Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa Oddział w Katowicach TNOiK
Katowice

Management and Quality – Zarządzanie i jakość

Czasopismo naukowe

Katowice, 2026

ISSN 2658-2104

Management and Quality – Zarządzanie i jakość

Rada naukowa:

prof. dr hab inż. Radosław Wolniak
prof. dr hab. Oleksandr Amosha, Ukraina
prof. dr hab. Agnieszka Izabela Baruk, Polska
prof. Lucia Bednarova, Słowacja
prof. dr hab. inż. Józef Bendkowski, Polska
prof. dr hab. inż. Jan Brzóska, Polska
dr inż. Sandra Grabowska, Polska
dr Eve Michalene Grebski, USA
prof. dr inż. Wieslaw Grebski, USA
prof. Michael Höck, Niemcy
dr hab. inż. prof. PO Katarzyna Hys, Polska
prof. dr hab. Izabela Jonek- Kowalska, Polska
dr hab. prof. PŚ Agnieszka Kowalska-Styczeń, Polska
dr hab. inż. prof. PŚ Lilla Knop
dr hab. prof. UEK Paweł Kosiń, Polska
prof. dr hab. Dmytro Lazarenko, Ukraina
prof. dr hab. Viacheslav Liashenko, Ukraina
prof. Oksana Marinina, Rosja
dr hab. inż. prof. PŚ Aneta Michalak, Polska
dr hab. inż. prof. PŚ Anna Michna, Polska
dr inż. Marcin Olkiewicz, Polska
dr hab. inż. prof. PŚ Sławomir Olko, Polska
prof. dr hab. inż. Andrzej Pacana, Politechnika Rzeszowska, Polska
prof. dr hab. Jan Pyka, Polska
prof. dr hab. Mykola Rogoza, Ukraina
dr hab. inż. prof. PŚ Marek Roszak, Polska
prof. dr hab inż. Seweryn Spałek, Polska
prof. dr hab. Oleksii Lyulyov, Ukraina
dr hab. inż. Henryk Dźwigoł, prof. PŚ.
dr hab. Bogusław Bembenek, prof. PRz
dr hab. inż. Bożena Gajdzik, prof. PŚ.
dr hab. inż. Łukasz Wróblewski, prof. AWSB
dr hab. inż. prof. PŚ Katarzyna Sienkiewicz-Małyjurek, Polska
Dr hab. Robert Wolny, prof. UE, Polsk
dr hab. Magdalena Jaciow, prof. UE, Polska
PhD Roman Danel, Czechia
dr hab. Piotr Walentynowicz, prof. UG

Redakcja:

prof. dr hab. inż. Radosław Wolniak– Redaktor Naczelny
mgr Marta Penkala – sekretarz redakcji
mgr inż. Damian Skórnóg – sekretarz techniczny

© Copyright by Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa Oddział w Katowicach TNOiK Katowice, 2026 Wydawca: Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa Oddział w Katowicach

Spis treści

1. Magdalena WOJNAROWSKA - GOSPODARKA O OBIEGU ZAMKNIĘTYM Z PERSPEKTYWY KONSUMENTÓW: WYNIKI BADAŃ FOKUSOWYCH 5
2. Eugenia CZERNYSZEWICZ - WYMIARY KULTURY BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOŚCI W ŚWIETLE PRAWA UNIJNEGO I PRYWATNEGO 19
3. Salvatore INGENITO, Agata MATARAZZO – A TAXONOMY OF CIRCULAR ECONOMY GOOD PRACTICES: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND BIBLIOMETRIC ANALYSIS 33
4. Anna WENCEK, Agnieszka MISZTAL - EXAMPLE OF USING QUALITY COST INDICATOR FOR OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION PROCESS 64
5. Marta TUTKO, Małgorzata BUDZANOWSKA-DRZEWIECKA - REZULTATY KULTURY JAKOŚCI W UCZELNIACH: PRZEGLĄD BADAŃ ORAZ OCENA PODSTAW WNIOSKOWANIA PRZYCZYNOWEGO 94
6. Przemysław MIREK, Jacek CZERNIAK - ZASTOSOWANIE SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W OCENIE MĘTNOŚCI CIECZY 110
7. Patryk JAROSZEWSKI, Magdalena MURADIN - PRAKTYKI CYRKULARNE A ZRÓWNOWAŻONA JAKOŚĆ USŁUG W HOTELARSTWIE – BADANIE EKSPLORACYJNE 133
8. Carla SERRANO, Agata MATARAZZO, Magdalena WOJNAROWSKA, Patrizia MOSOCHETTI - QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0: EVIDENCE FROM SEMICONDUCTORS 152
9. Adrian FABIAŃSKI, Elżbieta TENGLER, Kacper KOŚCIUK, Maciej KAPUŚCIŃSKI, Karolina ŁĄTKA, Bożena SZCZUCKA-LASOTA - BEZPIECZEŃSTWO W TRANSPORCIE DROGOWYM (SAFETY IN ROAD TRANSPORT) 169
10. Julia BILICKA - SZTUCZNA INTELIGENCJA W ZARZĄDZANIU JAKOŚCIĄ: ZASTOSOWANIA, KORZYŚCI, BARIERY I KIERUNKI BADAŃ 179
11. Amelia SIEMIŃSKA, Angelika CHMURZYŃSKA, Andrzej KOCOT, Artur SZYMAŃSKI, Dominik JAROSZ, Jakub WALTER, Marek OŻAROWSKI, Bożena SZCZUCKA-LASOTA - WPROWADZENIE DO TRANSPORTU DROGOWEGO I SYSTEMU TRANSPORTOWEGO 191
12. Anna KOSMALA, Bartosz KUBETK, Mikołaj MUSIOŁ, Nina PIOTROWSKA, Karolina ŁĄTKA, Bożena SZCZUCKA-LASOTA – PLANOWANIE I ORGANIZACJA PRZEWOZÓW 205
13. Aneta ALEKSANDER, Małgorzata KOSZEMBAR-WIKLIK, Marek Krannich - UNIWERSYTET PRZEDSIĘBIORCZY JAKO ŚRODOWISKO KSZTAŁTOWANIA KOMPETENCJI PRZYSZŁOŚCI 212
14. Tomasz KLIŚ - EFEKTYWNOŚĆ NARZĘDZI MARKETINGU INTERNETOWEGO W KOMUNIKACJI FIRM HIGH-TECH – JAKOŚCIOWA ANALIZA PORÓWNAWCZA MODELI B2C I B2B NA PRZYKŁADZIE CD PROJEKT RED I LIVECHAT 226
15. Marzena KRAMARZ, Martyna KRAMARZ - ODPORNOŚĆ KANAŁÓW DYSTRYBUCJI WYROBÓW MEDYCZNYCH – W KIERUNKU OMNIKANAŁÓW 249
16. Leszek BOROWIEC, Marek WOLNY - KLASYFIKACJA AKTYWÓW TRWAŁYCH W SPRAWOZDAWCZOŚCI KLUBÓW SPORTOWYCH ZGODNIE Z MSSF 270
17. Michał PROŚCIEWICZ, Wiktor KOŁODZIEJCZYK, Julia KRÓL, Daniel KOWALEWSKI, Tomasz OSUCH, Bożena SZCZUCKA-LASOTA - DIAGNOSTYKA INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW I SYSTEMÓW OPTYCZNYCH 292
18. Weronika JURECKA - DOSKONALENIE PROCESÓW OBSŁUGI NAZIEMNEJ W KONTEKŚCIE BEZPIECZEŃSTWA 307
19. Konrad KOBIERSKI - ATRAKCYJNOŚĆ I AKCEPTACJA SYMULACJI BIZNESOWYCH JAKO WARTOŚCIOWEGO NARZĘDZIA SZKOLENIOWEGO PRZEZ POKOLENIE CYFROWE 324
20. Mateusz RZEPIELA - AUTOMATYZACJA I SZTUCZNA INTELIGENCJA W RACHUNKOWOŚCI – PERSPEKTYWA PRACOWNIKÓW DZIAŁÓW FINANSOWO-KSIĘGOWYCH 343
21. Marcin TYL, Iwona ULENBERG, Maksymilian PRZERWA - FORMAL AND INFORMAL AUTHORITY OF THE MANAGER AS A PREDICTOR OF ORGANIZATIONAL EFFECTIVENESS 361
22. Kordian BANAŚ, Krzysztof KNOP - WDROŻENIE I REALIZACJA SYSTEMU SUGESTII PRACOWNICZYCH W PRZEDSIĘBIORSTWIE Z BRANŻY OBUWNICZEJ 392
23. Konrad KOBIERSKI - BARIERY WIARYGODNOŚCI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH JAKO NARZĘDZIA SZKOLENIOWEGO - PERSPEKTYWA OSÓB BIEGŁYCH GAMINGOWO 412
24. Piotr PYRGIES - CZYNNIK LUDZKI VERSUS TECHNOLOGIA W INTEGRACJI BUDŻETOWANIA I CONTROLLINGU OPERACYJNEGO – ANALIZA EMPIRYCZNA 433
25. Konrad KOBIERSKI - MECHANIKI GRYWALIZACJI W KORPORACYJNYCH SYMULACJACH SZKOLENIOWYCH A POTRZEBY GAMINGOWO ZAAWANSOWANEGO POKOLENIA CYFROWEGO 449
26. Eryk BOJUR, Wojciech DEMCZUK, Gabriela KRUPA, Mykhailo BRODII, Stanisław MAREK, Jacek PROWOLIK, Patrycja LASOTA, Tomasz WĘGRZYN - NATURE AS PERFECT ENGINEER. HOW BIOMIMETICS SHAPE FLIGHT AND SPACE EXPLORATION 467
27. Filip JĘDRZEJCZAK, Filip PODPINKA, Kacper URBAŃCZYK, Adrian WOŹNIK, Karolina ŁĄTKA, Bożena SZCZUCKA-LASOTA - CZAS PRACY KIEROWCÓW I TACHOGRAFY 484

28. Gabriela SUCHAŃSKA, Maksymilian WITKOWSKI, Maksymilian KOWALCZYK, Michał PAUKSZTO, Patryk JAROSZ, Wojciech MASIAREK, Bożena SZCZUCKA-LASOTA 499
29. Piotr IMAŃSKI, Liliana HAWRYSZ - MIĘDZY STABILIZACJĄ A ADAPTACJĄ: SATYSFAKCJA Z PRACY, ZAANGAŻOWANIE ORGANIZACYJNE I ZAANGAŻOWANIE W PRACĘ W WARUNKACH KRYZYSU W BRANŻY PALIWOWEJ 511
30. Iwona ULENBERG, Maksymilian PRZERWA - SOFT SKILLS AND THE EMERGENCE OF INFORMAL LEADERS IN ORGANIZATIONAL TEAMS: AN INTEGRATIVE THEORETICAL REVIEW 531
31. Justyna PIETRASZKO - INTERAKCJA CZŁOWIEK – MASZYNA W SYSTEMACH AOI: WPŁYW DECYZJI OPERATORA NA DETEKCJĘ DEFEKTÓW PCBA 551
32. Arkadiusz DREWNICKI, Dawid JANIEC, Jan KAFEL, Maja KONIECZKO, Bartosz PONISZOWSKI, Maciej SOCHACKI, Oskar WOJSYK, Daniel ZYGMUNT, Bożena SZCZUCKA-LASOTA, Tomasz WĘGRZYN - WYKORZYSTANIE ALTERNATYWNYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH W POJAZACH CIĘŻAROWYCH 570
33. Marcin MAZURKIEWICZ, Joanna STEFANEK, Alverto ABREGU PEKŁA, Dawid ZDEBIK, Hubert STAROŚCIAK, Mateusz KOCLĘGA, Michał DĄBROWSKI, Aleksander JACKIEWICZ, Maja KONIECZKO, Bożena SZCZUCKA-LASOTA, Tomasz WĘGRZYN - NORMY EMISJI SPALIN – EURO 7 583
34. Szymon SKOLIK, Łukasz GIBAS, Oskar MICHALSKI, Marcin MRUKWA, Jakub TRZEBUNIAK, Bożena SZCZUCKA-LASOTA, Marek OŻAROWSKI - ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ EKOLOGICZNY W TRANSPORCIE 596
35. Dominika KACZMARZYK - NIEEFEKTYWNE ZARZĄDZANIE CZASEM PRZEZ STUDENTÓW JAKO WYZWANIE WSPÓŁCZESNEJ EDUKACJI AKADEMICKIEJ 603
36. Konrad KOBIERSKI - POTENCJAŁ AI W NIWELOWANIU BARIER WIARYGODNOŚCI SYMULACJI BIZNESOWYCH - PERSPEKTYWA CYFROWEGO POKOLENIA 617
37. Julia MRUKWA, Kuba DUTKIEWICZ, Maciej PILARZ, Marcel SKURCZYŃSKI, Tomasz ROGOWSKI, Zofia MARCZAK, Zuzanna MUSIOŁ, Patrycja LASOTA, Tomasz WĘGRZYN - EKO INNOWACJE – NOWOCZESNE PODEJŚCIE DO WPŁYWU LOTNICTWA NA ŚRODOWISKO 635
38. Wiktoria STOCHEL, Daniel PĄPKA, Jakub OCIEPA, Martyna BUCZMA, Martyna ŚLIWA, MATEUSZ ZIOMEK, Maxymilian MIDOR, Miłosz MALCHER, Nikodem ARBAS, Tomek SYREK, Magdalena TRACZ-KACZMARZYK, Dawid WIDERA, Mateusz RACHWAŁ, Patrycja LASOTA, Tomasz WĘGRZYN - SPEDYCJA JAKO ELEMENT ORGANIZACJI MIĘDZYNARODOWEGO TRANSPORTU TOWARÓW 661
39. Jakub JANIK, Michał STEC, Maja MIKULSKA, Piotr SKIBIŃSKI, Krzysztof BAJDA, Eryk FRANKIEWICZ, Jan SŁOMKA, Kacper BANASIAK, Kacper RUDZKI, Mikołaj ZALEWSKI, Mikołaj STAROŃ, Patrycja LASOTA, Tomasz WĘGRZYN - SYSTEMY ITS W ZARZĄDZANIU RUCHEM MIEJSKIM 684
40. Karol GROBNER, Kacper KUŚNIERCZYK, Grzegorz ŚWIĄDER, Marcin KUNICKI, Patryk TOMASZCZYK, Szymon KOZIOŁ, Bożena SZCZUCKA-LASOTA, Łukasz WSZKOŁEK – NOWOCZESNY TABOR SAMOCHODOWY 713
41. Karolina ROŻEJ, Sebastian KAMIŃSKI, Bartek WŁODEK, Kamil DUBIEL, Bartosz MASŁOWSKI, Jakub MIKA, Filip BUDNY, Tomasz CIOŁYŚ, Michał PŁONKA, Nicolas BREWCZYK, Patrycja LASOTA, Tomasz WĘGRZYn – SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA KOLEI W POLSCE 743
42. Grzegorz GLISZCZYŃSKI, Klaudia LALAK - METODYKA DIAGNOZY INNOWACYJNOŚCI SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA PRZEDSIĘBIORSTWAMI 773
43. Tadeusz SZELIGA, Patryk ŁĄTKA, Jakub ROCZEK, Wojciech FARON, Adrian MORAWSKI, Dawid SUCHOŃ, Konrad ŁAZARSKI, Dorian BOBER, Tomasz CHYBIORZ, Mikoaj PIEKARZ, Mateusz KACZOROWSKI, Patrycja LASOTA, Tomasz WĘGRZYN – NOWOCZESNE TECHNOLOGIE W POJAZDACH O NAPĘDZIE ELEKTRYCZNYM 798
44. Marek KRANNICH, Małgorzata KOSZEMBAR – WIKLIK, Aneta ALEKSANDER - ROZWÓJ KOMPETENCJI PRZYSZŁOŚCI W DOBIE ZIELONEJ I CYFROWEJ TRANSFORMACJI 811
45. Maksymilian PRZERWA, Iwona ULENBERG, Marcin TYL - ŚRODOWISKO PRACY JAKO REGULATOR ZASPOKOJENIA POTRZEB PSYCHOLOGICZNYCH: TEORIA AUTODETERMINACJI JAKO MODEL PROJEKTOWANIA ORGANIZACJI WSPIERAJĄCYCH EFEKTYWNOŚĆ 827
46. Christ Lekuma LEBY - USING TAKT TIME, CYCLE TIME, PROCESS TIME AND LTAI FOR CONTINUOUS IMPROVEMENT OF PRODUCTION PROCESSES 844
47. Aleksandra BAJERSKA - ZARZĄDZANIE JAKOŚCIĄ W ORGANIZACJACH POZORNIE EFEKTYWNYCH: MODEL DECYZYJNY OPARTY NA SYMULACJI ILUZJI KPI 862

GOSPODARKA O OBIEGU ZAMKNIĘTYM Z PERSPEKTYWY KONSUMENTÓW: WYNIKI BADAŃ FOKUSOWYCH

Magdalena WOJNAROWSKA[1*]

[1*] Katedra Technologii i Ekologii Wyrobów, Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Kraków;
wojnarom@uek.krakow.pl; https://orcid.org/0000-0001-7068-1698

Streszczenie: Artykuł prezentuje analizę postrzegania gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) przez konsumentów oraz czynników kształtujących ich praktyki cyrkularne. W artykule wykorzystano wyniki zogniskowanego wywiadu grupowego (FGI), który ujawnił, że uczestnicy interpretują pojęcia związane z gospodarką o obiegu zamkniętym (GOZ) w sposób kontekstualny i wielowymiarowy. „Impuls zakupowy" i „nadkonsumpcja" nie są traktowane jako jednorodne kategorie, lecz zależą od źródeł bodźców i sposobu wykorzystania produktów. Konsumenci aktywnie rekonstruują definicje GOZ i postrzegają siebie jako integralnych aktorów systemu współzależnych interesariuszy, w tym regulatorów i norm społecznych. Bariery w realizacji działań cyrkularnych obejmują ograniczenia ekonomiczne, czasowe i praktyczne, natomiast ułatwienia to dostępność infrastruktury, wsparcie społeczne i oferta produktów cyrkularnych. Wyniki podkreślają znaczenie operacyjnego języka komunikacji, integracji mechanizmów formalnych i oddolnych oraz uwzględniania aspektów praktycznych w projektowaniu produktów, aby zwiększyć rzeczywistą adaptację zachowań cyrkularnych.

Slowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym; zachowania konsumenckie; praktyki cyrkularne; badania jakościowe; grupy fokusowe

THE CIRCULAR ECONOMY FROM CONSUMERS' PERSPECTIVE: EVIDENCE FROM FOCUS GROUP RESEARCH

Abstract: This article examines consumers' perceptions of the circular economy (CE) and the factors shaping their circular practices. The study employed focus group discussions, which revealed that participants interpret CE-related concepts in a contextual and multidimensional manner. "Purchase impulse" and "overconsumption" are not perceived as homogeneous categories; rather, their meanings depend on the sources of stimuli and the ways in which products are used. Consumers actively reconstruct the definitions of the circular economy and perceive themselves as integral actors within a system of interdependent stakeholders, including regulators and social norms. Barriers to the implementation of circular actions include economic, temporal, and practical constraints, whereas facilitating factors comprise the availability of infrastructure, social support, and access to circular products and services. The findings underscore the importance of operational communication language, the integration of

formal and grassroots mechanisms, and the consideration of practical aspects in product and service design in order to enhance the actual adoption of circular behaviours.

Keywords: circular economy; consumer behaviour; circular practices; qualitative research; focus groups

Wprowadzanie

W literaturze dotyczącej gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ, z ang. circular economy; CE) coraz częściej podkreśla się znaczenie roli konsumentów w realizacji idei cyrkularności, choć ich wpływ pozostaje wciąż słabo poznany (Schöggl et al., 2020; Kirchherr et al., 2017, Ozden, 2026). Pomimo rosnącego znaczenia GOZ jako alternatywy dla liniowego modelu „weź–wytwórz–wyrzuć" oraz jej promowania ze względu na korzyści środowiskowe, ekonomiczne i społeczne, zachowania konsumenckie w tym kontekście pozostają marginalnie badane (Arora et al., 2023, Geissdoerfer et al., 2017).

Systematyczne przeglądy literatury wskazują (Camacho-Otero et al., 2018; Vidal-Ayuso et al., 2023; Blackburn, 2026), że dotychczasowe badania nad gospodarką o obiegu zamkniętym koncentrują się przede wszystkim na deklarowanych postawach konsumentów, ich intencjach zakupowych oraz poziomie wiedzy, natomiast znacznie mniej uwagi poświęca się rzeczywistym praktykom konsumpcyjnym, takim jak użytkowanie, ponowne wykorzystanie, naprawa czy recykling produktów (Hobson & Lynch, 2016). Zrozumienie tych zachowań wymaga uwzględnienia zarówno motywacji wewnętrznych, takich jak troska o środowisko czy wartości osobiste, jak i czynników zewnętrznych, w tym dostępności produktów cyrkularnych i infrastruktury recyklingowej, które kształtują realne decyzje konsumenckie w codziennym życiu (Kirchherr et al., 2018; Geissdoerfer et al., 2017; Gidaković et al. 2024).

Badania jakościowe podkreślają dodatkowo znaczenie sposobu, w jaki konsumenci interpretują i negocjują pojęcia związane z GOZ (Sijtsema et al., 2020). Niski poziom świadomości i niejednoznaczne rozumienie terminów cyrkularnych stanowią istotną barierę dla adaptacji praktyk cyrkularnych. Konsumenci często kojarzą GOZ ze zrównoważonym rozwojem lub recyklingiem, ale rzadko potrafią powiązać te pojęcia z własnymi codziennymi decyzjami zakupowymi i praktykami użytkowymi (Sijtsema et al., 2020; Vidal Ayuso et al., 2023). W tym kontekście wykorzystanie metod jakościowych, takich jak wywiady pogłębione czy dyskusje grupowe, pozwala uchwycić proces negocjowania znaczeń, kontekstualizację pojęć oraz wielowymiarowość motywacji i barier w codziennych praktykach konsumenckich.

Na podstawie analizy dostępnej literatury można zidentyfikować trzy główne luki badawcze. Po pierwsze, nadal niewystarczająco poznane pozostaje to, w jaki sposób konsumenci rozumieją i negocjują znaczenia pojęć związanych z gospodarką o obiegu zamkniętym (GOZ) w kontekście codziennych praktyk. Po drugie, ograniczona jest wiedza na

temat wpływu uwarunkowań sytuacyjnych na podejmowanie decyzji cyrkularnych, które nie wynikają wyłącznie z deklarowanych postaw i intencji. Po trzecie, brakuje pogłębionego zrozumienia procesów interpretacyjnych, które kształtują postrzeganie przez konsumentów określonych zachowań jako zgodnych z zasadami GOZ.

W odpowiedzi na te luki celem niniejszego artykułu jest analiza percepcji i interpretacji gospodarki o obiegu zamkniętym przez konsumentów oraz identyfikacja czynników warunkujących ich praktyki cyrkularne, ze szczególnym uwzględnieniem kontekstu codziennych doświadczeń i procesów negocjowania znaczeń. Aby osiągnąć ten cel, sformułowano następujące pytania badawcze:

1. Jak konsumenci definiują i interpretują pojęcia związane z gospodarką o obiegu zamkniętym, takie jak „impuls zakupowy" czy „nadkonsumpcja"?
2. Jakie czynniki sytuacyjne, społeczne i praktyczne wpływają na decyzje konsumenckie w zakresie działań cyrkularnych?
3. W jaki sposób konsumenci negocjują znaczenia i praktyki GOZ w codziennym życiu, uwzględniając bariery i możliwości wynikające z własnych doświadczeń?
4. Jakie bariery i ułatwienia dostrzegają konsumenci w realizacji zasad gospodarki o obiegu zamkniętym?

Odpowiedzi na te pytania pozwolą nie tylko wypełnić lukę badawczą w zakresie jakościowej analizy zachowań konsumentów w kontekście GOZ, lecz również dostarczą praktycznych rekomendacji dotyczących projektowania produktów, usług i strategii komunikacyjnych sprzyjających upowszechnianiu oraz trwałej adaptacji praktyk cyrkularnych wśród konsumentów.

Metodologia

Badania przeprowadzono w grudniu 2023 w formie zogniskowanego wywiadu grupowego (FGI) z udziałem pięciu uczestników oraz moderatora. Wywiad został przeprowadzony na podstawie wcześniej przygotowanego scenariusza, zarejestrowany w formie audio, a następnie poddany transkrypcji verbatim (Morgan, 1997; Wilkinson, 2008).

Celem badania było pogłębienie wiedzy na temat mechanizmów decyzyjnych konsumentów oraz identyfikacja procesów poznawczych i społecznych kształtujących ich postawy i zachowania związane z gospodarką o obiegu zamkniętym (GOZ). Analizę danych przeprowadzono zgodnie z procedurą analizy tematycznej, obejmującą identyfikację, kodowanie oraz grupowanie powtarzających się wzorców i tematów obecnych w wypowiedziach uczestników.

Szczególną uwagę poświęcono interakcyjnemu charakterowi dyskusji, analizując sposób, w jaki uczestnicy negocjowali znaczenia, odnosili się do wypowiedzi innych osób oraz

wspólnie konstruowali interpretacje dotyczące gospodarki o obiegu zamkniętym. Zgromadzony materiał empiryczny ujawnił wysoki poziom refleksyjności uczestników, którzy nie tylko opisywali własne zachowania i doświadczenia, lecz także poddawali krytycznej analizie przyjmowane założenia, normy i przekonania związane z konsumpcją oraz GOZ. W rezultacie dyskusja często przybierała charakter metarefleksyjny, wykraczając poza prostą charakterystykę praktyk konsumenckich i dostarczając wglądu w procesy interpretacyjne leżące u ich podstaw.

Wyniki badań

Analiza transkrypcji dyskusji grupowych ujawniła, że jednym z pierwotnie zidentyfikowanych problemów metodologicznych była trudność w jednoznacznym operacjonalizowaniu podstawowych kategorii analitycznych odnoszących się do zachowań konsumenckich oraz zasad GOZ. Trudność ta ujawniła się już na etapie pytania wprowadzającego i ma istotne implikacje dla projektowania badań ilościowych w tym obszarze. Pojęcie „impulsu zakupowego", które w badaniach ilościowych jest zazwyczaj traktowane jako stosunkowo jednorodna i jednoznacznie definiowana zmienna, w warunkach dyskusji grupowej ujawniło swoją złożoność interpretacyjną. Uczestnicy przypisywali mu różne znaczenia, odwołując się do odmiennych doświadczeń i kontekstów sytuacyjnych, co wskazuje na konieczność jego semantycznego doprecyzowania i kontekstualizacji. Uczestnicy spontanicznie podjęli próbę dekonstrukcji tego pojęcia, wskazując na jego niejednoznaczność oraz zróżnicowane zakresy znaczeniowe i konteksty użycia. W toku dyskusji wyraźnie ujawniły się odmienne sposoby jego interpretacji, co zostało explicite wyrażone w jednej z wypowiedzi: „jeśli tak szeroko zrozumiemy impuls, to wszyscy podlegamy impulsom… jestem głodna i widzę bułkę, to kupuję, ale to moim zdaniem nie jest impuls".

Wypowiedź ta nie tylko wprowadza analityczne rozróżnienie między impulsem zakupowym a zaspokojeniem potrzeby fizjologicznej, lecz również świadczy o refleksyjnym i metakognitywnym charakterze wypowiedzi uczestników, którzy dążą do precyzyjnego odróżnienia zachowań automatycznych od tych będących efektem ekspozycji na bodźce marketingowe lub przypadkowe bodźce sytuacyjne.

W toku dalszej interakcji pojęcie impulsu zostało dodatkowo zniuansowane poprzez identyfikację zróżnicowanych źródeł sprawczych, od bodźców interoceptywnych („jestem głodna"), przez czynniki sytuacyjno-organizacyjne (brak listy zakupów), aż po stymulację marketingową („kupuję oczami"). Tym samym uczestnicy nie tylko negocjowali definicję operacyjną badanego pojęcia, lecz równocześnie rekonstruowali wielowymiarowy, implicytny model zachowań konsumenckich, w którym impuls nie stanowi kategorii jednorodnej, lecz jest zmienną zależną od kontekstu i subiektywnej interpretacji aktora.

Analogiczny proces negocjowania znaczeń zaobserwowano w odniesieniu do pojęcia nadkonsumpcji. Uczestnicy odrzucali jego intuicyjne rozumienie jako zakupu przekraczającego zaplanowaną ilość, przesuwając centrum definicyjne w kierunku konsekwencji behawioralnych. W jednej z wypowiedzi sformułowano tę perspektywę następująco:
„kupienie dwóch kilo nadprogramowego ryżu nie jest nadkonsumpcją, pod warunkiem, że to się nie zmarnuje".

W ten sposób nadmiar konsumpcji został zdefiniowany nie jako immanentna właściwość aktu zakupu, lecz jako wypadkowa relacji między ilością nabytych dóbr a stopniem ich faktycznego wykorzystania. Dyskusja prowadziła do konkluzji, że kluczowymi zmiennymi moderującymi ocenę danego zachowania są: trwałość produktu, możliwości jego przechowywania oraz kompetencje konsumenta w zakresie zarządzania zasobami w czasie.

Dyskusja dotycząca samej koncepcji GOZ uwydatniła z kolei znaczenie sposobu komunikowania tej idei, eksponując trwałe napięcie między językiem eksperckim a percepcją konsumencką. Uczestnicy jednoznacznie artykułowali trudności w dekodowaniu definicji o wysokim stopniu abstrakcji, poddając krytyce ich język jako hermetyczny i pozbawiony referencji do praktyk codziennych. W toku rozmowy podkreślano, że „trzecia definicja jest przyswajalna dla przeciętnego człowieka", podczas gdy poprzednie „są straszne" pod względem dostępności językowej. Krytyka ta nie ograniczała się do wymiaru stylistycznego - obejmowała ona fundamentalny brak zakorzenienia definicji w konkretnych działaniach, które uczestnicy mogliby odnieść do własnego doświadczenia.

W konsekwencji uczestnicy spontanicznie preferowali definicję operacyjną, umożliwiającą osadzenie GOZ w sferze praktyk życia codziennego, takich jak naprawa, ponowne użycie czy minimalizacja odpadów. Co istotne, w toku dyskusji uczestnicy samodzielnie reinterpretowali elementy normatywnych definicji gospodarki o obiegu zamkniętym. Wskazywali między innymi, że nadmierne eksponowanie recyklingu w komunikacji edukacyjnej może przynosić efekt odwrotny do zamierzonego, ponieważ w hierarchii strategii cyrkularnych recykling powinien być traktowany jako rozwiązanie stosowane dopiero po wykorzystaniu bardziej pożądanych działań, takich jak ograniczanie konsumpcji, ponowne użycie czy naprawa produktów. Obserwacja ta świadczy o relatywnie zaawansowanym poziomie intuicyjnego rozumienia zasad cyrkularności przez uczestników, niezależnie od trudności z przyswajaniem języka eksperckiego.

W dalszej części dyskusji uczestnicy spontanicznie konstruowali model gospodarki o obiegu zamkniętym jako system współzależnych aktorów i podmiotów społeczno-gospodarczych. Ich wypowiedzi wskazują, że nie postrzegają konsumentów jako biernych odbiorców rozwiązań cyrkularnych ani końcowego ogniwa procesu obiegu zasobów, lecz jako aktywnych współtwórców tego systemu, współodpowiedzialnych za jego funkcjonowanie i efektywność. Jak zaznaczono expressis verbis:
„bez konsumenta (…) mamy tylko pół sukcesu".

Jednocześnie model ten był rozwijany poprzez systematyczne włączanie dodatkowych kategorii aktorów, w szczególności regulatora, identyfikowanego zarówno z instytucjami państwowymi, jak i z szerszymi mechanizmami koordynacji zbiorowej.

W toku dyskusji rola regulatora podlegała progresywnej reinterpretacji i rozszerzeniu zakresu definicyjnego. Uczestnicy wskazywali, że efektywna regulacja nie musi przyjmować wyłącznie formy formalno-prawnej, lecz może się materializować poprzez normy społeczne, praktyki środowiskowe oraz inicjatywy oddolne. W ten sposób GOZ został ujęty jako system wielopoziomowy i policentryczny, w którym formalne instytucje współistnieją i wzajemnie się wzmacniają z nieformalnymi mechanizmami regulacji społecznej.

Szczególnie wyraźnym i powracającym motywem w zebranym materiale empirycznym była rola kontekstu sytuacyjnego jako determinanty zachowań cyrkularnych. Uczestnicy wielokrotnie podkreślali, że nawet wysoki poziom świadomości ekologicznej nie przekłada się automatycznie na działania, jeśli ich podjęcie wiąże się z dodatkowymi kosztami transakcyjnymi, czasowymi, fizycznymi lub poznawczymi. W odniesieniu do praktyk takich jak oddawanie odzieży wskazywano, że „ta bliskość jest absolutnym ułatwieniem", co potwierdza fundamentalne znaczenie dostępności i konfiguracji infrastruktury cyrkularnej jako zmiennej moderującej intencje behawioralne.

Równolegle podkreślano, że deficyt takiej infrastruktury prowadzi do odraczania działań lub ich trwałego zaniechania. Wypowiedzi dotyczące barier logistycznych, trudności w transporcie przedmiotów czy konieczności ich wcześniejszego przygotowania. dowodzą, że decyzje cyrkularne są głęboko osadzone w strukturze codziennych praktyk i ograniczeń zasobowych. Zachowania cyrkularne mają zatem charakter warunkowy i kontekstualnie zmienny, nie zaś bezwarunkowy przejaw zinternalizowanej postawy proekologicznej.

Analiza zebranego materiału ujawniła ponadto istnienie rozbudowanych, oddolnych praktyk cyrkularnych funkcjonujących równolegle wobec formalnych systemów zbiórki i redystrybucji zasobów. Jednym z przykładów był opis nieformalnego obiegu odzieży dziecięcej, który uczestnicy przedstawiali jako praktykę powszechną, społecznie usankcjonowaną i zakorzenioną w relacyjnych sieciach zaufania. Praktyka ta była charakteryzowana jako „bezbolesna" właśnie dlatego, że opiera się na kapitale społecznym i nie wymaga angażowania dodatkowych zasobów organizacyjnych ani instytucjonalnych. Jednocześnie wskazywano na jej immanentne ograniczenia strukturalne, konieczność czasowego magazynowania oraz brak standaryzacji procesów wymiany, co pokazuje, że systemy oddolne, choć efektywne, nie są pozbawione barier skalowania. Ich analityczna doniosłość polega jednak na tym, że stanowią one funkcjonalne uzupełnienie formalnych systemów GOZ, redukując presję na ich przepustowość.

Istotnym wątkiem analitycznym było również napięcie między motywacjami ekonomicznymi a ekologicznymi jako rzeczywistymi predykatorami zachowań cyrkularnych. W licznych wypowiedziach respondenci wskazywali, że ich działania są przede wszystkim rezultatem kalkulacji ekonomicznej lub strukturalnych ograniczeń zasobowych, a nie

świadomego dążenia do realizacji normatywnych zasad GOZ. Przykładem odzwierciedlającym ten sposób rozumowania jest następująca wypowiedź:
„nie wiem, czy gdzieś w tyle głowy jest ten mechanizm, czy po prostu brak miejsca i pieniędzy".

Wypowiedź ta precyzyjnie ilustruje zjawisko ambiwalencji motywacyjnej oraz metodologiczną trudność w jednoznacznym przypisaniu zaobserwowanych działań do określonych kategorii analitycznych. Świadomość ekologiczna jawi się w tym świetle nie jako pierwotna determinanta zachowania, lecz jako wtórny mechanizm racjonalizacji decyzji podejmowanych z powodów pragmatycznych lub ekonomicznych. Obserwacja ta ma istotne implikacje dla projektowania interwencji publicznych i strategii komunikacyjnych, sugeruje bowiem, że instrumenty odwołujące się do motywacji ekologicznych mogą być mniej efektywne niż te, które redukują koszty transakcyjne działań cyrkularnych lub wzmacniają ich atrakcyjność ekonomiczną.

Wreszcie, uczestnicy wielokrotnie wskazywali na fundamentalną niejednoznaczność oceny konkretnych praktyk konsumenckich z perspektywy zgodności z zasadami GOZ. Dyskusja dotycząca pakowanej żywności ujawniła wyraźne napięcie między kryterium środowiskowym a funkcjonalno-prewencyjnym. Z jednej strony uczestnicy zwracali uwagę na problem zwiększonej ilości odpadów opakowaniowych generowanych przez tego typu rozwiązania, z drugiej jednak podkreślali, że porcjowane zestawy mogą skutecznie ograniczać marnowanie żywności, szczególnie wśród konsumentów dysponujących ograniczonymi kompetencjami w zakresie planowania zakupów i przygotowywania posiłków. Tego typu wypowiedzi dowodzą, że ocena zachowań konsumenckich w kategoriach zgodności z GOZ jest inherentnie wielokryterialna i zależna od przyjętej perspektywy analitycznej. Praktyki konsumenckie nie poddają się zatem prostym klasyfikacjom dychotomicznym, a ich adekwatna interpretacja wymaga uwzględnienia kontekstu działania, intencji aktora oraz wielopoziomowych efektów podejmowanych decyzji.

Dyskusja

Analiza dyskusji grupowych wykazała, że konsumenci konstruują pojęcia związane z gospodarką o obiegu zamkniętym (GOZ) w sposób wielowymiarowy i wysoce kontekstualny, co koresponduje z wcześniejszymi ustaleniami wskazującymi na ograniczoną klarowność terminologiczną i niski poziom świadomości konsumentów w tym zakresie (Sijtsema et al., 2020; Vidal Ayuso et al., 2023). Pojęcie „impulsu zakupowego", które w badaniach ilościowych bywa traktowane jako operacyjnie jednorodna zmienna, okazało się w warunkach dyskursu grupowego kategorią wymagającą negocjacji semantycznej i kontekstualizacji. Uczestnicy różnicowali impulsy wynikające z potrzeb fizjologicznych, czynników

sytuacyjnych oraz bodźców marketingowych, co wskazuje na konieczność uwzględnienia kontekstu i struktury sprawczej zachowań w badaniach nad cyrkularnymi decyzjami konsumenckimi. Takie wielowymiarowe ujęcie jest spójne z ustaleniami Kirchherra i współautorów (2018), którzy podkreślają złożone uwarunkowania decyzji konsumentów w kontekście GOZ, zarówno motywacyjne, jak i sytuacyjno-strukturalne.

Analogiczne wnioski wyłaniają się z analizy dyskursu dotyczącego nadkonsumpcji. Respondenci redefiniowali nadmiar nie jako immanentną właściwość aktu zakupu, lecz jako jego konsekwencje w relacji do faktycznego wykorzystania produktów. Zwracano uwagę na trwałość dóbr, możliwości ich przechowywania oraz zarządzanie zapasami jako kluczowe zmienne moderujące ocenę zachowań, co wskazuje, że ewaluacja działań cyrkularnych wymaga uwzględnienia praktycznych ograniczeń codzienności (Ozden, 2026; De Chiara et al., 2024). Równie istotne okazało się osadzenie indywidualnych decyzji w kontekście makrospołecznym: jednostkowe działania racjonalne mogą generować zbiorowo dysfunkcjonalne efekty emergentne, takie jak panika zakupowa czy zakłócenia podaży, co dowodzi złożoności sprzężeń między mikroracjonalnością a konsekwencjami agregatowymi.

Analiza dyskusji wskazuje, że jednym z istotnych wyzwań w komunikowaniu założeń gospodarki o obiegu zamkniętym jest hermetyczność języka eksperckiego oraz niewystarczająca operacjonalizacja definicji akademickich w sposób umożliwiający ich łatwe zrozumienie i praktyczne zastosowanie przez odbiorców niebędących specjalistami. Respondenci preferowali definicje osadzone w konkretnych, wykonalnych działaniach, takich jak naprawa, ponowne użycie czy minimalizacja odpadów. Uczestnicy podkreślali również, że recykling nie powinien być postrzegany jako podstawowe rozwiązanie problemów środowiskowych, lecz jako działanie podejmowane po wyczerpaniu bardziej pożądanych strategii cyrkularnych. Taka perspektywa świadczy o rozwiniętym rozumieniu logiki GOZ i jest spójna z hierarchicznym podejściem do cyrkularności prezentowanym w literaturze przedmiotu (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017).

Istotnym wynikiem jest systemowe postrzeganie GOZ przez uczestników jako struktury współzależnych aktorów, w której konsument pełni aktywną i centralną rolę, a jego decyzje są sprzężone z działaniami regulatora, producentów oraz mechanizmami koordynacji społecznej. Rozszerzenie pojęcia regulacji poza jej formalno-prawny wymiar - na normy społeczne, praktyki środowiskowe i inicjatywy oddolne, wskazuje na potrzebę podejścia systemowego i policentrycznego w analizie zachowań konsumenckich, co jest zgodne z postulatami De Chiara i współautorów (2024).

Kontekst sytuacyjny okazał się jednym z kluczowych czynników determinujących zachowania cyrkularne konsumentów. Wysoka świadomość ekologiczna nie gwarantuje podejmowania działań, jeśli są one obciążone znaczącymi kosztami transakcyjnymi, czasowymi, fizycznymi lub poznawczymi. Dostępność infrastruktury cyrkularnej okazała się zmienną o szczególnej sile moderującej: jej obecność radykalnie obniża próg behawioralny, natomiast jej brak prowadzi do odraczania lub trwałego zaniechania działań (Vidal Ayuso et

al., 2023; Ozden, 2026). Wynik ten ma bezpośrednie implikacje dla polityk publicznych, sugeruje, że inwestycje w infrastrukturę cyrkularną mogą być bardziej efektywne niż kampanie kształtujące postawy.

Badanie ujawniło również funkcjonowanie rozbudowanych, oddolnych systemów cyrkularnych, takich jak nieformalna wymiana odzieży dziecięcej w sieciach społecznych. Systemy te, efektywne, zakorzenione w relacjach zaufania i pozbawione kosztów instytucjonalnych napotykają jednak na immanentne bariery skalowania, takie jak konieczność magazynowania i brak standaryzacji. Znaczenie tych praktyk wykracza poza ich bezpośredni wymiar użytkowy, ponieważ pełnią one funkcję uzupełniającą wobec formalnych mechanizmów gospodarki o obiegu zamkniętym. Obserwacja ta pozostaje spójna z ustaleniami Geissdoerfera i współautorów (2017), wskazującymi na kluczową rolę inicjatyw społecznych i oddolnych w skutecznym wdrażaniu zasad cyrkularności.

W kontekście struktury motywacyjnej zidentyfikowano trwałą ambiwalencję między celami ekologicznymi a uwarunkowaniami ekonomiczno-pragmatycznymi. Respondenci konsekwentnie wskazywali, że ich działania cyrkularne są w większości efektem ograniczeń zasobowych lub kalkulacji utylitarnej, a świadomość ekologiczna pełni wtórną funkcję poznawczej racjonalizacji. Analogiczne ustalenia przedstawia Ozden (2026), podkreślając, że rzeczywiste zachowania cyrkularne często stanowią niezamierzony rezultat decyzji podejmowanych z przyczyn ekonomicznych. Wniosek ten ma fundamentalne znaczenie dla projektowania polityk publicznych i strategii komunikacyjnych, sugerując, że skuteczne wspieranie transformacji cyrkularnej nie musi opierać się wyłącznie na odwołaniach do wartości środowiskowych, lecz także na eksponowaniu korzyści ekonomicznych dostrzeganych przez konsumentów. Implikuje on w szczególności, że efektywniejsze może być obniżanie kosztów transakcyjnych i wzmacnianie ekonomicznych zachęt do zachowań cyrkularnych niż bezpośrednie odwoływanie się do wartości proekologicznych.

Wyniki badania wskazują również, że kwalifikowanie określonych zachowań konsumenckich jako zgodnych z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym nie jest jednoznaczne, lecz zależy od wielu kryteriów oceny oraz przyjętej perspektywy analitycznej. Przykład pakowanej żywności ilustruje napięcie między kryterium środowiskowym (redukcja odpadów opakowaniowych) a funkcjonalno-prewencyjnym (ograniczenie marnowania żywności), potwierdzając, że adekwatna interpretacja praktyk cyrkularnych wymaga uwzględnienia kontekstu, intencji oraz wielopoziomowych efektów działań (Vidal Ayuso et al., 2023; Sijtsema et al., 2020). Praktyki konsumenckie nie poddają się zatem uproszczonym klasyfikacjom dychotomicznym, co rodzi istotne wyzwania dla operacjonalizacji GOZ zarówno w badaniach empirycznych, jak i w praktyce regulacyjnej.

Wnioski

Przeprowadzone badanie wnosi istotny wkład empiryczny i teoretyczny w rozumienie konsumenckich reprezentacji poznawczych gospodarki o obiegu zamkniętym oraz uwarunkowań zachowań cyrkularnych. Wyniki uzyskane w drodze analizy dyskusji grupowej ujawniają, że konsumenci konstruują pojęcia związane z GOZ w sposób nieredukowalnie kontekstualny, wielowymiarowy i negocjowany społecznie, co rodzi fundamentalne implikacje zarówno dla teorii zachowań konsumenckich, jak i dla projektowania interwencji politycznych.

W odpowiedzi na pierwsze pytanie badawcze, dotyczące sposobów definiowania i interpretowania pojęć takich jak „impuls zakupowy" oraz „nadkonsumpcja" – wyniki wskazują, że kategorie te nie funkcjonują w poznaniu potocznym jako jednorodne konstrukty operacyjne. Impulsy zakupowe są różnicowane przez uczestników w zależności od struktury sprawczej leżącej u ich podłoża: bodźców interoceptywnych, czynników sytuacyjno-organizacyjnych oraz stymulacji marketingowej. Nadkonsumpcja z kolei jest oceniana nie jako immanentna właściwość aktu zakupu, lecz jako wypadkowa relacji między nabytą ilością dóbr a stopniem ich faktycznego wykorzystania, z uwzględnieniem trwałości produktu i możliwości zarządzania zapasami. Ustalenie to podważa zasadność traktowania obu pojęć jako jednorodnych zmiennych w badaniach ilościowych i wskazuje na konieczność ich pogłębionej operacjonalizacji uwzględniającej kontekstualność znaczeń.

W odniesieniu do drugiego pytania badawczego, obejmującego rolę czynników sytuacyjnych, społecznych i praktycznych w kształtowaniu zachowań cyrkularnych, wyniki potwierdzają, że dostępność infrastruktury cyrkularnej oraz osadzenie działań w strukturze codziennych praktyk stanowią zmienne o krytycznym znaczeniu moderującym. Wykazano, że wysoka świadomość ekologiczna nie jest warunkiem wystarczającym do inicjowania i podtrzymywania zachowań cyrkularnych, jeśli ich realizacja wiąże się ze znaczącymi kosztami transakcyjnymi, czasowymi, fizycznymi lub poznawczymi. Równolegle zaobserwowano, że oddolne systemy cyrkularne, takie jak sieci nieformalnej wymiany odzieży dziecięcej zakorzenione w relacyjnym kapitale społecznym, stanowią efektywne, choć strukturalnie ograniczone, uzupełnienie formalnych mechanizmów GOZ. Wyniki te uwydatniają potrzebę konceptualizacji zachowań cyrkularnych nie jako indywidualnych postaw, lecz jako praktyk społecznych uwarunkowanych infrastrukturalnie i relacyjnie.

W nawiązaniu do trzeciego pytania badawczego, poświęconego procesom negocjowania znaczeń oraz osadzeniu koncepcji GOZ w doświadczeniu codzienności, badanie wykazało, że konsumenci nie są biernymi odbiorcami dyskursu eksperckiego, lecz aktywnymi podmiotami reinterpretującymi jego treść w odniesieniu do własnych praktyk i zasobów poznawczych. Uczestnicy samodzielnie rekonstruowali hierarchię strategii cyrkularnych, korygowali

definicje normatywne i pozycjonowali siebie jako integralny element wieloaktorowego systemu cyrkularnego, w którym działania konsumentów pozostają w sprzężeniu z regulacją formalną, normami społecznymi oraz inicjatywami oddolnymi. Proces ten ma charakter wyraźnie refleksyjny i metakognitywny, co sugeruje, że potencjał adaptacyjny konsumentów w zakresie GOZ jest znacznie wyższy, niż wynikałoby to z badań bazujących wyłącznie na miarach świadomości deklaratywnej.

W odpowiedzi na czwarte pytanie badawcze, dotyczące struktury barier i ułatwień w realizacji zasad GOZ, wyniki wskazują, że czynniki ekonomiczne, temporalne i praktyczne stanowią rzeczywiste predyktory zachowań cyrkularnych, podczas gdy motywacje ekologiczne pełnią w przeważającej mierze wtórną funkcję poznawczą, służąc racjonalizacji decyzji podejmowanych z powodów pragmatycznych lub w odpowiedzi na ograniczenia zasobowe. Jednocześnie obecność ułatwień strukturalnych, bliskości infrastruktury, wsparcia sieci społecznych, dostępności produktów cyrkularnych o akceptowalnych parametrach użytkowych, wykazuje istotny pozytywny związek z prawdopodobieństwem podejmowania zachowań zgodnych z zasadami GOZ. Obserwacja ta wpisuje się w szerszą perspektywę teorii projektowania zachowań (behavioral design), akcentującą rolę środowiska decyzyjnego jako zmiennej o pierwszorzędnym znaczeniu sprawczym.

Na podstawie całości zaprezentowanych wyników możliwe jest sformułowanie wniosków o charakterze zarówno teoretycznym, jak i aplikacyjnym. W wymiarze teoretycznym niniejsze badanie dostarcza empirycznego wsparcia dla podejść systemowych i kontekstualistycznych w analizie zachowań cyrkularnych, podważając jednocześnie redukcjonistyczne modele zakładające linearną zależność między świadomością ekologiczną a działaniem. Wyniki przemawiają za konceptualizacją GOZ jako struktury wielopoziomowej, w której formalne mechanizmy regulacyjne, normy społeczne i praktyki oddolne współkonstYtuują przestrzeń możliwych zachowań konsumenckich.

W wymiarze aplikacyjnym badanie generuje trzy wiązki rekomendacji. Po pierwsze, efektywna komunikacja i edukacja w zakresie GOZ powinna operować językiem zakorzeniony w doświadczeniu codziennych praktyk, a nie abstrakcyjnymi definicjami eksperckimi; w szczególności należy unikać dysproporcjonalnego eksponowania recyklingu kosztem strategii usytuowanych wyżej w hierarchii cyrkularności. Po drugie, polityki wspierające transformację cyrkularną powinny przyjąć podejście systemowe, integrując instrumenty regulacji formalnej z mechanizmami wzmacniającymi kapitał społeczny i oddolne inicjatywy cyrkularne, przy równoczesnym konsekwentnym obniżaniu kosztów transakcyjnych zachowań cyrkularnych. Po trzecie, projektowanie produktów i systemów dystrybucji w duchu cyrkularności powinno eksplicytnie uwzględniać parametry użytkowe, wygodę, trwałość i łatwość ponownego wykorzystania, ponieważ to właśnie te czynniki, a nie deklaratywna wrażliwość ekologiczna, okazują się decydujące dla rzeczywistej adaptacji zachowań cyrkularnych w warunkach codzienności.

Finansowanie

Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego „Działania konsumenckie jako czynnik intensyfikujący rozwój gospodarki cyrkularnej”, nr 2022/45/B/HS4/00363, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Bibliografia

1. Arora, R., Mutz, D., & Mohanraj, P. (Eds.). (2023). Innovating for the circular economy: Driving sustainable transformation (pp. 1–107). CRC Press, Taylor & Francis Group. https://doi.org/10.1111/radm.12684
2. Blackburn, O., P.Ritala, J.Keränen, and N.Bocken. (2026). "Circular Economy Platforms: A Systematic Review." Business Strategy and the Environment35, no. 2: 2810–2841. https://doi.org/10.1002/bse.70307
3. Camacho-Otero, J., Boks, C., & Pettersen, I. N. (2018). Consumption in the circular economy: A literature review. Sustainability, 10(8), 2758. https://doi.org/10.3390/su10082758
4. De Chiara, A., Gallo, M., & Simonacci, V. (2024). Re-examining consumer engagement in the circular economy. Journal of Consumer Marketing, 41(7), 706–723. https://doi.org/10.1108/JCM-03-2023-5918
5. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048
6. Gidaković, P., Zabkar, V., Zečević, M., Sagan, A., Wojnarowska, M., Sołtysik, M., Arslanagic-Kalajdzic, M., Dlacic, J., Askegaard, S., & Cleff, T. (2024). Trying to buy more sustainable products: Intentions of young consumers. Journal of Cleaner Production, 434, 140200. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140200
7. Hobson, K., & Lynch, N. (2016). Diversifying and de-growing the circular economy: Radical social transformation in a resource-scarce world. Futures, 82, 15–25. https://doi.org/10.1016/j.futures.2016.05.012
8. Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Müller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). Ecological Economics, 150, 264–272. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028
9. Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In Resources, Conservation and Recycling. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
10. Morgan, D., 1997. Focus Groups as Qualitative Research, Focus Groups as Qualitative Research. SAGE Publications, Inc. https://doi.org/10.4135/9781412984287
11. Ozden, M. (2026). Understanding consumer behaviour in the circular economy: A theory of planned behaviour approach. Circular Economy and Sustainability, 6. https://doi.org/10.1007/s43615-026-00716-6

12. Schöggl, J.-P., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2020). The narrative of sustainability and circular economy: A longitudinal review of two decades of research. Resources, Conservation and Recycling, 163, 105073. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105073
13. Sijtsema, S. J., Snoek, H. M., van Haaster-de Winter, M. A., & Dagevos, H. (2020). Let's talk about circular economy: A qualitative exploration of consumer perceptions. Sustainability, 12(1), 286. https://doi.org/10.3390/su12010286
14. Vidal-Ayuso, F., Akhmedova, A., & Jaca, C. (2023). The circular economy and consumer behaviour: Literature review and research directions. Journal of Cleaner Production, 418, 137824. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137824
15. Wilkinson, S., 2008. Focus groups. In: Doing Social Psychology Research. The British Psychological Society and Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, pp. 344–376. https://doi.org/10.1002/9780470776278.ch14

WYMIARY KULTURY BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOŚCI W ŚWIETLE PRAWA UNIJNEGO I PRYWATNEGO

Eugenia CZERNYSZEWICZ[1]

[1] Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Lublin; eugenia.czernyszewicz@up.edu.pl; https://orcid.org/0000-0003-2292-6819

* Korespondencja: eugenia.czernyszewicz@up.edu.pl; Tel.: +48-783-606-006

Streszczenie: Celem pracy jest wyjaśnienie pojęcia kultury bezpieczeństwa żywności oraz wskazanie jej elementów istotnych z punktu widzenia spełnienia wymagań unijnego i prywatnego prawa żywnościowego, aby bardziej skutecznie kształtować właściwą kulturę bezpieczeństwa żywności i tym samym spełnić odpowiednie wymagania prawne. Pracę wykonano na podstawie przeglądu aktów prawnych, dokumentów normatywnych i krytycznej analizy literatury przedmiotu dotyczącej kultury bezpieczeństwa żywości, w szczególności jej definiowania i wymiarów. Przedstawiono sposób definiowanie kultury bezpieczeństwa żywności oraz podstawowe jej elementy wynikające z zapisów prawa żywnościowego w różnych krajach i prywatnego prawa dotyczącego bezpieczeństwa żywności. Z przeprowadzonego przeglądu wynika, że sposób definiowania i rozumienia kultury bezpieczeństwa żywności wywodzi się z teorii kultury organizacyjnej. Kultura bezpieczeństwa żywności obejmuje wspólne wartości, przekonania i praktyki przyczyniające się do zachowania higieny w procesie produkcji żywności, których efektem jest określony poziom bezpieczeństwa żywności. Z punktu widzenia prawa żywnościowego podstawowymi wymiarami kultury bezpieczeństwa żywności są: zaangażowanie kierownictwa i wszystkich pracowników, przywództwo, świadomość istotności zagrożeń dla bezpieczeństwa żywności, otwarta i jasna komunikacja oraz dostępność zasobów umożliwiających zapewnienie bezpiecznego i higienicznego obchodzenia się z żywnością.

Slowa kluczowe: kultura organizacyjna, bezpieczeństwo żywności, prawo żywnościowe, wymiary kultury bezpieczeństwa.

ASPECTS OF FOOD SAFETY CULTURE IN RELATION TO EU AND PRIVATE LAW REQUIREMENTS

Abstract: The objective of this paper is to elucidate the concept of food safety culture and to identify its critical elements from the perspective of compliance with both European Union and private food law. This is aimed at more effectively cultivating an appropriate food safety culture and thereby fulfilling the pertinent legal requirements. The study is grounded in

a review of legal acts and normative documents, and in a critical analysis of the literature on food safety culture, with a particular focus on its definition and dimensions. The paper delineates the definition of food safety culture and its fundamental elements as articulated in food law regulations across various countries and in private food safety regulations. The review reveals that the conceptualisation and understanding of food safety culture are rooted in organizational culture theory. Food safety culture comprises shared values, beliefs, and practices that help maintain hygiene throughout the food production process, thereby achieving a specific level of food safety. From the perspective of food law, the essential dimensions of food safety culture include management and all employees' commitment, leadership, awareness of the significance of food safety hazards, open and clear communication, and the availability of resources to facilitate the safe and hygienic handling of food.
Keywords: organizational culture, food safety, food law, dimensions of safety culture

Wprowadzanie

Występowanie wielu zagrożeń w łańcuchu żywnościowym powoduje, że zagwarantowanie bezpieczeństwa żywności nie jest łatwym zadaniem zarówno dla przedsiębiorstwa, jak i dla systemu urzędowego nadzoru żywności. Dodatkowo, od 2021r. nałożono na podmioty prowadzące przedsiębiorstwa spożywcze obowiązek prawny wdrożenia pozytywnej kultury bezpieczeństwa żywności (KBŻ), która podlega weryfikacji przez właściwy organ urzędowego nadzoru (Rozporządzenie (WE) nr 852/2004). W związku z tym wymaganiem podczas audytu przedsiębiorstwa muszą wykazać, że wszyscy pracownicy są świadomi kwestii bezpieczeństwa związanych z wykonywanymi przez nich zadaniami, a także że wdrożono właściwą kulturę bezpieczeństwa żywności. Rangę kultury bezpieczeństwa żywności w przedsiębiorstwie odzwierciedlają regulacje rozporządzenia (UE) 2021/382 zmieniającego załącznik II do rozporządzenia (WE) 852/2004 (Rozporządzenie (UE) 2021/382). Zmiana ta jest efektem zmian w Kodeksie Żywnościowym, którego standardy i zalecenia tworzą podstawy współczesnego światowego i europejskiego prawa żywnościowego. W 2020 r. do zmienionej wersji ogólnych zasad higieny żywności zawartych w Kodeksie Żywnościowym wprowadzono zasadę dotyczącą ustanowienia i utrzymania właściwej kultury bezpieczeństwa żywności (CXC 1-1969 9). Stwierdzono, że ma ona kluczowe znaczenie dla skutecznego funkcjonowania każdego systemu higieny żywności. Wskazano również elementy, które mają znaczenie w kształtowaniu pozytywnej kultury bezpieczeństwa żywności. W punkcie 5.1 Kodeksu Żywnościowego dotyczącego zaangażowania kierownictwa w bezpieczeństwo żywności zapisano, że „*Podstawą skutecznego funkcjonowania każdego systemu higieny żywności jest ustanowienie i utrzymanie pozytywnej kultury bezpieczeństwa żywności, uznającej znaczenie ludzkich zachowań w dostarczaniu bezpiecznej i odpowiedniej żywności*" (CXC 1-1969 9). W rozporządzeniu Komisji (UE) 2021/382 zdefiniowano elementy kultury bezpieczeństwa żywności i określono, że podmioty prowadzące przedsiębiorstwa spożywcze, które prowadzą

działalność inną niż produkcja podstawowa i działania powiązane, muszą spełnić ten wymóg. Również Food and Drug Administration (FDA) – amerykańska Agencja ds. Żywności i Leków podkreśla, że „*silna kultura bezpieczeństwa żywności jest warunkiem wstępnym skutecznego zarządzania bezpieczeństwem żywności*" (2022). Determinanty kultury bezpieczeństwa żywności określiła również Grupa Robocza powołana przez GFSI w 2015 r. (2018), a także The British Standard Institution (2023) i Food Safety Authority of Ireland (FSAI) (2025).

Celem pracy jest wyjaśnienie pojęcia kultury bezpieczeństwa żywności oraz wskazanie jej elementów (wymiarów, filarów) istotnych z punktu widzenia spełnienia wymagań unijnego i prywatnego prawa żywnościowego. Skupienie się na zidentyfikowanych filarach kultury bezpieczeństwa żywności pomoże skuteczniej ukształtować właściwą kulturę bezpieczeństwa żywności i tym samym spełnić odpowiednie wymagania prawne. W pracy zastosowano następujące metody badawcze: analizę krytyczną źródeł literaturowych, analizę dokumentów wtórnych, w tym raportów i wytycznych, analizę aktów prawnych i normatywnych dotyczących kultury bezpieczeństwa żywności oraz syntezę i wnioskowanie logiczne. Celowi pracy podporządkowano strukturę treści

Pojęcie i definiowanie kultury bezpieczeństwa żywności

Pojęcie kultury bezpieczeństwa znane jest w literaturze od 1990 r., a wywodzi się z kultury organizacyjnej, zdefiniowanej przez jednego z czołowych jej badaczy, Edgara Scheina, jako „*wzorzec podstawowych założeń*" podzielanych przez wszystkich członków grupy (Schein, 2010). Koncepcja kultury bezpieczeństwa jest wielowymiarowa, różnie definiowana i interpretowana. Jest ona związana z kulturą organizacyjną, a przejawia się w zachowaniu poszczególnych osób zatrudnionych w przedsiębiorstwie i grupach, ich postawach, przekonaniach i sposobie radzenia sobie w trudnych sytuacjach. Jednocześnie jest ona systemem wartości oraz poglądów i opinii, które wpływają na pracowników, strukturę organizacji oraz systemy kontroli, w efekcie tworząc normy zachowania. Badacze są zdania, że aby zrozumieć kulturę i nią zarządzać, trzeba wiedzieć „*co się dzieje w organizacji, gdy nikt nie patrzy*" (Ades i in., 2016).

Kultura bezpieczeństwa żywności (KBŻ) rozwinęła się jako zastosowanie koncepcji kultury bezpieczeństwa do specyficznego obszaru, jakim jest żywność. Koncepcję kultury bezpieczeństwa żywności wprowadził do literatury Frank Yiannas (Yiannas, 2009). Kolejni badacze opracowali ramy kultury bezpieczeństwa żywności (Griffith i in., 2010; Ades i Leith, 2016; Manning, 2017) i jej determinanty oraz narzędzia oceny (m.in. De Boeck i in., 2015; Jespersen i in., 2016; Nyarugwe i in., 2016). Tak więc na poziomie organizacji kultura bezpieczeństwa żywności jest elementem szerszej kultury organizacyjnej oraz częścią kultury bezpieczeństwa, która jest skupiona na bezpieczeństwie żywności. Koncentracja na

bezpieczeństwie żywności jest ważna, ponieważ dbałość o kulturę bezpieczeństwa żywności to dbałość o zdrowie i życie konsumentów. Dlatego według Nyarugwe i in. (2016) kultura bezpieczeństwa żywności powinna być dominującą kulturą w przedsiębiorstwach sektora żywnościowego, ponieważ te wartości podkreślają bezpieczeństwo ich klientów i pracowników. Musi także mieć pierwszeństwo przed innymi kulturami, które konkurują o pierwszeństwo w organizacji, włączając w to kulturę oszczędzania pieniędzy (Griffith i in., 2010). Szczególnie cięcie wydatków związanych z bezpieczeństwem żywności może być szkodliwe dla organizacji. Poza tym uboga kultura bezpieczeństwa żywności w przemyśle spożywczym jest postrzegana jako źródło występowania epidemii chorób pochodzenia odżywnościowego (Griffith i in., 2010). Wybrane definicje kultury bezpieczeństwa żywności przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.
Definiowanie kultury bezpieczeństwa żywności

Definicja	Źródło
Kultura bezpieczeństwa żywności to agregacja dominujących, względnie stałych, wyuczonych i podzielanych postaw, wartości i przekonań, które przyczyniają się do zachowań higienicznych stosowanych w danym środowisku związanym z obsługą żywności.	Griffith CJ, Livesey KM, Clayton D. The assessment of food safety culture. British Food Journal 2010, 112(4), 439-456.
Kultura bezpieczeństwa żywności to „ludzka droga" w ramach klimatu bezpieczeństwa żywności. Klimat bezpieczeństwa żywności to „wspólne postrzeganie przez pracowników przywództwa, komunikacji, zaangażowania, zasobów i świadomości ryzyka w odniesieniu do bezpieczeństwa żywności i higieny w ich obecnej organizacji pracy.	De Boeck E, Jacxsens L, Bollaerts M, Vlerick P. Food safety climate in food processing organizations: Development and validation of a self-assessment tool. Trends in Food Science & Technology 2015, 46(2), 242-251
Kultura bezpieczeństwa żywności to zbiór wspólnych wartości, przekonań i zachowań wszystkich pracowników firmy, które wpływają na sposób, w jaki żywność jest produkowana, przechowywana i dystrybuowana	FSAI 2025 Guidance Note 44 – Food Safety Culture
Kultura bezpieczeństwa żywności to długoterminowa konstrukcja istniejąca na poziomie organizacyjnym, odnosząca się do głęboko zakorzenionych przekonań, zachowań i założeń, które są nabyte i współdzielone przez wszystkich pracowników i mają wpływ na wyniki organizacji w obszarze bezpieczeństwa żywności.	Sharman N, Wallace CA, Jespersen L. Terminology and the understanding of culture, climate, and behavioural change – Impact of organisational and human factors on food safety management. Trends in Food Science & Technology 2020, 96, 13-20.
„sposób w jaki robi się różne rzeczy", aby zapewnić bezpieczeństwo żywości	Yiannas F. Food safety culture: creating a behavior-based food safety management system. Springer 2009.
Kultura bezpieczeństwa żywności to wspólne wartości, przekonania i normy, które wpływają na sposób myślenia i zachowania związane z bezpieczeństwem żywności w całej organizacji.	Global Food Safety Initiative (GFSI). A Culture Of Food Safety. A Position Paper From The Global Food Safety Initiative (GFSI). Vol. V1. Industry white paper. 2018.
Kultura bezpieczeństwa żywności to „szczególny element kultury organizacyjnej skupiony na bezpieczeństwie żywności, obejmujący wspólne wartości, przekonania i praktyki przyczyniające się do zachowania higieny w procesie produkcji żywności, których efektem jest określony poziom bezpieczeństwa żywności". Jest ona związana z percepcją pracowników dotyczącą zagrożeń bezpieczeństwa w ich	Czernyszewicz E. Kultura bezpieczeństwa w produkcji żywności. Koncepcja i pomiar. Wyd. UPL, Lublin 2020, s.30.

Definicja	Źródło
środowisku pracy, odpowiedzialności i ryzyka, sposobu zachowania, przywództwa oraz komunikacji.	

Źródło: Opracowanie własne

Według U.S. Food and Drug Administration (2022) najczęściej cytowaną definicją jest ta autorstwa Griffith, Livesey i Clayton (2010). Zdefiniowali oni kulturę bezpieczeństwa żywności jako: agregację dominujących, względnie stałych, wyuczonych i podzielanych postaw, wartości i przekonań, które przyczyniają się do zachowań higienicznych stosowanych w danym środowisku związanym z obsługą żywności (Tabela 1). Według Food Safety Authority of Ireland (FSAI) każde przedsiębiorstwo ma już pewną kulturę bezpieczeństwa, ale kluczowe jest, by była ona odpowiednia i wspierała produkcję bezpiecznej żywności. Jest to ważne, ponieważ wdrożenie takiej kultury bezpieczeństwa żywności pozwala: zwiększyć świadomość pracowników, poprawić komunikację i zaangażowanie, zapobiegać incydentom i kryzysom, wzmacniać zaufanie konsumentów i organów kontrolnych (FSAI, 2025). Definicja kultury bezpieczeństwa żywności zaprezentowana przez British Standard Institution w PAS 320:2023 odpowiada ściśle definicji opracowanej przez GFSI (2018). Słowami kluczami do zrozumienia tego zjawiska są „wspólne" (wartości, przekonania, praktyki), które są podzielane przez „wszystkich" pracowników, począwszy od najniższego szczebla do najwyższego, włączając w to menedżerów i liderów.

De Boeck i in. (2015) definiują kulturę bezpieczeństwa żywności inaczej, włączając pojęcie klimatu bezpieczeństwa żywności. Według wielu autorów klimat bezpieczeństwa żywności to „ludzka droga" w ramach kultury bezpieczeństwa żywności. System zarządzania bezpieczeństwem żywności jest „techniczno-zarządczą drogą", która odzwierciedla szerszy kontekst organizacji, cechy procesów oraz dostępne technologie. Jak wyjaśniają, kultura bezpieczeństwa żywności organizacji to nadrzędne ramy, składające się z tych dwóch uzupełniających się wzajemnie „dróg". Warto przy tym zwrócić uwagę, że definicja klimatu bezpieczeństwa żywności według De Boecka ściśle przypomina definicję kultury bezpieczeństwa żywności autorstwa Griffith, Livesey i Clayton (2010). Mimo to oba terminy nie są synonimami. Według Sharman i in. (2020) klimat bezpieczeństwa żywności jest zazwyczaj kojarzony z tymczasową perspektywą czasową i często opisywany jako postawy oraz percepcje jednostek w danym momencie. Natomiast kultura bezpieczeństwa żywności jest związana z dłuższym okresem i zwykle przedstawiana jako trwałe przekonania, zachowania, założenia i praktyki organizacji**.**

Griffith, Livesey i Clayton (2010) postrzegają kulturę bezpieczeństwa żywności jako element wchodzący w interakcję z systemami zarządzania organizacją, jej stylem oraz procesami, by w efekcie określić poziom bezpieczeństwa żywności. Jespersen i Huffman (2014) wykazali, że kultura bezpieczeństwa żywności może być specyficzna dla każdego kraju, ponieważ mają one swoje tradycje i specyficzne uregulowania prawne dotyczące żywności.

Jak podkreślają autorzy przeglądu literatury dokonanej przez FDA (2022) literatura opierająca się głównie na modelu Griffith i in. (2010) zazwyczaj używa terminu kultura

bezpieczeństwa żywności, zaś osoby korzystające z modelu De Boecka i in. stosują oba terminy, ale zwykle koncentrują się na narzędziach mierzących klimat bezpieczeństwa żywności przy ocenie kultury bezpieczeństwa żywności. W modelach kultury bezpieczeństwa żywności dostrzega się fakt, że kultura bezpieczeństwa żywności organizacji może mieć pozytywny lub negatywny wpływ na bezpieczeństwo żywności. Yiannas, (2009) argumentuje, że bezpieczeństwo żywności musi być integralną częścią kultury organizacji, „*wykraczając poza tradycyjne podejścia do szkoleń, testów i inspekcji w zarządzaniu ryzykiem*." Odróżnia on kulturę bezpieczeństwa żywności od systemu zarządzania bezpieczeństwem żywności, wyjaśniając, że „*system zarządzania bezpieczeństwem żywności (SZBŻ) to zbiór procesów obejmujących dobre praktyki produkcyjne, System Analizy Zagrożeń i Krytycznych Punktów Kontroli (HACCP) oraz plan wycofywania niebezpiecznej żywności z rynku*". Posiadanie tego systemu jest kluczowe, jednak kultura bezpieczeństwa żywności wykracza poza te procesy, koncentrując się na zachowaniach ludzi. Kultura bezpieczeństwa żywności jest czymś więcej niż tylko systemem zarządzania bezpieczeństwem żywności, bowiem według GFSI (2018) kultura czerpie swoją siłę z tego, co niewypowiedziane i intuicyjne, z obserwacji oraz z przekonań tak podstawowych jak „to jest właściwe" i „nigdy byśmy tak nie postąpili.". Dlatego kultura żyje dzięki doświadczeniom nie tylko jednostek, ale całych grup. Poprzez normy i zachowania wartości wyznawane w firmie są przekazywane nowym członkom i operacjonalizowane w grupach (GFSI, 2018). Ten aspekt odróżnia formalne systemy zarządzania bezpieczeństwem od kultury. De Boeck i in. (2015) zwracają uwagę, że dobrze opracowany i dopasowany do celu system zarządzania bezpieczeństwem żywności nie zawsze gwarantuje najwyższy poziom bezpieczeństwa żywności i jego stabilność. Dzieje się tak, ponieważ inne czynniki kulturowe zapewnienia bezpieczeństwa żywności takie jak zachowanie personelu mogą wpływać na skuteczność systemu bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie. Na podstawie badań stwierdzono wpływ kultury bezpieczeństwa żywności na motywację pracowników do przestrzegania bezpiecznych praktyk związanych z obsługą żywności, ich postawy i intencje zachowania. Zrozumienie znaczenia kultury bezpieczeństwa żywności wymaga czasu, wiedzy, zrozumienia funkcjonowania określonej organizacji i specyfiki zarządzania, zwłaszcza zasobami ludzkimi (Wiśniewska i Grybek, 2021).

Wymiary kultury bezpieczeństwa żywności w światowym i unijnym prawie żywnościowym

Podstawą dla współczesnego prawa żywnościowego są standardy i zalecenia zawarte w Kodeksie Żywnościowym. Mimo fakultatywności są one uznawane za międzynarodowe normy bezpieczeństwa żywności i są postrzegane jako fundament rozwoju prawa

żywnościowego światowego oraz europejskiego. Podkreślono to w rozporządzeniu (WE) 852/2004, zaznaczając, by podczas opracowywania krajowych wytycznych dobrej praktyki, uwzględniać odpowiednie kodeksy praktyki z Kodeksu Żywnościowego. W punkcie 5.1 Kodeksu Żywnościowego dotyczącego zaangażowania kierownictwa w bezpieczeństwo żywności wskazano, że podstawą skutecznego funkcjonowania każdego systemu higieny żywności jest ustanowienie i utrzymanie pozytywnej kultury bezpieczeństwa żywności, uznającej znaczenie ludzkich zachowań w dostarczaniu bezpiecznej i odpowiedniej żywności. W Kodeksie wskazano elementy mające znaczenie w kształtowaniu pozytywnej kultury bezpieczeństwa żywności, są to:

- zaangażowanie kierownictwa i pracowników w produkcję i przetwarzanie bezpiecznej żywności,
- przywództwo, które wyznacza właściwy kierunek i angażuje wszystkich pracowników w praktyki bezpieczeństwa żywności,
- świadomość znaczenia higieny żywności przez wszystkich pracowników przedsiębiorstwa spożywczego,
- otwarta i jasna komunikacja między wszystkimi pracownikami przedsiębiorstwa spożywczego, w tym informowanie o odchyleniach i oczekiwaniach oraz
- dostępność wystarczających zasobów do zapewnienia skutecznego funkcjonowania systemu higieny żywności.

Elementy te są zbieżne z wymiarami kultury bezpieczeństwa żywności określonymi przez Komisję Unii Europejskiej w rozporządzeniu Komisji (UE) 2021/382 z dnia 3 marca 2021 r. W rozdziale XI a tego rozporządzenia Komisji UE nakazano, aby podmioty prowadzące przedsiębiorstwa spożywcze uzyskały, utrzymywały i przedstawiły dowody potwierdzające odpowiednią kulturę bezpieczeństwa żywności poprzez spełnienie następujących wymogów dotyczących:

- zaangażowania kierownictwa i wszystkich pracowników,
- wiodącej roli kierownictwa w zakresie produkcji bezpiecznej żywności i angażowania wszystkich pracowników w praktyki w zakresie bezpieczeństwa żywności,
- świadomości zagrożeń dla bezpieczeństwa żywności oraz znaczenia bezpieczeństwa i higieny żywności wśród wszystkich pracowników przedsiębiorstwa,
- otwartej i jasnej komunikacji między wszystkimi pracownikami w przedsiębiorstwie w ramach danego działania i między kolejnymi działaniami, w ramach jednego zakładu lub różnych lokalizacji podmiotu spożywczego, w tym informowania o odchyleniach i oczekiwaniach,
- dostępności wystarczających zasobów do zapewnienia bezpiecznego i higienicznego obchodzenia się z żywnością.

Zaangażowanie kierownictwa określono w rozporządzeniu (WE) nr 852/2004, zaś zaangażowanie wszystkich pracowników to postrzeganie stopnia zaangażowania i udziału

wszystkich pracowników podmiotu prowadzącego przedsiębiorstwo spożywcze w zapewnieniu bezpieczeństwa żywności. Wiodąca rola kierownictwa oznacza postrzeganie stopnia w jakim kierownicy podmiotu są w stanie zaangażować pracowników w działania związane z bezpieczeństwem żywności i przestrzeganiem przepisów, aby spełnić wymogi dotyczące bezpieczeństwa żywności i zapewnić odpowiednią reakcję na zagrożenia, odchylenia i zmieniające się okoliczności. Świadomość zagrożeń oraz znaczenia bezpieczeństwa i higieny żywności wśród wszystkich pracowników przedsiębiorstwa to postrzeganie stopnia, w jakim wszyscy pracownicy podmiotu spożywczego są świadomi zagrożeń związanych z bezpieczeństwem żywności, istotnych z punktu widzenia wykonywanych przez nich zadań i je kontrolują. Otwarta i jasna komunikacja odnosi się do postrzegania stopnia, w jakim przekazywane lub rozpowszechniane są informacje związane z bezpieczeństwem żywności w organizacji. Wystarczające zasoby definiuje się zaś jako postrzeganie stopnia, w jakim fizyczne i niefizyczne środki niezbędne do prowadzenia działalności w sposób bezpieczny dla żywności obowiązują w podmiocie spożywczym, są to np. czas, personel, infrastruktura, edukacja/szkolenia i procedury. Chociaż poszczególne elementy są subiektywnie postrzegane, opracowano narzędzia umożliwiające przeprowadzenie obiektywnego pomiaru kultury bezpieczeństwa żywności. Są one zawarte w załączniku III do Zawiadomienia Komisji 355/01 z 2022 r. Są to: lista kontrolna dotycząca kultury bezpieczeństwa żywności dla właściwych organów, która zawiera odpowiedzi TAK/NIE w oparciu o elementy kultury bezpieczeństwa żywności do wykorzystania podczas oficjalnego audytu poprzez obserwację i wywiady oraz kwestionariusz do wypełnienia przez jak największą liczbę pracowników. Składa się on z 28 pytań podzielonych na 5 sekcji, które są oceniane w 5. stopniowej skali Likerta. Kwestionariusz został opracowany przez De Boeck E. i in. (2015). Porównując wyniki badania przeprowadzonego za pomocą kwestionariusza, można zidentyfikować niedociągnięcia niektórych zasad kultury bezpieczeństwa żywności, np. w zakresie zaangażowania kierownictwa, pracowników, komunikacji czy zasobów itd. Aby uniknąć subiektywnego postrzegania, weryfikacja kultury bezpieczeństwa żywności powinna odbywać się poprzez weryfikację obiektywnych danych takich jak np.: praktyki w zakresie higieny żywności, szkolenia personelu, sprawdzenie dokumentacji dotyczącej przepływu informacji i informacji zwrotnych przekazywanych między pracownikami a kierownikami lub sprawdzenie rezultatów działania takich jak: wyniki audytów wewnętrznych, analizy mikrobiologiczne, działania następcze dotyczące niezgodności itp. Audytor ma także możliwość zorganizowania badania z wykorzystaniem kwestionariusza (Zawiadomienie Komisji 355/01). Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności Irlandii (Food Safety Authority of Ireland – FSAI) w 2025 r. udostępnił notę z wytycznymi (44 Guidance Note) dotyczącymi kultury bezpieczeństwa żywności, która w założeniu ma pomóc przedsiębiorcom z sektora spożywczego we wdrażaniu kultury bezpieczeństwa żywności oraz wspierać organy urzędowe kontroli w ocenie kultury bezpieczeństwa żywności. Uwzględniając wymogi prawne dotyczące tworzenia i wdrażania odpowiedniej kultury bezpieczeństwa żywności zgodnie z

rozporządzeniem (WE) nr 852/2004 zmienionym rozporządzeniem Komisji (UE) 2021/382 wskazano pięć wymiarów kultury bezpieczeństwa żywności: zaangażowanie i przywództwo kierownictwa, komunikacja i świadomość, zaangażowanie pracowników, utrzymanie i weryfikacja oraz ciągłe doskonalenie i zgodność z przepisami prawa (Tabela 2).

Tabela 2.

Przegląd wymiarów/elementów kultury bezpieczeństwa żywności

Źródło	Wymiary/elementy kultury bezpieczeństwa żywności
Kodeks Żywnościowy Ogólne zasady higieny żywności CXC 1–1969 „Ogólne zasady higieny żywności", Rev. 2020.	– zaangażowanie kierownictwa i pracowników, – przywództwo, – świadomość znaczenia higieny żywności, – otwarta i jasna komunikacja, – dostępność wystarczających zasobów.
Rozporządzenie Komisji (UE) 2021/382 z dnia 3 marca 2021 r.	– zaangażowania kierownictwa i wszystkich pracowników, – wiodąca rola kierownictwa, – świadomość zagrożeń dla bezpieczeństwa żywności, – otwarta i jasna komunikacja, – dostępność wystarczających zasobów.
FSAI 2025 Guidance Note 44 – Food Safety Culture	– zaangażowanie i przywództwo kierownictwa, – komunikacja i świadomość, – zaangażowanie pracowników, – utrzymanie i weryfikacja, – ciągłe doskonalenie i zgodność z przepisami prawa.
U.S. Food and Drug Administration. 2022. Food Safety Culture Systematic Literature Review. A report prepared by Westat, Inc.	– przywództwo, – komunikacja, – zaangażowanie w bezpieczeństwo, – świadomość ryzyka, – środowisko, – odpowiedzialność, – wiedza, postawy, zachowania i wartości pracowników

Źródło: opracowanie własne

Terminologia wymiarów różni się od tych wskazanych w rozporządzeniu Komisji (UE) 2021/382. Wyszczególniono nowe wymiary takie jak utrzymanie i weryfikacja oraz ciągłe doskonalenie i zgodność z przepisami prawa. W załączniku 4 do noty z wytycznymi zawarto kompleksowy przegląd korelacji między wymogami prawnymi a odpowiednimi wymiarami zawartymi w cytowanej nocie. Podkreślono, aby traktować kulturę bezpieczeństwa żywności jako wysiłek zespołowy, polegający na współpracy w celu zapewnienia bezpieczeństwa żywności. Wiąże się to ze znajomością potencjalnych zagrożeń, wzajemną komunikacją oraz dbaniem o to, by każdy czuł się swobodnie, zgłaszając problemy. Zaznaczono, podobnie jak w zawiadomieniu Komisji 355/01 z 2022 r. że wdrażanie tego obowiązku powinno uwzględniać charakter i wielkość przedsiębiorstwa spożywczego (FSAI, 2025). W aneksie dołączono narzędzia oceny w postaci listy kontrolnej do samooceny przedsiębiorstw sektora spożywczego, kwestionariusza dla przedsiębiorców oraz listę kontrolną do oceny kultury bezpieczeństwa żywności w ramach urzędowych kontroli.

Jeszcze inną strukturę i terminologię elementów (determinant) kultury bezpieczeństwa żywności wskazał w 2022 r. Amerykański Urząd ds. Żywności i Leków (U.S. Food and Drug

Administration), są to: przywództwo, komunikacja, zaangażowanie w bezpieczeństwo, świadomość ryzyka, środowisko, odpowiedzialność, wiedza, postawy, zachowania i wartości pracowników (U.S. Food and Drug Administration, 2022). Komunikacja odnosi się do jakości przekazywania informacji dotyczących bezpieczeństwa żywności oraz wymiany wiedzy w całej organizacji. Zaangażowanie w bezpieczeństwo żywności to stopień, w jakim organizacja konsekwentnie ceni i nadaje priorytet bezpieczeństwu żywności. Zaangażowanie jest kluczowym składnikiem tworzenia kultury bezpieczeństwa żywności. Świadomość ryzyka to postrzeganie oraz zrozumienie na wszystkich poziomach i we wszystkich funkcjach rzeczywistych i potencjalnych zagrożeń oraz ryzyk związanych z bezpieczeństwem żywności. Środowisko obejmuje struktury organizacyjne, procesy i działania (np. zasoby, sprzęt, budynki, personel, szkolenia) dostępne w organizacji, które umożliwiają właściwe zapewnienie bezpieczeństwa żywności (Griffith i in., 2010). Odpowiedzialność oznacza umiejętność egzekwowania od pracowników na wszystkich szczeblach odpowiedzialności za wyniki w zakresie bezpieczeństwa żywności. Stwierdzono ponadto, że cechy pracowników, obejmujące wiedzę, nastawienie, zachowanie i wartości, mogą mieć wpływ na kulturę bezpieczeństwa żywności (US FDA, 2022). Pracownicy, którzy kładą nacisk na bezpieczeństwo żywności i pracę zespołową, mają pozytywny wpływ na zachowania swoich współpracowników w zakresie bezpieczeństwa żywności (Lone i Huffman, 2014). Wyszczególnione elementy w zasadzie pokrywają się z tymi określonymi w Kodeksie Żywnościowym, bowiem zasoby reprezentowane są w wyszczególnionym zestawie determinant przez „środowisko", a zasoby ludzkie przez wymiar „wiedza, postawy, zachowania i wartości pracowników". Elementy te zidentyfikowano na podstawie systematycznego przeglądu literatury naukowej dotyczącej kultury bezpieczeństwa żywności z okresu od stycznia 2009 r. do końca kwietnia 2021 r. Podkreślono, że w literaturze panuje ogólna zgoda co do determinant kultury bezpieczeństwa żywności, jednak terminologia używana do ich opisu jest różna. Znalazło się potwierdzenie w niniejszej publikacji.

Wymiary kultury bezpieczeństwa żywności w prywatnym prawie żywnościowym

Już dawno na poziomie UE dostrzeżono znaczenie i dynamiczny rozwój prywatnego prawa żywnościowego. Kategoria prywatnego prawa żywnościowego obejmuje różne standardy, systemy, przewodniki i kodeksy dobrych praktyk tworzone przez prywatne podmioty działające w przemyśle rolno-spożywczym lub z nim powiązane. Ten zbiór zasad nie jest warunkowany prawem żywnościowym, a bardziej wymogami rynku, chociaż zdecydowana większość tych wymagań wynika z uregulowań prawnych (Wiśniewska, 2021). Jest ono zwykle postrzegane jako bardziej rygorystyczne, stąd może skutecznie uzupełniać lub działać jako substytut

niedostatecznych lub brakujących przepisów w danym zakresie. Wiele standardów posiada rekomendację GFSI (Global Food Safety Initiative) – organizacji non-profit, zarządzanej przez Forum Branży Towarów Konsumpcyjnych, powstałej w 2009 r. Z komunikatu Komisji UE z 2010 r. wynika, że prywatne systemy certyfikacji nie są niezbędne, aby wykazać zgodność z przepisami prawa, a przystępowanie do nich w sektorze rolno-spożywczym jest i musi pozostać dobrowolne.

Grupa Robocza, zajmująca się kulturą bezpieczeństwa żywności, powołana przez Radę Global Food Safety Initiative (GFSI), działająca pod kierownictwem Lone Jespersen w opublikowanym w 2018 r. raporcie zidentyfikowała następujące wymiary kultury bezpieczeństwa żywności: wizja, misja i wartości, ludzie, zgodność (spójność), adaptacyjność, świadomość ryzyka i zagrożeń. Szczególny nacisk położono na rolę liderów i menedżerów w całej organizacji, znacznie regularnej komunikacji, edukacji, pracy zespołowej i osobistej odpowiedzialności w promowaniu kultury bezpieczeństwa żywności, zdolności adaptacji i świadomości zagrożeń rzeczywistych i potencjalnych oraz ryzyk związanych z bezpieczeństwem żywności. Podkreślono, że praktyki mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa żywności powinny być nawykowe i systemowe. Mogą one rozwijać się naturalnie w sprzyjającym i pozytywnym środowisku kulturowym, chociaż wymagają pewnych inwestycji, strategicznego nadzoru i ciągłego doskonalenia (Global Food Safety Initiative, 2018).

Identyczną terminologię wymiarów kultury bezpieczeństwa żywności przyjęła The British Standard Institution (BSI) w opublikowanym w 2023 r. dokumencie normalizacyjnym PAS 320:2023 Rozwój i utrzymanie dojrzałej kultury bezpieczeństwa żywności – Przewodnik. W dokumencie podano zalecenia dotyczące przywództwa, wizji, misji i polityki, struktury organizacyjnej, obowiązków, odpowiedzialności i autorytetów, kierowania zespołem, zainteresowanych stron, kierowników zmian, wpływów i dokumentacji bezpieczeństwa żywności. Wskazano, że dzięki wytycznym w PAS 320 kierownictwo będzie w stanie zrozumieć aktualny stan kultury bezpieczeństwa żywności w organizacji i zaplanować jej rozwój, dojrzewanie i ciągłe doskonalenie. Zalecenia umożliwiają zaprojektowanie strategicznego planu zmian w celu osiągnięcia pożądanej kultury bezpieczeństwa żywności oraz ustanowienie systemu monitorowania wyników, aby umożliwić ocenę kultury bezpieczeństwa żywności w organizacji.

Podsumowanie

Sposób definiowania i rozumienia kultury bezpieczeństwa żywności jest dość jednolity. Istnieje powszechna zgodność opinii, że kultura bezpieczeństwa żywności to coś więcej niż zasady i procedury systemu zarządzania bezpieczeństwem żywności, i że regulacje nie są

wystarczające, aby zapewnić bezpieczeństwo żywności. Liderzy oraz pracownicy organizacji zajmujących się żywnością muszą posiadać zestaw wartości i przekonań ukierunkowanych na zapewnienie bezpieczeństwa żywności. Pojęcie kultury bezpieczeństwa żywności wywodzi się z teorii kultury organizacyjnej. Kulturę bezpieczeństwa żywności można zdefiniować jako element kultury organizacyjnej i kultury bezpieczeństwa skupiony na bezpieczeństwie żywności, obejmujący wspólne wartości, przekonania i praktyki przyczyniające się do zachowania higieny w procesie produkcji żywności, których efektem jest określony poziom bezpieczeństwa żywności. Jest ona związana z percepcją wszystkich pracowników dotyczącą zagrożeń bezpieczeństwa w ich środowisku pracy, odpowiedzialności i ryzyka, sposobu zachowania oraz komunikacji. Szczególnie ważną rolę w kształtowaniu właściwej kultury bezpieczeństwa żywności pełnią liderzy i menedżerowie, którzy wyznaczają kierunek i nadają ton kulturze bezpieczeństwa żywności w organizacji. Ich odpowiedzialność, konsekwencja i zaangażowanie w bezpieczeństwo żywności może znacząco wpłynąć na ukształtowanie silnej kultury bezpieczeństwa żywności.

Istnieje powszechna zgoda co do czynników determinujących silną i skuteczną kulturę bezpieczeństwa żywności, są to: przywództwo, komunikacja, zaangażowanie w bezpieczeństwo żywności, świadomość ryzyka, środowisko, w którym wytwarzana jest żywność, odpowiedzialność, a także wiedza, postawy, zachowania i wartości pracowników. Z uregulowań prawnych wynika, że podstawowymi elementami właściwej kultury bezpieczeństwa żywności są: zaangażowanie kierownictwa i wszystkich pracowników, wiodąca rola kierownictwa w zakresie produkcji bezpiecznej żywności i angażowania wszystkich pracowników w praktyki higieny, świadomość zagrożeń dla bezpieczeństwa żywności oraz znaczenie bezpieczeństwa i higieny żywności wśród wszystkich pracowników przedsiębiorstwa, otwarta i jasna komunikacja oraz dostępność wystarczających zasobów do zapewnienia bezpiecznego i higienicznego obchodzenia się z żywnością.

Bibliografia

1. Rozporządzenie Komisji (UE) 2021/382 z dnia 3 marca 2021 r. zmieniające załączniki do rozporządzenia (WE) nr 852/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady *w sprawie higieny środków spożywczych w odniesieniu do zarządzania alergenami pokarmowymi, redystrybucji żywności i kultury bezpieczeństwa żywności*. *Dz.U. L 74 z 4.3.2021, pp. 3–6*
2. Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady z 29 kwietnia 2004 r. *w sprawie higieny środków spożywczych. Dz.U. L 139 z 30.4.2004, pp. 1–54.*
3. Kodeks Żywnościowy *Ogólne zasady higieny żywności* CXC 1–1969 „Ogólne zasady higieny żywności", Rev. 2020.
4. PAS 320:2023. (2023). *Developing and sustaining a mature food safety culture – Guide*, BSI.
5. FSAI (2025). *Guidance Note 44 – Food Safety Culture*, https://www.fsai.ie/publications/guidance-note-44-food-safety-culture
6. Global Food Safety Initiative (GFSI). (2018). *A Culture Of Food Safety*. A Position Paper From The Global Food Safety Initiative (GFSI). Vol. V1. Industry White Paper. https://mygfsi.com/wp-content/uploads/2019/09/GFSI-Food-Safety-Culture-Full.pdf.
7. U.S. Food and Drug Administration. (2022). *Food Safety Culture Systematic Literature Review*. A report prepared by Westat, Inc. Dostępny na https://www.fda.gov/media/163588/download. Dostęp [27.08.2025].
8. Yiannas F. (2009). *Food safety culture: creating a behaviour-based food safety management system*. Springer. http://rave.ohiolink.edu/ebooks/ebc/9780387728674.
9. Griffith CJ, Livesey KM, Clayton D. (2010). The assessment of food safety culture. *British Food Journal*, *112(4)*, s. 439-456. doi:10.1108/00070701011034448.
10. Ades GLK, Leith P. (2016). *Food safety a roadmap to success*. Boston.
11. Manning L. (2017). The Influence of Organizational Subcultures on Food Safety Management. *Journal of Marketing Channels*, *24(3-4)*,180-189. doi: 10.1080/1046669X.2017.1393235.
12. De Boeck E, Jacxsens L, Bollaerts M, Vlerick P. (2015). Food safety climate in food processing organizations: Development and validation of a self-assessment tool. *Trends in Food Science & Technology*, *46(2*), 242-251. doi: 10.1016/j.tifs.2015.09.006.
13. Jespersen L., Griffiths M., MacLaurin T., Chapman B., Wallace C.A. (2016). Measurement of food safety culture using survey and maturity profiling tools. *Food Control*, *66* (2016), 174-182.

14. Nyarugwe SP, Linnemann A, Hofstede GJ, Fogliano V, Luning PA. (2016). Determinants for conducting food safety culture research. *Trends in Food Science & Technology*, *56,* 77-87.
15. De Boeck E, Jacxsens L, Bollaerts M, Uyttendaele M, Vlerick P. (2016). Interplay between food safety climate, food safety management system and microbiological hygiene in farm butcheries and affiliated butcher shops. *Food Control*, *65*, 78-91. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.01.014.
16. Sharman N, Wallace CA, Jespersen L. (2020). Terminology and the understanding of culture, climate, and behavioural change – Impact of organisational and human factors on food safety management. *Trends in Food Science & Technology*, *96*, 13-20. doi: 10.1016/j.tifs.2019.12.005.
17. Jespersen L., Huffman R. (2015). Building food safety into the company culture: A look of maple leaf foods. *Perspectives in Public Health, 134(4)*, 200-205.
18. Schein EH. *Organizational culture and leadership*. vol 2. John Wiley & Sons; 2010.
19. De Boeck E, Jacxsens L, Bollaerts M, Vlerick P. (2015). Food safety climate in food processing organizations: Development and validation of a self-assessment tool. *Trends in Food Science & Technology 46(2),* 242-251. doi: 10.1016/j.tifs.2015.09.006.
20. Zawiadomienie Komisji w sprawie wytycznych dotyczących wdrażania systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności obejmujących dobre praktyki higieniczne i procedury oparte na zasadach HACCP, uwzględniając ułatwienia/elastyczność w zakresie wdrażania w niektórych przedsiębiorstwach spożywczych, Dz.U. UE 2022/C 355/01.
21. Wiśniewska M.Z., Grybek T. (2021). Kultura bezpieczeństwa żywności w świetle standardów uznanych przez GFSI. *Problemy Jakości*, *1*, 2-9.
22. Lone J., Huffman R. (2014). Building food safety into the company culture: a look at Maple Leaf Foods. *Perspect. Public Health*, *134(4)*, 200-205. doi. 10.1177/1757913914532620.
23. U.S. Food and Drug Administration (FDA). *New Era of Smarter Food Safety: FDA's Blueprint for the Future*. July 2020. https://www.fda.gov/food/new-era-smarter-food-safety/new-era-smarter-food-safety-blueprint. Dostep [30.01.2025 r.].

A TAXONOMY OF CIRCULAR ECONOMY GOOD PRACTICES:A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Salvatore Ingenito*, Agata Matarazzo

Department of Economics and Business, University of Catania, Catania, Italy

* Corresponding author: salvatore.ingenito@unict.it | Tel.: +39 388 198 9451

Abstract: The circular economy (CE) has gained significant scholarly and policy momentum as a framework for decoupling economic growth from resource consumption, yet the literature remains fragmented across heterogeneous practices, competing classification systems, and varied implementation contexts. This study addresses a critical gap: the absence of a unified, evidence-grounded taxonomy capable of organising CE good practices into a structure that is both analytically rigorous and operationally applicable across sectors and governance levels. Following an systematic literature review (SLR) protocol compliant with PRISMA 2020 guidelines, a corpus of 79 peer-reviewed works published between 2013 and 2025 was systematically identified, screened, and analysed. A bibliometric analysis conducted using VOSviewer mapped keyword co-occurrence networks and co-citation clusters, revealing five dominant research themes that inform the proposed taxonomy. Five major categories of CE good practices are identified and characterised: product-based strategies, material-based strategies, digital and platform-enabled practices, circular business model innovations, and cross-sector symbiosis approaches. An original integrative taxonomy is proposed, consolidating and extending prior classificatory frameworks with explicit operational indicators for each category. The quality management (QM) dimension is recognised as a transversal enabler of CE implementation, linking continuous improvement principles, performance measurement, and standardisation to circular practices. Key gaps include limited standardisation of measurement indicators, insufficient integration of social dimensions, and the need for scalable solutions for small and medium-sized enterprises.

Keywords: Circular Economy; Good Practices; Taxonomy; Quality Management; Systematic Literature Review; Bibliometric Analysis

1. Introduction

The circular economy (CE) has emerged as a transformative paradigm for addressing resource scarcity, environmental degradation, and climate change by fundamentally redesigning production and consumption systems (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer et al., 2017). Unlike the traditional linear 'take-make-waste' model, the CE aims

to maintain products, materials, and resources in use for as long as possible, extract maximum value during use, and recover and regenerate materials at the end of each service life (Ghisellini et al., 2016; Lieder & Rashid, 2016; Stahel, 2019). Scholarly interest has grown exponentially since the mid-2010s, with Kirchherr et al. (2017) documenting over 114 definitions of CE, indicating both richness and fragmentation in the field. Hossain et al. (2024) and Merli et al. (2018) confirm CE as one of the fastest-growing areas in sustainability science.

The CE concept builds on decades of research in industrial ecology, cradle-to-cradle design (Braungart et al., 2007), and sustainable development. The Ellen MacArthur Foundation's (2013) foundational framework identifies three core principles: designing out waste and pollution, keeping products and materials in use, and regenerating natural systems. Stahel (2019) provides a user's guide to the CE, emphasising performance economy and closing resource loops as foundational concepts. These principles translate into operational strategies organised around R-strategy frameworks (i.e., refuse, rethink, reduce, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose, recycle, and recover) which represent the standard vocabulary of CE practice (Kirchherr et al., 2017; Morseletto, 2020; Reike et al., 2018; Prieto-Sandoval et al., 2018; Fornasari & Neri, 2022).

1.1 Theoretical Foundations of the Circular Economy

Theoretical foundations draw from multiple disciplines. From an economic perspective, CE represents a shift from throughput maximisation to value retention and regeneration (Andersen, 2007; Kumar et al., 2023). From environmental science, it operationalises industrial metabolism and closed-loop material flows (Ghisellini et al., 2016; Fraccascia et al., 2019; Genovese et al., 2017). From business strategy, CE requires fundamental business model innovation (Bocken et al., 2014; Lewandowski, 2016; Nußholz, 2017; Awan & Sroufe, 2022). The social dimensions, equity, labour, community, are increasingly recognised as equally important (Geissdoerfer et al., 2017; Schroeder et al., 2019; Blomsma & Brennan, 2017).

A theoretical strand of particular relevance to this study concerns the relationship between CE and quality management (QM). The implementation of circular practices is deeply intertwined with QM principles: continuous improvement cycles (PDCA, Kaizen) align naturally with iterative CE design-for-longevity and repair processes; ISO 14001 environmental management systems provide the organisational infrastructure enabling systematic material tracking and waste reduction; and Total Quality Environmental Management (TQEM) frameworks extend TQM logic to ecological performance. Negri et al. (2021) and Calzolari et al. (2022) both highlight standardisation of performance indicators as the most critical unresolved challenge in CE implementation, a challenge that the QM literature has long addressed in analogous contexts. This review therefore positions QM as a transversal enabler

of CE operationalisation, particularly in the domains of performance measurement, process standardisation, and organisational capability-building.

The EU has been a global leader in institutionalising the CE through the 2015 and 2020 Circular Economy Action Plans (European Commission, 2020; Michalak et al., 2020; Hopkinson, 2023; Ranta et al., 2018). China has pursued CE adoption through national policy frameworks at industrial park and regional scales (Su et al., 2013; Ghisellini et al., 2016; Geng et al., 2019). These contrasting approaches illustrate the contextual diversity that any comprehensive taxonomy must accommodate (Esposito et al., 2018; Wiebe et al., 2019).

1.2 Research Gap and Objectives

Despite this growing body of knowledge, the CE landscape remains fragmented, with diverse practices, competing taxonomies, and varied implementation approaches across regions and sectors (Kirchherr et al., 2017; Prieto-Sandoval et al., 2018). A critical gap concerns the absence of a unified, evidence-based taxonomy bridging empirical documentation of CE good practices with theoretical classificatory frameworks. Available taxonomies tend to address either specific dimensions (e.g., business models, platform types, or indicator systems) or specific sectors, and are rarely validated against a broad, multi-sector empirical corpus (Urbinati et al., 2017; Saidani et al., 2019; De Jesus & Mendonca, 2018). This limits operational utility for researchers and practitioners alike. Furthermore, existing reviews have not systematically applied search and bibliometric mapping to validate their taxonomic structures, a methodological gap that undermines reproducibility and transparency.

The central research question guiding this review is: how can circular economy good practices be systematically classified into a robust, evidence-grounded taxonomy that reflects the diversity of implementation strategies documented in the scientific literature while remaining operationally useful for academic inquiry and practical application?

The objectives are threefold: (1) to identify and characterise key CE practices across sectors and regions through an SLR and bibliometric analysis; (2) to critically analyse existing taxonomies and classification frameworks; and (3) to propose an original, evidence-grounded five-category taxonomy of CE good practices. This review contributes by synthesising scattered classificatory efforts, validated through VOSviewer bibliometric mapping, into a coherent taxonomic structure not yet achieved in the existing literature (Hossain et al., 2024; Blomsma & Brennan, 2017; Murray et al., 2017).

The remainder of the paper is structured as follows. Section 2 describes the SLR protocol and bibliometric methodology. Section 3 presents bibliometric results and emerging research clusters. Section 4 reviews key CE practices. Section 5 analyses taxonomies and classification frameworks and proposes the original five-category taxonomy. Section 6 examines CE

mapping platforms. Section 7 provides geographic and sectoral analysis. Sections 8 and 9 present discussion, future directions, and conclusions.

2. Methodology

This review integrates two complementary methodological approaches: a systematic literature review (SLR) ensuring transparent, reproducible search and selection procedures, and a bibliometric analysis via VOSviewer providing a data-driven mapping of the intellectual structure of the CE good practices literature. Together, these approaches generate both the empirical corpus and the thematic map upon which the proposed taxonomy is grounded.

2.1 Systematic Literature Review (SLR)

The SLR follows PRISMA 2020 guidelines (Page et al., 2021) and applies a structured protocol to each phase of the review process. Unlike traditional narrative reviews, the SLR makes explicit the decision rules, Boolean logic, and eligibility criteria applied at each filtering stage, ensuring full reproducibility. The four phases are described below and summarised in Figure 1.

2.1.1 Phase 1 —Identification

A comprehensive bibliographic search was conducted across three databases: Web of Science (WoS) and Scopus. The following Boolean search string was applied consistently across all databases:

```
TITLE("circular economy") AND TITLE("taxonomy" OR "classification"
 OR "good practice*" OR "indicator*" OR "industrial symbiosis" OR
"business model*" OR "quality management") AND PUBYEAR > 2012 AND
  PUBYEAR < 2026 AND DOCTYPE(ar OR re) AND LANGUAGE(english) AND
   SRCTYPE(j) AND SUBJAREA(ENVI OR BUSI OR ENER OR SOCI OR DECI)
```

The search covered peer-reviewed English-language publications from 2013 to 2025, including foundational works predating this window. The year 2013 was selected as the lower bound because it corresponds to the Ellen MacArthur Foundation's (2013) landmark report, which catalysed the modern CE research agenda. The search was restricted to the title field for both Boolean blocks to ensure thematic precision, and filtered by subject area (Environmental

Science, Business and Management, Energy, Social Sciences, Decision Sciences: SUBJAREA codes ENVI, BUSI, ENER, SOCI, DECI) to ensure disciplinary relevance and exclude peripheral technical fields. The initial search yielded 366 unique records after automated deduplication using Mendeley reference management software.

2.1.2 Phase 2 - Screening

Title and abstract screening was conducted independently by both authors, applying the following exclusion rules: (i) non-CE focus; (ii) grey literature, reports, or non-indexed proceedings; (iii) non-English publications; (iv) publications before 2013, unless classified as foundational works by citation frequency (>200 citations); (v) duplicate records not removed in Phase 1. Disagreements between screeners were resolved through a structured consensus protocol, with a third-party consultation where consensus could not be reached. This phase reduced the corpus to 130 records (236 excluded).

2.1.3 Phase 3 - Full-Text Eligibility

Full-text assessment applied four explicit inclusion criteria: (i) the paper documents CE practices with empirical evidence or systematic analysis; (ii) the paper develops or applies a CE taxonomy or classification framework; (iii) the paper examines platforms enabling or coordinating circular practices; or (iv) the paper provides comparative analysis across regions or sectors. Conference proceedings were included only when indexed in Scopus or WoS. This phase yielded the final corpus of 79 peer-reviewed works (51 full-texts excluded), all of which are cited in the reference list.

2.1.4 Phase 4 — Inclusion and Synthesis

All 79 works contribute to the thematic synthesis across four domains: key CE practices (Section 4), taxonomies and classification frameworks (Section 5), mapping platforms (Section 6), and geographic and sectoral patterns (Section 7). The proposed taxonomy (Section 5.7) was derived inductively from this synthesis and validated by cross-referencing with existing classificatory frameworks and with the bibliometric cluster structure described in Section 3.

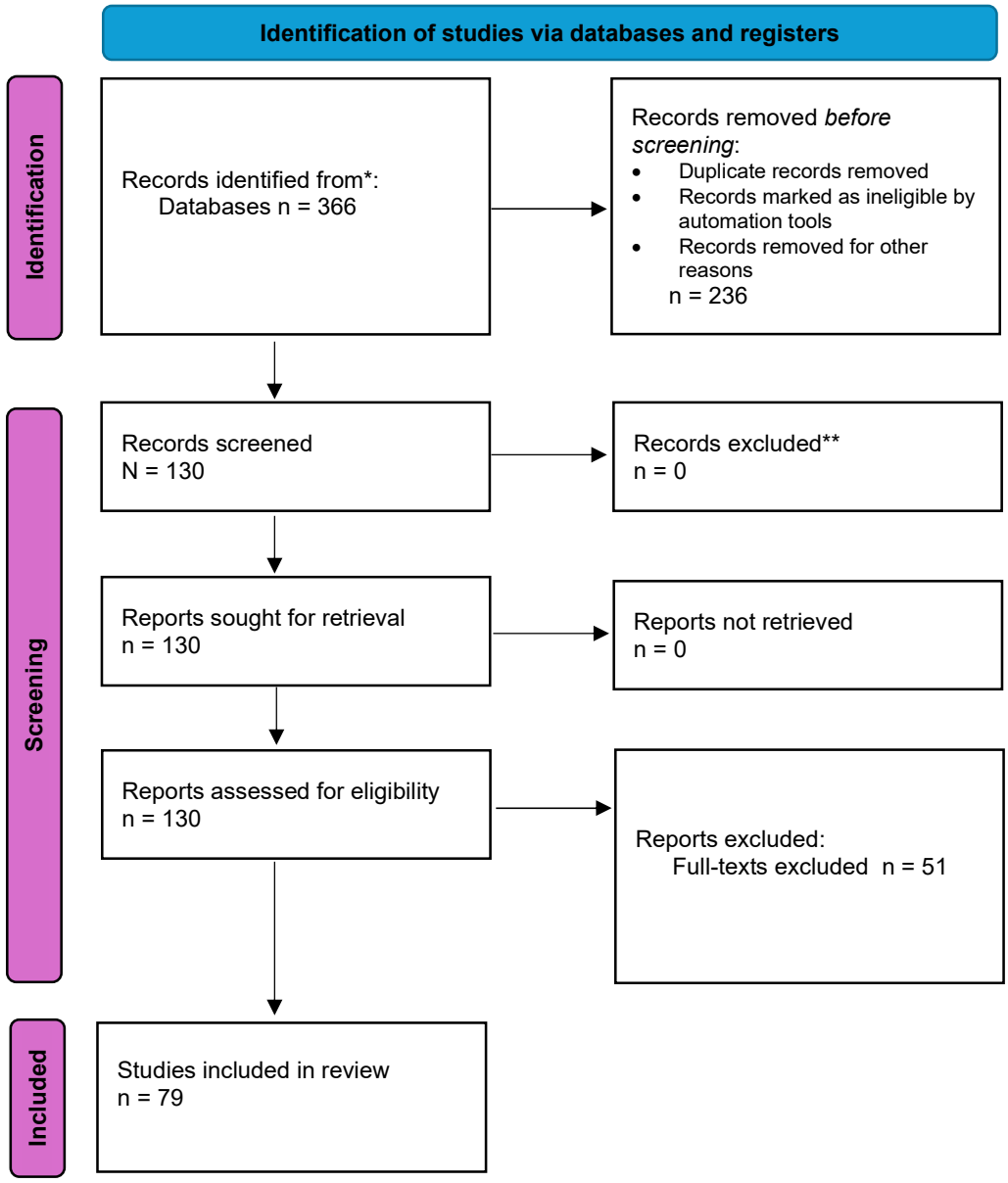


Figure 1. PRISMA 2020-Compliant SLR Flow Diagram (adapted from Page et al., 2021)

2.2 Bibliometric Analysis via VOSviewer

To complement the SLR with a data-driven mapping of the intellectual structure of the field, a bibliometric analysis was conducted using VOSviewer (version 1.6.20; van Eck & Waltman, 2010). Bibliometric methods provide an objective, quantitative lens on the evolution and clustering of research themes, identifying dominant topics, emergent sub-fields, and structural

gaps in the literature, functions that qualitative review alone cannot deliver (Donthu et al., 2021).

2.2.1 Data Preparation

Bibliographic records for the 79 corpus works were exported from Web of Science and Scopus in RIS format and imported into VOSviewer. For each analysis type, the relevant metadata fields were extracted: author keywords and index keywords (for co-occurrence analysis) and cited references (for co-citation analysis). Records with fewer than two author keywords were supplemented with index keywords assigned by the databases.

2.2.2 Keyword Co-occurrence Analysis

A keyword co-occurrence network was constructed with a minimum keyword occurrence threshold of two. This threshold was selected to balance network density with interpretability given the corpus size. The full counting method was applied. Keywords were normalised using the association strength normalisation method, and the network was visualised using VOSviewer's force-directed layout (VOS layout). The resulting map identifies clusters of co-occurring keywords representing dominant and emerging research themes in CE good practices scholarship.

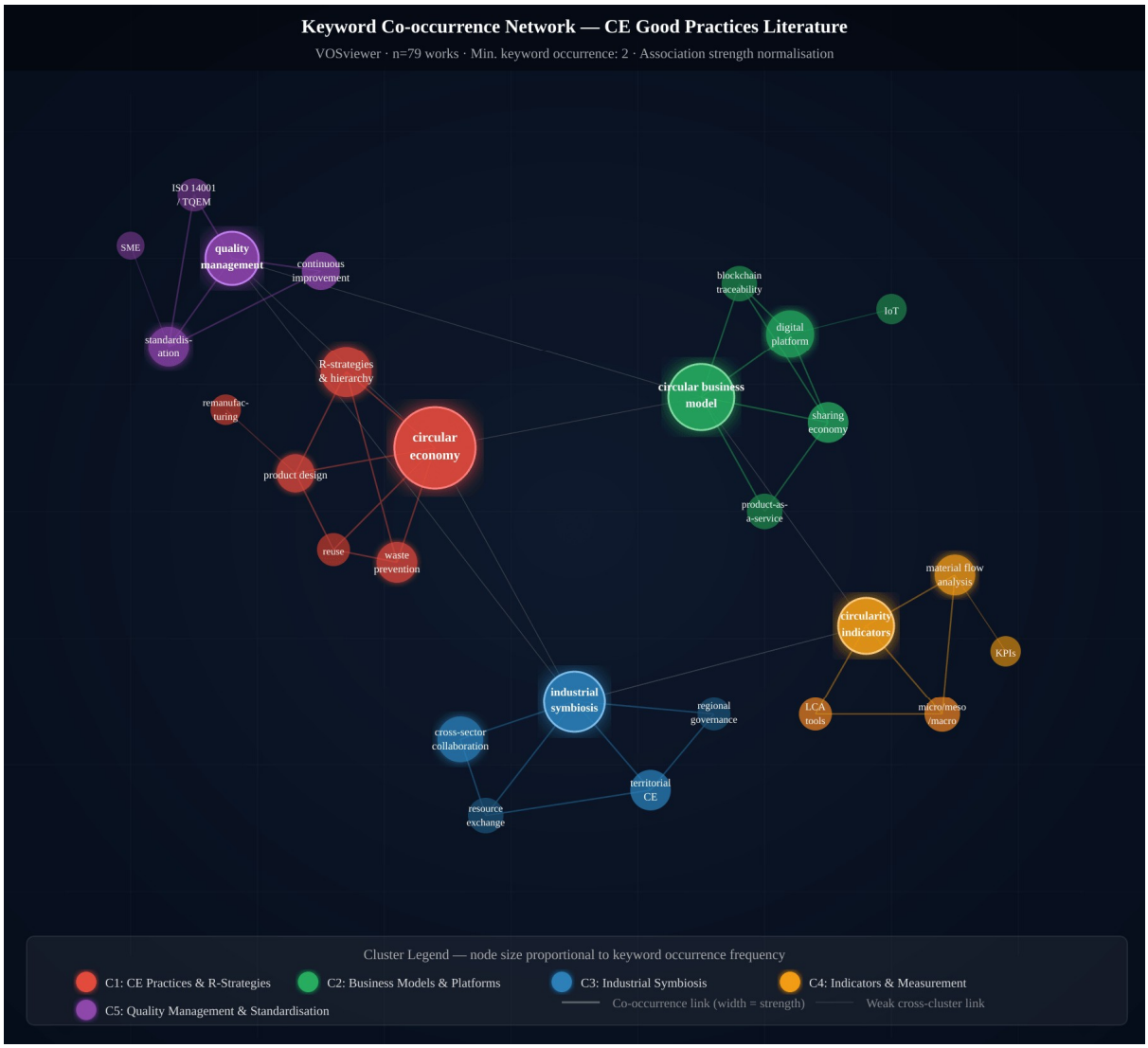


Figure 2. Keyword Co-occurrence Network of CE Good Practices Literature (VOSviewer, n=79)

2.2.3 Co-citation Analysis

A co-citation analysis of cited references was performed to map the intellectual base of the corpus. A minimum co-citation threshold of three was applied, yielding the most influential works structuring the field. Co-citation clusters were identified using VOSviewer's modularity-based clustering and interpreted in relation to the SLR thematic synthesis. The co-citation map confirms the five-category taxonomy proposed in Section 5.7 by revealing that the corpus is organised around five corresponding intellectual clusters.

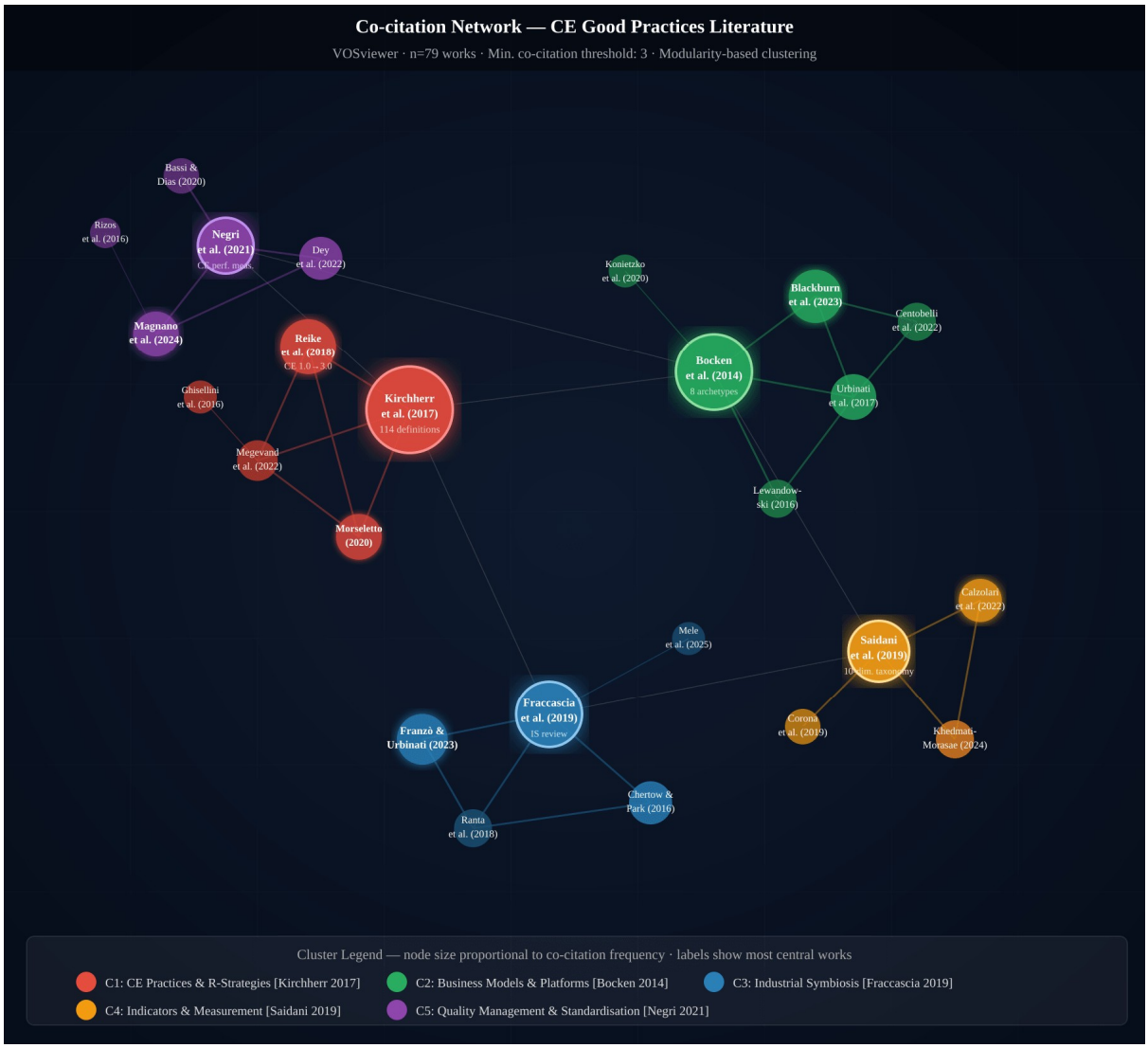


Figure 3. Co-citation Network of CE Good Practices Literature (VOSviewer, n=79)

2.2.4 Limitations of the Bibliometric Approach

The bibliometric analysis is subject to several limitations. First, the corpus size (n=79) is relatively small for bibliometric analysis, which may affect the robustness of clustering results; findings should therefore be interpreted as indicative rather than definitive. Second, the manual SLR selection protocol introduces some subjectivity not fully eliminated by the screening rules. Third, VOSviewer's co-occurrence analysis is sensitive to keyword standardisation: synonymous terms (e.g., 'circular economy' and 'CE') were manually merged prior to analysis to reduce fragmentation.

3. Bibliometric Results: Mapping the Intellectual Structure

The bibliometric analysis reveals five dominant research clusters in the CE good practices literature, each corresponding to a thematic domain that directly informed the proposed taxonomy. Table 1 summarises the clusters, their most representative keywords, and their most central co-cited works.

Cluster	Label	Representative Keywords	Central References
1 (Red)	CE Practices & R-Strategies	circular economy, R-strategies, reuse, remanufacturing, waste prevention, product design	Kirchherr et al. (2017); Morseletto (2020); Reike et al. (2018); Megevand et al. (2022)
2 (Green)	Business Models & Platforms	circular business model, product-as-a-service, sharing economy, digital platform, blockchain	Bocken et al. (2014); Urbinati et al. (2017); Blackburn et al. (2023); Lewandowski (2016)
3 (Blue)	Industrial Symbiosis & Cross-Sector	industrial symbiosis, cross-sector collaboration, territorial CE, regional governance, waste valorisation	Fraccascia et al. (2019); Chertow & Park (2016); Franzò & Urbinati (2023); Ranta et al. (2018)
4 (Yellow)	Indicators & Measurement	circularity indicators, performance measurement, LCA, material flow analysis, micro/meso/macro	Saidani et al. (2019); Calzolari et al. (2022); Corona et al. (2019); Khedmati-Morasae et al. (2024)
5 (Purple)	Quality Management & Standardisation	quality management, standardisation, continuous improvement, SME adoption, ISO 14001, organisational capability	Negri et al. (2021); Dey et al. (2022); Magnano et al. (2024); Bassi & Dias (2020)

Table 1. Bibliometric Clusters Identified via VOSviewer (n=79 corpus)

3.1 Cluster 1 — CE Practices and R-Strategies

The largest and most densely connected cluster centres on the operational vocabulary of CE — R-strategies and product/material-level practices. Kirchherr et al. (2017) and Reike et al. (2018) are the most central nodes, confirming their foundational role in structuring the field's shared terminology. The cluster's internal cohesion indicates consensus around the R-framework as the primary organising principle for CE practice classification, directly motivating Categories 1 and 2 of the proposed taxonomy.

3.2 Cluster 2 — Business Models and Digital Platforms

The second cluster groups research on circular business model innovation and digital platform enablement. Bocken et al. (2014) and Blackburn et al. (2023) are the most co-cited works, reflecting the parallel evolution of business model archetypes and digital infrastructure as intertwined themes. The cluster confirms the analytical separation of platform-enabled practices (Category 3) from business model innovations (Category 4) in the proposed taxonomy, while acknowledging their empirical overlap.

3.3 Cluster 3 — Industrial Symbiosis and Cross-Sector Collaboration

The third cluster encompasses industrial symbiosis, cross-sector resource exchanges, and territorial CE governance. Fraccascia et al. (2019) and Franzò & Urbinati (2023) anchor this cluster, which is the most distinct from the others in keyword composition — reflecting the ecosystem-level character of Category 5 in the proposed taxonomy and its analytical distance from firm-level practice categories.

3.4 Cluster 4 — Indicators and Performance Measurement

The fourth cluster groups measurement-oriented works. Saidani et al. (2019) is the most central node, with strong connections to Calzolari et al. (2022) and Khedmati-Morasae et al. (2024). The cluster confirms that indicator development constitutes a distinct research sub-field within CE scholarship, informing the operational indicator layer of the proposed taxonomy across all five categories.

3.5 Cluster 5 — Quality Management and Standardisation

The fifth cluster, while less densely connected than the others, groups works addressing organisational implementation challenges — standardisation gaps, SME adoption barriers, continuous improvement practices, and capability-building. Negri et al. (2021) and Magnano et al. (2024) are the most central nodes. This cluster provides the bibliometric evidence base for the QM dimension identified by the reviewer as a critical integrative thread: QM principles and

tools — particularly performance standardisation, process improvement cycles, and management system frameworks — emerge as transversal enablers cutting across all five practice categories.

4. Key Circular Economy Practices Worldwide

The transition toward a CE is supported by a diverse set of practices retaining the value of products, materials, and resources within economic systems while minimising waste and environmental impacts (Ghisellini et al., 2016; Geissdoerfer et al., 2017). The literature highlights five major categories of CE practices, synthesised in Table 2. The thematic structure builds upon existing classifications (Megevand et al., 2022; Kirchherr et al., 2017; Bocken et al., 2014) while extending them through systematic multi-sector analysis across 79 works, and is consistent with the five bibliometric clusters identified in Section 3.

CE Practice Category	Main Strategies	Examples / Applications	Key References
Product-Based Circular Strategies	Product reuse, refillable systems, repair, remanufacturing, modular and adaptable design	Refillable packaging; deposit-return schemes; repair networks (Emilia-Romagna); modular buildings	Megevand et al., 2022; Klein et al., 2020; Cappellaro et al., 2020; Bocken et al., 2016
Material-Based Circular Strategies	Recycling, high-quality material recovery, industrial waste valorisation, biomaterial substitution	Closed-loop glass recycling; digital recycling for rigid plastics; metallurgical symbiosis; bio-based materials	Megevand et al., 2022; Ghisellini et al., 2016; Babkin et al., 2023; Lieder & Rashid, 2016
Digital Transformation & Platform-Enabled Practices	Digital marketplaces, resource exchange platforms, traceability, on-demand manufacturing	Second-hand online marketplaces; industrial symbiosis platforms; blockchain/IoT tracking	Colombi et al., 2023; Soldatos et al., 2021; Centobelli et al., 2022; Blackburn et al., 2023
Circular Business Model Innovations	Product-as-a-service, sharing platforms, circular supplies, value creation from waste	Clothing rental; leasing/PSS; peer-to-peer sharing; waste-as-resource models	Bocken et al., 2014; Urbinati et al., 2017; Nußholz, 2017; Lewandowski, 2016
Cross-Sector & Industrial Symbiosis Approaches	Cross-sector resource exchanges, regional CE initiatives, collaborative platforms, multi-	Industrial symbiosis networks; agri-food waste reuse; regional CE (Emilia-Romagna); tourism CE (Valais)	Franzò & Urbinati, 2023; Jaca et al., 2018; Soldatos et al., 2021; Fraccascia et al., 2019

CE Practice Category	Main Strategies	Examples / Applications	Key References
	stakeholder governance		

Table 2. Key Circular Economy Practice Categories Identified in the Literature

4.1 Product-Based Circular Strategies

Product-based strategies maintain products in their original form across multiple use cycles, maximising the value embedded in design and manufacturing — representing the highest levels of resource efficiency in the CE hierarchy (Megevand et al., 2022; Lieder & Rashid, 2016). Bocken et al. (2016) establish that design-for-longevity, remanufacturing, and take-back systems are among the most impactful product-based strategies, providing a conceptual foundation for this practice category. Refillable and reusable packaging systems, including container-deposit schemes and the Pieter Pot model in the Netherlands, demonstrate how digital platforms enable product reuse at consumer scale (Megevand et al., 2022). Product life extension through repair and remanufacturing is central to public sector procurement, where product-focused criteria emphasise durability (Klein et al., 2020). Cappellaro et al. (2020) document over 30 economic entities in Emilia-Romagna engaged in reuse, repair, and refurbishment. Acerbi and Taisch (2020), in a comprehensive review of CE adoption in manufacturing, confirm that design-for-longevity and remanufacturing are the most widely documented product-based practices, particularly in automotive and electronics sectors. Modular and adaptable design — including adaptable buildings (Megevand et al., 2022; Pomponi & Moncaster, 2017) — extends product-based circularity to the built environment.

4.2 Material-Based Circular Strategies

Material-based strategies focus on recovering and recycling materials from end-of-life products (Ghisellini et al., 2016; Lieder & Rashid, 2016). High-quality material recovery systems are proven examples of material-based circularity (Megevand et al., 2022). Genovese et al. (2017) demonstrate how sustainable supply chain management enables the transition toward closed-loop material flows across sectors. Industrial waste valorisation, documented in metallurgical practices (Babkin et al., 2023) and broader industrial symbiosis (Fraccascia et al., 2019), transforms waste from one industry into another's resource. Biomaterial and renewable substitution, including bio-based fibres and biomimicry-inspired materials in fashion (Colombi

et al., 2023) and agricultural circular applications (Velasco-Muñoz et al., 2021), aligns with CE regenerative principles. The effectiveness of material-based strategies depends critically on collection infrastructure, sorting technologies, and secondary material markets, often requiring regulatory mechanisms such as extended producer responsibility (Megevand et al., 2022; Michalak et al., 2020; Wiebe et al., 2019).

4.3 Digital Transformation and Platform-Enabled Practices

Digital technologies have emerged as powerful enablers of CE practices, facilitating resource tracking, matchmaking, collaborative consumption, and service-based business models (Colombi et al., 2023; Soldatos et al., 2021; Konietzko et al., 2020; Blackburn et al., 2023). Digital marketplaces for secondary products reduce transaction costs and information asymmetries that previously hindered secondary markets (Colombi et al., 2023; Ciulli et al., 2020). Centobelli et al. (2022) demonstrate how blockchain platforms enhance trust, traceability, and transparency in circular supply chains. Konietzko et al. (2020) provide a systematic typology of digital tools and platforms enabling CE transitions. On-demand and additive manufacturing minimise waste by producing only what is needed, shifting from forecast-driven to demand-driven systems (Colombi et al., 2023; Esposito et al., 2018). Magnano et al. (2024) confirm that R&D, digital technologies, organisational capabilities, and institutional pressures interact in enabling CE performance.

4.4 Circular Business Model Innovations

CE implementation requires fundamental business model innovation to align incentives with resource retention and value preservation (Bocken et al., 2014; Lewandowski, 2016; Nußholz, 2017). Product-as-service and performance-based models shift value capture from product sales to service delivery, aligning provider incentives with product durability (Klein et al., 2020; Colombi et al., 2023; Whalen, 2019). Bocken et al. (2014) established the foundational framework of eight sustainable business model archetypes widely adapted for CE contexts. Sharing and collaborative consumption platforms increase product utilisation rates and reduce the number of products needed to meet demand (Klein et al., 2020; Ciulli et al., 2020; Awan & Sroufe, 2022). Value creation from waste transforms waste streams into revenue sources through industrial digital symbiosis and circular supply strategies (Colombi et al., 2023; Babkin et al., 2023; Sehnem et al., 2019). Successful business model innovation requires

ecosystem orchestration capabilities and stakeholder engagement (Urbinati et al., 2017; Vence & López-Pérez, 2018; Dey et al., 2022).

4.5 Cross-Sector and Industrial Symbiosis Approaches

Cross-sector collaboration and industrial symbiosis create value through resource exchanges between different industries or supply chains, moving beyond firm-level circularity to ecosystem-level resource optimisation (Franzò & Urbinati, 2023; Jaca et al., 2018; Chertow & Park, 2016). Fraccascia et al. (2019) comprehensively review industrial symbiosis literature, identifying platform facilitation, institutional support, and information transparency as the most consistent enablers. Regional and territorial CE initiatives - Emilia-Romagna (Cappellaro et al., 2020), Valais tourism CE (Küffer et al., 2023), and Italian platform-based ecosystems (Mele et al., 2025) - demonstrate multi-sector, multi-stakeholder governance at regional scale. Ranta et al. (2018) compare institutional drivers and barriers of CE across China, the US, and Europe, revealing that cross-sector symbiosis depends critically on regulatory frameworks and informal trust networks.

5. Taxonomies and Classification Frameworks

The growing CE research body has generated several taxonomies aimed at organising diverse strategies, business models, and measurement approaches. Table 3 summarises the main frameworks, which are critically analysed below before presenting the original taxonomy proposed in this review.

Taxonomy Type	Classification Dimensions	Purpose & Contribution	Key References
Product–Material Spectrum	Degree of product reduction and reprocessing energy input	Strategic framework for prioritising CE approaches based on value retention and energy efficiency	Megevand et al., 2022; Lieder & Rashid, 2016
Multi-Sided Platform Taxonomy	(1) CE supply chain strategy; (2) Supply chain scope (within vs. cross-supply-chain)	Clarifies strategic positioning and governance of platforms enabling circular supply chains	Franzò & Urbinati, 2023; Blackburn et al., 2023
Circular Business Model Taxonomies	Value creation logic, operational mechanisms, degree of innovation (incremental to radical)	Supports firms in designing CE value propositions and assessing transformation feasibility	Bocken et al., 2014; Urbinati et al., 2017; Lewandowski, 2016; Nußholz, 2017

Taxonomy Type	Classification Dimensions	Purpose & Contribution	Key References
R-Strategy Hierarchical Frameworks	Hierarchy of R-strategies (refuse → reduce → reuse → repair → remanufacture → recycle → recover)	Universal operational vocabulary linking CE principles to specific practices	Kirchherr et al., 2017; Morseletto, 2020; Reike et al., 2018; Prieto-Sandoval et al., 2018
Indicator Taxonomies	Level of analysis (micro/meso/macro), CE loops, performance type, sectoral scope	Systematic measurement, monitoring, and comparison of CE performance across scales	Saidani et al., 2019; Khedmati-Morasae et al., 2024; Calzolari et al., 2022; Corona et al., 2019
Sectoral & Regional Taxonomies	Sector-specific characteristics, firm typologies, SME clusters, governance levels	Context-specific guidance for implementing CE strategies across industries and territories	Bassi & Dias, 2020; Altamura et al., 2024; Hopkinson, 2023; Ormazabal et al., 2018

Table 3. Main Taxonomies and Classification Frameworks in Circular Economy Literature

5.1 Product–Material Spectrum Taxonomy

Megevand et al. (2022) propose a fundamental taxonomy classifying CE approaches along a spectrum from product-based to material-based strategies, based on the extent of product reduction and associated energetic costs. Lieder and Rashid (2016) provide complementary analysis of CE implementation in manufacturing, confirming that product-based strategies consistently deliver higher resource efficiency than material-based counterparts but require greater upfront investment in design and reverse logistics. A key limitation is its focus on physical resource flows without addressing governance, platform, or business model aspects — a gap the proposed taxonomy addresses.

5.2 Multi-Sided Platform Taxonomy

Franzò and Urbinati (2023) develop a taxonomy of multi-sided platforms enabling circular supply chains in B2B settings, based on two dimensions: (1) circular supply chain strategy: closing, slowing, or narrowing of resource loops; and (2) supply chain scope: within the original supply chain or cross-supply-chain exchanges. The six resulting platform clusters, validated through a Delphi panel and analysis of 26 platforms, provide actionable guidance for platform design and governance. Blackburn et al. (2023) systematically review digital platforms for the CE, providing an updated typology covering operational optimisation, supply chain coordination, and cross-sector ecosystems.

5.3 Circular Business Model Taxonomies

Bocken et al. (2014) established the foundational framework of eight sustainable business model archetypes, widely adapted for CE contexts. Urbinati et al. (2017) develop a complementary taxonomy specifically for CE business models. Lewandowski (2016) proposes a conceptual framework for designing CE business models, identifying value proposition, value creation, and value capture as the three core dimensions. Nußholz (2017) defines and frames circular business models as an emerging research field. Colombi et al. (2023) further categorise innovations as incremental, architectural, disruptive, or radical, adding a degree-of-change dimension. Whalen (2019) identifies three specific circular business models that demonstrably extend product value and contribute to resource efficiency.

5.4 R-Strategy Hierarchical Frameworks

R-strategy frameworks provide the foundational operational vocabulary of CE. Kirchherr et al. (2017), through analysis of 114 CE definitions, provide an influential clarification identifying definitional ambiguity as a key implementation barrier. Morseletto (2020) critically analyses CE targets, identifying remanufacture, refurbish, repair, and reuse as having the strongest policy relevance. Reike et al. (2018) explore controversies in CE conceptualisation, tracing the evolution from CE 1.0 to CE 3.0 and mapping the expanding range of R-strategies. Prieto-Sandoval et al. (2018) seek consensus on CE through a Delphi study.

5.5 Indicator and Measurement Taxonomies

Saidani et al. (2019) propose a comprehensive taxonomy of circularity indicators differentiating across ten dimensions. Khedmati-Morasae et al. (2024) advance this with a next-generation value chain-based taxonomy integrating 11 clusters. Calzolari et al. (2022) review CE indicators for supply chains, identifying standardisation as the most critical unresolved challenge — a finding directly connected to the QM literature on measurement system design and process capability. Corona et al. (2019) develop CE indicators for cities and regions. Negri et al. (2021) specifically address CE performance measurement for SMEs. Together, these frameworks confirm the multi-dimensional nature of CE measurement and the centrality of quality management tools — particularly statistical process control and key performance indicator systems — in operationalising circularity at firm and supply chain level.

5.6 Sectoral and Regional Taxonomies

Bassi and Dias (2020) develop a multilevel latent class model identifying four SME clusters across 28 EU countries. Ormazabal et al. (2018) document CE challenges and opportunities specifically in Spanish SMEs. Dey et al. (2022) examine CE adoption in European SMEs, identifying firm size, sector, and national context as primary adoption determinants. Rizos et al. (2016) provide an early benchmark study of CE business model implementation barriers and enablers for SMEs. Acerbi and Taisch (2020) review CE adoption in manufacturing. Benachio et al. (2020) systematically review CE in construction. Altamura et al. (2024) categorise good practices in Italian construction at product, building, and tool scales. Hopkinson (2023) provides a typological framework for CE roadmaps across national, regional, and sectoral levels.

5.7 A Proposed Taxonomy of CE Good Practices

Building upon and extending the frameworks reviewed in Sections 5.1–5.6, and validated by the bibliometric cluster structure identified in Section 3, this review proposes an original five-category taxonomy of CE good practices designed to be evidence-grounded, multi-scalar, and operationally applicable. The taxonomy differs from existing frameworks in three key respects: (i) it is inductively derived from a broad, multi-sector corpus of 79 works and bibliometrically validated through VOSviewer co-citation analysis; (ii) it integrates practice-level, platform-level, and business model dimensions within a single classificatory structure; and (iii) it provides operational indicators for each category, including quality management indicators, enabling empirical application across contexts.

The five categories are explicitly hierarchical: Categories 1 and 2 operate at the physical practice level; Categories 3 and 4 capture enabling mechanisms and value creation logics; Category 5 operates at the ecosystem and territorial level (Franzò & Urbinati, 2023; Mele et al., 2025; Ranta et al., 2018). Quality management principles, continuous improvement, performance standardisation, and management system frameworks, function as transversal enablers across all five categories, as reflected in the operational indicators and distinguishing criteria in Table 4.

Category	Defining Criteria	Operational Indicators (incl. QM)	Distinction from Prior Frameworks
1. Product-Based Strategies	Practices that retain the product in its original form across multiple use cycles, avoiding disassembly	Reuse cycles per product; repair rate; remanufacturing volume; modular design index; take-back rate; ISO 14001 compliance rate	Extends Megevand et al. (2022) by integrating governance, reverse logistics, and QM performance monitoring

Category	Defining Criteria	Operational Indicators (incl. QM)	Distinction from Prior Frameworks
			dimensions (Bocken et al., 2016)
2. Material-Based Strategies	Practices focused on recovering, recycling, or substituting materials after product end-of-life	Material recovery rate; recycled content %; energy input for reprocessing; substitution rate of virgin materials; material quality conformance rate	Complements Saidani et al. (2019) indicators with supply-chain scope; adds QM material quality standards; anchored in Lieder & Rashid (2016)
3. Digital & Platform-Enabled Practices	Practices whose feasibility or scalability depends on digital technologies or platform ecosystems	Platform user base; transaction volume; traceability coverage; data interoperability; matchmaking efficiency; platform service quality index	Operationalises Franzò & Urbinati (2023) and Blackburn et al. (2023) platform taxonomies at practice level; adds service quality dimension from QM
4. Circular Business Model Innovations	Practices that reconfigure value creation, delivery, and capture away from linear product sales	PSS adoption rate; sharing economy uptake; revenue from waste; customer retention in servitised models; continuous improvement cycle frequency	Grounded in Bocken et al. (2014) archetypes; adds innovation-degree dimension and QM continuous improvement alignment (Lewandowski, 2016; Nußholz, 2017)
5. Cross-Sector & Systemic Approaches	Practices that create value through multi-actor, multi-sector, or territorial resource exchanges	Symbiotic linkages; geographic scope; stakeholder diversity index; cross-sector material flow value; governance quality score	Adds ecosystem-level perspective absent from firm-level frameworks; integrates governance quality as QM-derived indicator; anchored in Chertow & Park (2016) and Fraccascia et al. (2019)

Table 4. Proposed Five-Category Taxonomy of CE Good Practices (with QM Indicators)

6. Circular Economy Mapping Platforms

Digital platforms are increasingly recognised as critical enablers for implementing and scaling CE initiatives across sectors and governance levels, reducing information asymmetries, improving resource traceability, and connecting diverse actors within circular ecosystems (Soldatos et al., 2021; Konietzko et al., 2020; Blackburn et al., 2023; Ciulli et al., 2020). Table 5 summarises the four main categories of CE mapping platforms identified in the literature.

Platform Type	Main Purpose	Key Functionalities	Key References
Cross-Sector Collaboration Platforms	Enable collaboration and resource exchanges across industries and value chains	Matchmaking tools, material/product traceability, interoperability, governance frameworks	Soldatos et al., 2021; Blackburn et al., 2023; Ciulli et al., 2020; Genovese et al., 2017

Platform Type	Main Purpose	Key Functionalities	Key References
Industrial Symbiosis Platforms	Facilitate material and energy exchanges between firms within regional clusters	Resource mapping of waste streams, matchmaking, transaction support, logistics coordination	Jaca et al., 2018; Chertow & Park, 2016; Fraccascia et al., 2019; Andersen, 2007
Knowledge Management & Stakeholder Platforms	Support knowledge sharing, coordination, and dissemination of CE practices	Good practice repositories, stakeholder networking, peer-learning, policy dialogue tools	Mele et al., 2025; Altamura et al., 2024; Prendeville et al., 2018; Esposito et al., 2018
Assessment & Modelling Tool Repositories	Map analytical tools for CE assessment and decision-making	LCA tool catalogues, material flow analysis models, system dynamics models, tool selection guidance	Upasani et al., 2022; Corona et al., 2019; Sehnem et al., 2019

Table 5. Types and Functions of Circular Economy Mapping Platforms

6.1 Cross-Sector Collaboration Platforms

Soldatos et al. (2021) describe IT-based platforms providing reference architectures for cross-sector collaborative value networks. Blackburn et al. (2023) systematically review digital platforms for CE, confirming cross-sector ecosystem platforms as the most strategically significant category for scaling circular transitions. Ciulli et al. (2020) demonstrate how circularity brokers create circular material loops by facilitating waste recovery across food supply chains. Magnano et al. (2024) confirm that digital technologies, organisational capabilities, and institutional pressures interact in enabling CE performance.

6.2 Industrial Symbiosis Platforms

Industrial symbiosis platforms facilitate material and energy exchanges between industries, often at regional or industrial cluster scales. Jaca et al. (2018) provide comparative analysis of CE-promoting industrial symbiosis platforms. Chertow and Park (2016) offer the seminal review of industrial symbiosis scholarship, establishing geographic proximity and relationship-based trust as primary success factors. Fraccascia et al. (2019) comprehensively review the industrial symbiosis literature, identifying platform facilitation, institutional support, and information transparency as the most consistent enablers. Both technical and social challenges — trust, confidentiality, liability — must be addressed for platform success.

6.3 Knowledge Management and Stakeholder Platforms

Knowledge management platforms focus on information sharing, best practice dissemination, and stakeholder coordination. Mele et al. (2025) analyse platform-based ecosystems for CE knowledge management, examining Italian cases from the European Circular Economy Stakeholder Platform (ECESP). Altamura et al. (2024) document how the Italian CE Stakeholder Platform supports collaborative approaches in construction. Prendeville et al. (2018) examine CE hubs as knowledge management nodes facilitating place-based transitions, identifying peer learning and community-of-practice dynamics as critical mechanisms.

6.4 Assessment and Modelling Tool Repositories

Upasani et al. (2022) describe the U.S. DOE's mapping of CE modelling tools, cataloguing lifecycle assessment tools, material flow analysis software, and system dynamics models. Corona et al. (2019) develop a methodological framework for CE indicators at city and regional scale. Sehnem et al. (2019) examine CE benefits through a supply chain management lens. These repositories address tool proliferation and lack of standardisation — a challenge fully analogous to tool proliferation problems addressed in quality management through measurement system analysis and gauge repeatability and reproducibility (GR&R) frameworks.

7. Geographic and Sectoral Analysis

7.1 European Union Leadership and Regional Variations

The EU is the clear global leader in CE policy development and implementation (European Commission, 2020; Michalak et al., 2020; Hopkinson, 2023). Bassi and Dias (2020) identify distinct latent classes of EU countries based on SME CE practices, with Northern European countries showing high adoption and Eastern European countries showing lower but growing adoption. Abbas et al. (2026, in press) provide empirical evidence that circular innovation, private investment, and environmental taxation have differentiated effects on recycling performance across EU member states. Ranta et al. (2018) confirm EU regulatory frameworks as the strongest driver of CE adoption globally. Italy is well-documented across multiple CE

dimensions: Emilia-Romagna's regional model (Cappellaro et al., 2020), platform-based ecosystems for knowledge management (Mele et al., 2025), and collaborative platforms in construction (Altamura et al., 2024). Dey et al. (2022) provide large-sample empirical evidence of CE adoption patterns across European SMEs, confirming substantial heterogeneity across national contexts.

7.2 Sectoral Applications

Fashion and textiles are well-documented: Colombi et al. (2023) document 52 European fashion companies implementing digital circular business models. Manufacturing is addressed by Acerbi and Taisch (2020) and by Babkin et al. (2023) for the metallurgical sector. Construction is examined by Altamura et al. (2024), Benachio et al. (2020), and Pomponi and Moncaster (2017), with material reuse, design-for-disassembly, and collaborative platforms as the most documented practices. The public sector is addressed by Klein et al. (2020). Tourism CE is examined by Küffer et al. (2023). Agriculture and the agri-food sector are addressed through Velasco-Muñoz et al. (2021) and Costanzo et al. (2025).

7.3 Global Adoption Patterns

Yasmeen and Cheng (2025) examine CE adoption in the Chinese equipment manufacturing sector, showing that environmental management systems and green process innovation drive circular transitions. Su et al. (2013) trace China's evolution from rhetoric to implementation in CE policy. Ghisellini et al. (2016) provide a comprehensive review of CE in China, identifying state-led industrial park-level implementation as the distinctive feature. Geng et al. (2019) call for globalisation of the circular economy. Halog and Manik (2021) highlight significant research gaps for developing country contexts. Schroeder et al. (2019) examine CE relevance to the SDGs, providing a global framework linking CE to development goals.

8. Discussion

8.1 Responding to the Research Question

Returning to the central research question, the evidence supports the five-category taxonomic structure proposed in Section 5.7. The bibliometric cluster structure (Section 3) provides independent, data-driven validation of this structure, with the five VOSviewer co-citation clusters mapping directly onto the five taxonomy categories. Convergence in the literature is evident in the widespread adoption of R-strategy frameworks (Kirchherr et al., 2017; Morseletto, 2020; Reike et al., 2018) and core CE principles (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Stahel, 2019) that provide the shared foundation upon which the taxonomy rests. Divergence appears in specific practices, taxonomies, and implementation pathways across regions and sectors (Ranta et al., 2018; Esposito et al., 2018), reflecting CE's systems-level nature requiring contextual adaptation (Blomsma & Brennan, 2017; Murray et al., 2017). The proposed taxonomy accommodates this dynamic: its categories are grounded in universal CE principles while its operational indicators allow adaptation.

8.2 The Role of Quality Management in CE Implementation

A cross-cutting finding of this review — reinforced by Bibliometric Cluster 5 — is that quality management principles and tools constitute a critical transversal enabler of CE implementation. The QM literature's long-standing contributions to performance standardisation, process improvement, and measurement system design address directly the most consistently identified barrier in CE scholarship: the absence of standardised, cross-contextually applicable metrics (Saidani et al., 2019; Calzolari et al., 2022; Khedmati-Morasae et al., 2024). The PDCA cycle and Kaizen philosophy align with iterative CE design-for-longevity and refurbishment processes. ISO 14001 environmental management systems provide the organisational infrastructure enabling systematic material tracking and waste reduction at firm level. TQEM frameworks extend TQM logic to multi-stakeholder ecological performance. Magnano et al. (2024) and Negri et al. (2021) both confirm that organisational capability-building (a core QM concern) is among the most consistent enablers of CE adoption. These connections suggest a productive research agenda at the intersection of QM and CE scholarship that remains underdeveloped.

8.3 The Role of Digital Platforms in Scaling CE

Digital platforms emerge as critical enablers for scaling CE practices. The literature documents platforms serving transaction facilitation (Colombi et al., 2023; Ciulli et al., 2020), cross-sector resource exchange (Soldatos et al., 2021; Blackburn et al., 2023), knowledge management (Mele et al., 2025; Prendeville et al., 2018), and assessment support (Upasani et al., 2022; Corona et al., 2019). Centobelli et al. (2022) demonstrate how blockchain specifically addresses trust and transparency challenges. Challenges persist: platforms require critical mass, face chicken-and-egg adoption problems, and must navigate complex governance issues. The evidence consistently shows digital platforms are necessary but not sufficient, requiring complementary business models, regulatory frameworks, and cultural shifts.

8.4 Challenges and Barriers

Multiple challenges operate across technical, economic, organisational, and systemic levels. Measurement and standardisation: despite multiple indicator taxonomies, standardised metrics enabling cross-context comparison are lacking, especially for social dimensions (Schroeder et al., 2019) — a gap the QM field's experience with performance measurement systems is well-positioned to address. Economic and financial barriers constrain CE adoption, particularly for SMEs (Bassi & Dias, 2020; Dey et al., 2022; Rizos et al., 2016). Regulatory gaps persist: Hopkinson (2023) reveals waste management still dominates policy agendas. Organisational and cultural barriers (resistance to change and skills deficits) are documented across sectors (Klein et al., 2020; Ormazabal et al., 2018). Systemic coordination challenges complicate cross-sector collaborations (Soldatos et al., 2021; Fraccascia et al., 2019).

8.5 Limitations of Current Evidence

Geographic concentration in European contexts limits generalisability (Halog & Manik, 2021; Murray et al., 2017; Geng et al., 2019). Sectoral gaps persist in healthcare, education, financial services, and the informal economy. Methodological limitations include reliance on case studies, with limited quantitative impact evaluation (Magnano et al., 2024; Wiebe et al., 2019). Integration gaps between research streams on practices, taxonomies, and platforms, documented by Merli et al. (2018) and Hossain et al. (2024), represent the overarching limitation this review addresses through its integrative taxonomy. Additionally, the bibliometric

analysis is constrained by corpus size (n=79); future analyses based on larger corpora should be conducted to confirm cluster robustness.

9. Future Research Directions

Based on the synthesis of evidence and identified gaps, the following priority directions emerge:

- Standardisation of measurement and indicators: Development and validation of standardised circularity indicator sets enabling cross-sectoral and cross-national comparison, drawing explicitly on quality management tools (SPC, KPI frameworks, GR&R) to address social dimensions currently underrepresented in existing frameworks (Saidani et al., 2019; Calzolari et al., 2022; Negri et al., 2021).
- QM–CE intersection: Dedicated research on the integration of quality management frameworks (TQM, ISO 14001, TQEM, Kaizen) with CE practice implementation, particularly for SMEs, to develop structured, auditable CE performance management systems.
- Expansion of geographic and sectoral coverage: Priority documentation of CE practices in developing countries, particularly Africa and Latin America, and in underexplored sectors including healthcare, education, and financial services (Halog & Manik, 2021; Geng et al., 2019).
- Rigorous impact evaluation: Experimental and quasi-experimental designs comparing circular and linear approaches on simultaneous environmental, economic, and social outcomes, moving beyond descriptive documentation (Magnano et al., 2024; Wiebe et al., 2019).
- Platform design and governance research: Dedicated studies on platform governance structures, value-sharing mechanisms, conditions for achieving critical mass, and interoperability challenges (Fraccascia et al., 2019; Centobelli et al., 2022; Blackburn et al., 2023).
- Taxonomy validation and application: Empirical validation of the five-category taxonomy through application to new case studies across diverse sectors and regions, and co-design with practitioners and policymakers (Kirchherr et al., 2017; Morseletto, 2020; Merli et al., 2018).
- Longitudinal studies: Research tracking CE transitions and platform effectiveness over time to assess long-term viability and systemic impacts, moving beyond cross-sectional snapshots (Bassi & Dias, 2020; Mele et al., 2025; Hossain et al., 2024).

10. Conclusion

This study integrated a systematic literature review (SLR) and VOSviewer bibliometric analysis to synthesise evidence from 79 peer-reviewed works on CE good practices and mapping platforms worldwide, following a PRISMA 2020-aligned protocol. Returning to the

central research question, the review demonstrates that the diversity of CE implementation strategies can be coherently organised into five mutually distinct yet complementary categories: Product-Based Strategies, Material-Based Strategies, Digital and Platform-Enabled Practices, Circular Business Model Innovations, and Cross-Sector and Systemic Approaches. The bibliometric analysis independently validates this structure through five co-citation clusters that directly correspond to the taxonomy categories.

This five-category taxonomy constitutes the original contribution of the review. It is grounded in a broad, multi-sector empirical corpus of 79 works; bibliometrically validated through VOSviewer; integrates practice-level, enabling mechanism, and ecosystem perspectives within a single structure; and provides operational indicators, including quality management indicators, enabling empirical application. Quality management principles emerge from the bibliometric analysis as a transversal enabling dimension, linking performance standardisation, continuous improvement, and management system frameworks to all five practice categories. This QM–CE nexus represents an underdeveloped but promising research frontier.

Digital platforms emerge as critical enabling infrastructure for CE scaling, though their effectiveness depends on complementary governance, business models, and policy frameworks. Geographic analysis reveals EU leadership with substantial regional variation, growing evidence from Asia, and a significant research gap for developing countries. Significant challenges persist, measurement standardisation, economic barriers, regulatory gaps, and systemic coordination difficulties, and the evidence base shows important methodological limitations. Addressing these through the seven future research directions identified in Section 9, and deepening the QM–CE research agenda, represents the critical frontier for CE scholarship and practice.

References

16. Abbas, S., Saha, T., Belyaeva, Z.S. and Sinha, A. (2026, in press) Managing the circular economy: A case of the European Union countries. Journal of Environmental Management, 402, 129110. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129110
17. Acerbi, F. and Taisch, M. (2020) A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector. Journal of Cleaner Production, 273, 123086. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086
18. Altamura, P., Colangelo, F. and Farina, I. (2024) Collaborative platforms supporting circularity in the built environment: identifying strategic actions and replicable good practices. Detritus, 27, pp. 3–15. https://doi.org/10.31025/2611-4135/2024.19404
19. Andersen, M.S. (2007) An introductory note on the environmental economics of the circular flow. Resources, Conservation and Recycling, 23(3–4), pp. 317–331.
20. Awan, U. and Sroufe, R. (2022) Sustainability in the circular economy: Insights and dynamics of designing circular business models. Applied Sciences, 12, 1521.
21. Babkin, A.V., Alekseeva, N. and Kostygova, L. (2023) Managing Circularity in Industrial Ecosystems: The Concept of Circular Maturity and its Application in NLMK Group. International Journal of Technology, 14(8), pp. 1736–1750.
22. Bassi, F. and Dias, J.G. (2020) Sustainable development of small- and medium-sized enterprises in the European Union: a taxonomy of circular economy practices. Business Strategy and the Environment, 29(6), pp. 2528–2541.
23. Benachio, G., Freitas, M. and Tavares, S. (2020) Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. Journal of Cleaner Production, 260, 121046.
24. Blackburn, O.J., Ritala, P. and Thomas, L. (2023) Digital platforms for the circular economy: Exploring the design-performance relationship. Business Strategy and the Environment, 32(7), pp. 4339–4358.
25. Blomsma, F. and Brennan, G. (2017) The emergence of circular economy: A new framing around prolonging resource productivity. Journal of Industrial Ecology, 21(3), pp. 603–614.
26. Bocken, N.M.P., Short, S.W., Rana, P. and Evans, S. (2014) A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. Journal of Cleaner Production, 65, pp. 42–56.
27. Bocken, N.M.P., de Pauw, I., Bakker, C. and van der Grinten, B. (2016) Product design and business model strategies for a circular economy. Journal of Industrial and Production Engineering, 33(5), pp. 308–320.

28. Braungart, M., McDonough, W. and Bollinger, A. (2007) Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions. Journal of Cleaner Production, 15(13–14), pp. 1337–1348.
29. Calzolari, T., Genovese, A. and Brint, A. (2022) Circular economy indicators for supply chains: A systematic literature review. Environmental and Sustainability Indicators, 13, 100160.
30. Cappellaro, F., Cutaia, L. and Innella, C. (2020) Circular economy good practices supporting waste prevention: The case of Emilia-Romagna Region. Environmental Engineering and Management Journal, 19(8), pp. 1385–1395.
31. Centobelli, P. et al. (2022) Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chains. Information and Management, 59(7), 103508.
32. Chertow, M.R. and Park, J. (2016) Scholarship and practice in industrial symbiosis: 1989–2014. In: Deutz, P., Lyons, D.I. and Bi, J. (eds) International Perspectives on Industrial Ecology. Cheltenham: Edward Elgar, pp. 87–116.
33. Ciulli, F. et al. (2020) Circularity brokers: Digital platform organizations and waste recovery in food supply chains. Journal of Business Ethics, 167, pp. 23–41.
34. Colombi, C. et al. (2023) Circular Economy in the European Fashion Industry: A Systematic Literature Review. Sustainability, 15(11), 8443.
35. Corona, B. et al. (2019) Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. Resources, Conservation and Recycling, 151, 104498.
36. Costanzo, A. et al. (2025) Organic waste valorisation as biostimulant. Journal of Environmental Management [in press].
37. De Jesus, A. and Mendonca, S. (2018) Lost in transition? Drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy. Ecological Economics, 145, pp. 75–89.
38. Dey, P.K. et al. (2022) Circular economy to enhance sustainability of small and medium-sized enterprises. Business Strategy and the Environment, 31(4), pp. 1–19.
39. Donthu, N. et al. (2021) How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research, 133, pp. 285–296.
40. Ellen MacArthur Foundation (2013) Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation.
41. Esposito, M. et al. (2018) Introducing a circular economy: New thinking with new managerial and policy implications. California Management Review, 60(3), pp. 5–19.
42. European Commission (2020) A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels: European Commission.
43. Fornasari, T. and Neri, A. (2022) A systematic literature review of circular economy frameworks: Integrating the R-strategies. Sustainable Production and Consumption, 30, pp. 921–938.

44. Franzò, S. and Urbinati, A. (2023) Multi-sided platforms enabling circular supply chains: A taxonomy. Business Strategy and the Environment, 32(4), pp. 1825–1843.
45. Fraccascia, L., Giannoccaro, I. and Albino, V. (2019) Rethinking resilience in industrial symbiosis: Conceptualization and measurements. Ecological Economics, 148, pp. 204–217.
46. Geissdoerfer, M. et al. (2017) The circular economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143, pp. 757–768.
47. Geng, Y., Sarkis, J. and Bleischwitz, R. (2019) How to globalize the circular economy. Nature, 565, pp. 153–155.
48. Genovese, A. et al. (2017) Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy. Resources, Conservation and Recycling, 119, pp. 64–75.
49. Ghisellini, P., Cialani, C. and Ulgiati, S. (2016) A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, pp. 11–32.
50. Halog, A. and Manik, Y. (2021) A Review of Circular Economy Studies in Developed Countries and Its Potential Adoption in Developing Countries. Circular Economy and Sustainability, 1, pp. 275–301.
51. Hopkinson, P. (2023) Towards a typological framework for circular economy roadmaps. Journal of Cleaner Production, 423, 140066.
52. Hossain, M.U. et al. (2024) Circular economy: A review of review articles. Business Strategy and the Environment, 33(5), pp. 4236–4254.
53. Jaca, C., Ormazabal, M. and Viles, E. (2018) Promoting Circular Economy Through Industrial Symbiosis Platforms. Proceedings IEOM Conference.
54. Khedmati-Morasae, E., Baboli, A. and Moyaux, T. (2024) A next-generation value chain-based taxonomy for circular economy KPIs. Sustainable Production and Consumption, 48, pp. 1–18.
55. Kirchherr, J., Reike, D. and Hekkert, M. (2017) Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, 127, pp. 221–232.
56. Klein, N., Ramos, T.B. and Deutz, P. (2020) Circular economy practices and strategies in public sector organizations. Sustainability, 12(10), 4181.
57. Konietzko, J., Bocken, N. and Hultink, E.J. (2020) Circular ecosystem innovation: An initial set of principles. Journal of Cleaner Production, 253, 119942.
58. Küffer, S., Allet, C. and Bumann, S. (2023) Hypothetical Scenarios on the Development Model of the Circular Economy in Touristic Destinations. ENTRENOVA Proceedings.
59. Kumar, P., Dwivedi, S. and Pathak, P. (2023) The Circular Economy. Royal Society of Chemistry.
60. Lewandowski, M. (2016) Designing the business models for circular economy. Sustainability, 8(1), 43.

61. Lieder, M. and Rashid, A. (2016) Towards circular economy implementation. Journal of Cleaner Production, 115, pp. 36–51.
62. Magnano, D.G. et al. (2024) Disentangling circular economy practices and firm sustainability performance. Journal of Environmental Management, 353, 120138.
63. Megevand, B. et al. (2022) Circularity in practice: Review of main current approaches and strategic propositions. Sustainability, 14(2), 962.
64. Mele, C. et al. (2025) Platform-based ecosystems and knowledge management for the circular economy. Journal of Knowledge Management, 29(1), pp. 1–25.
65. Merli, R., Preziosi, M. and Acampora, A. (2018) How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. Journal of Cleaner Production, 178, pp. 703–722.
66. Michalak, J., Michalowski, A. and Kasztelan, A. (2020) Gospodarka niskoemisyjna — gospodarka cyrkularna — zielona gospodarka. Lodz: Wydawnictwo UL.
67. Morseletto, P. (2020) Targets for a circular economy. Resources, Conservation and Recycling, 153, 104553.
68. Murray, A., Skene, K. and Haynes, K. (2017) The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration. Journal of Business Ethics, 140(3), pp. 369–380.
69. Negri, M. et al. (2021) Circular economy performance measurement in manufacturing firms. Sustainability, 13, 9049.
70. Nußholz, J.L.K. (2017) Circular Business Models: Defining a Concept and Framing an Emerging Research Field. Sustainability, 9(10), 1810.
71. Ormazabal, M. et al. (2018) Circular economy in Spanish SMEs: Challenges and opportunities. Journal of Cleaner Production, 185, pp. 157–167.
72. Page, M.J. et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71.
73. Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017) Circular economy for the built environment: A research framework. Journal of Cleaner Production, 143, pp. 710–718.
74. Prendeville, S. et al. (2017) Circular economy: Is it enough? Ecodesign insights from the UK. Procedia CIRP, 61, pp. 616–621.
75. Prendeville, S., Cherim, E. and Bocken, N. (2018) Circular cities: Mapping six cities in transition. Environmental Innovation and Societal Transitions, 26, pp. 171–194.
76. Prieto-Sandoval, V., Jaca, C. and Ormazabal, M. (2018) Towards a consensus on the circular economy. Journal of Cleaner Production, 179, pp. 605–615.
77. Ranta, V. et al. (2018) Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy. Resources, Conservation and Recycling, 135, pp. 70–82.
78. Rashid, A. et al. (2013) Resource Conservative Manufacturing. Journal of Cleaner Production, 57, pp. 166–177.
79. Reike, D., Vermeulen, W.J.V. and Witjes, S. (2018) The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? Resources, Conservation and Recycling, 135, pp. 246–264.

80. Rizos, V. et al. (2016) Implementation of circular economy business models by SMEs. Sustainability, 8, 1212.
81. Saidani, M. et al. (2019) A taxonomy of circular economy indicators. Journal of Cleaner Production, 207, pp. 542–559.
82. Schroeder, P., Anggraeni, K. and Weber, U. (2019) The relevance of circular economy practices to the SDGs. Journal of Industrial Ecology, 23(1), pp. 77–95.
83. Sehnem, S. et al. (2019) Circular economy: Benefits, impacts and overlapping. Supply Chain Management, 24(6), pp. 762–791.
84. Soldatos, J., Kyriazis, D. and Lazakidou, A. (2021) A digital platform for cross-sector collaborative value networks in the circular economy. Procedia Manufacturing, 55, pp. 476–483.
85. Stahel, W.R. (2019) The Circular Economy: A User's Guide. Abingdon: Routledge.
86. Su, B. et al. (2013) A review of the circular economy in China. Journal of Cleaner Production, 42, pp. 215–227.
87. Upasani, A., Bakshi, B. and Grubb, G. (2022) Mapping the Opportunity Space to Model the Circular Economy. U.S. Department of Energy.
88. Urbinati, A., Chiaroni, D. and Chiesa, V. (2017) Towards a new taxonomy of circular economy business models. Journal of Cleaner Production, 168, pp. 487–498.
89. van Eck, N.J. and Waltman, L. (2010) Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, 84(2), pp. 523–538.
90. Velasco-Muñoz, J.F. et al. (2021) Circular economy implementation in the agricultural sector. Resources, Conservation and Recycling, 170, 105618.
91. Vence, X. and López-Pérez, S. (2018) Eco-innovation and Circular Business Models as drivers for a circular economy. Contaduría y Administración, 63(3), pp. 64–81.
92. Whalen, K.A. (2019) Three circular business models that extend product value. Journal of Cleaner Production, 226, pp. 1128–1137.
93. Wiebe, K.S. et al. (2019) Global circular economy scenario in a multiregional input–output framework. Environmental Science and Technology, 53(11), pp. 6362–6372.
94. Yasmeen, H. and Cheng, L. (2025) Advancing circular economy in the equipment manufacturing sector. Journal of Environmental Management, 380, 124967.

EXAMPLE OF USING QUALITY COST INDICATOR FOR OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION PROCESS

Anna WENCEK[1*] and Agnieszka MISZTAL[2]

[1] Faculty of Engineering Management Poznan University of Technology, Poznań; anna.wencek@doctorate.put.poznan.pl; ORCID 0009-0000-9947-5935

[2] Faculty of Engineering Management Poznan University of Technology, Poznań, agnieszka.misztal@put.poznan.pl; ORCID 0000-0003-4439-4198

* Corresponding author: anna.wencek@doctorate.put.poznan.pl; Tel.: +48785055329

Summary: The main goal of the article was to demonstrate the practical application of quality costs as a source of data that is used as a basis for making operational and strategic decisions in a manufacturing company which led to improvement and cost saving. The first part presented conclusions from the literature review and various interpretations of the requirements set by quality standards. Then, the method of collecting and analyzing the elements considered for the calculation of quality costs was discussed. An example of such application in a manufacturing company was presented, along with the analysis of the results carried out by the management, which led to a solution, optimizing the production process and reducing the value of quality costs incurred.The presented example of a company and its approach to quality costs reporting showed an individual interpretation of definitions, the multitude of which in the literature was ambiguous and non-uniform. This example also proved that despite opinion of some authors, even focusing only on non-compliances, organization could gain valuable information from cost of quality reports which could lead to constructive strategic decisions and brought saving to the company. For this purpose, presented annual report was analyzed using the quantitative research. Correlational study of data collected through the year in assessed company showed clearly which parameters or reasons represent the highest contribution in cost of quality. These conclusions derived from statistical knowledge allowed to identify areas for improvement. An example of such improvement and the effect it brought was also presented.

Keywords: quality costs, KPI, cost management.

Introduction

Quality, which was one of the main pillars of building the competitive advantage of enterprises, was defined in the PN-EN ISO 9001:2015 standard as "the degree to which a set of inherent properties meets the requirements." We could therefore describe it as good or bad. In practice, we referred to a specific specification that determined whether the product's properties met the customer's requirements. However, quality measurement was sometimes controversial among management practitioners and theorists. Many authors distinguished qualitative features from quantitative ones. Quality was undoubtedly different from quantity, but the two concepts were not opposites (Grela, 2011).

As Zofia Zymonik stated, "quality, until recently considered the basic factor of an enterprise's competitiveness, had become a necessary requirement in terms of time and cost aspects, and was increasingly associated with the value created and offered to the customer" (Zymonik, 2003). The author pointed out that quality was a form of value. Moreover, it was a value that appealed to production operators, technologists, constructors, sales representatives, and engineers — money. This aligned with the well-known statement by Peter Drucker: "If you can't measure it, you can't improve it."

Costs and their analysis were fundamental aspects of managing any organization. The costs of quality, just like the costs of meeting customer requirements, constituted a significant element of organizational principles, so determining, measuring, and controlling them was necessary to achieve profitability. The topic of quality costs evolved over the years. The first mentions appeared in the literature in the 1940s, but the concept of quality costs was still not precisely or uniformly defined (Sadowski, 2017). Additionally, the literature offered no consistent division of quality costs or clear links between them and the production process (Wawak, 2002). This view was shared by many authors.

Nevertheless, regardless of the definition adopted, one conclusion was common: the lower the cost of quality, the better. Management often tended to assume that quality was a given. Of course, it was not. It required significant effort to understand what was needed in processes to achieve the required level of quality and maintain it over time, eliminating the variations encountered along the way.

It was also clear that a manufacturing unit producing defective products exposed itself to high inspection costs or — if the defect reached the market — the loss of current and future sales volume, and above all, credibility, prestige, and reputation.

Furthermore, reducing the costs of poor quality brought improvements not only measurable in financial terms. The resulting benefits were much broader. They included reduced consumption of energy and materials used to produce defective products, limiting activities that

did not add value, increasing operational efficiency, and increasing customer and employee satisfaction — just to name a few. All of this contributed to making the business more sustainable. In other words, actions to reduce measurable costs supported environmental goals (e.g., reducing premium freight shipments, which in turn reduced CO_2 emissions).

This was why the cost of quality was such an important indicator and why it was worth planning activities to keep it as low as possible. This article discussed a practical example of reporting quality costs and analyzing data that could be used to take actions to reduce losses.

Literature review findings on quality cost

2.1 Cost of quality definitions and models

The term 'quality cost,' as an element of quality management, had never been precisely defined and was interpreted differently by various specialists. It was a conventional concept. It had not appeared in cost theory and was not precisely defined by either theoreticians or practitioners in the field of quality assurance (Zymonik, 2003).

The term was first introduced by Joseph M. Juran and Armand V. Feigenbaum in the 1950s. This initial interpretation was later developed into many models and definitions. Its evolution was also reflected in different regions of the world and in subsequent generations of quality standards (ASQC, ISO, BS standards). However, differences in understanding quality and approaches to it were also visible in various styles of quality management. Modern styles of quality management were rooted in ancient Eastern and Western philosophies. The literature usually distinguished three styles of quality management: American, European, and Japanese. The American style was based on the philosophy of Plato, the European style on the philosophy of Aristotle, and the Japanese style on the Chinese philosophy of Lao Tzu (Biadacz, 2018).

The foundations of the cost-of-quality concept could also be seen in the Deming cycle and Shewhart control charts. The solutions proposed by these quality pioneers were based on the desire to reduce the costs associated with quality.

When considering the cost of quality, the philosophy of P.B. Crosby was often mentioned. He stated, as one of the four absolutes of quality, that quality should be measured by the cost of nonconformity. He drew significant attention to the financial aspect of poor quality and, like many other authors, proposed that quality should be expressed in monetary units. However, in his philosophy, the maximum quality according to this measure was 0, hence his famous saying: "quality is free," meaning that the only cost is the lack of quality.

Also, in later approach through the integration of quality principles with financial indicators such as cost of quality and operational-stability measures, TQM influences a firm's profitability and its overall risk position. (Kostadinović, 2025)

The dates of development of selected quality-cost models are presented on the timeline in Figure 1:

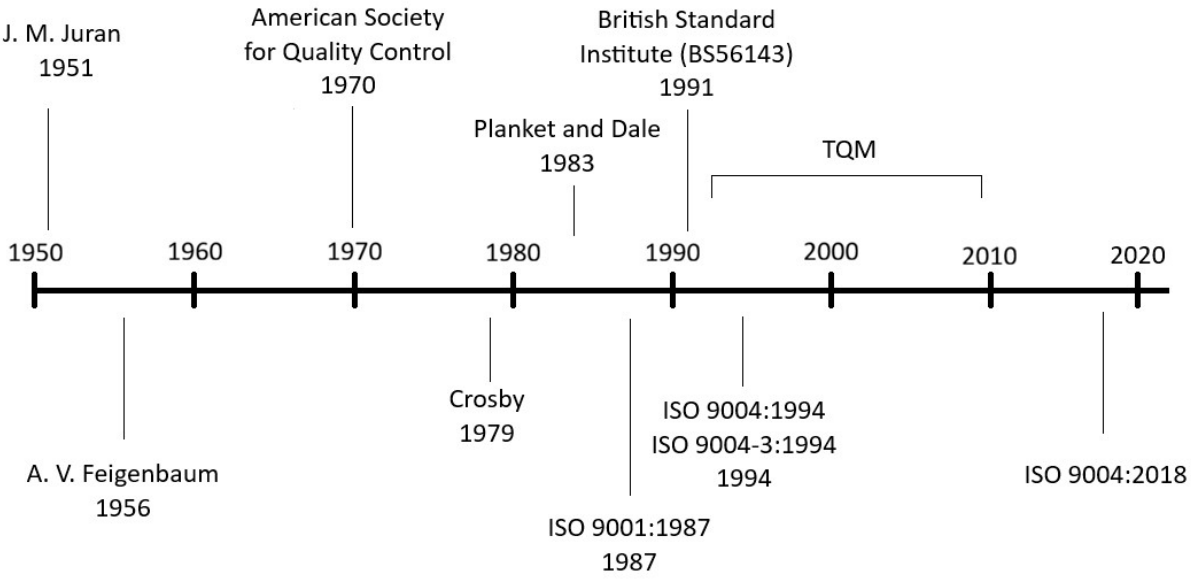


Figure 1. Primary cost of quality models

Source: own study based on Schiffauerova, Thomson, 2006

Differences in definitions highlighted an important aspect: some approaches were based solely on the costs of poor quality, i.e., expenses incurred when customer expectations were not met. Other definitions also included the costs associated with efforts to achieve the required level of quality. Therefore, the costs of quality should include not only the costs of errors but also the costs of all actions taken to prevent them. As a result, these costs can be divided into several categories related mainly to prevention, evaluation, research, and control (Popiel, 2019).

An overview of different aspects considered when analyzing quality costs is presented in Table 1.

Tabele 1

Generic CoQ models and cost categories

Generic model	Cost/activity categories
P-A-F models	prevention + appraisal + failure
Crosby's model	conformance + non-conformance
Opportunity or intangible cost models	prevention + appraisal + failure

	+ opportunity
	conformance + non-conformance + opportunity
	tangibles + intangibles
	P-A-F (failure cost includes opportunity cost)
Process cost models	conformance + non-conformance
ABC models	value-added + non-value-added

Source: Schiffauerova, Thomson, 2006

Over time, in addition to quality standards, organizations also had to follow legal regulations that determined what costs must be incurred by the producer (manufacturer) in the event of a detected failure. For example, the European legal system includes basic consumer rights relating to full information about the product, its safe use, and compensation for damage caused by a dangerous defect. The scope of a company's liability for its product throughout its entire "life" was also extended over time (Zymonik, 2008). These regulations also determined what data an organization must retain and for how long. Enterprises approached data collection in different ways, depending on their financial and accounting policies. As a result, interest in advanced IT systems such as ERP or SAP increased.

2.2 ISO standards requirements

Most companies in Europe built their Quality Management Systems based on the requirements of ISO standards. The European style of quality management is strongly rooted in standardization. Within the extensive standardization achievements of France, Great Britain, and Germany, and later within the legal regulations of the European Communities and the development of the international ISO 9000 series, Aristotle's objective approach to quality was further developed (Biadacz, 2018).

ISO 9001:1987, which was based on the British Standard BS 5750 as the first released ISO 9000 quality standard, required the following: "quality costs should be regularly monitored and reported to management. They should be related to other cost measures (ratios) such as 'sales value,' 'turnover,' or 'value added,' so that: a) the suitability and effectiveness of the quality management system can be assessed, b) additional areas requiring attention can be identified, c) quality and cost objectives can be established" (ISO, 1987).

Quality costs were also described in subsequent International Organization for Standardization documents (1993, 1994, 2000), particularly in ISO 8402:1994, ISO 9000:2000, and ISO 9004-3:1993. ISO 8402:1994 specifies that quality costs include expenses incurred for defect prevention and appraisal costs, as well as losses resulting from internal and external errors. ISO 9004-3:1993 considers the measures used to assess the effectiveness of the quality system as part of quality costs. In contrast, ISO 9000:2000 defines quality costs as those incurred in guaranteeing and ensuring satisfactory quality (Sadkowski, Sala, 2022).

ISO 9004:2018 shifted the focus from measuring traditional cost-of-quality categories to evaluating how quality contributes to long-term organizational performance and value creation. Instead of tracking prevention or failure costs, it emphasized strategic resource use, maturity assessment, and sustained success.

However, none of these standards introduced specific requirements or rules regarding the formal structure of quality-cost reports or the obligation to separate quality-cost reporting from controlling activities. Likewise, other standards that extend ISO 9001 — such as automotive (IATF 16949:2016) and railway (ISO/TS 22163:2023) — do not provide detailed regulations on reporting quality costs. They only require that quality-cost information be reviewed as part of the management review, which may be conducted as infrequently as once per year.

Most detailed information were found in ISO 9004-3:1994 introduced a structured, PAF-based approach focused on measuring and classifying quality costs for control and reduction. Then, ISO 9004:2018 shifted the focus toward linking cost of non-quality with overall business performance, emphasizing prevention, process orientation, risk, and long-term value including hidden costs.

2.3 Analysis of individual elements taken into account for the monthly reports of the cost of quality

As mentioned in the previous chapter, there were many definitions of quality and, consequently, many definitions of the cost of quality. This is why the literature presents multiple proposals for reporting this crucial financial indicator. In most of these proposals, recurring factors can be observed. This review presents several interpretations, and the similarities among them are clearly visible.

According to John Edge and David J. Smith, under the editorship of Dennis Lock, quality costs can be divided into two types:

1. Operational quality costs - costs incurred by the company to achieve and ensure a specific level of quality, including:
    a. Prevention and assessment (or investment) costs
        - Prevention – costs of expenses incurred to avoid waste:
            - Construction review
            - Quality and reliability training
            - Supplier quality planning

- Audits
- implementation of preventive actions
- Product qualification
- Quality technical documentation

- Assessments - costs of trials, inspections and examinations to assess whether specified quality is maintained, such as:
  - Research and checking
  - Maintenance and calibration
  - Depreciation of research equipment
  - Technical documentation of quality in the process
  - Installation attempts

b. Costs of non-compliance (or losses)

- Internal:
  - Design changes
  - Delivery rejects
  - Rework
  - Material shortages and repairs
  - Warranties
  - Failure in order completion
  - Defects discovered during testing
- External quality assurance costs - the costs resulting from conducting demonstrations and tests as objective evidence required by recipients, including specific and additional costs of quality assurance measures, procedures, data, demonstration tests and evaluations, e.g. costs of testing specific safety characteristics by recognized, independent testing bodies (Lock, 2002)

In another publication, quality costs refer to the costs incurred to prevent the production of low-quality products (or the costs that arise as a result of producing them), and they are classified into four groups.

Table 2.

Items Pertaining to Costs-of-Quality Reports

Prevention Costs	Appraisal Costs	Internal Failure Costs	External Failure Costs
Design engineering	Inspection	Spoilage	Customer support
Process engineering	Online product manufacturing and process inspection	Rework	Manufacturing/ process engineering for external failures
Supplier evaluations	Product testing	Scrap	Warranty repair costs
Preventive equipment maintenance		Machine repairs	Liability claims
Quality training		Manufacturing/ process engineering on internal failures	
Testing of new materials			

Source: Horngren, Datar, Foster, 2015

Yet another approach could be observed in the TQM system, where three types of quality costs were distinguished, presented on figure 2.

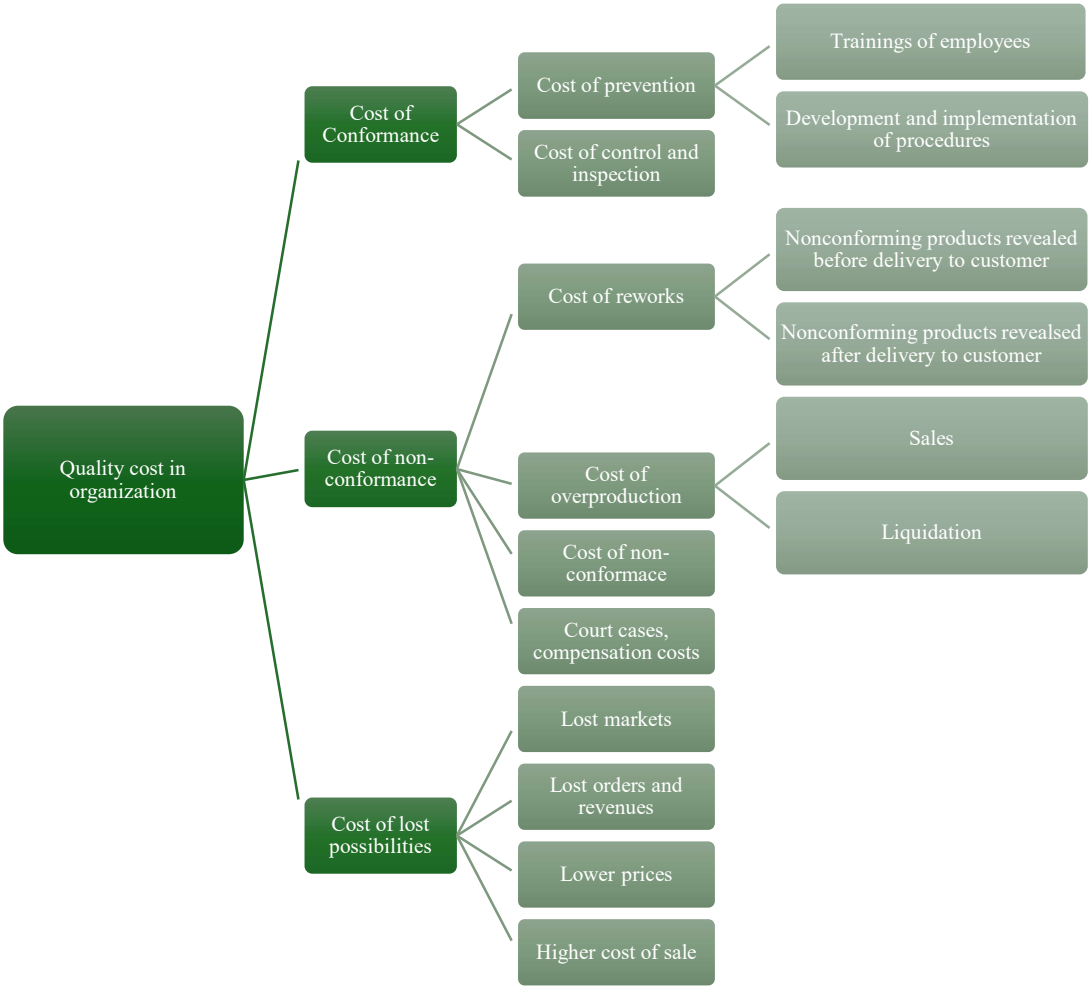


Figure 2. Division of quality costs according to TQM

Source: Wawak, 2002

Even in the literature, which could simply indicate what should be measured without considering the real difficulties of gathering the data, the issue of hidden factors was raised. This meant that if certain aspects of quality in a company could not be expressed in monetary terms, they could not be included in calculations and therefore were not counted in financial reports. Such a factor could be, for example, lost reputation. Another group of hidden factors consisted of those that were unclear or difficult to calculate and were therefore omitted from the report. These could include time spent rewriting job instructions or time spent resetting machines after breakdowns.

For visualizing these hidden factors, the commonly used iceberg model illustrated the concept perfectly.

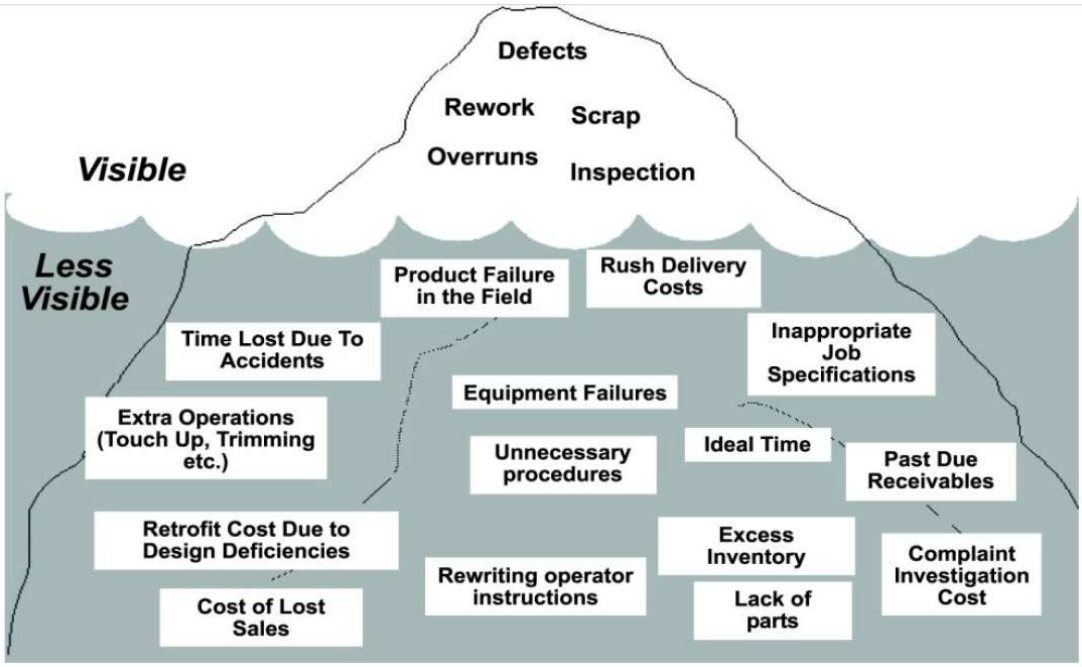


Figure 3. Cost of quality iceberg

Source: Durmaz, 2012

2.4 Cost of quality – reporting

Undoubtedly, the way the cost of quality was presented in a company reflected how important it was for stakeholders and how aware they wished to be of the money spent on quality. Setting Key Performance Indicators (KPIs) was crucial for measuring, monitoring, targeting goals, and reacting to deviations. Successful organizations routinely evaluated the outcomes of past events to determine what needed to be accomplished in the future to maintain a strategic advantage (Kaplan and Norton, 1996). This meant that the organization's performance indicators mirrored its mission, strategy, and objectives.

All measurable attributes should be documented in Performance Measurement Systems (PMS). Such documentation should specify how each indicator is measured and how often it is reviewed. The accuracy of measurements has an impact on the validity and usefulness of

performance metrics developed for evaluating, planning, and improving production processes (Sonmez and Testik, 2017). According to Zymonik, Hamrol, and Grudowski (2013), report preparation periods, their structure, and their scope should be adapted to the needs of recipients (shorter intervals are more favorable), and the information provided in these reports should be used by management when making strategic, tactical, and operational decisions.

Hence, the conclusion that the quality-cost indicator should be reviewed by management on a daily, weekly, monthly, and annual basis. Each analysis is of a different nature and should result in different conclusions and actions.Daily inspection - based on conclusions from the previous day's production, mainly focusing on the analysis of non-compliance and rework, and material defects, i.e. aspects that were possible to consider in terms of a given production unit (line/nest/channel), allowing to draw quick and simple conclusions to possible causes/sources of defects and, consequently, losses. Examples of causes that could have been identified in such a short time were: incorrect setting of machines or measuring instruments, a defective batch of material that could be replaced with another one, machine failure, etc. On this basis, we could also quickly decide whether the cause could be eliminated in a short time or the level of losses generated was too high and production should have been stopped;

- Weekly inspection consisted of:
    - conclusions from daily meetings,
    - estimating the impact of quality costs on achieving the monthly production target,
    - making changes to production plans,
    - verifying corrective actions taken during the week.
- Monthly review focused on the analysis of the entire report, where it was also possible to assess the value of costs related to delivery failures or complaints from external customers. The form of the monthly report should allow for a clear comparison with previous months so that deviations can be highlighted. It was difficult to set targets for individual report elements; however, such targets were applied to individual production units (e.g., a single production line or channel). This made it possible to see, on a monthly basis, where targets were exceeded, and an analysis should be carried out—often using simplified methods such as the A3 form or the 8D report—to identify the cause and eliminate it in the future. The analysis considered the top Pareto causes of defects identified in a given month. Special attention should be paid to the credibility and reliability of data collection, as this determines the direction of improvement activities. If possible, data should be verified to avoid misleading conclusions.
- Annual review was the most important from the perspective of the company’s operational strategy. Therefore, it should be an element of the management review and constitute input data for building the business plan for the following year. At this stage, an analysis should be made regarding, for example:
    - the effectiveness of actions taken so far,
    - identification of elements causing the greatest financial losses,

- changes in prices or the range of products produced by the company (if the analysis shows that some products are unprofitable),
- activities needed to eliminate the elements causing the greatest financial losses,
- changing market requirements — customer expectations evolve, and organizations should recognize them as early as possible to stay competitive.

It could therefore be noted that the quality-cost indicator was used primarily for making operational decisions, to react to problems arising in daily production, and was much less frequently used for strategic purposes. On the other hand, the indicator was used every day, which clearly illustrated the importance assigned to it by management.

To analyze quality problems, three techniques were usually used: control charts, Pareto diagrams, and cause-and-effect diagrams (Horngren, 2015). Other publications also mention additional tools supporting CoQ analysis, such as summary lists, correlation diagrams, histograms, flowcharts, relationship diagrams, and other statistical indicators. Essentially, any analysis that produced valuable conclusions was worth using.

In reviews, deviations were recognized more quickly when it was visible that an agreed target had been exceeded. Setting targets, however, was highly individual and depended on management decisions. It provided a comprehensive overview across production lines, but it was difficult to set an acceptable level of CoQ, especially because it should reflect the capability of each production line, meaning that targets would likely differ for each channel. Nevertheless, as mentioned for monthly reviews, this approach could highlight obvious deviations and prompt teams to search for root causes and eliminate them.

Another important point is that the system—including data collection—should be adapted to organizational needs, not the other way around. Organizations must continually improve their systems so that they provide answers to the questions that matter.

Traditional cost-calculation systems were characterized by low accuracy and low measurement cost. The error curve increased because information about actual costs was distorted, and decisions made by managers based on this information could be incorrect. New cost-calculation systems should eliminate the disadvantages of existing systems. Although their increased cost must be considered, the benefits outweigh the disadvantages (Zymonik, 2003).

Some authors conducted broader studies on data quality and claimed that the results did not allow rejection of the statement that, from the point of view of the quality of cost information obtained, it was not important whether the company used proprietary spreadsheet-based solutions or professional ERP-embedded tools. Research showed that information technology was necessary to use advanced cost-management tools, but was equally often used by companies relying on spreadsheets and dedicated professional tools (Nasternak, Kowalski, 2018). This means that even with simple tools and non-advanced reporting systems, it was possible for an organization to effectively collect, monitor, and analyze financial data regarding quality.

Modern Cost of Non-Quality (CoNQ) models have evolved from the classic PAF framework to include Lean/Six Sigma COPQ, process-based, opportunity cost, and digital/AI-driven approaches that emphasize real-time prevention and hidden costs. The main shift today is from measuring failures to proactively preventing defects, while also capturing strategic impacts like lost revenue, reputation, and missed opportunities.

Newest approach to cost of non-quality calculation models are using more digitalized ways of storing the data and AI models to analyze the output but still the way they are structured are based on the same principles as years ago. However, thank to more modern solutions we are able to react in more agile way.

Example of production company

The example presented concerned a manufacturing company operating in accordance with ISO 9001:2015 and IATF 16949 standards. It showed an individual, simplified approach to reporting quality costs, partially based on the models discussed earlier in the literature.

The factory was part of a corporate group. The company consisted of many manufacturing units located around the world, although the product assortment produced by each unit was quite similar. Hence, it can be easily concluded that cost-of-quality reports needed to be standardized so that the units could be compared with one another.

The manufacturing unit located in Poland consisted of four production areas with a total employment of almost 800 people. It operated in heavy industry, producing for segments such as automotive, railway, agriculture, and mining.

The basis for the study below was data acquired in 2023, including the cost-of-quality report and more detailed data from production reports, procedures, instructions, manuals, and other technical documentation, which explained how data were collected, monitored, and analyzed.

The company’s quality-cost model was most similar to Juran’s model. There was awareness that prevention and appraisal costs should also be included in total quality costs. In the internal manual, which served as a guideline for each factory in the company, it was specified how quality costs should be divided according to Juran’s ideology, as presented in Figure 4.



Figure 4. Quality cost model according to assessed company

Source: company's manual

There was also specifically given standard of how to measure and create a report. As it was mentioned above, this unification was obligatory. According to the manual, report should have contained the data shown in table 3.

Table 3.

Cost of quality report

Account description:		2023 YTD	2023 JAN	2023 FEB	2023 MAR
Non Quality - Scrap & Losses	10	-5,610	-931,433	-728,882	-785,329
Non Quality - Additional Costs	20	-3,125	-614,689	-415,130	-375,558
Non Quality - Rework	25	-423	-32,430	-36,602	-87,342
Non Quality - Internal sorting	30	-7	-3,330	0,000	0,000
Non Quality - Premium freight	40	-77	-19,554	-19,586	0,000
Non Quality - Internal complaints	50	-24	-0,419	-0,836	0,000
Non Quality - Customer complaints	60	-7	0,000	-0,836	0,000
Non Quality - Critical complaints & Recall	70	0	0,000	0,000	0,000
Non Quality - Field returns & Warranty	80	0	0,000	0,000	0,000
Non Quality - Reported Supplier CoNQ	110	-27	-0,500	-0,700	-0,700
Non Quality - Agreed cost recovery from Supplier	120	776	0,000	81,125	3,292

Source: based on assessed company's report

Analyzing individual points of the quality-cost report of the assessed company should be performed in accordance with the following principles and classifications:

- Internal failure costs
  - Nonconformity / Losses – material losses were the costs of ejected and scrapped products at their standard cost value.
  - Additional costs – the value of material or components added during production operations that were lost when the product was rejected. This cost was measured separately from material cost, as it represented an important element of waste. It highlighted that material rejected later in the process had a higher cost than material rejected earlier. At each production stage, value was added through operations, measured as "additional cost."

  - The reporting system had to be designed to allow this distinction. The bottleneck in the production process was especially critical: any failure occurring after the bottleneck led to a loss of production capacity and potential delays. Moreover, detecting the root cause of the defect was more difficult, and additional activities such as sorting, reworking, and investigation increased costs. The later the problem was detected, the more defective pieces were produced only to be scrapped.
  - Rework – the cost of additional operations beyond the defined manufacturing and testing process flow, required to transform rejected or nonconforming material into fully compliant product.
  - Internal sorting – the cost of additional controls or inspections not normally planned in the production process. These were usually performed outside the production line and were not included in the standard cost of the product. Sorting was necessary to segregate good parts from defective ones.
  - Premium freight / special shipments – costs of expedited shipments to customers or suppliers outside the normal delivery process (e.g., air freight). These did not include additional shipments due to complaints or returns.
  - Internal complaints – all internal costs related to complaints from another factory or between production units.
- External failure costs
  - Customer complaint (zero-hour failure) – a complaint raised before the product reached the market, usually during assembly or incoming inspection. Costs included storage, sorting, replacement, complaint handling, and testing.
  - Critical complaints and recalls – costs related to critical complaints and activities necessary to withdraw the product from the market (storage, sorting, replacement, testing).
  - Warranties and field failures – costs associated with parts returned from the field within the warranty period or complaints due to poor performance in service. These issues arose after the customer's product had been put into service and were categorized as performance complaints (as opposed to conformance complaints detected before assembly).
  - Reported supplier cost of poor quality – costs incurred due to suppliers providing nonconforming components, materials, or services.
  - Agreed cost recovery from supplier – the value of recovered costs agreed between the company and the supplier following a supplier complaint process.

At this point, it is worth mentioning an important aspect that must be considered by any manufacturing unit preparing a procedure for its cost-of-quality reporting method: each company has limitations defined by its reporting capabilities and several determinants, such as:

  - whether a system has been implemented (e.g., SAP, ERP, MCSS, or simple spreadsheets),

- what reporting points have been defined,
- how communication between manufacturing units functions in the area of post-sales services,
- the industry in which the company operates (rules regarding containment activities and related costs differ between automotive, railway, medical, etc.).

One crucial determinant for further analysis was the aspect of reporting points. These referred to stages of the production process where defects and errors were recorded. The more reporting points existed, the more "firewalls" protected the product from progressing to subsequent stages and generating additional costs through added operations. On the other hand, more reporting points meant higher cost, time, and effort for data collection and additional control activities.

An example list of reporting points for the production area is presented in Table 4.

Table 4.

Reporting points

Code	Parameter		Code	Reason	"X" items not included in the channel defect rate (only costs are counted)
01	**Dw**	Dimension	**01**	Documentation	
02	**L**	Length	**02**	Tooling	
03	**P**	Cracks, grinding burns	**03**	Production device	
04	**g3**	Dimple	**04**	Measuring devices	
05	**Sc**	Grinding cuts	**05**	Technology	
06	**K**	Corrosion	**06**	Material	
07	**T**	Heat-treatment	**07**	Warehousing	
08	**S**	Spots	**08**	Transport	
09	**Ks**	Geometry issue	**09**	Employee	
10	**Vd**	Ovality	**10**	Set-up	
11	**Ra**	Visual defects	**11**	Media	
12	**X1m**	Asymmetry	**12**	Technological tests	**X**
13	**Nm**	Black marks (spots on the face)	**13**	Product implementation (trial run)	
14	**J**	Destructive test of etching	**14**	External supplier (cooperant)	
15	**Z**	Sharp edges	**15**	Destructive metallographic test	**X**
16	**O/L**	Nicks/dents on surface x	**16**	Destructive etching test	**X**
17	**Ra/L**	Face roughness	**17**	External supplier X	**X**

Code	Parameter		Code	Reason	"X" items not included in the channel defect rate (only costs are counted)
18	**U**	Cut	**18**	External supplier Y	**X**
19	**Sz**	Bore dimension	**19**	External supplier Z	**X**
20	**O/Dw**	Nicks/dents on surface y	**20**	Furnace breakdown	

Source: own development basing on material from assessed company

Non-conformities were registered in the system as shown on figure 5.

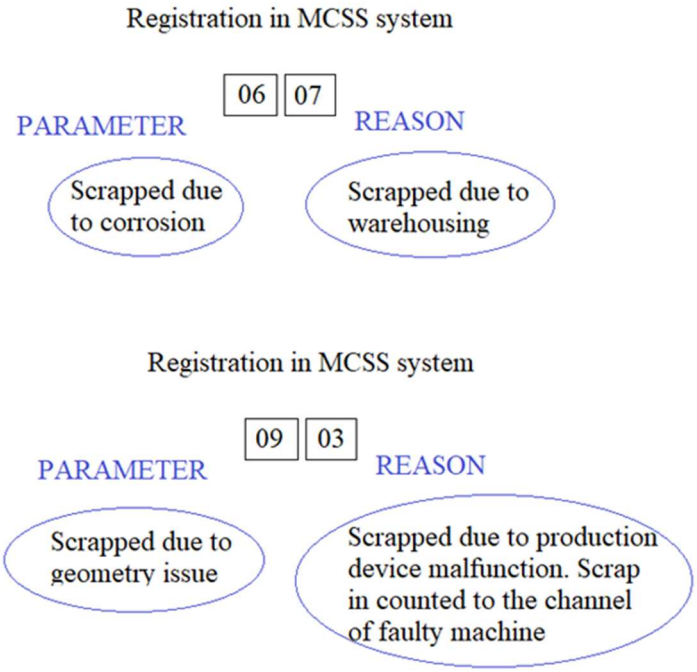


Figure 5. Registration system

Source: own development basing on material from assessed company

Usability of the CoNQ indicator for optimization

In the example company, costs of quality were presented monthly in a collective summary, as shown in Table 5. The first column contained the year-to-date (YTD) calculation, which was recalculated each month by adding the value of newly accrued costs. In the annual report, this value reflected the total cost in each category accumulated over the entire year.

As mentioned earlier, only the costs of poor quality were included; therefore, the abbreviation CONQ (Cost of Non-Quality) was used as the indicator. Each cost element was expressed in thousands of zlotys. The sum of these costs was then compared to the production value, and the resulting indicator was expressed as a percentage.

$$CONQ = \frac{Kjc}{Vp} * 100\%$$

KJc – total cost of quality

Vp – production value

Table 5.

Annual report of cost of quality. Values presented in Thousands Local Currency - PLN

Account description	2023 YTD	2023 JAN	2023 FEB	2023 MAR	2023 APR	2023 MAY	2023 JUN	2023 JUL	2023 AUG	2023 SEP	2023 OCT	2023 NOV	2023 DEC
Non-conformance & Losses	8743,1	931,4	728,9	785,3	693,6	785,4	754,2	531,7	793,6	698,0	725,3	720,9	594,9
Additional costs	3125,0	614,7	415,1	375,6	334,6	254,8	197,3	123,6	146,6	184,9	145,5	153,7	179,1
Rework	423,0	32,4	36,6	87,3	58,3	33,1	28,5	13,3	23,9	27,1	25,9	43,5	13,4
Internal Sorting	7,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0
Premium freight	77,0	19,6	19,6	0,0	26,1	3,9	4,6	0,0	0,0	1,8	0,0	1,2	0,0
Internal complaints	24,0	0,4	0,8	0,0	0,0	0,4	0,6	0,0	10,2	0,0	0,4	9,9	0,8
Customer complaints	7,0	0,0	0,8	0,0	0,4	0,0	1,7	0,4	0,8	0,8	0,8	0,0	1,3
Critical complaints & recall	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Field returns and warranty	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reported supplier CONQ	27,0	0,5	0,7	0,7	2,1	3,5	0,0	3,5	2,1	2,1	6,5	1,4	3,5
Agreed cost recovery from suppliers	-776,0	0,0	-81,1	-3,3	0,0	-141,2	-141,7	-127,3	-60,2	-44,0	-3,6	-1,7	-171,6
Total	11657,1	1602,4	1121,4	1245,6	1115,1	939,9	846,1	545,1	917,0	873,2	900,9	928,8	621,2
Production	354340,0	36960,0	37350,0	37400,0	30900,0	30250,0	31330,0	15820,0	29510,0	27950,0	28400,0	29010,0	19460,0
CONQ %	3,29%	4,34%	3,00%	3,33%	3,61%	3,11%	2,70%	3,45%	3,11%	3,12%	3,17%	3,20%	3,19%

Source: own work basing on material from assessed company

In the annual report, two months clearly showed different production results — July and December. This was because production was typically stopped for about two weeks during these periods: in July due to the holiday shutdown, during which machine servicing was carried out (also called a preventive-maintenance break), and in December due to the Christmas break. In December, the company also performed its annual financial closing and inventory calculation, during which deposits and work-in-progress (WIP) inventory were recalculated and

summarized. This meant that any calculation irregularities were likely recorded in January, which distorted the January result.

However, this was only one of several factors that reduced data reliability. Other factors can be identified, as follows:

- changes in material prices — fluctuations in the prices of direct materials (components, raw materials) and indirect materials (electricity, natural gas) were usually not reflected in the monthly quality-cost report. If such variables were included, the product value would have to change every month, making data analysis and month-to-month comparison more difficult.
- product assortment diversity — differences in final-product prices could significantly distort the real number of missing or repaired products. This resulted from expressing the indicator in value rather than quantity.
- agreed recovery cost from suppliers — this value represented compensation negotiated with suppliers for nonconformities caused by them. It was the only negative value in the report because it reflected money recovered rather than lost. However, due to the length of the complaint and negotiation process, the amount posted in a given month was compensation for costs incurred several months earlier, appearing (often only partially) in categories such as “Reported supplier CONQ” or “Internal sorting.” The most problematic aspect of this factor was its lack of predictability, trend, or long-term planning potential. Month-to-month comparisons were not meaningful; only long-term comparisons were valid.

The data from 2023 leaded to the conclusion that sales decreased significantly over the year. In this case, the cause was effect of Russia's armed attack on Ukraine, which led to paralysis of the supply chain, price increases and, consequently, stocks decrease and consumption of stored products while waiting for the next course of events.

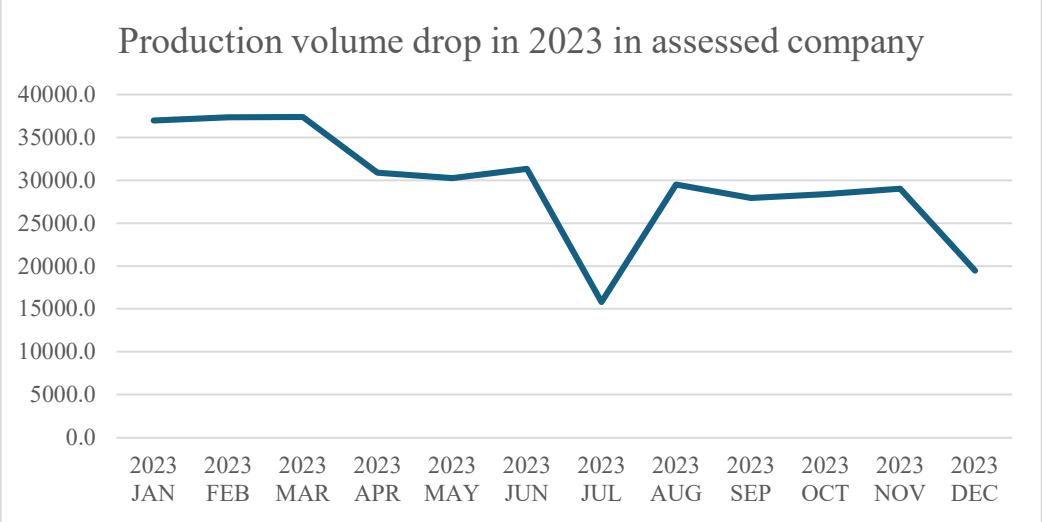


Figure 6. Production volume drop in 2023

Source: own work basing on material from assessed company

It should be remembered that, in the case of manufacturing companies, responsiveness to changes in orders was limited. In an unpredictable time horizon and an unclear future, companies might reduce production volumes and decrease stock levels, but under such conditions, with no certainty about what would happen next, the only feasible decision was to postpone the implementation of the production plan and wait.

Looking at the Pareto–Lorenz chart presented in Figure 7, it was clear that nonconformities and losses had the greatest influence on the high level of CONQ.

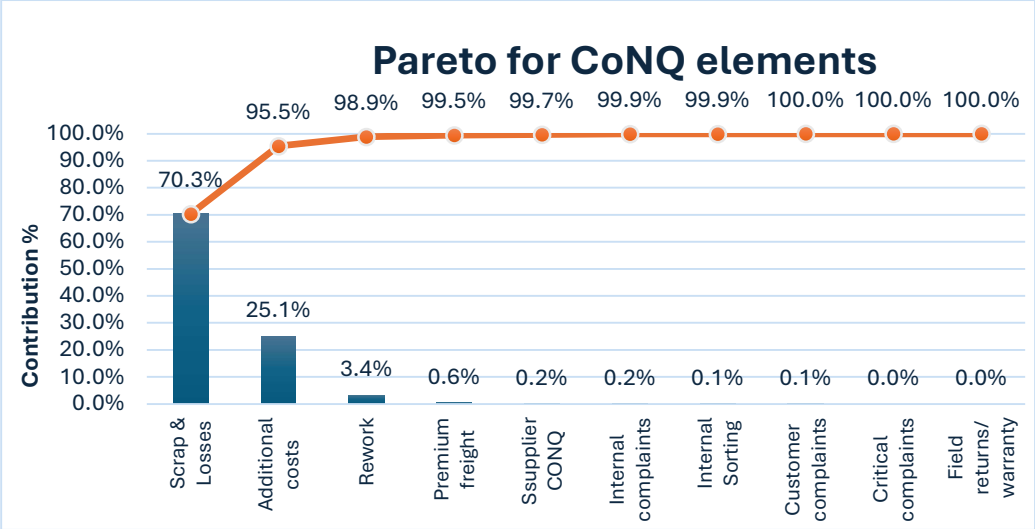


Figure 7. CONQ element contribution

Source: own work basing on material from assessed company

In order to identify potential for improvement or — as in this case — to eliminate waste, the data collected by the production area at the level of individual sections must be analyzed more deeply. The following aspects should be considered:

- where the number of non-conformances was the highest,
- where the additional costs were the highest,
- where the established acceptable level of deficiencies was exceeded.

In Table 6, extracts from the data analysis generated in the Power BI tool used by the company are presented. This was only one of many tools available on the market that support statistical analysis of data gathered from different sources.

Table 6.
Overview of annual costs of waste among production areas in year 2023

Production area A

Channel	Material cost	Value added	Total
Channel A1	185333,18	134826,15	320159,33
Channel A2	62835,71	77443,96	140279,67
Channel A3	18712,5	22120,03	40832,53
Channel A4	6844,53	7323,67	14168,2
Total	**273725,92**	**241713,81**	**515439,73**

Production area C

Channel	Material cost	Value added	Total
Channel C1	962829,82	312718,23	1275548,05
Channel C2	775432,42	219894,42	995326,84
Channel C3	107812,48	34528,79	142341,27
Channel C4	529897,42	90386,23	620283,65
Channel C5	44728,21	328,05	45056,26
Total	**2420700,35**	**657855,72**	**3078556,07**

Production area B

Channel	Material cost	Value added	Total
Channel B1	171564,43	118132,87	289697,3
Channel B2	395119,23	98054,02	493173,25
Channel B3	13295,58	10986,97	24282,55
Channel B4	2795,35	1423,11	4218,46
Channel B5	60121,32	32718,65	92839,97
Total	**642895,91**	**261315,62**	**904211,53**

Production area D

Channel	Material cost	Value added	Total
Channel D1	50491,14	93154,37	143645,51
Channel D2	100456,4	78267,18	178723,58
Channel D3	137439,79	148534,86	285974,65
Channel D4	1023579,96	1321623,87	2345203,83
Channel D5	146483,26	321465,83	467949,09
Total	**1458450,55**	**1963046,11**	**3421496,66**

	Material cost	Value added	Total
	4795772,73	3123931,26	7919703,99

Source: (own work basing on material from assessed company)

Looking at the data from the production areas, it was notable that the highest material cost was wasted in production area C, while the highest additional cost was recorded in production area D. This can be explained by the specificity of the production process: operations in production area D involved assembling the final product. Therefore, any failure detected at this stage meant wasting not a single component but usually a group of components.

The overall cost (material cost + additional cost) was the highest in production area D, which is why this area should be the primary focus of further analysis.

Another step in the deeper investigation was to analyze the waste generated in production area D by its parameters and causes, as illustrated in Tables 7 and 8.

Table 7.
Distribution of defects on production area D according to its parameters

Parameter	Parameter	Waste [pcs.]	Cost [PLN]
Defects classified as waste	**Total**	**23703**	**964112,16**
	Surface defects	19	821,46
	Roughness (Ra)	21	1.721,99
	Waviness	62	4.957,28
	Deburring	15	466,31
	Corrosion	4190	5.352,29
	Non - parallelism	18	757,78
	Lack of material / black spots	46	4.010,49
	Nicks / dents	330	22.347,49
	Ovality	361	18.848,88
	Double non-perpendicularity	15	914,52
	Straightness	191	14.934,88
	Burns	377	9.890,07
	Structure	78	10.846,15
	Diameter of the main raceway outside	948	50.883,56
	Diameter of the main raceway inside	1289	41.859,17
	Bore dimension	5998	239.807,41
	Outer diameter	5363	279.117,23
	Dimension of the auxiliary track	39	2.976,37
	Side track height	73	2.938,32
	Side track height (A for TRB rings, C for CRB rings)	6	578,02
	Ring height	4143	246.184,24
	Cuffs	8	848,07
	Radius outline	1	55,63
	Convergence	92	2.994,55
Defects not classified as waste	**Total**	**145426**	**2.455.721,75**
		5	72,78
	Surface defects	46	6.197,72
	Deburring	19	1.830,38
	Corrosion	5097	4.124,82

Parameter	Parameter	Waste [pcs.]	Cost [PLN]
	Lack of material / black spots	2151	163.922,06
	Nicks / dents	110596	303.191,09
	Ovality	195	8.356,08
	Straightness	20	1.524,94
	Burns	143	6.014,97
	Structure	11496	940.200,06
	Diameter of the main raceway outside	2123	191.773,05
	Diameter of the main raceway inside	453	69.826,90
	Bore dimension	7225	351.872,67
	Outer diameter	2258	149.157,73
	Side track height	140	12.479,14
	Ring height	3419	240.274,55
	Cuffs	31	4.176,72
	Radius outline	9	726,09
(Blank)	**Total**	**22**	**676,44**
Total		**169151**	**3.420.510,35**

Source: own work basing on company's material

Table 8.

Distribution of defects on production area D according to its reason

Reason	Reason	Number of waste [pcs.]	Cost[PLN]
Defects classified as waste	**Total**	**23703**	**965.067,36**
	Set up	1112	44.270,70
	Transport	12	330,18
	Technology	42	4.729,98
	Warehousing	30	2.365,41
	Employee	386	15.920,61
	Production device	8097	331.177,75
	Tooling	96	5.662,45
	Media	10	853,59
	Material	4655	31.885,52
	Channel A-1	7018	433.140,22
	Internal supplier channel B-1	2245	94.730,96
Defects not classified as waste	**Total**	**145448**	**2.456.427,31**
	Supplier X	40	1.706,04
	Destructive set-up test	14819	868.093,82
	Technological trials	997	152.203,35
	Metallographic trials	15	513,78
	Tooling	102	770,44
	External supplier XX	3475	308.628,19
	External supplier XY	7973	634.011,94
	External supplier XZ	97	1.654,82

Reason	Reason	Number of waste [pcs.]	Cost[PLN]
	External supplier YY	1125	45.997,19
	External supplier YZ	1278	143.354,44
	Disassembly	115527	299.493,29
Total		**169151**	**3.421.494,66**

Source: own work basing on company's material

Looking at the charts of parameter and reason values, it was clear where the highest sources of financial waste occurred. At this point in the analysis, it was important for the production-area team to meet and examine these results more closely. Developing solutions should be the work of an interdisciplinary team, which can also assess the feasibility of any proposed reduction measures. Naturally, this stage of analysis requires some out-of-the-box thinking.

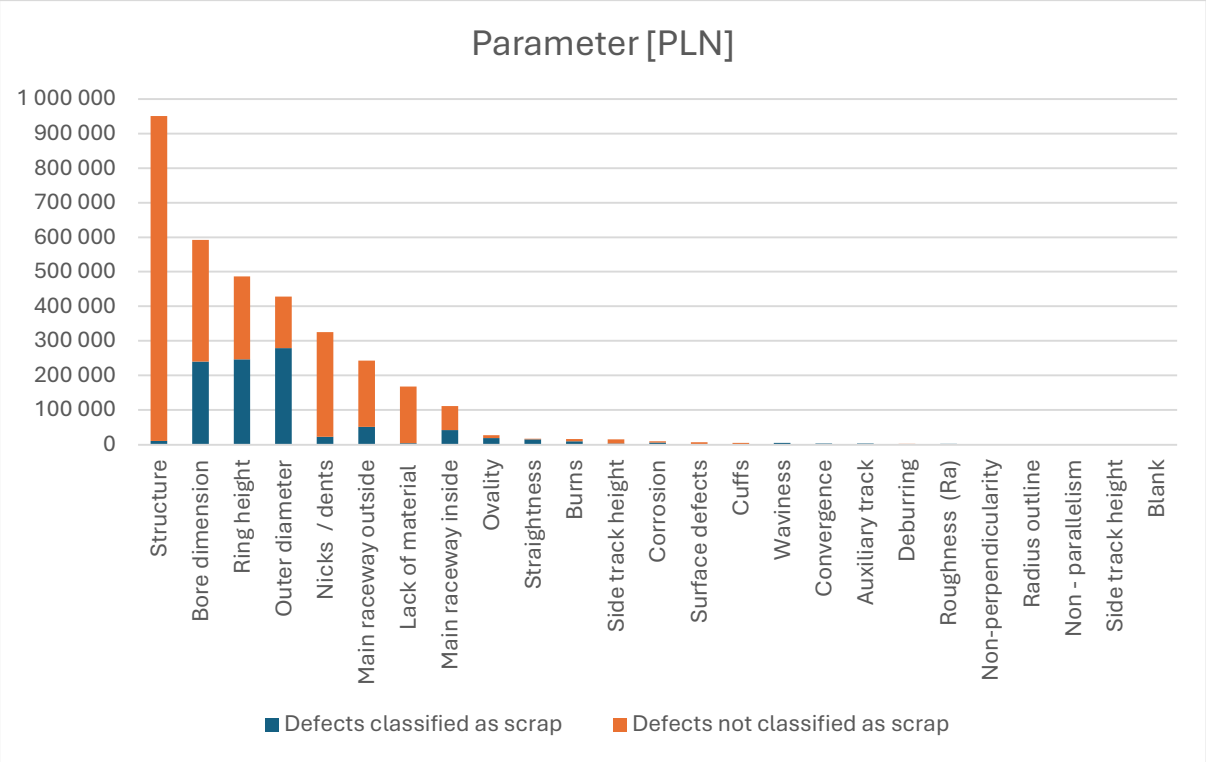


Figure 8. Distribution of defects on production area D according to its parameters

Source: own work basing on company's material

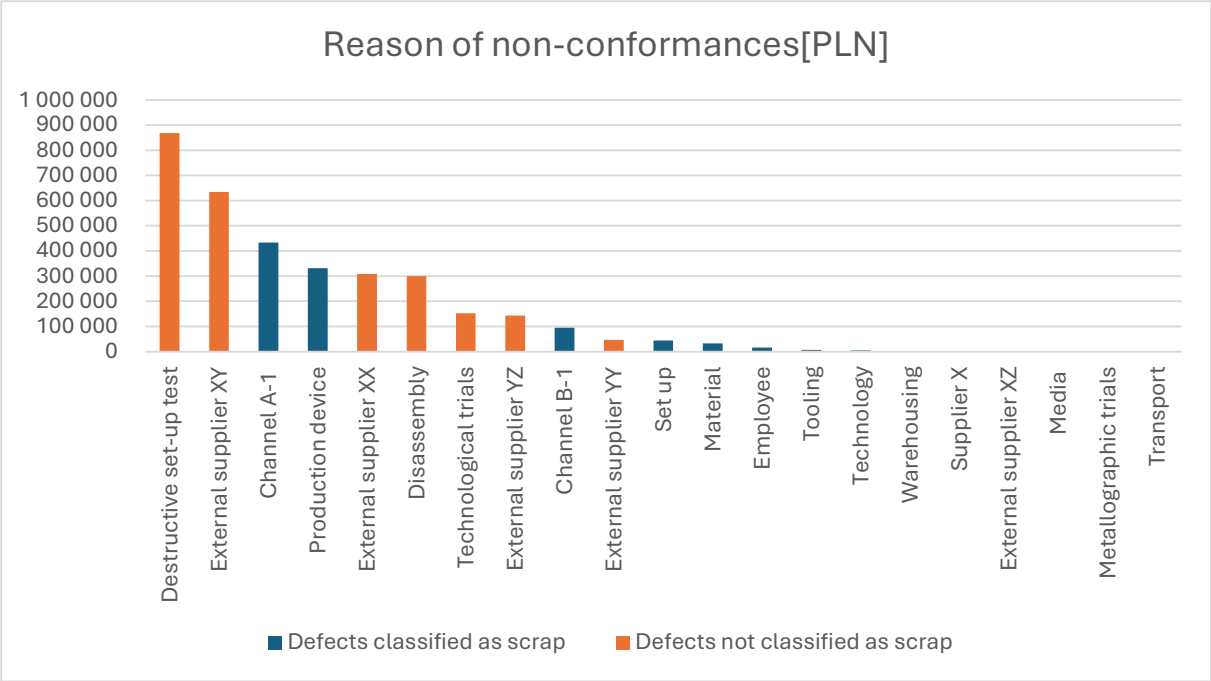


Figure 9 Distribution of defects on production area D according to its reason

Source: own work basing on company's material

Additionally, when using the cost of non-quality as a driver for improvement activities, it was crucial to consider all effects of the improvement. In order to reduce CoNQ overall, action on any of its components could lower the costs, as long as these actions were not taken at the expense of other criteria. For example, reducing inspections and sorting activities would decrease CoNQ in the short term, but unless such reductions were accompanied by increased process capability, they would lead to higher costs due to customer complaints, returns, and similar issues. Therefore, any CoNQ targets had to be defined as a combination of the individual targets of the sub-elements.

The Pareto charts revealed the two dominant results for both parameter and reason. The most frequent parameter of waste was **structure**. However, the "reason" analysis did not provide a clear explanation of where this originated. In the "reason" chart, it was visible that **destructive set-up tests** were the main contributing factor. Although these tests were not classified as defects—because they were a technological part of process adjustment confirmed by destructive testing—their contribution to the overall result was still significant.

As non-destructive set-up tests, the company reported **etching**, which is a chemical or electrolytic process used after grinding and polishing steel surfaces. Etching enhances surface contrast to visualize the microstructure or macrostructure and helps detect surface burns. These tests were carried out to confirm the correct settings of polishing and grinding machines, meaning they had to be performed after every machine reset, at the start of each shift, and after any maintenance work. Unfortunately, these tests were destructive for the product and prevented further use of the semi-finished item.

The analysis performed to assess further possibilities included: • benchmarking with other factories with a similar production profile to identify alternative methods for performing comparable tests, • evaluating the results and reliability of the tests — specifically, whether they effectively detected errors and prevented defective products from reaching the customer.

Based on the actions taken, a solution was proposed: it was possible to reuse tested semi-finished products by adding one additional polishing operation. The surface of the product changed after the test, but an extra honing process restored the product to its previous appearance and condition without loss of functional properties.

To proceed with this idea, the activities presented in Table 9 must be carried out.

Table 9.

Costs of introducing solution for high cost of waste due to destructive set-up test

Activity	Calculation	Total cost per year
Test of proposed solution (trial honing + metallographic test to confirm that functional features are not lost)	3538,24 PLN	3538,24 PLN
Adding extra honing machine to the process (it was decided to use capacity of existing not fully utilized machine.)	1,23 PLN / pc	12299,77 PLN
Communication with customers – labels added to every package with product which had extra test	0,12 PLN / pc	1.778,28 PLN
Change of work instructions	423,90 PLN	423,90 PLN
Total		**18227,375 PLN**

Source: own study

Total cost spent by company during 2023 for destructive set-up test was 868 093,82 PLN. Subtracting from this amount the costs incurred to introduce the change/improvement:

868.093,82 – 18227,37 = 849.866,45 PLN

For the calculations above it was assumed that the number of potential tested parts would be exactly the same in previous years. The assumption seemed to be relevant as the number of tests depended more on the number of production shifts rather than production volume.

This example showed that solutions did not have to be complicated or expensive. Company saved almost 850 000 PLN per year with limited effort and little investment just by using existing data to identify pain point.

Conclusions

The example of the manufacturing company and its approach to preparing a quality-cost report did not fully reflect the models described in the literature. This was not unusual. Although the literature review showed interest from the academic community, theoretical CoQ approaches were not widely applied in most quality management systems. The article also emphasized that the model chosen by a factory must fit its situation, environment, purpose, and needs in order to become a successful systematic tool in daily reporting and quality management.

In the described example, the organization covered only part of the costs of poor quality, i.e. expenses incurred due to failure to meet requirements:

- by suppliers,
- through defects discovered during the process,
- in the form of customer complaints.

Therefore, there was no mention of prevention costs, quality-planning costs at the prototype or trial-production stage, the costs associated with planning multiple reporting points, or the cost of maintaining the quality department (e.g., controllers). Although these aspects are discussed in the literature, they were not included in many enterprises. They were analyzed daily, addressed during prototype trial runs, or embedded in other financial reports. The cost of collecting such data and ensuring its credibility and reliability was important. However, the most important aspect of conducting this type of report was defining the questions it needed to answer.

The literature reviewed mentioned new trends in analyzing quality costs in various aspects of planning, improvement, and control. According to authors such as Zofia Zymonik, who examined the practical application of quality measurements in Polish production companies, this indicator was intended to serve as a measure of market competitiveness and was expected to evolve in the coming years. Apart from analyzing internal errors, it should expand its scope to include external factors. This area has been increasingly appreciated by companies. However, most external factors were difficult to express in monetary terms. Many of them were invisible, as described in the literature and illustrated using the iceberg model.

Companies also faced a rapidly changing environment. The dynamics of market changes were surprising, as were the reasons behind them, which made previous forecasts and scenarios obsolete. First, the COVID-19 pandemic and then Russia’s invasion of Ukraine caused major disruptions in the supply chain of basic components, affecting many European companies. The lack or limited availability of materials resulted in price increases. Consequently, the cost structure of enterprises had changed significantly, and manufacturing costs rose accordingly.

In addition to existing goals related to environmental protection and reducing ecological impact, companies also had to address rising electricity prices and limited access to natural-gas resources.

These developments led to a strategic emphasis on eliminating waste in the form of shortages. Such shortages caused higher cost losses than two or three years earlier, and therefore their impact on the company's financial results increased.

The example presented in this article proved that even simplified reporting focused on non-conformities could support reviewing, monitoring, and analyzing data to draw conclusions, observe deviations, react to them, and improve where possible. The approach to reporting the cost of quality must be individual, as all authors propose their own definitions. Organizations must consider what they want to learn from such a report and adjust their approach accordingly..

Bibliography

Books

1. Crosby, P.B. (1979), Quality is Free, McGraw-Hill, New York
2. Gruszka J. (2019). Rachunek kosztów jakości jako źródło systemu informatycznego do analiz jakości wyrobu. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 3 (53)
3. Horngren, C. T., Datar, S. M., Foster G. (2015). Cost Accounting: A Managerial Emphasis. Pearson Education Limited, Fifteenth Edition, New Jersey, USA
4. Juran J.M., Godfrey A.B. (1998). Quality Control Handbook. Fifth edition, McGraw Hill Books, New York
5. Foulad R, Amellah S, Jebli S, Sahib AO, and Bouaziz A (2023). Cost of quality: Literature review, correspondence between models, and a call for a paradigm shift. International Journal of Advanced and Applied Sciences, 10(2): 39-49
6. Kaplan, R. and Norton, D., (1996). The Balanced Scorecard, 1st Ed. Harvard Business Review Press
7. Lock D. (2002) Podręcznik zarządzania jakością. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
8. Myszewski J. M. (2009). Po prostu jakość. Podręcznik zarządzania jakością. Wydawnictwa Akademickie i Profesionalne Spółka z o.o, Warszawa
9. Szafrański M. (2007). Elementy ekonomiki jakości w przedsiębiorstwach. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań
10. Szczepańska K. (2009). Koszty jakości dla inzynierów. Wydawnictwo Placet. Warszawa
11. Szczepańska K. (2013). Doskonalenie zarządzania jakością. Podstawy. Oceny. Perspektywy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa
12. Szczepańska K. (2012). Podstawy zarządzania jakością. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa
13. Wawak S. (2002). Zarzadzanie jakością. Teoria i praktyka. Wydawnictwo Helio, Gliwice
14. Zymonik Z. (2003). Koszty Jakości w zarządzaniu przedsiębiorstwem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław
15. Zymonik Z., Hamrol A, Grudowski P. (2013). Zarządzanie jakościa i bezpieczeństwem. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczn, Warszawa.

Standards:

16. ASQC (1970), “Quality Costs – What and How”, American Society for Quality Control, pp.54\
17. BS 5750-1:1987: The Standard for Quality systems - Specification for design/development, production, installation and servicing
18. BS 6143 (1990), Guide to Determination and Use of Quality Related Costs
19. IATF 16949:2016 Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organisations
20. ISO/TS 22163:2023 Railway applications — Railway quality management system
21. ISO 8402:1994 Quality management and quality assurance
22. ISO 9000:2000 Quality management systems
23. ISO 9001:1987 Quality systems — Model for quality assurance in design/development, production, installation and servicing
24. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements
25. ISO 9004-3:1993 Quality management and quality system elements
26. ISO 9004:2018 Quality management

Journal articles:

27. Biadacz R. (2018). Rozwój problematyki rachunku kosztów jakości w czasopismach polskich. Zeszyty Teoretyczne Rachunkowości, tom 98 (154), Stowarzyszenie Księgowych w Polsce
28. Durmaz Y., Sevil Z. (2012). A theoretical approach to the concept of cost of quality. International Journal of Business and Social Science Vol. 3 No. 11
29. Feigenbaum, A.V. (1956), “Total quality control”, Harvard Business Review, Vol.34, No.6
30. Grela G. (2011). Jakość jako kategoria mierzalna. Zeszyty Naukowe Ostrołęckiego Towarzystwa Naukowego 25, 337-345
31. Khudhair Al-Salmawi, M., A. (2024). The use of quality costs in the re-positioning strategy to achieve a competitive advantage. Academy of Accounting and Financial Studies Journal, 28(2), 1-16.
32. Kostadinović, G., Ilievska Kostadinović. (2025). Integration of tqm and financial management: impact on profitability and risk. Horizonti menadžmenta, 5 (1) 113-125
33. Kozień E. (2019). Quality Improvement in production process. Conference Quality Production Improvement – CQPI, Vol. 1
34. Lange PCM. (2025). Development of a Machine Learning Prediction Model for Supplier Cost Performance based on Total Cost of Ownership [Internet] [Dissertation]. (TRITA-SCI-GRU). Available from: https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-371359

35. Nesterak J., Kowalski M.J. (2018) Czynniki wpływające na jakość informacji o kosztach – wnioski z badań empirycznych. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław.
36. Popiel H. (2019). Rachunek kosztów jakości w zarządzaniu przedsiębiorstwem Nowoczesne Systemy Zarządzania Zeszyt 14, nr 1 (styczeń-marzec) ISSN 1896-9380, s. 167-184
37. Plunkett, J.J. and Dale, B.G. (1983), "Quality costing: a study in the pressure vessel fabricationsection of the process plant industry", Quality Assurance, Vol.9,
38. Sadkowski W., Sala K. (2022). Perception of the quality costs in historical hospitality services: evidence from Poland. Ekonomia i Prawo, Vol. 21 (1)
39. Schiffauerova, A., & Thomson, V. (2006b). Managing cost of quality: insight into industry practice. The TQM Magazine, 18(5), 542–550.
40. Schiffauerova, A. and Thomson, V., (2006). A review of research on cost of quality models and best practices", International Journal of Quality and Reliability Management, Vol.23, No.4.
41. Sonmez, V., Testik, M.C. (2017). Using accurately measured production amounts to obtain calibration curve corrections of production line speed and stoppage duration consisting of measurement errors. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88(9-12), 3257-3263
42. Smater M., Puchalski S. (2012). Kompleksowe podejście do zagadnienia jakości w małych i średnich przedsiębiorstwach produkcyjnych. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Pomiary automatyka Robotyka 2/2012, s. 114-118
43. Teplicka K, Hurna S. (2021). New approach of cost of quality according their trend of during long period in industrial enterprises in SMEs. Management Systems in Production Engineering. Vol 29 (2021): Issue 1

Journal articles from DOI

44. Herzog I., Grabowska M. (2021). Quality Cost Account as a Framework of Continuous Improvement at Operational and Strategic Level. Management and Production Engineering Review, Volume 12, number 4, pp. 122–132 DOI: 10.24425/mper.2021.140000
45. Moudoub A., BonatoM., (2026), Predicting the Quality Defect Rate: A Stochastic Approach from Automotive Field Data, *2026 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Miramar Beach, FL, USA, 2026, pp. 1-6, doi: 10.1109/RAMS50514.2026.11424553.
46. Sadkowski, W. (2019). Koszty jakości przedsiębiorstw w ujęciu definicyjnym. Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego, 33(1), 80–88. https://doi.org/10.24917/20801653.331.6

REZULTATY KULTURY JAKOŚCI W UCZELNIACH: PRZEGLĄD BADAŃ ORAZ OCENA PODSTAW WNIOSKOWANIA PRZYCZYNOWEGO

Marta TUTKO[1*] i Małgorzata BUDZANOWSKA-DRZEWIECKA[2]

[1] Uniwersytet Jagielloński, Wydział Zarządzania i Komunikacji Społecznej, Instytut Ekonomii, Finansów i Zarządzania, Kraków; marta.tutko@uj.edu.pl; ORCID 0000-0002-8359-8081

[2] Uniwersytet Jagielloński, Wydział Zarządzania i Komunikacji Społecznej, Instytut Ekonomii, Finansów i Zarządzania, Kraków; m.budzanowska-drzewiecka@uj.edu.pl; ORCID 0000-0001-6651-4037

* Korespondencja: marta.tutko@uj.edu.pl; Tel.: +48-126-645-772

Streszczenie: Celem artykułu jest systematyczny przegląd badań dotyczących rezultatów kultury jakości w szkolnictwie wyższym, obejmujący identyfikację raportowanych efektów oraz ocenę, czy stosowane podejścia badawcze uzasadniają ich interpretację jako zależności przyczynowych. Zastosowano metodę systematycznego przeglądu literatury zgodnie z wytycznymi PRISMA. Wyniki wskazują, że w literaturze konsekwentnie raportuje się dodatnie powiązania pomiędzy kulturą jakości a funkcjonowaniem szkół wyższych, obejmujące wyniki organizacyjne, pracę kadry, jakość usług edukacyjnych oraz systemy zapewniania jakości. Jednocześnie ujawniono istotne ograniczenia metodologiczne analizowanych badań. Dominują projekty przekrojowe oparte na danych ankietowych i samoopisowych, analizowane przy użyciu modeli korelacyjnych i strukturalnych. W konsekwencji identyfikowane relacje mają charakter statystyczny, a nie przyczynowy. Dodatkowym problemem jest niespójność pomiędzy poziomem pomiaru a poziomem wnioskowania, prowadząca do błędów pomiędzy poziomami analizy. Wyniki wskazują na lukę pomiędzy deklarowanymi „rezultatami" a empirycznymi podstawami ich identyfikacji. Artykuł wnosi wkład poprzez krytyczną rewizję sposobu interpretacji wyników oraz wskazanie potrzeby stosowania bardziej rygorystycznych projektów badawczych, w tym badań podłużnych, quasi-eksperymentalnych i wieloźródłowych.

Słowa kluczowe: instytucje szkolnictwa wyższego, kultura jakości, rezultaty kultury jakości, systematyczny przegląd, metodyka badań.

EFFECTS OF QUALITY CULTURE IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Abstract: The aim of this article is to provide a systematic review of research on the effects of quality culture in higher education. Specifically, it seeks to identify the outcomes reported in the literature and to assess whether the research approaches employed justify interpreting these effects as causal relationships. A systematic literature review was conducted in accordance with

PRISMA guidelines. The findings indicate that the literature consistently reports positive associations between quality culture and the functioning of higher education institutions, including organizational performance, staff work, the quality of educational services, and quality assurance systems. At the same time, significant methodological limitations of the analyzed research were identified. Cross-sectional designs based on survey and self-reported data predominate, typically analyzed using correlational and structural models. As a result, the identified relations are statistical rather than causal. In addition, the inconsistency between the level of measurement and the level of inference leads to cross-level fallacies. The results reveal a gap between the declared "outcomes" and the empirical basis for their identification. The article contributes by offering a critical reassessment of how findings are interpreted and by highlighting the need for more rigorous research designs, including longitudinal, quasi-experimental, and multi-source studies.

Keywords: higher education institutions, quality culture, results of quality culture, effects of quality culture, systematic review, research methodology.

Wprowadzenie

Współczesne badania nad organizacjami coraz częściej odwołują się do koncepcji kultury jakości jako czynnika kształtującego funkcjonowanie i wyniki organizacji (np. Khalfan i in., 2022; Navarro i Naranjo, 2025). W literaturze rozwijanej przede wszystkim w kontekście przedsiębiorstw, kultura jakości jest konsekwentnie przedstawiana jako źródło pozytywnych rezultatów. Na przykład podkreśla się, że sprzyja wdrażaniu koncepcji TQM (Saraph i Sebastian, 1993), umożliwia osiąganie celów jakościowych (Watson i Gryna, 2001) oraz wiąże się z poprawą wyników finansowych i satysfakcji klientów (Bugdol, 2013). Podobny obraz wyłania się z badań empirycznych, które dokumentują dodatnie zależności między kulturą jakości a wynikami organizacyjnymi, jakością procesów, wydajnością pracy czy relacjami z klientami (np. Mohd Ali i Borhandden Musah, 2012; Barrett i Waddell, 2001; Wu, 2015; Hebbar i Mathew, 2017; Saarikallio i Tyrväinen, 2023).

Jednorodność tych ustaleń rodzi jednak pytanie o ich status poznawczy. Nie jest jasne, czy obserwowane zależności można interpretować jako rzeczywiste rezultaty kultury jakości, czy raczej jako deklarowane powiązania między zmiennymi, wynikające z przyjętych założeń metodologicznych i sposobów pomiaru. W konsekwencji pojęcie „rezultatów kultury jakości" bywa stosowane w sposób nieprecyzyjny, często bez odniesienia do warunków, które muszą zostać spełnione, aby możliwe było wnioskowanie o relacjach przyczynowo-skutkowych.

Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w kontekście szkolnictwa wyższego. Szkoły wyższe funkcjonują w odmiennym, złożonym otoczeniu instytucjonalnym, charakteryzującym się wielością interesariuszy i złożonymi strukturami zarządzania (Cavallone i in., 2022). W takich warunkach kultura jakości ma charakter wielowymiarowy, obejmując zarówno komponenty kulturowo-psychologiczne, jak i strukturalno-zarządcze, pozostające we

wzajemnych, często trudnych do rozdzielenia relacjach. Utrudnia to jednoznaczne przypisywanie obserwowanych efektów pojedynczym czynnikom oraz zwiększa ryzyko uproszczonych interpretacji.

Dotychczasowe badania nad kulturą jakości w szkolnictwie wyższym koncentrują się przede wszystkim na jej definiowaniu, identyfikacji komponentów oraz analizie mechanizmów jej kształtowania (np. Tutko i Budzanowska-Drzewiecka, 2019). Relatywnie rzadziej podejmowana jest natomiast kwestia jej rzeczywistych rezultatów. W konsekwencji interpretacje wyników często wykraczają poza możliwości wnioskowania wynikające z zastosowanych projektów badawczych, prowadząc do utożsamiania zależności statystycznych z relacjami przyczynowo-skutkowymi.

W tym kontekście pojawia się luka badawcza, dotycząca nie tyle samego istnienia powiązań między kulturą jakości a funkcjonowaniem uczelni, ile sposobu ich interpretacji. Brakuje systematycznych analiz, które jednocześnie identyfikowałyby raportowane zależności oraz poddawały krytycznej ocenie ich podstawy metodologiczne, a tym samym status poznawczy formułowanych wniosków.

Celem artykułu jest systematyczny przegląd badań dotyczących rezultatów kultury jakości w szkolnictwie wyższym. W szczególności artykuł ma na celu: (1) identyfikację powiązań między kulturą jakości a funkcjonowaniem uczelni oraz (2) ocenę, na ile dostępne badania pozwalają na formułowanie wniosków o charakterze przyczynowym.

W odróżnieniu od dotychczasowych opracowań, artykuł nie ogranicza się do syntezy wyników empirycznych, lecz koncentruje się na ich reinterpretacji w świetle przyjętych założeń metodologicznych. Pozwala to na przesunięcie perspektywy z identyfikacji „rezultatów" na analizę warunków, w których takie rezultaty mogą być wiarygodnie ustalane, oraz na krytyczną refleksję nad sposobem, w jaki pojęcie kultury jakości funkcjonuje w literaturze przedmiotu.

Metoda

Badanie zrealizowano wykorzystując metodę systematycznego przeglądu literatury postępując zgodnie z wytycznymi PRISMA (więcej Moher i in., 2009). Podejście takie zapewnia przejrzystość procedury oraz możliwość replikacji. Ponadto pozwala na uporządkowaną analizę istniejącego dorobku naukowego, choć nie eliminuje w pełni ryzyka subiektywności na etapie selekcji i interpretacji badań.

Przegląd literatury został ukierunkowany przez dwa pytania badawcze:

PB1: Jakie powiązania pomiędzy kulturą jakości a funkcjonowaniem instytucji szkolnictwa wyższego są raportowane w badaniach empirycznych?

PB2: W jakim zakresie zastosowane w tych badaniach podejścia metodologiczne uzasadniają interpretację raportowanych powiązań jako zależności przyczynowo-skutkowych?

Zgodnie z przyjętym protokołem, wyszukiwanie literatury przeprowadzono w bazie SCOPUS, obejmując publikacje z lat 1995-2026 (marzec). Strategia wyszukiwawcza opierała się na kombinacji słów kluczowych odnoszących się do kultury jakości („quality culture" OR „culture of quality"), jej rezultatów (outcome*, result*, effect*, impact*, consequence*, influence*) oraz kontekstu szkolnictwa wyższego („higher education" OR universit*). Wyszukiwanie ograniczono do pól: tytuł, abstrakt oraz słowa kluczowe, a także do artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach i dostępnych w języku angielskim.

Przyjęte kryteria włączenia obejmowały wyłącznie artykuły empiryczne odnoszące się do rezultatów kultury jakości w szkolnictwie wyższym, natomiast wykluczono publikacje o charakterze nieakademickim, opracowania pokonferencyjne oraz teksty niezwiązane z analizowanym kontekstem. Przyjęta strategia, mimo że daje podstawy do dyskusji problemu badawczego może prowadzić do pominięcia części dorobku naukowego, w szczególności badań publikowanych w innych językach lub indeksowanych w innych bazach.

W wyniku zastosowanej strategii zidentyfikowano 237 publikacji. Po wstępnej selekcji oraz analizie abstraktów zbiór zawężono do 17 artykułów, z których 15 spełniało kryteria pełnego dostępu i zostało włączonych do dalszej analizy. Ostateczna, niewielka liczebność próby sugeruje zarówno ograniczony zakres badań empirycznych w tym obszarze, jak i restrykcyjność przyjętych kryteriów.

Analiza pełnych tekstów umożliwiła opracowanie systemu kodów analitycznych służących identyfikacji raportowanych powiązań oraz charakterystyk metodologicznych badań. Proces kodowania przeprowadzono z udziałem dwóch badaczy, co miało na celu zwiększenie rzetelności analizy. Jednocześnie brak formalnej procedury oceny zgodności między koderami (np. współczynnika zgodności) stanowi ograniczenie metodologiczne i może wpływać na spójność klasyfikacji.

Najstarszy z analizowanych tekstów pochodzi z 2007 roku, co wskazuje na relatywnie późne zainteresowanie tą tematyką przez badaczy. Jednocześnie widoczny jest wyraźny wzrost liczby publikacji w latach 2023-2025 (12 z 15 analizowanych badań), co świadczy o rosnącym zainteresowaniu problematyką deklarowanych rezultatów kultury jakości w badaniach nad szkolnictwem wyższym. Taka struktura korpusu może wynikać z efektu aktualności (*recency bias*), co powinno być wzięte pod uwagę w interpretacji ustaleń.

Wszystkie z 15 tekstów poddano ocenie jakości metodologicznej na podstawie zestawu kryteriów zaadaptowanych z wcześniejszych przeglądów literatury w obszarze zarządzania. Ocena obejmowała przejrzystość i adekwatność projektu badania, dobór i wielkość próby, trafność operacjonalizacji zmiennych, adekwatność zastosowanych metod analizy danych, kontrolę pomiaru oraz zgodność formułowanych wniosków z zasadami wnioskowania statystycznego i przyczynowego. Równolegle przeprowadzono ocenę ryzyka wystąpienia stronniczości badań (*risk of bias*), uwzględniając typowe dla badań ankietowych zagrożenia, takie jak *common method bias*, *cross-sectional bias*, *self-report bias* oraz *selection bias*. Etap

ten ma szczególne znaczenie ze względu na zróżnicowanie projektów badawczych oraz przewagę badań ankietowych w dziedzinie kultury jakości w szkolnictwie wyższym.

Wyniki

3.1 Zidentyfikowane powiązania pomiędzy kulturą jakości a funkcjonowaniem instytucji szkolnictwa wyższego

W pierwszej kolejności, analiza koncentrowała się na identyfikacji powiązań pomiędzy kulturą jakości a funkcjonowaniem szkół wyższych w różnych obszarach (PB1) (tabela 1).

Przegląd 15 zakwalifikowanych artykułów pozwala na wyciągnięcie kilku wniosków dotyczących deklarowanych powiązań. Analizowana literatura konsekwentnie dokumentuje dodatnie zależności między kulturą jakości a różnymi wymiarami funkcjonowania uczelni. Powiązania te obejmują zarówno poziom organizacyjny, jak i indywidualny, odnosząc się do wyników instytucji, efektywności pracy kadry, jakości usług edukacyjnych oraz funkcjonowania wewnętrznych systemów zapewniania jakości. Jednocześnie należy podkreślić, że identyfikowane zależności mają charakter raportowanych powiązań między zmiennymi, których interpretacja jako rezultatów wymaga dalszej analizy metodologicznej.

Zwrócono również uwagę na poziom analizy przyjmowany w badaniach (mikro, mezo i makro). Analizy obejmowały zarówno poziom indywidualny (mikro), odnoszący się do postaw, zachowań i wyników pracy pracowników (np. Musah i in., 2023), jak i poziom organizacyjny (makro), w którym zakładano ocenę wyników instytucji (np. Hilman i in., 2017; Iqbal, Ashfaq, i in., 2023; Iqbal, Razalli, i in., 2023; Iqbal, Taib, i in., 2023). W części badań uwzględniano także poziom pośredni (mezo), związany z funkcjonowaniem procesów i systemów zapewniania jakości (np. Tuan i in., 2023).

Tabela 1.
Raportowane rezultaty kultury jakości w szkołach wyższych

Lp.	Autor(-zy), rok	Główny raportowany wynik	Charakter relacji	Deklarowany poziom analizy	Obszar
1	Ahmad i Francis (2007)	Kultura jakości jako czynnik sprzyjający skuteczności reorganizacji procesów	Pozytywny	Mezo	Funkcjonowanie uczelni
2	Mohd Ali i Borhandden Musah (2012)	Związek kultury jakości z wydajnością pracy kadry	Pozytywny	Mikro	Wyniki kadry
3	Hilman i in. (2017)	Wpływ kultury jakości na wyniki uczelni	Pozytywny	Makro	Funkcjonowanie uczelni
4	Hildesheim i Sonntag (2020)	Związek kultury jakości z satysfakcją, zaangażowaniem i rozwojem kariery pracowników	Pozytywny	Mikro	Wyniki kadry
5	Damanik i in. (2023)	Wpływ kultury jakości na zaangażowanie w realizację polityki jakości	Pozytywny	Mikro	Systemy zapewniania jakości

Lp.	Autor(-zy), rok	Główny raportowany wynik	Charakter relacji	Deklarowany poziom analizy	Obszar
6	Iqbal, Razalli i in. (2023)	Kultura jakości jako mediator między motywacją a wynikami szkolnictwa wyższego	Mediacja	Makro	Funkcjonowanie uczelni
7	Iqbal, Ashfaq i in. (2023)	Wpływ kultury jakości na jakość usług edukacyjnych	Pozytywny	Makro	Jakość usług edukacyjnych
8	Iqbal, Taib i in. (2023)	Kultura jakości jako mediator między stylami przywództwa a wynikami organizacyjnymi	Mediacja	Makro	Wyniki kadry
9	Musah i in. (2023)	Wpływ kultury jakości na wyniki pracy kadry akademickiej	Pozytywny	Mikro	Wyniki kadry
10	Tuan i in. (2023)	Wpływ komponentów kultury jakości na skuteczność systemów zapewniania jakości	Pozytywny	Mezo	Systemy zapewniania jakości
11	Iqbal i in. (2024)	Kultura jakości jako mediator między akredytacją a wynikami uczelni	Mediacja	Makro	Systemy zapewniania jakości
12	Tu i in. (2024)	Wpływ kultury jakości na jakość kształcenia (studia II i III stopnia)	Pozytywny	Mezo	Jakość usług edukacyjnych
13	Ali i Al Salami (2025)	Kultura jakości jako mediator między inicjatywami jakości a wynikami organizacyjnymi	Mediacja	Makro	Funkcjonowanie uczelni
14	Khuram i in. (2025)	Kultura jakości jako mediator między czynnikami zarządzania a wynikami kadry	Mediacja	Mikro	Wyniki kadry
15	Yazid i in. (2025)	Wpływ kultury jakości na wyniki uczelni	Pozytywny	Makro	Funkcjonowanie uczelni

Źródło: opracowanie własne na podstawie źródeł przytoczonych w tabeli.

Przeprowadzona analiza wskazuje na istotną niespójność pomiędzy deklarowanym a rzeczywistym poziomem analizy. Choć w przypadku wielu badań formułowane wnioski dotyczą poziomu organizacyjnego (np. wpływ kultury jakości na wyniki uczelni), operacjonalizacja zmiennych opiera się na danych pochodzących od indywidualnych respondentów. Oznacza to, że pomiar realizowany jest na poziomie mikro, podczas gdy wnioskowanie odnosi się do poziomu makro. Tego rodzaju rozbieżność stanowi przykład błędu wnioskowania między poziomami analizy (*cross-level fallacy i ecological fallacy*) i ogranicza możliwość formułowania wniosków dotyczących funkcjonowania organizacji jako całości. W konsekwencji część raportowanych zależności może odzwierciedlać raczej percepcje jednostek niż rzeczywiste efekty na poziomie instytucjonalnym.

Deklarowane w analizowanych artykułach efekty można przyporządkować do czterech głównych obszarów funkcjonowania szkół wyższych. Najczęściej odnoszą się one do wyników osiąganych przez organizację jako całość. W tym zakresie kultura jakości jest opisywana jako czynnik wspierający procesy reorganizacyjne (Ahmad i Francis, 2007) oraz poprawiający wyniki organizacyjne (Hilman i in., 2017; Iqbal i in., 2024). Yazid i in. (2025) wskazują dodatkowo, że kultura jakości nie tylko wpływa na wyniki organizacyjne, ale także wzmacnia relacje pomiędzy procedurami a oceną efektów działań. W analizowanych badaniach dominowały modele o charakterze bezpośrednim, natomiast jedynie w pracach Yazid i in. (2025) oraz Iqbala i in. (2024) uwzględniono modele mediacyjne, sugerujące pośrednie mechanizmy oddziaływania.

Drugim obszarem rezultatów kultury jakości są powiązania pomiędzy kulturą jakości a funkcjonowaniem kadry akademickiej. Wyniki badań wskazują, że kultura jakości wiąże się z wyższą wydajnością pracy (Mohd Ali i Borhandden Musah, 2012; Musah i in., 2023), a także z satysfakcją zawodową, zaangażowaniem oraz rozwojem kariery (Hildesheim i Sonntag, 2020). Iqbal, Taib i in. (2023) pokazują ponadto, że kultura jakości może odgrywać rolę mechanizmu pośredniczącego, przenosząc oddziaływanie stylów przywództwa na wyniki organizacyjne.

Kolejny obszar obejmuje jakość usług edukacyjnych. W tym zakresie badania wskazują na bezpośredni związek pomiędzy kulturą jakości a jakością świadczonych usług, niezależnie od typu uczelni (publiczne vs prywatne) (Iqbal, Ashfaq, i in., 2023) oraz poziomu kształcenia (Tu i in., 2024).

Ostatni wyodrębniony obszar dotyczy wewnętrznych systemów zapewniania jakości. Wyniki analiz wskazują, że kultura jakości wspiera ich funkcjonowanie oraz skuteczność (Damanik i in., 2023; Tuan i in., 2023). Co ważne, w analizowanych badaniach rzadko uwzględnia się możliwość współzależności pomiędzy kulturą jakości a systemami zapewniania jakości. Tymczasem może ona mieć charakter endogeniczny (więcej Antonakis i in., 2010; Antonakis i in., 2014), co oznacza, że oba zjawiska wzajemnie się wzmacniają, a nie pozostają w prostej relacji przyczynowo-skutkowej.

Mimo że wyniki wskazują na konsekwentnie pozytywny kierunek zależności, ich interpretacja wymaga ostrożności ze względu na ograniczenia metodologiczne analizowanych badań. We wszystkich uwzględnionych w analizie publikacjach raportowano wyłącznie pozytywne relacje, co może wskazywać na obecność efektu publikacyjnego lub dominację określonego paradygmatu badawczego. Dodatkowo obserwowana jednorodność wyników może być w pewnym stopniu konsekwencją ograniczeń projektów badawczych.

3.2 Możliwości interpretacji raportowanych powiązań jako zależności przyczynowo-skutkowych

Odpowiedź na drugie pytanie badawcze wymagała oceny zastosowanych w analizowanych badaniach podejść metodologicznych w kontekście trafności interpretacji raportowanych powiązań w kategoriach zależności przyczynowo-skutkowych. W tym celu przeanalizowano projekty badań, metody analizy danych, charakter prób oraz sposób formułowania wniosków, co pozwoliło na identyfikację kluczowych ograniczeń wnioskowania (tabela 2).

Tabela 2.
Ograniczenia metodologiczne badań nad rezultatami kultury jakości w szkolnictwie wyższym

Lp.	Autor(-zy), rok	Projekt (procedura) badania	Metody analizy	Próba badawcza	Typ wnioskowania	Ograniczenia wnioskowania
1	Ahmad i Francis (2007)	Jakościowe studium przypadku	Analiza tematyczna	3 uczelnie	Interpretacyjne	Brak możliwości uogólnienia; brak wnioskowania statystycznego
2	Mohd Ali i Borhandden Musah (2012)	Ankietowe	PCA, CFA, korelacje	267 pracowników akademickich	Korelacyjne	Brak kontroli zmiennych zakłócających; brak inferencji przyczynowej
3	Hilman i in. (2017)	Ankietowe	PLS-SEM	44 przedstawicieli kadry zarządzającej	Zależnościowe	Mała próba; ograniczona stabilność estymacji
4	Hildesheim i Sonntag (2020)	Ankietowe	EFA, PCA, SEM	789 pracowników uczelni	Korelacyjno-modelowe	Dane samoopisowe; brak danych obiektywnych
5	Damanik i in. (2023)	Ankietowe	*Path Analysis*	202 pracowników akademickich	Zależnościowe	*Cross-sectional design*; brak testowania przyczynowości
6	Iqbal, Razalli i in. (2023)	Ankietowe	PLS-SEM	105 menedżerów administracyjnych	Modelowanie zależności	Jedno źródło danych; ryzyko *common method bias*
7	Iqbal, Ashfaq i in. (2023)	Ankietowe	PLS-SEM	105 pracowników administracyjnych i menedżerów ds. jakości	Modelowanie zależności	Ograniczona reprezentatywność próby
8	(Iqbal, Taib i in. 2023)	Ankietowe	PLS-SEM	105 pracowników administracyjnych	Modelowanie zależności	Brak danych wielopoziomowych; problem poziomu analizy
9	Musah i in. (2023)	Ankietowe	CFA, SEM	1068 pracowników akademickich	Modelowanie zależności	Dane przekrojowe; brak testowania kierunku zależności
10	Tuan i in. (2023)	Ankietowe	EFA, regresja	300 pracowników akademickich, administracyjnych i menedżerów	Zależnościowe	Mieszanie metod; ograniczona spójność inferencji
11	Iqbal i in. 2024)	Ankietowe	PLS-SEM	105 pracowników administracyjnych	Modelowanie zależności	Brak danych podłużnych; mediacja oparta na korelacjach
12	Tu i in. (2024)	Ankietowe	EFA, regresja	256 studentów	Zależnościowe	Przeniesienie wniosków na poziom instytucjonalny
13	Ali i Al Salami (2025)	Ankietowe	PLS-SEM	337 liderów	Modelowanie zależności	Jedno źródło danych; bias percepcyjny
14	Khuram i in. (2025)	Ankietowe	PLS-SEM	373 pracowników akademickich	Modelowanie zależności	Ograniczenia *cross-sectional*; brak eksperymentu

Lp.	Autor(-zy), rok	Projekt (procedura) badania	Metody analizy	Próba badawcza	Typ wnioskowania	Ograniczenia wnioskowania
15	Yazid i in., 2025)	Ankietowe	PLS-SEM	177 audytorów	Modelowanie zależności	Brak kontroli kontekstu; możliwy efekt publikacyjny

Źródło: opracowanie własne na podstawie źródeł przytoczonych w tabeli.

Zasadniczy problem ujawniony w analizie polega na tym, że pomimo iż badania często operują językiem „wpływu" lub „rezultatów", zastosowane procedury w większości nie spełniają podstawowych warunków wnioskowania przyczynowego. Innymi słowy, interpretacje sugerujące istnienie rezultatów kultury jakości wykraczają poza możliwości inferencyjne zastosowanych metod.

Wyniki wskazują na wyraźną dominację ilościowych badań przekrojowych opartych na danych ankietowych (14 z 15 analizowanych badań), w których wykorzystuje się zaawansowane techniki statystyczne, takie jak modelowanie równań strukturalnych (SEM, PLS-SEM). Jedynie Ahmad i in. (2007) zastosowali podejście jakościowe w formie wielokrotnego studium przypadku, co umożliwiło pogłębioną analizę kontekstu, jednak nie dostarczyło podstaw do uogólniania wyników.

Dominacja badań przekrojowych oznacza, że wszystkie zmienne mierzone są w tym samym momencie czasowym, co uniemożliwia ustalenie kierunku zależności między nimi. W konsekwencji nie można rozstrzygnąć, czy kultura jakości wpływa na wyniki organizacyjne, czy też odwrotnie, tzn. czy lepiej funkcjonujące szkoły wyższe deklarują wyższy poziom kultury jakości. Problem ten dotyczy wszystkich badań ilościowych ujętych w analizie.

Dodatkowym ograniczeniem analizowanych badań jest powszechne wykorzystanie w projektach danych samoopisowych pochodzących z jednego źródła (badania ankietowe). Tego typu rozwiązania metodologiczne zwiększają ryzyko wystąpienia błędu wspólnej metody (*common method bias*), a także błędów percepcyjnych wynikających z cech badań ankietowych, co może prowadzić do zawyżania siły obserwowanych zależności. Jednocześnie brak triangulacji danych (np. poprzez wykorzystanie obiektywnych wskaźników) ogranicza możliwość weryfikacji uzyskanych wyników.

Analiza prób badawczych wśród których zrealizowane zostały badania, wskazuje na dominację doboru wygodnego oraz znaczną heterogeniczność respondentów (pracownicy akademiccy, administracja, kadra zarządzająca, studenci). Ponadto w wielu przypadkach liczebność prób jest ograniczona (np. w przypadku Hilman i in., 2017 do 44 osób), co może wpływać na stabilność estymacji modeli statystycznych oraz ich zdolność do odzwierciedlania rzeczywistych zależności. Jednocześnie brak procedur losowego doboru próby generuje ryzyko błędu selekcji (*selection bias*).

Szczególnej ostrożności wymagają badania wykorzystujące modele mediacyjne. Choć zastosowanie SEM lub PLS-SEM umożliwia testowanie złożonych relacji między zmiennymi, mediacja estymowana na danych przekrojowych ma charakter wyłącznie statystyczny. W

warunkach braku porządku czasowego oraz kontroli zmiennych zakłócających nie może być interpretowana jako dowód istnienia mechanizmu przyczynowego.

Zidentyfikowane ograniczenia metodologiczne znalazły odzwierciedlenie w ocenie jakości analizowanych badań. Wśród 15 artykułów dominują opracowania o umiarkowanej jakości metodologicznej (10 przypadków), podczas gdy pozostałe zakwalifikowano jako niskiej jakości. Żadne z badań nie spełniało kryteriów wysokiej jakości, co wynikało przede wszystkim z przekrojowego charakteru projektów badawczych, braku kontroli zmiennych oraz ograniczeń w zakresie wnioskowania przyczynowego.

Reasumując, mimo że analizowane badania empiryczne konsekwentnie wskazują na pozytywne powiązania pomiędzy kulturą jakości a funkcjonowaniem szkół wyższych, zastosowane podejścia metodologiczne nie dostarczają wystarczających podstaw do interpretowania tych zależności w kategoriach przyczynowo-skutkowych. W konsekwencji dotychczasowe ustalenia należy traktować przede wszystkim jako opis współwystępowania zmiennych, a nie dowód istnienia rzeczywistych efektów kultury jakości.

Dyskusja

Artykuł prezentuje wyniki jednej z pierwszych systematycznych syntez wyników badań dotyczących deklarowanych rezultatów funkcjonowania kultury jakości w szkolnictwie wyższym. Uzyskane wyniki wskazują na silne zakorzenienie tego nurtu badawczego w paradygmacie ilościowym oraz dominację podejść koncentrujących się na statystycznym testowaniu zależności między teoretycznymi konstruktami. Jednocześnie przeprowadzona analiza ujawnia istotną rozbieżność pomiędzy stosowanym językiem interpretacji a rzeczywistymi możliwościami inferencyjnymi zastosowanych projektów badawczych.

Przede wszystkim wyniki wskazują, że znaczna część z analizowanej literatury odwołuje się do „rezultatów" lub „wpływu", mimo że zastosowane podejścia metodologiczne nie spełniają podstawowych warunków wnioskowania przyczynowego. Wiarygodna identyfikacja zależności przyczynowo-skutkowych w naukach społecznych wymaga spełnienia konkretnych warunków, takich jak kontrola zmiennych zakłócających, zapewnienie porządku czasowego, randomizacja czy reprezentatywność próby (więcej Abston i in., 2016; Aguinis i in., 2021; Martin i in., 2021), a także wykorzystania zróżnicowanych źródeł danych ograniczających ryzyko błędu wspólnej metody (Podsakoff i in., 2003; Baumgartner i in., 2021). Jednak jak pokazuje przeprowadzony przegląd, badania nad kulturą jakości w szkolnictwie wyższym rzadko spełniają te warunki. W konsekwencji dostarczają one przede wszystkim dowodów na współwystępowanie zmiennych, a nie na istnienie relacji przyczynowo-skutkowych.

Ograniczona możliwość formułowania silnych wniosków wynika również z umiarkowanej jakości metodologicznej analizowanych badań. Żadne z 15 opracowań nie spełniało kryteriów

wysokiej jakości, co wynikało przede wszystkim z dominacji projektów przekrojowych, wykorzystania danych samoopisowych oraz braku kontroli kluczowych zmiennych. W rezultacie mimo spójnego i konsekwentnie pozytywnego obrazu wyłaniającego się z literatury, trudno uznać, że istnieją wystarczające podstawy empiryczne do formułowania jednoznacznych twierdzeń o wpływie kultury jakości na funkcjonowanie szkół wyższych.

Dodatkowym problemem jest znaczące zróżnicowanie sposobów operacjonalizacji zarówno kultury jakości (Tutko, 2019), jak i jej potencjalnych rezultatów. Brak spójnych ram pomiarowych utrudnia porównywalność wyników oraz może wpływać na obserwowaną siłę i kierunek zależności. W konsekwencji analizowany konstrukt funkcjonuje często jako kategoria percepcyjna, odzwierciedlająca subiektywne oceny respondentów, a nie jednoznacznie zdefiniowany mechanizm organizacyjny. Zatem z tej perspektywy, kultura jakości powinna być interpretowana nie jako mechanizm sprawczy, lecz jako konstrukcja percepcyjna współwystępująca z ocenami funkcjonowania organizacji.

Na uwagę zasługuje także wysoka jednorodność raportowanych wyników. Wszystkie analizowane badania wskazują na pozytywne powiązania między kulturą jakości a różnymi aspektami funkcjonowania uczelni. Brak wyników niejednoznacznych lub negatywnych może sugerować występowanie efektu publikacyjnego (*publication bias*) lub dominację określonego paradygmatu badawczego, w którym zakłada się z góry pozytywny charakter analizowanych zależności.

W rezultacie uzyskane ustalenia skłaniają do rewizji sposobu, w jaki w literaturze interpretowane są „rezultaty" kultury jakości. Obecny stan badań uzasadnia raczej ostrożne wnioskowanie o powiązaniach lub współwystępowaniu zmiennych niż o ich przyczynowym oddziaływaniu. Oznacza to potrzebę wyraźnego rozróżnienia pomiędzy językiem teoretycznym a empirycznymi podstawami wnioskowania, a także konieczność projektowania badań, które pozwolą na bardziej rygorystyczne testowanie mechanizmów przyczynowych.

Podsumowanie

Przeprowadzony systematyczny przegląd literatury wskazuje, że badania empiryczne dostarczają licznych dowodów na istnienie powiązań między kulturą jakości a różnymi aspektami funkcjonowania instytucji szkolnictwa wyższego. Zidentyfikowane zależności obejmują zarówno poziom organizacyjny, jak i indywidualny, koncentrując się wokół wyników uczelni, jakości usług edukacyjnych, funkcjonowania systemów zapewniania jakości oraz efektów pracy kadry. Jednocześnie analiza ujawnia, że sposób interpretacji tych powiązań w literaturze wykracza poza możliwości wnioskowania wynikające z zastosowanych podejść metodologicznych.

Kluczowym wnioskiem jest istnienie wyraźnej luki między deklarowanymi „rezultatami" a empirycznymi podstawami ich identyfikacji. Dominacja badań przekrojowych, wykorzystujących dane samoopisowe pochodzące z jednego źródła, brak kontroli zmiennych zakłócających oraz ograniczenia w doborze i wielkości prób powodują, że większość analizowanych badań nie spełnia warunków umożliwiających wnioskowanie przyczynowo-skutkowe. W konsekwencji dostępne wyniki należy interpretować przede wszystkim jako dowody współwystępowania zmiennych, a nie potwierdzenie rzeczywistych efektów kultury jakości.

Wyniki przeglądu mają istotne implikacje dla dalszego rozwoju badań nad kulturą jakości w szkolnictwie wyższym. Wskazują one na potrzebę większej precyzji pojęciowej i metodologicznej, w szczególności rozróżnienia pomiędzy językiem opisującym zależności statystyczne a językiem implikującym przyczynowość. Ponadto wyniki podkreślają konieczność projektowania badań o wyższym rygorze metodologicznym, uwzględniających dane podłużne, schematy eksperymentalne lub quasi-eksperymentalne, a także wykorzystanie wielu źródeł danych. Wyniki sugerują też potrzebę większej spójności w operacjonalizacji kultury jakości oraz jej rezultatów, co umożliwiłoby bardziej wiarygodne porównania między badaniami i kumulację wiedzy.

Jednocześnie przeprowadzona analiza wskazuje na potencjalne kierunki dalszych badań. Zasadne wydaje się rozwijanie podejść wielopoziomowych, pozwalających na spójne łączenie poziomu indywidualnego i organizacyjnego, a także badanie mechanizmów pośredniczących w sposób uwzględniający porządek czasowy. Istotnym kierunkiem jest również eksploracja alternatywnych wyników, w tym efektów niejednoznacznych lub negatywnych, co mogłoby ograniczyć ryzyko biasu publikacyjnego i przyczynić się do bardziej zrównoważonego obrazu badanego zjawiska.

Przeprowadzony przegląd nie jest wolny od ograniczeń. Najważniejszym z nich jest ograniczenie analizy do artykułów pełnotekstowych dostępnych w jednej bazie danych (SCOPUS), co mogło wpłynąć na zakres uwzględnionych badań. Ograniczenie to wskazuje na potrzebę rozszerzenia przyszłych analiz o inne bazy oraz typy publikacji, co pozwoliłoby na pogłębioną ocenę metodologiczną badań nad rezultatami kultury jakości w szkolnictwie wyższym.

Bibliografia

1. Abston, K.A., White, C.D., Bennett, A.A., Batchelor, J.H., Adkins, C.L., Banks, G.C., Whelpley, C.E., Pollack, J.M., & O'Boyle, E.H. (2016). Questions about questionable research practices in the field of management. *Journal of Management*, *42*(1), 5–20. https://doi.org/10.1177/0149206315619011
2. Aguinis, H., Hill, N.S., & Bailey, J.R. (2021). Best practices in data collection and preparation: recommendations for reviewers, editors, and authors. *Organizational Research Methods*, *24*(4), 678–693. https://doi.org/10.1177/1094428119836485
3. Ahmad, H., & Francis, A. (2007). Business process reengineering: critical success factors in higher education. *Business Process Management Journal*, *13*(3), 451–469. https://doi.org/10.1108/14637150710752344
4. Ali, H.M., & Al Salami, K.A.M. (2025). The impact of quality assurance initiatives on the performance of private higher education institutions in Oman: the mediating roles of quality culture. *Quality in Higher Education*, *31*(2), 165–188. https://doi.org/10.1080/13538322.2025.2542647
5. Antonakis, J., Bendahan, S., Jacquart, P., & Lalive, R. (2010). On making causal claims: A review and recommendations. *The Leadership Quarterly*, *21*(6), 1086–1120. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2010.10.010
6. Antonakis, J., Bendahan, S., Jacquart, P., & Lalive, R. (2014). Causality and endogeneity: problems and solutions. W *The Oxford handbook of leadership and organizations* (T. 1, Numer June 2018). https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199755615.013.007
7. Barrett, B., & Waddell, D. (2001). Quality culture and its impact on quality performance (19/01).
8. Baumgartner, H., Weijters, B., & Pieters, R. (2021). The biasing effect of common method variance: some clarifications. *Journal of the Academy of Marketing Science*, *49*(2), 221–235. https://doi.org/10.1007/s11747-020-00766-8
9. Bugdol, M. (2013). Kultura jakości jako wyraz filozofii zarządzania. W *Filozofia a zarządzanie* (ss. 213–240). Oficyna Wolters Kluwer business.
10. Cavallone, M., Ciasullo, M.V., Manna, R., & Palumbo, R. (2022). A tale of two stakeholders: achieving excellence by merging quality expectations in Higher Education Institutions. *Studies in Higher Education*, *47*(2), 244–258. https://doi.org/10.1080/03075079.2020.1739016
11. Damanik, S., Suprayitno, S., Mesnan, M., & Nasution, U. (2023). The influence of leadership, quality culture, and job satisfaction on commitment in implementing quality

assurance policies. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, *11*(6), 1555–1565. https://doi.org/10.46328/ijemst.3760

12. Hebbar, R.R., & Mathew, A.O. (2017). Impact of quality culture on total quality management practices and quality performance: a case study. *Quality - Access to Success*, *18*(157), 95–100.
13. Hildesheim, C., & Sonntag, K. (2020). The Quality Culture Inventory: a comprehensive approach towards measuring quality culture in higher education. *Studies in Higher Education*, *45*(4), 892–908. https://doi.org/10.1080/03075079.2019.1672639
14. Hilman, H., Abubakar, A., & Kaliappen, N. (2017). The effect of quality culture on university performance. *Journal of Business and Retail Management Research*, *11*(4), 25–34.
15. Iqbal, S., Ashfaq, T., Azlan Bin Taib, C., & Rizal Razalli, M. (2023). The effect of quality culture on service quality of public and private universities: a comparative analysis. *PLOS ONE*, *18*(4), e0283679. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283679
16. Iqbal, S., Razalli, M.R., & Taib, C.A. Bin. (2023). Influence of intrinsic and extrinsic motivation on higher education performance: mediating effect of quality culture. *Frontiers in Education*, *8*, 1–16. https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1099415
17. Iqbal, S., Taib, C.A. Bin, & Razalli, M.R. (2023). The nexus between leadership styles and organizational performance: the mediating role of quality culture. *Quality Assurance in Education*, *31*(4), 600–615. https://doi.org/10.1108/QAE-03-2023-0038
18. Iqbal, S., Taib, C.A. Bin, & Razalli, M.R. (2024). The effect of accreditation on higher education performance through quality culture mediation: the perceptions of administrative and quality managers. *The TQM Journal*, *36*(2), 572–592. https://doi.org/10.1108/TQM-11-2022-0322
19. Khalfan, I., Jamaluddin, Z., & Widyarto, S. (2022). Effect of leadership and quality culture on quality management practices and operational performance of construction companies in Oman. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *39*(7), 1824–1843. https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2021-0165
20. Khuram, S., Rehman, C.A., Aslam, M.Z., & Ali, S. (2025). Managing faculty performance: a social cognitive perspective. *Management Decision*, 1–19. https://doi.org/10.1108/MD-01-2025-0219
21. Martin, R., Hughes, D.J., Epitropaki, O., & Thomas, G. (2021). In pursuit of causality in leadership training research: a review and pragmatic recommendations. *The Leadership Quarterly*, *32*(5), 101375. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2019.101375
22. Mohd Ali, H., & Borhandden Musah, M. (2012). Investigation of Malaysian higher education quality culture and workforce performance. *Quality Assurance in Education*, *20*(3), 289–309. https://doi.org/10.1108/09684881211240330

23. Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D.G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, *339*(jul21 1), b2535–b2535. https://doi.org/10.1136/bmj.b2535
24. Musah, M.B., Tahir, L.M., Ali, H.M., Al-Hudawi, S.V.H., Issah, M., Farah, A.M., Abdallah, A.K., & Kamil, N.M. (2023). Testing the validity of academic staff performance predictors and their effects on workforce performance. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, *12*(2), 941. https://doi.org/10.11591/ijere.v12i2.24230
25. Navarro, G., & Naranjo, G. (2025). Quality culture, quality management, and organizational performance: a structural model for the manufacturing sector. *Sustainability*, *17*(9), 3934. https://doi.org/10.3390/su17093934
26. Podsakoff, P.M., MacKenzie, S.B., Lee, J.Y., & Podsakoff, N.P. (2003). Common method biases in behavioral research: a critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology*, *88*(5), 879–903. https://doi.org/10.1037/0021-9010.88.5.879
27. Saarikallio, M., & Tyrväinen, P. (2023). Quality culture boosts agile transformation: action research in a business-to-business software business. *Journal of Software: Evolution and Process*, *35*(1), 1–15. https://doi.org/10.1002/smr.2504
28. Saraph, J.V., & Sebastian, R.J. (1993). Developing a quality culture. *Quality Progress*, *26*(9), 73–79.
29. Tu, N.T., Huong, T.T.T., Nham, N.T., & Tuan, N.A. (2024). Quality culture in postgraduate education: student's satisfaction perspectives. *Edelweiss Applied Science and Technology*, *8*(6), 3997–4013. https://doi.org/10.55214/25768484.v8i6.2879
30. Tuan, N.A., Kien, N.T., Trang, N.N., Tu, N.T., & Hue, N.T. (2023). Research on factors of quality culture affecting internal education quality assurance of universities in Vietnam. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, *19*, 218–232. https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.19
31. Tutko, M. (2019). Quality culture research in higher education: literature review. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, *2019*(136), 619–629. https://doi.org/10.29119/1641-3466.2019.136.48
32. Tutko, M., & Budzanowska-Drzewiecka, M. (2019). Postrzeganie kultury jakości uniwersytetu przez społeczność akademicką. W Ł. Sułkowski & J. Fijałkowska (Red.), *Zarządzanie kapitałem ludzkim w uczelniach* (s. 181–195). Wydawnictwo Społecznej Akademii Nauk.
33. Watson, M.A., & Gryna, F.M. (2001). Quality culture in small business: four case studies. *Quality Progress*, *34*(1), 41–48.
34. Wu, S. J. (2015). The impact of quality culture on quality management practices and performance in Chinese manufacturing firms. *International Journal of Quality &*

Reliability Management, *32*(8), 799–814. https://doi.org/10.1108/IJQRM-12-2013-0199

35. Yazid, H., Wiyantoro, L.S., Ismail, T., & Ismawati, I. (2025). Performance determinants of higher education institutions and the mediating role of quality culture: internal auditors' perspectives. *Cogent Business & Management*, *12*(1). https://doi.org/10.1080/23311975.2025.2455537

ZASTOSOWANIE SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W OCENIE MĘTNOŚCI CIECZY

Przemysław MIREK[1], Jacek CZERNIAK[2]

1 Dr inż., Kraków; przemyslaw.mirek@phd.uek.krakow.pl; ORCID 0009-0008-2166-2114
2 Dr inż., Kraków; czerniaj@uek.krakow.pl; ORCID 0000-0002-6446-1426

Streszczenie: W obszarze współczesnego zarządzania jakością oraz nauk o środowisku, zapewnienie czystości cieczy wymaga zastosowania metod analitycznych łączących wysoką precyzję z efektywnością operacyjną. Tradycyjne metody nefelometryczne i turbidymetryczne, mimo że stanowią obowiązujący standard, generują krytyczne ograniczenia operacyjne (tzw. wąskie gardło): dostarczają one jedynie zagregowanej wartości ilościowej (NTU), pozbawione są jednak zdolności do jakościowej identyfikacji specyficznych zanieczyszczeń. Głównym celem niniejszych badań jest opracowanie zoptymalizowanego modelu oceny jakości wody, łączącego szybkość, prostotę i wysoką dokładność, co w konsekwencji usprawni procesy operacyjne w obszarze zarządzania jakością. Wykorzystanie inteligentnych algorytmów rozpoznawania zanieczyszczeń i patogentów, pozwala na wyeliminowanie dotychczasowych ograniczeń, umożliwiając błyskawiczne rozróżnienie elementów biotycznych (mikroorganizmów i zanieczyszczeń organicznych) od abiotycznych cząstek stałych (zawiesin mineralnych, mikroplastiku). Wdrożenie przedmiotowej metodologii w strukturach zarządzania jakością pozwala na substytucję kosztochłonnych i długotrwałych procedur laboratoryjnych (generujących konieczność utrzymywania specyficznej infrastruktury wzorcowej) na rzecz zautomatyzowanego monitoringu in line. Architektura modelu, determinowana przez ciągły napływ danych o wysokiej rozdzielczości, pozwala na radykalne skrócenie pętli sprzężenia zwrotnego w sterowaniu procesowym. Przekłada się to na prewencję uszkodzeń infrastruktury technicznej oraz ochronę biotopów wodnych, konstytuując nowy standard w obszarze efektywnego ekonomicznie Quality Control. Wykorzystanie technik sztucznej inteligencji w procesie predykcji i estymacji parametrów nadaje metodzie charakter transformacyjny, konsolidując funkcje kontrolne, prognostyczne oraz audytowe w jednolity system wspomagania decyzji menedżerskich.

Słowa kluczowe: Sztuczna inteligencja, Mętność cieczy, Składniki biotyczne i abiotyczne, Cząstki stałe, Monitoring środowiska, Uczenie maszynowe, Integralność ekosystemów, Zanieczyszczenia nieorganiczne.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LIQUID TURBIDITY ASSESSMENT

Przemysław MIREK[1], Jacek CZERNIAK[2]

[1] Dr inż., Kraków; przemyslaw.mirek@phd.uek.krakow.pl; ORCID 0009-0008-2166-2114
[2] Dr inż., Kraków; czerniaj@uek.krakow.pl; ORCID 0000-0002-6446-1426

Abstract: In contemporary quality management and environmental sciences, ensuring fluid purity demands analytical methods that reconcile accuracy with operational efficiency. Traditional nephelometric and turbidimetric protocols, while standard, present a critical operational bottleneck: they provide an aggregate quantitative value (NTU) but lack the qualitative capacity to identify specific contaminants. The primary objective of this research is to develop an optimized framework that achieves fast, simple, and highly accurate water quality assessment, thereby streamlining operational workflows within the field of quality management. By deploying intelligent pattern-recognition algorithms, the proposed system transcends traditional limitations, enabling the rapid differentiation between biotic elements (microorganisms and organic detritus) and abiotic particulate matter (mineral solids, microplastics). From a quality management perspective, this holistic approach eliminates the need for complex, time-consuming laboratory cultivation and specialized infrastructure, thereby simplifying the monitoring workflow. By providing high-density, real-time qualitative data, this framework reduces operational latency, minimizes risk to both technical infrastructure and living ecosystems, and establishes a scalable standard for cost-effective, high-precision water quality assurance. Consequently, this AI-enhanced methodology serves as a transformative tool for managerial oversight, resource protection, and regulatory compliance.

Keywords: Artificial Intelligence, Liquid Turbidity, Biotic and Abiotic Constituents, Particulate Matter, Environmental Monitoring, Machine Learning, Ecosystem Integrity, Inorganic Contaminants.

1. Introduction

1.1 The Evolutionary Trajectory of Artificial Intelligence: From Symbolic Logic to Autonomous Systems

The conceptual foundations of Artificial Intelligence (AI) were established in the mid-20th century as a theoretical endeavor to replicate human logic through computational heuristics. Early AI, often referred to as Good Old-Fashioned AI (GOFAI), was characterized by expert systems and symbolic logic—rigid frameworks designed for narrow, rule-based tasks such as basic theorem proving or early computer chess. These systems, while groundbreaking, were fundamentally limited by their inability to handle the stochastic nature of real-world data.

The transition to Machine Learning (ML) marked a paradigm shift, moving from explicit programming to statistical pattern recognition. Early ML models, such as Support Vector Machines (SVM) and Decision Trees, allowed for basic data classification and predictive maintenance. However, the true revolution arrived with the advent of Deep Learning (DL). Utilizing multi-layered artificial neural networks, DL architectures—such as Convolutional Neural Networks (CNNs) for image recognition and Recurrent Neural Networks (RNNs) for sequential data—now enable the analysis of non-linear, high-dimensional datasets that were previously considered "noise."

Today, AI is an integral part of private, commercial, and scientific life, transitioning from a reactive tool to a proactive agent. We are currently moving toward Edge AI, where complex processing occurs directly within individual sensors, and Self-Supervised Learning, which requires less human-labeled data. The trajectory of AI suggests a future of Autonomous Scientific Discovery, where intelligent systems will not only analyze turbidity but autonomously hypothesize and identify emerging contaminants in real-time, evolving alongside the complexity of the problems they solve.

From an operational standpoint, this technological evolution shifts the paradigm of quality assurance from a reactive, threshold-based checkpoint to a proactive, continuous optimization asset. By converting unmanageable multi-dimensional data into real-time actionable metrics, modern AI architectures directly eliminate traditional procedural latencies. Consequently, this transition from rigid logic to autonomous systems enables managers to streamline monitoring workflows, reduce diagnostic overhead, and establish a highly scalable standard for regulatory compliance.

1.2 The Complexity of Liquid Contamination: A Multi-Scale Challenge

The assessment of liquid purity is a fundamental requirement for maintaining the stability of both biotic and abiotic systems. Turbidity, while often perceived as a simple aesthetic parameter, is a sophisticated indicator of quality across a vast spectrum of fluid environments:

Municipal and Consumer Sectors: Beyond standard sewage and tap water monitoring, there is an increasing demand for purity verification in the bottled water industry. Even minute traces of microplastics from packaging or bacterial regrowth during storage can compromise consumer safety and brand integrity. In the consumer sector—particularly the bottled water

industry—purity verification is a critical brand protection metric. Even minute quality deviations, such as microplastic leaching from packaging or localized bacterial regrowth during logistics and storage, pose severe threats to consumer safety, regulatory compliance, and brand equity, potentially triggering costly product recalls and legal liabilities.

Subsurface and Ground Sources: Monitoring extends to private wells and groundwater reservoirs, which are increasingly vulnerable to agricultural runoff, mineral leaching (e.g., fine sand, clay), and nitrate infiltration. Monitoring subsurface aquifers and private wells introduces distinct quality assurance challenges. These sources are highly vulnerable to volatile external vectors, including agricultural runoff and mineral leaching. Inconsistent raw material quality at these extraction points demands continuous, adaptive oversight to prevent downstream processing failures.

Global Aquatic Systems: On a macro scale, oceans, seas, and lakes face a dual threat from organic and inorganic sources. This includes harmful algal blooms (biotic) and industrial chemical precipitates or sediments (abiotic). Above stated aquatic regions provide highly complex, unmanaged variables into industrial supply chains. Seasonal biotic surges (e.g., algal blooms) and abiotic fluctuations (industrial sediments) create erratic baseline conditions for organizations relying on surface water intake.

The impact of these contaminants is twofold. Biotic elements, such as pathogenic bacteria (E. coli, Legionella), viruses, and organic detritus, represent severe biological hazards that jeopardize compliance with health and safety standards (e.g., ISO 22000), necessitating immediate, labor-intensive corrective actions. Also they pose direct threats to living ecosystems and human health. Conversely, abiotic stressors, such as mineral suspensions, silt, and synthetic micro-particles, lead to the physical degradation of non-living infrastructure. This includes the abrasion of industrial pumps, the clogging of high-efficiency filtration membranes, and the disruption of geochemical cycles. Traditional methods typically treat all "cloudiness" as a single, undifferentiated value, failing to account for this critical diversity.

1.3 The Technical Gap in Nephelometry and Turbidimetry

The technological frontier in fluid analytics lies in the strategic integration of AI with advanced optical hardware, addressing a significant market deficit in specialized testing devices capable of rapid, autonomous, and qualitative assessment. Traditional quality control protocols,

specifically nephelometry and turbidimetry, have remained conceptually static for decades, relying on legacy frameworks that introduce substantial inefficiencies into modern quality assurance (QA) workflows. While these standard analytical techniques yield a baseline quantitative metric (NTU), they present three severe operational limitations that hinder proactive quality management:

Defect Misclassification (Lack of Differentiation): Current instrumentation cannot differentiate between benign process variations (e.g., inert silica particles) and critical biological hazards (e.g., pathogens). This diagnostic blindness leads to either costly false alarms or catastrophic quality escapes.

Operational Latency (Manual Lead Times): High-precision validation still relies on manual sampling and time-consuming laboratory cultivation. This temporal lag creates a critical bottleneck, preventing real-time process control and delaying managerial decision-making.

Low Information Density (Sub-optimal Data Utilization): Reducing complex physical samples to a single numerical output discards the rich "optical fingerprint" of the fluid. This limits the data maturity required for advanced statistical process control (SPC).

Consequently, modern quality management demands intelligent instrumentation that transcends primitive light-scattering measurements. Embedding AI-driven algorithms directly into nephelometric sensors optimizes the testing workflow, enabling a simultaneous quantitative and qualitative characterization of fluid constituents with zero added complexity for the operator. By automating particle categorization and microbial identification at the point of measurement, this convergence of AI and optical physics eliminates process bottlenecks, minimizes operational risk, and establishes a highly accurate, cost-effective standard for real-time quality assurance and regulatory compliance.

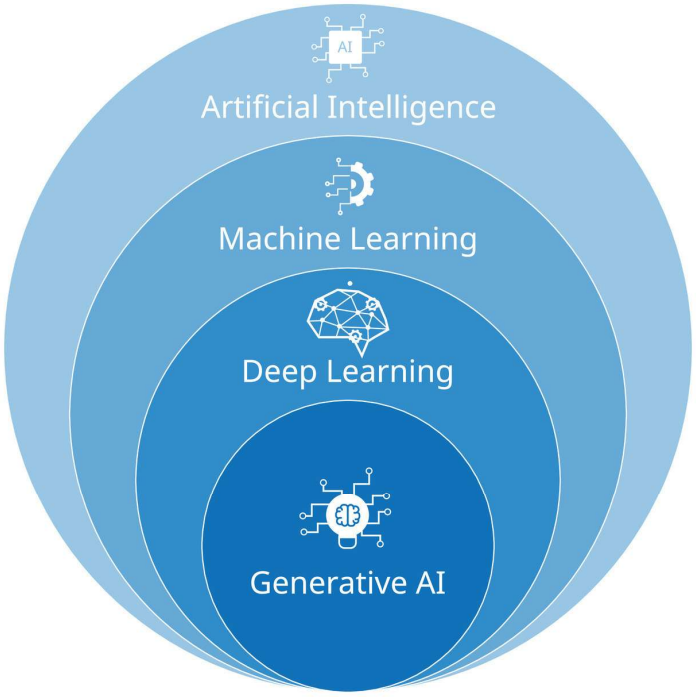


Image. 1 Diagram showing different levels of AI development

Source: https://www.vecteezy.com/

2. Scope of currently used liquid turbidity research methods

2.1. Introduction: The Physical Nature of Turbidity

Turbidity is an optical property of a fluid that causes light to be scattered and absorbed rather than transmitted in straight lines. It is primarily caused by suspended particulate matter (SPM) such as clay, silt, organic and inorganic matter, soluble colored organic compounds, and microscopic organisms. In research and industry, turbidity is used as a proxy for Total Suspended Solids (TSS) and as a critical indicator of water quality in environmental monitoring, industrial processing, and public health.

The fundamental physics governing turbidity is described by the Mie Scattering Theory (for particles larger than the wavelength of light) and Rayleigh Scattering (for smaller particles). The interaction of light with these particles is mathematically expressed through the scattering coefficient *beta*, which relates to the intensity of scattered light I_s at a given angle *theta*:

$$I_s(\backslash theta) = \backslash frac\{I_0 \backslash cdot \backslash lambda\^2\}\{8\backslash pi\^2r\^2\} \backslash cdot (i_1 + i_2)$$

where I_0 is the incident intensity, *lambda* is the wavelength, and i_1, i_2 are scattering functions dependent on the refractive index and particle size.

From a quality and management (QaM) perspective, understanding the physical nature of turbidity is crucial because it transforms a volatile physical variable into a structured indicator of process stability and conformance. Turbidity is not merely a passive optical property; it is a dynamic manifestation of particulate interaction governed by Mie and Rayleigh scattering theories, where variables like particle size, shape, and refractive index dictate the behavior of light. In a quality assurance workflow, these physical attributes serve as a direct proxy for product consistency and raw material integrity. If a management system treats turbidity as a generic, one-dimensional metric, it introduces significant operational risk—failing to recognize that variations in the underlying physics of a fluid can signal either a minor, benign process fluctuation or a critical systematic failure (such as filter degradation or microbial contamination). By scientifically deconstructing the optical behavior of suspended matter, quality managers can establish more precise control limits, optimize raw material utilization, and replace reactive troubleshooting with predictive, data-driven process optimization.

2.2. Standardized Optical Methods

Optical sensing remains the most prevalent method for turbidity measurement, governed by international standards to ensure data comparability.

2.2.1 Nephelometry (ISO 7027 and EPA 180.1)

Nephelometry measures the intensity of light scattered at a 90-degree angle to the incident beam. This angle is chosen because it is least sensitive to particle size variations, providing a more stable correlation to concentration.

- ISO 7027 (European Standard): Specifies the use of Near-Infrared (NIR) light (typically 860 nm). NIR is advantageous as it eliminates interference from dissolved colors (e.g., humic acids) in the water, making it the preferred method for environmental and wastewater research.
- EPA 180.1 (U.S. Standard): Specifies a tungsten lamp (white light). While more sensitive to very small particles, it is highly susceptible to color interference, often requiring pre-filtration or mathematical correction.

2.2.2 Turbidimetry (Attenuation)

Turbidimetry measures the loss of intensity of the transmitted light beam as it passes through a sample. This is based on the Beer-Lambert Law:

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I}\right) = \epsilon \cdot c \cdot L$$

Where A is absorbance, I_0 is transmitted intensity, ϵ is the molar extinction coefficient, c is the concentration, and L is the path length. This method is most effective in high-turbidity environments (>1000 NTU) where scattering is so intense that 90-degree sensors become saturated.

2.3. Acoustic Backscattering Sensors (ABS)

In environments where optical sensors fail—such as high-density slurries, opaque industrial fluids, or during storm events in rivers—Acoustic Backscattering has emerged as a robust alternative.

2.3.1 Principles of Operation

ABS devices emit high-frequency ultrasonic pulses (typically 0.5 MHz to 10 MHz). As the sound wave encounters particles, a portion of the energy is reflected back to the transducer. Unlike optical light, sound waves can penetrate deeper into highly concentrated suspensions.

2.3.2 Advantages and Research Trends

- Insensitivity to Color: ABS is completely unaffected by the "tea color" of organic-rich waters.

- Particle Size Profiling: Current research utilizes multi-frequency acoustic arrays. By analyzing the backscatter intensity across different frequencies, researchers can estimate both the concentration and the mean particle size distribution, a feat difficult for standard optical nephelometers.

2.4. Remote Sensing and Satellite Imagery

For macro-scale research (oceans, large lakes, and river deltas), in-situ sensors are insufficient. Researchers now utilize satellite-based optical sensors to estimate turbidity over thousands of square kilometers.

2.4.1 Satellite Platforms

- Sentinel-2 (MSI): Provides high spatial resolution (10–60m). Research in 2024-2025 has focused on using the Red (665 nm) and NIR (842 nm) bands to develop empirical models for turbidity in coastal waters.
- Landsat-8/9: Widely used for long-term historical trend analysis of lake clarity.

2.4.2 Challenges in Remote Sensing

The primary research hurdle is Atmospheric Correction. Distinguishing between light reflected by the water and light scattered by the atmosphere (aerosols) requires complex bio-optical algorithms like the Quasi-Analytical Algorithm (QAA).

Table 1. *Comparison of Liquid Turbidity Research Methods*

Method	Physical Principle / Mechanism	Primary Application & Strengths	Limitations & Key Challenges
Nephelometry	Measures the intensity of **light scattered at a 90-degree angle** to the incident beam.	Most prevalent method for standard water quality; **ISO 7027 (Near-Infrared)** eliminates interference from dissolved colors.	**EPA 180.1 (white light)** is highly susceptible to color; cannot distinguish between different particle types (e.g., silica vs. pathogens).
Turbidimetry (Attenuation)	Measures the **loss of intensity of transmitted light** as it passes through a sample (Beer-Lambert Law).	Most effective in **high-turbidity environments (>1000 NTU)** where 90-degree scattering sensors become saturated.	Less sensitive than nephelometry for low-concentration samples.

Acoustic Backscattering (ABS)	Emits **high-frequency ultrasonic pulses** (0.5 MHz to 10 MHz) and measures the energy reflected back.	Robust in **high-density slurries** or opaque fluids; **completely insensitive to water color**; can estimate mean particle size distribution.	Requires multi-frequency acoustic arrays for detailed particle profiling.
Remote Sensing / Satellite Imagery	Utilizes **satellite-based optical sensors** (e.g., Sentinel-2, Landsat-8/9) to estimate turbidity.	Ideal for **macro-scale research** covering thousands of square kilometers in oceans, large lakes, and river deltas.	Faces significant hurdles with **Atmospheric Correction**, requiring complex algorithms to separate water reflection from atmospheric scattering.

Source: own collaboration

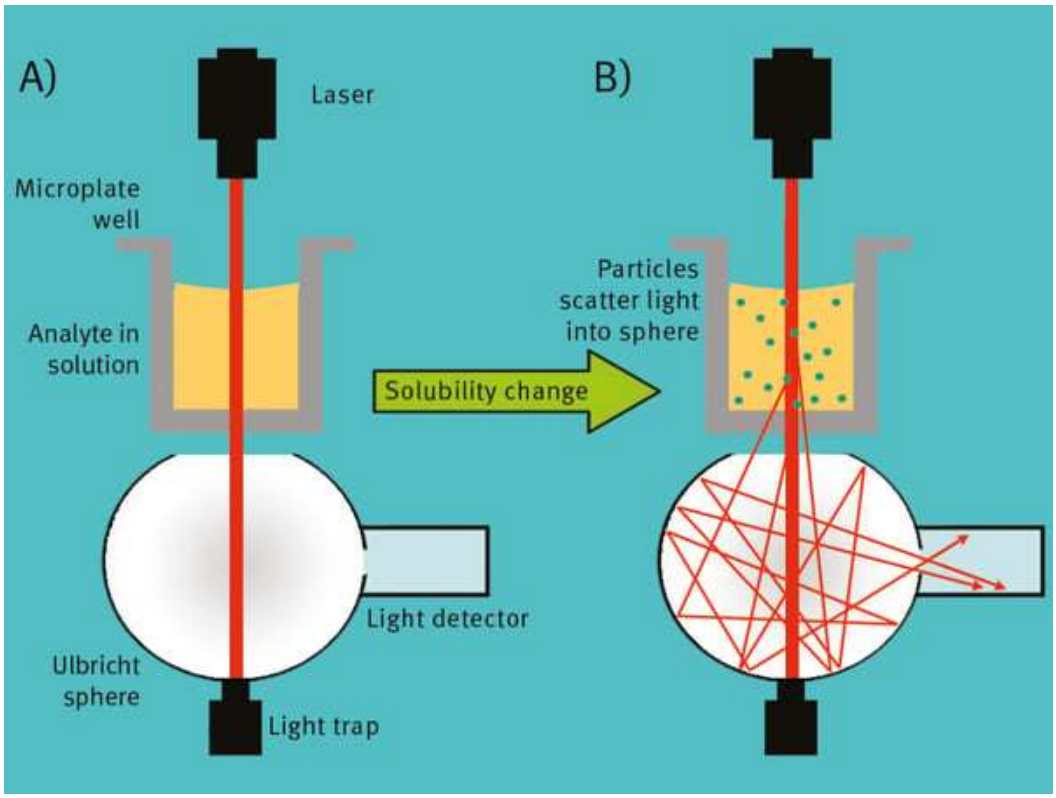


Image. 2 Nephelometry liquid testing

Source: https://www.bmglabtech.com/en/application-notes/monitoring-of-microbial-growth-curves-by-laser-nephelometry/

3. Comprehensive Analysis of Turbidity-Inducing Constituents: Biotic and Abiotic Threats

3.1. Abiotic (Inorganic and Synthetic) Constituents

Abiotic turbidity is generally the result of physical, chemical, or anthropogenic processes. These particles are often characterized by high stability and resistance to biological degradation.

3.1.1 Mineral Suspensions (Silt, Clay, and Lithogenic Matter)

Composition and Occurrence: These are naturally occurring particles derived from the mechanical weathering of rocks. Clay particles (2µm) and silt (2-60µm) are ubiquitous in rivers, wells, and coastal waters, especially after heavy rainfall or dredging activities.

The "Carrier Effect" (A Hidden Threat): Beyond simple cloudiness, clay particles possess a high surface-area-to-volume ratio and a negative surface charge (Zeta potential). This allows them to act as *adsorption sites* for toxic heavy metals (lead, arsenic, mercury) and hydrophobic organic pollutants (pesticides). Thus, turbid water is often a "toxic cocktail" where the minerals themselves are merely the delivery vehicles.

Infrastructural Impact: In abiotic systems, these minerals act as potent abrasives. They can erode turbine blades in hydroelectric plants and cause "fouling" in cooling systems, leading to catastrophic mechanical failure and massive economic losses.

From a Quality and Management (QaM) standpoint, the occurrence of mineral suspensions and their inherent "carrier effect" represents a dual threat to supply chain integrity and asset management. In quality assurance, treating clay and silt as mere aesthetic defects overlooks a critical operational risk: due to their high surface-area-to-volume ratio and negative Zeta potential, these micro-particles act as uncontrollable delivery vehicles for chemical and biological contaminants, introducing severe, unmeasured variance into raw water inputs. This directly threatens product conformance and regulatory safety compliance, potentially leading to costly product recalls or brand damage.

Simultaneously, from an operations and maintenance (O&M) perspective, the highly abrasive nature of these lithogenic minerals introduces systemic risk to capital infrastructure,

accelerating the wear of critical components, causing severe fouling in cooling systems, and inducing premature equipment failure. For quality managers, understanding these specific physical mechanisms is essential for transitioning from reactive damage control to proactive risk mitigation, allowing for the strategic optimization of filtration lifecycles, reduction of operational downtime, and strict control over total cost of quality (CoQ).

3.1.2 Microplastics and Anthropogenic Polymers

Composition and Occurrence: These include polyethylene, polypropylene, and PET fragments, as well as synthetic fibers from textiles. They are found in every liquid environment on Earth, from the deep Mariana Trench to commercially bottled mineral water.

Threat to Living Systems: Microplastics are often mistaken for food by low-trophic level organisms (zooplankton). This introduces synthetic polymers into the food chain, where they undergo *biomagnification*.

Chemical Leaching: These particles are not chemically inert; they leach "plasticizers" like phthalates and Bisphenol A (BPA), which are known endocrine disruptors, potentially affecting the reproductive health of both aquatic life and humans.

3.1.3 Chemical Precipitates and Scale-Forming Salts

Composition and Occurrence: These occur when dissolved ions reach saturation and solidify. Common examples include calcium carbonate ($CaCO_3$), iron oxides (rust), and manganese dioxide.

Threat to Abiotic Infrastructure: This is a primary concern for the *food and beverage industry* and power generation. "Scaling"—the buildup of these precipitates—insulates heat exchangers, drastically increasing energy consumption. In water distribution, iron precipitates can lead to "tuberculation," which reduces pipe diameter and creates niches for anaerobic bacteria to thrive.

3.2. Biotic (Biological and Organic) Constituents

Biotic turbidity is more dynamic than abiotic; it involves living entities capable of reproduction, mutation, and toxin production.

3.2.1 Pathogenic Microorganisms (Bacteria, Viruses, Protozoa)

Composition and Occurrence: Key threats include *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*, *Legionella*, and *Cryptosporidium*. These occur in water sources contaminated by fecal matter, agricultural runoff, or poorly maintained HVAC systems.

The Protective Shield Threat: In turbid water, pathogens often "attach" to inorganic silt particles. This provides them with a *physical shield* against disinfection. Chlorine cannot reach a bacterium tucked into a crevice of a sand grain, and UV light is scattered away, allowing live pathogens to pass through treatment plants undetected.

3.2.2 Harmful Algal Blooms (HABs) and Cyanobacteria

Composition and Occurrence: Triggered by nutrient loading (nitrogen and phosphorus), these blooms occur in lakes, reservoirs, and coastal seas.

Chemical Warfare (Cyanotoxins): Some species, like *Microcystis*, produce microcystins—toxins more lethal than cyanide in certain concentrations. They cause liver failure, neurotoxicity, and skin irritation.

Environmental Hypoxia: When the bloom dies, the aerobic decomposition process strips the water of dissolved oxygen, creating "Dead Zones" where no fish or coral can survive. This represents a total collapse of the biotic environment.

3.2.3 Extracellular Polymeric Substances (EPS) and Bio-detritus

Composition and Occurrence: This is the "slime" or organic debris produced by bacterial colonies and decaying plant matter.

The Biofouling Threat: EPS is the "glue" that allows biofilms to form on surfaces. Once a biofilm is established on a sensor or a medical device, it is incredibly resilient to cleaning. In the context of turbidity sensors, EPS creates "drift," where the sensor's lens becomes perpetually cloudy, leading to false data.

3.3. The Specific Case of Bottled and Well Water

It is a common misconception that "packaged" or "subsurface" water is free from turbidity-related threats.

In Bottled Water: Recent studies have identified thousands of nanoplastic particles per liter. These induce a "sub-visual turbidity" that traditional sensors miss but which pose long-term health risks.

In Wells: Sudden turbidity spikes in wells are often indicators of *surface infiltration*. A rise in silt after rain usually means that surface bacteria (from animal waste) have also entered the aquifer, turning a "mineral" problem into a "biological" hazard.

3.4. Scope of the "Blindness" of Current Technology

The overarching threat identified in this research is the *qualitative blindness* of existing nephelometric and turbidimetric devices.

Currently, a water treatment plant operator might see a turbidity reading of 5.0 NTU. They have no way of knowing if that 5.0 consists of:

1. Harmless Calcium Carbonate: Requires no action.
2. Abrasive Fine Sand: Requires filtration to protect pumps.
3. Active *Cryptosporidium* Oocysts: Requires immediate shutdown to prevent a public health disaster.

3.4.1 The Strategic Role of AI

The integration of AI aims to solve this "identity crisis." By analyzing the *specific morphology* (shape, size, texture) and the *multi-spectral scattering signature* of the particles,

AI models can differentiate between the jagged edges of a mineral fragment and the spherical, lipid-rich membrane of a pathogen. This allows for:

Surgical Intervention: Treating only the specific threat detected.

Early Warning Systems: Detecting the "optical signature" of an algal bloom days before it becomes visible to the naked eye.

Risk Quantification: Not just saying "the water is cloudy," but stating "there is a 92% probability of microbial contamination."

3.5. Conclusion

The materials and organisms causing liquid turbidity represent a spectrum of threats ranging from mechanical wear to acute lethality. As global water scarcity increases and industrial processes become more sensitive, the ability to *identify* rather than just *measure* turbidity is becoming the new standard. The future of fluid analytics lies in the transition from "optical measurement" to "intelligent diagnostic identification."

Table 2. *Analysis of Turbidity-Inducing Threats*

Category	Specific Constituent	Primary Threats and Impacts
Abiotic	**Mineral Suspensions** (Silt, Clay)	Acts as a **"Carrier" for toxic heavy metals** and pesticides; causes **mechanical abrasion** of industrial pumps and turbines.
Abiotic	**Microplastics**	Leads to **biomagnification** in the food chain; leaches **endocrine disruptors** (BPA, phthalates) into the water.
Abiotic	**Chemical Precipitates** (Scale/Rust)	Causes **"Scaling"** that increases energy consumption in heat exchangers; leads to **tuberculation** in pipes, creating niches for bacteria.

Biotic	**Pathogenic Microorganisms** (e.g., E. coli, Legionella)	Poses direct health hazards; utilizes silt particles as a **"Protective Shield"** to survive UV and chlorine disinfection.
Biotic	**Harmful Algal Blooms** (Cyanobacteria)	Releases **lethal cyanotoxins** (neurotoxicity/liver failure); creates **"Dead Zones"** through environmental hypoxia.
Biotic	**EPS and Bio-detritus** (Organic Slime)	Facilitates **Biofouling** on medical devices and sensors; causes **"sensor drift,"** leading to false data and lens clouding.

Source: own collaboration

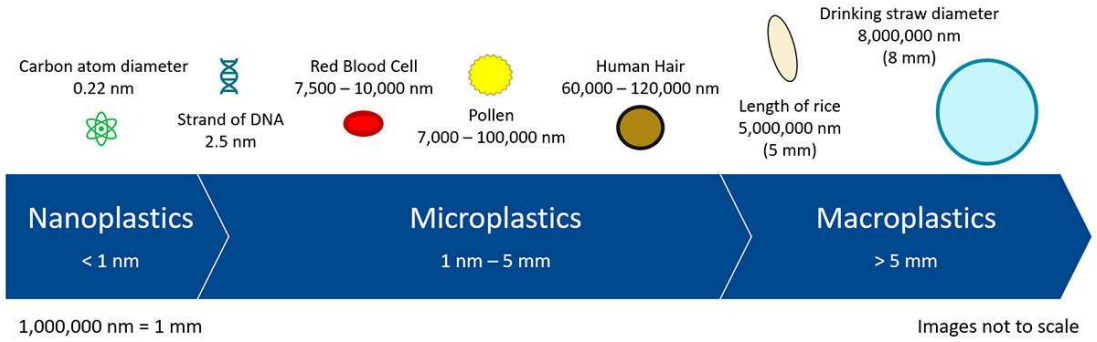


Image. 3 Different sizes of plastics impurities

Source: https://epa.illinois.gov/topics/water-quality/microplastics.html

4. AI-Driven Data Synthesis in Liquid Turbidity: A Multi-Modal Analytical Framework

4.1. The Convergence of AI Evolution and Sensory Data

The transition of AI from symbolic heuristics (1950s–1980s) to Deep Learning (DL) has fundamentally changed how we interpret liquid turbidity. Early "expert systems" could only process "If-Then" logic (e.g., *If light scattering > X, then Turbidity = High*). Contemporary AI,

however, thrives on a wide spectrum of data, moving beyond simple numerical thresholds to complex pattern recognition.

4.1.1 From 1D Values to High-Dimensional Data Signatures

Standard nephelometry provides a one-dimensional (1D) value (NTU). AI transforms this into a high-dimensional "data signature" by integrating:

- Multi-Angle Scattering Data: Instead of just 90°, AI analyzes scattering at 15°, 45°, and 135°, creating a "scattering profile" unique to specific particle shapes.
- Spectral Data: Analyzing light across the UV-Vis-NIR spectrum to identify chemical absorption peaks alongside physical scattering.

4.2. Computer Vision and Morphological Differentiation

The most significant use of AI in this field is Computer Vision (CV), specifically utilizing Convolutional Neural Networks (CNNs). This addresses the "qualitative blindness" of traditional sensors by analyzing the physical structure of suspended matter.

4.2.1 Identifying Biotic vs. Abiotic Morphologies

AI models are trained to recognize the distinct visual features of the contaminants identified in previous research:

- Biotic Features: CNNs detect cellular symmetry, lipid bilayer textures, and flagellar structures characteristic of pathogens like *E. coli* or *Cyanobacteria*.
- Abiotic Features: AI identifies the sharp, crystalline edges of mineral silt or the jagged, irregular "shards" of microplastics.

By processing raw microscopic or high-speed camera images, the AI can perform Qualitative Classification in real-time—distinguishing between a mechanical threat (sand) and a biological threat (pathogens) that would both otherwise appear as a generic NTU value.

4.3. Sensor Fusion: Integrating the "Wide Spectrum" of Data

AI does not operate in a vacuum. Its true power in liquid testing comes from Sensor Fusion - the ability to correlate turbidity with other environmental parameters to assess threats to nature and infrastructure.

4.3.1 Multi-Parametric Correlation

An AI-driven system analyzes turbidity data in conjunction with:

1. Electrochemical Data (pH, Conductivity): High turbidity + high conductivity often points to mineral leaching (Abiotic). High turbidity + neutral pH + high organic carbon suggests microbial growth (Biotic).
2. Acoustic Backscatter (ABS): As established, ABS provides data on high-concentration slurries. AI fuses optical and acoustic data to create a "depth profile" of the fluid, identifying stratification of pollutants.
3. Meteorological and Flow Data: By integrating rainfall and flow rate data, AI can predict "Turbidity Events" (e.g., predicting a spike in well-water contamination 6 hours after a storm).

4.4. Addressing the Technical Gap: Qualitative Identification

As noted in Section 1.3, the market lacks devices capable of qualitative assessment. AI fills this gap through Fingerprinting and Feature Extraction.

4.4.1 Real-Time Risk Quantification

Rather than providing a "blind" number, the AI-integrated sensor provides a Risk Profile:

- Quantitative: "Turbidity: 12.5 NTU"
- Qualitative: "Composition: 85% Mineral Silt, 12% Organic Detritus, 3% Pathogenic Microorganisms."

- Threat Assessment: "High risk to filtration membranes; Moderate risk to human consumption."

This level of detail allows for Surgical Intervention - for example, automatically diverting water to a specialized UV-treatment tank only when the AI detects the specific optical signature of *Cryptosporidium*.

4.5. Future Scope: Edge AI and Autonomous Monitoring

Looking toward the future, the research points to the deployment of Edge AI. This involves shrinking complex neural networks so they can run directly on the microprocessors inside a portable nephelometer or a remote ocean buoy.

- Decentralized Intelligence: Sensors in remote wells or oceans will no longer need to send data to a central server. They will "think" locally, identifying microplastics or algal blooms instantly.
- Self-Cleaning and Self-Calibrating Systems: AI can monitor its own "optical health," using signal processing to distinguish between actual water turbidity and Biofouling (slime growth on the lens), automatically triggering ultrasonic cleaning only when necessary.

4.6. Conclusion

The integration of AI into a wide spectrum of liquid turbidity data represents a leap from observation to interpretation. By synthesizing historical AI methodologies with modern sensor fusion and computer vision, we can overcome the inherent limitations of traditional nephelometry. This AI-driven approach provides a robust safeguard for both living ecosystems and industrial infrastructure, transforming a simple measure of "cloudiness" into a sophisticated tool for global diagnostic bioscience.

Table 4. *AI-Driven Multi-Modal Analytical Framework*

AI Framework Component	Technical Mechanism / Method	Key Outcome & Capability
High-Dimensional Data Signatures	Analysis of **Multi-Angle Scattering** (15°, 45°, 90°, 135°) and **UV-Vis-NIR Spectral Data**.	Transforms a simple 1D NTU value into a unique **"optical fingerprint"** that identifies specific particle shapes and chemical absorption peaks.
Computer Vision (CV)	Utilization of **Convolutional Neural Networks (CNNs)** to process microscopic or high-speed camera images.	Enables **Morphological Differentiation**; identifies biotic features (cellular symmetry) versus abiotic features (crystalline edges) in real-time.
Sensor Fusion	Correlation of turbidity data with **pH, Conductivity, Acoustic Backscatter (ABS)**, and meteorological/flow data.	Distinguishes between mineral leaching and microbial growth; allows for the **prediction of "Turbidity Events"** (e.g., contamination following a storm).
Qualitative Fingerprinting	Advanced **Feature Extraction** and Real-Time Risk Quantification models.	Solves "qualitative blindness" by providing a **Risk Profile** (e.g., percentage of pathogens vs. silt) instead of a single numerical value.

Edge AI (Future Scope)	Deployment of **compact neural networks** directly onto sensor microprocessors or remote buoys.	Facilitates **Decentralized Intelligence** and autonomous monitoring; enables **self-cleaning/self-calibrating systems** that distinguish between turbidity and biofouling.

Source: own collaboration

In conclusion, the deployment of this multi-modal AI framework marks a decisive departure from passive, aggregate measurements toward a highly optimized model of proactive process governance. By turning an ambiguous physical variable into granular, qualitative intelligence, this system addresses the persistent tension between speed, simplicity, and accuracy that challenges modern quality assurance. For quality management professionals, this approach transforms turbidity testing from an operational bottleneck into a strategic, data-rich asset. Implementing this architecture allows organizations to mitigate supply chain volatility, prevent costly infrastructure failures, and ensure strict regulatory compliance in real time. Ultimately, this convergence of optical physics and artificial intelligence establishes a new standard for operational excellence and total quality management, proving that continuous, high-precision quality control is both scalable and highly cost-effective in modern industrial science.

BIBLIOGRAPHY

1. Beer, A. (1852). Determination of the absorption of red light in colored liquids.
2. Bhat, M. A., & Wani, S. A. (2024). Water quality monitoring and assessment using machine learning: A review of formulation, modeling approaches, and explainable artificial intelligence. Journal of Environmental Management, 352, 119-134.
3. Chandra Asri Group. (2024). Smart water quality monitoring system & its role in industrial water treatment. Technical Operations Briefing, Corporate Quality Assurance Division.
4. European Committee for Standardization. (2016). EN ISO 7027-1: Water quality – Determination of turbidity – Part 1: Quantitative methods.
5. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press..
6. International Organization for Standardization. (1999). ISO 7027: Water quality – Determination of turbidity.
7. Lee, Z. P., Carder, K. L., & Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm (QAA). Applied Optics.
8. Mie, G. (1908). Contributions to the optics of turbid media, particularly colloidal metal solutions. Annalen der Physik.
9. National Aeronautics and Space Administration. (2024). Landsat 8-9 Data Users Handbook.
10. Rayleigh, L. (1871). On the light from the sky, its polarization and colour.
11. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagation errors. Nature.
12. Sadar, M. J. (1998). Turbidity science (Technical Monograph No. 11). Hach Company.
13. Schölkopf, B., & Smola, A. J. (2002). Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond. MIT Press..
14. U.S. Environmental Protection Agency. (1993). Method 180.1: Determination of turbidity by nephelometry.
15. World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda.
16. Vapnik, V. N. (1995). The Nature of Statistical Learning Theory. Springer.
17. Journal of Remote Sensing of Environment. (2024). Empirical models for turbidity in coastal waters using Sentinel-2 MSI bands.
18. Acoustic Society of America. (n.d.). Technical specifications for multi-frequency acoustic arrays in particle size profiling.
19. International Journal of Environmental Research and Public Health. (n.d.). Studies on the "Protective Shield" effect: Pathogen attachment to inorganic silt.

20. International Organization for Standardization. (2016). Water quality — Determination of turbidity — Part 1: Quantitative methods (ISO Standard No. 7027-1:2016).
21. Journal of Hazardous Materials. (n.d.). Analysis of phthalate and BPA leaching from microplastics in bottled water.
22. LeChevallier, M. W., Evans, T. M., & Seidler, R. J. (1981). Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water. Applied and Environmental Microbiology, 42(1), 159-167.
23. Applied and Environmental Microbiology. (n.d.). Morphological differentiation of Cyanobacteria and pathogenic lipid bilayers.
24. Sensors and Actuators B: Chemical (n.d.). Multi-parametric correlation of pH, conductivity, and turbidity for mineral leaching detection.
25. Wang, X., Zhang, Y., & Liu, J. (2025). Water quality management in the age of AI: Applications, challenges, and prospects. Water Research, 268, 122-139.
26. Water Research. (n.d.). The role of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in sensor biofouling and signal drift.
27. Deep Learning for Computer Vision. (n.d.). Convolutional Neural Networks for the classification of crystalline vs. organic suspended matter
28. Zheng, T., & Al-Ansari, N. (2024). Real-time water quality monitoring using AI-enabled sensors: Detection of contaminants and UV disinfection analysis in smart urban water systems. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 36(3), 184-195

PRAKTYKI CYRKULARNE A ZRÓWNOWAŻONA JAKOŚĆ USŁUG W HOTELARSTWIE – BADANIE EKSPLORACYJNE

Patryk JAROSZEWSKI[1], Magdalena MURADIN[1*]

[1]Katedra Zarządzania Jakością, Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, Polska

magdalena.muradin@ue.poznan.pl; ORCID: 0000-0003-1209-0018

* Corresponding author: magdalena.muradin@ue.poznan.pl; Tel.: +48-600-097-170

Streszczenie: Celem badania jest identyfikacja rodzajów praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) wdrażanych w przedsiębiorstwach hotelarskich, ocena ich rozmieszczenia w poszczególnych obszarach operacyjnych oraz analiza ich potencjału w zakresie wspierania zrównoważonej jakości usług bez ograniczania komfortu gości. Przeprowadzono badanie eksploracyjne z wykorzystaniem metody sondażu diagnostycznego (CAWI), a dane zebrano za pomocą kwestionariusza internetowego od 19 polskich przedsiębiorstw sektora MŚP działających w branży hotelarskiej. Praktyki GOZ pogrupowano w kluczowe obszary operacyjne (gospodarka odpadami, energia, woda, ekoefektywność), a poziom ich wdrożenia oceniono z wykorzystaniem koncepcji luki cyrkularności opartej na stopniu adopcji poszczególnych praktyk. Wyniki wskazują na nierównomierny poziom wdrożenia GOZ. Wysoki poziom implementacji odnotowano w przypadku recyklingu oraz podstawowych praktyk efektywności zasobowej (np. segregacja odpadów, oświetlenie LED), natomiast praktyki związane z zapobieganiem powstawaniu odpadów, ponownym użyciem i odzyskiem (np. przeciwdziałanie marnowaniu żywności, kompostowanie, odzysk energii) pozostają ograniczone. Powszechna jest współpraca z lokalnymi dostawcami, wspierająca cyrkularność łańcucha dostaw, podczas gdy praktyki ekoefektywności dotyczące papieru, tekstyliów i środków czystości wdrażane są na umiarkowanym poziomie. Większość praktyk cyrkularnych funkcjonuje w tle procesu świadczenia usług i nie wpływa negatywnie na ich jakość, a niektóre mogą nawet zwiększać postrzeganą wartość usług. Wyniki sugerują, że przedsiębiorstwa hotelarskie powinny wdrażać rozwiązania GOZ stopniowo, rozpoczynając od niskokosztowych działań zwiększających efektywność, a następnie przechodząc do bardziej zaawansowanych rozwiązań, takich jak systemy monitoringu, cyrkularne zamówienia czy przeciwdziałanie marnowaniu żywności. Rekomenduje się również wzmacnianie lokalnych łańcuchów dostaw oraz integrację działań z zakresu zrównoważonego rozwoju z systemami zarządzania jakością. Badanie wnosi wkład empiryczny do literatury dotyczącej wdrażania GOZ w hotelarstwie, proponuje zastosowanie podejścia opartego na luce cyrkularności oraz łączy praktyki cyrkularne ze zrównoważoną jakością usług, odpowiadając na lukę badawczą dotyczącą sektora usług, szczególnie w Europie Środkowo-Wschodniej.

Słowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym; branża hotelarska; zrównoważona jakość usług; praktyki cyrkularne; ekoefektywność.

CIRCULAR PRACTICES AND SUSTAINABLE SERVICE QUALITY IN HOSPITALITY – AN EXPLORATORY STUDY

Patryk JAROSZEWSKI[1], Magdalena MURADIN[1*]

[1] Department of Quality Management, Poznan University of Economics and Business, Poland; magdalena.muradin@ue.poznan.pl; ORCID: 0000-0003-1209-0018
* Korespondencja: magdalena.muradin@ue.poznan.pl; Tel.: +48-600-097-170

Summary: The study aims to identify types of circular economy (CE) practices implemented in hospitality enterprises, assess their distribution across operational areas, and examine their potential to support sustainable service quality without reducing guest comfort. An exploratory study was conducted using a diagnostic survey (CAWI), with data collected via an online questionnaire from 19 Polish hospitality SMEs. Circular practices were grouped into key domains (waste, energy, water, eco-efficiency), and their implementation was assessed using a circularity gap framework based on adoption rates. The results reveal uneven CE implementation. Recycling and basic resource-efficiency practices (e.g., waste segregation, LED lighting) show high adoption, while prevention, reuse, and recovery practices (e.g., food waste prevention, composting, energy recovery) remain limited. Cooperation with local suppliers is widespread, supporting supply-chain circularity, while eco-efficiency practices in paper, textiles, and cleaning agents are moderately implemented. Most circular practices operate in the background and do not negatively affect service quality; some may enhance perceived value. The findings suggest that hospitality enterprises should prioritize gradual CE implementation, starting with low-cost efficiency measures and progressing toward advanced solutions such as monitoring systems, circular procurement, and food waste prevention. Strengthening local supply chains and integrating sustainability with quality management systems are also recommended. The study contributes empirical evidence on CE implementation in hospitality, introduces a circularity gap approach, and links circular practices with sustainable service quality, addressing a gap in service-sector research, particularly in Central and Eastern Europe.

Keywords: circular economy; hospitality industry; sustainable service quality; circular practices; eco-efficiency

Introduction

The overexploitation of natural resources, environmental degradation, and rising waste volumes highlight the need for more sustainable economic models. In this context, the circular economy (CE) promotes resource efficiency, waste minimisation, and closed material loops, offering an alternative to the linear "take–use–dispose" model. Although the hospitality industry belongs to the service sector, its continuous operation and intensive use of energy, water, food, and materials generate a substantial environmental footprint (Şahin et al., 2024).

This leads to increasing governmental, market, and social pressure for hotels to transform their business models toward more sustainable ones. A key challenge for hotels is maintaining sustainability while serving a growing number of guests. For this reason, an increasing number of companies are choosing to adopt circular economy principles. Circular practices enable the reuse of products, extending their lifespan and closing process loops, which can lead to lower operating costs and a competitive advantage, while reducing the facility's environmental footprint.

Despite growing interest in circular economy approaches, research on CE implementation in tourism and hospitality remains limited and fragmented compared with manufacturing sectors (Rodríguez et al., 2020). This gap is even more pronounced in the context of Central and Eastern Europe, where research on circular economy implementation in the hospitality sector is still scarce. In particular, in Poland the available literature addressing sustainability in the hospitality sector focuses mainly on selected pro-environmental initiatives or the broader context of sustainable tourism development. While previous studies highlight the growing importance of ecological practices and policy frameworks supporting sustainable tourism, systematic empirical research examining the implementation of circular economy practices in hotel enterprises remains limited (Łuka, 2024).

Existing studies on circularity in hospitality predominantly focus on selected sustainability initiatives, case studies, or specific operational issues such as food waste or resource efficiency. While valuable, these contributions typically analyse isolated practices rather than providing a comprehensive and systematic overview across key operational domains (Jacob et al., 2024). Consequently, empirical evidence on the distribution and relative advancement of circular practices within areas such as resource management, procurement, waste management, and daily operations remains limited. To address these research gaps, an exploratory empirical study was conducted. The research questions guiding the study are presented in the Methods section.

A further limitation concerns the lack of comparative insights into how circular practices are distributed across different operational areas. Existing research tends to examine individual domains—such as energy efficiency, water management, or food waste reduction—without capturing the full spectrum of hotel activities (Jones & Comfort, 2023). As a result, there is insufficient systematic knowledge regarding which areas demonstrate higher levels of circular implementation and which remain underdeveloped. Identifying these differences is essential for prioritising future circular transitions in the sector.

Another research gap relates to the relationship between circular practices and service quality in hospitality. Although prior studies suggest that sustainability initiatives can influence customer satisfaction and perceptions, empirical findings remain inconclusive, and some practices may even reduce perceived comfort (Bittner et al., 2024). Given the limited availability of direct guest perception data, it is important to identify which practices support service quality without compromising guest experience.

Literature review

1.1. 2.1 Circular practices in hospitality

The hospitality industry is part of the service sector, however, its operations have a significant impact on the environment. According to a study conducted between 2009 and 2019 by an international team of researchers from the University of Queensland in Australia, emissions from the tourism sector worldwide grew at an average rate of 3,5% per year, reaching 5.2 gigatons of CO2 equivalent in 2019, accounting for 8,8% of total global emissions.

(Sun et al., 2024). The hotel subsector accounts for a fraction of the tourism industry's emissions, at approximately one percent of global CO2 emissions (UNWTO, 2008). The transformation from a linear model to circular practices requires an approach that encompasses the entire lifecycle of services and products – from the design stage, through procurement and usage, to waste management.

The main source of the carbon footprint in the hospitality industry is energy consumption. It represents the main source of the hospitality sector's environmental footprint, accounting for approximately 60–70% of operating costs (Martinez Santos et al., 2026). Consequently, circular approaches focus primarily on energy efficiency and gradual integration of renewable sources. The hospitality industry also has a significant impact on water consumption. According to a study conducted by the European Commission, the average water consumption per tourist can range from 450 to 800 litres per day (European Commission, 2021). The main areas driving high water consumption are showers and toilets, laundry rooms, kitchens, as well as amenities such as swimming pools and spas. To reduce water consumption, hotels are using solutions such as low-flow aerators in faucets and showers, dual-flush toilets, waterless urinals, as well as more advanced technologies such as rainwater harvesting and greywater recovery systems.

The hospitality industry is notable for its significant waste generation. According to the EU reference document on best practices in environmental management, the benchmark for excellence regarding waste generated by a guest during a single hotel night is less than 0,6 kg of waste (European Commission, 2016) which is significantly different from the reality in many establishments. A large part of this waste is food waste from dining areas, which has significant environmental and social impacts. Facilities offering food services are adopting solutions such as buffest that are systematically replenished with smaller portions or the creative use of leftovers to reduce food waste. Sustainable waste management is primarily achieved through recycling and waste reduction, and an increasing number of establishments are phasing out single-use plastics. Composting bins and returnable packaging are also growing in popularity.

Another area where circular practices can be implemented is procurement sector. Sustainable companies collaborate with local entities, consciously selecting suppliers to shorten the supply chain and opting for products delivered in returnable packaging. The use of locally sourced food products simultaneously enhances the perceived quality of services, supports the

local economy, and reduces emissions associated with food transportation (Wang et al., 2013). In addition, sustainable procurement management involves the mindful use of textiles and chemicals, as well as repairing and refurbishing equipment instead of replacing it with new items.

Increasing attention is also being paid to the design and renovation of hotel buildings in accordance with the principles of sustainable design. These practices include adapting existing facilities rather than building new ones, using bio-based materials and integrating green infrastructure. This approach reduces resource use and emissions (Pomponi & Moncaster, 2016).

1.2. 2.2 Sustainable service quality

Circular practices in hotels support resource efficiency and sustainable development but must be carefully balanced with service quality, as some initiatives may be perceived as reducing guest comfort (Baratta & Simeoni, 2021). Consequently, hotel managers are encouraged to develop business models in which pro-environmental actions enhance rather than diminish service standards (Oliveras-Villanueva et al., 2020). This balance can be achieved through integrated management approaches combining quality (ISO 9001) and environmental (ISO 14001) management systems, which enable resource optimisation while maintaining service quality (Pamić, Slivar & Periša, 2025).

Efficiency-oriented investments, such as energy-efficient lighting, typically improve operational performance without negatively affecting the guest experience. Similarly, the use of local and fresh food products enhances perceived service quality and customer satisfaction by offering more authentic and healthier experiences, while simultaneously reducing transport-related emissions (Draper & Green, 2002; Gössling et al., 2011). This is also one of the few areas where guests demonstrate a higher willingness to pay a premium for sustainable services (Baratta & Simeoni, 2021).

However, sustainability initiatives do not automatically translate into higher demand. Some practices, particularly those directly limiting comfort, such as towel reuse programmes, may reduce guest satisfaction due to the lack of visible quality benefits (Geerts, 2014; López-Gamero et al., 2011). This highlights that service quality remains a fundamental determinant of competitiveness in hospitality and should not be compromised in sustainability strategies (Manaktola & Jauhari, 2007).

Customer satisfaction in hospitality results from both traditional service quality attributes and the experience of the stay, including interpersonal interactions, atmosphere, and aesthetics (Ariffin, 2013; Cafiero et al., 2020). Direct contact with staff, service reliability, responsiveness, and empathy play a crucial role in shaping positive guest experiences and repeat visitation (Wu & Ko, 2013). Therefore, maintaining a balance between circular practices and guest comfort remains essential for ensuring sustainable service quality and long-term competitiveness in hospitality enterprises (Tavares de Carvalho et al., 2024).

In response to these customer expectations regarding both high service quality and environmental responsibility, hotel managers are increasingly implementing solutions based on the principles of the circular economy and integrated management systems. Ensuring sustainable service quality requires combining traditional quality and environmental management tools with measures aimed at reducing resource consumption and minimizing negative environmental impacts (Pamić, Slivar & Periša, 2025). A balance between the implementation of environmentally responsible practices and the maintenance of a high level of comfort, remains a fundamental condition for guest satisfaction.

Methods

1.3. 3.1 Research design and data collection

Based on the identified research gaps and the objective of the study, the following research questions were formulated:

RQ1: What types of circular economy practices are implemented in hotel enterprises?

RQ2: Which operational areas show the highest level of circular implementation?

RQ3: Which circular practices can be interpreted as supporting sustainable service quality without reducing guest comfort?

Taken together, the three research questions aim to identify circular economy practices implemented in hotel enterprises, determine the level of their implementation across different operational areas, and analyse their potential contribution to sustainable service quality. To address the research questions, a study was conducted using the diagnostic survey method. The research had an exploratory character and was carried out using the CAWI method (Computer-Assisted Web Interview) through an online questionnaire. The CAWI method is commonly applied in service quality research, including transport and hospitality-related studies (Świda, 2025). Respondents completed the survey independently using a web-based form created on the Google Forms platform, which was distributed via email. The questionnaire was completed by individuals responsible for managing the surveyed hospitality enterprises, primarily owners and managers, who were considered the most knowledgeable informants regarding operational practices and sustainability-related activities implemented within their establishments. As the study focused on organisational practices rather than individual attitudes or behaviours, socio-demographic characteristics of respondents were not collected. Data collection was conducted between October and December 2025. This approach enabled efficient data collection within a relatively short period of time while ensuring respondent anonymity, which may have contributed to more candid responses. The survey instrument consisted primarily of closed-ended questions of a quantitative nature, including both single-choice and multiple-choice

formats. It included demographic and firmographic variables used to characterise the surveyed enterprises, as well as questions related to the identification of circular economy practices implemented in hospitality businesses.

The questionnaire was designed to ensure internal consistency and clarity of responses, although formal reliability testing was not conducted due to the exploratory nature of the study. The study involved 19 hospitality enterprises operating in Poland and belonging to the small and medium-sized enterprise (SME) sector, in accordance with the definition set out in the European Commission Recommendation 2003/361/EC. The relatively small sample size is consistent with the exploratory character of the study, which aims to identify preliminary patterns rather than to provide statistically generalisable results (Bujang et al., 2024).

1.4. 3.2 Statistical descriptive analysis

The collected data were analysed using descriptive statistical methods. Frequencies and percentages were calculated to assess the prevalence of individual circular economy practices among the surveyed hospitality enterprises (N = 19).

The analytical approach focuses on assessing the extent to which circular practices are implemented within organisations, enabling the identification of areas where circular economy principles are embedded in operational activities. Similar approaches are commonly applied in circular economy research to evaluate the implementation of circular strategies across organisations and sectors (Kirchherr et al., 2017; Korhonen et al., 2018).

To facilitate the interpretation and comparison of implementation levels across operational domains, a circularity gap classification was applied. Practices were grouped into four categories based on predefined threshold values reflecting the proportion of enterprises implementing a given practice: low gap (≥80%), moderate gap (50–79%), high gap (20–49%), and very high gap (<20%). As there are no universally accepted threshold values for assessing the implementation of circular economy practices in the hospitality sector, the threshold values used in this study were established for analytical purposes to provide a consistent framework for comparing implementation levels across different operational areas. The adopted classification follows commonly used approaches in which the prevalence of specific environmental practices across organisations serves as an indicator of their level of sectoral adoption (Del Río et al., 2016). Consequently, the proposed categories should be interpreted as analytical rather than normative benchmarks, enabling a comparative assessment of implementation levels across different stages of the circular economy and operational domains.

In addition to practice-level analysis, aggregated indicators were calculated to enable cross-domain comparison. For each operational domain, the mean level of implementation was computed based on the percentage of enterprises adopting individual practices. Measures of dispersion, including minimum and maximum values, were used to assess variability in adoption levels across practices.

Given the exploratory character of the study and the limited sample size, inferential statistics were not applied, and the results should be interpreted as indicative rather than generalisable. In addition to practice-level analysis, aggregated indicators were calculated to enable cross-domain comparison. For each operational domain, the mean level of implementation was computed based on the percentage of enterprises adopting individual practices. Measures of dispersion, including minimum and maximum values, were used to assess variability in adoption levels across practices. Given the exploratory character of the study and the limited sample size, inferential statistics were not applied, and the results should be interpreted as indicative rather than generalisable.

1.5. 3.3 Characteristics of the study sample

The study targeted hospitality entrepreneurs without restrictions on location or size, and the collected data enabled profiling of enterprises by category, location, size, and scale of operations (table 1). The surveyed sample is dominated by hotels, which account for 42.1% of all responses (n=8). A significant share of the sample is also represented by holiday cottages (36.8%, n=7) and guesthouses (15.8%, n=3) whereas agritourism was represented by a single respondent (5.3%, n = 1). It is noteworthy that all surveyed entities (100%) are independent, privately owned establishments, which reflects the specific characteristics of the research group, primarily representing the small and medium-sized enterprise (SME) sector.

Most of the surveyed enterprises are located in tourist and recreational destinations, such as mountainous, coastal, or lake regions, accounting for 63.2% of all enterprises (n=12). The remaining establishments are situated in smaller cities (with fewer than 150,000 inhabitants) or on the outskirts of large metropolitan areas (15.8%, n=3), in rural areas (15.8%, n=3), while one establishment is located in the centre of a large city (5.3%, n=1).

In terms of size, the largest group consists of medium-sized establishments offering between 50 and 99 beds (36.8%, n=7), followed by those with 20-49 beds (26.3%, n=5). Three enterprises reported having 100-199 beds and another three indicated fewer than 20 beds, each group representing 15.8% of the surveyed sample. One establishment (5.3%) reported a capacity exceeding 200 beds.

The largest group consists of entities employing between 10 and 49 employees (42.1%, n=8), followed by enterprises employing fewer than 10 people (36.8%, n=7). Companies employing between 50 and 249 employees account for 10.5% of respondents (n=2). While two enterprises did not disclose their number of employees, they were retained in the sample because their SME status had been verified during the sample selection process, and the survey was distributed exclusively to organizations meeting the SME eligibility criteria.

The annual number of guests in the surveyed hospitality establishments most commonly does not exceed 5,000 persons (47.4%, n=9). A range of 5,000 to 15,000 guests per year was indicated by 21.1% of respondents (n=4), while two enterprises (10.5%) reported

accommodating between 15,000 and 30,000 guests annually. Four enterprises (21.1%) declined to provide information regarding the annual number of guests.

Table 1.
Characteristics of the surveyed hospitality enterprises

Variable	Category	Share	n
type of facility	Hotel	42.1	8
	Holiday cottages	36.8	7
	Guesthouses	15.8	3
	Agritourism	5.3	1
location	Tourist areas	63.2	12
	Hotel	15.8	3
	Holiday cottages	15.8	3
	Guesthouses	5.3	1

Source: own elaboration based on own research.

Results

1.6. 4.1 Waste management practices

Table 2 presents a circularity gap matrix for waste management practices identified in the surveyed hospitality enterprises. The practices are organised according to their position within the circular economy hierarchy (prevention, reuse, recycling and recovery) and their level of implementation across the analysed sample of enterprises. The implementation level is expressed as the proportion of enterprises declaring the use of a given practice, while the circularity gap classification reflects the degree to which these practices are implemented across the analysed sample. The results indicate a high level of implementation of basic waste segregation practices among the surveyed enterprises. All respondents declared the segregation of paper and glass waste (100%), while slightly lower percentages were reported for plastics and metals (89.5%) and bio-waste (84.2%) (table 2). The survey data do not allow for a detailed explanation of these differences; however, they may reflect variations in waste management practices or respondents' interpretation of the survey questions. It should be noted that practices related to food waste management apply only to the subgroup of enterprises offering gastronomic services (11 out of 19 surveyed entities), which partially explains differences in implementation levels within higher-order circular activities. Practices located higher in the circular hierarchy, particularly those related to waste prevention and reuse, are implemented less frequently. These include actions such as optimising food purchasing, adjusting portion sizes, and informing guests about food waste prevention. Lower implementation levels are also observed for practices associated with food surplus management and organic waste recovery,

such as the creative reuse of food leftovers, the use of food-sharing platforms, food donations to charitable organisations, and composting of green waste. The distribution of responses indicates a concentration of practices in the recycling stage, with significantly lower frequencies observed for prevention, reuse, and recovery activities.

Table 2.
Circularity gap matrix for waste management practices in hospitality enterprises

Circular stage	Circular practice identified in the study	Implementation (n / %)	Circularity gap
Prevention	Elimination of single-use plastic straws and cutlery	12 / 63.2%	Moderate
	Optimisation of food purchasing processes	5 / 45.5%*	High
	Preparation of meals on demand		
	Optimisation of portion sizes		
	Reduction of plastic bottles (glass alternatives)	6 / 31.6%	
	Use of smaller serving dishes on buffets	3 / 27.3%*	
	Informing guests about food waste prevention		
	Installation of drinking water dispensers eliminating PET bottles	1 / 5.3%	Very high
Reuse	Refillable cosmetic dispensers instead of single-use packaging	11 / 57.9%	Moderate
	Redistribution of edible food surplus to employees	6 / 54.5%*	
	Use of reusable packaging in gastronomy	4 / 36.4%*	High
	Creative reuse of food leftovers	2 / 18.2%*	Very high
	Use of food sharing applications		
	Donation of food surplus to charities	1 / 9.1%*	
Recycling	Segregation of paper and glass waste	19 / 100%	Low
	Segregation of plastics and metals	17 / 89.5%	
	Segregation of bio-waste	16 / 84.2%	
	Segregation of batteries and accumulators	10 / 52.6%	Moderate
	Segregation of electronic waste and textiles	8 / 42.1%	High
	Segregation of used oils and fats	4 / 36.4%*	
Recovery	Collection of used cooking oils by specialised companies	8 / 72,7%*	High
	Composting of organic waste from gastronomy	7 / 36.8%*	
	Composting of green waste	2 / 10.5%	Very high

*percentages calculated only for enterprises providing gastronomic services (11 out of 19).

Source: own elaboration based on own research.

1.7. 4.2 Energy and water management practices

The figure 1 presents the distribution of energy and water management practices across four circular stages and four levels of circularity gap identified in the study. The horizontal axis represents circular stages of resource management, while the vertical axis indicates the level of circularity gap based on the share of enterprises implementing a given practice. Bubble size

reflects the number of surveyed hotels adopting a particular practice (N = 19). Colours indicate different circular stages: blue for resource efficiency, green for resource optimisation and monitoring, orange for renewable energy adoption and red for energy recovery.

The circularity gap matrix presented in figure 1 reveals substantial variation in the implementation of energy and water management practices across the surveyed enterprises. The highest level of adoption is observed for basic resource efficiency measures. Energy-efficient lighting and motion sensors exhibit a low circularity gap, as they are implemented by nearly all surveyed hotels (19 and 17 enterprises respectively). These practices represent relatively low-cost technological solutions that are easy to implement and provide immediate operational savings, which explains their widespread adoption in the sector.

Moderate implementation levels are observed for practices related to the use of energy-efficient appliances, which were implemented by 11 hotels. Although these solutions contribute to reducing energy consumption, their adoption may require gradual replacement of equipment and therefore tends to occur over longer investment cycles.

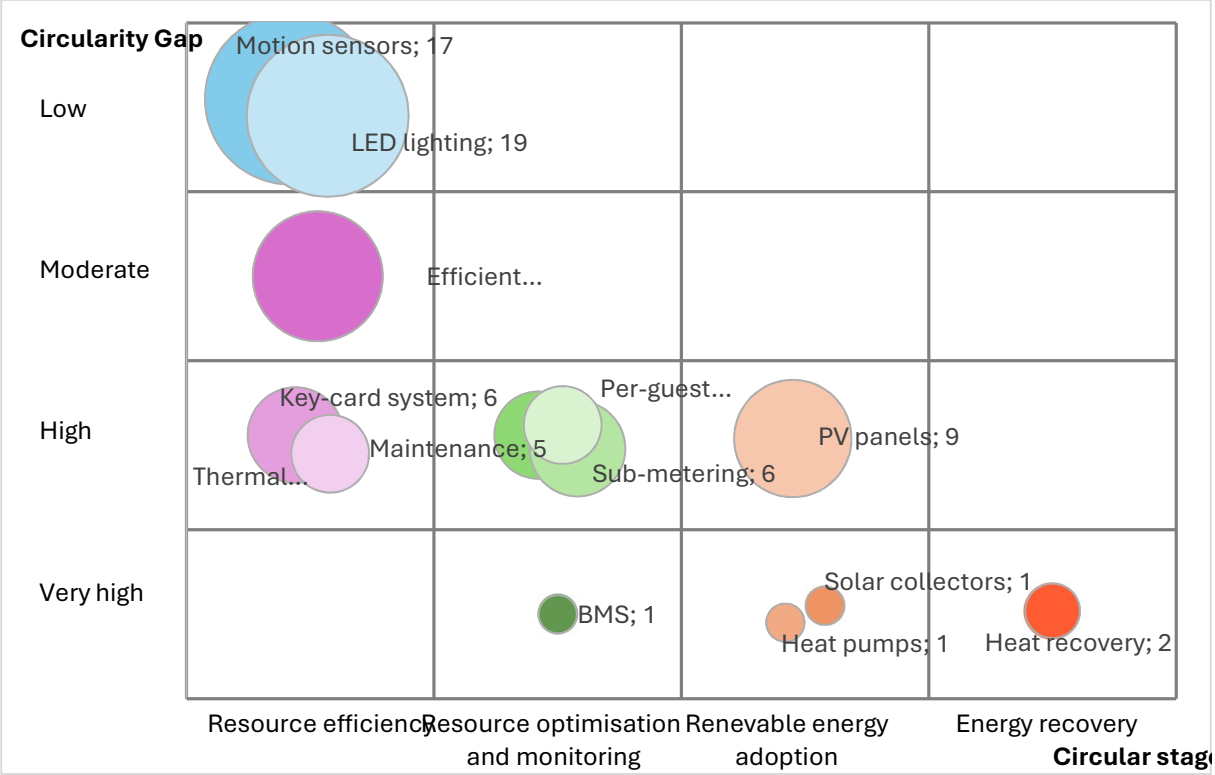


Figure 1. Distribution of energy and water management practices across four circular stages and four levels of circularity gap.

Source: own elaboration based on own research.

Practices associated with more advanced resource optimisation and monitoring show a noticeably higher circularity gap. Solutions such as sub-metering systems, regular maintenance and energy monitoring per guest are implemented by only a limited number of enterprises. A similar pattern can be observed for renewable energy adoption. Photovoltaic panels are the most

common renewable technology, implemented by nine enterprises, which places this practice within the high circularity gap category. Other renewable solutions, such as solar collectors and heat pumps, are adopted only marginally, suggesting that the transition towards diversified renewable energy sources in the hospitality sector remains limited.

The largest implementation gaps occur for practices located at the most advanced stage of circular resource management. Energy recovery technologies, such as heat recovery systems, are implemented by only a small number of enterprises. Similarly, advanced digital energy management tools such as building management systems (BMS) appear rarely in the surveyed sample. These findings indicate that while hotels widely adopt basic efficiency measures, the diffusion of more complex technological solutions enabling systemic circular resource management remains relatively low.

1.8. 4.3 Eco-efficiency practices in hotel operations

The implementation of circular economy (CE) principles in the hospitality sector extends beyond internal resource management to encompass supply-chain organization and stakeholder cooperation. Supplier selection and procurement structures influence environmental performance, transport-related emissions, and the strengthening of local economic networks. A substantial majority of surveyed facilities (84.2%; 16 out of 19) reported active cooperation with local partners, indicating strong integration of CE practices within shortened supply chains. Most respondents (73.7%) preferred local suppliers, while only seven enterprises identified price as the primary selection criterion. Six facilities required returnable or bulk packaging, reducing single-use packaging waste. The limited importance attributed to ecological certifications and recycled materials suggests a predominantly pragmatic approach.

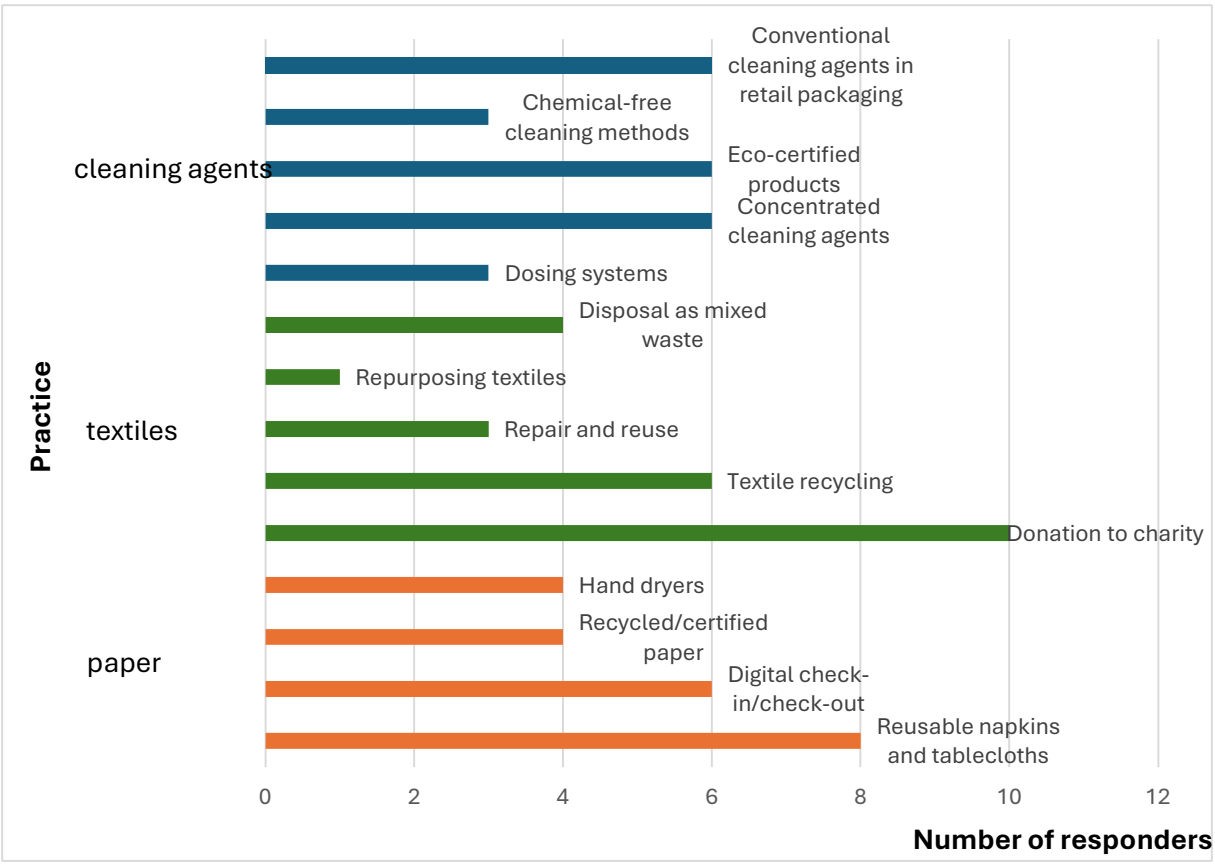


Figure 2. Eco-efficiency practices in the area of paper, textiles and cleaning agents consumption

Source: own elaboration based on own research.

Hotels show moderate optimization in paper consumption. The most common measure is the use of reusable napkins and tablecloths (8/19), followed by digitalized check-in/check-out processes (6). Less frequent are recycled/certified paper and hand dryers (4 each), while five hotels reported no paper-reduction initiatives. Textile management focuses on extending product life cycles. Most facilities donate used textiles, while others recycle, repair, or repurpose them internally. Disposal as mixed waste remains marginal.

In cleaning-agent management, the most prevalent practices include dosing systems and the use of concentrated products. Some facilities additionally employ environmentally certified agents, while only a few adopt alternative technologies such as ozone-based disinfection. However, the continued purchase of cleaning products in small retail packaging in several cases indicates ongoing inefficiencies in packaging waste management.

1.9. 4.4 Waste management practices

To provide a cross-domain perspective, aggregated indicators of circular practice implementation were calculated (table 3).

Table 3.
Comparative summary of circular practice implementation across operational domains

Operational domain	Mean (%)	Min (%)	Max (%)	Range (%)	Number of practices (N)
Waste management (N=19)	53.7	5.3	100	5.3–100	10
Waste management - food related practices (N=11)	37.4	9.1	72.7	9.1–72.7	9
Energy and water management	34.8	5.3	100	5.3–100	13
Eco-efficiency practices	26.3	5.3	52.6	5.3–52.6	14

Source: own elaboration based on own research.
Note: Aggregated indicators were calculated separately for practices applicable to the full sample of enterprises (N = 19) and for practices specific to enterprises offering gastronomic services (N = 11).

The results indicate that waste management practices applicable to the full sample (N=19) exhibit the highest average level of implementation (53.7%) with substantial variability (5.3%–100%). Food-related practices show a lower level (37.4%) and a narrower range (9.1%–72.7%), indicating limited development of higher-order circular activities. Energy and water management practices demonstrate a moderate level (34.8%) with a wide range (5.3%–100%), while eco-efficiency practices show the lowest level of implementation (26.3%) and a narrower range (5.3%–52.6%). Overall, circular economy implementation in hospitality remains uneven and concentrated in low-cost, efficiency-oriented practices, with limited adoption of more advanced solutions.

Discussion

RQ1 is addressed through the identification of circular economy practices implemented across waste management, energy and water management, and eco-efficiency domains. The most frequently adopted practices include waste segregation, energy-efficient lighting, motion sensors, cooperation with local suppliers, and the use of refillable cosmetic dispensers. In contrast, more advanced circular practices, such as food surplus redistribution, composting, energy recovery systems, and digital resource-monitoring tools, remain relatively uncommon. These results suggest that circular economy implementation in hospitality is primarily concentrated on operational measures that are relatively easy to adopt, require limited investment, and generate immediate environmental and economic benefits.

The comparison of implementation levels across operational domains provides an answer to *RQ2.* Aggregated indicators show that waste management exhibits the highest level of implementation (53.7%), followed by energy and water management (34.8%) and eco-efficiency practices (26.3%). The dominance of waste management is driven by the widespread implementation of recycling practices, particularly waste segregation, which is consistent with previous findings highlighting the role of regulatory frameworks and low implementation costs

(Kiaušienė et al., 2024). At the same time, substantial variability within this domain indicates that higher-order practices, such as prevention, reuse, and recovery, remain underdeveloped. This is especially evident in food-related activities, where the average implementation level is lower (37.4%), suggesting that more complex circular solutions, such as food waste prevention and redistribution, are more difficult to implement (Manniche et al., 2021).

A similar pattern is observed in energy and water management, where enterprises prioritise low-cost efficiency measures, while more advanced solutions remain limited (Singh et al., 2023). Eco-efficiency practices, despite their potential to reduce resource use and waste generation, show the lowest average level of implementation (26.3%), indicating that they are less systematically integrated into hotel operations. The findings also highlight the importance of organisational and supply-chain dimensions, particularly cooperation with local suppliers, which supports circularity through shortened supply chains and reduced environmental impact. The limited implementation of more advanced circular practices, including building management systems (BMS), energy recovery technologies, and food waste prevention measures, may reflect several barriers commonly identified in the circular economy and hospitality literature (Bittner, Bakker & Long, 2024). First, these solutions often require substantial upfront investments, specialised technical expertise, and organisational capabilities that may exceed the resources of small and medium-sized hospitality enterprises. In addition, the economic benefits of such investments are frequently realised over a longer time horizon, which may discourage adoption by businesses operating under financial constraints. Food waste prevention presents additional organisational challenges, as it requires accurate demand forecasting, staff engagement, modifications to operational routines, and compliance with food safety regulations. Consequently, hospitality enterprises may prioritise relatively simple and cost-effective practices, such as waste segregation or energy-efficient lighting, which provide immediate operational and environmental benefits while requiring fewer organisational changes. The predominance of SMEs in the study sample is likely to reinforce these constraints, as smaller enterprises generally have more limited financial and human resources available for implementing complex circular innovations.

The findings also provide insights into *RQ3* concerning the relationship between circular practices and sustainable service quality. The results suggest that many circular practices can be interpreted as supporting sustainable service quality without reducing guest comfort. In particular, efficiency-oriented measures such as LED lighting, energy-efficient equipment, and resource-saving technologies operate largely in the background of service delivery and therefore remain largely invisible to guests. Similarly, cooperation with local suppliers may enhance the perceived quality and authenticity of hospitality services while simultaneously contributing to environmental objectives. Many eco-efficiency practices related to paper consumption, textiles, and cleaning agents are also implemented in ways that do not interfere with service delivery, allowing hotels to reduce resource consumption without compromising service standards (Oliveras-Villanueva et al., 2020). In contrast, practices requiring direct guest

involvement may require more careful implementation and communication to avoid potential negative effects on perceived comfort (Oliveras-Villanueva et al., 2020; Sah et al., 2025).

From a theoretical perspective, the study contributes to the growing literature on circular economy implementation in hospitality by providing empirical evidence from SMEs operating in Poland and by linking circular practices with sustainable service quality considerations. From a managerial perspective, the findings suggest that the transition toward circular hospitality should begin with efficiency-oriented measures and gradually extend to more advanced practices, such as resource monitoring, food waste prevention, and circular procurement.

The study has several limitations. First, the small sample size limits generalisability, positioning the research as exploratory. Second, reliance on self-reported data may introduce subjectivity; future studies should incorporate objective performance indicators. Third, the analysis focuses on the supply side; further research should examine customer perceptions and the impact of circular practices on satisfaction, perceived value, and loyalty.

Conclusions

The findings demonstrate that the implementation of circular economy practices in hospitality enterprises remains uneven across operational areas. Waste management, particularly recycling activities, represents the most developed domain, whereas practices related to prevention, reuse, recovery, and resource monitoring are less widespread. This suggests that hotels tend to prioritise solutions that are relatively easy to implement and provide immediate operational benefits. The results also indicate that many circular practices can support environmental objectives without compromising guest comfort. Resource-efficiency measures and cooperation with local suppliers appear particularly compatible with maintaining service quality. Despite its exploratory nature and limited sample size, the study provides empirical insights into circular economy implementation in Polish hospitality enterprises and identifies directions for future research, particularly regarding the relationship between circular practices and customer perceptions of service quality.

Bibliography:

1. Ariffin, A. A. M. (2013). Generic dimensionality of hospitality in the hotel industry: A host–guest relationship perspective. *International Journal of Hospitality Management*, *35*, 171-179.
2. Baratta, R., & Simeoni, F. (2021). Food is good for you (and the planet): Balancing service quality and sustainability in hospitality. *Sinergie Italian Journal of Management*, *39*(1), 193-213.
3. Bittner, N., Bakker, N., & Long, T. B. (2024). Circular economy and the hospitality industry: A comparison of the Netherlands and Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, *444*, 141253.
4. Bujang, M. A., Omar, E. D., Foo, D. H. P., & Hon, Y. K. (2024). Sample size determination for conducting a pilot study to assess reliability of a questionnaire. *Restorative dentistry & endodontics*, *49*(1).
5. Burmeister, E., & Aitken, L. M. (2012). Sample size: How many is enough?. *Australian critical care*, *25*(4), 271-274.
6. Cafiero, C., Palladino, M., Marcianò, C., & Romeo, G. (2020). Traditional agri-food products as a leverage to motivate tourists: A meta-analysis of tourism-information websites. *Journal of Place Management and Development*, *13*(2), 195-214.
7. Del Río, P., Peñasco, C., & Romero-Jordán, D. (2016). What drives eco-innovators? A critical review of the empirical literature based on econometric methods. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2158-2170.
8. Draper, A., & Green, J. (2002). Food safety and consumers: constructions of choice and risk. *Social Policy & Administration*, *36*(6), 610-625.
9. Geerts, W. (2014). *BUSINESS TRAVEL, HOTELS, AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY* (Doctoral dissertation, Department of Geography Royal Holloway, University of London).
10. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy–A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, *143*, 757-768.
11. Gössling, S., Garrod, B., Aall, C., Hille, J., & Peeters, P. (2011). Food management in tourism: Reducing tourism's carbon 'foodprint'. *Tourism Management*, *32*(3), 534-543.
12. Jacob, M., Martínez-Gómez, M., Florido, C., & Vives, A. (2025). Key factors influencing the guest loyalty towards green hotels in an island sun and beach destination. *Journal of Hospitality and Tourism Insights*, *8*(8), 3128-3147.

13. Jones, P., & Comfort, D. (2020). The COVID-19 crisis and sustainability in the hospitality industry. *International journal of contemporary hospitality management*, *32*(10), 3037-3050.
14. Kiaušienė, I., Hladkova, V., & Makūnaitė, G. (2024). Application of circular economy principles in the tourism sector. *Management theory and studies for rural business and infrastructure development.*, *46*(1), 31-44.
15. Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological economics*, *150*, 264-272.
16. Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., & Birkie, S. E. (2018). Circular economy as an essentially contested concept. *Journal of cleaner production*, *175*, 544-552.
17. López-Gamero, M. D., Zaragoza-Sáez, P., Claver-Cortés, E., & Molina-Azorín, J. F. (2011). Sustainable development and intangibles: building sustainable intellectual capital. *Business Strategy and the Environment*, *20*(1), 18-37.
18. Łuka, P. (2024). Pro-environmental factors affecting the attractiveness of tourism products: a case study of the hotel industry. *Polish Journal for Sustainable Development*, *28*(2), 39-44.
19. Manaktola, K., & Jauhari, V. (2007). Exploring consumer attitude and behaviour towards green practices in the lodging industry in India. *International journal of contemporary hospitality management*, *19*(5), 364-377.
20. Manniche, J., Larsen, K. T., & Broegaard, R. B. (2021). The circular economy in tourism: transition perspectives for business and research. *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, *21*(3), 247-264.
21. Martínez Santos, K. E., Thollander, P., & Guerra Plasencia, M. Á. (2025). Improved Energy Management in the Hotel Industry, Energy Key Performance Indicators, Benchmarking, and Taxonomy Methodology. *Energies*, *18*(16), 4277. https://doi.org/10.3390/en18164277 Oliveras-Villanueva, M., Llach, J., & Perramon, J. (2020). Service quality in hospitality and the sustainability effect: Systematic literature review and future research agenda. *Sustainability*, *12*(19), 8152.
22. Pamić, R. K., Slivar, I., & Periša, A. (2025). A New Model of Sustainable Quality Management in Hotel Companies. *TEM Journal*, *14*(1), 342.
23. Pomponi, Francesco & Moncaster, Alice. (2016). Circular economy for the built environment: A research framework. 10.17863/CAM.7204.
24. Rodríguez, C., Florido, C., & Jacob, M. (2020). Circular Economy Contributions to the Tourism Sector: A Critical Literature Review. *Sustainability*, *12*(11), 4338. https://doi.org/10.3390/su12114338
25. Sah, A. K., Hong, Y. M., & Huang, K. C. (2025). Enhancing brand value through circular economy service quality: The mediating roles of customer satisfaction, brand image, and customer loyalty. *Sustainability*, *17*(3), 1332.

26. Şahin, E., Yiğitoğlu, V., Gök Demir, Z., Karakaya, Ç., Erendağ Sümer, F., & Güneri, B. (2024). Circular Economy for Sustainability: A Bibliometric Analysis for the Tourism/Hospitality Field. *Sustainability*, *16*(15), 6290. https://doi.org/10.3390/su16156290
27. Singh, A. B., Khandelwal, C., Sarkar, P., Dangayach, G. S., & Meena, M. L. (2023). Theoretical and methodological contribution of sustainable practices to the hospitality industry.
28. Tavares de Carvalho, P. (2024, June). Digital Age and Hospitality Human Resources Strategy of Development. The Case of the Japanese and Chinese Customers. In *University Forum for Human Resource Development Conference* (pp. 71-90). Cham: Springer Nature Switzerland.
29. van Haastert, M., & de Grosbois, D. (2010). Environmental initiatives in bed and breakfast establishments in Canada: Scope and major challenges with implementation. *Tourism and Hospitality Planning & Development*, *7*(2), 179-193.
30. Wang, L. E., Cheng, S. K., Zhong, L. S., Mu, S. L., Dhruba, B. G., & Ren, G. Z. (2013). Rural tourism development in China: Principles, models and the future. *Journal of mountain science*, *10*(1), 116-129.
31. Wu, H. C., & Ko, Y. J. (2013). Assessment of service quality in the hotel industry. *Journal of Quality Assurance in Hospitality & Tourism*, *14*(3), 218-244.
32. European Commission (n.d), EU Ecolabel Tourist Accommodation. https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel/eu-ecolabel-tourist-accommodation_en. (Access on 20.03.2026)
33. European Commission. (2016). Commission Decision (EU) 2016/611 of 15 April 2016 on the reference document on best environmental management practice, sector environmental performance indicators and benchmarks of excellence for the tourism sector under Regulation (EC) No 1221/2009 (EMAS). Official Journal of the European Union, L 104, 27–77.
34. UNWTO. (2008). Climate Change and Tourism. https://www.e-unwto.org/doi/epdf/10.18111/9789284412341. (Access on 20.03.2026)

QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0: EVIDENCE FROM SEMICONDUCTORS

Carla SERRANO[1*], Agata MATARAZZO[1], Magdalena WOJNAROWSKA [2] and Patrizia MOSCHETTI[3]

[1] Department of Economics, University of Catania (Italy); carla.serrano@phd.unict.it; 0009-0006-8355-8246

[1] Department of Economics, University of Catania (Italy); amatara@unict.it; 0000-0003-1537-1915

[2] Department of Technology and Ecology of Products - University of Economics in Krakow (Poland); wojnarom@uek.krakow.pl; 0000-0001-7068-1698

[3] STMicroelectronics, Str. Primosole, 50, 95121 Catania (Italy); patrizia.moschetti@st.com

* Corresponding author: carla.serrano@phd.unict.it; Tel.: +39 345/2996530

Summary

Purpose

The aim of this research is to investigate the development of the Quality Management System (QMS) in the context of Industry 4.0, in order to identify the quality standards and tools that can support industrial innovation, particularly in the semiconductor sector.

Methodology

The research follows a narrative literature review approach to trace the progressive repositioning of the QMS in the context of Quality 4.0. The theoretical framework is supported by a case study of STMicroelectronics (ST), through the use of recent data and quantitative indicators.

Findings

The research results highlight that the QMS is moving from a system focused on documentary compliance and final inspection to a more integrated, preventive, and data-based system. In this context, the future revision of ISO 9001:2026 is of particular interest, since it is focused on sustainability, leadership, quality culture, ethics, risk/opportunity management, and the use of data for strategic decisions. The semiconductor sector is of particular interest because of the close relationship between quality, process control, repeatability of production and reliability of components. The case study of STMicroelectronics confirms that, in this specific context, the QMS acts as a strategic system for governance, control, reliability, and innovation.

Research Limitations/Implications

The research has some limitations due to the narrative approach, the use of a single case and the ongoing development of the new ISO 9001:2026. Further research can follow this path through more in-depth analyses.

Originality/Value

The research has originality in linking Quality 4.0, ISO 9001:2026, and the semiconductor sector through the case of STMicroelectronics.

Keywords: Quality Management System; Quality 4.0; Industry 4.0; semiconductor industry; ISO 9001:2026.

1. Introduction

In the context of Industry 4.0, the issue of quality has become increasingly strategic, since the digital transformation of production processes requires systems of control, monitoring, and continuous improvement capable of operating in environments that are progressively more interconnected, automated, and data-driven. The most recent literature interprets this evolution as a shift toward Quality 4.0, namely the integration of traditional quality management practices with the emerging technologies of Industry 4.0, including Artificial Intelligence (AI), advanced sensors, the Internet of Things (IoT), analytics, and predictive systems, with the aim of improving time, costs, efficiency, and product quality (Liu et al., 2023; Saihi et al., 2023). From this perspective, quality no longer coincides exclusively with an ex post inspection function, but rather takes the form of an integrated lever for prevention, traceability, organizational learning, and support for innovation, especially in manufacturing contexts characterized by high technological complexity (Hafid et al., 2025).

Within this scenario, the QMS represents the managerial infrastructure through which digitalization can be translated into stable, measurable, and replicable organizational capability. From this perspective, the present contribution takes as its reference the latest revision of the ISO 9001 standard, currently under review and expected to be published in 2026, as a useful interpretative framework for analyzing the evolution of quality management systems in the digital era. Added to this is the 2024 amendment relating to the climate action framework, which confirms the ability of the standard to adapt to new productive, organizational, and environmental contexts. More generally, recent evidence shows that manufacturing firms are progressively integrating quality management principles with Industry 4.0 technologies through operating models based on the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle, intelligent sensors, IoT platforms, Enterprise Resource Planning (ERP) systems, and AI tools (Chiarini and Cherrafi, 2023). The current challenge, therefore, does not lie in abandoning traditional standards, but rather in reinterpreting and adapting them to processes that are increasingly digital, rapid, and interdependent (Aichouni et al., 2024; Mahin et al., 2024).

The choice to focus the analysis on the semiconductor industry responds to both theoretical and industrial reasons. Semiconductors are in fact a fundamental enabling technology for contemporary digital transformation and represent a sector in which quality, reliability, and compliance are of particularly high importance, since even minimal process variations can compromise component performance, yield, and safety, with significant effects throughout the entire production chain. In this context, a central reference is represented by IATF 16949

(International Automotive Task Force 16949), a relevant standard for semiconductors intended for automotive applications. Alongside it, the standards of the Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC) are also relevant, namely the technical references developed by the leading standardization organization in the microelectronics and semiconductor sector, as well as the standards of the Automotive Electronics Council (AEC), including in particular AEC-Q100, relating to the qualification of integrated circuits for automotive applications. The coexistence of managerial standards and sector-specific technical standards therefore makes the semiconductor industry a privileged observatory for understanding how the QMS can evolve from a simple compliance tool into a driver of reliability, innovation, and competitiveness.

In light of these considerations, the research question guiding this contribution may be formulated as follows: what are the most relevant quality standards for improving innovation in Industry 4.0, with a specific focus on the semiconductor industry?

Consistent with this question, the aim of the paper is to identify the new tools and standards of the QMS, with particular attention to those that are most relevant in the semiconductor industry, in order to highlight how quality can evolve from a mere compliance tool into an integrated lever for control, learning, reliability, and innovation.

The novelty of this research lies in the combination of the theoretical discourse on Quality 4.0 and an updated analysis of the QMS, taking into account the most recent ISO 9001 revision, which is due for publication in 2026. Accordingly, the research aims to provide an updated interpretation of the complex relationships between standardization, digitalization, and innovation, showing that the evolution of the QMS does not mean the replacement of traditional standards but rather their repositioning in a new paradigm of production that is increasingly intelligent, connected, and data-driven.

On the basis of this theoretical framework, the paper also aims to provide a case study of the company STMicroelectronics, a major player in the microelectronic industry, to concretely examine the application of QMS tools and standards in a high-tech industrial context. The case study will be supported by data and quantitative indicators that will be used to illustrate the complex relationships between quality management systems, production performance, process reliability, and innovation capacity.

According to these premises, the structure of the article can be divided into four sections: methodology, results, discussion, and conclusions. The first section deals with the methodological framework and the relevant literature. The second section deals with the main results, with particular emphasis given to the new tools and standards in the QMS and their application to the ST case. The third section focuses on the interpretation of the results, with emphasis given to their theoretical and managerial implications. The fourth section deals with the conclusions, presenting the main results of the article, its limitations, and possible implications for future developments.

2. Methodology

The methodology of the present contribution is based on a literature review aimed at reconstructing, from a critical and interpretative perspective, the progressive repositioning of the QMS within the framework of Industry 4.0. This choice is particularly appropriate in the presence of a broad, cross-cutting, and still evolving field of study, in which the objective is not only to describe individual findings, but also to relate concepts, theoretical trajectories, and recurring thematic cores, so as to build a coherent analytical basis for the subsequent sector-specific in-depth analysis.

In this direction, Hamrol and Grabowska (2026) observe that, when a topic is conceptually heterogeneous and spans different disciplines, a narrative or semi-systematic review constitutes a particularly useful solution, since it makes it possible to follow the evolution of the debate over time, identify emerging themes, and bring out possible theoretical gaps, without excessively constraining the analysis within the limits of a strict systematic review. The same authors also specify that, in the case of quality applied to Industry 4.0, the review not only offers an overview of the state of the art, but also supports the construction of future research agendas, especially where it becomes necessary to connect technological transformation, organizational models, and quality principles within a single interpretative framework. On this basis, the review adopted here assumes an eminently conceptual function: the aim is to read in an integrated way the literature that has discussed the impact of the enabling technologies of the fourth industrial revolution, in particular IoT, cyber-physical systems, big data, cloud computing, advanced automation, and artificial intelligence, on the processes of quality planning, control, assurance, and improvement.

Zaidin et al. (2018) already show how factory digitalization reconfigures the very perimeter of quality management, which is no longer treated as a function limited to the final conformity of the product, but as a dimension distributed throughout the entire production system. From this perspective, quality continues to rest on the classical references of the ISO tradition, namely quality planning, quality control, quality assurance, and quality improvement, but these components are reinterpreted within an interconnected production environment in which machines, data, systems, and people participate with greater continuity in monitoring and decision-making processes. The literature indeed underlines that the emergence of the smart factory simultaneously expands both the opportunities and the criticalities of quality management: on the one hand, advantages are highlighted in terms of competitiveness, operational speed, flexibility, and process coordination; on the other hand, difficulties are emphasized in connection with vertical, horizontal, and end-to-end integration, high initial investments, the shortage of specialists, and the need to reskill human capital. The transition toward Industry 4.0 is therefore not presented as a linear or automatically improving process,

but rather as a structural change that requires governance capacity, organizational skills, and a redefinition of traditional control arrangements.

A second interpretative turning point clearly emerges in Sader et al. (2019), who highlight that the contribution of Industry 4.0 to quality is manifested above all in the shift from a predominantly reactive model to a preventive, connected, and data-driven model. According to this approach, the value of the QMS grows to the extent that it integrates with continuous information flows coming from sensors, ERP systems, cyber-physical systems, and analysis platforms, making more timely process supervision possible. The authors show that this digital infrastructure enables the development of real-time monitoring, fault prediction systems, in-process inspection, early defect identification, and decisions supported by data analysis, with significant effects on the reduction of quality costs, the decrease of lead time, and greater responsiveness toward the customer. In other words, quality is no longer placed exclusively downstream of production, but is distributed along the entire value chain, entering the core of operational planning, maintenance, logistics, and coordination among internal and external actors. This transition is methodologically relevant for the present paper because it makes it possible to interpret the QMS not as a static apparatus of documentary verification, but as an architecture of learning and dynamic control, in which data assume a structural function for the prevention of nonconformity and for continuous improvement.

Nenadál (2020) insists on the fact that the integration between production, suppliers, and customers, made possible by the extended connectivity typical of Industry 4.0, strengthens both product quality and the quality of decision-making, since systems become more capable of reacting in real time, reallocating resources, updating production priorities, and maintaining consistency with the required quality specifications.

At a further level of reflection, Baran et al. (2022) show that digital transformation affects not only the tools of quality, but also its founding principles. The authors take the seven Quality Management Principles as a reference and argue that smart manufacturing technologies do not determine their overcoming, but profoundly modify the conditions of their application. In an environment characterized by increasing customization, shorter life cycles, more flexible processes, decentralized decisions, and intensive use of real-time data, quality principles retain their validity, but are reformulated in light of new requirements of speed, adaptability, and human-system interaction. The most significant theoretical point is therefore the complementary nature of the relationship between quality and digitalization: technologies increase the effectiveness and efficiency of quality management processes, but they do not eliminate the need for structures, responsibilities, rules, customer orientation, and continuous improvement.

This interpretation makes it possible to overcome a dichotomous representation between tradition and innovation, instead restoring the idea of transformative continuity: the QMS evolves, expands, and becomes digitalized, but does not lose its essential foundations. For this reason, the review adopted in the present paper takes as its guiding criterion the reconstruction

of the main axes of convergence present in the literature: the centrality of digital integration among functions, data, and actors of the value chain; the strengthening of real-time control and predictive capabilities; the growing importance of evidence-based decisions supported by big data and intelligent tools; and, finally, the persistence of the classical principles of quality, reinterpreted, however, in more flexible, faster, and interconnected forms.

This approach is also consistent with the most recent developments in the debate, in which the topic has been further explored by contributions dedicated to Quality 4.0, the relationship between digitalization and the profession of the quality manager, and the redefinition of control practices and the maturity of quality systems in Industry 4.0 environments, as shown, among others, by Chiarini (2020), Zonnenshain and Kenett (2020), Silva et al. (2022), Canbay and Gülşen (2023), and Almeida and Abreu (2024). In this way, the adopted methodology does not merely collect heterogeneous contributions, but aims to organize them into a unified analytical framework, useful for showing how quality, in the era of the fourth industrial revolution, no longer coincides only with conformity or final inspection, but rather with a broader organizational capability aimed at integrating prevention, reliability, adaptation, and innovation.

Applied to the semiconductor industry, the methodological perspective just outlined acquires even greater relevance, since in this sector quality does not simply coincide with the conformity of the finished product, but also involves process stability, production repeatability, traceability, component qualification, and the prevention of minimal defects, which can generate significant consequences for the reliability of the entire system in which the device is used. In a production context characterized by extremely tight tolerances, high technological intensity, and strong integration among design, manufacturing, and testing, the QMS assumes a particularly critical function, since it must support not only compliance with standards, but also process robustness and the ability to promptly detect even minimal variations. Within this framework, the strategic centrality of the sector was explicitly reaffirmed by the European Commission (2023), which, in the context of the European Chips Act, underlines how strengthening the semiconductor ecosystem is decisive for increasing the resilience of European supply chains, reducing external dependencies, and supporting the technological sovereignty of the Union.

Evidence from the main companies in the sector also shows that the adoption of structured standards does not have a merely formal function, but constitutes an integral part of the industrial architecture. The most recent corporate reporting highlights, in fact, how third-party audits, product qualification procedures, process monitoring, and a culture of continuous improvement are closely connected to the ability to ensure reliability, stability, and performance consistency in highly complex production environments. From this perspective, standards are not exhausted in a documentary requirement, but operate as coordination devices among design, production, testing, risk management, and customer relations.

From a QMS perspective in the world of semiconductors, one should refer to a set of elements in which international standards, technical competence, audits, permanent monitoring, and technology come together in a way that can support not just quality and innovation but also competitiveness in the industry. It is therefore not possible to speak of a mere application of the quality discussion in a specific industry; rather, one should refer to a paradigm in which the transformations outlined in the general literature on Industry 4.0 and Quality 4.0 are deployed in a particularly strong and strategic way.

3. Results

The results of the review show that, within the framework of Industry 4.0, the QMS tends to evolve from a system mainly oriented toward documentary compliance and final inspection into a more integrated, preventive, and data-driven platform, in which continuous monitoring, risk management, traceability, and data-based decisions become central elements of quality improvement. This trajectory, already highlighted in the literature on the transition from traditional quality management to Quality 4.0, finds a particularly significant field of application in the semiconductor industry, since in this context quality is closely connected to process stability, production repeatability, and component reliability, even in the presence of minimal deviations. From this perspective, the choice to examine a specific company case is consistent with the aim of the paper, as it makes it possible to observe how the theoretical principles discussed in the literature are concretely translated into standards, tools, and quality management practices in an industrial context characterized by extremely high technological intensity.

The novelty of the present contribution, as already highlighted, lies in placing this reflection within the most up-to-date debate on the revision of ISO 9001, namely the future ISO 9001:2026. This revision represents the first complete update of the standard since 2015 and is intended to keep the quality management system consistent with the changes that have taken place over the last decade, including digitalization, sustainability, organizational resilience, a more advanced management of risks and opportunities, ethics, and a greater enhancement of data and intelligent technologies (International Organization for Standardization, 2026; SGS, 2025). In this sense, the paper does not merely recall the general role of quality standards in Industry 4.0, but uses the evolution of ISO 9001 as an interpretative key to understand the repositioning of the QMS in contemporary production contexts.

From the point of view of the revision process, the standard is at an advanced but not yet final stage. The Draft International Standard (DIS) was published on August 27, 2025, and was approved in December of the same year with a 97% consensus; subsequently, in February 2026, the ISO working group announced that technical consensus had been reached on the

requirements of clauses 1 to 10, postponing the finalization of the introductory elements and Annex A to the next phase (International Organization for Standardization, 2026; ISO/TC 176/SC 2, 2026). Final publication is expected in the second half of 2026; therefore, ISO 9001:2026 can currently be considered a revision that is substantially defined in its main orientations, although still undergoing editorial refinement.

The future ISO 9001:2026 may offer several advantages to organizations, since it allows quality objectives to be more closely aligned with long-term business strategy, improves customer satisfaction through more consistent product and service quality, reduces the risks of nonconformity thanks to clearer and more updated requirements, and strengthens competitiveness by adapting more effectively to evolving market expectations. Added to this is the possible strengthening of corporate reputation, encouraged by greater attention to ethics and integrity, as well as an increase in efficiency and opportunities deriving from a broader integration of digital tools and artificial intelligence into the quality management system.

In summary, the transition period envisaged is three years from the publication of the final version of the standard; this means that companies certified according to ISO 9001:2015 will have, indicatively, until 2029 to complete the transition, while during the transitional phase both certifications may coexist before the definitive withdrawal of the 2015 version. In operational terms, the transition may be structured in an initial phase of gap analysis and alignment of the QMS with the new requirements, an intermediate phase of updating audit protocols by certification bodies, and a final phase of completing transition audits. In order to prepare effectively, organizations may already begin some concrete actions, including a preliminary gap analysis, staff training and awareness-raising, the involvement of top management, the assessment of the relevance of climate change within their context, the updating of quality system documentation, the strengthening of QMS digitalization, and the definition of an action plan with clearly identified timing and responsibilities.

In terms of content, the revision does not appear to be a radical remake of ISO 9001:2015, but rather a selective update. Technical sources highlight, in particular, greater attention to the context of the organization, with the stable integration of climate change and sustainability; a strengthening of the role of leadership in promoting quality culture and ethical behavior; a clearer distinction between risks and opportunities; and a more explicit enhancement of the use of data, digitalization, and intelligent tools. Particularly significant also appears to be the expansion of Annex A, intended to offer broader and more applicable interpretative support, especially for SMEs, while the possible removal of Annex B fits within a broader logic of simplifying the informative structure of the standard. Overall, the future ISO 9001:2026 therefore seems oriented toward making the QMS less “paper-based” and more closely aligned with organizational practice, process governance, and long-term resilience.

For greater clarity, the main innovations of the future ISO 9001:2026 can be summarized in the following table.

Table 1.
Main innovations of the future ISO 9001:2026

Section / Annex	Direction of the 2026 revision	Main implications
Clause 3 - Terms and definitions	More QMS terms integrated directly into the standard	Reduced dependence on external references and greater terminological clarity.
Clause 4 - Context of the organization	Integration of climate change and greater attention to sustainability	The organizational context must take into account climate and environmental factors, as well as stakeholder expectations.
Clause 5 - Leadership	Strengthening of leadership, quality culture, ethics, and connection with strategy	Top management must demonstrate concrete commitment, not merely formal compliance.
Clause 6 - Planning	Clearer separation between risks and opportunities	More structured planning, also oriented toward innovation and resilience.
Clause 7 - Support / Awareness	Greater attention to quality culture and ethical behavior	Training and awareness must be broader and not only procedural.
Clause 8 - Operation	Limited changes, mainly terminological	Limited operational impact, but a need to update references and traceability.
Clause 9 - Performance evaluation	Framework substantially stable, with emphasis on the use of data	Monitoring, audits, and management reviews remain central, but with greater attention to trends and evidence-based decisions.
Clause 10 - Improvement	Continuous improvement made more explicit and more closely linked to leadership	It is necessary to demonstrate how leadership supports improvement cycles.
Annex A	Significant expansion as interpretative guidance	Greater practical support, especially for SMEs, and reduced interpretative ambiguity.
Annex B	Possible removal	Simplification of the informative annexes.
General structure of the standard	Alignment with the Harmonized Structure of modern management systems	Greater consistency with other ISO standards and easier integration with systems such as ISO 14001 (Environmental Management Systems – EMS) and ISO 45001 (Occupational Health and Safety Management Systems – OHSMS).

Note: Authors' own elaboration based on the DIS of ISO 9001, on the updates concerning the revision process published by ISO/TC 176/SC 2, and on the technical analysis provided by SGS (2026).

Source: ISO/TC 176/SC 2; SGS (2026).

According to this perspective, STMicroelectronics can be regarded as a particularly salient case study for at least three reasons. First of all, it is one of the most prominent worldwide companies in the semiconductor sector: in fact, in 2024, it recorded revenues of 13.27 billion dollars, has over 50,000 employees, 14 major manufacturing sites in 9 countries, and serves over 200,000 customers worldwide. Secondly, the company operates in sectors that are particularly sensitive from a quality perspective, such as the automotive, industrial, personal electronics, and communications sectors. Reliability, security, robustness, and continuity of performance are essential in these sectors. Finally, STMicroelectronics is of particular interest because of its significant presence in Europe and because of the sector in which it operates, which is of major interest for technological and manufacturing competitiveness.

From a corporate perspective, ST defines itself as a global semiconductor company and an integrated device manufacturer, active in the design, development, production, and commercialization of a broad portfolio of microelectronic devices and solutions. Its value chain includes research and development, design, front-end manufacturing, electrical wafer sorting, back-end manufacturing, and final testing, with the support, where necessary, of external foundries and Outsourced Semiconductor Assembly and Test (OSAT) operators. A configuration of this kind makes the QMS particularly central, since quality must be controlled throughout all phases of the production cycle and not only at the end of the process. Consistently

with this, ST states that its QMS constitutes the foundation of its corporate approach to quality and that quality and reliability are integrated from the product development stage onward.

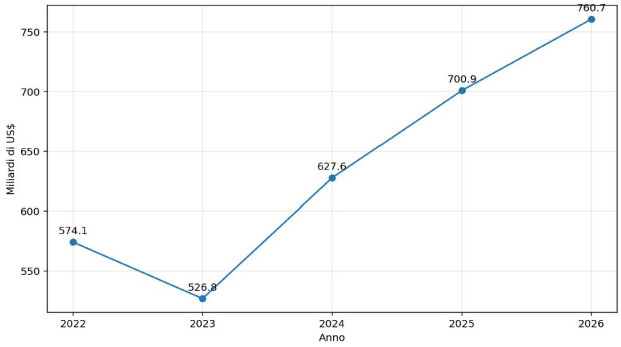
From a regulatory point of view, ST states that its quality management system is certified according to internationally recognized standards, including ISO 9001:2015 and IATF 16949:2016, and specifies that its company-wide certification has been renewed every three years since 2003, while certification according to ISO 9001:2015 and IATF 16949:2016 has been in place since 2018. This confirms the relevance of the case study, since it makes it possible to observe a company that already operates within a structured quality governance framework and that, prospectively, will be required to align itself with the future ISO 9001:2026. Although the definitive transition rules have not yet been formally established, specialist sources consider an adjustment window of about three years from the final publication of the standard to be likely; in this scenario, ST too will presumably have to plan the updating of its QMS in line with the new requirements concerning leadership, ethics, risks and opportunities, sustainability, and the greater enhancement of data.

Overall, the analysis of the future ISO 9001:2026 and the subsequent focus on STMicroelectronics confirm that the QMS, in manufacturing contexts characterized by high technological complexity, tends to be increasingly less interpretable as a mere apparatus of documentary compliance and increasingly more as an integrated infrastructure of prevention, coordination, learning, and innovation. In this sense, the transition from ISO 9001:2015 to the future ISO 9001:2026 does not represent only a regulatory update, but also an indicator of the broader repositioning of quality in the era of Industry 4.0 and Quality 4.0, with particularly relevant implications for the semiconductor industry.

4. **Discussion**

The discussion of the results confirms that, within the framework of Industry 4.0, the Quality Management System tends to evolve from a system mainly oriented toward documentary compliance and final inspection into a more integrated, preventive, and data-driven platform, in which continuous monitoring, risk management, traceability, and data-based decisions assume a central role. From this perspective, the future ISO 9001:2026 appears consistent with this evolution, since it strengthens the importance of the organizational context, leadership, quality culture, the distinction between risks and opportunities, and the use of information to support improvement and resilience. The fact that the DIS was published in August 2025 and that technical consensus on the main clauses was reached in 2026 confirms that the update of the standard already constitutes a relevant reference for interpreting the repositioning of the QMS in production contexts characterized by high technological complexity.

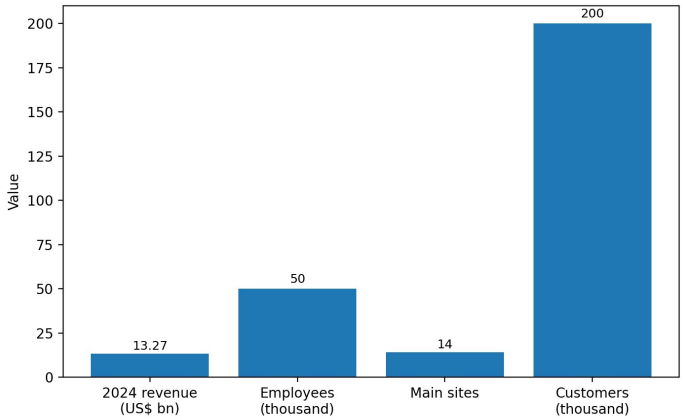
This evolution takes on particularly evident significance in the semiconductor industry. As shown in Graph 1, the global market of the sector reached 574.1 billion dollars in 2022, fell to 526.8 billion in 2023, and then rose again to 627.6 billion in 2024; the most recent forecasts also indicate growth to 700.9 billion in 2025 and to 760.7 billion in 2026. The five-year series highlights, on the one hand, the cyclical volatility of the sector and, on the other, a clear medium-term growth trajectory. Within this framework, quality can no longer be understood as a simple compliance requirement, but rather as a lever to ensure process robustness, production continuity, and the capacity to respond to an industrial environment that is increasingly competitive and unstable.



Graph 1. Trend of the global semiconductor market, 2022–2026 (billions of US$).

Source: authors' own elaboration based on Semiconductor Industry Association and World Semiconductor Trade Statistics.

Within this scenario, the ST case makes it possible to verify in concrete terms how the QMS operates in a company that is representative of the sector. As highlighted in Graph 2, in 2024 ST recorded revenues of 13.27 billion dollars, employs more than 50,000 people, has 14 main manufacturing sites in 9 countries, and serves more than 200,000 customers worldwide. These data reflect the company's global scale and organizational complexity, thus justifying its selection as a case study. ST in fact represents a large integrated semiconductor company operating in markets such as automotive, industrial, personal electronics, and communications equipment, in which reliability, safety, and continuity of performance are essential elements.



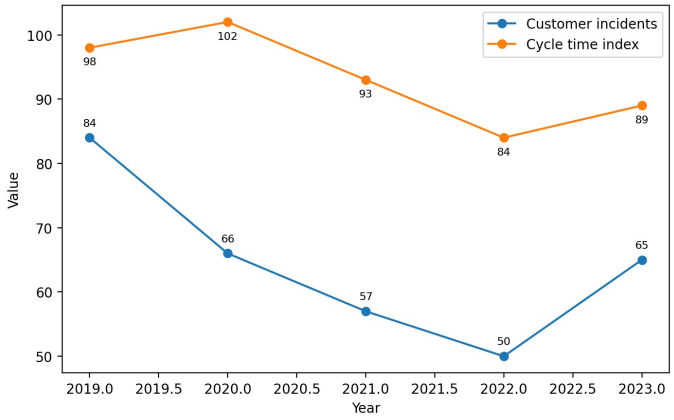
Graph 2. STMicroelectronics: main structural indicators of the case study.

Source: authors' own elaboration based on STMicroelectronics (2024–2025).

On a more strictly qualitative level, the indicators published by ST show that the QMS produces measurable effects. As shown in Graph 3, customer incidents decreased from 84 in 2019 to 50 in 2022, before rising again to 65 in 2023 due to exceptional circumstances associated with a specific product. At the same time, the cycle time to process customer incidents moved from an index value of 98 in 2019 to 84 in 2022, before settling at 89 in 2023, while remaining below the historical baseline (base index 100 = 2016). To these data must be added the fact that 84% of users declared themselves satisfied with online support.

Overall, these indicators show that the company's quality system contributes both to the containment of critical issues and to the speed of management, while still remaining exposed to the sensitivity typical of a sector characterized by high technological complexity. However, the STMicroelectronics case could be further developed through a more analytical interpretation of the available indicators, so as to show more precisely how the QMS contributes not only to performance measurement, but also to the organization's ability to learn, adapt, and govern complexity.

Taken together, the quantitative data reinforce the paper's argument. The growth of the global semiconductor market highlights the systemic pressure within which companies in the sector operate; ST's scale and structure confirm its relevance as a case study; and the company's quality indicators demonstrate that QMS performance can be observed and measured through concrete parameters.



Graph 3. STMicroelectronics: trend in customer incidents and cycle time to process customer incidents, 2019–2023

Source: authors' own elaboration based on STMicroelectronics (2024).

Taken as a whole, the quantitative data strengthen the argument of the paper. The growth of the global semiconductor market highlights the systemic pressure within which companies in the sector operate; the size and structure of ST confirm the relevance of the selected case; and the company's quality indicators demonstrate that the performance of the QMS can be observed and measured through concrete parameters.

Within this framework, the transition from ISO 9001:2015 to the future ISO 9001:2026 does not appear as a simple formal update, but rather as the expression of a broader change: the shift from a conception of quality understood mainly as compliance to a conception of quality understood as an organizational capability for prevention, coordination, reliability, adaptation, and innovation. The STMicroelectronics case therefore suggests that, in the semiconductor industry, the QMS tends to be configured increasingly as a strategic infrastructure for governing complexity, in full coherence with the logic of Quality 4.0.

5. Conclusion

The present contribution has analyzed the evolution of the Quality Management System within the framework of Industry 4.0, with the aim of identifying the standards and tools that are most relevant for supporting industrial innovation, with a specific focus on the semiconductor industry.

The analysis shows that the QMS is now evolving from a system mainly oriented toward documentary compliance and final inspection into a more integrated, preventive, and data-driven infrastructure, in which continuous monitoring, risk management, traceability, and organizational learning play a central role. From this perspective, quality no longer coincides

solely with conformity verification, but becomes a strategic lever for reliability, resilience, adaptation, and innovation.

The paper has also highlighted how this evolution finds a point of particular interest in the revision of ISO 9001 scheduled for 2026. Although it does not amount to a radical rewriting of the 2015 version, the future ISO 9001:2026 appears to be oriented toward strengthening themes that are now central to the debate on Quality 4.0, such as sustainability, leadership, quality culture, the management of risks and opportunities, the use of data, and continuous improvement. In this sense, the revision of the standard can be interpreted as an expression of the broader repositioning of the QMS within a production paradigm that is increasingly digital, interconnected, and data-driven. The focus on the semiconductor industry has made it possible to observe this transformation in a particularly significant context, in which quality concerns not only the final product, but also process stability, production repeatability, traceability, and the prevention of minimal defects with relevant effects on overall reliability.

An in-depth analysis of the STMicroelectronics case seems to confirm this assumption, as the large multinational corporation in the sector is able to translate the Quality Management System (QMS) into an effective system of governance, monitoring, and control, also through the support of quantitative performance measures. The above pattern seems to confirm that, in sectors where technological complexity is high, the QMS is increasingly acting as a strategic infrastructure. Notwithstanding the above, the contribution also seems to present some limitations. First, the study is based on a narrative review with an interpretative approach, which is less replicable than the systematic review approach. Second, the analysis of the ISO 9001:2026 standard is based on the revision documents available before the publication of the standard. Third, the approach is not generalizable to the entire semiconductor sector, as the single-case study is relevant but not representative. In light of the above limitations, the contribution suggests that future research can follow three main paths: the comparative analysis of multiple companies in the semiconductor sector; the analysis of the impact of the adoption of the ISO 9001:2026 standard; the analysis of the relationship between the QMS and some technologies related to the Industry 4.0 revolution, such as artificial intelligence, the Internet of Things, analytics, and prediction systems.

Further developments could also concern the link between quality, sustainability, and supply chain resilience, a topic that is destined to assume increasing importance in contemporary production systems. Overall, the paper shows that the QMS, in the era of Industry 4.0, can no longer be interpreted as a simple compliance apparatus, but rather as a strategic organizational capability, able to integrate control, reliability, adaptation, and innovation. It is precisely in this sense that the future ISO 9001:2026 and the case of the semiconductor industry highlight with particular clarity the increasingly central role of quality in long-term industrial competitiveness.

Bibliography

1. Aichouni, A. B. E., Silva, C., & Ferreira, L. M. D. (2024). A systematic literature review of the integration of total quality management and industry 4.0: Enhancing sustainability performance through dynamic capabilities. *Sustainability*, *16*(20), 9108. https://doi.org/10.3390/su16209108
2. Almeida, S., & Abreu, L. P. (2023, June). The Quality Manager in the Industry 4.0 Era. In *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing* (pp. 468-474). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38165-2_55
3. Automotive Electronics Council. (2023). *AEC-Q100: Failure mechanism based stress test qualification for integrated circuits in automotive applications* (Rev. J). https://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q100_Rev_J_Base_Document.pdf
   Baran, E., & Korkusuz Polat, T. (2022). Classification of Industry 4.0 for total quality management: A review. *Sustainability*, *14*(6), 3329. https://doi.org/10.3390/su14063329
4. Canbay, K., & Akman, G. (2023). Investigating changes of total quality management principles in the context of Industry 4.0: Viewpoint from an emerging economy. *Technological Forecasting and Social Change*, *189*, 122358. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122358
5. Chiarini, A. (2020). Industry 4.0, quality management and TQM world. A systematic literature review and a proposed agenda for further research. *The TQM Journal*, *32*(4), 603-616. https://doi.org/10.1108/TQM-04-2020-0082
6. Chiarini, A., & Cherrafi, A. (2023). Integrating ISO 9001 and Industry 4.0. An implementation guideline and PDCA model for manufacturing sector. *Total quality management & business excellence*, *34*(13-14), 1629-1654. https://doi.org/10.1080/14783363.2023.2192916
7. European Commission. (2023). *European Chips Act*. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act
8. Hafid, A., Sebtaoui, F. E., & Mouchtachi, A. (2025). Evaluating the impact of industry 4.0 technologies on quality management systems: applications, challenges, and future directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *139*(7), 3637-3655. https://doi.org/10.1007/s00170-025-16122-5
9. Hamrol, A., & Grabowska, M. (2026). Quality in the Era of Industry 4.0—Quality Management Principles in the Context of the Fourth Industrial Revolution. *Applied Sciences*, *16*(4), 1919. https://doi.org/10.3390/app16041919
10. International Automotive Task Force. (2016). *IATF 16949:2016*. https://www.iatfglobaloversight.org/iatf-169492016/

11. International Organization for Standardization. (2024). ISO 9001:2015/Amd 1:2024: Quality management systems—Requirements—Amendment 1: Climate action changes. https://www.iso.org/standard/88431.html
12. International Organization for Standardization. (2026). *ISO/DIS 9001: Quality management systems—Requirements* (Draft International Standard, under development). https://www.iso.org/standard/88464.html
13. ISO/TC 176/SC 2. (2026, February 12). *ISO 9001 revision update*. ISO Committee Drafts. https://committee.iso.org/sites/tc176sc2/home/news/content-left-area/news-and-updates/iso-9001-revision-update-3.html
14. JEDEC Solid State Technology Association. (2025). *JESD47M: Stress-test-driven qualification of integrated circuits*. https://www.jedec.org Liu, H.-C., Liu, R., Gu, X., & Yang, M. (2023). From total quality management to Quality 4.0: A systematic literature review and future research agenda. *Frontiers of Engineering Management, 10*(2), 191–205. https://doi.org/10.1007/s42524-022-0243-z
15. Mahin, M., Kadasah, N., Alsabban, A., & Albliwi, S. (2024). Exploring the landscape of quality 4.0: a comprehensive review of its benefits, challenges, and critical success factors. *Production & Manufacturing Research*, *12*(1), 2373739. https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2373739
16. Nenadál, J. (2020). The new EFQM model: What is really new and could be considered as a suitable tool with respect to quality 4.0 concept?. *Quality Innovation Prosperity*, *24*(1), 17-28. https://doi.org/10.12776/qip.v24i1.1415
17. Sader, S., Husti, I., & Daroczi, M. (2019). Quality management practices in the era of industry 4.0. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Research Reviews of Czestochowa University of Technology*, *35*(1), 117-126. https://doi.org/10.17512/znpcz.2019.3.10.
18. Saihi, A., Awad, M., & Ben-Daya, M. (2023). Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices–a systematic review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *40*(2), 628-650. https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2021-0305
19. Semiconductor Industry Association. (2025, February 7). *Global semiconductor sales increase 19.1% in 2024; double-digit growth projected in 2025*. https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-19-1-in-2024-double-digit-growth-projected-in-2025/
20. SGS. (2025, November 14). *ISO 9001:2026 – Key updates and transition guidance*. https://www.sgs.com/en-th/news/2025/11/iso-9001-2026-key-updates-and-transition-guidance
21. Silva, C. S., Borges, A. F., & Magano, J. (2022). Quality Control 4.0: a way to improve the quality performance and engage shop floor operators. *International Journal of*

Quality & Reliability Management, *39*(6), 1471-1487. https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2021-0138

22. STMicroelectronics. (2024). *2024 sustainability report.* https://www.st.com/content/dam/aboutus/sustainability/pdf/st-sustainability-report-2024-en.pdf
23. STMicroelectronics. (2024). *Quality handbook*. https://www.st.com/resource/en/qualification_report/ST-Quality-Handbook-V1-1.pdf
24. STMicroelectronics. (2025). *2024 annual report (Form 20-F)*. https://investors.st.com/static-files/27a03295-79bf-4f45-958f-9c68062aa3c1
25. STMicroelectronics. (2025). *2024 annual report (Form 20-F).* https://investors.st.com/financials/annual-and-semi-annual-reports
26. World Semiconductor Trade Statistics. (2025, June 3). *Global semiconductor market continues strong growth; 2026 forecast reaches $760.7 billion*. https://www.wsts.org/esraCMS/extension/media/f/WST/7057/WSTS_FC-Release-2025_05.pdf
27. Zaidin, N. H. M., Diah, M. N. M., & Sorooshian, S. (2018). Quality management in industry 4.0 era. *Journal of Management and Science*, *8*(2), 82-91. https://doi.org/10.26524/jms.2018.17
28. Zonnenshain, A., & Kenett, R. S. (2020). Quality 4.0—the challenging future of quality engineering. *Quality engineering*, *32*(4), 614-626. https://doi.org/10.1080/08982112.2019.1706744

BEZPIECZEŃSTWO W TRANSPORCIE DROGOWYM (SAFETY IN ROAD TRANSPORT)

Adrian FABIAŃSKI[1], Elżbieta TENGLER[1*], Kacper KOŚCIUK[2], Maciej KAPUŚCIŃSKI[3], Karolina ŁĄTKA[4], Bożena SZCZUCKA-LASOTA[5]

[1]Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8, af311316@student.polsl.pl; ORCID: brak

Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8, kk311343@student.polsl.pl; ORCID: brak

Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8, mk303512@student.polsl.pl; ORCID: brak

Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8, karolina.latka7@gmail.com; ORCID: brak

Korespondencja*: Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8, bozena.szczucka-lasota@polsl.pl, ORCID: 0000-0003-3312-1864

Streszczenie: Transport drogowy odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu gospodarki oraz codziennym przemieszczaniu osób i towarów, dlatego zagadnienia związane z bezpieczeństwem ruchu drogowego stanowią jeden z najważniejszych obszarów współczesnego transportu. W artykule przedstawiono istotę bezpieczeństwa w transporcie drogowym, omówiono podstawowe pojęcia związane z bezpieczeństwem ruchu drogowego oraz scharakteryzowano zagrożenia występujące w systemie transportowym. Szczególną uwagę poświęcono zarządzaniu ryzykiem jako procesowi identyfikacji, analizy oraz ograniczania zagrożeń mogących wpływać na bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego. Omówiono metody zarządzania ryzykiem, w tym działania prewencyjne, reaktywne i adaptacyjne, a także wskazano znaczenie nowoczesnych technologii i właściwej organizacji systemu transportowego. W pracy przedstawiono również problematykę przewozu materiałów niebezpiecznych zgodnie z umową ADR, obejmującą klasyfikację towarów niebezpiecznych, zasady ich transportu oraz zagrożenia wynikające z niewłaściwego przewozu. Podkreślono, że bezpieczeństwo transportu drogowego zależy od wielu czynników, takich jak stan infrastruktury drogowej, sprawność techniczna pojazdów, przestrzeganie przepisów oraz odpowiedzialność uczestników ruchu drogowego. Wskazano również, że skuteczne zarządzanie bezpieczeństwem i ryzykiem pozwala ograniczyć liczbę wypadków oraz minimalizować ich skutki dla ludzi, środowiska i gospodarki.

Słowa kluczowe: Transport drogowy, Bezpieczeństwo, ADR, Zarządzanie ryzykiem

Abstract: Road transport plays a key role in the functioning of the economy and the daily movement of people and goods, which is why issues related to road safety are one of the most important areas of modern transport. This article presents the essence of road transport safety, discusses basic concepts related to road safety, and characterizes threats occurring in the transport system. Particular attention is paid to risk management as the process of identifying, analyzing, and mitigating threats that may affect the safety of road users. Risk management methods are discussed, including preventive, reactive, and adaptive measures, and the importance of modern technologies and proper organization of the transport system. The paper also discusses the transport of hazardous materials in accordance with the ADR agreement, covering the classification of dangerous goods, the principles of their transport, and the risks resulting from improper transport. It emphasizes that road transport safety depends on many factors, such as the condition of road infrastructure, the technical condition of vehicles, compliance with regulations, and the responsibility of road users. It also demonstrates that effective safety and risk management can reduce the number of accidents and minimize their impact on people, the environment, and the economy.

Keywords: Road transport, Safety, ADR, Risk management

1. Wprowadzenie.

Transport drogowy jest obecnie jednym z najważniejszych elementów systemu transportowego zarówno w Polsce, jak i na świecie. Jego rozwój związany jest z rosnącym zapotrzebowaniem na szybki przewóz osób oraz towarów, co wpływa bezpośrednio na funkcjonowanie gospodarki, handlu i logistyki. Powszechność wykorzystania transportu drogowego sprawia jednak, że niezwykle istotnym zagadnieniem staje się zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Bezpieczeństwo w transporcie drogowym obejmuje szeroki zakres działań związanych

z organizacją ruchu, stanem infrastruktury drogowej, sprawnością techniczną pojazdów, przestrzeganiem przepisów prawa oraz odpowiedzialnym zachowaniem uczestników ruchu drogowego. Pomimo postępu technologicznego oraz rozwoju systemów wspomagających kierowców nadal dochodzi do licznych kolizji, wypadków oraz katastrof drogowych, które powodują straty materialne, zagrożenie zdrowia i życia ludzi, a także negatywnie wpływają na środowisko naturalne.

Szczególnego znaczenia nabiera również problem przewozu materiałów niebezpiecznych, których transport wymaga stosowania odpowiednich procedur bezpieczeństwa oraz przestrzegania międzynarodowych regulacji ADR. Nieprawidłowy przewóz tego rodzaju ładunków może prowadzić do bardzo poważnych konsekwencji, takich jak pożary, wybuchy, skażenia środowiska czy zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi.

Współczesny system transportowy wymaga zatem skutecznego zarządzania ryzykiem, które pozwala identyfikować potencjalne zagrożenia oraz minimalizować

prawdopodobieństwo występowania niebezpiecznych zdarzeń. Wdrażanie odpowiednich metod prewencyjnych, reaktywnych i adaptacyjnych umożliwia poprawę poziomu bezpieczeństwa oraz zwiększenie efektywności funkcjonowania transportu drogowego.

Celem artykułu jest przedstawienie podstawowych zagadnień związanych

z bezpieczeństwem w transporcie drogowym, omówienie procesu zarządzania ryzykiem oraz charakterystyka przewozu materiałów niebezpiecznych zgodnie z przepisami ADR.

2. Bezpieczeństwo w ruchu drogowym.

Bezpieczeństwo ruchu drogowego (BRD) jest powszechnie używaną nazwą, określającą zbiór zasad dotyczących bezpiecznego poruszania się po drogach. Określa ona również osobną dziedzinę wiedzy, zajmującą się kształtowaniem właściwych warunków ruchu drogowego.

Na bezpieczeństwo ruchu drogowego składają się zagadnienia z zakresu nadzoru nad ruchem drogowym, organizacji ruchu drogowego, szkolenia i egzaminowania kierowców, psychologii transportu, ratownictwa medycznego, stanu technicznego oraz wymagań wobec pojazdów, dróg i oznakowania, a także promowania pożądanych zachowań u uczestników ruchu drogowego (Wikipedia, b.d.).

BRD w Polsce:

Pomimo złego stanu bezpieczeństwa na drogach nie powstały w Polsce rządowe agencje wyspecjalizowane w ocenie stanu BRD odpowiadające za koordynację działań prawno-organizacyjnych i badawczych zmierzających do poprawy sytuacji. Za monitorowanie stanu BRD i kształtowanie polityki w tym zakresie odpowiadają kolegialne ciała społeczne:

- na szczeblu rządowym – Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, międzyresortowy organ doradczy i pomocniczy Rady Ministrów w sprawach bezpieczeństwa ruchu drogowego.

We wszystkich województwach działają regionalne odpowiedniki KR BRD – Wojewódzkie
Rady BRD. W ich skład wchodzą m. in. Marszałek, wojewoda, komendant wojewódzki policji.

System finansowania jest niewydolny na poziomie nieadekwatnym do strat generowanych przez wypadki. Nie ma wyspecjalizowanych instytucji państwa, dla których BRD jest pierwszoplanowym przedmiotem działalności. Kadencyjność rad powiązanych ze stanowiskami w administracji rządowej i samorządowej utrudnia realizację działań długofalowych i powoduje, że o kształcie wielu inicjatyw decydują osoby bez należytego przygotowania zawodowego, doświadczenia i specjalistycznej wiedzy (Wikipedia, b.d.).

Pojęcie bezpieczeństwa w ruchu drogowym:

Fakt, iż niemal 9 na 10 dóbr transportowych w Polsce przemieszczane jest

z wykorzystaniem transportu drogowego, skłania do zastanowienia się nad aspektem bezpieczeństwa w tym systemie. Jednak, aby możliwa była analiza bezpieczeństwa

w drogowym systemie transportowym, należy to pojęcie zdefiniować (Orłowski, 2020).

Transport drogowy stanowi proces przemieszczania ładunków i osób w przestrzeni przy wykorzystaniu infrastruktury drogowej i środków transportu samochodowego w celu zaspokajania potrzeb człowieka. Jest on realizowany w ramach systemów transportowych. Jednakże każdy system techniczny narażony jest na awarie, a zatem system transportowy nie jest od nich wolny, tzn. nie jest obiektem niezawodnym. Awarie systemu transportowego są tożsame z zaistnieniem jednego z następujących zdarzeń niebezpiecznych: kolizja drogowa, Wypadek drogowy, katastrofa drogowa. Pojęcia wyjaśnione zostały poniżej:

- Zdarzenie niebezpieczne – jest zdarzeniem niepożądanym, stanowiącym zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu drogowego i powodującym straty, które mogą być zarówno materialne, jak i wśród uczestników ruchu drogowego.
- Kolizja drogowa – jest zdarzeniem niebezpiecznym, powodującym wyłącznie straty materialne.
- Wypadek drogowy – to zdarzenie, którego skutkiem są straty wśród jego uczestników (zarówno uszczerbek na zdrowiu, jak i śmierć).
- Katastrofa drogowa – jest to wypadek drogowy z dużą ilością ofiar śmiertelnych (Pułkownik, 2018).

A zatem bezpieczeństwo w ruchu drogowym można rozumieć jako spełnienie przyjętych standardów oraz praktykę zarządzania ryzykiem na drogach przez systemy transportowe.

Stwierdzić można, że w ruchu drogowym nie występuje sytuacja braku zagrożeń – nie można ich całkowicie wyeliminować. Stopień oddziaływania zagrożeń na bezpieczeństwo w ruchu drogowym jest subiektywnie oceniany i kompensowany przez kierowców. Może to stanowić bodziec do zachowania wzmożonej ostrożności (Pułkownik, 2018).

3. Zarządzanie ryzykiem.

System bezpieczeństwa transportu (w tym drogowego) to rodzaj systemu, który definiowany jest przez trzy składowe: cel elementy oraz strukturę systemu.

System bezpieczeństwa transportu drogowego, którego składowe przedstawiono w tabeli 1, jest częścią całego systemu transportu i stanowi układ złożony z elementów materialnych,

i niematerialnych współdziałających w danym otoczeniu oraz warunkach środowiskowych

w celu realizacji funkcji szeroko pojętego bezpieczeństwa. Zagrożenia w systemie transportu drogowego to potencjalne źródło zdarzeń niebezpiecznych. W tym przypadku zdarzeniem takim można nazwać kolizję drogową skutkującą stratami materialnymi, środowiskowymi lub też stratami w osobach (Piekarski, Dudziak, Rudzińska, 2014).

System zarządzania bezpieczeństwem transportu drogowego jest częścią systemu zarządzania organizacji (transportowej instytucji centralnej lub regionalnej, zarządu drogowego, przewoźnika), który obejmuje (Piekarski, Dudziak, Rudzińska, 2014):

- struktury organizacji i odpowiedzialność kierownictwa,
- zasady postępowania (w tym obowiązujące metody oraz procedury),
- narzędzia i niezbędne zasoby potrzebne do opracowania, wdrażania, realizowania, monitorowania i utrzymywania zadeklarowanej przez organizację polityki bezpieczeństwa i jej celów.

Tabela 1. System bezpieczeństwa transportu, opracowanie na podstawie (Piekarski, Dudziak, Rudzińska, 2014; Stan-Trans, b.d.)

Cel systemu	Obejmuje racjonalizację ryzyka w obszarach funkcjonowania transportu tak, aby dla zagrożeń w nich rozpoznawanych zapewniać co najmniej tolerowany poziom ryzyka;
elementy systemu	Elementami są: człowiek (operator, uczestnik ruchu itp.), elementy materialne (elementy środków transportu, elementy infrastruktury, elementy środowiska naturalnego, systemy ratownictwa itp.) i elementy niematerialne (prawo, normy, wytyczne, metody, strategie, procedury itp.);
struktura systemu	To zbiór relacji między elementami systemu dla osiągania jego celu.

Czynniki zagrożenia wynikające z nieprawidłowego funkcjonowania poszczególnych elementów systemu transportu drogowego ujawniają się w procesie ruchu drogowego w wyniku nieprawidłowych zachowań uczestników ruchu, awarii technicznych, złych warunków meteorologicznych i przyrodniczych lub też w wyniku innych zdarzeń np. losowych (Piekarski, Dudziak, Rudzińska, 2014).

Metody zarządzania ryzykiem i bezpieczeństwem.

Zarządzanie ryzykiem to systematyczny proces identyfikacji, analizy i reagowania na potencjalne zagrożenia, które mogą wpłynąć na realizacje celu. W transporcie oznacza to przewidywanie i ograniczanie ryzyka związanego z opóźnieniami, bezpieczeństwem towarów i innych uczestników ruchu drogowego oraz zgodnością z regulacjami prawnymi. W wielkim skrócie, można stwierdzić, że głównym celem zarządzania ryzykiem jest nie tylko zapobieganie potencjalnym problemom, ale także szybka reakcja na sytuacje, których nie udało się wcześniej przewidzieć, a które mogą skomplikować proces przewozu towarów (Stan-Trans, b.d.).

Zarządzanie ryzykiem polega przede wszystkim na sformalizowanej analizie i ocenie ryzyka w celu wybrania efektywnych działań umożliwiających jego zmniejszenie (Piekarski, Dudziak, Rudzińska, 2014).

W transporcie możemy podzielić zarządzanie ryzykiem na trzy grupy wykorzystywanych metod:

- metody prewencyjne – skupiają się przede wszystkim na identyfikowaniu zagrożeń jeszcze przed rozpoczęciem transportu i są to np. analizy tras, ocena stanu technicznego pojazdów czy weryfikacja dokumentacji;

- metody reaktywne – pojawiają się już w momencie wystąpienia sytuacji kryzysowej, do przykładów zaliczamy m. in. szybkie przekierowanie transportu w przypadku np. zamknięcia drogi lub problemów na granicy;
- metody adaptacyjne – te koncentrują się na działaniu długofalowym, może być to np. wprowadzenie nowych technologii czy nowych partnerów logistycznych, co usprawnia pewien obszar w łańcuchach dostaw (Stan-Trans, b.d.).

Na szczególną uwagę przy tworzeniu zintegrowanej metody zarządzania ryzykiem w transporcie drogowym zasługują elementy wspólne, podobne lub wybrane aspekty przekrojowe stykające się z różnymi rodzajami transportu:

- transportu materiałów niebezpiecznych,
- łańcuchów przewozowych (pasażerskich i towarowych),
- transportu intermodalnego,
- ważnych obiektów z otoczenia infrastruktury drogowej (tunele, mosty, węzły integracyjne, przejazdy kolejowe),
- floty pojazdów,
- operatorów (Piekarski, Dudziak, Rudzińska, 2014).

Zasady zarządzania ryzykiem

W zarządzaniu ryzykiem warto wspierać się kilkoma zasadami, dzięki którym redukcja wpływu rozmaitych zdarzeń na płynność działań jest dużo bardziej efektywna. Należą do nich m. in.:

- Systematyczność – regularne monitorowanie procesów transportowych i identyfikacja nowych zagrożeń,
- Elastyczność – umiejętność szybkiego dostosowania działań do zmieniających się warunków,
- Komunikacja – współpraca między działami firmy oraz zewnętrznymi partnerami np. spedytorami czy dostawcami.
- Wdrażanie technologii – korzystanie z systemów GPS, narzędzi do monitorowania transportu czy analizy danych (Stan-Trans, b.d.).

4. ADR – przewóz towarów niebezpiecznych.

ADR (fr. L’ Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route) – jest międzynarodową konwencją dotyczącą drogowego przewozu towarów i ładunków niebezpiecznych. Została sporządzona w Genewie dnia 30 września 1957 r. Ratyfikowana przez Państwo Polskie w 1975 r. Przepisy umowy ADR są nowelizowane zawsze w cyklu dwuletnim, a umowa obowiązuje obecnie w 44 krajach . ADR składa się

z umowy właściwej oraz z załączników A i B, będących jej integralną częścią. Umowa właściwa określa stosunki prawne między uczestniczącymi państwami, natomiast załączniki zawierają przepisy regulujące w szerokim zakresie warunki przewozu poszczególnych materiałów niebezpiecznych w międzynarodowym transporcie samochodowym

(Wołczański i Rut, 2014).

Definicja i przykłady materiałów niebezpiecznych.

Materiały lub towary niebezpieczne to produkty oraz przedmioty, których przewóz jest albo zabroniony, albo dopuszczalny jedynie na warunkach określonych prawem.

Materiałami niebezpiecznymi niedopuszczonymi do przewozu są towary stwarzające bardzo duże zagrożenie podczas transportu np. UN 2186 CHLOROWODÓR, SKROPLONY,

SCHŁODZONY; UN 2455 AZOTYN METYLU; UN 1798 WODA KRÓLEWSKA

(mieszanina stężonych kwasów azotowego i solnego). Materiałami niebezpiecznymi dopuszczonymi do przewozu zgodnie z ADR są np. UN 0334 OGNIE SZTUCZNE; UN 1090 ACETON; UN 1263 FARBY; UN 3090 AKUMULATORY LITOWE.

Niektóre towary niebezpieczne są zwolnione z ADR np. Alkohol etylowy w roztworze wodnym powyżej 24% jest materiałem niebezpiecznym, UN 1170 ETANOL W ROZTWORZE, ale już roztwory wodne alkoholu etylowego zawierające nie więcej niż 24% objętościowych alkoholu nie podlegają przepisom ADR.

Materiałami niebezpiecznymi w aspekcie ADR mogą być więc substancje, preparaty o właściwościach palnych, wybuchowych, żrących, trujących, utleniających, samozapalnych, promieniotwórczych czy zagrażających środowisku. Mogą to być ściśle zdefiniowane grupy towarów np. farby, ognie sztuczne, granaty, akumulatory. Materiałami niebezpiecznymi mogą być grupy towarów o podobnych uściślonych właściwościach np.: UN 1987 ALKOHOLE

I.N.O. (alkohole inaczej nie określone), lub grupy towarów o podobnych właściwościach ogólnych np.: UN 1992 MATERIAŁ ZAPALNY, CIEKŁY, TRUJĄCY. Materiałom

o poszczególnych numerach UN (numer ten określa konkretny towar/produkt), przypisuje się tzw. grupy pakowania. Grupa pakowania określa natężenie zagrożenia, tak więc:

- grupa pakowania I – towar, który stwarza duże zagrożenie,
- grupa pakowania II – towar, który stwarza średnie zagrożenie,
- grupa pakowania III – towar, który stwarza małe zagrożenie.

Przepisy regulujące przewóz materiałów niebezpiecznych mają za zadanie w maksymalny sposób zminimalizować lub znacznie ograniczyć prawdopodobieństwo zaistnienia wypadków oraz zminimalizować rozmiar szkód jakie mogą powstać w trakcie ich transportu (Wołczański i Rut, 2014).

Podział klasowy materiałów niebezpiecznych (ADR).

Wyżej wspomniany załącznik A obejmuje podział wszystkich produkowanych na całym świecie materiałów niebezpiecznych na 9 klas zagrożeń wraz z podklasami oraz zawiera szczegółową klasyfikację tych materiałów w poszczególnych klasach (Wołczański i Rut, 2014):

- **Klasa 1** – Materiały i przedmioty wybuchowe;

- **Klasa 2** – Gazy;
- **Klasa 3 –** Materiały ciekłe zapalne;
- **Klasa 4**:
  - **4.1** – Materiały stałe zapalne;
  - **4.2 –** Materiały samozapalne;
  - **4.3** – Materiały wytwarzające w zetknięciu z wodą gazy zapalne;
- **Klasa 5:**
  - **5.1 –** Materiały utleniające;
  - **5.2 –** Nadtlenki organiczne;
- **Klasa 6:**
  - **6.1 –** Materiały trujące;
  - **6.2** – Materiały zakaźne;
- **Klasa 7 –** Materiały promieniotwórcze;
- **Klasa 8 –** Materiały żrące;
- **Klasa 9** – Różne materiały i przedmioty niebezpieczne.

Zagrożenia związane z przewozem materiałów niebezpiecznych.

Każda osoba uczestnicząca w łańcuchu transportowym powinna podejmować środki bezpieczeństwa odpowiednie do dających się przewidzieć zagrożeń zarówno dla życia i zdrowia ludzi jak i środowiska naturalnego. Przepisy Umowy ADR określają obowiązki uczestników przewozu w zakresie bezpieczeństwa. W przypadku stwierdzenia naruszenia wymagań przepisów ADR zagrażających bezpieczeństwu przewozu, należy przerwać ten przewóz przy zachowaniu wymagań dotyczących bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Zagrożenia związane z przewozem transportu materiałów niebezpiecznych mogą wynikać między innymi z wad technicznych pojazdów, niezachowania zasad bezpieczeństwa ruchu drogowego, niewłaściwej eksploatacji środków transportu oraz złego stanu dróg, które powodują rocznie około 100 wypadków, w których uczestniczą pojazdy przewożące towary niebezpieczne. W 20–30 przypadkach dochodzi do uwolnienia się do środowiska substancji niebezpiecznych. W ponad 80% zdarzenia te dotyczą przewozu paliw płynnych. Zdarzenia drogowe powstające podczas transportu towarów niebezpiecznych są szczególnie groźne dla otoczenia. Związane z nimi zagrożenia pożarowe, wybuchowe, toksyczne czy promieniotwórcze mogą bezpośrednio zagrozić życiu lub zdrowiu wielu osób, mogą wymagać natychmiastowej ewakuacji ludzi i zwierząt, spowodować skażenie i degradację środowiska naturalnego oraz poważne straty materialne (Wołczański i Rut, 2014).

5. Podsumowanie i wnioski

Bezpieczeństwo w transporcie drogowym stanowi jeden z kluczowych elementów prawidłowego funkcjonowania współczesnego systemu transportowego. Wzrost liczby pojazdów oraz intensywności ruchu drogowego powoduje zwiększenie ryzyka występowania kolizji, wypadków oraz innych zdarzeń niebezpiecznych, które mogą prowadzić do poważnych konsekwencji społecznych, ekonomicznych i środowiskowych.

Przeprowadzona analiza wykazała, że bezpieczeństwo ruchu drogowego zależy od wielu wzajemnie powiązanych czynników. Istotną rolę odgrywają przede wszystkim: stan techniczny pojazdów, jakość infrastruktury drogowej, warunki atmosferyczne, organizacja ruchu oraz zachowania uczestników ruchu drogowego. Szczególne znaczenie ma również odpowiedni system zarządzania bezpieczeństwem i ryzykiem, którego zadaniem jest identyfikacja zagrożeń oraz wdrażanie działań ograniczających możliwość wystąpienia niebezpiecznych zdarzeń.

W artykule zwrócono uwagę na znaczenie metod zarządzania ryzykiem, takich jak działania prewencyjne, reaktywne i adaptacyjne. Ich właściwe stosowanie pozwala nie tylko zmniejszać prawdopodobieństwo występowania zagrożeń, ale również skutecznie reagować na sytuacje kryzysowe oraz doskonalić funkcjonowanie systemu transportowego. Ważnym elementem poprawy bezpieczeństwa jest również rozwój nowoczesnych technologii wspomagających monitorowanie transportu, analizę danych oraz kontrolę przebiegu przewozów.

Szczególnie wymagającym obszarem transportu drogowego jest przewóz materiałów niebezpiecznych zgodnie z konwencją ADR. Transport tego rodzaju ładunków wiąże się

z podwyższonym ryzykiem wystąpienia zagrożeń dla zdrowia ludzi, środowiska naturalnego oraz infrastruktury. Dlatego konieczne jest ścisłe przestrzeganie przepisów dotyczących klasyfikacji, oznakowania, pakowania i przewozu materiałów niebezpiecznych, a także odpowiednie przygotowanie kierowców i przewoźników.

Podsumowując, poprawa bezpieczeństwa w transporcie drogowym wymaga kompleksowego podejścia obejmującego rozwój infrastruktury, skuteczne zarządzanie ryzykiem, edukację uczestników ruchu drogowego oraz stosowanie nowoczesnych technologii i regulacji prawnych. Tylko współdziałanie wszystkich elementów systemu transportowego może przyczynić się do ograniczenia liczby wypadków oraz zwiększenia bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego.

Bibliografia

1. Orłowski, Ł. (2020). *Bezpieczeństwo w ruchu drogowym*. Dostęp z dnia 24.04.2026 z: https://slw.wat.edu.pl/pdf-133858-62336?filename=BEZPIECZENSTWO-W-RUCHUDR.pdf
2. Piekarski, W., Dudziak, A., Rudzińska, J. (2014). *Zarządzanie ryzykiem w transporcie*. Logistyka – nauka. Dostęp z dnia 24.04.2026 z: https://logistyka.net.pl/wpcontent/uploads/2019/09/Piekarski_Dudziak_RudziAIska_ZarzOdzanie_ryzykiem_w_transporcie.pdf
3. Pułkownik, M. (2018). *Wskaźniki oceny bezpieczeństwa w ruchu drogowym*. DOI: 10.12716/1002.33.05
4. Stan-Trans. (b.d.). *Jak wygląda zarządzanie ryzykiem w transporcie międzynarodowym?* Dostęp z dnia 20.04.2026 z: https://www.stan-trans.com.pl/jak-wygladazarzadzanie-ryzykiem-w-transporcie-miedzynarodowym/
5. Wikipedia. (b.d.). *Bezpieczeństwo ruchu drogowego*. Dostęp z dnia 24.04.2026 z: https://pl.wikipedia.org/wiki/Bezpieczeństwo_ruchu_drogowego
6. Wołczański, T., Rut, J. (2014). *Bezpieczeństwo w transporcie drogowym materiałów niebezpiecznych*. Dostęp z dnia 24.04.2026 z: https://logistyka.net.pl/wpcontent/uploads/2017/04/Wolczanski_Rut_Bezpieczensto_w_transporcie.pdf

SZTUCZNA INTELIGENCJA W ZARZĄDZANIU JAKOŚCIĄ: ZASTOSOWANIA, KORZYŚCI, BARIERY I KIERUNKI BADAŃ

Julia BILICKA[1]

[1]Uniwersytet Gdański, Gdańsk; julia.bilicka02@gmail.com; ORCID: 0009-0009-5071-008X

* Korespondencja: julia.bilicka02@gmail.com

Streszczenie: Celem artykułu jest usystematyzowanie wiedzy na temat wykorzystania sztucznej inteligencji w zarządzaniu jakością oraz wskazanie kierunków dalszych badań. Postawiono trzy pytania badawcze dotyczące obszarów zastosowań, korzyści oraz barier wdrażania rozwiązań opartych na uczeniu maszynowym w praktyce projakościowej. Zastosowano metodę narracyjnego przeglądu literatury obejmującego recenzowane publikacje indeksowane w bazach Scopus i Web of Science oraz dorobek samego czasopisma. Na podstawie analizy zaproponowano autorską typologię zastosowań, porządkującą je wokół czterech funkcji: predykcji jakości, automatycznej kontroli i inspekcji, wspomagania decyzji i doskonalenia procesów oraz zarządzania jakością usług i doświadczeniem klienta. Wykazano, że dojrzałe wdrożenia przesuwają punkt ciężkości z wykrywania niezgodności na ich zapobieganie, co odpowiada klasycznej zasadzie projektowania jakości u źródła. Zidentyfikowano najważniejsze korzyści, w tym skrócenie czasu reakcji, ograniczenie kosztów braków oraz pełniejsze wykorzystanie danych procesowych. Omówiono również bariery natury technologicznej, organizacyjnej i etycznej, ze szczególnym uwzględnieniem jakości danych, deficytu kompetencji, ograniczonej wyjaśnialności modeli oraz nowych wymogów regulacyjnych. Rozważania osadzono w nurcie koncepcji Jakości 4.0 i powiązano z dyskusją prowadzoną na łamach czasopisma. Wnioski wskazują, że skuteczność sztucznej inteligencji w obszarze jakości zależy nie tyle od samej technologii, ile od dojrzałości organizacyjnej, kompetencji pracowników i kultury opartej na danych.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, zarządzanie jakością, Jakość 4.0, uczenie maszynowe, doskonalenie jakości

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN QUALITY MANAGEMENT: APPLICATIONS, BENEFITS, BARRIERS AND RESEARCH DIRECTIONS

Abstract: The aim of this article is to systematise the knowledge on the use of artificial intelligence in quality management and to indicate directions for further research. Three research questions were posed, concerning the areas of application, the benefits and the barriers to implementing machine learning based solutions in quality practice. A narrative literature

review was applied, covering peer reviewed publications indexed in the Scopus and Web of Science databases, as well as the output of the journal itself. On this basis, an original typology of applications was proposed, organised around four functions: quality prediction, automated inspection, decision support and process improvement, and the management of service quality and customer experience. It was shown that mature implementations shift the focus from detecting nonconformities towards preventing them, which corresponds to the classic principle of designing quality at the source. The main benefits were identified, including shorter response times, lower costs of defects and fuller use of process data. Technological, organisational and ethical barriers were also discussed, with particular attention to data quality, the competence gap, the limited explainability of models and new regulatory requirements. The discussion is embedded in the Quality 4.0 stream and linked to the debate conducted in the journal. The conclusions indicate that the effectiveness of artificial intelligence in the area of quality depends not so much on the technology itself as on organisational maturity, employee competences and a data driven culture.

Keywords: artificial intelligence, quality management, Quality 4.0, machine learning, quality improvement

1. Wprowadzenie

Zarządzanie jakością przez dekady opierało się na założeniu, że źródłem doskonałości jest powtarzalność procesów oraz systematyczne ograniczanie zmienności. Klasyczne podejścia, ukształtowane przez Deminga (1986) oraz Jurana i Godfreya (1999), kładły nacisk na pomiar, analizę przyczyn źródłowych i ciągłe doskonalenie, a ich instytucjonalnym wyrazem stała się rodzina norm ISO 9001 promująca podejście procesowe (ISO, 2015). Współczesne organizacje działają jednak w środowisku, w którym ilość generowanych danych procesowych rośnie szybciej niż zdolność człowieka do ich przetwarzania. W rezultacie tradycyjne narzędzia statystycznego sterowania jakością, choć nadal użyteczne, coraz częściej okazują się niewystarczające wobec złożoności i tempa współczesnej produkcji oraz usług.

Czwarta rewolucja przemysłowa przesunęła punkt ciężkości w stronę technologii cyfrowych, a wśród nich szczególne znaczenie zyskała sztuczna inteligencja, rozumiana jako zdolność systemów informatycznych do realizacji zadań wymagających dotąd ludzkiej inteligencji, w tym rozpoznawania wzorców, prognozowania i podejmowania decyzji (Davenport i Ronanki, 2018). Na styku obu nurtów wyłoniła się koncepcja Jakości 4.0, opisująca przenikanie technologii Przemysłu 4.0 do praktyki projakościowej (Radziwill, 2018; Sader i in., 2022). W literaturze podkreśla się, że sztuczna inteligencja nie jest jedynie kolejnym narzędziem, lecz czynnikiem zmieniającym sam sposób myślenia o jakości, ponieważ umożliwia przejście od reagowania na niezgodności do ich przewidywania (Zonnenshain i Kenett, 2020).

Mimo rosnącego zainteresowania tą problematyką wiedza o zastosowaniach sztucznej inteligencji w zarządzaniu jakością pozostaje rozproszona. Część opracowań koncentruje się na wąsko rozumianej kontroli wizyjnej w produkcji, inne traktują tę technologię ogólnie, jako element strategii lub zarządzania zasobami ludzkimi, nie odnosząc jej wprost do funkcji jakościowej. Brakuje syntezy, która porządkowałaby obszary zastosowań i konfrontowała

deklarowane korzyści z realnymi barierami wdrożeniowymi. Celem niniejszego artykułu jest uporządkowanie dotychczasowego dorobku oraz wskazanie kierunków dalszych badań. Realizacji tego celu podporządkowano trzy pytania badawcze: po pierwsze, w jakich obszarach zarządzania jakością znajdują zastosowanie rozwiązania oparte na sztucznej inteligencji; po drugie, jakie korzyści przynosi ich wdrożenie; po trzecie, jakie bariery i ryzyka ograniczają skuteczność tych wdrożeń.

Artykuł ma charakter przeglądowy. W dalszej części przedstawiono metodykę przeglądu, następnie omówiono ramę pojęciową łączącą tradycyjne zarządzanie jakością z koncepcją Jakości 4.0. Rdzeń opracowania stanowi autorska typologia obszarów zastosowań, po której następuje analiza korzyści oraz barier. Całość zamyka dyskusja wskazująca luki badawcze oraz podsumowanie zawierające rekomendacje dla praktyki.

2. Materiał i metodyka przeglądu literatury

Zastosowano metodę narracyjnego przeglądu literatury, właściwą dla obszarów dynamicznie się rozwijających, w których celem jest raczej synteza i konceptualizacja niż wyczerpujące zliczenie publikacji. Kwerendę przeprowadzono w bazach Scopus i Web of Science, posiłkując się wyszukiwarką Google Scholar w celu identyfikacji prac uzupełniających. Wykorzystano kombinacje słów kluczowych w języku angielskim, obejmujące terminy artificial intelligence, machine learning oraz deep learning w zestawieniu z quality management, quality control i Quality 4.0.

Przyjęto następujące kryteria włączenia: recenzowany charakter publikacji, bezpośredni związek z zarządzaniem lub inżynierią jakości oraz horyzont czasowy obejmujący lata 2018-2025, co odpowiada okresowi intensywnego rozwoju koncepcji Jakości 4.0. Uwzględniono również wcześniejsze prace o charakterze klasycznym, niezbędne do osadzenia rozważań w teorii zarządzania jakością. Wykluczono materiały nierecenzowane oraz opracowania, w których sztuczna inteligencja pojawiała się wyłącznie marginalnie. Świadomie ograniczono dobór do publikacji o ugruntowanej pozycji, rezygnując z formuły systematycznej zgodnej z protokołem PRISMA, co należy traktować jako ograniczenie przyjętego podejścia.

Kwerendę w bazach Scopus i Web of Science oparto na zapytaniach łączących dwie grupy terminów za pomocą operatorów logicznych, w postaci: („artificial intelligence” OR „machine learning” OR „deep learning”) AND („quality management” OR „quality control” OR „Quality 4.0”), z przeszukiwaniem pól tytułu, streszczenia i słów kluczowych. Ze względu na przyjętą, celowo niesystematyczną formułę przeglądu narracyjnego nie prowadzono pełnej, ilościowej ewidencji procesu selekcji. Spośród rekordów zwróconych przez wyszukiwarki, po usunięciu duplikatów oraz ocenie tytułów i streszczeń pod kątem przyjętych kryteriów włączenia, do dalszych prac zakwalifikowano publikacje recenzowane, bezpośrednio powiązane z funkcją jakościową i o ugruntowanej pozycji w literaturze. Ostatecznie do pogłębionej analizy tematycznej zakwalifikowano korpus 24 publikacji, na którym oparto niniejszy przegląd.

Odrębną grupę źródeł stanowiły artykuły opublikowane w czasopiśmie Management and Quality, co pozwoliło powiązać prowadzoną analizę z dyskusją toczącą się na jego łamach oraz uwzględnić polski kontekst badawczy. Zgromadzony materiał poddano analizie tematycznej, grupując zidentyfikowane zastosowania według pełnionej funkcji projakościowej, a następnie konfrontując je z opisywanymi w literaturze korzyściami i barierami.

3. Od kompleksowego zarządzania jakością do Jakości 4.0

Współczesne rozumienie jakości wyrasta z dorobku kompleksowego zarządzania jakością. Deming (1986) dowodził, że większość problemów jakościowych ma źródło w systemie, a nie w pojedynczym pracowniku, i postulował sterowanie procesami w oparciu o dane oraz nieustanne ograniczanie zmienności. Juran i Godfrey (1999) uzupełnili ten obraz, akcentując planowanie jakości oraz jej powiązanie z potrzebami klienta. Praktycznym ukoronowaniem tej tradycji stało się podejście procesowe wraz z cyklem ciągłego doskonalenia, zapisane w normie ISO 9001 (ISO, 2015). Wspólnym mianownikiem wymienionych koncepcji pozostaje przekonanie, że jakość projektuje się u źródła, a kontrola końcowa stanowi jedynie ostatnią i najmniej efektywną linię obrony.

Rozwój technologii cyfrowych nie unieważnił tych zasad, lecz dostarczył nowych środków ich realizacji. Koncepcja Jakości 4.0 opisuje wykorzystanie rozwiązań charakterystycznych dla Przemysłu 4.0, takich jak Internet rzeczy, analityka dużych zbiorów danych oraz sztuczna inteligencja, do wzmocnienia tradycyjnych metod zapewnienia jakości (Radziwill, 2018; Sader i in., 2022). W badaniu o zasięgu globalnym Antony i in. (2022) wykazali, że pojęcie to bywa rozumiane niejednolicie, jednak respondenci zgodnie wskazywali łączenie kompetencji technologicznych z dojrzałością organizacyjną jako jego istotę. Zonnenshain i Kenett (2020) określili Jakość 4.0 mianem wyzwania dla inżynierii jakości, ponieważ wymaga ona od specjalistów nowych umiejętności analitycznych. Przykładem stopniowej cyfryzacji procesów w polskim przemyśle, tworzącej podłoże dla tego rodzaju wdrożeń, są analizy sektora stalowego, w których wskazuje się na nierównomierne tempo adaptacji narzędzi informatycznych w przedsiębiorstwach (Gajdzik i Wolniak, 2021).

W ramach tej koncepcji sztuczna inteligencja pełni rolę szczególną. Escobar i in. (2021) zwracają uwagę, że to właśnie zdolność uczenia się z danych odróżnia rozwiązania oparte na sztucznej inteligencji od wcześniejszej automatyzacji wykorzystującej sztywne reguły. Modele uczenia maszynowego potrafią wychwytywać złożone, nieliniowe zależności między parametrami procesu a cechami wyrobu, które pozostają niedostrzegalne dla klasycznych kart kontrolnych. Jednocześnie autorzy ci podkreślają, że wartość analityczna danych zależy od ich kompletności i wiarygodności, co czyni uporządkowane zarządzanie danymi warunkiem wstępnym skutecznego wdrożenia.

Warto zaznaczyć, że nawet najbardziej zaawansowane wdrożenia nie eliminują czynnika ludzkiego. Radziwill (2020) podkreśla, że Jakość 4.0 nie polega na zastąpieniu specjalistów

algorytmami, lecz na rozszerzeniu ich możliwości decyzyjnych. Zbliżone stanowisko zajmuje Krajewska (2025), która na łamach analizowanego czasopisma dowodzi, że strategiczne wykorzystanie sztucznej inteligencji wymaga odpowiednich zdolności organizacyjnych oraz wysokiego poziomu ich dojrzałości, a sama technologia bez tych warunków nie przekłada się na trwałą przewagę.

4. Obszary zastosowań sztucznej inteligencji w zarządzaniu jakością

Analiza zgromadzonej literatury pozwala wyodrębnić cztery zasadnicze obszary, w których sztuczna inteligencja wspiera zarządzanie jakością. Zaproponowana poniżej typologia porządkuje je według funkcji pełnionej w cyklu jakości, od zapobiegania niezgodnościom, przez ich wykrywanie, po doskonalenie procesów oraz kształtowanie jakości w relacji z klientem. Taki układ odpowiada logice cyklu planuj-wykonaj-sprawdź-działaj i pozwala dostrzec, że poszczególne zastosowania nie konkurują ze sobą, lecz wzajemnie się uzupełniają. Syntetyczne zestawienie wyodrębnionych obszarów, ich funkcji w cyklu jakości oraz przykładowych źródeł przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Typologia zastosowań sztucznej inteligencji w zarządzaniu jakością

Obszar zastosowań	Funkcja w cyklu jakości	Przykładowe rozwiązania i techniki	Wybrane źródła
Predykcja jakości	Zapobieganie niezgodnościom	Prognozowanie cech wyrobu i prawdopodobieństwa wad, predykcyjne utrzymanie ruchu, modele uczenia maszynowego i głębokiego	Tercan i Meisen (2022); Md i in. (2022)
Automatyczna kontrola i inspekcja	Wykrywanie niezgodności	Widzenie maszynowe, głębokie sieci konwolucyjne, wykrywanie wad powierzchniowych	Hoffmann i Reich (2023); Morales-Matamoros i in. (2025)
Wspomaganie decyzji i doskonalenie procesów	Analiza przyczyn i doskonalenie	Analiza przyczyn źródłowych, wzbogacenie cyklu DMAIC, przetwarzanie języka naturalnego (głos klienta)	Escobar i in. (2022)
Zarządzanie jakością usług i doświadczeniem klienta	Kształtowanie jakości w relacji z klientem	Systemy konwersacyjne i rekomendacyjne, analiza nastrojów, automatyzacja raportowania zdarzeń	Jankowska (2025)

Źródło: opracowanie własne.

Predykcja jakości. Pierwszy z wyodrębnionych obszarów obejmuje prognozowanie cech wyrobu lub prawdopodobieństwa wystąpienia niezgodności na podstawie danych z procesu. W systematycznym przeglądzie Tercan i Meisen (2022) wykazali, że modele uczenia maszynowego oraz uczenia głębokiego są coraz powszechniej stosowane do przewidywania jakości jeszcze przed zakończeniem produkcji, co umożliwia korygowanie parametrów w czasie rzeczywistym. Pokrewnym zastosowaniem jest predykcyjne utrzymanie ruchu, w którym algorytmy przewidują awarie maszyn mogące prowadzić do pogorszenia jakości. Md i in. (2022) w przeglądzie poświęconym predykcji jakości w procesach produkcyjnych zwracają

uwagę, że skuteczność takich modeli rośnie wraz z integracją danych z czujników rozmieszczonych wzdłuż linii technologicznej. Znaczenie tego obszaru wynika z jego zgodności z fundamentalną zasadą zarządzania jakością, według której zapobieganie jest skuteczniejsze i tańsze niż wykrywanie.

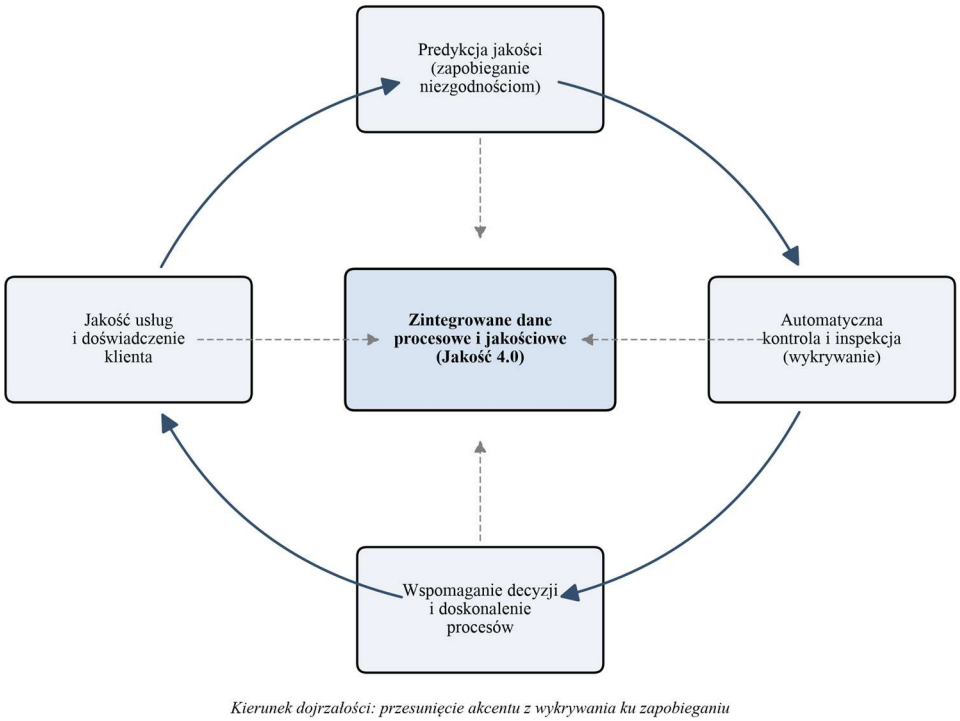
Automatyczna kontrola i inspekcja. Drugi obszar to historycznie najwcześniej rozwinięte zastosowanie sztucznej inteligencji w jakości. Wykorzystuje się tu przede wszystkim widzenie maszynowe oparte na głębokich sieciach neuronowych, które analizują obraz wyrobu i wykrywają defekty z dokładnością często przewyższającą inspekcję wykonywaną przez człowieka. Hoffmann i Reich (2023) w przeglądzie systematycznym poświęconym wizyjnemu zapewnieniu jakości wskazują, że sieci konwolucyjne stały się dominującym narzędziem wykrywania wad powierzchniowych, sygnalizując zarazem rosnące znaczenie wyjaśnialnej sztucznej inteligencji, która pozwala zrozumieć podstawy podejmowanych przez model decyzji. Na przykładzie przemysłu motoryzacyjnego Morales-Matamoros i in. (2025) dokumentują szerokie zastosowanie tych metod w wykrywaniu defektów, podkreślając konieczność integracji rozwiązań sztucznej inteligencji z istniejącymi systemami produkcyjnymi. Automatyzacja inspekcji ogranicza subiektywizm oceny oraz zmęczenie kontrolerów, które należą do typowych źródeł błędów.

Wspomaganie decyzji i doskonalenie procesów. W trzecim obszarze sztuczna inteligencja wspiera analizę przyczyn źródłowych, identyfikację czynników wpływających na jakość oraz priorytetyzację działań korygujących. Escobar i in. (2022) proponują, by tradycyjny cykl DMAIC, stanowiący trzon metodyki Six Sigma, wzbogacić o techniki uczenia maszynowego, co pozwala analizować zbiory danych zbyt obszerne dla klasycznych narzędzi statystycznych. W tym ujęciu sztuczna inteligencja nie zastępuje sprawdzonych metodyk doskonalenia, lecz zwiększa ich moc analityczną. Do tego obszaru należy także przetwarzanie języka naturalnego, umożliwiające automatyczną analizę głosu klienta zawartego w reklamacjach, opiniach i zgłoszeniach, a tym samym szybsze wykrywanie powtarzających się problemów jakościowych.

Zarządzanie jakością usług i doświadczeniem klienta. Czwarty obszar obejmuje kształtowanie doświadczenia klienta. Rozwiązania konwersacyjne, systemy rekomendacyjne i analiza nastrojów pozwalają monitorować i podnosić jakość obsługi w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Szczególnie wyraźnie obszar ten rozwija się w ochronie zdrowia, gdzie jakość ma bezpośredni związek z bezpieczeństwem pacjenta. Jankowska (2025) opisuje na łamach czasopisma wykorzystanie sztucznej inteligencji w automatyzacji raportowania zdarzeń niepożądanych w szpitalach, wskazując na jej pozytywny wpływ na kulturę bezpieczeństwa oraz jakość opieki. Przykład ten pokazuje, że zastosowania sztucznej inteligencji w jakości wykraczają poza sektor wytwórczy i obejmują również usługi, w tym usługi publiczne.

Przedstawiona typologia nie ma charakteru rozłącznego. W dojrzałych wdrożeniach poszczególne obszary tworzą zintegrowaną pętlę, w której dane z inspekcji zasilają modele predykcyjne, a wnioski z analizy głosu klienta ukierunkowują doskonalenie procesów.

Wspólnym mianownikiem wszystkich zastosowań jest przesunięcie akcentu z wykrywania ku zapobieganiu, zgodne z tradycją projektowania jakości u źródła. Wzajemne powiązania czterech obszarów w cyklu zarządzania jakością ilustruje rysunek 1.



Rysunek 1. Typologia zastosowań sztucznej inteligencji w cyklu zarządzania jakością
Źródło: opracowanie własne.

5. Korzyści z zastosowania sztucznej inteligencji

Najczęściej wskazywaną w literaturze korzyścią z wdrożenia sztucznej inteligencji w zarządzaniu jakością jest przejście od kontroli reaktywnej do działania prewencyjnego. Zdolność przewidywania niezgodności pozwala ograniczyć koszty złej jakości, na które składają się braki, poprawki, reklamacje oraz utrata zaufania klienta (Tercan i Meisen, 2022). Wczesne wykrycie odchyleń skraca czas reakcji i umożliwia korektę procesu, zanim powstanie wadliwa partia.

Drugą grupę korzyści stanowi poprawa powtarzalności i obiektywności oceny. Algorytmy nie ulegają zmęczeniu ani presji czasu, dzięki czemu inspekcja automatyczna zapewnia stabilniejsze wyniki niż ocena wzrokowa (Hoffmann i Reich, 2023). Trzecim obszarem jest pełniejsze wykorzystanie danych. Organizacje gromadzą ogromne ilości informacji procesowych, które bez odpowiednich narzędzi pozostają niewykorzystane, a sztuczna inteligencja pozwala przekształcić je w wiedzę użyteczną decyzyjnie (Escobar i in., 2021).

Korzyści wykraczają poza poziom operacyjny. Mikalef i Gupta (2021) wykazali empirycznie, że zdolność organizacji do wykorzystania sztucznej inteligencji, rozumiana jako konfiguracja zasobów technologicznych, ludzkich i organizacyjnych, wiąże się dodatnio z

kreatywnością oraz wynikami przedsiębiorstwa. W kontekście jakości oznacza to, że technologia ta może stać się źródłem trwałej przewagi, o ile zostanie osadzona w strategii. Spostrzeżenie to koresponduje z ustaleniami Krajewskiej (2025), według której rzeczywiste korzyści pojawiają się dopiero przy odpowiednim poziomie dojrzałości organizacyjnej.

6. Bariery i ryzyka wdrożeniowe

Pomimo obiecujących rezultatów wdrażanie sztucznej inteligencji w zarządzaniu jakością napotyka istotne bariery. Pierwszą i najczęściej wymienianą jest jakość oraz dostępność danych. Modele uczą się na danych historycznych, a ich skuteczność zależy od kompletności, spójności i wiarygodności tych danych (Escobar i in., 2021). W praktyce wiele organizacji dysponuje danymi rozproszonymi, niejednorodnymi lub obarczonymi błędami, co ogranicza możliwość budowy rzetelnych modeli.

Drugą barierą jest deficyt kompetencji. Skuteczne wykorzystanie sztucznej inteligencji wymaga połączenia wiedzy z zakresu jakości, analityki danych oraz znajomości procesu, a takie kompetencje pozostają rzadkie i kosztowne (Antony i in., 2022). Wiąże się z nią trudność integracji nowych rozwiązań z istniejącymi systemami zarządzania jakością, w tym z wymaganiami normy ISO 9001 oraz z infrastrukturą informatyczną przedsiębiorstwa. Sony i in. (2021) wśród czynników gotowości do wdrożenia Jakości 4.0 wymieniają zarówno zasoby technologiczne, jak i wsparcie kierownictwa oraz odpowiednią kulturę organizacyjną.

Trzecią grupę barier tworzą ograniczenia natury poznawczej i etycznej. Wiele modeli, zwłaszcza opartych na głębokim uczeniu, działa na zasadzie czarnej skrzynki, której decyzji nie sposób łatwo wyjaśnić, co utrudnia ich akceptację w środowiskach wymagających rozliczalności (Hoffmann i Reich, 2023). Problem ten nabiera znaczenia wobec rosnących wymagań regulacyjnych, ponieważ przyjęte w Unii Europejskiej rozporządzenie w sprawie sztucznej inteligencji wprowadza obowiązki zależne od poziomu ryzyka danego zastosowania, co bezpośrednio dotyczy systemów wspierających decyzje jakościowe (Parlament Europejski i Rada, 2024). Do ryzyk należy także stronniczość modeli oraz społeczne konsekwencje automatyzacji, na które w odniesieniu do polskiego rynku zwraca uwagę Skiba (2025).

Bariery o charakterze organizacyjnym i kulturowym bywają trudniejsze do pokonania niż przeszkody techniczne. Wdrożenie sztucznej inteligencji zmienia role pracowników działów jakości i może budzić opór wynikający z obawy przed utratą znaczenia lub miejsca pracy. Gajda i in. (2025) w badaniu opublikowanym w analizowanym czasopiśmie pokazują, że pracownicy postrzegają technologie oparte na sztucznej inteligencji ambiwalentnie, dostrzegając zarówno szanse, jak i zagrożenia, co potwierdza, że powodzenie wdrożenia zależy od świadomego zarządzania zmianą.

7. Dyskusja i kierunki dalszych badań

Przeprowadzony przegląd pozwala udzielić odpowiedzi na postawione pytania badawcze. Sztuczna inteligencja znajduje zastosowanie w czterech głównych obszarach zarządzania jakością, od predykcji, przez inspekcję, po doskonalenie procesów oraz kształtowanie jakości usług. Jej wdrożenie przynosi wymierne korzyści, przede wszystkim w postaci przejścia do działania prewencyjnego i pełniejszego wykorzystania danych, jednak skuteczność tych rozwiązań ogranicza zespół barier technologicznych, kompetencyjnych, organizacyjnych i etycznych. Z zestawienia tego wyłania się wniosek, że o powodzeniu decyduje nie sama technologia, lecz dojrzałość organizacji zdolnej do jej wchłonięcia.

Analiza ujawnia również istotne luki badawcze. Dominująca część dorobku dotyczy dużych przedsiębiorstw produkcyjnych, podczas gdy uwarunkowania małych i średnich przedsiębiorstw oraz sektora usług pozostają słabo rozpoznane. Niedostatecznie zbadane są także sposoby integracji rozwiązań sztucznej inteligencji z wymaganiami znormalizowanych systemów zarządzania jakością oraz modele współpracy człowieka z algorytmem w procesach decyzyjnych. Odrębnym, obiecującym kierunkiem jest rozwój wyjaśnialnej sztucznej inteligencji w kontekście jakości, który mógłby pogodzić skuteczność modeli z wymogiem rozliczalności. Zidentyfikowane luki badawcze wraz z proponowanymi kierunkami dalszych badań zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zidentyfikowane luki badawcze i proponowane kierunki dalszych badań

Zidentyfikowana luka badawcza	Proponowany kierunek dalszych badań
Dominacja badań nad dużymi przedsiębiorstwami produkcyjnymi	Badania empiryczne w sektorze małych i średnich przedsiębiorstw oraz w usługach, w tym usługach publicznych
Słabo rozpoznana integracja sztucznej inteligencji ze znormalizowanymi systemami zarządzania jakością (ISO 9001)	Modele i studia przypadku integracji rozwiązań AI z wymaganiami norm jakości
Niedostatecznie zbadane modele współpracy człowieka z algorytmem w decyzjach jakościowych	Badania nad podziałem ról i odpowiedzialności w hybrydowych procesach decyzyjnych
Ograniczona wyjaśnialność modeli (czarna skrzynka) wobec wymogów rozliczalności i regulacji (AI Act)	Rozwój wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (XAI) w kontekście jakości oraz zgodności regulacyjnej
Przewaga deklarowanych nad rzeczywistymi, mierzalnymi efektami wdrożeń	Studia przypadku dokumentujące mierzalne efekty wdrożeń, osadzone w polskim kontekście

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury.

Zidentyfikowane luki korespondują z kierunkami dyskusji prowadzonej na łamach czasopisma Management and Quality. Prace poświęcone strategicznej dojrzałości w wykorzystaniu sztucznej inteligencji (Krajewska, 2025), jej zastosowaniom w środowisku pracy (Gajda i in., 2025) oraz w obszarze jakości i bezpieczeństwa w ochronie zdrowia (Jankowska, 2025), a także rozważania o roli interesariuszy w zarządzaniu jakością i ryzykiem w świetle norm międzynarodowych (Manczak i in., 2025), wyznaczają obiecujące pole dla

badań empirycznych osadzonych w polskim kontekście. Szczególnie wartościowe wydają się studia przypadku dokumentujące rzeczywiste, a nie jedynie deklarowane efekty wdrożeń.

8. Podsumowanie

Celem artykułu było usystematyzowanie wiedzy o zastosowaniach sztucznej inteligencji w zarządzaniu jakością. Wykazano, że technologia ta wpisuje się w długą tradycję doskonalenia jakości, dostarczając nowych środków realizacji jej fundamentalnej zasady, jaką jest zapobieganie niezgodnościom u źródła. Głównym wkładem opracowania jest typologia porządkująca obszary zastosowań według funkcji pełnionej w cyklu jakości, która może służyć zarówno badaczom, jak i praktykom jako rama orientacyjna.

Dla praktyki gospodarczej z przeglądu płyną trzy zalecenia. Po pierwsze, wdrożenie sztucznej inteligencji należy poprzedzić uporządkowaniem danych jakościowych, bez których nawet zaawansowane modele pozostają bezużyteczne. Po drugie, inwestycje w technologię powinny iść w parze z rozwojem kompetencji pracowników działów jakości oraz świadomym zarządzaniem zmianą. Po trzecie, projektując systemy wspierające decyzje jakościowe, warto od początku uwzględniać wymogi wyjaśnialności i zgodności z otoczeniem regulacyjnym.

Opracowanie nie jest wolne od ograniczeń. Przyjęta formuła narracyjnego przeglądu, choć właściwa dla syntezy szybko rozwijającego się obszaru, nie zapewnia kompletności charakterystycznej dla przeglądów systematycznych. Sformułowane wnioski wskazują zatem raczej kierunki niż ostateczne rozstrzygnięcia i powinny zostać zweryfikowane w badaniach empirycznych, w tym w warunkach polskich przedsiębiorstw i instytucji.

Bibliografia

1. Antony, J., McDermott, O., and Sony, M. (2022). Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study. The TQM Journal, 34(5), 1169-1188. doi: 10.1108/TQM-07-2021-0215
2. Davenport, T.H., and Ronanki, R. (2018). Artificial intelligence for the real world. Harvard Business Review, 96(1), 108-116.
3. Deming, W.E. (1986). Out of the Crisis. Cambridge, MA: MIT Press.
4. Escobar, C.A., Macias, D., McGovern, M., and Hernandez-de-Menendez, M. (2022). Quality 4.0 – an evolution of Six Sigma DMAIC. International Journal of Lean Six Sigma, 13(6), 1200-1238. doi: 10.1108/IJLSS-05-2021-0091
5. Escobar, C.A., McGovern, M.E., and Morales-Menendez, R. (2021). Quality 4.0: a review of big data challenges in manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing, 32(8), 2319-2334. doi: 10.1007/s10845-021-01765-4
6. Gajda, J., Krzyżanowska, E., and Randak-Jezierska, M. (2025). Wykorzystywanie technologii opartych na sztucznej inteligencji w środowisku pracy – perspektywa szans oraz zagrożeń dla pracowników. Management and Quality – Zarządzanie i Jakość, 7(4), 269-281.
7. Gajdzik, B., and Wolniak, R. (2021). Digitalisation and innovation in the steel industry in Poland – selected tools of ICT in an analysis of statistical data and a case study. Energies, 14(11), 3034. doi: 10.3390/en14113034
8. Hoffmann, R., and Reich, C. (2023). A systematic literature review on artificial intelligence and explainable artificial intelligence for visual quality assurance in manufacturing. Electronics, 12(22), 4572. doi: 10.3390/electronics12224572
9. International Organization for Standardization, ISO (2015). ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements. Geneva: ISO.
10. Jankowska, P. (2025). Sztuczna inteligencja w automatyzacji raportów zdarzeń niepożądanych w szpitalach – wpływ na kulturę bezpieczeństwa i jakość. Management and Quality – Zarządzanie i Jakość, 7(2), 195-206.
11. Juran, J.M., and Godfrey, A.B. (1999). Juran's Quality Handbook (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
12. Krajewska, A. (2025). Strategiczne wykorzystanie sztucznej inteligencji a zdolności i dojrzałość organizacji. Management and Quality – Zarządzanie i Jakość, 7(3), 5-34.
13. Manczak, I., Moroz, V., Serpukhov, O., Moroz, S., and Kruhlov, V. (2025). Stakeholders' participation in organization's product quality and risk management in the light of the international standards. Management and Quality – Zarządzanie i Jakość, 7(3), 357-374.

14. Md, A.Q., Jha, K., Haneef, S., Sivaraman, A.K., and Tee, K.F. (2022). A review on data-driven quality prediction in the production process with machine learning for Industry 4.0. Processes, 10(10), 1966. doi: 10.3390/pr10101966
15. Mikalef, P., and Gupta, M. (2021). Artificial intelligence capability: conceptualization, measurement calibration, and empirical study on its impact on organizational creativity and firm performance. Information & Management, 58(3), 103434. doi: 10.1016/j.im.2021.103434
16. Morales-Matamoros, O., Takeo-Nava, J.G., Moreno-Escobar, J.J., and Ceballos-Chávez, B.A. (2025). Artificial intelligence for quality defects in the automotive industry: a systemic review. Sensors, 25(5), 1288. doi: 10.3390/s25051288
17. Parlament Europejski i Rada (UE) (2024). Rozporządzenie (UE) 2024/1689 z dnia 13 czerwca 2024 r. ustanawiające zharmonizowane przepisy dotyczące sztucznej inteligencji (akt w sprawie sztucznej inteligencji). Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L, 2024/1689.
18. Radziwill, N.M. (2018). Quality 4.0: let's get digital – the many ways the fourth industrial revolution is reshaping the way we think about quality. arXiv:1810.07829. Retrieved from https://arxiv.org/abs/1810.07829
19. Radziwill, N.M. (2020). Connected, Intelligent, Automated: The Definitive Guide to Digital Transformation and Quality 4.0. Milwaukee, WI: Quality Press.
20. Sader, S., Husti, I., and Daróczi, M. (2022). A review of quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges. Total Quality Management & Business Excellence, 33(9-10), 1164-1182. doi: 10.1080/14783363.2021.1944082
21. Skiba, Ł. (2025). Społeczne konsekwencje rozwoju AI w Polsce i na świecie – ujęcie porównawcze. Management and Quality – Zarządzanie i Jakość, 7(4), 241-254.
22. Sony, M., Antony, J., Douglas, J.A., and McDermott, O. (2021). Motivations, barriers and readiness factors for Quality 4.0 implementation: an exploratory study. The TQM Journal, 33(6), 1502-1515. doi: 10.1108/TQM-11-2020-0272
23. Tercan, H., and Meisen, T. (2022). Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review. Journal of Intelligent Manufacturing, 33(7), 1879-1905. doi: 10.1007/s10845-022-01963-8
24. Zonnenshain, A., and Kenett, R.S. (2020). Quality 4.0 – the challenging future of quality engineering. Quality Engineering, 32(4), 614-626. doi: 10.1080/08982112.2019.1706744

WPROWADZENIE DO TRANSPORTU DROGOWEGO I SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

Amelia SIEMIŃSKA[1], Angelika CHMURZYŃSKA[2], Andrzej KOCOT[3], Artur SZYMAŃSKI[4], Dominik JAROSZ[5] i Jakub WALTER[6], Marek OŻAROWSKI[7] Bożena SZCZUCKA-LASOTA[8]

[1] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny; studentka, identyfikator ORCID – brak, e-mail: as319510@student.polsl.pl

[2] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny; studentka identyfikator ORCID – brak, e-mail: ac319505@student.polsl.pl

[3] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak, e-mail: ak319513@student.polsl.pl

[4] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak, e-mail: as319514@student.polsl.pl

[5] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak, e-mail: dj322986@student.polsl.pl

[6] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak, e-mail: jw319521@student.polsl.pl

[7]Uniwersytet WSB Merito Gdańsk, e-mail:marek.ozarowski@gdansk.merito.pl;

Identyfikator ORCID 0009-0002-6682-9498

[8]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail:bozena.szczucka-lasota@polsl.pl;

Identyfikator ORCID – 0000-0003-3312-1864

*Korespondencja: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl;

Streszczenie: Artykuł dotyczy transportu drogowego oraz systemy transportowego i jego rolę oraz znaczenie w gospodarce. Przedstawione są rodzaje transportu, ich znaczenie oraz system transportowy państwa jak i Unii Europejskiej. Również funkcje, wyzwania jak i rozwój transportu.

Słowa kluczowe: transport, system transportowy, infrastruktura, logistyka, sieć drogowa

Wprowadzenie

Artykuł skupia się na systemie transportu i jego roli dla gospodarki krajowej i w Europie.

Transport stanowi jeden z kluczowych elementów współczesnej gospodarki, warunkując sprawne funkcjonowanie systemów produkcji, dystrybucji oraz wymiany handlowej. Jego znaczenie wynika przede wszystkim z umożliwienia przemieszczania dóbr, usług oraz osób, co bezpośrednio wpływa na rozwój gospodarczy zarówno w skali krajowej, jak i międzynarodowej (Bąk i Burnewicz, 2020; European Commission, 2020).

Współczesne systemy transportowe charakteryzują się wysokim stopniem złożoności oraz dynamicznym rozwojem, wynikającym z postępu technologicznego, globalizacji oraz rosnących potrzeb społeczeństw. Transport odgrywa istotną rolę w procesach integracji gospodarczej, w szczególności w ramach Unii Europejskiej, gdzie stanowi podstawę funkcjonowania jednolitego rynku oraz swobodnego przepływu towarów i usług (European Commission, 2020).

Jednocześnie rozwój transportu wiąże się z licznymi wyzwaniami, w tym rosnącymi kosztami działalności, presją środowiskową oraz wpływem czynników geopolitycznych. Problemy te mają charakter globalny i oddziałują na wszystkie gałęzie transportu, wpływając na ich efektywność, bezpieczeństwo oraz stabilność funkcjonowania (World Bank, 2019; International Monetary Fund, 2022).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie istoty transportu, jego funkcji oraz znaczenia dla gospodarki, a także analiza współczesnych problemów i wyzwań, przed którymi stoi sektor transportowy. W pracy omówione zostaną również perspektywy rozwoju transportu w kontekście zmian technologicznych oraz procesów globalizacyjnych.

Struktura artykułu obejmuje sześć rozdziałów. W pierwszej części przedstawiono istotę i funkcje transportu. Następnie omówiono rodzaje transportu oraz ich znaczenie dla rozwoju gospodarczego. Kolejne rozdziały poświęcone są roli transportu w gospodarce krajowej i integracji europejskiej, jego znaczeniu w handlu międzynarodowym oraz procesach globalizacji. W dalszej części zaprezentowano najważniejsze problemy i wyzwania transportu na świecie, natomiast ostatni rozdział dotyczy kierunków rozwoju oraz przyszłości sektora transportowego.

2. Istota i funkcje transportu

Transport stanowi jeden z fundamentalnych filarów współczesnej cywilizacji, będąc czynnikiem warunkującym sprawne funkcjonowanie systemów społeczno-gospodarczych. W najszerszym ujęciu, transport definiuje się jako zespół czynności związanych z odpłatnym lub nieodpłatnym przemieszczaniem osób i ładunków w przestrzeni przy użyciu odpowiednich środków technicznych. Jednakże we współczesnej ekonomii transportu nie postrzega się go jedynie jako prostego ruchu fizycznego, lecz jako złożony proces logistyczny, technologiczny i organizacyjny, który dodaje wartości produktom poprzez zmianę ich miejsca położenia oraz czasu dostępności.

Istota transportu opiera się na trzech kluczowych komponentach: infrastrukturze

(drogi, torowiska, porty, terminale), suprastrukturze (środki transportu, takie jak samochody, pociągi, statki, samoloty) oraz procesach przewozowych zarządzanych przez czynnik ludzki i systemy teleinformatyczne. To właśnie synergia tych elementów pozwala na pokonywanie barier przestrzennych, które oddzielają miejsca produkcji od miejsc konsumpcji.

Funkcje ekonomiczne:

Są one najbardziej wymierne i bezpośrednio wpływają na wskaźniki makroekonomiczne państwa. Transport jest krwiobiegiem gospodarki, ponieważ:

-Umożliwia wymianę handlową: Bez wydajnego transportu handel międzynarodowy i krajowy byłby niemożliwy, co doprowadziłoby do izolacji rynków.

-Kształtuje ceny towarów: Koszty transportu są istotnym składnikiem ceny końcowej produktu.

Rozwój technologii transportowych pozwala na obniżenie tych kosztów, co zwiększa dostępność towarów dla konsumentów.

-Wpływa na lokalizację produkcji: Inwestorzy wybierają miejsca dobrze skomunikowane, co stymuluje rozwój regionalny i tworzenie nowych miejsc pracy.

-Zwiększa efektywność produkcji: Dzięki modelom takim jak Just-in-Time (dokładnie na czas), firmy mogą minimalizować zapasy magazynowe, polegając na precyzyjnych dostawach transportowych.

Funkcje społeczne:

-Transport bezpośrednio wpływa na jakość i styl naszego życia. -Zwiększanie mobilności:

Daje nam wolność poruszania się – dostęp do edukacji, opieki zdrowotnej, kultury czy rekreacji. -Integracja społeczna: Ułatwia kontakty międzyludzkie i pozwala na podtrzymywanie więzi rodzinnych oraz społecznych niezależnie od odległości. Przeciwdziałanie wykluczeniu: Sprawna komunikacja publiczna pozwala osobom starszym lub uboższym na aktywne uczestnictwo w życiu społecznym.

Funkcje przestrzenne:
Transport zmienia sposób, w jaki zagospodarowana jest ziemia.

- Kształtowanie osadnictwa: Miasta i fabryki powstają tam, gdzie jest dobry dostęp do dróg, kolei lub portów.
- Niwelowanie barier geograficznych: Pozwala na zasiedlanie i wykorzystywanie terenów,
- które bez infrastruktury byłyby odcięte od świata.
- Funkcje polityczne i obronne:
- Z perspektywy państwa transport jest narzędziem strategicznym.
- Integracja terytorialna: Spaja państwo w jedną całość pod względem administracyjnym i politycznym.
- Bezpieczeństwo narodowe: Umożliwia szybkie przemieszczanie służb ratunkowych, policji czy wojska w sytuacjach kryzysowych lub zagrożenia konfliktem

Transport pełni również istotną rolę w procesach globalizacyjnych. Dzięki jego rozwojowi możliwe stało się tworzenie międzynarodowych łańcuchów dostaw oraz intensyfikacja wymiany handlowej. Współczesna gospodarka światowa opiera się w dużej mierze na sprawnym przepływie dóbr i usług, co czyni transport jednym z jej fundamentów. Podsumowując, transport jest nieodzownym elementem funkcjonowania gospodarki i społeczeństwa. Jego rola wykracza daleko poza samo przemieszczanie dóbr i osób, obejmując także aspekty ekonomiczne, społeczne oraz środowiskowe. Zrozumienie istoty i funkcji transportu stanowi podstawę do dalszej analizy jego znaczenia w rozwoju gospodarki.

3. Rodzaje transportu i jego znaczenie dla rozwoju gospodarki

Transport stanowi jeden z fundamentalnych sektorów gospodarki, pełniąc funkcję integrującą poszczególne jej elementy. Jest on niezbędnym ogniwem umożliwiającym przepływ dóbr, usług oraz czynników produkcji, a jego sprawność bezpośrednio wpływa na tempo rozwoju gospodarczego. W ujęciu ekonomicznym transport nie tylko zaspokaja potrzeby przewozowe, lecz także kreuje wartość dodaną poprzez skracanie czasu dostaw, zwiększanie dostępności rynków oraz obniżanie kosztów działalności przedsiębiorstw.

Transport drogowy pełni kluczową rolę w systemie transportowym, przede wszystkim dzięki wysokiej dostępności przestrzennej i możliwości realizacji przewozów bezpośrednich. Jest szczególnie istotny w obsłudze tzw. „ostatniej mili", stanowiąc niezbędne uzupełnienie innych gałęzi transportu. Jednocześnie jego intensywny rozwój wiąże się z powstawaniem kosztów zewnętrznych, takich jak zanieczyszczenie środowiska, hałas czy przeciążenie

infrastruktury. W związku z tym coraz większe znaczenie mają działania regulacyjne oraz wdrażanie nowoczesnych technologii, które zwiększają efektywność i ograniczają negatywny wpływ transportu drogowego.

Transport kolejowy stanowi bardziej zrównoważoną alternatywę dla transportu drogowego, zwłaszcza w przewozach masowych i na długich dystansach. Charakteryzuje się relatywnie niską energochłonnością oraz wysoką zdolnością przewozową. W warunkach rosnącej presji na ograniczanie emisji gazów cieplarnianych jego znaczenie systematycznie wzrasta, szczególnie w kontekście polityki klimatycznej Unii Europejskiej.

Transport lotniczy, mimo wysokich kosztów, pełni strategiczną rolę w przewozach pasażerskich oraz w transporcie towarów o wysokiej wartości lub krótkim cyklu życia. Jego znaczenie wzrosło szczególnie w dobie globalizacji oraz dynamicznego rozwoju handlu elektronicznego. Jednocześnie sektor ten stoi przed wyzwaniami związanymi z ograniczaniem wpływu na środowisko naturalne.

Transport wodny stanowi uzupełnienie systemu transportowego i dzieli się na transport wodny śródlądowy oraz transport rurociągowy. Pierwszy z nich cechuje się wysoką efektywnością energetyczną, jednak jego rozwój jest uzależniony od warunków naturalnych i infrastrukturalnych. Transport rurociągowy natomiast ma kluczowe znaczenie dla sektora energetycznego, umożliwiając stabilny i ciągły przesył surowców takich jak ropa naftowa i gaz ziemny.

Znaczenie transportu dla rozwoju gospodarki przejawia się w wielu aspektach. Przede wszystkim umożliwia on specjalizację produkcji oraz rozwój handlu międzynarodowego, co prowadzi do bardziej efektywnej alokacji zasobów. Ponadto wpływa na lokalizację przedsiębiorstw oraz rozwój regionów, przyczyniając się do zmniejszania dysproporcji przestrzennych. Sprawny system transportowy zwiększa również mobilność siły roboczej oraz sprzyja rozwojowi rynku pracy. W konsekwencji transport staje się jednym z kluczowych czynników determinujących konkurencyjność gospodarki zarówno w skali krajowej, jak i globalnej.

Podsumowując, transport stanowi kluczowy element funkcjonowania współczesnej gospodarki, umożliwiając sprawny przepływ ludzi, towarów oraz usług, a także wspierając rozwój handlu krajowego i międzynarodowego. Poszczególne jego gałęzie różnią się zakresem zastosowania i efektywnością, jednak wspólnie tworzą zintegrowany system determinujący konkurencyjność oraz tempo rozwoju państw. W związku z tym rozwój transportu powinien być ukierunkowany na zwiększanie jego efektywności, przy jednoczesnym ograniczaniu negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

4. Rola transportu w gospodarce krajowej i w integracji europejskiej

Transport stanowi „*krwiobieg nowoczesnej gospodarki*", determinując tempo wzrostu PKB oraz efektywność procesów produkcyjnych. Niniejszy artykuł analizuje funkcje transportu w wymiarze krajowym oraz jego kluczowe znaczenie dla spójności Unii Europejskiej, ze szczególnym uwzględnieniem korytarzy transportowych TEN-T. Transport stanowi usługę wspierającą inne sektory gospodarki. W inżynierii systemów transportowych definiuje się go jako proces celowego przemieszczania osób, ładunków lub energii w przestrzeni przy użyciu odpowiednich środków technicznych (Rydzkowski, i Wojewódzka-Król, 2022). Na poziomie studiów inżynierskich istotne jest zrozumienie, że transport generuje tzw. wartość dodaną miejsca i czasu (Wierzejski, i Kędzierska-Szczepańska, 2017).

W ujęciu makroekonomicznym transport w gospodarce krajowej pełni trzy zasadnicze funkcje (Rydzkowski, i Wojewódzka-Król, 2022):

- Funkcja produkcyjna: Zaspokajanie potrzeb przewozowych wynikających z podziału pracy.

Bez transportu niemożliwa byłaby specjalizacja zakładów produkcyjnych.

- Funkcja konsumpcyjna: Umożliwienie obywatelom dostępu do dóbr i usług, a także mobilność zawodowa (dojazdy do pracy).
- Funkcja integracyjna: Łączenie regionów o różnym stopniu zurbanizowania, co zapobiega wykluczeniu ekonomicznemu mniejszych ośrodków.

Sektor transportu i logistyki (TSL) odpowiada w Polsce za około 6-7% PKB (Liberadzki, i Mindur, 2007). Eefektywność transportu wpływa na koszty krańcowe niemal każdego produktu, a uwarunkowania prawne, takie jak ustawa o transporcie drogowym, narzucają określone ramy funkcjonowania rynku (Ustawa o transporcie drogowym, 2024). Obniżenie kosztów transportu o 1% może przynieść wielomiliardowe oszczędności w skali całego państwa. Transport pełni również istotną rolę jako fundament integracji europejskiej. Integracja europejska opiera się na „czterech swobodach", z których swoboda przepływu towarów i osób jest bezpośrednio uzależniona od wydolności systemów transportowych (Komisja Europejska, 2011).

Sieć TEN-T (Trans-European Transport Network) stanowi obecnie kluczowy instrument integracji w krajach Europy. Jej celem jest wyeliminowanie „wąskich gardeł" na granicach państw oraz modernizacja infrastruktury w krajach Europy Środkowo-Wschodniej. Korytarz Bałtyk – Adriatyk jest elementem kluczowym, z punktu widzenia Polski, gdyż łączący porty w Gdańsku i Gdyni z południem Europy.

Kluczowe znaczenie ma również rozwój transportu intermodalnego. Unia Europejska kładzie nacisk na łączenie różnych gałęzi transportu, co ma na celu optymalizację kosztów i redukcję emisji CO_2 (Komisja Europejska, 2011).

Współczesna inżynieria transportu stoi przed wyzwaniem zrównoważonego rozwoju. Zgodnie z założeniami Białej Księgi Transportu, sektor ten musi zredukować emisję gazów cieplarnianych w nadchodzących dekadach (Komisja Europejska, 2011).

Rola transportu ewoluuje od prostego przemieszczania dóbr ku zaawansowanym systemom logistycznym typu Just-in-Time. W skali krajowej buduje on potencjał przemysłowy, a w skali europejskiej niweluje bariery geograficzne i polityczne, tworząc jeden, spójny organizm gospodarczy.

5. Transport w handlu i globalizacji

Współczesna gospodarka światowa funkcjonuje jako jeden, ściśle powiązany organizm.

Kluczowym czynnikiem, który umożliwił powstanie tego systemu, jest ewolucja transportu (Kowalski, i Nowak, 2020). W tym rozdziale przeanalizujemy, jak mobilność towarów wpłynęła na strukturę handlu i procesy globalizacyjne, unikając przy tym powielania opisów technicznych środków transportu omówionych wcześniej. Globalizacja nie polega jedynie na sprzedaży gotowych produktów za granicę, ale przede wszystkim na rozproszeniu procesów produkcyjnych. Dzięki niskiemu kosztowi transportu, producenci mogą stosować strategię fragmentacji produkcji (Smith, i Bradley, 2018). Obecnie rzadko zdarza się, aby produkt był w całości wytworzony w jednym kraju. Transport umożliwia realizację modelu, w którym surowce wydobywa się w Afryce lub Australii, przetwarza w Azji, projektuje w Europie, a montuje końcowo w Ameryce. Transport jest "klejem", który trzyma te wszystkie etapy razem. Gdyby koszty logistyki gwałtownie wzrosły, globalny model produkcji stałby się nieopłacalny, zmuszając firmy do powrotu do produkcji lokalnej (Kowalski, i Nowak, 2020).

Efektywność systemów transportowych bezpośrednio przekłada się na konkurencyjność państw na arenie międzynarodowej. Obniżenie barier wejścia sprawia, że mniejsze firmy mogą eksportować towary dzięki dostępowi do globalnych sieci logistycznych. Ponadto, szybki transport pozwala na model "Just-in-Time", minimalizując koszty magazynowania. Ułatwia on również dyfuzję innowacji, czyli przepływ technologii i wiedzy między kontynentami (Smith, i Bradley, 2018).

Konteneryzacja jako katalizator wymiany towarowej

Nie da się omówić roli transportu w globalizacji bez wspomnienia o standaryzacji. Wprowadzenie kontenera zrewolucjonizowało handel bardziej niż jakiekolwiek porozumienie polityczne. Dzięki ujednoliconym wymiarom, czas przeładunku w portach skrócił się o ponad 90%, co drastycznie obniżyło ceny produktów końcowych dla konsumentów (Levinson, 2016, p. 55). Istnieje bezpośrednia korelacja między indeksem łączności transportowej danego kraju a jego rozwojem gospodarczym.

Transport pozwolił regionom świata na specjalizację zgodnie z ich przewagą komparatywną. Przykładowo, kraje Ameryki Południowej mogą być światowymi liderami w eksporcie owoców egzotycznych tylko dlatego, że istnieją zaawansowane łańcuchy chłodnicze, które pozwalają dostarczyć świeży produkt do Europy w ciągu kilku dni lub tygodni (Wiśniewski, 2023).

Integracja transportu z handlem sprawiła, że granice państwowe stały się mniej istotne dla przepływu kapitału, a bardziej istotna stała się jakość infrastruktury portowej, kolejowej i drogowej.

6. Problemy i wyzwania transportu na świecie

Transport, stanowiący podstawę oraz rozwój globalnej gospodarki, stale mierzy się z szeregiem wyzwań, zagrożeń i problemów mających znaczący wpływ na jego funkcjonowanie (European Commission, 2020; Bąk i Burnewicz, 2020). W tym rozdziale przedstawione zostaną problemy i wyzwania, mające zarówno charakter ekonomiczny, środowiskowy jak i geopolityczny.

Istotnym problemem z jakim mierzą się firmy transportowe na całym świecie są rosnące koszty transportu (World Bank, 2019; Bąk i Burnewicz, 2020). Obejmują one przede wszystkim wydatki na paliwo, opłaty drogowe, koszty pracownika oraz utrzymanie oraz modernizację floty. Przedsiębiorstwa stale dostosowują się do nowych norm oraz regulacji, wymusza to inwestycje w nowoczesne, często bardziej ekologiczne technologie (European Environment Agency, 2021). Wpływa to bezpośrednio na ceny towarów i usług, firmy zmuszone do optymalizacji procesów oraz poszukiwania oszczędności, nie zawsze są w stanie utrzymać jakości usług bądź relatywnie krótkiego czasu dostawy.

Jednakże, podczas optymalizacji działalności, ujawnia się kolejny z problemów. Mianowicie, niewydolność infrastruktury transportowej, szczególnie widoczna w dużych

aglomeracjach (European Commission, 2020). Przeciążenia dróg, zjawiska zatorów czy niedostosowanie infrastruktury (jak jednopasmowa/dwupasmowa droga szybkiego ruchu) prowadzą do opóźnień, zwiększenia kosztów oraz spadku efektywności. Problem ten jest szczególnie widoczny w krajach rozwijających się, gdzie infrastruktura nie nadąża za wzrostem gospodarczym. Kolejnym z istotnych problemów, wynikających z presji kosztowej jest niedobór wykwalifikowanych pracowników, w szczególności kierowców zawodowych (ILO, 2020). Wynika to z paru czynników. Starzenie się społeczeństwa, trudne warunki pracy i niska atrakcyjność zawodu sprawiają, że coraz mniej osób wybiera ten zawód. Co z kolei ogranicza możliwość realizacji usług transportowych oraz wpływają na stabilność całego sektora. Jednym z bardziej złożonych problemów z jakim zmaga się branża transportu jest sytuacja geopolityczna (IMF, 2022). Szczególnie w ostatnich latach, podczas zmagań z pandemią a następnie konfliktami zbrojnymi.

Konflikty zbrojne, takie jak wojna w Ukrainie czy w Iranie, prowadzą do zakłóceń w funkcjonowaniu kluczowych szlaków transportowych na całym świecie, ograniczenie dostępności infrastruktury oraz wzrostu kosztów przewozów (IMF, 2022; UNCTAD, 2022). Zmusza to przedsiębiorstwa do poszukiwania alternatywnych tras, co wydłuża czas dostaw oraz obniża efektywność całego systemu. Ponadto sankcje gospodarcze nakładane na poszczególne państwa, ograniczające swobodę przepływu towarów oraz usług transportowych, wpływają na zmianę kierunków handlu międzynarodowego oraz destabilizują istniejące łańcuchy dostaw. Napięcia geopolityczne wpływają również na bezpieczeństwo transportu, szczególnie morskiego i lotniczego. Blokady szlaków morskich czy powietrznych oraz konflikty regionalne mogą (oraz często prowadzą) do poważnych zakłóceń w globalnym handlu. Dodatkowo, zmiany polityki handlowej, jak wprowadzanie ceł, ograniczeń importowych czy regulacji administracyjnych utrudnia swobodny przepływ towarów i jak wcześniej wspomniano zwiększa koszty operacyjne dla przedsiębiorstw transportowych. W rezultacie czynnik geopolityczne stanowią jedno z kluczowych źródeł ryzyka w transporcie.

Podsumowując, choć współcześnie branża transportu zmaga się z wieloma wyzwaniami, to przede wszystkim koszty oraz sytuacja geopolityczna stanowią najważniejsze problemy, wpływając zarówno na przedsiębiorstwa transportowe, jak i na funkcjonowanie całej gospodarki światowej.

7. Rozwój i przyszłość transportu

Transport to jeden z najważniejszych elementów dzisiejszej gospodarki (Rydzkowski i Wojewódzka-Król, 2017). Obecnie widzimy jednak, że ta branża musi przejść szybką transformację. Wymuszają to na nas przede wszystkim problemy związane ze zmianami klimatycznymi, ciągły rozrost miast oraz rozwój nowych technologii. Przyszłość transportu

opiera się na kilku głównych trendach: elektryfikacji, automatyzacji, łączności i współdzieleniu, co w literaturze przedmiotu często określa się angielskim skrótem CASE – Connected, Autonomous, Shared, Electric (McKinsey & Company,

2019).

Elektryfikacja i nowe paliwa:

Odejście od tradycyjnych paliw kopalnych to aktualnie najważniejszy cel w transporcie.

Silniki spalinowe są stopniowo zastępowane przez rozwiązania bardziej ekologiczne.

Pojazdy elektryczne **(**EV**):**

Baterie stają się coraz tańsze i pozwalają na przejechanie większych dystansów na jednym ładowaniu. Dzięki temu "elektryki" zyskują na popularności, zarówno jeśli chodzi o samochody osobowe, jak i pojazdy dostawcze (IEA, 2023).

Napęd wodorowy**:** W przypadku transportu ciężkiego (np. ciężarówki i pociągi) baterie są często zbyt ciężkie i ładują się zbyt długo. Dlatego rozwija się technologie wodorowe. Wodór pozwala na szybkie tankowanie i zapewnia duży zasięg, a efektem ubocznym jego spalania jest tylko para wodna.

Biopaliwa w lotnictwie**:** Lotnictwo to sektor, w którym najtrudniej zrezygnować z tradycyjnego paliwa. Zanim pojawią się samoloty pasażerskie na prąd lub wodór, branża ta inwestuje w zrównoważone paliwa lotnicze (SAF), które powstają z surowców odnawialnych.

Autonomia i Sztuczna Inteligencja (AI)

Sztuczna inteligencja coraz mocniej wkracza do logistyki, pomagając szybciej i lepiej zarządzać ruchem. Pojazdy autonomiczne**,** które potrafią jeździć same, bez udziału kierowcy, mają na celu głównie poprawę bezpieczeństwa i eliminację tzw. błędu ludzkiego (Litman, 2022). W niektórych miejscach na świecie testuje się już autonomiczne taksówki.

Drony i małe roboty najczęściej odpowiadają za prace magazynowe. Nowe ich zastosowania, np. dostarczenie paczki do rąk klienta obecnie stanowią najdroższy etap logistyki. W przyszłości drony latające oraz małe roboty poruszające się po chodnikach mogą przejąć część dostaw kurierskich, co zmniejszy ruch samochodów dostawczych na ulicach i powinno wpłynąć na obniżenie kosztów samej usługi.

AI wykorzystuje się też do sterowania sygnalizacją świetlną w tzw. inteligentnych miastach (Smart Cities). Komputery analizują natężenie ruchu na bieżąco (tzw. inteligentne zarządzanie ruchem) pomaga rozładowywać korki, skierować pojazdy na inne drogi w razie sytuacji nieplanowych (np. wypadek na drodze) itd.

Współczesne podejście do transportu zakłada, że nie musimy posiadać własnego samochodu, aby sprawnie się przemieszczać. Pojęcie MaaS(Mobility as a Service) oznacza integrację wielu różnych rodzajów transportu w jednej cyfrowej usłudze (Hietanen, 2014).

W praktyce oznacza to, że w jednej aplikacji na telefonie możemy zaplanować i opłacić całą trasę – używając np. autobusu, pociągu, a na koniec wypożyczając hulajnogę elektryczną. Usługi takie jak car-sharing (auta na minuty) czy miejskie rowery bardzo dobrze uzupełniają tradycyjną komunikację miejską i pozwalają na elastyczne podróżowanie.

Poza zmianami w samych pojazdach, testuje się również zupełnie nowe sposoby podróżowania:

kolej wysokich prędkości i Hyperloop**.** Rozwój kolei magnetycznych (Maglev), które nie dotykają torów, umożliwia rozwinięcie przez pojazdy znacznych predkości. Równolegle trwają prace nad koncepcją Hyperloop, czyli specjalnymi kapsułami przemieszczającymi się w rurach próżniowych z prędkością zbliżoną do samolotów (Taylor i in., 2021).

Podobne projekty sa rozwijane dla pojazdów samochodowych. Pojawiają się koncepcje mające na celu przeniesienie części ruchu samochodowego pod ziemię. Głównym celem jest odciążenie zakorkowanych ulic na powierzchni i odzyskanie miejsca dla pieszych, a także budowa zielonych korytarzy, mających na celu dekarbonizację sektora automotive.

W najbliższych latach transport będzie stawał się coraz bardziej nowoczesny i proekologiczny. Aby te zmiany się udały, konieczne są nie tylko nowe pomysły i pojazdy, ale też modernizacja dróg, nowe przepisy prawa oraz zmiana naszych codziennych nawyków związanych z podróżowaniem.

8. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza potwierdza, że transport stanowi jeden z najważniejszych filarów współczesnej gospodarki oraz kluczowy element funkcjonowania społeczeństw. Jego rola wykracza daleko poza fizyczne przemieszczanie osób i ładunków – obejmuje również tworzenie wartości dodanej w czasie i przestrzeni, integrację rynków oraz stymulowanie rozwoju gospodarczego.

W artykule wykazano, że transport pełni szereg istotnych funkcji: ekonomicznych, społecznych, przestrzennych oraz politycznych. Umożliwia rozwój handlu krajowego i międzynarodowego, wpływa na lokalizację działalności gospodarczej oraz zwiększa mobilność społeczeństwa. Jednocześnie stanowi fundament procesów globalizacyjnych, umożliwiając tworzenie złożonych, międzynarodowych łańcuchów dostaw.

Analiza poszczególnych gałęzi transportu wskazuje, że każda z nich posiada odmienną specyfikę i zastosowanie, jednak dopiero ich integracja tworzy efektywny system transportowy. Szczególne znaczenie ma rozwój transportu zrównoważonego, który pozwala ograniczać negatywny wpływ sektora na środowisko naturalne.

W pracy podkreślono również kluczową rolę transportu w gospodarce krajowej oraz jego znaczenie dla integracji europejskiej, zwłaszcza w kontekście rozwoju sieci TEN-T. Transport jest nie tylko czynnikiem wzrostu gospodarczego, ale także narzędziem spójności terytorialnej i społecznej.

Jednocześnie sektor transportowy stoi przed wieloma wyzwaniami, takimi jak rosnące koszty działalności, niedobór pracowników, przeciążenie infrastruktury czy niestabilność

geopolityczna. Problemy te wpływają na efektywność systemów transportowych oraz bezpieczeństwo globalnych łańcuchów dostaw.

Analiza literatury pozwala sformułować następujące wnioski:

1. **Transport jest kluczowym determinantem rozwoju gospodarczego** – jego efektywność bezpośrednio wpływa na konkurencyjność państw, poziom handlu oraz funkcjonowanie przedsiębiorstw.
2. **Integracja różnych gałęzi transportu jest niezbędna** – tylko spójny i intermodalny system transportowy pozwala osiągnąć wysoką efektywność logistyczną.
3. **Znaczenie transportu w globalizacji stale rośnie** – umożliwia on funkcjonowanie międzynarodowych łańcuchów dostaw oraz specjalizację gospodarek.
4. **Sektor transportowy stoi przed poważnymi wyzwaniami** – szczególnie w zakresie kosztów, infrastruktury, zasobów ludzkich oraz czynników geopolitycznych.
5. **Transformacja technologiczna jest konieczna** – rozwój pojazdów elektrycznych, autonomicznych oraz inteligentnych systemów zarządzania ruchem stanowi klucz do przyszłości transportu.
6. **Zrównoważony rozwój jest priorytetem** – ograniczenie emisji i negatywnego wpływu na środowisko staje się jednym z głównych kierunków polityki transportowej.
7. **Rola państwa i instytucji międzynarodowych jest kluczowa** – odpowiednie regulacje, inwestycje infrastrukturalne oraz współpraca międzynarodowa są niezbędne dla dalszego rozwoju sektora.

W kontekście przyszłości dynamiczny rozwój nowych technologii, takich jak elektryfikacja, automatyzacja, sztuczna inteligencja oraz koncepcja mobilności jako usługi (MaaS) będzie pełnić kluczowa rolę transformacji sektora transportu. Transformacja ta ma na celu zwiększenie efektywności transportu przy jednoczesnym ograniczeniu jego negatywnego wpływu na środowisko.

Bibliografia

1. Bąk, M., i Burnewicz, J. (2020). *Transport i logistyka w gospodarce*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
2. European Commission (2011). White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area. Brussels: European Commission.
3. European Commission (2020). *Transport in the European Union: Current Trends and Issues*. Brussels: European Commission.
4. European Environment Agency (2021). *Transport and Environment Report 2021*. Copenhagen: EEA.
5. Hietanen, S. (2014). Mobility as a Service – the new transport model? *Eurotransport Magazine*, 12, pp. 2–4.
6. International Energy Agency (2023). *Global EV Outlook 2023*. Paris: IEA.
7. International Labour Organization (2020). *Working Conditions in Transport Sector*. Geneva: ILO.
8. International Monetary Fund (2022). World Economic Outlook: War Sets Back the Global Recovery. Washington: IMF.
9. Kowalski, T., i Nowak, A. (2020). *Globalizacja i transport*. Warszawa: Difin.
10. Levinson, M. (2016). The Box: How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger. Princeton: Princeton University Press.
11. Liberadzki, B., i Mindur, L. (2007). *Transport w gospodarce narodowej*. Warszawa: Instytut Technologii Eksploatacji.
12. Litman, T. (2022). Autonomous vehicle implementation predictions. *Victoria Transport Policy Institute*, 28, pp. 1–45.
13. McKinsey & Company (2019). *The Future of Mobility*. Retrieved from https://www.mckinsey.com
14. Rydzkowski, W., i Wojewódzka-Król, K. (2017). *Transport*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
15. Rydzkowski, W., i Wojewódzka-Król, K. (2022). *Transport. Problemy i perspektywy rozwoju*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
16. Smith, J., i Bradley, T. (2018). Global supply chains and transport systems. *Journal of Transport Economics*, 45(2), pp. 123–145.
17. Taylor, J., et al. (2021). Future transport technologies and infrastructure. *Transport Reviews*, 41(3), pp. 321–340.
18. UNCTAD (2022). *Review of Maritime Transport 2022*. Geneva: United Nations.

19. Wiśniewski, P. (2023). Logistyka chłodnicza w handlu międzynarodowym. *Logistyka*, 6, pp. 45–52.
20. World Bank (2019). *Transport for Development Report*. Washington: World Bank.
21. Wierzejski, T., i Kędzierska-Szczepańska, M. (2017). *Ekonomika transportu*. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.

PLANOWANIE I ORGANIZACJA PRZEWOZÓW

Anna KOSMALA[1], Bartosz KUBEK[2], Mikołaj MUSIOŁ[3], Nina PIOTROWSKA[4], Karolina ŁĄTKA[5], Bożena SZCZUCKA-LASOTA[6]

[1]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, indentyfikator ORCID - brak; ak311338@student.polsl.pl

[2]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, indentyfikator ORCID - brak; bk313243@student.polsl.pl

[3]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, indentyfikator ORCID - brak; mm307463@student.polsl.pl

[4]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, indentyfikator ORCID - brak; np311361@student.polsl.pl

[5]Politechnika Śląska, Katowice, e-mail: karolina.latka7@gmail.com; identyfikator ORCID - brak

[6]Politechnika Śląska, Katowice, e-mail: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl; identyfikator ORCID - 0000-0003-3312-1864

*Korespondencja: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł analizuje kluczowe aspekty planowania i organizacji procesów w transporcie drogowym towarów. Praca skupia się na trzech głównych filarach logistyki transportu: procesie optymalizacji tras, harmonogramowaniu czasu pracy kierowców w oparciu o aktualne przepisy prawne oraz strategicznym zarządzaniu flotą pojazdów. W tekście omówiono rolę nowoczesnych systemów wspomagających zarządzanie (TMS) oraz telematyki w redukcji kosztów operacyjnych, takich jak zużycie paliwa czy puste przebiegi. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi ograniczeń infrastrukturalnych i prawnych na efektywność przewozów. Wnioski z analizy wskazują, że najwyższą wydajność transportową osiąga się poprzez synergię precyzyjnego planowania operacyjnego z dbałością o zasoby techniczne i ludzkie.

Słowa kluczowe: transport drogowy, optymalizacja, zarządzanie flotą, logistyka, czas pracy kierowców

Abstract: This article analyzes key aspects of planning and organizing processes in road freight transport. The work focuses on three main pillars of transport logistics: route optimization, driver time scheduling based on current legal regulations, and strategic fleet management. The text discusses the role of modern management support systems (TMS) and telematics in reducing operating costs, such as fuel consumption and empty runs. Particular attention is paid to the impact of infrastructure and legal constraints on transport efficiency. The conclusions from the analysis indicate that the highest transport efficiency is achieved through the synergy of precise operational planning with attention to technical and human resources.

Keywords: road transport, optimization, fleet management, logistics, driver working time

1. Wprowadzenie

Transport drogowy odgrywa kluczową rolę w systemie transportowym wielu państw na świecie, w tym Polski. Jego znaczenie nieustannie wzrasta i można stwierdzić, iż transport drogowy aktualnie jest podstawą logistyki oraz kluczowym ogniwem w globalnych łańcuchach dostaw.

Transport drogowy jest procesem polegającym na przemieszczaniu osób i towarów za pomocą pojazdów poruszających się po drogach lądowych. Charakteryzuje się on przede wszystkim najwyższą dostępnością przestrzenną oraz zdolnością do realizacji dostaw w systemie „door-to-door" (od drzwi do drzwi), co minimalizuje konieczność kłopotliwych przeładunków na trasie.

Dzięki stale rozwijającej się infrastrukturze drogowej, w tym gęstniejącej sieci autostrad i dróg ekspresowych, transport drogowy stał się bardzo elastyczny, gdyż umożliwia przemieszczanie towarów na różne odległości, bezpośrednio do miejsc docelowych. (BBATS, b.d.) Rosnąca rola tego sektora stawia przed menadżerami logistyki nowe wyzwania. Efektywne planowanie i organizacja przewozów nie są już tylko domeną operacyjną, ale kluczowym elementem budowania przewagi konkurencyjnej. Rentowność przedsiębiorstw transportowych zależy od precyzyjnego balansu między trzema filarami: matematyczną optymalizacją tras, rygorystycznym przestrzeganiem czasu jazdy i czasu pracy kierowców oraz strategicznym zarządzaniem flotą pojazdów.

Wprowadzenie nowoczesnych technologii cyfrowych, takich jak systemy TMS (Transport Management System), telematyka oraz algorytmy sztucznej inteligencji, zrewolucjonizowało podejście do logistyki. Celem niniejszego artykułu jest analiza kluczowych etapów planowania i organizacji procesów transportowych oraz wskazanie współzależności pomiędzy optymalizacją operacyjną, wymogami prawnymi a efektywnym zarządzaniem zasobami technicznymi przedsiębiorstwa.

Proces planowania tras

Proces planowania trasy definiuje się jako ogólny proces określania i organizacji zlecenia transportowego, zawierający ustalone miejsce początkowe, punkty przystankowe oraz miejsce docelowe. Oprócz tego przy planowaniu trasy należy brać pod uwagę warunki geograficzne, drogowe, ale również dostępność floty. Proces ten może odbywać się ręcznie lub przy pomocy specjalistycznego programu komputerowego. (Trans.eu, b.d.)

Aby zaplanować trasę, należy uwzględnić szereg zmiennych w zależności od priorytetu operacji. Priorytetem może być czas przejazdu, jego koszty, ale też czynniki ekologiczne. Aktualnie w większości firm to właśnie koszty grają kluczową rolę. Obejmują one zużycie paliwa oraz opłaty drogowe. (Omega Pilzno, b.d.)

W dobie rosnącej konkurencji i dynamicznie zmieniających się cen paliw, planowanie przestało być procesem statycznym. Aby transport był opłacalny, niezbędne jest dążenie do ciągłej optymalizacji. Nie jest to już tylko kwestia wyboru drogi, ale ciągłe doskonalenie procesów, które pozwala na maksymalne wykorzystanie dostępnych zasobów przy minimalizacji nakładów finansowych.

Aby skutecznie zoptymalizować trasę przejazdu, należy precyzyjnie określić lokalizacje miejsc załadunku i rozładunku, co pozwala ustalić najbardziej efektywną drogę. Następnie trzeba wyznaczyć trasę, która przy tym, że będzie najkrótsza, to będzie również najszybsza. Oczywiście należy uwzględnić natężenie ruchu i aktualne warunki drogowe. Przy planowaniu trasy przejazdu trzeba również uwzględnić infrastrukturę paliwową (stacje benzynowe) oraz parkingi (gdyż planujący trasę musi pamiętać o rygorystycznych przepisach o czasie jazdy obowiązujących kierowców). W celu obniżenia kosztów operacyjnych i zwiększenia efektywności stosuje się eliminację pustych przebiegów. Polega to na zaplanowaniu trasy

w taki sposób, żeby liczba kilometrów pokonywanych przez pojazd bez załadunku była minimalna. W sytuacji, gdy dwa pojazdy jednej firmy (ciągniki siodłowe z lawetą) mają do przebycia tą samą, długą trasę bez załadunku, a ich miejsca startowe są niedaleko siebie, stosuje się zabieg, gdzie jeden pojazd ładowany jest na drugi. Dzięki temu zużycie paliwa jest zminimalizowane, ponieważ tylko jeden z silników pracuje - drugi jest przewożony. Jest to bardzo często spotykany zabieg. Aby zminimalizować koszty operacyjne można zrezygnować z poruszania się drogami płatnymi. Niestety w większości przypadków jest to równoznaczne

z wydłużeniem czasu przejazdu lub opóźnieniem dostawy.

Podczas planowania trasy konieczne jest także uwzględnienie wszelkich obowiązujących przepisów drogowych, takich jak: ograniczenia prędkości, ograniczenia tonażowe, zakazy wjazdu dla określonych pojazdów, strefy ekologiczne. (TIMOCOM, b.d.)

Wspomniane powyżej ograniczenia tonażowe są niezwykle istotnym elementem, wykraczającym poza standardowe planowanie GPS. Należy bowiem uwzględnić parametry techniczne obiektów inżynierskich. Planista musi zweryfikować trasę pod względem skrajni pionowych (wysokość wiaduktów i tuneli) oraz nośności mostów. Ignorowanie tych ograniczeń prowadzi do ryzyka zniszczenia infrastruktury i pojazdu, jak również wymusza czasochłonne objazdy w trakcie realizacji zlecenia.

Dobre zaplanowanie trasy niesie za sobą szereg korzyści. Są to m.in. oszczędność kosztów, większa terminowość dostaw (która ma znaczący wpływ na poziom zadowolenia klienta), zmniejszenie wpływu na środowisko poprzez redukcję emisji spalin, optymalne wykorzystanie zasobów (czyli tzw. unikanie pustych przebiegów).

Należy jednak pamiętać, że nawet najlepiej zoptymalizowana trasa nie zostanie efektywnie zrealizowana bez uwzględnienia kluczowego ogniwa procesu transportowego kierowcy oraz rygorystycznych norm regulujących jego czas pracy.

Harmonogramowanie pracy kierowców

Planowanie i organizacja przewozów jest niemożliwe do wykonania bez uwzględnienia czasu pracy kierowcy. Przepisy prawne o czasie pracy kierowcy pojazdu o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 tony nieco różnią się od tych dla kierowcy pojazdu o dopuszczalnej masie całkowitej przekraczającej 3,5 tony. Czas pracy dla kierowcy pojazdu o DMC do 3,5t nie jest zbyt restrykcyjnie ograniczany i w większości wynika z ograniczeń nakładanych przez Prawo Pracy. Według Prawa Pracy dzienny odpoczynek dla takiego kierowcy wynosi 11 godzin (czyli odpowiednio 35 godzin tygodniowo). Oznacza to, że teoretycznie czas pracy tego kierowcy to 13 godzin. Niestety obecnie w takich pojazdach nie montuje się tachografu, więc w praktyce czas pracy kierowcy nie jest monitorowany.

Tachograf to urządzenie pomiarowe, które rejestruje i zapisuje czas jazdy oraz odpoczynku, a także prędkość pojazdu i inne czynności kierowcy. Jego głównym zadaniem jest kontrola przestrzegania przepisów dotyczących czasu pracy kierowców w celu zapobiegania przemęczeniu w transporcie drogowym. (Solid Security, b.d.)

O ile przepisy dotyczące czasu jazdy zwyczajnego kierowcy są dość proste, o tyle ograniczenia czasu pracy kierowcy pojazdu, którego DMC jest większa niż 3,5t są doprecyzowane i bardzo rygorystyczne.

Standardowo łączny czas prowadzenia pojazdu wynosi maksymalnie 9 godzin dziennie. Jednakże są odstępstwa od tej reguły. Dwukrotnie w tygodniu kalendarzowym czas prowadzenia pojazdu może zostać wydłużony do 10 godzin. Maksymalny czas jazdy ciągłej wynosi 4,5 godziny. Po upływie tego czasu kierowca zobowiązany jest odbyć przerwę (tzw. pauzę) o długości 45 minut lub 15 i 30 minut (oznacza to, że kierowca ma kilka opcji odbycia przerwy: odbywa przerwę trwającą całe 45 minut lub odbywa przerwę trwającą minimum 15 minut i później - po kolejnym okresie jazdy - odbywa przerwę trwającą minimum 30 minut). W przeciągu 6 godzin pracy kierowca ma obowiązek odbyć jedną 45-minutową przerwę. Dodatkowo każdego dnia kierowca ma czas na odpoczynek dzienny trwający według przepisów 11 godzin w ciągu doby. W przypadku wydłużenia czasu jazdy - czas odpoczynku dziennego skraca się do 9 godzin. Określa się jeszcze termin taki jak tygodniowy oraz dwutygodniowy czas jazdy, gdzie tygodniowy oznacza, że od poniedziałku do niedzieli kierowca może jechać maksymalnie 56 godzin, a dwutygodniowy oznacza, że kierowca może jechać w okresie od poniedziałku do niedzieli maksymalnie 90 godzin. (Spedytor.org, b.d)

Ciekawa sytuacja występuje w przypadku podwójnej obsady, czyli sytuacji, gdzie jednym pojazdem porusza się dwóch kierowców i jeżdżą na zmianę. Ich standardowy odpoczynek dzienny wynosi 9 godzin.

Rygorystyczność tych przepisów wynika z faktu, że każda minuta przekroczenia rejestrowana jest przez tachograf cyfrowy, a kary nakładane przez organy kontrolne - bardzo wysokie.

Z perspektywy organizacji przewozów oznacza to, że plan przewozu musi być ułożony

z marginesem bezpieczeństwa na nieprzewidziane zdarzenia, tkie jak zatory drogowe, remonty drogowe, czy brak wolnych miejsc parkingowych na parkingach dla ciężarówek.

Poza aspektem prawnym, harmonogramowanie pracy kierowcy musi uwzględniać czynnik ludzki. Efektywny planista jest zobowiązany zadbać o odpowiednią rotację kierowców

i przewidzieć czas na powrót do bazy lub miejsca zamieszkania.

Odpowiednio zaplanowany czas pracy kierowcy nie tylko eliminuje ryzyko kar, ale przede wszystkim zapobiega zmęczeniu, które jest główną przyczyną wypadków w transporcie drogowym.

Należy pamiętać, że nawet najlepiej przygotowany harmonogram pracy kierowcy i optymalna trasa mogą zawieść, jeśli zawiedzie środek transportu. Dlatego trzecim, niezbędnym filarem organizacji przewozów jest kompleksowe zarządzanie flotą, które zapewnia gotowość techniczną pojazdów do realizacji postawionych zadań.

Zarządzanie flotą

Zarządzanie flotą to proces polegający na kontrolowaniu wszystkich pojazdów od momentu zakupu do zakończenia ich eksploatacji. Proces ten ma na celu kontrolę kosztów, efektywne wykorzystanie floty oraz przestrzeganie obowiązujących przepisów i regulacji. Flotą można zarządzać za pomocą nowoczesnych komputerów pokładowych zainstalowanych w ciężarówkach. W ten sposób dane można odczytywać zdalnie i na bieżąco. (Trimble Transport & Logistics, b.d.)

Oprócz zczytywania danych technicznych pojazdów, można też uzyskać informacje dotyczące jazdy kierowców. W systemie można odczytać czy kierowca gwałtownie hamuje, czy nadużywa gazu itp. W ten sposób zarządzający flotą może szybko zareagować i doedukować kierowców, dzięki czemu zapobiega awariom i tym samym obniża koszty utrzymania floty.

Zarządzanie flotą obejmuje także zarządzanie kosztami floty, określane inaczej jako Total Cost of Ownership (TCO). Analiza i kontrola wszystkich kosztów związanych z eksploatacją pojazdów jest niezbędna do maksymalizacji efektywności floty. Aby skutecznie zarządzać kosztami paliwa należy monitorować zużycie paliwa wszystkich posiadanych pojazdów. Warto

wprowadzić programy oszczędności paliwa, np. przeszkolić kierowców z eco-drivingu. W celu obniżenia kosztów serwisowych i napraw wykonuje się regularne serwisowanie i konserwację pojazdów. Regularne planowanie przeglądów technicznych i konserwacji pozwala zapobiec poważnym awariom i przedłużyć żywotność pojazdu. Utrzymanie floty w dobrym stanie techicznym nie tylko spowoduje obniżenie kosztów napraw, ale też pozytywnie wpłynie na bezpieczeństwo. (Cartrack, b.d.)

Ważnym elementem zarządzania flotą jest również optymalizacja cyklu życia pojazdu. Zarządzający musi podjąć strategiczną decyzję, w którym momencie eksploatacja auta przestaje być rentowna (ze względu na rosnące koszty napraw i spadek wartości rezydualnej) i kiedy należy dokonać wymiany taboru na nowy. Nowoczesne podejście opiera się na serwisowaniu predykcyjnym (predictive maintenance), gdzie dzięki czujnikom i systemom łączności, serwis planowany jest nie tylko na podstawie przebiegu, ale realnego zużycia podzespołów.

Ponadto, poza monitoringiem stylu jazdy, kluczowe jest zarządzanie gospodarką paliwową i ogumieniem. Opony stanowią jeden z najwyższych kosztów eksploatacyjnych po paliwie, dlatego regularna kontrola ciśnienia i stanu bieżnika jest niezbędna dla zachowania bezpieczeństwa i niskiego spalania.

Podsumowanie

Analiza procesów planowania tras, harmonogramowania pracy kierowców oraz zarządzania flotą jenoznacznie wskazuje, że elementy te stanowią nierozerwalną całość. Skuteczna organizacja przewozów nie jest możliwa przy zignorowaniu któregokolwiek z tych filarów. Nawet najbardziej zaawansowana, matematyczna optymalizacja trasy pod kątem kosztów paliwa i opłat drogowych zawiedzie, jeśli kierowca przekroczy dopuszczalne normy czasy pracy, a najepiej przygotowany harmonogram stanie się nieaktualny w przypadku awarii zaniedbanego technicznie pojazdu.

Współczesny transport drogowy, dążąc do maksymalnej efektywności, musi opierać się na synergii nowoczesnych technologii (stystemy TMS, telematyka) oraz rygorystycznego przestrzegania standardów bezpieczeństwa. Tylko zintegrowane zarządzanie tymi obszarami pozwala przedsiębiorstwom na zachowanie płynności operacyjnej, konkurencyjności cenowej oraz wysokiej jakości usług w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu rynkowym.

Bibliografia

1. BBATS. (b.d.). Czym jest transport drogowy? Dostęp z dnia 13.05.2026 z: https://bbats.pl/czym-jest-transport-drogowy/
2. Cartrack. (b.d.). Zarządzanie flotą bez tajemnic – przewodnik Cartrack. Dostęp z dnia 13.05.2026 z: https://magazyn.cartrack.pl/zarzadzanie-flota-bez-tajemnic-przewodnik-cartrack/
3. Omega Pilzno. (b.d.). Planowanie transportu – sztuka optymalizacji i uzyskiwania kompromisu. Dostęp z dnia 13.05.2026 z: https://omega-pilzno.com.pl/planowanie-transportu-sztuka-optymalizacji-i-uzyskiwaniakompromisu/
4. Solid Security. (b.d.). Tachograf – co to jest i kto musi go posiadać? Dostęp z dnia 08.04.2026 https://solidsecurity.pl/blog/tachograf-co-to-jest-i-kto-musi-go-posiadac
5. Spedytor.org. (b.d.). Czas pracy kierowcy. Dostęp z dnia 08.04.2026 z: https://spedytor.org/czas-pracy-kierowcy/
6. TIMOCOM. (b.d.). Planowanie i optymalizacja tras w transporcie drogowym. Dostęp z dnia 11.05.2026 z: https://www.timocom.pl/blog/planowanie-optymalizacja-tras-w-transporcie-drogowym700040
7. Trans.eu. (b.d.). Planowanie tras. Dostęp z dnia 04.04.2026 z: https://edu.trans.eu/wydarzenie/planowanie-tras
8. Trimble Transport & Logistics. (b.d.). Zarządzanie flotą. Dostęp z dnia 29.04.2026 z: https://www.trimbletl.com/pl/glossary_term/zarzadzanie-flota/

UNIWERSYTET PRZEDSIĘBIORCZY JAKO ŚRODOWISKO KSZTAŁTOWANIA KOMPETENCJI PRZYSZŁOŚCI

Aneta ALEKSANDER

Politechnika Śląska; aneta.aleksander@polsl.pl; ORCID 0000-0001-5442-5520

Małgorzata Koszembar-Wiklik

Politechnika Śląska; malgorzata.koszembar-wiklik@polsl.pl; ORCID 0000-0002-8603-1646

Marek Krannich

Politechnika Śląska; marek.krannich@polsl.pl; ORCID 0000-0001-6513-5369

Streszczenie: Artykuł porusza aktualne kwestie związane z kształtowaniem kompetencji przyszłości na poziomie nauczania w szkolnictwie wyższym. Model uniwersytetu przedsiębiorczego stał się jednym z kluczowych kierunków transformacji szkolnictwa wyższego w Polsce i na świecie. Zmiany technologiczne, cyfryzacja, globalizacja oraz rosnąca niepewność rynku pracy wymuszają redefinicję roli uczelni jako instytucji nie tylko przekazujących wiedzę, lecz także aktywnie uczestniczących w procesach innowacyjnych i gospodarczych. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera problem kształtowania kompetencji przyszłości, rozumianych jako zestaw umiejętności, postaw i wiedzy niezbędnych do funkcjonowania w dynamicznie zmieniającym się świecie pracy. Celem artykułu jest analiza zależności między ideą uniwersytetu przedsiębiorczego, a procesem rozwijania kompetencji przyszłości u studentów i absolwentów. Autorzy oparli artykuł na przeglądzie literaturowym w którym zastosowano podejście argumentacyjne i opisowe, gdzie punktem wyjścia jest twierdzenie, iż zmiana wizji uniwersytetu wymaga uwzględnienia wymagań rynku pracy i w tym modelu kompetencje przyszłości nie stanowią dodatku do programu studiów, lecz jego centralny komponent.

Słowa kluczowe: kompetencje przyszłości, uniwersytet przedsiębiorczy, gospodarka cyfrowa, kształtowanie kompetencji

THE ENTREPRENEURIAL UNIVERSITY AS AN ENVIRONMENT FOR DEVELOPING FUTURE COMPETENCIES

Abstract: The article examines contemporary issues pertaining to the cultivation of future-oriented competencies within the framework of higher education instruction. The entrepreneurial university model has emerged as one of the principal trajectories of higher education transformation, both in Poland and internationally. Rapid technological advancement, accelerating digitalization, intensifying globalization, and the growing precariousness of the labor market collectively necessitate a fundamental redefinition of the

institutional role of universities — reconceptualizing them not merely as knowledge-transmitting entities, but as active participants in innovation ecosystems and broader socioeconomic processes. Within this context, the question of developing future competencies acquires particular scholarly approach, where such competencies are understood as an integrated set of skills, attitudes, and knowledge required for effective functioning in a dynamically evolving labor world. The primary objective of this article is to critically analyze the relationship between the theoretical construct of the entrepreneurial university and the processes through which future competencies are systematically developed among current students and graduates. The authors based the article on a literature review that employs an argumentative and descriptive approach, where the starting point is the claim that changing the vision of the university requires taking labor market demands into account, and in this model, future competencies do not constitute an addition to the curriculum but its central component.

Keywords: Employer expectations, sustainable development, digital economy, future competencies.

Wstęp

Współczesne uniwersytety i całe szkolnictwo wyższe funkcjonuje w warunkach dynamicznych przemian technologicznych, społecznych i gospodarczych. Cyfrowa i zielona transformacja, automatyzacja, globalizacja oraz rosnąca złożoność otoczenia instytucjonalnego sprawiają, że tradycyjny model uniwersytetu, skoncentrowany na badaniach naukowych i przekazywaniu wiedzy, staje się niewystarczający. Przeobrażenia w postrzeganiu roli uniwersytetu zauważalne są w Polsce już od kilkudziesięciu lat, jednak dynamika zmian w ostatnich latach przyśpieszyła transformację uniwersytetów i na nowo określiło jego w gospodarce i społeczeństwie. Nastąpiło przejście od uniwersytetu liberalnego do uniwersytetu przedsiębiorczego, który kieruje się innymi zasadami, zgodnymi z logiką rynkową. Uniwersytet przedsiębiorczy charakteryzuje się silną władzą centralną uczelni, nastawieniem na promowanie przedsiębiorczości i współpracę z biznesem oraz poszukiwaniem pozabudżetowych źródeł finansowania. Taka koncepcja uniwersytetu zakłada aktywne uczestnictwo uczelni w procesach innowacyjnych, gospodarczych i społecznych oraz wdrożenie modelu dydaktycznego opartego na uczeniu się przez działanie, takie jak projekty interdyscyplinarne, laboratoria innowacji, inkubatory przedsiębiorczości, czy współpraca z otoczeniem społeczno-gospodarczym.

Zmiana postrzegania roli uniwersytetu

Uniwersytety są jednym z najstarszych instytucji w naszym społeczeństwie. Przez wiele stuleci edukacja była przywilejem bogatych elit, podczas gdy obecnie edukacja jest czymś powszechnym i dostępnym dla każdego, przynajmniej w krajach wysokorozwiniętych. Nazwa „uniwersytet" funkcjonuje od późnego średniowiecza, jednak idei tego typu szkoły należy szukać w starożytności (Kobylarek, 2002). W dokumentach prawnych XII i XIII wieku universitas oznaczała korporację, najczęściej zrzeszenie mieszczan, kupców lub rzemieślników, posiadającą osobowość prawną i określone przywileje. Dopiero z czasem termin ten zaczął być stosowany wobec wspólnoty nauczycieli i studentów, tworzących autonomiczną korporację nauczającą (de Ridder-Symoens, 2020). Najstarsze europejskie ośrodki akademickie, takie jak Bolonia czy Paryż, nie były początkowo określane mianem uniwersytetów. W Bolonii funkcjonowały *universitates scholarium*, czyli stowarzyszenia studentów, natomiast w Paryżu - *universitas magistrorum et scholarium*, wspólnota mistrzów i uczniów (Southern, 2020). To właśnie paryski model korporacji nauczycielskiej przyczynił się do utrwalenia nazwy *universitas* jako określenia instytucji nauczającej, posiadającej autonomię, strukturę organizacyjną oraz prawo nadawania stopni naukowych.

Początkowo u podstaw uniwersytetu leżała autonomiczność, czyli niezależność od państwa, ale również od presji społecznej (Gadacz, Kłoczowski, 2012). Orędownikiem uniwersytetu liberalnego był I. Kant. W swej koncepcji uniwersytetu zakładał on autonomię społeczności uniwersyteckiej od administracji państwowej i instytucji religijnych, uniwersytet funkcjonować miał jako wolny i stanowić wspólnotę uczonych (Kant, 2003). Innym uczonym, który na początku XIX wieku podjął się próby określenia roli uniwersytetu, był Niemiec Wilhelm von Humboldt. Idea uniwersytetu Humboldta była jedną z najbardziej wpływowych idei w historii uniwersytetów. Humboldt, postulował, aby połączyć wszystkie instytucje naukowe: uniwersytety, akademie i instytuty oraz opowiadał się za uniwersytetem, który będzie nie tylko miejscem nauczania, lecz głównie miejscem badań naukowych (Andrzejewski, 1989). Wyeksponowanie przez Humboldta roli badań naukowych prowadziło do tego, iż działalność dydaktyczna wydawała się schodzić na drugi plan. Idea uniwersytetu prowadzącego badania została przyjęta w większości systemów szkolnictwa wyższego na świecie (Cwynar, 2005). Inne spojrzenie na rolę uniwersytetu miał J.H. Newman. W koncepcji Newmana uniwersytet powinien kształtować ludzi sprawujących poszczególne stanowiska w życiu społecznym, ale także ludzi ukształtowanych moralnie, gdzie wykształcenie nie jest tożsame z wychowaniem, a uniwersytet powinien nauczać wiedzy uniwersalnej, przygotowując do życia w społeczeństwie (Newman, 1990). Program nauczania powinien być oparty o przedmioty racjonalne, posiadające logiczne uzasadnienie.

Dziś mówimy o dwóch modelach uniwersytetu: europejskim i amerykańskim (Puzyn, 2020). Na ukształtowanie europejskiego modelu edukacji wpływ miała przyjęta Wielka Karta Uniwersytetów Europejskich, uchwalona na Uniwersytecie w Bolonii 1988 roku, w 900 rocznicę jego powstania. Zmiany, jakie przyniósł XIX wiek spowodowały, iż uniwersytet powoli tracił cechy korporacji, aż w końcu stał się instytucją państwową, kształcącą urzędników, lekarzy, inżynierów i innych fachowców, którzy podejmowali pracę w różnych dziedzinach gospodarki (Antonowicz, 2005). Jednak już na przełomie XX i XXI w. rola społeczna i kulturowa uniwersytetu zaczęła być podważana. Wynikało to przede wszystkim z wprowadzenia mechanizmów rynkowych, globalizacji oraz pojawienia się alternatywnych źródeł finansowania uczelni.

Ewolucyjne zmiany w podejściu do roli i organizacji uniwersytetów są wynikiem ich przystosowania się do zmieniającego się świata i oczekiwań otoczenia. Pojęcie uniwersytetu przedsiębiorczego zostało spopularyzowane przez Burtona R. Clarka, który opisał je jako instytucję zdolną do aktywnego reagowania na zmiany otoczenia, dywersyfikacji źródeł finansowania oraz budowania trwałych relacji z sektorem gospodarczym (Clark, 2005). W tym modelu uczelnia staje się organizacją innowacyjną, elastyczną i konkurencyjną. Uniwersytet przedsiębiorczy oparty jest przede wszystkim na rozwoju współpracy z biznesem i administracją publiczną, dywersyfikacji źródeł finansowania z malejącą rolą państwa, wzrastającej orientacji na praktykę, komercjalizacji badań, umiędzynarodowianiu działalności i badań, modyfikacji kierunków uczenia się zgodnie z zapotrzebowaniem rynku i aktualnymi trendami technologicznymi. Często wymaga to zmiany kultury organizacyjnej w kierunku bardziej elastycznych struktur sprzyjających innowacyjności. Nowy model uczelni wpisuje się w szerszy trend „urynkowienia" sektora publicznego, w którym uczelnie funkcjonują w warunkach konkurencji o studentów, pracowników i środki finansowe.

Sama idea uniwersytetu przedsiębiorczego ma zarówno zwolenników, jak i przeciwników. Przeciwnicy przeciwstawiają się traktowaniu uniwersytetów jako podmiotów służebnych wobec korporacji, które narzucają kierunki badań i kształcenia oraz są przeciwni redukowaniu uczelni do kalkulacji ekonomicznej (Chłodna, 2008). Zwolennicy uniwersytetu przedsiębiorczego uważają, iż powinny być przedsiębiorcze i innowacyjne, podobnie jak każda firma, a największą przeszkodą dla przedsiębiorczości organizacji publicznych jest sama organizacja (Drucker, 2004). Aby uniwersytet mógł reagować i przeprowadzać zmiany musi stać się uniwersytetem przedsiębiorczym, powinien więc poszukiwać zdywersyfikowanych źródeł finansowania, zwiększać otwartość na nowe formy organizacyjne, intensyfikować współpracę z otoczeniem w zakresie transferu wiedzy, kontaktów biznesowych, a także rozwijać kulturę organizacyjną na wzór firm (Clark, 2005). Znaczenie tego modelu wzrasta w obliczu zmian na rynku pracy, które są determinowane m.in. rozwojem sztucznej inteligencji, automatyzacją, serwicyzacją gospodarki, internacjonalizacją organizacji oraz zmianami demograficznymi. Z kolei w kontekście gospodarki 4.0 uczelnie przedsiębiorcze pełnią rolę

ośrodków transferu technologii, wdrażając nowoczesne narzędzia cyfrowe, platformy analityczne oraz rozwiązania oparte na sztucznej inteligencji.

Konsekwencje zmiany paradygmatu funkcjonowania uniwersytetu pociąga za sobą skutki w obszarze:

- nauki - wzrost znaczenia badań stosowanych kosztem badań podstawowych,
- dydaktyki - większy nacisk na kompetencje praktyczne i współpracę z pracodawcami,
- zatrudnionych pracowników akademickich - rosnąca presja na publikowanie, pozyskiwanie grantów i współpracę z biznesem,
- studentów - traktowanie przez nich edukacji jako inwestycji ekonomicznej, a nie procesu formacyjnego.

Model uniwersytetu na kształt przedsiębiorstwa jest szczególnie istotny w procesie kształtowania kompetencji przyszłości, definiowanych jako zestaw umiejętności, postaw i wiedzy niezbędnych do funkcjonowania w zmieniającym się świecie pracy. Dzisiejszy uniwersytet powinien rozwijać te kompetencje, które są kluczowe z punktu widzenia pracodawców, czyli musi być środowiskiem rozwijania kompetencji cyfrowych i miękkich bez względu czy mamy do czynienia z kierunkami humanistycznymi, społecznymi, czy technicznymi. Na te dwie grupy kompetencji cyfrowe (m.in. digitalizowania analogowych procesów, zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji, umiejętność pracy z danymi, innowacyjnego podejścia do złożonych problemów) i miękkie (w tym rozwijanie inteligencji emocjonalnej, wzmacnianie psychicznej odporności, umiejętność współpracy w zespole i komunikacji interpersonalnej) wskazują różne raporty z badań rynku pracodawców, m.in. na nie wskazuje raport firmy szkoleniowo-doradczej CERTES z 2025 roku (CERTES, 2025) czy raport PARP z 2022 roku (Łapińska, 2022). Integracja dydaktyki z praktyką cyfrową odbywa się m.in. poprzez laboratoria innowacji, kursy programowania, analizy danych i AI dostępne dla studentów wszystkich kierunków, projekty realizowane w środowiskach cyfrowych, czy współpracę z firmami technologicznymi. Studenci uczestniczący w programach przedsiębiorczości akademickiej osiągają wyższy poziom kompetencji cyfrowych i większą gotowość do pracy w środowisku zautomatyzowanym. Przedsiębiorczość akademicka nie jest tożsama z komercjalizacją wiedzy. Obejmuje ona również rozwijanie postaw kreatywnych, zdolności współpracy, odpowiedzialności społecznej oraz kompetencji cyfrowych, które stają się niezbędne w każdym sektorze gospodarki. Z kolei kształtowanie kompetencji miękkich w modelu uniwersytetu przedsiębiorczego odbywa się poprzez pracę projektową, zespołową, rozwiązywanie problemów metodą design thinking, pracę zespołów multidyscyplinarnych - wprowadzenie przedmiotów realizowanych w formie PBL (project based learning). Tego typu środowisko sprzyja rozwijaniu kompetencji miękkich, takich jak kreatywność, współpraca, adaptacyjność i odporność psychiczna.

Uniwersytet przedsiębiorczy buduje także sieci współpracy z przedsiębiorstwami, instytucjami publicznymi, czy organizacjami sektora non profit. Jest to istotny fragment

kształcenia wyższego, gdyż kompetencje cyfrowe i miękkie rozwijają się najskuteczniej w środowisku, które łączy teorię z praktyką. Dzięki zajęciom w rzeczywistym środowisku studenci uczą się pracy nad realnymi problemami, komunikacji z interesariuszami, czy wykorzystywania technologii w praktyce.

Mimo licznych korzyści model uniwersytetu przedsiębiorczego wiąże się z wyzwaniami m.in. z: ryzykiem nadmiernej komercjalizacji, presją na efektywność kosztem jakości kształcenia, nierównościami w dostępie do technologii, koniecznością stałego podnoszenia kompetencji kadry akademickiej, marginalizacji nauk humanistycznych oraz promowaniem kierunków praktycznego kształcenia kosztem kierunków ogólnoakademickich.

Kompetencje jako wyzwanie przyszłości

W najnowszej literaturze przedmiotu kompetencje nie są ujmowane jako prosta suma wiedzy i umiejętności, lecz jako zintegrowana zdolność do skutecznego działania w określonym kontekście. W tym sensie obejmują one mobilizację wiedzy, umiejętności, postaw i wartości wobec złożonych wymagań sytuacyjnych. Szczególnie wyraźnie widać to w dyskusji o kompetencjach przyszłości, gdzie akcent przesuwa się z reprodukcji wiedzy na sprawczość, samoorganizację i zdolność działania w warunkach niepewności oraz szybkiej zmiany (Ehlers, 2024). Taki sposób rozumienia kompetencji ma istotne konsekwencje dla szkolnictwa wyższego: profil absolwenta nie może być ograniczony do efektów stricte kierunkowych, lecz powinien obejmować także kompetencje transferowalne, pozwalające funkcjonować w środowisku pracy i życia społecznego o wysokim stopniu zmienności.

Współczesna literatura podkreśla zarazem, że pole badawcze kompetencji przyszłości pozostaje heterogeniczne. Nie istnieje jedna, powszechnie uzgodniona lista takich kompetencji; zamiast tego funkcjonują różne ramy pojęciowe, klasyfikacje i modele. Ehlers (2024), syntetyzując dorobek badań nad kompetencjami przyszłości w szkolnictwie wyższym, wskazuje, że jest to dynamicznie rozwijające się pole, w którym poszczególne propozycje różnią się zarówno podstawą teoretyczną, jak i sposobem operacjonalizacji kompetencji. Jednocześnie autor pokazuje, że mimo tej różnorodności można wyodrębnić względnie stabilne grupy kompetencji, które powracają w różnych badaniach i raportach.

Zgodnie z najnowszymi badaniami kompetencje można dzielić co najmniej na trzy komplementarne sposoby. Po pierwsze, według struktury wewnętrznej, a więc na komponent poznawczy, sprawnościowy i aksjonormatywny; innymi słowy, kompetencja obejmuje to, co jednostka wie, potrafi zrobić oraz jakie postawy i wartości uruchamia w działaniu. Po drugie, według obszaru funkcjonowania, co dobrze oddaje model Ehlersa (2024), wyróżniający:

- kompetencje związane z uczeniem się i rozwojem osobistym,
- kompetencje związane z projektowaniem, innowacją i rozwiązywaniem problemów,

- kompetencje związane ze współtworzeniem środowiska społecznego i organizacyjnego.

Po trzecie, według dominującej domeny zastosowania, co w praktyce badań nad profilem absolwenta prowadzi do wyróżniania kompetencji poznawczych, cyfrowych i technicznych, społeczno-komunikacyjnych, etycznych oraz związanych ze zrównoważonym rozwojem (Smalej-Kołodziej et al., 2025). Na tej podstawie można stwierdzić, że w najnowszej literaturze za kompetencje przyszłości najczęściej uznaje się kilka powtarzających się kategorii.

Pierwszą z nich tworzą kompetencje samorozwojowe i uczenia się przez całe życie. Ehlers (2024) pokazuje, że w analizowanych podejściach szczególnie często pojawiają się kompetencje osobiste (self-competency) oraz umiejętność uczenia się (learning literacy). Oznacza to, że przyszłościowy profil absolwenta obejmuje nie tylko gotowość do aktualizacji wiedzy, ale także zdolność do autorefleksji, samoregulacji i uczenia się w warunkach niestabilności. W praktyce szkoły wyższej są to kompetencje fundamentalne, ponieważ warunkują możliwość dalszego rozwoju zawodowego po ukończeniu studiów.

Drugą grupę stanowią kompetencje poznawcze wyższego rzędu, przede wszystkim krytyczne myślenie, rozwiązywanie złożonych problemów, kreatywność i myślenie projektowe. W tym właśnie kierunku przesuwa się logika kształcenia w szkolnictwie wyższym: od reprodukcji treści ku generowaniu nowych rozwiązań. Ehlers (2024) wskazuje, że w metaanalizie istniejących modeli szczególnie często pojawiają się kompetencje związane z myśleniem projektowym (design-thinking competence) oraz kompetencje związane z działaniem w sytuacjach emergentnych. Z kolei Smalej-Kołodziej i in. (2025) akcentują rosnące znaczenie wyższych kompetencji kognitywnych obok umiejętności technicznych. Oznacza to, że przyszłościowy profil absolwenta powinien obejmować nie tylko wiedzę specjalistyczną, ale także zdolność jej twórczego i krytycznego wykorzystania.

Trzecią, wyjątkowo silnie eksponowaną grupą są kompetencje cyfrowe i technologiczne. W najnowszych badaniach nie są one redukowane do operacyjnej obsługi narzędzi, lecz obejmują znacznie szersze spektrum działań. Mejías-Acosta i in. (2024) pokazują, że kompetencje cyfrowe studentów szkolnictwa wyższego można ujmować w czterech wymiarach: komunikacja i bezpieczeństwo cyfrowe, dostęp do treści i zarządzanie nimi, tworzenie treści cyfrowych i użycie mediów cyfrowych oraz empatia cyfrowa. Z kolei Ehlers (2024) podkreśla, że kompetencje cyfrowe (digital literacy) należą do najczęściej wskazywanych kompetencji przyszłości, ale jednocześnie zwraca uwagę na częsty deficyt komponentu krytyczno-refleksyjnego i etycznego w wielu modelach. W kontekście profilu absolwenta oznacza to konieczność łączenia sprawności technologicznej z odpowiedzialnym, krytycznym i twórczym użyciem technologii.

Czwartą grupę tworzą kompetencje społeczne i komunikacyjne. Badania nad kompetencjami przyszłości konsekwentnie pokazują, że mimo cyfryzacji i automatyzacji nie tracą one znaczenia, lecz przeciwnie, stają się jeszcze bardziej istotne. Ehlers (2024) wskazuje, że umiejętność współpracy oraz umiejętności komunikacyjne (cooperation competence i

communication competence) należą do najczęściej występujących kategorii w analizowanych modelach. Podobnie Smalej-Kołodziej i in. (2025) podkreślają trwałe znaczenie kompetencji społecznych, nawet w warunkach digitalizacji i wirtualizacji relacji. Dodatkowo badania z obszaru edukacji medycznej pokazują, że do kompetencji przyszłości zalicza się również pracę w zespołach interdyscyplinarnych, komunikację, wrażliwość kulturową i zdolność funkcjonowania w środowiskach zróżnicowanych społecznie i kulturowo (Miguez-Pinto et al., 2025). Z perspektywy szkolnictwa wyższego oznacza to, że profil absolwenta powinien obejmować zdolność współpracy, komunikacji międzykulturowej i działania w złożonych układach organizacyjnych.

Piątą grupę stanowią kompetencje etyczne, związane z odpowiedzialnością i ze zrównoważonym rozwojem. Choć Ehlers (2024) zauważa, że kompetencje etyczne bywają rzadziej eksponowane niż cyfrowe czy komunikacyjne, nie oznacza to ich marginalności. Przeciwnie, rozwój AI, automatyzacji i gospodarki cyfrowej czyni je coraz bardziej koniecznymi. Smalej-Kołodziej i in. (2025) wskazują wyraźnie na rosnące znaczenie kompetencji związanych ze zrównoważonym rozwojem, natomiast Miguez-Pinto i in. (2025) akcentują wagę rozumowania etycznego i humanistycznego wymiaru profesjonalizmu. W konsekwencji nowoczesny profil absolwenta powinien łączyć efektywność działania z odpowiedzialnością społeczną, środowiskową i etyczną.

Syntezę prezentowanych podejść przedstawia tabela nr 1.

Tabela 1. Kompetencje przyszłości – wyniki przeglądu literatury.

Źródło	**Definicje kompetencji przyszłości**	**Kategorie kompetencji przyszłości**	**Kompetencje uznawane za przyszłościowe**
Ehlers (2024)	Kompetencje przyszłości to kompetencje umożliwiające rozwiązywanie złożonych problemów w warunkach wysokiej nieprzewidywalności, w sposób samoorganizujący się; obejmują mobilizację wiedzy, umiejętności, postaw i wartości	Autor porządkuje kompetencje w trzech polach: umiejętności uczenia się i rozwoju, Umiejętności projektowania i innowacji, umiejętności współtworzenia; dodatkowo osadza je w modelu działania: wiedza, zdolność działania, wartości/motywy	kompetencje osobiste, umiejętność uczenia się, umiejętność korzystania z technologii cyfrowych (biegłość cyfrowa), kompetencje w zakresie myślenia projektowego, kompetencje w zakresie współpracy, kompetencje komunikacyjne; rzadziej eksponowane: kompetencje etyczne, samostanowienie.
Mejías-Acosta et al. (2024)	Kompetencje cyfrowe są ujmowane jako wiedza, umiejętności i postawy potrzebne do skutecznego, bezpiecznego,	W badaniu empirycznym wyodrębniono 4 wymiary: komunikacja i bezpieczeństwo cyfrowe, dostęp do	bezpieczeństwo cyfrowe, komunikacja cyfrowa, wyszukiwanie i zarządzanie informacją, tworzenie treści cyfrowych, korzystanie z

Źródło	Definicje kompetencji przyszłości	Kategorie kompetencji przyszłości	Kompetencje uznawane za przyszłościowe
	krytycznego i odpowiedzialnego używania technologii w uczeniu się, pracy i uczestnictwie społecznym	zarządzania treściami cyfrowymi, tworzenie treści cyfrowych i korzystanie z mediów cyfrowych, empatia cyfrowa	mediów cyfrowych, empatia cyfrowa
Miguez-Pinto et al. (2025)	Kompetencje przyszłości są ujmowane jako zestaw zdolności potrzebnych do działania w transformującym się środowisku zawodowym; w centrum znajdują się adaptacyjność, humanizm i gotowość technologiczna	Autorzy nie tworzą jednej zwartej taksonomii, ale porządkują kompetencje wokół obszarów: technologicznego, humanistycznego, przywódczego, globalnego i prewencyjno-publicznozdrowotnego	zaawansowana biegłość technologiczna, biegłość w zakresie AI, komunikacja, wrażliwość kulturowa, rozumowanie etyczne, empatia, praca zespołowa, przywództwo, zdolność adaptacji, wiedza interdyscyplinarna, uczenie się przez całe życie
Smalej-Kołodziej et al. (2025)	Kompetencje przyszłości są rozpatrywane z perspektywy oczekiwań pracodawców wobec absolwentów kierunków ekonomicznych; nacisk pada na dopasowanie szkolnictwa wyższego do zmieniającego się rynku pracy	Wyodrębniono następujące grupy kompetencji: kompetencje techniczne związane z Industry 4.0, kompetencje poznawcze wyższego rzędu, kompetencje społeczne oraz kompetencje związane ze zrównoważonym rozwojem	podstawowe kompetencje IT, znajomość najnowszych technologii, kompetencje poznawcze wyższego rzędu, kompetencje społeczne, kompetencje w obszarze zrównoważonego rozwoju

Źródło: Opracowanie własne.

Z punktu widzenia kształtowania profilu absolwenta szkoły wyższej zasadniczy wniosek jest następujący: kompetencje przyszłości nie stanowią dodatku do programu studiów, lecz jego centralny komponent. Badania literaturowe pokazują, że rdzeń tych kompetencji tworzą: samorozwój i uczenie się, kompetencje poznawcze wyższego rzędu, kompetencje cyfrowe, współpraca i komunikacja oraz odpowiedzialność etyczna oraz w zakresie zrównoważonego rozwoju (Ehlers, 2024; Mejías-Acosta et al., 2024; Smalej-Kołodziej et al., 2025). Profil absolwenta w szkolnictwie wyższym powinien więc być projektowany jako profil osoby nie tylko merytorycznie przygotowanej do wykonywania zawodu, ale także zdolnej do adaptacji, współtworzenia zmian i odpowiedzialnego działania w rzeczywistości społecznej i technologicznej przyszłości.

Wnioski

Dynamika zmian technologicznych (automatyzacja, cyfryzacja, sztuczna inteligencja), gospodarczych (globalizacja, gospodarka 4.0) i społecznych wymusza fundamentalne przewartościowanie roli uczelni wyższych. Koncentracja na transmisji wiedzy i badaniach podstawowych charakterystyczna dla modelu humboldtowskiego, nie odpowiada już złożoności i zmienności współczesnego rynku pracy. Uczelnie funkcjonujące w tradycyjnym paradygmacie powinny podjąć strategiczną decyzję o transformacji instytucjonalnej i opracować wieloletnią strategię przejścia ku modelowi przedsiębiorczemu. Strategia ta powinna obejmować: redefinicję misji uczelni z uwzględnieniem roli aktywnego uczestnika ekosystemu innowacji, rewizję struktury organizacyjnej w kierunku elastycznych jednostek projektowych zdolnych do szybkiej rekonfiguracji, a także wdrożenie systemów zarządzania opartych na wskaźnikach efektywności powiązanych z wynikami współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym. Kluczowym elementem tej transformacji jest zmiana kultury organizacyjnej: od kultury administracyjno-zachowawczej ku kulturze innowacyjnej, nagradzającej podejmowanie ryzyka, eksperymentowanie i tworzenie wartości dodanej poza murami uczelni. Fundamentalne cechy tego modelu - silne przywództwo, orientacja na rynek i transfer technologii - odpowiadają na zewnętrzną presję konkurencyjną, choć budzą zarazem uzasadnione kontrowersje aksjologiczne.

Kompetencje przyszłości stają się centralnym komponentem kształcenia, nie jego dodatkiem. Literatura przedmiotu jednoznacznie wskazuje, że nowoczesny profil absolwenta nie może być ograniczony do wiedzy kierunkowej. Kompetencje transferowalne, takie jak samorozwój, krytyczne myślenie czy współpraca, warunkują możliwość efektywnego funkcjonowania w środowisku o wysokim stopniu zmienności i nieprzewidywalności.

Uczelnie powinny zbudować trwałe i sformalizowane partnerstwa z podmiotami gospodarczymi, samorządami i organizacjami pozarządowymi jako fundament modelu przedsiębiorczego. Można tutaj wskazać na możliwość: powołania rad programowych złożonych z przedstawicieli pracodawców dla każdego kierunku studiów, wdrożenie mechanizmów wspólnego projektowania programów kształcenia z udziałem interesariuszy zewnętrznych, a także utworzenie uczelniano-biznesowych laboratoriów innowacji, realizujących projekty badawczo-wdrożeniowe na zlecenie firm i instytucji publicznych. Istotne jest również dywersyfikowanie źródeł finansowania uczelni poprzez aktywne aplikowanie o środki z programów europejskich oraz rozwijanie komercyjnej oferty szkoleń, studiów podyplomowych i usług doradczych dostosowanych do potrzeb rynku.

Programy studiów na wszystkich kierunkach powinny zostać poddane rewizji pod kątem integracji kompetencji przyszłości jako centralnego, a nie uzupełniającego elementu kształcenia. Rozwiązaniem tego problemu może być wdrożenie modułów międzykierunkowych rozwijających: krytyczne myślenie i rozwiązywanie złożonych

problemów, kompetencje cyfrowe dostosowane do specyfiki danej branży, zdolność uczenia się przez całe życie oraz adaptacyjność zawodową. Niezbędna jest również rewizja efektów uczenia się na poziomie kierunkowym i ogólnouczelnianych tak, by w sposób mierzalny odzwierciedlały owe transferowalne kompetencje. Profil absolwenta powinien być systematycznie aktualizowany we współpracy z pracodawcami – np. co trzy lata - w oparciu o analizę raportów rynku pracy i prognoz technologicznych.

W zakresie transformacji cyfrowej uczelnie powinny wdrożyć kompleksowe programy rozwijania kompetencji cyfrowych, które wykraczają poza umiejętności obsługi narzędzi. Można przyjąć jako właściwe uruchomienie dla studentów wszystkich kierunków - również humanistycznych i społecznych - modułów z zakresu: analizy i wizualizacji danych, etycznego stosowania sztucznej inteligencji, cyberbezpieczeństwa oraz tworzenia i krytycznej oceny treści cyfrowych. Równocześnie uczelnie powinny digitalizować własne procesy dydaktyczne poprzez wdrożenie platform e-learningowych, narzędzi do zdalnej współpracy projektowej i cyfrowych portfeli studenta, dokumentujących kompetencje. Transformacja cyfrowa uczelni powinna być wspierana również przez systematyczne podnoszenie kompetencji cyfrowych kadry akademickiej, w tym poprzez wewnętrzne programy szkoleniowe i staże w firmach technologicznych.

Kompetencje społeczne i komunikacyjne zachowują strategiczne znaczenie mimo postępującej automatyzacji. Wbrew potocznym przekonaniom cyfryzacja nie deprecjonuje kompetencji interpersonalnych. Zdolność do współpracy, komunikacji międzykulturowej i pracy w zespołach interdyscyplinarnych utrzymuje lub wręcz zwiększa swoją wartość w warunkach wirtualizacji relacji i globalizacji środowisk pracy. Kompetencje etyczne i odpowiedzialność wobec zrównoważonego rozwoju nabierają rosnącego znaczenia. Choć w wielu modelach kompetencje etyczne są mniej eksponowane niż cyfrowe czy poznawcze, dynamiczny rozwój SI i automatyzacji czyni je coraz bardziej niezbędnymi na rynku pracy. Nowoczesny absolwent powinien łączyć efektywność działania z odpowiedzialnością społeczną, środowiskową i etyczną. Transformacja ku uniwersytetowi przedsiębiorczemu wymaga włączenia do programów studiów zielonej agendy, to znaczy kompetencji związanych ze zrównoważonym rozwojem i transformacją klimatyczną. Zdecydowanie istotnym jest tutaj wprowadzenie przedmiotów poświęconych: ekonomii cyrkularnej i zielonej gospodarce, zrównoważonemu zarządzaniu łańcuchami dostaw, raportowaniu ESG (Environmental, Social, Governance) oraz wpływowi technologii na środowisko naturalne. Kandydaci do pracy w tym absolwenci uczelni wyższych są coraz częściej oceniani przez pracodawców również pod kątem gotowości do działania w ramach strategii ESG, co czyni te kompetencje niezbędnym elementem nowoczesnego profilu absolwenta.

Uczelnie powinny zreformować metody kształcenia, odchodząc od modelu transmisji wiedzy ku metodom aktywnym sprzyjającym rozwijaniu kompetencji interpersonalnych, przedsiębiorczych i etycznych. Rekomenduje się systemowe wdrożenie: „project-based learning” (PBL) z udziałem partnerów zewnętrznych, „challenge-based learning” opartego na

realnych problemach społecznych i gospodarczych, a także „design thinking" jako narzędzia rozwijania kreatywności i empatii. Uczelnie powinny również tworzyć aktywnie funkcjonujące (poza logiką jedynie strukturalnego umocowania) inkubatory i akceleratory przedsiębiorczości studenckiej, które umożliwiają przekształcenie pomysłów w realne projekty biznesowe

i społeczne. Niezbędne jest uwzględnienie w programach kształcenia problematyki etyki technologicznej - w szczególności kwestii związanych z odpowiedzialnym rozwojem

i stosowaniem sztucznej inteligencji, ochroną danych osobowych i cyfrową sprawiedliwością - jako trwałego elementu profilu absolwenta, a nie jednorazowego wykładu o poglądowym charakterze.

Transformacja w kierunku uniwersytetu przedsiębiorczego wymaga systemowej zmiany polityki kadrowej i ciągłego doskonalenia kompetencji akademickich. Istotnym elementem mogłoby tutaj być wprowadzenie mechanizmów motywacyjnych i oceny pracowników uwzględniających zaangażowanie we współpracę z otoczeniem, transfer wiedzy oraz dydaktykę nastawioną innowacyjnie co do metodyk i treści kształcenia - równolegle z dotychczasowymi kryteriami publikacyjnymi. Uczelnie powinny również umożliwiać i aktywnie wspierać staże pracowników akademickich w przedsiębiorstwach, instytucjach publicznych i organizacjach pozarządowych, tak aby wiedza przekazywana studentom była zakorzeniona w aktualnej praktyce rynkowej. Docelowo relacja między nauką, dydaktyką i praktyką powinna mieć charakter synergetycznie cyrkularny: wyniki badań zasilają programy kształcenia, a studenci i absolwenci wnoszą kompetencje rozwinięte w uczelni do systemów zarządczych i operacyjno-wykonawczych w przedsiębiorstwach, regionach oraz różnych sektorach gospodarki. Tylko uczelnia zdolna do ciągłego uczenia się - instytucjonalnie i kadrowo - będzie zdolna kształtować absolwentów, którzy sprostają wyzwaniom cyfrowej i zielonej transformacji współczesnej gospodarki.

Obszar badawczy kompetencji przyszłości pozostaje heterogeniczny i wymaga syntezy. Nie istnieje jedna, powszechnie uzgodniona taksonomia kompetencji przyszłości. Mimo tej różnorodności w literaturze wyłania się względnie stabilne jądro: samorozwój i uczenie się przez całe życie, kompetencje poznawcze wyższego rzędu, kompetencje cyfrowe, zdolności społeczno-komunikacyjne oraz odpowiedzialność etyczna i w zakresie zrównoważonego rozwoju. To właśnie ta synteza może stanowić doskonałą bazę oraz punkt wyjścia dla projektowania programów kształcenia na poziomie uczelni wyższych.

Bibliografia

1. Andrzejewski, B. (1989). Wilhelm von Humboldt. Warszawa: Wiedza Powszechna.
2. Antonowicz, D. (2005). Uniwersytet przyszłości. Wyzwania i modele polityki. Warszawa: Instytut Spraw Publicznych.
3. CERTES, Raport kompetencje przyszłości. (2025). https://szkolenia.certes.pl/wp-content/uploads/2022/02/Raport-kompetencje-przyszlosci-2025_CERTES.pdf.
4. Chłodna, I. (2008). Edukacja amerykańska. Drogi i bezdroża. Lublin: Wydawnictwo KUL.
5. Clark, B. R. (2005). Sustaining Change in Universities. Continuities in Case Studies and Concepts. Maidenhead, Berkshire: The Society for Research into Higher Education & Open University Press, McGraw-Hill.
6. Cwynar, K. M. (2005). Idea uniwersytetu w kulturze europejskiej. Polityka i Społeczeństwo, 2.
7. De Ridder-Symoens, H. (2020). A History of the University in Europe. Vol. I: Universities in the Middle Ages. Cambridge.
8. Drucker, P. (2004). Natchnienie i fart, czyli innowacja i przedsiębiorczość. Warszawa: Wydawnictwo Studio Emka.
9. Ehlers, U.-D. (2024). Towards a future skills framework for higher education. In U.-D. Ehlers and L. Eigbrecht (Eds.), Creating the university of the future, pp. 21–60. Springer VS.
10. Gadacz, T., and Kłoczowski, P. (2012). Tożsamość uniwersytetu w czasach cywilizacyjnych przemian - przegląd problematyki.
11. Kant, I. (2003). Spór fakultetów. Toruń: Wydawnictwo Rolewski.
12. Kobylarek, A. (2002). Uniwersytet, zarys ewolucji idei podstawowych. Nauka i Szkolnictwo Wyższe, 1(19).
13. Łapińska J., Sudolska A., Zinecker M. (2022). (Raport z badań empirycznych w zakresie kompetencji i zawodów przyszłości) https://www.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/Raport-z-badan-empirycznych-w-zakresie-kompetencji-i-zawodow-prz.pdf.
14. Mejías-Acosta, A., D'Armas Regnault, M., Vargas-Cano, E., Cárdenas-Cobo, J., and Vidal-Silva, C. (2024). Assessment of digital competencies in higher education students: Development and validation of a measurement scale. Frontiers in Education, 9, Article 1497376.
15. Miguez-Pinto, J. P., Garcia-Rosa, B., Maggitti-Bezerril, M., Ramalho, C., Garcia, S. L., Pustilnik, H. N., Boczar, D., Avena, K. M., and Andrade, B. B. (2025). The medical

student of the future: Redefining competencies in a transformative era. Frontiers in Medicine, 12, Article 1593685.
16. Newman, J. H. (1990). Idea uniwersytetu. Warszawa: PWN.
17. Pandya, B., Ruhi, U., and Patterson, L. (2023). Preparing the future workforce for 2030: The role of higher education institutions. Frontiers in Education, 8, Article 1295249.
18. Puzyn, J. (2020). Uniwersytet w rynkowej grze. Pressje, 1.
19. Smalej-Kołodziej, O., Grzesiuk, K., Filipek, K., Jakubiak, M., Kędra, A., Mącik, R., Sobotka, B., and Tatarczak, A. (2025). Future competencies: Employers' insights on economics graduates from the Lublin Voivodeship. Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio H – Oeconomia, 59(2), pp. 201–234.
20. Southern, R. W. (2021). Scholastic Humanism and the Unification of Europe. Oxford.

EFEKTYWNOŚĆ NARZĘDZI MARKETINGU INTERNETOWEGO W KOMUNIKACJI FIRM HIGH-TECH – JAKOŚCIOWA ANALIZA PORÓWNAWCZA MODELI B2C I B2B NA PRZYKŁADZIE CD PROJEKT RED I LIVECHAT

mgr Tomasz KLIŚ

Niezależny badacz, Wrocław, Absolwent studiów magisterskich na kierunku Zarządzanie Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, rok ukończenia: 2017; tomasz.kliss@wp.pl; identyfikator ORCID 0009-0009-6944-3217

Korespondencja: tomasz.kliss@wp.pl; +48 608 092 448

Streszczenie: Celem artykułu jest ocena efektywności narzędzi marketingu internetowego w komunikacji firm high-tech w ujęciu porównawczym modeli B2C i B2B. Badanie ma charakter jakościowy i zostało przeprowadzone z wykorzystaniem metody studium przypadku na przykładzie dwóch polskich przedsiębiorstw: CD Projekt RED (model B2C) oraz LiveChat (model B2B/SaaS). Analiza opiera się na danych wtórnych, treściach publikowanych w kanałach cyfrowych oraz wskaźnikach aktywności komunikacyjnej i biznesowej. Porównanie przypadków pozwoliło zidentyfikować odmienne mechanizmy budowania efektywności w zależności od modelu biznesowego. W modelu B2C skuteczność komunikacji opiera się na narracyjnych formach przekazu, wydarzeniach online oraz aktywnym zarządzaniu społecznością, natomiast w modelu B2B kluczowe znaczenie mają treści eksperckie, personalizacja komunikacji oraz wykorzystanie narzędzi marketing automation. Wyniki wskazują, że efektywność marketingu internetowego w sektorze high-tech jest warunkowana strategicznym dopasowaniem narzędzi do specyfiki relacji z odbiorcą oraz etapu procesu decyzyjnego klienta.

Słowa kluczowe: marketing internetowy, komunikacja marketingowa, firmy high-tech, content marketing, B2B, B2C, studium przypadku

THE EFFECTIVENESS OF INTERNET MARKETING TOOLS IN HIGH-TECH COMPANIES' COMMUNICATION: A QUALITATIVE COMPARATIVE ANALYSIS OF B2C AND B2B MODELS. BASED ON THE CASES OF CD PROJEKT RED AND LIVECHAT

Abstract: The aim of this article is to assess the effectiveness of internet marketing tools in the communication strategies of high-tech companies through a qualitative comparative analysis of

B2C and B2B models. The study adopts a qualitative research approach based on the case study method, examining two Polish companies: CD Projekt RED (B2C model) and LiveChat (B2B/SaaS model). The analysis draws on secondary data, digital content published across online channels, and selected communication and business performance indicators. The comparative perspective enables the identification of distinct mechanisms of effectiveness depending on the business model. In the B2C model, communication effectiveness is primarily driven by narrative-based video content, online events, and active community management. In contrast, the B2B model emphasizes expert content, communication personalization, and the use of marketing automation tools. The findings suggest that the effectiveness of internet marketing in the high-tech sector depends on the strategic alignment of communication tools with the nature of customer relationships and the decision-making process.

Keywords: online marketing, marketing communication, high-tech companies, content marketing, B2B, B2C, case study

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój technologii cyfrowych oraz postępująca globalizacja rynków sprawiają, że marketing internetowy odgrywa coraz istotniejszą rolę w strategiach komunikacji marketingowej przedsiębiorstw high-tech. Firmy działające w tym sektorze funkcjonują w warunkach wysokiej innowacyjności, szybkich cykli życia produktów oraz rosnących oczekiwań odbiorców, co wymusza stosowanie zaawansowanych, elastycznych i precyzyjnie dopasowanych narzędzi komunikacyjnych. W tym kontekście marketing internetowy przestaje pełnić wyłącznie funkcję promocyjną, stając się integralnym elementem budowania relacji z klientami, edukacji rynku oraz kreowania wartości marki.

Szczególna specyfika produktów i usług technologicznie zaawansowanych sprawia, że komunikacja marketingowa firm high-tech musi łączyć elementy informacyjne, edukacyjne oraz wizerunkowe. Złożoność oferowanych rozwiązań, często wymagających wysokiego poziomu wiedzy technicznej, powoduje, że przedsiębiorstwa coraz częściej sięgają po narzędzia marketingu internetowego umożliwiające personalizację przekazu, interaktywność oraz wykorzystanie danych w czasie rzeczywistym. Jak wskazują współczesne badania, rosnącą rolę odgrywają w tym zakresie rozwiązania oparte na automatyzacji i sztucznej inteligencji, które pozwalają na bardziej efektywne dopasowanie komunikacji do potrzeb różnych segmentów odbiorców (Kumar, Singh &Sharma, 2025).

W literaturze przedmiotu podkreśla się, że przedsiębiorstwa high-tech, szczególnie w modelu B2B (model B2B – business-to-business, obejmujący relacje między przedsiębiorstwami; model B2C – business-to-consumer, odnoszący się do relacji firmy z klientem indywidualnym), coraz częściej konkurują nie tylko jakością produktu, lecz także jakością doświadczeń cyfrowych oferowanych klientom. Digitalizacja usług oraz rozwój innowacji usługowych powodują przesunięcie akcentów z jednorazowych transakcji na

długofalowe relacje i współtworzenie wartości (Miočević, Herhausen&Kleijnen, 2024). W efekcie skuteczna komunikacja marketingowa wymaga integracji różnych narzędzi online od content marketingu i mediów społecznościowych, przez eventy online, aż po zaawansowane systemy marketing automation (rozumiany jako wykorzystanie systemów informatycznych do automatyzacji procesów komunikacyjnych i sprzedażowych (segmentacja, wysyłka spersonalizowanych treści), odgrywa istotną rolę w analizowanych modelach biznesowych).

Celem niniejszego artykułu jest analiza efektywności wybranych narzędzi marketingu internetowego w komunikacji marketingowej polskich firm high-tech na przykładzie CD Projekt RED oraz LiveChat. Dobór tych przedsiębiorstw pozwala na zestawienie dwóch odmiennych modeli komunikacji: B2C, opartego na storytellingu i budowaniu emocjonalnego zaangażowania społeczności, oraz B2B, skoncentrowanego na edukacji technologicznej i generowaniu wartości poprzez treści eksperckie. Artykuł ma charakter eksploracyjny i opiera się na metodzie studium przypadku, umożliwiającej pogłębioną analizę praktyk komunikacyjnych stosowanych przez badane podmioty.

Podjęta analiza ma na celu nie tylko identyfikację najczęściej wykorzystywanych narzędzi marketingu internetowego, lecz także przeanalizowanie działań związanych z marketingiem w kontekście budowania zaangażowania odbiorców, wspierania decyzji zakupowych oraz wzmacniania wizerunku firm high-tech. Uzyskane wnioski mogą stanowić punkt odniesienia zarówno dla dalszych badań naukowych, jak i dla praktyki zarządzania komunikacją marketingową w sektorze technologii zaawansowanych.

2. Marketing internetowy jako element strategii komunikacyjnych marek

Marketing internetowy odgrywa coraz istotniejszą rolę w strategiach komunikacji marketingowej przedsiębiorstw high-tech, funkcjonujących w warunkach wysokiej dynamiki zmian technologicznych, skracających się cykli życia produktów oraz rosnących oczekiwań informacyjnych odbiorców. W literaturze przedmiotu podkreśla się, że w sektorze technologii zaawansowanych komunikacja marketingowa musi łączyć funkcje informacyjne, edukacyjne i relacyjne, a jej skuteczność zależy w dużej mierze od zdolności przedsiębiorstw do integrowania narzędzi cyfrowych w spójną i długofalową strategię komunikacyjną (Chaffey i Ellis-Chadwick, 2019; Verhoef i in., 2021).

Na potrzeby niniejszego opracowania marketing internetowy rozumiany jest jako planowy i zintegrowany sposób wykorzystania kanałów cyfrowych, treści oraz technologii informacyjnych w celu realizacji celów komunikacyjnych marki, obejmujących budowanie świadomości, wizerunku, relacji oraz doświadczeń odbiorców w środowisku online. Strategia komunikacyjna marki oznacza natomiast długookresową koncepcję zarządzania przekazem, kanałami i punktami styku z interesariuszami, podporządkowaną realizacji celów

wizerunkowych i relacyjnych organizacji. W takim ujęciu marketing internetowy nie stanowi wyłącznie zbioru narzędzi promocyjnych, lecz jest elementem szerszego systemu zarządzania relacjami z rynkiem w środowisku cyfrowym. Jak podkreślają Chaffey i Ellis-Chadwick (2019), skuteczna komunikacja cyfrowa wymaga planowego zarządzania treściami, kanałami oraz punktami styku z klientem na całej ścieżce zakupowej. Szczególne znaczenie ma to w przypadku firm high-tech, których oferta cechuje się wysokim stopniem złożoności technologicznej i wymaga odpowiedniego poziomu edukacji odbiorców.

Badania nad marketingiem w sektorze technologii zaawansowanych wskazują, że przedsiębiorstwa konkurują obecnie nie tylko innowacyjnością produktów, lecz także jakością doświadczeń cyfrowych oferowanych klientom. Miočević, Herhausen i Kleijnen (2024) zwracają uwagę, że w środowisku B2B rozwój cyfrowych innowacji usługowych prowadzi do przesunięcia akcentów z komunikacji transakcyjnej w kierunku komunikacji relacyjnej, opartej na współtworzeniu wartości oraz długofalowej współpracy z klientem. Podobnie Verhoef i in. (2021) wskazują, że proces transformacji cyfrowej wymusza redefinicję sposobów komunikowania się firm z rynkiem, obejmującą integrację kanałów online, danych oraz technologii analitycznych.

Marketing internetowy pełni w tym kontekście funkcję strategiczną, a nie jedynie operacyjną. Obejmuje on planowe wykorzystanie kanałów cyfrowych w celu budowania świadomości marki, generowania popytu oraz kształtowania długoterminowych relacji z odbiorcami (Chaffey i Ellis-Chadwick, 2019). W odróżnieniu od tradycyjnych form komunikacji, charakteryzuje się on wysokim poziomem interaktywności, możliwością precyzyjnego pomiaru efektów działań oraz zaawansowaną personalizacją przekazu.

Strategie marketingu internetowego mogą przyjmować różnorodne formy – od działań opartych na treściach (content marketing), przez komunikację w mediach społecznościowych, po wykorzystanie narzędzi automatyzacji marketingu i analityki predykcyjnej. Ich wspólnym mianownikiem pozostaje integracja działań komunikacyjnych wokół cyfrowych punktów styku z klientem (customer touchpoints) oraz zarządzanie doświadczeniem odbiorcy w całej ścieżce zakupowej (Lemon i Verhoef, 2016). W literaturze podkreśla się przy tym, że marketing internetowy może być ujmowany zarówno jako zbiór narzędzi komunikacyjnych wykorzystujących Internet, jak i jako kompleksowy system zarządzania relacjami z klientem w środowisku cyfrowym (Hollebeek i Macky, 2019; Verhoef i in., 2021). W niniejszym artykule przyjęto szerokie podejście, obejmujące zarówno działania komunikacyjne, jak i procesy analityczne oraz technologiczne wspierające realizację strategii komunikacyjnej marki.

Do podstawowych narzędzi marketingu internetowego należą m.in. content marketing (artykuły eksperckie, raporty, materiały wideo), media społecznościowe, webinary i wydarzenia online, kampanie e-mail marketingowe, narzędzia marketing automation, systemy analityczne oraz rozwiązania służące personalizacji treści. Znaczenie tych instrumentów jest szczególnie widoczne w sektorze firm high-tech, w którym oferta wymaga dostarczania odbiorcom wiedzy umożliwiającej właściwe zrozumienie produktu lub usługi. W modelu B2B

komunikacja marketingowa koncentruje się przede wszystkim na dostarczaniu treści edukacyjnych i analitycznych wspierających proces decyzyjny. Natomiast w modelu B2C większą rolę odgrywają elementy narracyjne, emocjonalne i społecznościowe, sprzyjające budowaniu zaangażowania wokół marki.

Jednym z kluczowych zagadnień współczesnych badań nad marketingiem internetowym jest problematyka zaangażowania odbiorców (customer engagement). Hollebeek i Macky (2019) wskazują, że treści cyfrowe odgrywają istotną rolę w budowaniu zaangażowania, zaufania oraz postrzeganej wartości marki, zwłaszcza w środowisku online. Skuteczny content marketing nie ogranicza się zatem do przekazywania informacji, lecz powinien angażować odbiorców poprzez narrację, interakcję oraz możliwość współuczestnictwa w tworzeniu treści i doświadczeń marki.

W literaturze coraz większe znaczenie przypisuje się także storytellingowi oraz treściom wizualnym, szczególnie w komunikacji firm technologicznych. Patil (2023) oraz Kumar, Singh i Sharma (2025) podkreślają, że rozwój generatywnej sztucznej inteligencji umożliwia tworzenie bardziej spersonalizowanych i angażujących komunikatów, co sprzyja wzrostowi zaangażowania konsumentów oraz budowaniu relacji emocjonalnych z marką. W modelu B2C narracyjne formy komunikacji, takie jak materiały wideo czy wydarzenia online, odgrywają szczególnie istotną rolę w procesie budowania społeczności wokół produktów technologicznych. Znaczenie społeczności online oraz interakcji użytkowników z marką podkreślają również Dessart, Veloutsou i Morgan-Thomas (2021), wskazując, że zaangażowanie konsumentów w społecznościach marek opiera się nie tylko na częstotliwości interakcji, lecz także na jakości relacji społecznych, poczuciu przynależności oraz współtworzeniu treści.

Z perspektywy całościowego doświadczenia klienta marketing internetowy pełni funkcję integrującą różne etapy ścieżki zakupowej. Lemon i Verhoef (2016) podkreślają, że spójność komunikacji oraz konsekwentne zarządzanie punktami styku z klientem wpływają na postrzeganą wartość marki i trwałość relacji z odbiorcami. W firmach technologicznych, w których decyzje zakupowe są często poprzedzone długotrwałym procesem poszukiwania informacji, narzędzia marketingu internetowego umożliwiają synchronizację treści informacyjnych, edukacyjnych i relacyjnych na kolejnych etapach kontaktu z marką.

Istotnym elementem współczesnych strategii komunikacyjnych marek jest także wykorzystanie danych, narzędzi analitycznych oraz rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji. Davenport i in. (2020) wskazują, że technologie AI umożliwiają bardziej precyzyjne prognozowanie zachowań konsumentów, automatyzację procesów marketingowych oraz dynamiczną personalizację komunikacji. W środowisku marketingu opartego na danych komunikacja staje się coraz bardziej zindywidualizowana i dostosowywana do zachowań użytkowników w czasie rzeczywistym.

Huang i Rust (2021) podkreślają, że zastosowanie sztucznej inteligencji w usługach cyfrowych sprzyja poprawie jakości interakcji z klientem poprzez bieżące dopasowywanie

komunikatów do preferencji i kontekstu użytkownika. W kontekście strategii komunikacyjnych marek oznacza to możliwość projektowania bardziej responsywnych i spójnych doświadczeń marketingowych, w których automatyzacja i personalizacja stanowią wsparcie dla realizacji celów relacyjnych i wizerunkowych.

Należy jednak podkreślić, że personalizacja komunikacji – szczególnie przy wykorzystaniu narzędzi generatywnej sztucznej inteligencji – nie ma charakteru neutralnego technologicznie. Jej skuteczność zależy od jakości danych, transparentności działań oraz społecznej akceptacji automatyzacji komunikacji marketingowej. W literaturze wskazuje się, że nadmierna automatyzacja może prowadzić do spadku postrzeganej autentyczności marki oraz wzrostu sceptycyzmu odbiorców wobec komunikatów generowanych algorytmicznie. Z tego względu ocena efektywności personalizacji powinna uwzględniać zarówno wskaźniki ilościowe, jak i kontekst relacyjny.

Szczególne znaczenie rozwiązania te mają w sektorze B2B, gdzie procesy decyzyjne są wieloetapowe i rozciągnięte w czasie. Järvinen i Taiminen (2016) wskazują, że marketing automation oraz systematyczne wykorzystanie treści eksperckich sprzyjają nie tylko generowaniu leadów (potencjalnych klientów, którzy wykazali zainteresowanie ofertą poprzez określoną aktywność (np. zapis do newslettera, pobranie raportu), lecz także budowaniu relacji opartych na wiedzy i zaufaniu. Uzupełnieniem tych ustaleń są raporty branżowe (McKinsey & Company, 2023; HubSpot, 2024), które potwierdzają rosnącą rolę generatywnej sztucznej inteligencji oraz analityki predykcyjnej w strategiach marketingowych firm technologicznych.

Na podstawie przeglądu literatury można wskazać, że marketing internetowy w strategii komunikacyjnej marek high-tech pełni trzy zasadnicze role: po pierwsze – informacyjno-edukacyjną, polegającą na dostarczaniu odbiorcom wiedzy niezbędnej do zrozumienia oferty; po drugie – relacyjną, związaną z budowaniem zaangażowania, społeczności oraz długofalowych więzi z marką; po trzecie – doświadczeniową, obejmującą projektowanie spójnych i spersonalizowanych punktów styku w środowisku cyfrowym. Zakres i znaczenie poszczególnych ról pozostają jednak silnie uzależnione od modelu biznesowego przedsiębiorstwa oraz charakteru relacji z odbiorcami.

Mimo rosnącej liczby badań poświęconych marketingowi internetowemu i komunikacji cyfrowej, nadal widoczny jest niedobór pogłębionych analiz empirycznych ukazujących praktyczne wykorzystanie narzędzi marketingu internetowego w firmach high-tech, w szczególności w ujęciu porównawczym modeli B2B i B2C. Jak wskazuje Yin (2018), studia przypadków umożliwiają uchwycenie złożonych procesów zachodzących w rzeczywistym kontekście organizacyjnym oraz identyfikację mechanizmów stojących za skutecznością działań komunikacyjnych. Wypełnienie tej luki badawczej, poprzez analizę porównawczą strategii komunikacyjnych dwóch firm high-tech działających w odmiennych modelach biznesowych, stanowi zasadniczy punkt odniesienia dla dalszej części niniejszego artykułu.

3. Metoda badań

Badanie zostało przeprowadzone z wykorzystaniem metody studium przypadku, która umożliwia pogłębioną analizę zjawisk zachodzących w ich naturalnym kontekście organizacyjnym oraz uwzględnienie wielu współzależnych czynników wpływających na badany problem. Jak podkreśla Yin (2018), metoda ta znajduje zastosowanie zwłaszcza w analizie procesów złożonych i dynamicznych, w których istotne jest zrozumienie mechanizmów działania, a nie wyłącznie identyfikacja zależności statystycznych.

Badanie ma charakter jakościowy, eksploracyjny i porównawczy oraz zostało przeprowadzone z wykorzystaniem metody studium przypadku. Metoda ta umożliwia pogłębioną analizę zjawisk zachodzących w ich naturalnym kontekście organizacyjnym oraz uwzględnienie wielu współzależnych czynników wpływających na badany problem. Jak podkreśla Yin (2018), studium przypadku znajduje zastosowanie zwłaszcza w analizie procesów złożonych i dynamicznych, w których kluczowe jest zrozumienie mechanizmów działania, a nie wyłącznie identyfikacja zależności statystycznych. W niniejszym badaniu analizę jakościową uzupełniono prostym opisem ilościowym, pełniącym wyłącznie funkcję ilustracyjną i wspierającą interpretację wyników.

Głównym problemem badawczym jest pytanie: w jaki sposób i w jakim zakresie narzędzia marketingu internetowego są wykorzystywane w strategiach komunikacyjnych firm high-tech działających w modelach B2C i B2B oraz jakie różnice występują pomiędzy tymi modelami w zakresie funkcji komunikacyjnych realizowanych przez te narzędzia?

Na tej podstawie sformułowano następujące pytania szczegółowe:

1. Jakie narzędzia marketingu internetowego są wykorzystywane w komunikacji marketingowej badanych firm,
2. Jakie funkcje komunikacyjne pełnią publikowane treści (informacyjne, edukacyjne, relacyjne, wizerunkowe),
3. W jaki sposób badane firmy angażują odbiorców w środowisku cyfrowym,
4. Jaką rolę w strategiach komunikacyjnych odgrywają personalizacja, wykorzystanie danych oraz automatyzacja działań marketingowych,
5. Jakie różnice występują pomiędzy modelem B2C i B2B w sposobie projektowania komunikacji marketingowej online.

Na potrzeby badania przyjęto następującą tezę badawczą: skuteczność i sposób wykorzystania narzędzi marketingu internetowego w strategiach komunikacyjnych firm high-tech są silnie uzależnione od modelu biznesowego, przy czym w modelu B2C dominują narzędzia służące budowaniu zaangażowania emocjonalnego i społeczności, natomiast w

modelu B2B kluczową rolę odgrywają treści edukacyjne, personalizacja komunikacji oraz automatyzacja procesów marketingowych.

Badanie ma charakter jakościowy, eksploracyjny i porównawczy. Zastosowano metodę studium przypadku, umożliwiającą pogłębioną analizę złożonych procesów komunikacyjnych zachodzących w rzeczywistym kontekście organizacyjnym (Yin, 2018). Wybór tej metody jest uzasadniony potrzebą szczegółowego poznania sposobów projektowania i realizacji strategii komunikacyjnych w firmach high-tech oraz identyfikacji mechanizmów stojących za skutecznością działań marketingu internetowego.

Do analizy wybrano dwie polskie firmy high-tech działające na rynkach globalnych:

- CD Projekt RED, reprezentującą model B2C oraz sektor kreatywnych technologii (branża gier komputerowych),
- LiveChat, reprezentującą model B2B oraz sektor usług cyfrowych typu SaaS (Software as a Service – model dostarczania oprogramowania w formie usługi dostępnej online w ramach subskrypcji).

Dobór przypadków miał charakter celowy i został oparty na następujących kryteriach:

- wysoki poziom zaawansowania technologicznego oferowanych produktów i usług,
- intensywne i systematyczne wykorzystanie narzędzi marketingu internetowego w komunikacji z rynkiem,
- globalny zasięg działań komunikacyjnych,
- funkcjonowanie w odmiennych modelach biznesowych (B2C oraz B2B),
- dostępność publicznie udostępnionych danych wtórnych umożliwiających przeprowadzenie analizy porównawczej.

Zestawienie dwóch przedsiębiorstw działających w różnych modelach biznesowych pozwala na identyfikację zróżnicowanych wzorców wykorzystania narzędzi marketingu internetowego oraz na analizę wpływu kontekstu rynkowego na sposób projektowania komunikacji marketingowej.

Badanie oparto na analizie danych wtórnych. Wykorzystano następujące źródła danych:

- oficjalne strony internetowe badanych firm oraz blogi firmowe,
- oficjalne profile w mediach społecznościowych (YouTube, X/Twitter, LinkedIn, Discord),
- materiały wideo oraz zapisy wydarzeń online i webinarów,
- raporty branżowe i prezentacje inwestorskie,

- publikacje prasowe i branżowe dotyczące strategii marketingowych analizowanych firm.

Wybór danych wtórnych jest uzasadniony charakterem badania, którego celem jest analiza faktycznie realizowanych praktyk komunikacyjnych widocznych w publicznych kanałach komunikacji marek oraz ich treści cyfrowych.

Zakres czasowy analizy obejmuje okres od stycznia 2024 r. do grudnia 2025 r. Okres ten został dobrany ze względu na dynamiczny rozwój narzędzi marketingu internetowego opartych na automatyzacji i rozwiązaniach wykorzystujących sztuczną inteligencję oraz intensyfikację działań komunikacyjnych firm technologicznych w środowisku cyfrowym.

Do analizy zakwalifikowano około 50 wpisów blogowych, 220 postów opublikowanych w mediach społecznościowych, 30 materiałów wideo oraz 15 wydarzeń online pochodzących z oficjalnych kanałów komunikacji badanych przedsiębiorstw. Dobór materiału miał charakter celowy i został oparty na kryteriach zgodności z celem badania oraz reprezentatywności dla analizowanych strategii komunikacyjnych.

W badaniu zastosowano jakościową analizę treści oraz analizę porównawczą. Jednostką analizy były pojedyncze treści komunikacyjne publikowane przez badane firmy (wpisy blogowe, posty w mediach społecznościowych, materiały wideo, zapowiedzi wydarzeń online, webinary).

Proces analizy przebiegał według jednolitego schematu dla obu przypadków i obejmował:

1. identyfikację wykorzystywanych narzędzi marketingu internetowego,
2. klasyfikację treści według ich funkcji komunikacyjnych,
3. analizę form angażowania odbiorców,
4. identyfikację rozwiązań związanych z personalizacją, wykorzystaniem danych i automatyzacją.

Na potrzeby badania przyjęto następujące kryteria analizy:

- rodzaj narzędzia marketingu internetowego (content marketing, media społecznościowe, webinary i wydarzenia online, e-mail marketing, marketing automation, narzędzia analityczne),
- funkcja komunikacyjna treści (informacyjna, edukacyjna, relacyjna, wizerunkowa, sprzedażowo-wspierająca),
- forma angażowania odbiorców (brak interakcji, reakcje i komentarze, aktywne uczestnictwo w wydarzeniach online, współtworzenie treści),

- poziom personalizacji komunikacji (brak personalizacji, segmentacja odbiorców, dynamiczna personalizacja treści),
- zakres wykorzystania danych i automatyzacji (brak, podstawowa automatyzacja, zaawansowana automatyzacja i rekomendacje treści).

W celu zwiększenia przejrzystości porównania zastosowano jakościowe skale porządkowe (niski, średni, wysoki, bardzo wysoki) dla oceny:

- stopnia wykorzystania marketing automation,
- poziomu personalizacji treści,
- zakresu wykorzystania analityki danych,
- intensywności interakcji z odbiorcami.

Oceny te miały charakter ekspercki i były wynikiem systematycznej obserwacji sposobu prowadzenia komunikacji marketingowej oraz analizy zawartości publikowanych materiałów.

Uzupełniająco zastosowano proste elementy opisu ilościowego, obejmujące:

- przybliżoną częstotliwość publikacji treści w poszczególnych kanałach komunikacyjnych,
- liczbę publikacji określonego typu w analizowanym okresie,
- liczbę reakcji użytkowników (komentarze, polubienia, udostępnienia) w odniesieniu do wybranych przykładów treści.

Dane ilościowe pełnią w badaniu funkcję pomocniczą i ilustracyjną, służąc wsparciu interpretacji jakościowej, a nie statystycznemu testowaniu zależności.

Porównanie przypadków przeprowadzono według identycznych kryteriów analizy, co umożliwiło identyfikację podobieństw i różnic pomiędzy strategiami komunikacyjnymi firm działających w modelach B2C i B2B.

Zastosowana procedura badawcza pozwala na zwiększenie rzetelności analizy poprzez:

- wykorzystanie wielu źródeł danych,
- zachowanie jednolitych kategorii analitycznych dla obu przypadków,
- systematyczne dokumentowanie procesu klasyfikacji treści.

Należy jednocześnie podkreślić, że badanie ma charakter eksploracyjny i obarczone jest ograniczeniami typowymi dla metody studium przypadku. W szczególności zastosowanie danych wtórnych oraz jakościowy charakter analizy nie pozwalają na uogólnianie wyników na

całą populację firm high-tech. Celem badania jest przede wszystkim identyfikacja wzorców i mechanizmów wykorzystania narzędzi marketingu internetowego w strategiach komunikacyjnych oraz sformułowanie wniosków stanowiących punkt wyjścia do dalszych, pogłębionych badań ilościowych.

Kluczowym zagadnieniem niniejszego opracowania jest określenie, w jaki sposób rozumiana i mierzona jest efektywność działań marketingu internetowego. W literaturze pojęcie to bywa interpretowane jako relacja nakładów do uzyskanych rezultatów, stopień realizacji celów strategicznych lub wartość generowana dla organizacji. W niniejszym badaniu przyjęto podejście funkcjonalne, zgodnie z którym efektywność oznacza stopień realizacji celów komunikacyjnych i biznesowych przy wykorzystaniu narzędzi cyfrowych.

W celu zapewnienia przejrzystości analizy przyjęto trzy wymiary oceny efektywności:

1. Wymiar komunikacyjny – obejmujący wskaźniki zaangażowania (engagement rate), dynamikę wzrostu społeczności oraz poziom interakcji w mediach społecznościowych.
2. Wymiar konwersyjny – obejmujący współczynnik klikalności (CTR), liczbę wygenerowanych leadów oraz wskaźnik konwersji użytkowników.
3. Wymiar biznesowy – analizowany poprzez dynamikę przychodów, wzrost liczby klientów oraz – w przypadku modelu SaaS – wskaźniki retencji użytkowników.

Takie wielowymiarowe ujęcie pozwala ograniczyć subiektywność oceny oraz powiązać działania komunikacyjne z mierzalnymi efektami organizacyjnymi.

W kolejnej części przedstawiono wyniki analizy uporządkowane zgodnie z przyjętymi wymiarami operacjonalizacji efektywności.

4. Wyniki – analiza empiryczna i porównawcza

Przykłady wykorzystywanych treści marketingowych

Analiza treści publikowanych przez badane firmy wskazuje na istotne różnice w typach komunikatów oraz ich funkcjach komunikacyjnych.

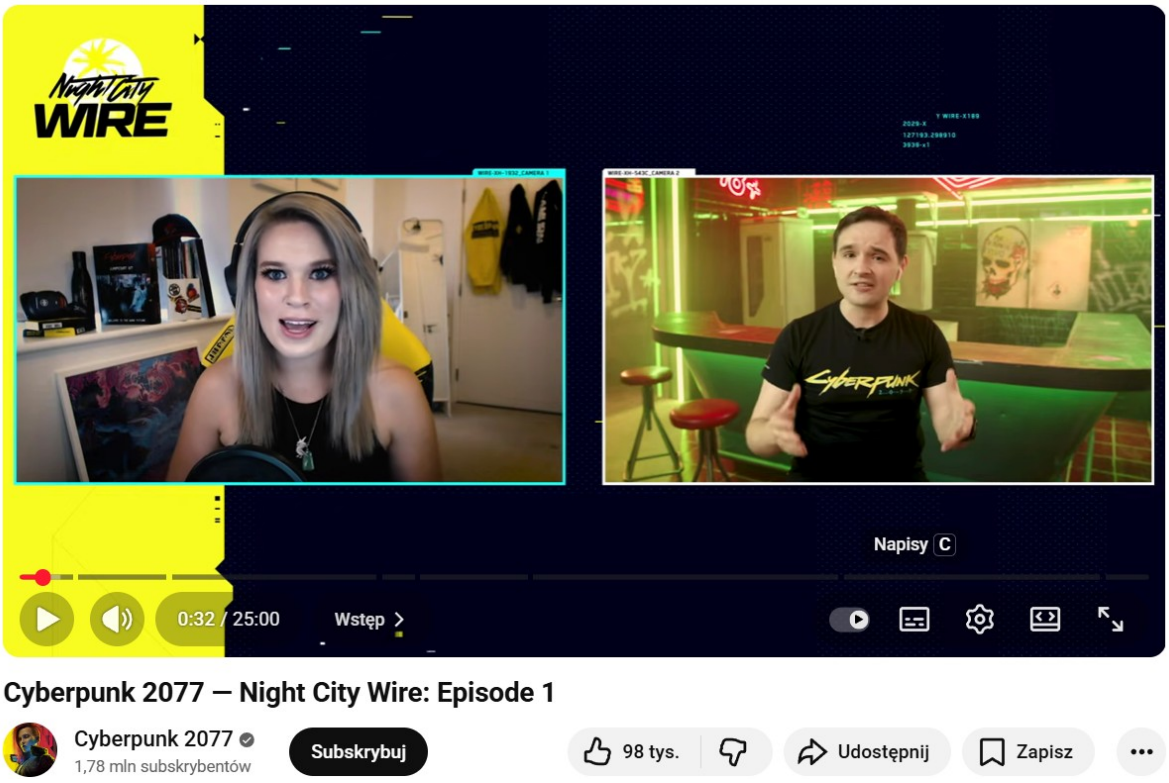
W przypadku CD Projekt RED dominują treści o charakterze:

- narracyjnym (trailery, teasery fabularne),
- wizualnym (materiały wideo, grafiki koncepcyjne),
- społecznościowym (posty angażujące fanów, zapowiedzi wydarzeń online).

Przykładem są cykliczne transmisje online (*Night City Wire*), które łączą funkcję informacyjną z elementami storytellingu i interakcji z odbiorcami. Materiały te generują wysokie zaangażowanie społeczności (komentarze, udostępnienia, reakcje), co wskazuje na skuteczność tego typu narzędzi w budowaniu relacji emocjonalnych z odbiorcami.

Cykliczne transmisje *Night City Wire* były publikowane na oficjalnych kanałach komunikacyjnych *Cyberpunk 2077*, które są autoryzowane i koordynowane przez CD Projekt RED jako element strategii marketingu internetowego. Materiały te łączą prezentacje treści informacyjnych (np. zwiastuny, gameplay) z elementami storytellingu i interakcji z odbiorcami, co sprzyja budowaniu wysokiego poziomu zaangażowania społeczności graczy.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy zrzut ekranu jednego z odcinków cyklu „Night City Wire", opublikowany na oficjalnym kanale gry *Cyberpunk 2077* na YouTube, zawierający zwiastun gry, fragmenty rozgrywki oraz wypowiedzi deweloperów — świetny przykład transmisji łączącej **informacyjny charakter z narracją i storytellingiem**.



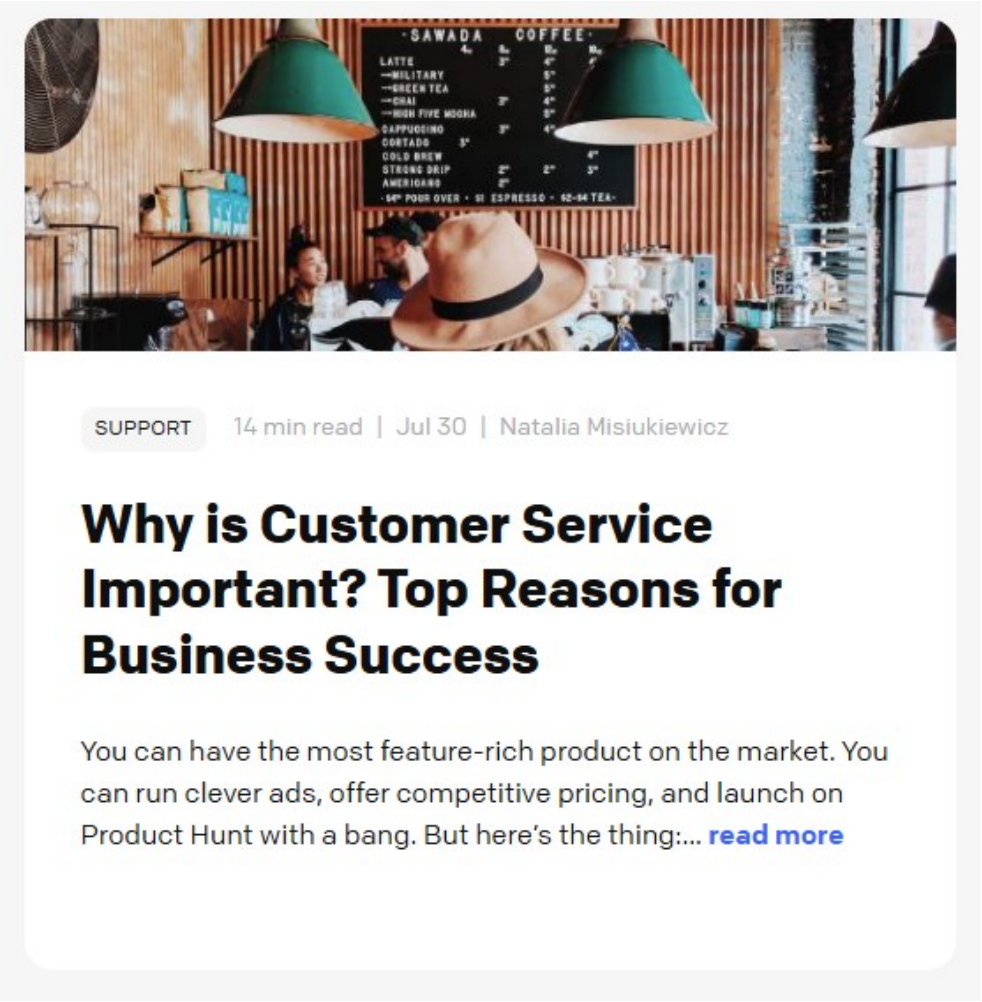
Rysunek 1. Przykładowy kadr z filmiku opublikowanego w serwisie YouTube.com ilustrujący wprowadzający odcinek do serii Night City Wire na kanale gry Cyberpunk 2077 stworzonej przez firmę CD Projekt RED.

Źródło: oficjalny kanał Cyberpunk 2077 (materiał autoryzowany przez CD Projekt RED).

Z kolei LiveChat publikuje przede wszystkim treści o charakterze:

- edukacyjnym (artykuły eksperckie, poradniki),
- analitycznym (raporty, studia przypadków klientów),
- funkcjonalnym (webinary, tutoriale produktowe).

Przykładem są regularnie publikowane wpisy blogowe dotyczące optymalizacji obsługi klienta oraz materiały wideo pokazujące zastosowanie narzędzia LiveChat w praktyce. Treści te pełnią funkcję wsparcia decyzyjnego i edukacyjnego, co jest zgodne z modelem komunikacji B2B. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy zrzut ekranu przedstawiający jeden z wpisów na blogu firmy LiveChat.



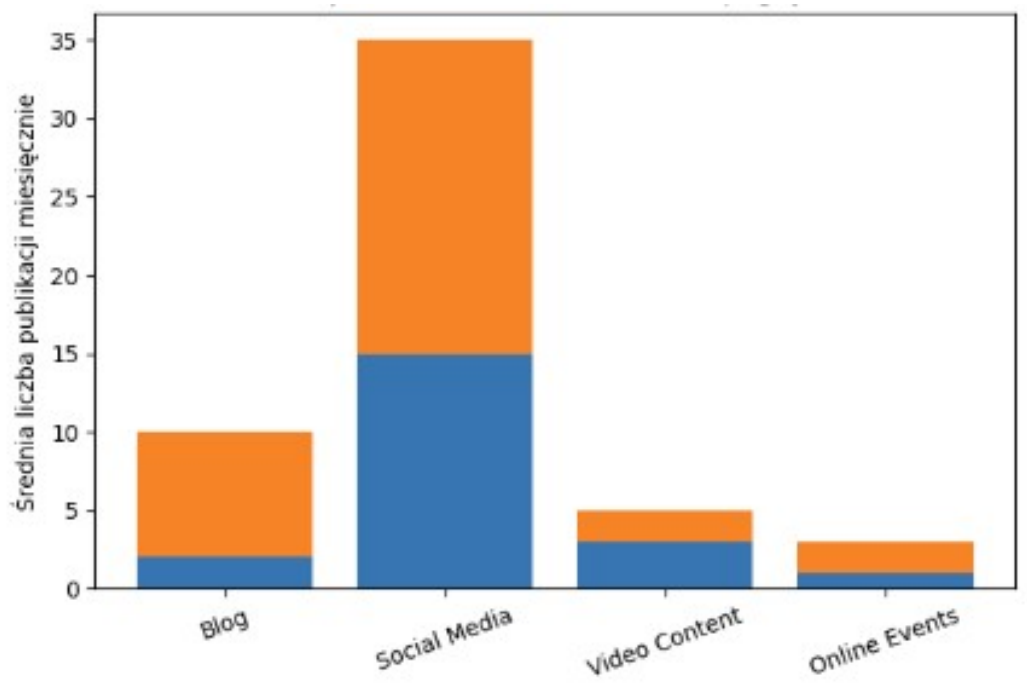
Rysunek 2. Przykład treści edukacyjnej i funkcjonalnej w komunikacji marketingowej LiveChat – artykuł ekspercki na blogu firmowym.

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów opublikowanych na oficjalnym blogu LiveChat.

Porównanie intensywności i form komunikacji

Analiza porównawcza wykazała, że obie firmy stosują odmienne strategie dystrybucji treści:

- CD Projekt RED koncentruje się na mniej częstych, ale silnie angażujących publikacjach, często powiązanych z ważnymi wydarzeniami (premiery, zapowiedzi).
- LiveChat stosuje regularną i systematyczną komunikację, opartą na kalendarzu publikacji i automatyzacji.



Wykres 1. Częstotliwość publikacji treści online (CD Projekt RED vs LiveChat – dane poglądowe).

Źródło: opracowanie własne

Wykres 1 przedstawia porównanie przybliżonej częstotliwości publikacji treści online przez CD Projekt RED oraz LiveChat w ujęciu miesięcznym, z uwzględnieniem czterech głównych kanałów komunikacji: blogów, mediów społecznościowych, treści wideo oraz wydarzeń online. Dane mają charakter poglądowy i opierają się na analizie regularności oraz intensywności działań komunikacyjnych obu firm.

Analiza wykresu wskazuje, że LiveChat charakteryzuje się wyższą i bardziej regularną intensywnością publikacji treści, szczególnie w obszarze blogów oraz mediów społecznościowych, co jest typowe dla komunikacji marketingowej w modelu B2B. Z kolei CD Projekt RED publikuje treści rzadziej, jednak koncentruje się na materiałach o wysokim potencjale angażującym, zwłaszcza w formie treści wideo i wydarzeń online, powiązanych z kluczowymi momentami cyklu życia produktu.

Efektywność treści – zaangażowanie i reakcje odbiorców

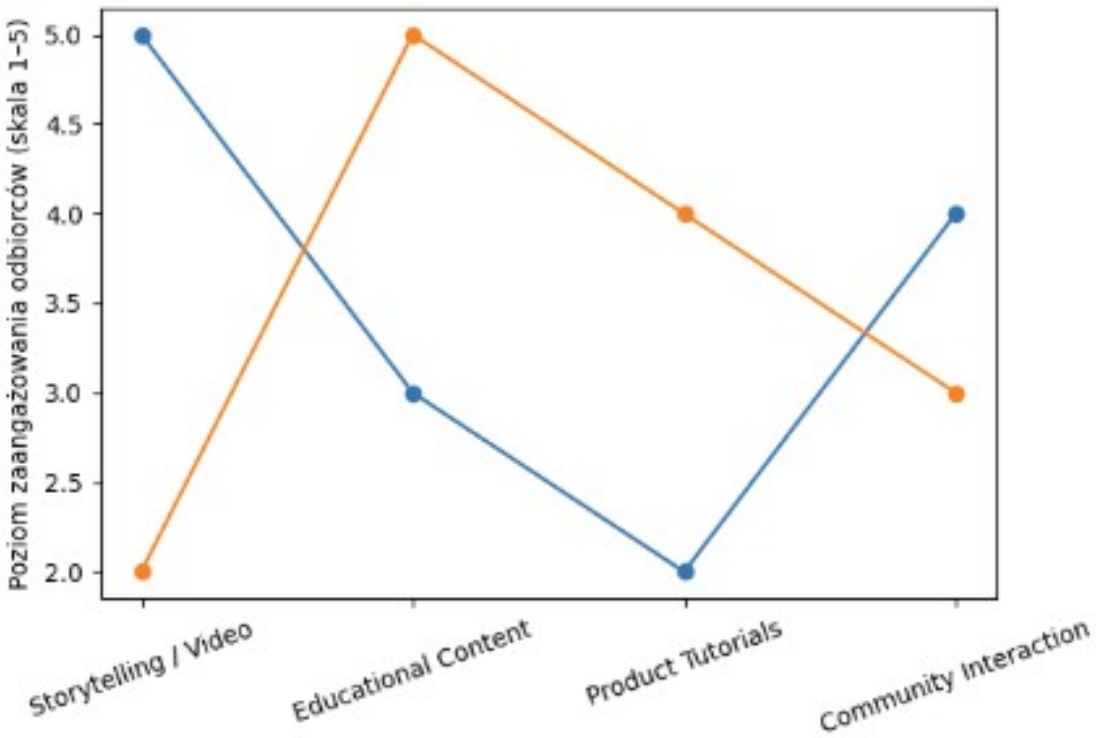
Wyniki analizy wskazują, że treści o wysokim stopniu personalizacji i dopasowania do potrzeb odbiorców generują większe zaangażowanie.

W przypadku CD Projekt RED szczególnie skuteczne są:

- materiały wideo prezentujące kulisy produkcji,
- narracyjne zapowiedzi fabularne,
- interaktywne wydarzenia online.

LiveChat osiąga najwyższy poziom zaangażowania w przypadku:

- treści edukacyjnych odpowiadających na konkretne problemy biznesowe,
- studiów przypadków klientów,
- webinarów i materiałów eksperckich.



Wykres 2. Typy treści a poziom zaangażowania odbiorców (CD Projekt RED vs LiveChat – dane poglądowe).

Źródło: opracowanie własne

Wykres 2 przedstawia porównanie poziomu zaangażowania odbiorców w zależności od typu publikowanych treści marketingowych w przypadku CD Projekt RED oraz LiveChat. Poziom zaangażowania został przedstawiony w skali pięciostopniowej i ma charakter poglądowy, oparty na analizie reakcji użytkowników (komentarze, interakcje, udostępnienia) oraz charakteru komunikacji marketingowej obu firm.

Analiza wykresu wskazuje, że CD Projekt RED osiąga najwyższy poziom zaangażowania w przypadku treści storytellingowych i wideo, które są silnie osadzone w narracji fabularnej oraz emocjonalnej. Wysoki poziom zaangażowania generują również treści związane z interakcją społecznościową, co potwierdza skuteczność strategii budowania społeczności wokół marki.

Z kolei LiveChat notuje najwyższe zaangażowanie w przypadku treści edukacyjnych oraz tutoriali produktowych, które odpowiadają na konkretne potrzeby informacyjne i decyzyjne klientów biznesowych. Tego typu treści pełnią funkcję wsparcia użytkownika i wpisują się w model komunikacji charakterystyczny dla sektora B2B.

Wykorzystanie danych i personalizacji

Analiza przypadków pokazuje, że LiveChat w znacznie większym stopniu wykorzystuje dane do personalizacji komunikacji. Przejawia się to m.in. w:

- automatycznych rekomendacjach treści,
- segmentacji użytkowników,
- dynamicznych kampaniach e-mail marketingowych.

W CD Projekt RED personalizacja ma charakter bardziej ogólny i opiera się głównie na segmentacji społeczności (np. różne kanały komunikacji dla różnych grup fanów), choć widoczny jest stopniowy wzrost wykorzystania danych analitycznych w planowaniu kampanii. Poniżej została zaprezentowana tabela przedstawiająca porównanie poziomu personalizacji i wykorzystania narzędzi marketingowych w CD Projekt RED oraz LiveChat w kluczowych obszarach komunikacji z odbiorcami, a zastosowane wskaźniki oznaczają:

- Niski – ograniczone wykorzystanie narzędzi lub działań w danym obszarze, głównie w podstawowym zakresie, bez zaawansowanej automatyzacji czy indywidualizacji komunikacji.
- Średni – umiarkowany poziom rozwoju danego obszaru, obejmujący częściową automatyzację, segmentację odbiorców oraz wykorzystanie danych w wybranych działaniach marketingowych.

- Wysoki – zaawansowane i systematyczne wykorzystanie narzędzi oraz danych, umożliwiające skuteczną personalizację treści, automatyzację procesów oraz efektywną analizę zachowań użytkowników.
- Bardzo wysoki – bardzo zaawansowany poziom działań, oparty na intensywnej, często dwukierunkowej interakcji z odbiorcami, bieżącym dostosowywaniu komunikacji oraz głębokim wykorzystaniu danych i technologii.

Obszar	CD Projekt RED	LiveChat
Marketing automation	niski	wysoki
Personalizacja treści	średnia	wysoka
Analityka danych	średnia	wysoka
Interakcja z odbiorcą	bardzo wysoka	wysoka

Tabela 1. Porównanie poziomu wykorzystania danych i automatyzacji w komunikacji marketingowej badanych firm

Źródło: opracowanie własne

Jak widać na powyższej tabeli, analiza porównawcza obejmuje cztery kluczowe obszary: stopień zastosowania narzędzi marketing automation, poziom personalizacji treści, zakres wykorzystania analityki danych oraz charakter interakcji z odbiorcami. Dane te mają charakter jakościowy i poglądowy, wynikający z analizy treści publikowanych przez badane firmy oraz obserwacji sposobów prowadzenia komunikacji marketingowej.

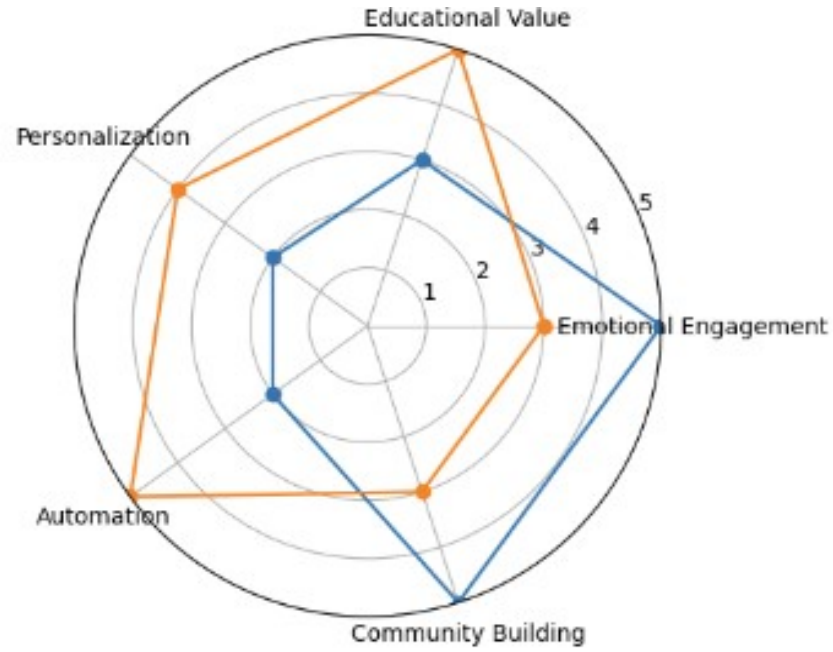
Analiza wskazuje, że LiveChat charakteryzuje się wysokim poziomem wykorzystania narzędzi automatyzacji oraz analityki danych, co umożliwia personalizację komunikacji marketingowej na różnych etapach ścieżki zakupowej klienta. Takie podejście jest typowe dla firm działających w modelu B2B i oferujących rozwiązania typu SaaS, gdzie efektywność komunikacji zależy od precyzyjnego dopasowania przekazu do potrzeb użytkowników.

W przypadku CD Projekt RED wykorzystanie danych i automatyzacji ma charakter bardziej selektywny i uzupełniający. Komunikacja marketingowa opiera się przede wszystkim na budowaniu zaangażowania emocjonalnego i społecznościowego, przy jednoczesnym wykorzystywaniu danych analitycznych do planowania kampanii i segmentacji odbiorców. Różnice te potwierdzają wpływ modelu biznesowego na sposób implementacji narzędzi marketingu internetowego w firmach high-tech.

Synteza wyników i porównanie modeli

Zestawienie wyników wskazuje, że:

- skuteczność marketingu internetowego w firmach high-tech jest silnie powiązana z dopasowaniem narzędzi do modelu biznesowego,
- CD Projekt RED skutecznie buduje zaangażowanie emocjonalne i społecznościowe,
- LiveChat osiąga efektywność poprzez edukację, automatyzację i personalizację komunikacji.



Wykres 3. Modele efektywności marketingu internetowego (B2C – CD Projekt RED vs B2B – LiveChat) (dane poglądowe).

Źródło: opracowanie własne

Wykres 3 przedstawia syntetyczny model efektywności marketingu internetowego w dwóch odmiennych modelach biznesowych: B2C (CD Projekt RED) oraz B2B (LiveChat). Analiza obejmuje pięć kluczowych wymiarów komunikacji marketingowej: zaangażowanie emocjonalne, wartość edukacyjną treści, poziom personalizacji, stopień automatyzacji oraz budowanie społeczności. Dane mają charakter poglądowy i wynikają z jakościowej analizy treści oraz sposobów wykorzystania narzędzi marketingu internetowego przez badane firmy.

Wyniki wskazują, że CD Projekt RED osiąga najwyższą efektywność w obszarach zaangażowania emocjonalnego oraz budowania społeczności, co jest charakterystyczne dla

komunikacji marketingowej w sektorze B2C. Strategia ta opiera się na narracji, storytellingu oraz aktywnym zarządzaniu społecznościami fanów.

Z kolei LiveChat charakteryzuje się wysoką efektywnością w zakresie wartości edukacyjnej, personalizacji oraz automatyzacji komunikacji marketingowej, co odpowiada specyfice rynku B2B oraz modelowi SaaS. W tym przypadku marketing internetowy pełni funkcję wsparcia procesów decyzyjnych klientów oraz długofalowego budowania relacji opartych na wiedzy i danych.

5. Dyskusja wyników badań na tle literatury oraz implikacje praktyczne

Przeprowadzone badanie potwierdza, że sposób i efektywność wykorzystania narzędzi marketingu internetowego w komunikacji marketingowej firm high-tech są silnie uzależnione od modelu biznesowego oraz charakteru relacji z odbiorcami. Uzyskane wyniki pokazują, że mimo wykorzystywania zbliżonych kanałów cyfrowych, strategie komunikacyjne CD Projekt RED oraz LiveChat różnią się pod względem realizowanych funkcji komunikacyjnych, form przekazu oraz mechanizmów angażowania użytkowników.

Wyniki dotyczące spółki LiveChat wskazują, że w modelu B2B marketing internetowy pełni przede wszystkim funkcję edukacyjną oraz wspierającą procesy decyzyjne klientów. Taki sposób wykorzystania narzędzi cyfrowych jest zgodny z ustaleniami Miočević i in. (2024), którzy podkreślają, że w środowisku B2B cyfrowe innowacje usługowe sprzyjają przechodzeniu od komunikacji transakcyjnej do komunikacji relacyjnej, opartej na współtworzeniu wartości i długofalowej współpracy. Intensywne wykorzystanie treści eksperckich, marketing automation oraz analityki danych w analizowanym przypadku potwierdza, że komunikacja marketingowa w sektorze technologii zaawansowanych coraz silniej integruje funkcje informacyjne i relacyjne, jednocześnie wzmacniając jakość doświadczenia klienta.

Z perspektywy praktyki zarządzania komunikacją marketingową wyniki te wskazują, że w firmach high-tech działających w modelu B2B szczególnego znaczenia nabiera systematyczne projektowanie treści odpowiadających na konkretne potrzeby informacyjne użytkowników oraz integracja tych treści z procesami automatyzacji i personalizacji komunikacji. Oznacza to konieczność ścisłego powiązania strategii content marketingowej z systemami analitycznymi oraz rozwiązaniami marketing automation, tak aby komunikacja mogła realnie wspierać procesy decyzyjne klientów.

Odmienny charakter mają wyniki uzyskane dla CD Projekt RED, które korespondują z ustaleniami Patil (2023) oraz Kumar, Singh i Sharma (2025), wskazującymi na rosnącą rolę narracji, storytellingu oraz treści wizualnych – w tym tworzonych z wykorzystaniem rozwiązań opartych na generatywnej sztucznej inteligencji – w budowaniu zaangażowania konsumentów.

W analizowanym przypadku treści narracyjne i wizualne pełnią funkcję nie tylko informacyjną, lecz przede wszystkim relacyjną i wizerunkową, sprzyjając tworzeniu trwałych społeczności wokół marki.

Wyniki te potwierdzają, że w modelu B2C emocjonalny wymiar komunikacji marketingowej oraz konsekwentne budowanie narracji marki pozostają kluczowymi determinantami skuteczności działań online. Wyniki te pozostają również spójne z ustaleniami Hollebeek i Macky (2019) oraz Dessart, Veloutsou i Morgan-Thomas (2021), zgodnie z którymi zaangażowanie odbiorców w środowisku cyfrowym kształtowane jest nie tylko przez częstotliwość interakcji, lecz także przez możliwość współuczestnictwa w doświadczeniu marki oraz budowania relacji społecznych w ramach jej społeczności. Z perspektywy praktycznej oznacza to, że firmy technologiczne działające w modelu B2C powinny traktować media społecznościowe i wydarzenia online nie jedynie jako kanały dystrybucji treści promocyjnych, lecz jako kluczowe narzędzia zarządzania relacjami i społecznością użytkowników.

Istotnym wątkiem wyłaniającym się z analizy jest także zróżnicowany poziom wykorzystania danych, analityki oraz automatyzacji w komunikacji marketingowej. W przypadku LiveChat rozwiązania oparte na danych umożliwiają dynamiczne dostosowywanie treści do potrzeb użytkowników, co wpisuje się w koncepcję predykcyjnej analityki marketingowej oraz automatyzacji procesów komunikacyjnych opisywaną w literaturze przedmiotu. Z kolei CD Projekt RED wykorzystuje dane w sposób bardziej selektywny, koncentrując się głównie na analizie reakcji społeczności oraz planowaniu kampanii o wysokim potencjale angażującym. Wyniki te potwierdzają wnioski formułowane przez Davenport i in. (2020) oraz Huang i Rust (2021), zgodnie z którymi technologie oparte na sztucznej inteligencji i analityce danych stanowią narzędzie wspierające personalizację i jakość interakcji, jednak ich znaczenie w strategii komunikacyjnej zależy od specyfiki rynku oraz relacji z odbiorcami.

Z punktu widzenia praktyki oznacza to, że wysoki poziom automatyzacji nie jest uniwersalnym wyznacznikiem skuteczności komunikacji marketingowej. W modelu B2B automatyzacja i analityka stanowią fundament skalowalnej personalizacji przekazu, natomiast w modelu B2C kluczowe znaczenie zachowuje spójność narracji marki oraz zdolność do budowania zaangażowania emocjonalnego, nawet przy ograniczonym wykorzystaniu zaawansowanych systemów automatyzacji.

Wyniki badania wskazują również na centralne znaczenie spójności strategii komunikacyjnej oraz integracji narzędzi marketingu internetowego. Niezależnie od modelu biznesowego, skuteczność komunikacji rośnie wówczas, gdy poszczególne kanały i narzędzia cyfrowe są podporządkowane jasno określonym celom komunikacyjnym i wpisują się w długofalową strategię marki. W tym zakresie uzyskane rezultaty potwierdzają tezy Chaffeya i Ellis-Chadwick (2019), zgodnie z którymi marketing internetowy w firmach technologicznych powinien być traktowany jako element strategiczny, a nie jedynie operacyjne wsparcie działań promocyjnych.

Należy jednocześnie podkreślić ograniczenia przeprowadzonego badania. Zastosowanie metody studiów przypadków oraz jakościowy charakter analizy nie pozwalają na formułowanie uogólnień o charakterze statystycznym. Niemniej jednak uzyskane rezultaty umożliwiają identyfikację istotnych mechanizmów wykorzystania narzędzi marketingu internetowego w strategiach komunikacyjnych firm high-tech i stanowią punkt odniesienia do sformułowania syntetycznych wniosków przedstawionych w kolejnym rozdziale.

6. Podsumowanie

Celem artykułu była analiza efektywności narzędzi marketingu internetowego w komunikacji marketingowej firm high-tech na przykładzie dwóch polskich przedsiębiorstw funkcjonujących w odmiennych modelach biznesowych – B2C oraz B2B. Zastosowanie metody studiów przypadków umożliwiło identyfikację kluczowych różnic i podobieństw w sposobach projektowania strategii komunikacyjnych oraz wykorzystania narzędzi cyfrowych w budowaniu relacji z odbiorcami.

Wyniki badania wskazują, że efektywność marketingu internetowego w firmach high-tech nie wynika przede wszystkim z intensywności prowadzonych działań komunikacyjnych, lecz z ich dopasowania do specyfiki modelu biznesowego oraz charakteru relacji z odbiorcami. W modelu B2C kluczowe znaczenie mają treści narracyjne i wizualne oraz działania ukierunkowane na budowanie społeczności i zaangażowania emocjonalnego. Natomiast w modelu B2B dominującą rolę odgrywają treści edukacyjne i eksperckie, wspierane przez personalizację komunikacji oraz automatyzację procesów marketingowych.

Istotnym wnioskiem jest również rosnąca rola danych i analityki w strategiach komunikacyjnych firm technologicznych. Choć stopień wykorzystania zaawansowanych rozwiązań analitycznych i automatyzacyjnych różni się pomiędzy badanymi przypadkami, w obu strategiach marketing internetowy pełni funkcję strategiczną i wykracza poza tradycyjnie rozumianą promocję. Narzędzia cyfrowe stają się elementem zarządzania doświadczeniem klienta oraz budowania długofalowej przewagi konkurencyjnej.

Przedstawione wyniki mają charakter eksploracyjny i podlegają ograniczeniom wynikającym z jakościowej metody badawczej. Mogą one jednak stanowić podstawę do dalszych badań empirycznych, w szczególności badań ilościowych nad wpływem konkretnych narzędzi marketingu internetowego na zaangażowanie odbiorców, lojalność klientów oraz efektywność komunikacji marketingowej firm high-tech w różnych sektorach i na różnych rynkach.

Bibliografia

Książki

1. Biesok, G., & Wyród-Wróbel, J. (2016). *Modele satysfakcji klienta*. Warszawa: Wydawnictwo Difin.
2. Chaffey, D., &Ellis-Chadwick, F. (2019). Digital marketing: Strategy, implementation and practice (7th ed.). Pearson Education.
3. Yin, R. K. (2018). Case study research and applications: Design and methods (6th ed.). SAGE Publications.

Artykuły w czasopismach z DOI

4. Davenport, T. H., Guha, A., Grewal, D., &Bressgott, T. (2020). How artificial intelligence will change the future of marketing. Journal of the Academy of Marketing Science, 48, 24–42. https://doi.org/10.1007/s11747-019-00696-0
5. Dessart, L., Veloutsou, C., & Morgan-Thomas, A. (2021). Consumer engagement in online brand communities: A social media perspective. Journal of Product & Brand Management, 30(1), 28–42. https://doi.org/10.1108/JPBM-04-2019-2345
6. Hollebeek, L. D., & Macky, K. (2019). Digital content marketing's role in fostering consumer engagement, trust, and value: Framework, fundamental propositions, and implications. Journal of Interactive Marketing, 45, 27–41. https://doi.org/10.1016/j.intmar.2018.07.003
7. Huang, M.-H., & Rust, R. T. (2021). Artificial intelligence in service. Journal of Service Research, 24(1), 3–27. https://doi.org/10.1177/1094670520902266
8. Kumar, V., Singh, S., & Sharma, A. (2025). Marketing of technology-intensive products: An AI-driven approach. Journal of Business Research, 176, 114–128. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114128
9. Lemon, K. N., & Verhoef, P. C. (2016). Understanding customer experience throughout the customer journey. Journal of Marketing, 80(6), 69–96. https://doi.org/10.1509/jm.15.0420
10. Miočević, D., Herhausen, D., &Kleijnen, M. (2024). Digital service innovation in B2B markets: A customer-centric perspective. Industrial Marketing Management, 115, 180–193. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2023.10.006
11. Patil, D. (2023). Generative artificial intelligence in marketing and advertising: Advancing personalization and optimizing consumer engagement strategies. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/ssrn.4624723
12. Verhoef, P. C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Dong, J. Q., Fabian, N., & Haenlein, M. (2021). Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. Journal of Business Research, 122, 889–901. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.022

Źródła i strony internetowe

13. HubSpot. (2024). State of marketing report 2024. HubSpot Research.
14. IAB Polska. (2024). Internet 2023/2024. Interactive Advertising Bureau Polska.
15. McKinsey & Company. (2023). The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year. McKinsey Global Institute.

ODPORNOŚĆ KANAŁÓW DYSTRYBUCJI WYROBÓW MEDYCZNYCH – W KIERUNKU OMNIKANAŁÓW

Marzena KRAMARZ[1*], Martyna KRAMARZ [2]

[1] Politechnika Śląska; mkramarz@polsl.pl; https://orcid.org/0000-0003-0619-5809
[2] Politechnika Śląska; martyna.kramarz@lukasiewicz.ai.gov.pl;
* mkramarz@polsl.pl; Tel.: +48 605211005

Streszczenie: Systemy dystrybucji podlegają ciągłej ewolucji pod wpływem zmieniających się warunków rynkowych, rosnących oczekiwań klientów oraz postępującej cyfryzacji łańcuchów dostaw. Transformacja od kanałów dedykowanych ku strukturom wielokanałowym i omnikanałowym, obserwowana jest w większości sektorów gospodarki. Dystrybucja wyrobów medycznych nie podlega transformacji w takim tempie. Celem artykułu jest analiza zmian w tym sektorze, omówienie determinantów oraz identyfikacja wyzwań i ograniczeń stojących przed sieciami dystrybucji w drodze do budowy systemów omnikanałowych.

Słowa kluczowe: odporność, sieć dystrybucji, omnikanały, wyroby medyczne, transformacja cyfrowa.

RESILIENCE OF MEDICAL DEVICE DISTRIBUTION CHANNELS – TOWARDS OMNICHANNEL DISTRIBUTION

Abstract: Distribution systems are constantly evolving, driven by changing market conditions, rising customer expectations, and the ongoing digitalization of supply chains. The transformation from dedicated channels to multi-channel and omni-channel structures is observed in most economic sectors. Medical device distribution is not undergoing such a transformation at such a pace. The aim of this article is to analyze changes in this sector, discuss the determinants, and identify the challenges and limitations facing distribution networks as they build omni-channel systems.

Keywords: resilience, distribution networks, omnichannel, medical device, digital transformation.

Wprowadzanie

Pandemia COVID-19 stała się przełomowym momentem weryfikacji odporności systemów dystrybucji: przedsiębiorstwa dysponujące zintegrowanymi, wielokanałowymi strukturami sprzedaży i dostaw wykazały się istotnie wyższą zdolnością do absorpcji zakłóceń niż podmioty opierające się na tradycyjnych, liniowych kanałach (He i in., 2022). Doświadczenia pandemiczne stanowią zatem empiryczne potwierdzenie tezy, że omnikanałowość nie jest wyłącznie strategią sprzedażową, ukierunkowaną na dostarczanie spójnych doświadczeń zakupowych klientom korzystającym z różnych kanałów dystrybucji i jednocześnie wspierającą zrównoważony rozwój przedsiębiorstw, lecz istotnym elementem budowania odporności organizacji na zakłócenia egzogeniczne.

Branża wyrobów medycznych, oferująca produkty zarówno bezpośrednimi, jak i pośrednimi kanałami dystrybucji, nie jest jeszcze silnie zaawansowana w rozwoju omnikanałów. Tempo i charakter zmian systemów dystrybucji wyrobów medycznych są silnie zdeterminowane przez specyfikę regulacyjną, złożoność produktową oraz dualność segmentów odbiorców. Omnikanałowość – rozumiana jako pełna integracja kanałów fizycznych i cyfrowych, zapewniająca klientowi spójne doświadczenie zakupowe niezależnie od wybranej formy kontaktu (Kramarz, 2025) – wdrażana jest w tej branży selektywnie i nierównomiernie.

Celem artykułu jest analiza ewolucji kanałów dystrybucji wyrobów medycznych – od modeli jednokanałowych ku omnikanałowym – w kontekście budowania odporności systemów dystrybucji, ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki regulacyjnej i struktury rynku polskiego. W artykule podjęto analizę ewolucji systemów dystrybucji wyrobów medycznych, wskazując na dotychczasowe rozwiązania i kierunki rozwoju tych systemów, a w rezultacie identyfikując możliwości i bariery rozwoju omnikanałów na przykładzie polskiego rynku. Artykuł ma charakter przeglądowy i jest oparty na analizie literatury przedmiotu, aktów prawnych oraz danych statystycznych i branżowych dotyczących struktury sprzedaży wyrobów medycznych w Polsce.

Artykuł składa się z czterech części. W pierwszej omówiono ewolucję systemów dystrybucji – od kanałów dedykowanych ku strukturom omnikanałowym – w kontekście budowania odporności sieci dystrybucji. Drugą część poświęcono specyfice dystrybucji wyrobów medycznych: ich klasyfikacji, segmentacji odbiorców oraz determinantom organizacji przepływu, w tym regulacjom prawnym. Trzecia część zawiera analizę struktury sprzedaży wyrobów medycznych w Polsce z uwzględnieniem podziału na kanały instytucjonalne i detaliczne, stacjonarne i internetowe, oraz tendencji zmian w ostatnich latach. Artykuł zamykają wnioski, ograniczenia badawcze i rekomendacje

Wyzwania logistyczne współczesnych systemów dystrybucji

Odporność sieci dystrybucji i jej adaptacyjność

Współczesne systemy dystrybucji funkcjonują w warunkach rosnącej niepewności otoczenia makro- i mikroekonomicznego. Wśród kluczowych zakłóceń egzogenicznych, które w sposób zasadniczy przyspieszyły zmiany w systemach dystrybucji, wskazuje się pandemię COVID-19 oraz konflikty zbrojne. Zdarzenia te stały się katalizatorami zmian o charakterze endogenicznym i potwierdziły potrzebę budowania struktur odpornych na tego rodzaju zakłócenia. Liczne publikacje podejmujące problem zakłóceń systemowych potwierdzają konieczność poszukiwania struktur odpornych (Christopher i Peck, 2004).

Odporność łańcucha dostaw to zdolność systemu do przewidywania zakłóceń, adaptacji do nich oraz powrotu do stanu pierwotnego lub pożądanego po ich wystąpieniu (Christopher i Peck, 2004). W kontekście systemów dystrybucji odporność przejawia się przede wszystkim przez adaptacyjność – zdolność do rekonfiguracji kanałów dystrybucji w odpowiedzi na zmieniające się warunki rynkowe. Adaptacyjność jest tym wyższa, im bardziej system dystrybucji jest usieciowiony i zintegrowany informacyjnie.

Sieciowość implikuje wzrost liczby uczestników na tym samym poziomie kanału dystrybucji (Kramarz, 2023). Wzrasta znaczenie zarówno sieci handlowych, jak i sieci logistycznych tworzonych przez współpracujących dostawców usług. W nowoczesnych systemach dystrybucji wyraźnie zaznacza się rola koordynatora – podmiotu, którym może być firma handlowa o cechach hurtownika lub detalisty, producent albo operator logistyczny – synchronizującego cały proces zaopatrzenia w produkty i gromadzącego informacje o popycie (Kramarz i Kmiecik, 2024). Posiadana przez koordynatora wiedza ma istotny wpływ na poziom sprzedaży i zapasy w całym systemie dystrybucji.

Przed wybuchem pandemii COVID-19 w systemach dystrybucji wyraźnie zaznaczała się tendencja do silnego usieciowienia jako strategii budowania odporności. Paradygmat sieciowy w zarządzaniu – koncepcja quasiorganizacji złożonej z kooperujących przedsiębiorstw realizujących wspólny cel nadrzędny – zyskał wówczas szerokie uznanie jako odpowiedź na rosnącą niepewność rynkową, potrzebę dyferencjacji produktów i presję na jakość obsługi klienta. Charakterystyczną cechą tych sieci była dynamiczna przynależność uczestników: podmioty peryferyjne funkcjonowały doraźnie – wchodziły do sieci, gdy były potrzebne i wycofywały się, gdy zapotrzebowanie malało. Taka struktura zapewniała sieci wysoką elastyczność i adaptacyjność, pozwalając systemom dystrybucji radzić sobie z niepewnością bez konieczności utrzymywania trwałych, kosztownych zobowiązań relacyjnych na wszystkich jej poziomach. Jak wskazują Christopher i Holweg (2017), rekonfiguracja struktury sieci dostaw w odpowiedzi na zmiany otoczenia jest jednym z kluczowych mechanizmów

redukowania ekspozycji na ryzyko zakłóceń. Na początku pandemii, sieci o takiej właśnie strukturze okazały się bardziej odporne niż systemy oparte na tradycyjnych, liniowych kanałach dystrybucji – ich elastyczność umożliwiła szybkie dostosowanie się do gwałtownie zmieniających się warunków.

Pandemia ujawniła jednak granice odporności opartej wyłącznie na dynamicznej przynależności węzłów peryferyjnych. Po jej zakończeniu struktury sieciowe w systemach dystrybucji uległy dalszej ewolucji. Obserwuje się wyraźne dążenie do wzmacniania rdzenia sieci poprzez silną integrację kluczowych uczestników, bezpieczną wymianę informacji i transparentność przepływów – co bezpośrednio przekłada się na zdolność do proaktywnego zarządzania zakłóceniami (Tian i in., 2026). Pandemia nie podważyła zasadności modelu sieciowego, lecz ujawniła konieczność jego pogłębionej integracji informacyjnej Badania potwierdzają, że wyższy poziom transparentności łańcucha dostaw istotnie wzmacnia jego odporność, szczególnie w przypadku sieci o rozproszonych strukturach (Tian & Cui, 2025). Odporność zyskuje więc charakter wielopoziomowy: w rdzeniu sieci budowana jest poprzez zaufanie, trwałe relacje i integrację informacyjną, natomiast w jej warstwach peryferyjnych – poprzez dynamikę uczestnictwa i elastyczność przynależności podmiotów. Oba mechanizmy są komplementarne: rdzeń zapewnia stabilność i bezpieczeństwo przepływów, peryferia – adaptacyjność wobec zmiennego otoczenia. Takie rozumienie odporności jako własności wielowarstwowej sieci wpisuje się w postulowane w literaturze przejście od inżynierskiego paradygmatu odporności – rozumianej jako powrót do stanu równowagi – ku paradygmatowi adaptacyjnemu, traktującemu sieć dystrybucji jako złożony system adaptacyjny (Wieland i Durach, 2021).

Od kanałów dedykowanych do wielokanałowości – determinanty zmian

Tradycyjne kanały dystrybucji były projektowane jako dedykowane konkretnym segmentom rynku. Produkty standardowe, wytwarzane zgodnie z materiałowym punktem rozdziału Make to Stock (MTS), wymagały szerokich, intensywnych kanałów dystrybucji zapewniających wysoką dostępność produktu z zapasów w wielu lokalizacjach. Wprowadzenie strategii różnicowania produktów zmieniło intensywność dystrybucji – kanały ulegały skróceniu, zawężeniu i selektywnemu doborowi (Kramarz i Kramarz, 2014). W przypadku materiałowego punktu rozdziału Assemble to Order (ATO) dobór pośredników był determinowany zdolnością do realizacji produkcji odroczonej i konfigurowania produktów z modułów. Z kolei w przypadku Make to Order (MTO) i Engineering to Order (ETO) dystrybucja przesuwała się ku dystrybucji bezpośredniej, z udziałem organizacji świadczących usługi logistyczne i agentów sprzedaży (Kramarz i Kramarz, 2019).

W dystrybucji od wielu lat obserwuje się dwa trendy – rozwój e-commerce i personalizacja produktów. Pomimo różnic we wpływie na strukturę kanałów, oba wskazane trendy łączy

wspólna konsekwencja: sieciowość systemu dystrybucji, której przykładem są systemy multikanałowe. Multikanał oznacza udostępnienie klientowi zróżnicowanych opcji nabycia produktu – zarówno cyfrowego, jak i stacjonarnego. Istotą multikanałowości jest skupienie na produkcie i sposobie dystrybucji (Stojković i in., 2016). Poszczególne kanały nie są ze sobą zintegrowane – każdy stanowi odrębną ofertę zakupu, dając klientowi dużą swobodę wyboru sposobu zakupu. Kluczowe w tej strategii jest maksymalizowanie intensywności obecności produktu na rynku, co przekłada się na wysoką dostępność produktu postrzeganą przez klienta.

Do kluczowych determinantów przejścia od kanałów dedykowanych do multikanałowości należą: rozwój e-commerce zmieniający modele biznesowe poprzez nowe formy udostępniania i sprzedaży produktów (subskrypcje, platformy marketplace, dropshipping, paczkomaty, punkty odbioru) (Li, 2025), a także wzrost wymagań klientów w zakresie sposobu udostępnienia, dostarczenia i możliwości zwrotu produktu – co wiąże się bezpośrednio z rekonfiguracją sieci dystrybucji widoczną zwłaszcza od 2020 roku (He i in., 2022; Ratchford i in., 2022).

Cross- kanały i omnikanały – integracja odpowiedzią na problem odporności

Strategia cross-channel zakłada, że organizacja tworzy wiele kanałów dystrybucji, pomiędzy którymi klient może przechodzić (Watson i in., 2015). Nie jest to jednak strategia w pełni integrująca kanały – klient może przechodzić pomiędzy kanałami na etapie poszukiwania informacji i komunikacji, jednak proces zakupu pozostaje przypisany do konkretnego kanału. Cross-channel jest silniej zróżnicowany w wymiarze marketingowym niż logistycznym od strategii multikanałowej i omnikanałowej. Wykorzystuje zintegrowane kanały kontaktu z klientem, jednak nie umożliwia swobodnego przechodzenia między nimi na etapie transakcji.

Strategia omnikanałowa zapewnia spersonalizowaną ofertę dla każdego użytkownika i zaciera granicę między sprzedażą tradycyjną a internetową. Kluczowe w tej koncepcji jest utrzymanie relacji z klientem i budowanie długoterminowych relacji (Risberg, 2023). W centrum wszystkich możliwych opcji zakupu i zwrotu produktu stoi klient, a poszczególne opcje są ze sobą zintegrowane, wymieniają dane, a klient może wybrać dowolną konfigurację obsługi (Vhatkar i in., 2024). Omnikanał jako strategia sprzedaży wskazuje, że marki zapewniają nie tylko wielokanałowy dostęp do produktów, lecz także spójność doświadczeń w każdym kanale (Kang, 2019). Złożone systemy dystrybucji przyjmują cel dostarczenia jednakowej wysokiej wartości niezależnie od wybranej przez klienta formy składania zamówień, komunikacji i obsługi zwrotów (Shen i in., 2018).

Omnikanał łączy wymagania klientów hurtowych, sklepów detalicznych i indywidualnych klientów e-commerce w ramach jednej organizacji (Shi i in., 2020). Podmioty te różnią się zasadniczo wolumenem i częstotliwością zamówień oraz poziomem sezonowych wahań popytu. Połączenie tych rozbieżnych potrzeb logistycznych rodzi praktyczne wyzwania – przede wszystkim w zakresie zarządzania magazynem, a w szczególności decyzji o łączeniu

wszystkich zamówień i ich realizacji z jednego magazynu lub infrastrukturalnym wyodrębnieniu zamówień online i stacjonarnych (Kembro i Norrman, 2020). Decyzja ta zależy od wielu czynników: szczegółowych charakterystyk klientów, udziału każdego kanału w całkowitej sprzedaży, liczby SKU, a także skali działalności i planów wzrostu firmy (Kramarz i Kmiecik, 2024).

Z perspektywy odporności systemu dystrybucji strategia omnikanałowa stanowi odpowiedź na wysoką niepewność otoczenia. Integracja kanałów fizycznych i cyfrowych, zaawansowane systemy zarządzania zapasami w czasie rzeczywistym oraz elastyczność form dostawy i zwrotu produktów budują zdolność systemu do absorpcji zakłóceń. Rekonfiguracja sieci dystrybucji – szczególnie widoczna od 2020 roku – przyspieszyła konsolidację modeli biznesowych zarówno w handlu (dropshipping), jak i logistyce (fulfillment) (He i in., 2022; Ratchford i in., 2022).

Ograniczeniem wdrożenia strategii omnikanałowej są przede wszystkim wyzwania organizacyjno-informacyjne: integracja systemów IT (ERP, WMS, OMS, TMS, CRM), zarządzanie zwrotami bez zakłócania innych operacji magazynowych oraz utrzymanie spójnych standardów obsługi we wszystkich kanałach (Kramarz, 2025). Determinantami sprawczymi pozostają natomiast: rosnące oczekiwania klientów w zakresie elastyczności i personalizacji obsługi, presja kosztowa wymuszająca optymalizację przepływów oraz postępująca cyfryzacja łańcuchów dostaw (Kramarz i Kmiecik, 2024).

Powyższe przesłanki ewolucji systemów dystrybucji stanowią punkt wyjścia do analizy specyfiki dystrybucji wyrobów medycznych, gdzie regulacyjne, logistyczne i rynkowe uwarunkowania tworzą odrębny kontekst tej transformacji.

Systemy dystrybucji wyrobów medycznych – modele i determinanty

Dystrybucja wyrobów medycznych stanowi szczególny przypadek organizacji przepływu produktów, w którym uwarunkowania regulacyjne, specyfika produktu oraz zróżnicowanie odbiorców kształtują struktury przepływu w sposób zasadniczo odmienny od innych branż. Zrozumienie tych uwarunkowań wymaga w pierwszej kolejności precyzyjnego zdefiniowania przedmiotu dystrybucji oraz identyfikacji segmentów klientów, których odmienne potrzeby logistyczne determinują kształt sieci dystrybucji.

1.10. Wyroby medyczne i ich klasyfikacja

Rynek wyrobów medycznych charakteryzuje się wyjątkową heterogenicznością produktową. Zgodnie z polskim prawodawstwem wyrób medyczny definiowany jest jako narzędzie, przyrząd, urządzenie, oprogramowanie, materiał lub inny artykuł, stosowany samodzielnie lub w połączeniu, w tym z oprogramowaniem przeznaczonym przez jego wytwórcę do używania specjalnie w celach diagnostycznych lub terapeutycznych i niezbędnym

do jego właściwego stosowania, przeznaczony przez wytwórcę do stosowania u ludzi w celu: diagnozowania, zapobiegania, monitorowania, leczenia lub łagodzenia przebiegu choroby; diagnozowania, monitorowania, leczenia, łagodzenia lub kompensowania skutków urazu lub upośledzenia; badania, zastępowania lub modyfikowania budowy anatomicznej lub procesu fizjologicznego; regulacji poczęć – który nie osiąga zasadniczego zamierzonego działania w ciele lub na ciele ludzkim środkami farmakologicznymi, immunologicznymi lub metabolicznymi, lecz którego działanie może być wspomagane takimi środkami (Ustawa o wyrobach medycznych, 2010). Na rynku dostępnych jest ponad 500 tysięcy różnych wyrobów medycznych, co kontrastuje z ok. 16 tysiącami produktów leczniczych (POLMED, 2024). Wartość polskiego rynku wyrobów medycznych szacowana jest na około 11 mld zł (POLMED, 2024).

Kluczowym kryterium klasyfikacyjnym wyrobów medycznych jest ryzyko związane z ich stosowaniem (Wilk, i inni 2024). Zgodnie z obowiązującymi przepisami wyroby medyczne klasyfikuje się do czterech klas: klasy I (np. kołnierze ortopedyczne, rękawice do badań, wózki inwalidzkie), klasy IIa (np. opatrunki hydrożelowe, cewniki jednorazowe, klisze rentgenowskie), klasy IIb (np. pojemniki na krew, prezerwatywy, respiratory) oraz klasy III (np. implanty piersi, zastawki serca, protezy naczyniowe). W ramach klasy I wyróżnia się dodatkowo wyroby z funkcją pomiarową oraz wyroby sterylne, wobec których stosuje się zaostrzone wymagania. Czynnikami branymi pod uwagę podczas klasyfikacji są m.in.: stopień inwazyjności, czas i rodzaj kontaktu z pacjentem, sposób zasilania oraz obecność składników potencjalnie niebezpiecznych (np. produkty lecznicze, składniki krwiopochodne, tkanki zwierzęce). Klasyfikacja wyrobu medycznego ma fundamentalne znaczenie praktyczne – od niej zależy rodzaj procedury oceny zgodności, którą musi przeprowadzić wytwórca (Nowak i inni 2023). Im wyższa klasa wyrobu, tym bardziej restrykcyjna procedura oceny zgodności i tym większe wymagania wobec całego łańcucha dystrybucji. (Ustawa o wyrobach medycznych, 2010; Podlaskie Centrum Eksportera, 2024).

W Polsce w 2020 roku funkcjonowało ok. 5 266 podmiotów gospodarczych związanych z wytwarzaniem, importem lub dystrybucją wyrobów medycznych, z czego jedynie 682 prowadziło działalność aktywnie i w sposób niepośredniczący – co odpowiadało 13% wszystkich zarejestrowanych podmiotów (Łyszczarz i in., 2022, za: Podlaskie Centrum Eksportera, 2024). Łączne przychody netto ze sprzedaży branży wyrobów medycznych w Polsce w 2020 roku wyniosły szacunkowo ok. 17,5 mld zł, a zatrudnienie w sektorze – ok. 30 tysięcy osób, przy czym za połowę zatrudnienia odpowiadało 30 największych firm w branży (Podlaskie Centrum Eksportera, 2024). Wśród producentów wyrobów medycznych w Polsce dominuje produkcja wyrobów nieinwazyjnych – firmy skupiające się na tej kategorii generują 66% ogólnych przychodów producentów, a wśród głównych grup produktowych wskazuje się wyroby ortopedyczne i rehabilitacyjne, meble szpitalne, wyposażenie sal operacyjnych oraz artykuły jednorazowe (Podlaskie Centrum Eksportera, 2024).

Z perspektywy organizacji sieci dystrybucji wyrobów medycznych kluczowe znaczenie mają trzy wzajemnie powiązane grupy determinantów: segmentacja odbiorców, cechy logistyczne produktu oraz uwarunkowania regulacyjne. Determinanty te łącznie kształtują strukturę przepływów w sieci i decydują o tym, które modele dystrybucji – od kanałów dedykowanych po struktury omnikanałowe – są możliwe lub optymalne dla poszczególnych kategorii wyrobów i segmentów rynku.

Branża wyrobów medycznych operuje w trzech podstawowych segmentach odbiorców: Business-to-Business (B2B), Business-to-Consumer (B2C) oraz Business-to-Government (B2G), z których każdy charakteryzuje się odmiennymi profilami nabywców i zachowaniami zakupowymi (Prestinoni, 2025). Segment B2B jest dominujący w systemach ochrony zdrowia krajów rozwiniętych i obejmuje szpitale, wyspecjalizowane kliniki, gabinety lekarskie i rehabilitacyjne, laboratoria diagnostyczne oraz prywatne sieci placówek medycznych, które nabywają wyroby medyczne bezpośrednio lub poprzez sieci dystrybucji (Prestinoni, 2025). Decyzje zakupowe w segmencie B2B podejmowane są najczęściej przez wielodyscyplinarne komitety zakupowe, w których skład wchodzą lekarze, inżynierowie biomedyczni, specjaliści ds. zamówień i ekonomiści zdrowia, a kluczowymi kryteriami oceny są skuteczność kliniczna, zgodność z regulacjami, warunki serwisowe i całkowity koszt posiadania (Prestinoni, 2025). W bardziej rozdrobnionych systemach ochrony zdrowia, takich jak system amerykański, funkcję koordynującą zakupy instytucjonalne pełnią organizacje zbiorowego zakupu (GPO – Group Purchasing Organizations), negocjujące warunki kontraktów w imieniu sieci placówek (Prestinoni, 2025).

Segment B2C obejmuje pacjentów i użytkowników indywidualnych nabywających wyroby medyczne bezpośrednio dla własnych potrzeb zdrowotnych – sprzęt rehabilitacyjny, wyroby stomijne, materiały opatrunkowe, glukometry, aparaty słuchowe czy urządzenia do monitorowania parametrów życiowych. Segment ten charakteryzuje się rozproszeniem geograficznym nabywców, niską przewidywalnością popytu, rosnącą wrażliwością na dostępność wielokanałową oraz potrzebą wsparcia informacyjnego przy wyborze produktu (Wittayakom, 2022). Dynamiczny rozwój urządzeń noszonych (wearables) oraz telemedycyny istotnie poszerza ten segment – 45% populacji USA korzysta z trackerów fitness, a rosnące zainteresowanie zdalnym monitorowaniem zdrowia tworzy nowe kategorie wyrobów medycznych klasy I i IIa kierowanych bezpośrednio do konsumentów (Podlaskie Centrum Eksportera, 2024). Segment B2G tworzą natomiast podmioty sektora publicznego: ministerstwa zdrowia, agencje rządowe, wojsko, służby ratownicze i systemy ubezpieczeń zdrowotnych, których zakupy realizowane są w oparciu o procedury przetargowe i zamówienia publiczne, z silną presją na standaryzację, transparentność i optymalizację kosztową (Prestinoni, 2025).

Drugim determinantem organizacji sieci dystrybucji wyrobów medycznych są cechy logistyczne samego produktu, które w tej grupie towarowej są wyjątkowo zróżnicowane i często restrykcyjne. Wyroby medyczne różnią się zasadniczo pod względem: podatności na

działanie czynników atmosferycznych (temperatura, wilgotność, promieniowanie UV) – wymagającej kontrolowanych warunków przechowywania i transportu, szczególnie dla wyrobów sterylnych i implantów; podatności na uszkodzenia mechaniczne – decydującej o wymaganiach opakowaniowych i manipulacyjnych; terminu przydatności do użycia – ograniczającego możliwości budowania zapasów buforowych i wymuszającego rotację; gabarytów i ciężaru – determinujących dobór środków transportu i konfigurację magazynów; podatności manipulacyjnej – wpływającej na możliwość automatyzacji procesów kompletacji i wydań; higroskopijności – szczególnie istotnej dla materiałów opatrunkowych, wyrobów chłonnych i niektórych implantów; a także sterylności – wymagającej utrzymania łańcucha czystości od producenta do punktu użycia. Złożoność profilu logistycznego wyrobów medycznych sprawia, że w praktyce jeden podmiot dystrybucyjny rzadko jest w stanie obsłużyć efektywnie wszystkich uczestników sieci – stąd tendencja do specjalizacji ogniw łańcucha dystrybucji i tworzenia zróżnicowanych modeli przepływu dla różnych klas produktowych.

Łącznie, zróżnicowanie segmentów odbiorców oraz złożony profil logistyczny produktów medycznych tworzą warunki, w których żaden pojedynczy model dystrybucji – ani czysto kanałowy, ani czysto sieciowy – nie jest w stanie efektywnie obsłużyć całego rynku. Producent wyrobów klasy III kierujący produkty do szpitali publicznych w trybie przetargowym (B2G) funkcjonuje w zupełnie innej logice przepływu niż dystrybutor wyrobów klasy I dla klientów indywidualnych (B2C) poprzez sklepy internetowe. Ta fundamentalna dualność – a właściwie trójdzielność – segmentacyjna stanowi jeden z głównych determinantów ewolucji modeli dystrybucji wyrobów medycznych, którą szczegółowo opisują kolejne podrozdziały. Trzecią determinantą, która nakłada się na oba powyższe, są regulacje prawne.

1.11. Determinanty organizacji przepływu wyrobów medycznych

Organizacja przepływu wyrobów medycznych podlega wielowymiarowym uwarunkowaniom, wśród których szczególną rolę odgrywają regulacje prawne na poziomie krajowym i europejskim. Tworzą one ramy, w których muszą funkcjonować wszystkie ogniwa łańcucha dystrybucji – od wytwórcy, przez importera i dystrybutora, aż do końcowego użytkownika.

Podstawowym aktem regulacyjnym na poziomie Unii Europejskiej jest Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 w sprawie wyrobów medycznych (MDR – Medical Device Regulation), które zastąpiło wcześniejszą Dyrektywę o wyrobach medycznych (MDD 93/42/EWG) i weszło w życie w maju 2021 roku (European Commission, 2021). Rozporządzenie MDR ustanawia kompleksowe ramy regulacyjne dla produkcji i dystrybucji wyrobów medycznych na obszarze UE, zaostrzając wymagania w zakresie bezpieczeństwa i jakości w całym łańcuchu dostaw. Do kluczowych wymogów MDR wpływających na organizację dystrybucji należą: obowiązek stosowania systemu Unikalnej Identyfikacji Urządzenia (UDI – Unique Device Identification) zwiększającego identyfikowalność wyrobów w całym łańcuchu dostaw, rejestracja wyrobów i podmiotów w europejskiej bazie danych

EUDAMED, rozszerzone obowiązki nadzoru posprzedażowego oraz zaostrzenie wymogów wobec jednostek notyfikowanych (TÜV Rheinland, 2021). Rozporządzenie MDR reguluje odrębnie obowiązki wytwórców (art. 10), importerów (art. 13), dystrybutorów (art. 14) oraz zasady identyfikowalności w łańcuchu dostaw (art. 25) i sprzedaż na odległość (art. 6), co bezpośrednio kształtuje możliwe modele dystrybucji (Quality Systems Compliance, 2021).

Na poziomie krajowym podstawowym aktem prawnym jest Ustawa o wyrobach medycznych z dnia 7 kwietnia 2022 r. (Dz.U. poz. 974), będąca implementacją rozporządzenia MDR do polskiego porządku prawnego. Wprowadza ona m.in. obowiązek rejestracji dystrybutorów w wykazie podmiotów prowadzonym przez Urząd Rejestracji Produktów Leczniczych, Wyrobów Medycznych i Produktów Biobójczych (URPL). Obowiązek rejestracji dotyczy dystrybutorów z siedzibą na terytorium Polski, którzy po raz pierwszy udostępniają wyrób na rynku krajowym (Kondrat, 2023). Regulacje te istotnie podnoszą bariery wejścia do kanałów dystrybucji i wymuszają profesjonalizację podmiotów pośredniczących.

Oprócz uwarunkowań prawnych na organizację przepływu wyrobów medycznych wpływają determinanty o charakterze rynkowym i logistycznym. Po pierwsze, specyfika produktu – wyroby medyczne wysokich klas (IIb, III) wymagają szczególnych warunków przechowywania i transportu, ścisłej kontroli temperatur, reżimu sterylności oraz precyzyjnej dokumentacji każdego ogniwa przepływu. Po drugie, złożoność procesów certyfikacji – wytwórcy spoza UE muszą działać przez autoryzowanego przedstawiciela, co wydłuża i komplikuje proces dystrybucji. Po trzecie, struktura kanałów dystrybucji wyrobów medycznych w Polsce wykazuje charakterystyczną dualność: dominujący model mieszany, w którym hurtownie farmaceutyczne obsługują jednocześnie produkty lecznicze i wyroby medyczne (PKD 46.46.Z obejmuje sprzedaż hurtową wyrobów farmaceutycznych i medycznych łącznie), współistnieje z wyspecjalizowanymi dystrybutorami działającymi w segmentach B2B – sprzętu szpitalnego, implantów czy sprzętu diagnostycznego (często będącymi jednocześnie importerami lub autoryzowanymi przedstawicielami producentów). Po czwarte, rosnąca rola e-commerce i sprzedaży wielokanałowej – handel internetowy produktami OTC i wyrobami medycznymi w Polsce osiągnął w 2023 roku wartość ok. 2,8 mld zł netto (PMR, 2023), a liczba aptek prowadzących sprzedaż wysyłkową z wykorzystaniem strony internetowej wzrosła z 164 w 2021 roku do 236 w 2024 roku (GUS, 2024).

Wyzwania logistyczne sektora wyrobów medycznych dodatkowo koncentrują się wokół kilku kluczowych obszarów. Pierwszym jest zarządzanie identyfikowalnością – wymóg UDI i EUDAMED wymusza implementację zaawansowanych systemów śledzenia wyrobów w całym łańcuchu dostaw. Drugim jest zarządzanie zwrotami i wycofaniami – wymogi MDR w zakresie nadzoru posprzedażowego nakładają na dystrybutorów obowiązek utrzymywania systemów umożliwiających szybkie wycofanie wyrobu z rynku. Trzecim jest obsługa różnorodnych wymagań klientów instytucjonalnych i indywidualnych w ramach coraz bardziej zintegrowanych systemów dystrybucji.

Modele dystrybucji wyrobów medycznych

Dystrybucja wyrobów medycznych, podobnie jak innych dóbr konsumenckich i przemysłowych, podlega procesowi ewolucji od modeli opartych na dedykowanych, jednorodnych kanałach ku strukturom sieciowym i omnikanałowym. Ewolucja ta przebiega jednak w specyficznym kontekście sektorowym, gdzie rygorystyczne regulacje prawne, różnorodność produktowa i dualność segmentacji klientów kształtują tempo i charakter zmian.

W tradycyjnym modelu single-channel dystrybucja wyrobów medycznych realizowana była poprzez dedykowane, hierarchiczne kanały: producent – hurtownia – szpital/apteka lub producent – autoryzowany dystrybutor – placówka medyczna. Model ten charakteryzował się wysoką specjalizacją pośredników i silnym dopasowaniem kanału do jednorodnego segmentu odbiorców. Jak wskazuje literatura, taki model sprawdzał się w warunkach stabilnego, przewidywalnego popytu i ograniczonej różnorodności produktowej (ASPE, 2021). W Stanach Zjednoczonych wiodącą rolę dystrybutorów odgrywały podmioty takie jak McKesson, Cardinal Health i AmerisourceBergen, które konsolidowały zakupy od wielu producentów, magazynowały produkty w centralnych magazynach i sprzedawały je szpitalom (ASPE, 2021). Zaletą tego modelu dla szpitali była możliwość zamawiania produktów wielu producentów od jednego dystrybutora, co redukuje koszty administracyjne i logistyczne.

Istotnym elementem ewolucji modeli dystrybucji w sektorze wyrobów medycznych na rynkach rozwiniętych – szczególnie w USA – było pojawienie się organizacji zbiorowego zakupu (GPO – Group Purchasing Organizations). Ponad 95% szpitali w USA korzysta z GPO, które negocjują ceny w imieniu grup placówek, redukując koszty administracyjne i uzyskując korzystniejsze warunki cenowe (Health Affairs Scholar, 2024). GPO są charakterystycznym przykładem przejścia od kanału dedykowanego ku modelowi sieciowemu w dystrybucji instytucjonalnej – sieć szpitali wspólnie koordynuje zakupy, co zmienia pozycję przetargową zarówno wobec producentów, jak i dystrybutorów. Równolegle po stronie podaży postępuje koncentracja sieci dystrybucji – od producenta do podmiotu leczniczego jest ona coraz bardziej skonsolidowana, a presja kosztowa i potrzeba kontroli nad procesem zakupowym sprzyjają tworzeniu coraz bardziej wyspecjalizowanych podmiotów zakupowych (MDDI Online, 2024).

Model multikanałowy w dystrybucji wyrobów medycznych oznacza równoległe funkcjonowanie kilku niezintegrowanych kanałów: sprzedaży bezpośredniej do placówek medycznych (B2B), sprzedaży przez hurtownie farmaceutyczno-medyczne, sprzedaży detalicznej w specjalistycznych sklepach medycznych oraz sprzedaży internetowej. Każdy z tych kanałów obsługuje inny segment klientów i operuje według odmiennej logiki logistycznej. W Polsce struktura detalicznego rynku wyrobów medycznych obejmuje ok. 514 podmiotów zarejestrowanych w PKD 47.74.Z (sprzedaż detaliczna wyrobów medycznych i ortopedycznych), generujących łącznie ponad 4,26 mld zł przychodu (BizRaport, 2022), a sprzedaż hurtowa – zarówno farmaceutyków, jak i wyrobów medycznych – koncentruje się w

rękach kilku dominujących podmiotów: 10 pełnozakresowych hurtowni zapewnia 95% wolumenu produktów do aptek i 70% do szpitali (ZPHF, 2024).

Ewolucja w kierunku modelu cross-kanałowy i omnikanałowy w sektorze wyrobów medycznych jest procesem złożonym, przyspieszonym przez pandemię COVID-19 i rosnące oczekiwania klientów indywidualnych. Digitalizacja opieki zdrowotnej, upowszechnienie urządzeń ubieralnych (wearables) jako elementów omnikanałowego łańcucha dostaw w opiece zdrowotnej (Chang V., 2022) oraz rosnąca sprzedaż internetowa wyrobów medycznych klasy I i OTC tworzą przesłanki do integracji kanałów. Badania wskazują, że implementacja strategii omnikanałowej w ochronie zdrowia wymaga jednoczesnego uwzględnienia czynników etycznych, regulacyjnych i logistycznych, a brak integracji systemów IT oraz specyficzne wymogi identyfikowalności wyrobów stanowią główne bariery wdrożenia (Chang V., 2022). Jednocześnie odporność omnikanałowych łańcuchów dostaw w ochronie zdrowia jest rozwijającym się obszarem badań, w którym identyfikuje się czynniki budowania odporności specyficzne dla tego sektora (Chang V., 2022).

Porównanie modeli dystrybucji na rynku polskim i światowym wskazuje na wyraźne różnice w tempie i zakresie transformacji. Na rynkach dojrzałych – USA, Europa Zachodnia – modele sieciowe z silną rolą GPO i zintegrowanymi platformami zakupowymi są standardem w segmencie instytucjonalnym. W Polsce dominuje wciąż model mieszany (farmaceutyki i wyroby medyczne w jednym kanale hurtowym), choć rynek detaliczny i e-commerce rozwijają się dynamicznie. Raport PARP wskazuje, że polscy producenci wyrobów medycznych operują głównie w modelu B2B z lokalnymi dystrybutorami – przykładem jest EchoSon, który działa wyłącznie w modelu B2B z lokalnymi dealerami, tworząc rozproszoną sieć bez dominującego dystrybutora strategicznego (PARP, 2021). Takie podejście odpowiada logice modelu sieciowego z dynamiczną przynależnością węzłów peryferyjnych, opisanego w rozdzaile 1. Perspektywa porównawcza wskazuje, że ewolucja ku omnikanałowości w dystrybucji wyrobów medycznych będzie postępować – lecz jej tempo i kształt pozostają silnie zdeterminowane przez specyfikę regulacyjną sektora oraz dualność potrzeb logistycznych klientów instytucjonalnych i indywidualnych.

Sieci dystrybucji wyrobów medycznych w Polsce

Analiza struktury sprzedaży wyrobów medycznych w Polsce napotyka na istotne ograniczenia wynikające ze specyfiki krajowego systemu statystyki publicznej. Zrozumienie tych ograniczeń jest niezbędne dla właściwej interpretacji dostępnych danych i oceny rzeczywistego zakresu transformacji kanałów dystrybucji. Równocześnie sama struktura sieci dystrybucji – z jej podziałem na kanał instytucjonalny, detaliczny stacjonarny i internetowy –

stanowi odzwierciedlenie opisanej w rozdziale 2 trójsegmentowej logiki B2B/B2C/B2G oraz determinantów logistycznych i regulacyjnych właściwych dla tej branży.

Ograniczenia analiz statystycznych rynku wyrobów medycznych w Polsce

Głównym ograniczeniem analitycznym jest brak odrębnej kategorii statystycznej dla wyrobów medycznych w systemie sprawozdawczości GUS. Dane dotyczące produkcji sprzedanej branży medycznej gromadzone są w ramach kodu PKWiU 32.50 obejmującego łącznie urządzenia, instrumenty oraz wyroby medyczne, w tym stomatologiczne – jednak bez rozdzielenia od farmaceutyków na poziomie hurtowym i detalicznym. W efekcie analiza struktury sprzedaży wymaga sięgania do danych cząstkowych z różnych źródeł: danych GUS dotyczących aptek i punktów aptecznych, danych NFZ o refundacji wyrobów medycznych, raportów branżowych organizacji takich jak POLMED i TECHNOMED oraz szacunków rynkowych opracowywanych przez firmy analityczne.

Brak wydzielonej kategorii statystycznej dla wyrobów medycznych nie jest jedynie problemem metodologicznym – jest on odzwierciedleniem rzeczywistej struktury rynku, w której granica między kanałem farmaceutycznym a medycznym pozostaje płynna. Apteki sprzedają zarówno leki, jak i wyroby medyczne klasy I; hurtownie farmaceutyczne dystrybuują równolegle produkty lecznicze i wyroby medyczne (co odzwierciedla klasyfikacja PKD 46.46.Z łącząca oba segmenty w jednej kategorii hurtowej). Dla celów niniejszego artykułu przyjęto, że dane dotyczące aptek i hurtowni farmaceutycznych stanowią przybliżenie tendencji w dystrybucji wyrobów medycznych w kanałach B2C, przy wyraźnym zastrzeżeniu, że dotyczą one szerszej kategorii produktowej. Dane twarde – o charakterze ilościowym i wartościowym – dostępne są przede wszystkim w obszarze refundacji NFZ, gdzie wyroby medyczne są ewidencjonowane odrębnie.

Struktura sprzedaży wyrobów medycznych w Polsce

Rynek wyrobów medycznych w Polsce charakteryzuje się wyraźną dominacją kanału instytucjonalnego. Kanał B2B/B2G – obejmujący sprzedaż hurtową bezpośrednio do szpitali, klinik, gabinetów lekarskich i stomatologicznych, laboratoriów diagnostycznych oraz innych podmiotów leczniczych – generuje szacunkowo ok. 60–70% wartości całego rynku (POLMED, 2024; szacunki rynkowe). Trafia tędy wyposażenie ciężkie i specjalistyczne: aparatura diagnostyczna i obrazowa, implanty, sprzęt operacyjny, jednorazowe materiały chirurgiczne oraz sprzęt laboratoryjny. Zakupy w tym segmencie realizowane są przede wszystkim w trybie zamówień publicznych (przetargi, umowy ramowe z NFZ) lub kontraktów bezpośrednich z dystrybutorami autoryzowanymi przez producentów.

Kanał detaliczny B2C odpowiada za szacunkowo ok. 30–40% wartości rynku i obejmuje produkty nabywane bezpośrednio przez pacjentów – glukometry, ciśnieniomierze, pieluchomajtki, ortezy, testy diagnostyczne, sprzęt rehabilitacyjny, aparaty słuchowe

(POLMED, 2024; szacunki rynkowe). W obrębie kanału detalicznego stacjonarnego funkcjonują dwa główne typy podmiotów o wyraźnie odmiennych profilach asortymentowych. Wyspecjalizowane sklepy zaopatrzenia medycznego i ortopedycznego są liderem w segmencie cięższego i spersonalizowanego zaopatrzenia – wózków inwalidzkich, ortez, protez oraz zaawansowanych środków chłonnych. Obsługują one szacunkowo ok. 85–90% obrotu wyrobami wydawanymi na refundowane zlecenia NFZ, w tym wnioski na wyroby ortopedyczne i pomocnicze (dane branżowe POLMED). Wynika to ze specyfiki tych wyrobów: wymagają przymiarki, indywidualnego doboru i często natychmiastowej realizacji zlecenia na miejscu. Apteki stacjonarne pełnią w segmencie wyrobów medycznych rolę uzupełniającą – choć dominują na rynku leków, w przypadku wyrobów medycznych obsługują szacunkowo zaledwie ok. 10–15% obrotu produktami na zlecenia. Skupiają się na mniejszych wyrobach niewymagających dopasowania: igłach, strzykawkach, prostych testach diagnostycznych, ciśnieniomierzach nareczych czy kompresach gazowych (dane branżowe POLMED).

Publiczny system refundacji stanowi istotny wymiar struktury sprzedaży wyrobów medycznych, pozwalający na bardziej precyzyjną ocenę skali rynku w segmencie B2G. W 2023 roku NFZ zrefundował 413 milionów sztuk wyrobów medycznych dla blisko 2,2 miliona pacjentów, generując koszty przekraczające 2,3 mld zł (NFZ, 2024). Dla porównania, łączne nakłady refundacyjne w obszarze technologii lekowych wyniosły w 2024 roku ok. 29 mld zł, co w zestawieniu z ok. 3 mld zł wydatkowanymi na wyroby medyczne uwidacznia wyraźną dysproporcję finansowania obu segmentów w publicznym systemie ochrony zdrowia (TECHNOMED, 2025). Dysproporcja ta wynika nie tylko z różnic w strukturze cenowej produktów, lecz także z odmiennych ścieżek refundacyjnych – mniej ustrukturyzowanych i mniej transparentnych w przypadku wyrobów medycznych niż leków (TECHNOMED, 2025).

Tendencje i zmiany w sprzedaży wyrobów medycznych w Polsce

Sprzedaż stacjonarna wciąż zdecydowanie dominuje w detalicznym obrocie wyrobami medycznymi. Szacunki rynkowe wskazują na udział ponad 80% w rynku detalicznym, co wynika ze specyfiki znacznej części asortymentu: wyroby chłonne i ortopedyczne wymagają bezpośredniego kontaktu z doradcą, przymiarki oraz często natychmiastowej realizacji zlecenia NFZ w punkcie sprzedaży (szacunki branżowe, POLMED). Równocześnie sprzedaż online dynamicznie rośnie i odpowiada szacunkowo za ok. 10–18% rynku detalicznego. Przez kanał internetowy najczęściej nabywane są wyroby niewymagające dopasowania (maski CPAP, akcesoria do inhalatorów, baterie do aparatów słuchowych) oraz artykuły masowe bez refundacji (pulsoksymetry, termometry bezdotykowe). Kanał online podlega przy tym istotnym ograniczeniom prawnym: sprzedaż wysyłkowa jest legalna, jednak reklama wyrobów medycznych w internecie podlega surowym restrykcjom – zakazowi posługiwania się wizerunkiem lekarzy oraz zakazowi kierowania reklam wyrobów przeznaczonych do użytku profesjonalnego do odbiorców publicznych (Ustawa o wyrobach medycznych, 2022).

Pośrednim wskaźnikiem tendencji w sprzedaży online wyrobów medycznych są dane GUS dotyczące aptek prowadzących sprzedaż wysyłkową – jako że apteki stanowią jeden z głównych kanałów internetowej sprzedaży wyrobów klasy I. Liczba aptek realizujących sprzedaż wysyłkową z wykorzystaniem strony internetowej systematycznie rośnie: z 164 w 2021 roku do 199 w 2022 roku, 197 w 2023 roku i 236 w 2024 roku (GUS, 2024). Towarzyszyło temu jednoczesne zmniejszanie się całkowitej liczby aptek w Polsce – z ponad 13,1 tys. w 2017 roku do 11,3 tys. na koniec sierpnia 2024 roku, co oznacza spadek o ok. 15% (GUS, 2024; BOŚ Bank, 2025). Zestawienie tych dwóch tendencji – malejącej liczby aptek ogółem przy rosnącej liczbie aptek z kanałem online – wskazuje na wyraźny kierunek transformacji: podmioty, które pozostają na rynku, w coraz większym stopniu rozbudowują swój zasięg cyfrowy.

Warto podkreślić, że wzrost liczby aptek internetowych nie odzwierciedla w pełni skali transformacji omnikanałowej – w większości przypadków stanowi on rozszerzenie działalności o kanał sprzedaży wysyłkowej, a nie integrację kanałów w sensie omnikanałowym. Pełną strategię omnikanałową wdrożyły jedynie wybrane sieci apteczne – w tym Super-Pharm, który konsekwentnie realizuje strategię omnikanałową łączącą sprzedaż stacjonarną, e-commerce i aplikację mobilną z funkcją click-and-collect (Retailnet, 2023), a także sieci DOZ (Dbam o Zdrowie), Apteka Gemini i Ziko Apteka, które oferują zakup online z odbiorem w placówce stacjonarnej (Lizard Media, 2018). Równocześnie raport Lizard Media wskazuje, że nawet w tych zaawansowanych podmiotach omnikanałowość jest ograniczona regulacyjnie: leki na receptę i OTC nie mogą być wysyłane kurierem do klienta, a zwroty produktów aptecznych są prawnie wykluczone, co oznacza, że pełna integracja kanałów możliwa jest wyłącznie w odniesieniu do kosmetyków, suplementów diety i wyrobów medycznych klasy I (Lizard Media, 2018). Pełna strategia omnikanałowa – zakładająca integrację systemów IT, spójność cen i stanów magazynowych we wszystkich kanałach oraz swobodne przechodzenie klienta między nimi na etapie transakcji i zwrotu – jest w polskim sektorze wyrobów medycznych wdrożona jedynie przez nieliczne, największe podmioty apteczne. Sklepy medyczne oferują zazwyczaj sprzedaż albo wyłącznie stacjonarną, albo wyłącznie online; w niektórych przypadkach podejmują próby łączenia obu form, jednak bez zaawansowanej integracji procesów logistycznych i informacyjnych (dane branżowe).

Koncentracja geograficzna sprzedaży i stan ominiknałowosci

Przestrzenna struktura rynku wyrobów medycznych w Polsce wykazuje silną koncentrację w województwach o największej liczbie ludności oraz rozwiniętym zapleczu akademickim i klinicznym. Województwo mazowieckie jest liderem rynku – skupia największą liczbę dystrybutorów, central medycznych oraz głównych szpitali zamawiających specjalistyczny sprzęt. Województwo śląskie zajmuje drugie miejsce, charakteryzując się największym zagęszczeniem placówek ochrony zdrowia w kraju, co generuje stałe zapotrzebowanie na wyroby medyczne wszystkich klas ryzyka. Województwa wielkopolskie i małopolskie uznawane są za kolejne kluczowe rynki ze względu na dużą liczbę prywatnych placówek

medycznych oraz rozwinięty sektor B2B (Podlaskie Centrum Eksportera, 2024). Warto odnotować, że ta sama trójka regionów – mazowieckie, śląskie, wielkopolskie – dominuje również w statystykach liczby podmiotów zarejestrowanych w PKD 47.74.Z, gdzie łącznie skupiają ok. 43% wszystkich wyspecjalizowanych sklepów medycznych w Polsce (BizRaport, 2022).

Opisane tendencje wskazują, że ewolucja kanałów dystrybucji wyrobów medycznych w Polsce przebiega asymetrycznie: najszybciej w segmencie B2C (rosnący e-commerce, pierwsze wdrożenia omnikanałowe w aptekach sieciowych), wolniej w segmencie B2B (digitalizacja procesów zakupowych bez integracji kanałów sprzedaży), a najwolniej w zakresie pełnej integracji omnikanałowej obejmującej wszystkie segmenty odbiorców i wszystkie klasy produktowe. Regulacje prawne, specyfika produktu i dualizm systemu refundacyjnego pozostają głównymi barierami przyspieszenia tej transformacji – co szerzej omówiono w wnioskach.

Wnioski

Przeprowadzona analiza ewolucji kanałów dystrybucji wyrobów medycznych – od modeli jednokanałowych ku strukturom omnikanałowym – pozwala sformułować kilka kluczowych wniosków dotyczących zarówno stanu obecnego, jak i kierunków dalszego rozwoju systemów dystrybucji w tym sektorze.

Po pierwsze, omnikanałowość stanowi strukturę odporną na zakłócenia. Doświadczenia przedsiębiorstw z okresu pandemii COVID-19 potwierdzają, że organizacje dysponujące zintegrowanymi, wielokanałowymi systemami sprzedaży i dystrybucji wykazały istotnie wyższą zdolność do absorpcji zakłóceń egzogenicznych niż podmioty opierające się na tradycyjnych, liniowych kanałach. Odporność ta wynika z kilku mechanizmów: możliwości przekierowania popytu między kanałami w przypadku zakłócenia jednego z nich, wyższej transparentności informacyjnej w zintegrowanych systemach IT, a także elastyczności form dostawy i odbioru produktu, która skraca czas reakcji na zmiany warunków rynkowych. Pod względem logistycznym wdrożenie omnikanałów wymaga podporządkowania zarówno procesów transportowych, jak i magazynowych pod zintegrowany system zarządzania – OMS, WMS, TMS – w celu zapewnienia spójnych doświadczeń zakupowych niezależnie od wybranego przez klienta kanału.

Po drugie, sektor wyrobów medycznych w Polsce jest zaawansowany w omnikanałowości w stopniu istotnie niższym niż inne branże detaliczne. Analiza rynku wskazuje, że pełna strategia omnikanałowa została wdrożona jedynie przez nieliczne podmioty apteczne, podczas gdy większość sklepów medycznych pozostaje na etapie multikanałowości.

Po trzecie, w celu zwiększenia odporności całego złożonego systemu dystrybucji wyrobów medycznych tendencje te powinny ulec zmianie. Asymetryczny rozwój omnikanałowości – najszybszy w aptekach sieciowych, wolniejszy w sklepach medycznych i najwolniejszy w kanale instytucjonalnym B2B/B2G – tworzy lukę odporności w tych ogniwach systemu, które obsługują największy wolumen wyrobów w ujęciu wartościowym.

Ograniczeniem w przeprowadzonych badaniach jest luka danych statystycznych. Jak wykazano w rozdziale 3.1, brak wydzielonej kategorii statystycznej dla wyrobów medycznych w systemie GUS uniemożliwia precyzyjną ilościową ocenę struktury i dynamiki kanałów dystrybucji. Dostępne dane mają charakter cząstkowy, branżowy lub szacunkowy, co ogranicza możliwości wnioskowania empirycznego i stanowi istotną lukę badawczą wymagającą uzupełnienia – zarówno przez instytucje statystyki publicznej, jak i organizacje branżowe.

Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułować można trzy grupy rekomendacji – dla przedsiębiorstw sektora, dla regulatorów oraz dla badaczy.

Dla przedsiębiorstw dystrybucji wyrobów medycznych kluczową rekomendacją jest stopniowe integrowanie kanałów, rozpoczynając od tych kategorii produktowych, które nie są objęte restrykcyjnymi wymogami identyfikowalności i zwrotów – a więc przede wszystkim wyrobów klasy I niewymagających indywidualnego doboru. Inwestycja w systemy OMS i WMS zdolne do obsługi zamówień z wielu kanałów równocześnie powinna być traktowana nie jako koszt transformacji cyfrowej, lecz jako inwestycja w odporność systemu dystrybucji. Doświadczenia sieci aptecznych – w szczególności Super-Pharm i DOZ – wskazują, że model click-and-collect jest realnie wykonalny w warunkach polskiego rynku i regulacji farmaceutycznych.

Dla regulatorów rekomenduje się podjęcie prac nad wyodrębnieniem wyrobów medycznych jako odrębnej kategorii w statystyce publicznej – zarówno na poziomie hurtowym (PKD 46.46.Z), jak i detalicznym – co umożliwi monitorowanie struktury i dynamiki kanałów dystrybucji w tym sektorze. Ponadto, w kontekście trwających prac nad nowelizacją ustawy o wyrobach medycznych, warto rozważyć stworzenie ścieżki regulacyjnej dla e-commerce wyrobów medycznych klasy I i IIa, analogicznej do istniejących rozwiązań dla produktów OTC, która umożliwiałaby szersze wdrożenie modeli omnikanałowych bez obniżania poziomu bezpieczeństwa pacjenta.

Dla badaczy obszarem wymagającym dalszej eksploracji jest empiryczna ocena wpływu omnikanałowości na odporność dystrybutorów wyrobów medycznych – zarówno w segmencie B2C (apteki, sklepy medyczne), jak i B2B/B2G (dystrybutorzy instytucjonalni). Dotychczasowa literatura dotycząca omnikanałowych łańcuchów dostaw w ochronie zdrowia koncentruje się głównie na rynkach dojrzałych (USA, Europa Zachodnia), a polska specyfika regulacyjna i strukturalna pozostaje obszarem słabo zbadanym.

Bibliografia

1. Chang, V., Doan L., Xu Q., Hall K., Wang Y., (2022). Digitalization in omnichannel healthcare supply chain businesses: The role of smart wearable devices. Journal of Business Research, 156, art. 113369. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113369
2. Christopher, M. (1998). Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service (2nd ed.). Financial Times / Pitman Publishing.
3. Christopher, M. (2016). Logistics and Supply Chain Management (5th ed.). Pearson Education.
4. Christopher, M., Holweg, M. (2017). Supply chain 2.0 revisited: a framework for managing volatility-induced risk in the supply chain. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 47(1), 2–17. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-09-2016-0245
5. Christopher, M., Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. International Journal of Logistics Management, 15(2), 1–13. https://doi.org/10.1108/09574090410700275
6. Chopra, S. (2003). Designing the distribution network in a supply chain. Transportation Research Part E, 39(2), 123–140. https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00044-3
7. He P., He Y., Tang X., Ma S., Xu H., (2022). Channel encroachment and logistics integration strategies in an e-commerce platform service supply chain. International Journal of Production Economics, 244, 108368.
8. Kang, J.Y.M. (2019). Repurchase loyalty for customer social co-creation e-marketplaces. Journal of Fashion Marketing and Management, 23(3), 320–336. https://doi.org/10.1108/JFMM-01-2018-0010
9. Kembro, J.H., Norrman, A. (2020). Warehouse configuration in omni-channel retailing: a multiple case study. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 50(5), 509–533. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2019-0034
10. Kramarz, M. (2023). Logistics coordination in building the resilience of the distribution network. *Scientific Papers of Silesian University of Technology - Organization and Management Series*, 170. https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.170.14
11. Kramarz, M. (2025). ICT systems in logistics distribution. W M. Kramarz & S. Kauf (Red.), *Logistics and digital transformation. The challenges of modern supply chains* (s. 92–124). Routledge. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003615040-5/ict-systems-logistics-distribution-marzena-kramarz?context=ubx&refId=be3030bb-e9b2-40d0-a461-89605fb6c34b

12. Kramarz, M., Kramarz, W. (2014). The Flexibility and Specialization of Resources - Competitive Strategies of Materials Decoupling Points of a Network Supply Chain of Metallurgic Products, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 111, 741-750.
13. Kramarz, M., Kramarz, W. (2019). Managing the flow components in supply chains. Metalurgija, 58(1-2), 158-160.
14. Kumar, A., Naz, F., Luthra, S., Vashistha, R., Kumar, V., Garza-Reyes, J.A., Chhabra, D. (2023). Digging DEEP: Futuristic building blocks of omni-channel healthcare supply chains resiliency using machine learning approach. Journal of Business Research, 162, art. 113903.
15. Kramarz, M., Kmiecik, M. (2024). The role of the logistics operator in the network coordination of omnichannels. Applied Sciences, 14(12), 1-32.
16. Li J., (2025) The impact of e-commerce on traditional retail supply chains, Scientific Journal of Economics and Management Research , 7, 127-134, doi 10.54691/m56e6v49
17. Nowak, J., Kramarz, M., & Muzalewska, M. (2023). Modułowe urządzenie terapeutyczne z funkcją gratyfikacji sygnałem dźwiękowym - DiscoBulbulator. W M. Wyleżoł (redaktor), *Przegląd osiągnięć studenckich kół naukowych działających przy KPKM. T. 1* (T. 156, s. 87–98). Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn. Wydział Mechaniczny Technologiczny. Politechnika Śląska. https://kpkm.polsl.pl/PUBLIKACJE/zeszyt_nr_156_tekst.pdf
18. Prestinoni, G. (2025). Medical Devices: Market Environment & Stakeholder Analysis. W: Medical Device Industry. A Strategic and Operational Guide. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03577-6_4
19. Ratchford, B. i in. (2022). Online and offline retailing: What we know and directions for future research. Journal of Retailing, 98(1), 152–177.
20. Risberg, A. (2023). A systematic literature review on e-commerce logistics: towards an e-commerce and omni-channel decision framework. The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research, 33(1), 67–91. https://doi.org/10.1080/09593969.2022.2089903
21. Shen X, Li Y, Sun Y, Wang N, (2018), Channel integration quality, perceived fluency and omnichannel service usage: The moderating roles of internal and external usage experience, Decision Support Systems, 109, 61-73, https://doi.org/10.1016/j.dss.2018.01.006.
22. Shi S, Wang Y, Chen X, Zhang Q, (2020) Conceptualization of omnichannel customer experience and its impact on shopping intention: A mixed-method approach, International Journal of Information Management, 50, 325-336, https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.09.001.
23. Stojković, D., Stipe L, Zoran B., (2016). Multichannel strategy – the dominant approach in modern retailing. Economic Annals, LXI(209), 105–127. https://doi.org/10.2298/EKA1609105S

24. Tian, Y., & Cui, L. (2025). Supply chain resilience and digital transformation: perspectives from a supply chain network. Humanities and Social Sciences Communications, 12(1), 1–15.
25. Tian G, Chen Z., Xia Z., Abbas H., Liu W., (2026) Facilitation mechanisms for supply chain resilience-oriented inputs: a digitalization and enterprise alliance based perspective, International Journal of Production Economics, 295, https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2026.109962.
26. Vhatkar M., Raut R., Gokhale R., Kumar M, Akarte M, Ghoshal S., Leveraging digital technology in retailing business: Unboxing synergy between omnichannel retail adoption and sustainable retail performance, Journal of Retailing and Consumer Services, 81, 2024, 104047, https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2024.104047.
27. Watson, G.F., Worm, S., Palmatier, R.W., Ganesan, S. (2015). The evolution of marketing channels: trends and research directions. Journal of Retailing, 91(4), 546–568. https://doi.org/10.1016/j.jretai.2015.04.002
28. Wieland, A., Durach, C.F. (2021). Two perspectives on supply chain resilience. Journal of Business Logistics, 42(3), 315–322. https://doi.org/10.1111/jbl.12271
29. Wilk, K., Kramarz, M., Gierek, S., & Muzalewska, M. (2024). Rzep_check - pomoc logopedyczna wspomagająca zdolności motoryczne oraz fonetyczne dziecka. W M. Wyleżoł (redaktor), *Przegląd osiągnięć studenckich kół naukowych działających przy KPKM. Tom II* (Nr 159; s. 85–90). Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn. Wydział Mechaniczny Technologiczny. Politechnika Śląska. https://kpkm.polsl.pl/PUBLIKACJE/zeszyt_nr_159_tekst.pdf
30. Wittayakom, S. (2022). Digital Marketing Challenge in Medical Device Industry. Open Journal of Business and Management, 10(4). https://www.scirp.org/pdf/ojbm_2022071216174022.pdf
31. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie wyrobów medycznych. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 117/1.
32. Ustawa z dnia 20 maja 2010 r. o wyrobach medycznych (Dz.U. 2010 nr 107 poz. 679). https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20101070679/U/D20100679Lj.pdf
33. Ustawa z dnia 7 kwietnia 2022 r. o wyrobach medycznych (Dz.U. 2022 poz. 974).
34. BOŚ Bank (2025). Hurt farmaceutyczny – analiza sektora. Bank Ochrony Środowiska. https://www.bosbank.pl/__data/assets/pdf_file/0021/62391/BOSBank_Hurt_farmaceutyki_2025.04.pdf
35. BizRaport (2022). Analiza branży PKD 47.74.Z – Sprzedaż detaliczna wyrobów medycznych i ortopedycznych. BizRaport.pl.
36. GUS (2024). Apteki i punkty apteczne. Główny Urząd Statystyczny. https://stat.gov.pl

37. Health Affairs Scholar (2024). Role of supply chain intermediaries in steering hospital product choice: Group Purchasing Organizations and biosimilars.
38. Kondrat, M. (2023). Prawo wyrobów medycznych
39. Lizard Media (2018). Raport: e-apteki mało omnichannelowe. Opublikowany w: Rynek Aptek. https://www.rynekaptek.pl/marketing-i-zarzadzanie/raport-e-apteki-malo-omnichannelowe,25324.html
40. Łyszczarz, B., Nojszewska, E., Bukowski, H. (2022). Sektor wyrobów medycznych w Polsce. Wielkość, oddziaływanie, znaczenie. INNOWO. (cytowane za: Podlaskie Centrum Eksportera, 2024)
41. MDDI Online (2024). The Narrowing Distribution Funnel: How to Get Your Medical Device to Market.
42. NFZ (2024). Sprawozdanie z działalności Narodowego Funduszu Zdrowia. Narodowy Fundusz Zdrowia. https://www.nfz.gov.pl
43. PARP (2021). Medical Devices and Equipment in Poland. Report 2021. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości. https://en.parp.gov.pl
44. PMR (2023). Rynek internetowy OTC i wyrobów medycznych w Polsce. PMR Market Experts.
45. Podlaskie Centrum Eksportera (2024). Rynek wyrobów medycznych w woj. podlaskim, w Polsce i na świecie. Raport branżowy. https://centrumeksportera.pl/wp-content/uploads/2024/06/Podlaskie-Centrum-Eksportera.-Raport-branzowy-rynek-wyrobow-medycznych-w-woj.-podlaskim-w-Polsce-i-na-swiecie.pdf
46. POLMED (2024). Sektor wyrobów medycznych w Polsce. Izba POLMED. https://polmed.org.pl
47. Quality Systems Compliance (2021). EU Medical Device Regulation (EU MDR) 2017/745 Quick Reference: General Obligations of Distributors Under Article 14. QS Compliance
48. Retailnet (2023). Super-Pharm wzmacnia sprzedaż mobilną. Średnio 30 tysięcy zamówień miesięcznie w aplikacji. https://retailnet.pl/2023/02/08/super-pharm-wzmacnia-sprzedaz-mobilna-srednio-30-tysiecy-zamowien-miesiecznie-w-aplikacji/
49. Source Intelligence (2023). Understanding and Complying with the EU Medical Device Regulation
50. TECHNOMED (2025). Raport I Kongresu Wyrobów Medycznych i Technologii. https://kongreswyrobymedyczne.pl/2025/Raport_I_Kongres_Wyrobow_Medycznych_i_Technologii.pdf
51. TÜV Rheinland (2021). The New Medical Device Regulation (MDR) 2017/745: Requirements for Notified Bodies and Unique Device Identification (UDI) Implementation.
52. ZPHF (2024). Raport o roli Hurtowni Farmaceutycznych w zapewnieniu bezpieczeństwa lekowego Polski. ZPHF

KLASYFIKACJA AKTYWÓW TRWAŁYCH W SPRAWOZDAWCZOŚCI KLUBÓW SPORTOWYCH ZGODNIE Z MSSF

Dr hab. Leszek BOROWIEC[1], Marek WOLNY[2]

[1] Uniwersytet Warszawski, Wydział Zarządzania, Warszawa; lborowiec@wz.uw.edu.pl

[2] Uniwersytet Warszawski, Wydział Zarządzania, Warszawa, mwolny061@gmail.com;

Streszczenie: Celem artykułu jest charakterystyka stosowania zasad rachunkowości dotyczących wyceny rzeczowych aktywów trwałych oraz analiza i ocena ich prezenta-cji w sprawozdaniach finansowych w wybranych europejskich klubach piłkarskich. Badaniem objęto osiem klubów: Manchester United, Juventus FC, Borus-sia Dortmund, Olympique Lyon, Celtic FC, FC Porto, SL Benfica oraz SS Lazio, które notowane są na giełdach papierów wartościowych. Analiza została przepro-wadzona na podstawie danych ze skonsolidowanych sprawozdań finansowych za sezony 2021/2022–2024/2025. W artykule wykorzystano krytyczną analizę literatury oraz aktów prawnych. W badaniu zastosowano analizę pionową, poziomą oraz analizę porównawczą, które pozwoliły określić udział rzeczowych aktywów trwałych w strukturze aktywów trwałych klubów oraz znaczenie amortyzacji w kosztach operacyjnych. Wyniki wskazują na znaczące zróżnicowanie pomiędzy analizowanymi klubami. W niektórych przypadkach, takich jak Olympique Lyon czy FC Porto, udział środków trwałych w aktywach trwałych przekracza 50%, co wskazuje na duże zna-czenie infrastruktury stadionowej w strukturze majątku. W innych klubach, m.in. SS Lazio czy SL Benfica udział ten jest znacznie niższy, co może wynikać z większego znaczenia aktywów niematerialnych - w szczególności praw do zawodników. Przeprowadzona analiza pokazuje również, że amortyzacja stanowi relatywnie niewielką część kosztów operacyjnych większości klubów, najczęściej na poziomie kilku procent. Uzyskane wyniki wskazują, że struktura oraz znaczenie rzeczowych aktywów trwałych w klubach piłkarskich są silnie zróżnicowane i zależą m.in. od modelu własności infrastruktury stadionowej oraz strategii inwestycyjnej klubu.

Slowa kluczowe: MSSF, kluby sportowe, raportowanie finansowe, środki trwałe, amortyzacja.

CLASSIFICATION OF FIXED ASSETS IN SPORTS CLUB REPORTING UNDER IFRS

Abstract: This article analyzes the classification, measurement and presentation of property, plant and equipment (PPE) in selected European football clubs that prepare their financial statements in accordance with International Financial Reporting Standards (IFRS). Tangible

infrastructure such as stadiums, training facilities and equipment plays a significant role in the operations of professional sports organizations. The study covers eight publicly listed football clubs: Manchester United, Juventus FC, Borussia Dortmund, Olympique Lyonnais, Celtic FC, FC Porto, SL Benfica, and SS Lazio. The analysis is based on financial data from consolidated annual financial statements for the reporting seasons 2021/2022–2024/2025. The research aims to identify how these clubs classify property, plant, and equipment and which accounting methods they apply in terms of measurement, depreciation, and presentation. The article uses a critical analysis of literature and legal acts. The research methodology includes vertical, horizontal, and comparative analysis. The results show that the importance of property, plant and equipment in the asset structure varies significantly between clubs and depends on stadium ownership and infrastructure investments. In most cases, buildings and sports facilities constitute the largest class of tangible assets. Although depreciation represents a small share of operating costs, clubs with extensive infrastructure investments record noticeably higher depreciation levels..

Keywords: Fixed assets, property plant, and equipment, IFRS, football clubs, financial reporting, depreciation.

Introduction

Professional football clubs operate not only as sports organizations but also as complex economic entities. In addition to sporting activities, clubs conduct a wide range of business operations including broadcasting, sponsorship agreements, merchandising and stadium-related services. To support these activities, clubs rely on diverse types of assets, among which property, plant and equipment play a key role.

Tangible fixed assets in football clubs include stadiums, training facilities, administrative buildings, and other infrastructure necessary for the organization of sporting events and daily operations. The accounting treatment of these assets significantly affects the presentation of the financial position and performance of a club in its financial statements.

In the European Union, companies listed on regulated capital markets are required to prepare their consolidated financial statements in accordance with International Financial Reporting Standards (IFRS). The accounting treatment of tangible fixed assets is regulated primarily by International Accounting Standard 16 (IAS 16), which specifies the rules for recognition, measurement, depreciation and derecognition of property, plant, and equipment.

The structure and importance of tangible fixed assets may differ significantly between football clubs depending on factors such as the ownership model of stadium infrastructure and the scale of investments in sports facilities. Despite their importance, research in sports accounting has often focused on intangible assets, particularly player registration rights, while tangible assets have received less attention.

Therefore, the aim of this article is to analyze the classification and accounting treatment of property, plant, and equipment in selected publicly listed European football clubs reporting

under IFRS. The study focuses on the recognition, measurement, depreciation, and presentation of tangible assets in financial statements and compares the accounting practices applied by the analyzed entities.

Literature review regarding fixed tangible assets

In accounting an asset is a resource that has economic value, which is controlled by an entity. They are essential to conduct a business. Every company must show them in their financial statements. In each country companies must prepare their financial statements regarding correct legal framework. Rules for preparing financial statements, characteristics, and valuation of each financial statement's elements results from specific accounting standards. Those standards may be international or national. In Poland, each company that is not listed prepares it in accordance with Polish Accounting Act. On the other hand all listed European companies (those whose securities are traded on EU regulated market) must use International Financial Reporting Standards (IFRS).

According to International Accounting Standards 16 (IAS) property, and equipment are tangible assets that:

- are expected to be used during more than one period, which means that company plans to use it for more than 12 months,
- are not for resale,
- are hold for use in the production or supply of goods or services, for rental to others or for administrative purposes,
- has physical substance or presence,
- depreciate over time (except for land which value does not depreciate) (IAS 16, 2020, p. 6 and Anggraini, 2023, p. 5).

In financial statements fixed tangible assets are divided into appropriate classes. Class of property plant and equipment is a group of assets with similar characteristics, nature and use in a company's operations. It distinguish land, buildings, machinery, ships, aircraft, motor vehicles, furniture and fixtures, office equipment, bearer plant.(IAS 16, 2020, p. 37). Each of those classes are different and substantial number of assets might be classified to each of them.

Companies often use lands as place to locate their offices or manufacturing plants (Weygandt, 2014, p. 430). In this class all land and land improvements should be registered. Land improvements are structural additions made to land such are parking lots, fences, driveways, landscaping, and underground sprinklers (Weygandt, 2014, p. 431).

Buildings are assets often used in operational activities, such as stadiums, retail stores, offices, training facilities, warehouses, or club headquarters (Weygandt, 2014, p. 431). They

have an exceptionally long useful life, however, unlike land its limited. Buildings may be used for a wide range of activities depending on the scope of the company's business operations.

Machinery and equipment constitute a set of principal tools and devices used in the production of goods and services and in support of business operations. This category is the most dependent on the type of activity conducted by the company.

Vehicles constitutes a component of the assets of most companies and organizations. Only firms operating exclusively online may not possess them. Vehicles may be divided into smaller categories:

- they may include commercial passenger vehicles used to provide travel and transport services,
- aircraft – similarly to ships, they are most used for transportation of goods and passengers,
- motor vehicles – this is the broadest category of vehicles. It includes most vehicles used in football clubs – buses, taxis, or rental cars (Chatterjee and Cohen, 2004, p. 50-59).

Office equipment comprises PPE held for the administrative purposes of enterprise. Examples include computer equipment, communication equipment, and other office equipment. Furniture and fixtures are larger, movable objects used to furnish office spaces and enable them to function for business purposes.

The measurement of fixed assets is the process aimed at determining the monetary amounts at which these components of the financial statements are to be recognized and presented. This process requires the selection of appropriate general methods and detailed principles necessary to determine both the initial and the carrying amount of a PPE. Fixed tangible assets undergo a two stage measurement process:

- initial measurement,
- measurement at the balance sheet date (Kumor, 2014, p. 163).

Fixed assets may be acquired, modernized, or constructed by an entity. During their measurement, the entity should determine whether the cost can be recognized as an asset or not. A cost should be included in the carrying amount of a fixed asset if and only if:

- it is probable that the entity will obtain future economic benefits associated with the item, and
- the cost of the item can be measured reliably (IAS 16, 2020, p. 7).

The initial cost of PPE may include purchase price, import duties, rebates, discounts, and non-refundable taxes, as well as any cost directly attributable to bringing the asset to the location and condition necessary for it to operate as planned. These may also include costs of a site preparation, dismantling costs and borrowing costs. On the other hand, examples of costs that cannot be included in the carrying amount of a fixed tangible assets include the costs of opening a new facility, costs related to introducing a new product or service (including advertising and marketing activities), cost of conducting a business in a new location or with a

new group of customers (including staff training costs), as well as administrative and other general overhead costs (Muthupandian, 2009, p. 4).

The previously mentioned borrowing costs include interest and other costs that a company incurs in connection with the borrowing of funds (IAS 23, 2007, p. 5). Costs capitalized by an entity relate to those directly attributable to the acquisition, construction, or production of a qualifying asset. This term refers to an asset that require a substantial period to be prepared for their intended use (Prewysz – Kwinto, 2018, p. 389). Typically these are assets constructed for the entity's own use, such as buildings or machinery that require a longer period of preparation or adaptation before they can be used (Hołda, 2013, p. 294).

Taking the above information into account it can be concluded that an entity may determine the initial value of a fixed asset using the following equation:

$$\textit{Initial value of PPE} = \textit{Purchase price} + \textit{directly attributable costs} + \textit{initial estimate of dismantling costs} + \textit{borrowing costs} \quad (1)$$

Depreciation is inherently associated with the use of fixed assets. It reflects the cost of the consumption or wear of a given fixed asset over time. Depreciation charge apply to all fixed assets except land. Depreciation represents the accounting reduction in the value of fixed assets resulting from:

- the impact of technical, mechanical, or natural factors such as corrosion,
- their consumption during economic processes during their useful life,
- the obsolescence of assets caused by rapid technological development, which may lead to the emergence of new and more efficient machinery (Mucomo, 2016, p. 374).

The purpose of depreciation is to adjust the value of a fixed asset and present it as closely as possible to its actual value. Company should begin depreciating a fixed asset when it becomes available for use, that is when it has been brought to the location and condition necessary for it to operate as intended (Łojek and Kozioł, 2021, p. 16). The depreciation should be conducted due to the following reasons:

- to determine the actual profit of the enterprise,
- to present true and fair view of the company's financial position,
- to report the actual value of the fixed asset in the financial statements,
- to ensure the availability of the fund for the replacement of the asset (Tsamis and Liapis, 2014, p. 123).

Depreciation is the systematic allocation of the depreciable amount of an asset over its useful life. This allocation is performed in such a way that depreciation expense is recognized in the reporting periods corresponding to the economic usefulness of the fixed asset (Tsamis and Liapis, 2014, p. 123). When calculating the amount of depreciation, the following factors must be considered:

- the initial cost of the fixed asset,
- the residual value also referred to as the recoverable or salvage value. This is the estimated amount that an entity would currently obtain from the disposal of the asset, after deducting estimated costs of disposal, assuming that the asset were already fully depreciated,
- the depreciable amount of the asset, which is the difference between the value of the fixed asset and its estimated residual value,
- the useful life of the fixed asset (Mucomo, 2016, p. 375 and IAS 16, 2020, p. 6).

An entity should depreciate separately each component of a fixed asset whose cost is significant in relation to the total cost of the asset (IAS 16, 2020, p. 43). For example if an entity owns a stadium, it should depreciate separately the equipment in the stadium stands, which may require replacement several times during its use, the playing field and the sound systems since each of these asset components has a different expected useful life (Michalciuc, 2017, p. 100).

In practice most often companies use the straight – line depreciation, the declining balance depreciation method, or the units of production depreciation method. The straight-line method of depreciation involves calculating a depreciation rate which—assuming no change in the gross value of the fixed asset—remains constant (Zvekić, 2019, p. 111). First, the entity must determine the depreciation rate. This can be done by dividing one hundred by the number of periods (years) during which the asset will be used. The entity must then multiply this rate by the gross value of the fixed asset, as shown in the equation below:

$$\textit{Depreciation expense} = \textit{(PPE initial value} - \textit{residual value)} * \textit{depreciation rate} \quad (2)$$

Within the declining-balance method of depreciation, there are two most used approaches:

- the reducing balance method,
- the sum of the years digits method (SYD).

The reducing balance method involves calculating a depreciation rate and applying it to the net carrying amount of the asset. In practice, companies most often apply a depreciation rate using their previous experience with similar fixed assets. However, there is also a mathematical formula that allows this rate to be calculated, as presented in the equation below, where t means the number of years during which the asset will be used:

$$Depreciation\,rate = 1 - \sqrt[5]{\frac{residual\ value}{PPE\ initial\ value}} \quad (3)$$

Next to determine the depreciation charge for each year, the net carrying amount of the asset (gross value minus accumulated depreciation) is multiplied by this rate.

Another example of a declining depreciation method is the sum-of-the-years'-digits method (SYD). Under this method, the depreciation charge is calculated by multiplying the depreciation rate by a constant depreciation base, which is the cost of the asset reduced by its residual value.

The percentage rate can be calculated using the formula presented below, where t means the number of years of useful life and p represents the consecutive period for which the depreciation charge is calculated (Kuzior, 2007, p. 134).

$$Depreciation\ rate = \frac{t + (1 - p)}{\frac{t * (t + 1)}{2}} \quad (4)$$

The final depreciation method discussed is the units-of-production method. This method is most applied to assets whose value is closely related to the number of units produced or utilized rather than to the number of years of use. To apply this method, an entity must estimate the total number of production units (e.g., hours of operation or units produced) expected from the asset. The entity may then use the following formula to calculate the depreciation charge:

$$Depreciation\ expense = \frac{Gross\ value * Used\ units\ of\ production\ in\ the\ period}{Total\ estimated\ unit\ of\ production\ of\ fixed\ assets} \quad (5)$$

Depreciation charge= (Gross value *Used units of production in the period)/(Total estimated unit of production of fixed asset)

Another standard type of write-down in accounting, next to depreciation charges is the impairment loss of a fixed asset. Impairment is recognized when the carrying amount of an asset exceeds its recoverable amount (IAS 16, 2020, p. 8). This means that an enterprise should recognize impairment when the value of a fixed asset presented in the balance sheet is higher than the amount that the entity could obtain from the sale of that asset. The recoverable amount is defined as the higher of the following two value:

- fair value less costs of disposal,
- value in use.

If there are no grounds for reliably estimating the price at which a transaction for the sale of the asset could be concluded in the market, determining the fair value may be impossible. In such case the entity may adopt the value in use of the asset as its recoverable amount. However if the entity can determine both values it should adopt the higher one to ensure that the asset is not written down more than necessary. The recoverable amount is determined for individual assets. However if a given asset does not generate independent cash inflows, the recoverable amount is determined for the cash-generating unit to which the asset belongs (Amiraslani, 2013, p. 13).

At the end of the fiscal year an entity must present its fixed assets in the financial statements. According to IAS 16, an enterprise may choose to present them using the cost model or the revaluation model. Both models may be applied together provided that only one model is applied to a given class of assets with a similar nature and use, and that all assets within that class are measured using the same model (Cebrowska, 2012, p. 128).

The cost model is the oldest and most widely used valuation method in accounting (Poniatowska, 2009, p. 164). Under this method the initial value of a fixed asset is increased by

the effects of its improvements and reduced by accumulated depreciation and impairment losses already recognized (Cebrowska, 2012, p. 128). This is a simple method due to the availability of all information necessary for its application.

Another approach used by enterprises is valuation under the revaluation model. Under this method, after recognition as an asset a fixed asset should be carried at a revalued amount -that is its fair value at the date of revaluation less any subsequent accumulated depreciation and accumulated impairment losses (IAS 16, 2020, p. 31). Such revaluations should be conducted regularly to ensure that the fair value corresponds to the actual value of the fixed asset at the reporting date in the financial statements.

Once a fixed asset has been fully depreciated or sold it must be derecognized. This means the complete or partial removal of a previously recognized asset from the entity's financial statements. A fixed asset should be derecognized at the date of disposal or when the entity no longer expects to obtain economic benefits from its use or disposal (IAS 16, 2020, p. 67).

Research methodology

The aim of this article is to analyze the classification and accounting principles relating to property, plant and equipment in selected sports club which reports under IFRS. For such research eight listed football clubs were selected. The other purpose was to identify similarities and differences in fixed assets valuation, depreciation, and presentation in financial statements. Accordingly two main research questions have been formulated:

- What is the accounting classification of the fixed assets in publicly listed football clubs and what accounting methods do they apply regarding its measurement and depreciation?
- What are the main similarities and differences in the recognition, measurement and presentation of property, plant, and equipment?

The study focuses only on PPE, excluding intangible assets which despite their significant role in the asset structure of football clubs, do not constitute the subject of this analysis.

The analysis covers eight European football clubs listed on stock exchanges. These entities are presented in Table 1:

Table 1 List and description of selected football clubs

Club's name	**Description**
Manchester United	This is an English football club competing in the highest tier of English football. It has achieved huge successes, including multiple league titles and victories in European competitions.
Juventus FC	This Italian club was founded in 1897. It competes in Serie A and is the most successful club in its country.

Club's name	Description
Borussia Dortmund	This is a German club based in Dortmund. It was founded in 1909 and competes in the Bundesliga, the highest level of football competition in Germany.
Olympique Lyonnais	This is a French club founded in 1899. It competes in Ligue 1, and its shares are listed on the Euronext Paris stock exchange.
Celtic FC	This is a Scottish football club founded in 1887. It is one of only five clubs in the world to have won so much as one hundred trophies in its history.
FC Porto	The club, founded in 1893, competes in the highest football league in Portugal. Its shares are listed on Euronext Lisbon.
SL Benfica	This is a Lisbon based sports club founded in 1904. It competes in Portugal and is one of the most successful clubs in the country.
SS Lazio	his Italian club was founded in 1900 and competes in the highest division of Italian football. It achieved its greatest successes at the beginning of the 21st century.

Source: Own study.

The sample selection was purposeful. The main selection criteria were the listing of the club on a regulated capital market in Europe and the obligation to prepare financial statements in accordance with International Financial Reporting Standards (IFRS). The selected clubs represent different European leagues and various models of stadium infrastructure ownership, which allows for the analysis of diverse structures of property, plant, and equipment.

The analysis covers financial data for four reporting seasons: 2021/2022, 2022/2023, 2023/2024, and 2024/2025. Due to the specific nature of football clubs' operations their fiscal year usually covers the period from 1 July to 30 June of the following calendar year. The data were obtained directly from the consolidated annual financial statements published by the selected entities. The sources of information included:

- statements of financial position,
- income statements,
- explanatory notes – relating to property, plant, equipment, and costs.

The following research methods were used to prepare the empirical part of the article:

- vertical analysis consists of determining the share of property, plant and equipment in total assets and the share of depreciation in total costs. This made it possible to assess the significance of tangible infrastructure in the asset and cost structure of the clubs,
- horizontal analysis involving the comparison of data over multiple years to identify trends in changes in the value of property, plant and equipment, the dynamics of depreciation, and changes in the structure of asset classes,
- comparative analysis, enabling a comparison of the valuation models, depreciation methods, and useful lives of assets applied by the individual clubs.

There are studies in literature on sports club reporting. The first group of studies concers aspects of profitability [Panagiotis, 2015; Ahtiainen, Jarva, 2019; Panagiotis, 2011]. Others address the issues of liquidity and valuation of players[Shareef and Davey, 2005 ; Abassy and Morskogen, 2024 ; Pawłowski, 2020] However, these studies do not examine in a systematic

way the classification, measurement, and presentation of tangible fixed assets (property, plant and equipment, PPE) in the financial statements of football clubs, particularly those listed on European stock exchanges. There is a lack of research addressing how football-specific assets such as stadiums, training facilities, and infrastructure are recognized, valued (e.g., cost model vs. revaluation model), and disclosed under IFRS, as well as how differences in these approaches affect comparability and transparency of financial reporting. This gap is significant both from a theoretical and practical perspective. From a theoretical standpoint, it limits the development of accounting frameworks tailored to the specifics of the sports industry. From a practical perspective, inconsistent classification and valuation of PPE may distort financial ratios, impair comparability between clubs, and affect stakeholders' decision-making, especially in the context of listed entities. Therefore, this article aims to fill this gap by analyzing the methods of valuation and presentation of tangible fixed assets in European publicly traded football clubs.

The study has several limitations. First, the analysis is based exclusively on data published in financial statements. This means that the study concerns the accounting policies declared by the entities and the information disclosed in the explanatory notes. It was not possible to analyze detailed agreements relating to infrastructure, the financing structure of stadium investments, or internal accounting policies not disclosed in the financial statements. Moreover, due to the focus on property, plant and equipment, the analysis excludes intangible assets (in particular, player registration rights), which often constitute the dominant component of assets in football clubs.

Research results

Table 2 presents the value of property, plant, and equipment in relation to the total non-current assets of Manchester United in the years 2022–2025. Based on the presented data, a gradual increase in the value of property, plant and equipment can be observed over the analyzed period. In 2022, their value amounted to EUR 282,2 mln, while in 2025 it reached EUR 341,1 mln. At the same time, the total value of non-current assets also increased. Despite this growth, the share of property, plant and equipment in non-current assets remained stable, ranging between 22% and 23%.

Table 2 Share of PPE in total non – current assets Manchester United [mln EUR]

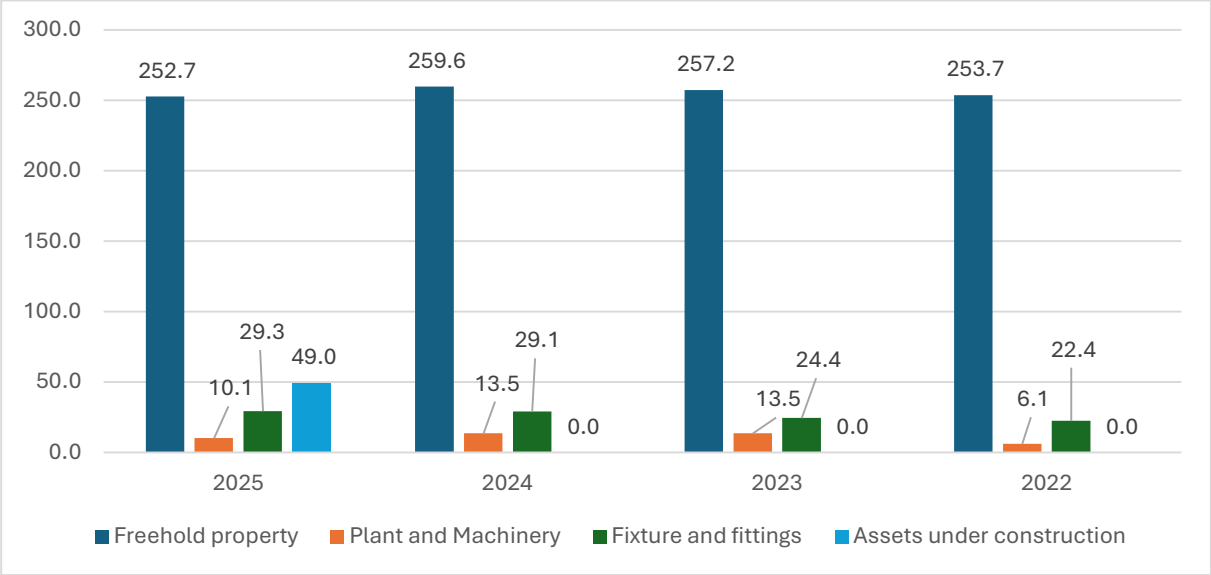
Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	341,1	1 579,4	22%
2024	302,2	1 377,5	22%

Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2023	295,1	1 309,9	23%
2022	282,2	1 228,7	23%

Source: Own study based on financial statements.

Figure 1 presents the classification of tangible fixed assets in the years 2022–2025 in Manchester United divided into four categories: freehold properties, plant and machinery, fixture and fittings and assets under construction. Freehold properties are the largest class of PPE in selected period and it stays at almost linear level. The plant and machinery and fixture and fittings classes have increasing trend but are much smaller portion with comparison to properties. Additionally in 2025 this club invested in assets under construction which means that they plan to expand their fixed assets.

Figure 1 Classification of PPE Manchester United [mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

The next club analyzed is Juventus FC. Table 3 presents the value of property, plant, and equipment in relation to total non-current assets in the years 2022–2025. Based on the presented data it can be observed that the value of property, plant and equipment changed during the period analyzed, however the overall trend indicates an increase compared with the beginning of the examined period. The share of property, plant and equipment in non-current assets fluctuated during the analyzed period, rising from 20% in 2022 to 32% in 2024, and then stabilizing at 28% in 2025. This indicates that the importance of property, plant and equipment in the club's asset structure increased compared with the beginning of the analyzed period.

Table 3 Share of PPE in total non – current assets Juventus FC [mln EUR]

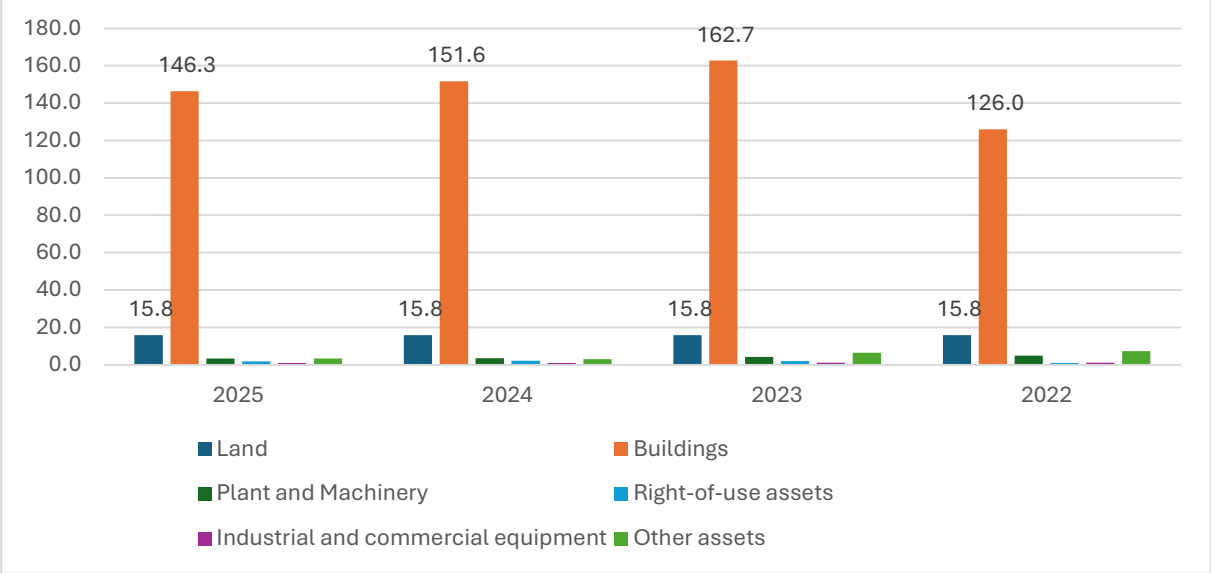
Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	171,6	621,8	28%

Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2024	177,1	548,2	32%
2023	176,5	661,4	27%
2022	140,5	699,9	20%

Source: Own study based on financial statements.

Figure 2 shows how tangible assets are divide into classes. Juventus present 6 classes: land, buildings, plant and machinery, industrial and commercial equipment, right of use assets and other assets. The biggest class is buildings which represent almost 78% - 86% of all PPE, second biggest class is land. The other ones are immaterial. Throughout the selected period buildings increased slightly, and value of the land did not change.

Figure 2 Classification of PPE Juventus FC [mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

In the next part of the analysis, the values related to Borussia Dortmund were examined. According to the information presented in Table 4 which shows the value of property, plant, and equipment in relation to total non-current assets it can be observed that despite the increase in the value of property, plant and equipment, their share in total non-current assets decreased by 8 percentage points. This indicates that, in addition to investments in property, plant and equipment, the club allocated greater resources to other categories of non-current assets.

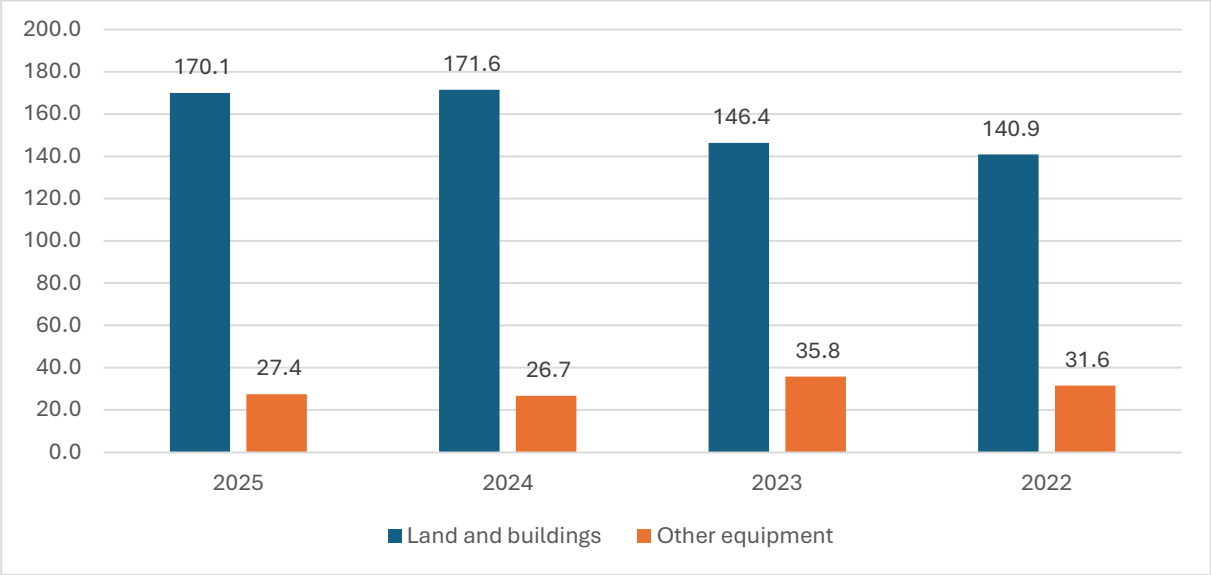
Table 4 Share of PPE in total non – current assets Borussia Dortmund [mln EUR]

Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	197,5	488,9	40%
2024	198,3	473,3	42%
2023	182,3	440,7	41%
2022	172,5	361,9	48%

Source: Own study based on financial statements.

Figure 3 shows that Borussia Dortmund presented only 2 classes of PPE in their financial statements – land and buildings and other equipment. Value of land and buildings increased slightly in 2024 while other equipment decreased in the same year. Overall, the value of the buildings once again is the biggest class presented in the financial statements.

Figure 3 Classification of PPE Borussia Dortmund [mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

Subsequently, the data for the French club Olympique Lyon were analyzed in Table 5 and it presents a comparison between the value of property, plant and equipment and total non-current assets. The share of property, plant and equipment in non-current assets shows a declining trend during the analyzed period despite the stable value of total non-current assets. This indicates that the value of property, plant and equipment decreased significantly, which resulted from a decline in the value of real estate held by the club.

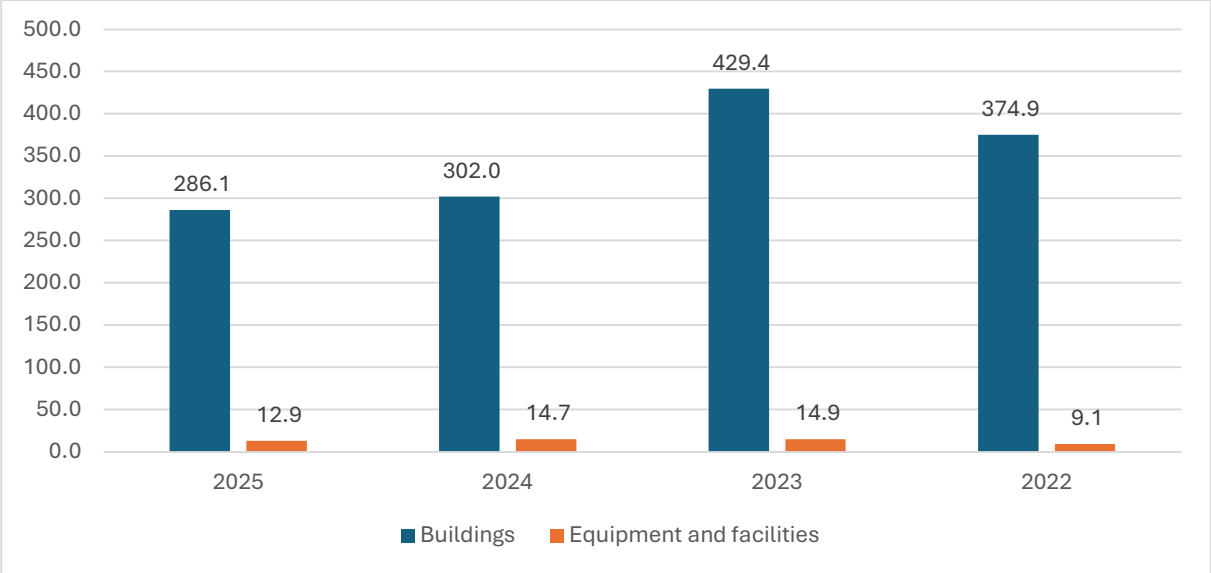
Table 5 Share of PPE in total non – current assets Olympique Lyon [mln EUR]

Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	299,0	541,4	55,23%
2024	316,7	503,7	62,89%
2023	444,3	572,7	77,59%
2022	384,0	538,4	71,33%

Source: Own study based on financial statements.

In figure 4 the division among classes were shown. Similarly to German club, Olympique Lyon presents only 2 classes – buildings, equipment, and facilities. The class of equipment has immaterial value while the building is significant. The value of buildings decreased in selected period.

Figure 4 Classification of PPE Olympique Lyon [mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

The next club whose financial statements were examined is the Scottish club Celtic. Table 6 presents the share of property, plant, and equipment in total non-current assets.

Table 6 Share of PPE in total non – current assets Celtic FC [mln EUR]

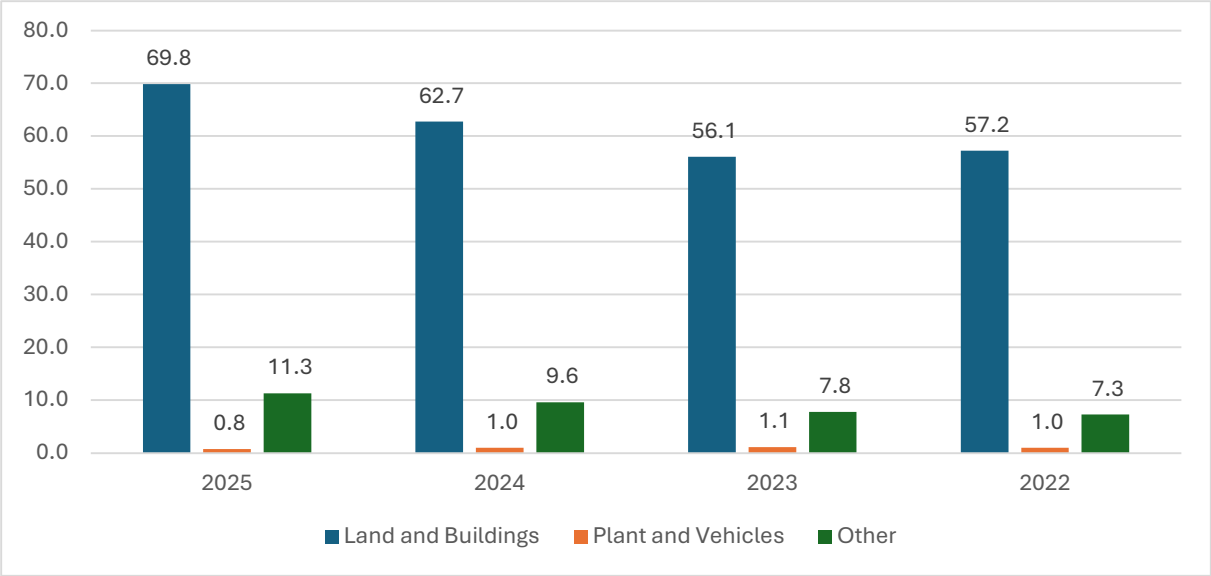
Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	81,9	161,8	51%
2024	73,3	112,5	65%
2023	64,9	115,2	56%
2022	65,4	121,8	54%

Source: Own study based on financial statements.

The ratio between these two balance sheet items fluctuated slightly throughout the analyzed period, which resulted both from the increase in the value of property, plant, and equipment and from fluctuations in the value of total non-current assets. Over the examined period, the share of property, plant and equipment in non-current assets amounted to 56%.

Scottish club presents 3 classes of PPE which were shown on figure 5. They present land and buildings which are the biggest class of PPE, and which increased slightly in research period. Beside this they present plant and vehicles which is immaterial and did not change much and other PPE which also increased slightly.

Figure 5 Classification of PPE Olympique Lyon [mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

The next club analyzed was FC Porto. Table 7 presents the value of property, plant, and equipment in relation to total non-current assets in the years 2022–2025. Based on the presented data a clear increase in the value of property, plant and equipment can be observed during the analyzed period. In 2022, their value amounted to EUR 120,6 mln, while in 2025 it reached EUR 221,4 mln. The most dynamic growth occurred between 2023 and 2024, when the value of this category of assets increased from EUR 116,7 mln to EUR 216,4 mln. This increase was driven by the rise in the value of sports facilities. At the same time, the value of total non-current assets changed from EUR 231,2 mln to EUR 355,7 mln. Therefore, the share of property, plant and equipment in non-current assets increased significantly rising from 39% in 2022 to 62% in 2025.

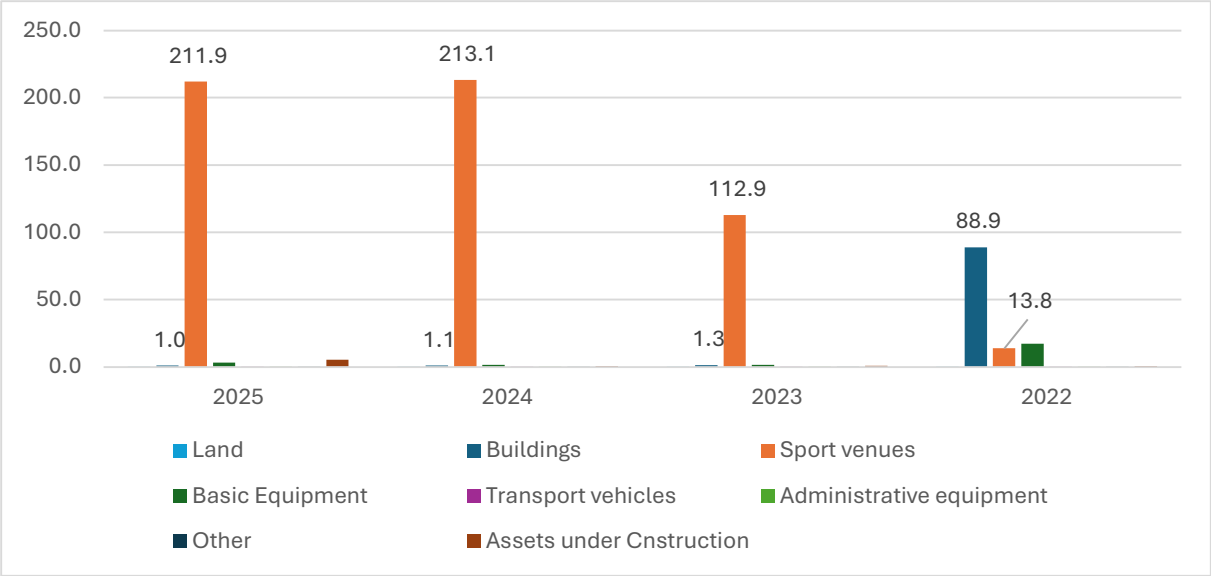
Table 7 Share of PPE in total non – current assets FC Porto [mln EUR]

Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	221,4	355,7	62%
2024	216,4	348,6	62%
2023	116,7	231,2	50%
2022	120,6	305,9	39%

Source: Own study based on financial statements.

Figure 6 shows division of classes of PPE in FC Porto. From selected research sample this club presents the most classes: land, buildings, sport venues, basic equipment, transport vehicles, administrative equipment, other and assets under construction. Besides sports venues all classes have exceedingly insignificant amounts. In 2023 club decided to change their presentation of PPE and combined three classes of PPE: buildings, basic equipment, and sport venues into one – sport venues. Additionally in 2024 value of this class increased by almost 100% which shows great development.

Figure 6 Classification of PPE FC Porto [mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

Table 8 presents the value of property, plant, and equipment in relation to total non-current assets of SL Benfica in the years 2022–2025. The analysis of the presented data indicates that the value of property, plant and equipment gradually decreased during the analyzed period. In 2022, it amounted to 103,5 mln, while in the following years a systematic decline can be observed reaching 89,1 mln in 2025. At the same time the total value of non-current assets remained stable fluctuating between EUR 415,1 mln and EUR 470,3 mln. As a result, the share of property, plant and equipment in non-current assets decreased over the analyzed period from 25% in 2022 to 19% in 2025. These data indicate that the importance of property, plant and equipment in the club's asset structure has gradually declined over the years.

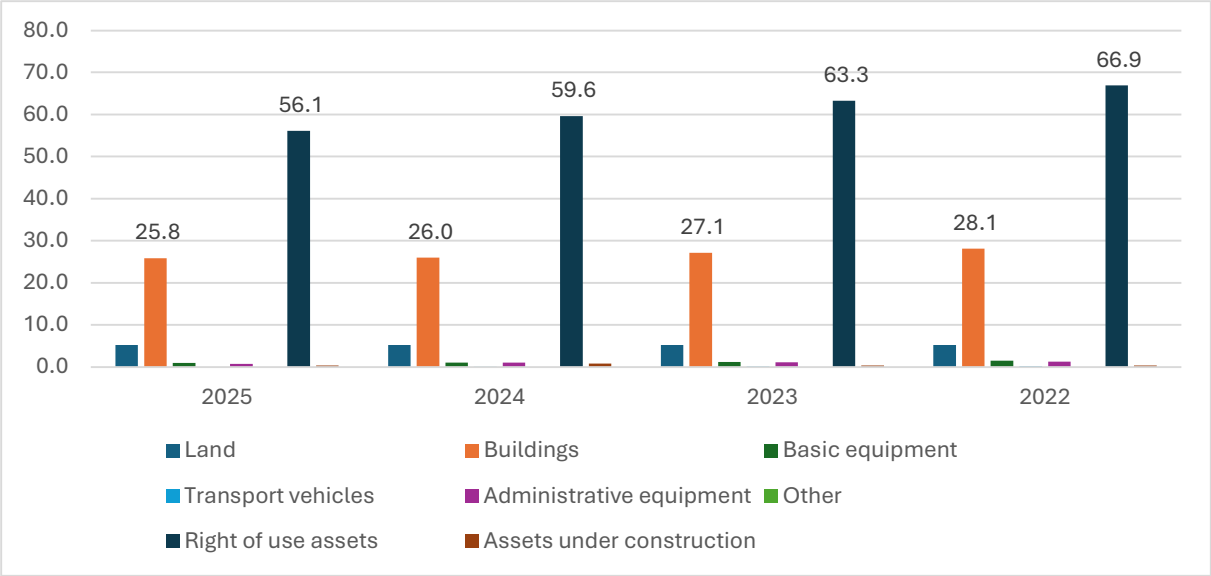
Table 8 Share of PPE in total non – current assets SL Benfica [mln EUR]

Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	89,1	470,3	19%
2024	93,7	464,7	20%
2023	98,4	420,5	23%
2022	103,5	415,1	25%

Source: Own study based on financial statements.

As can be seen on figure 7 SL Benfica presents the most classes beside FC Porto. They present land, buildings, basic equipment, transport vehicles, administrative equipment, right of use assets, assets under construction and other. This is the only club in which the biggest class is right of use asset. This class refers to leasings of the building with connection to IFRS 16. The second biggest class are building just like in other football clubs. The remaining classes are immaterial and small in value.

Figure 7 Classification of PPE SL Benfica [mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

Table 9 presents the value of property, plant, and equipment in relation to total non-current assets of SS Lazio in the years 2022–2025. The analysis of the data indicates that the value of property, plant and equipment gradually increased during the analyzed period. In 2022 it amounted to EUR 47,4 mln, while in 2025 it reached EUR 53,9 mln. At the same time the total value of non-current assets ranged between approximately EUR 275,7 mln and EUR 325,1 mln. As a result the share of property, plant and equipment in non-current assets remained low and fluctuated between 17% and 19%.

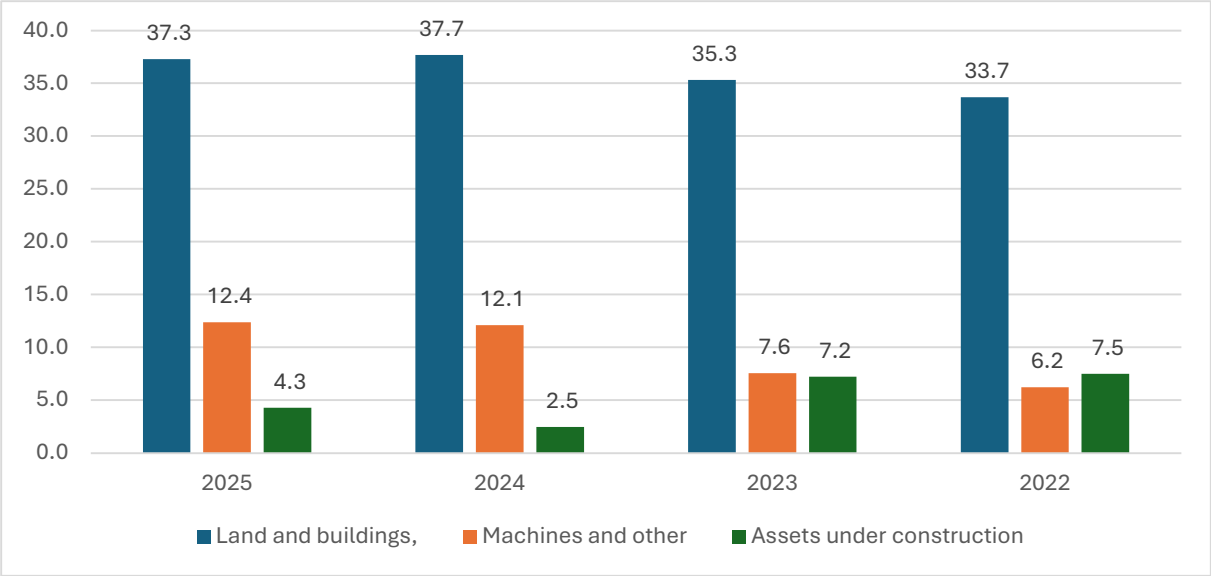
Table 9 Share of PPE in total non – current assets SS Lazio [mln EUR]

Year	PPE	Total non-current assets	Share of PPE in total non-current assets
2025	53,9	325,1	17%
2024	52,2	281,6	19%
2023	50,1	275,7	18%
2022	47,4	281,6	17%

Source: Own study based on financial statements.

SS Lazio shows only three classes of PPE which is presented on figure 8: land and buildings, machines and other, assets under construction. The land and buildings class is once more the biggest in value, however this time the machinery and asset under construction is not immaterial. However what can be seen is that in 2024 decrease in asset under construction resulted in increase in machines and other.

Figure 8 Classification of PPE SS Lazio[mln EUR]



Source: Own study based on financial statements.

Table 10 Depreciation of tangible assets analysis

Club	Year	2025	2024	2023	2022
Manchester United	Depreciation	18,3	17,7	13,8	14,3
	Total operating costs	856,0	906,8	793,6	805,4
	Share (%)	2,14%	1,95%	1,74%	1,77%
Juventus FC	Depreciation	10,9	10,1	10,8	12,3
	Total operating costs	405,7	400,1	425,5	466,3
	Share (%)	2,68%	2,53%	2,53%	2,63%
Borussia Dortmund	Depreciation	12,8	12,3	13,0	13,4
	Total operating costs	563,3	572,3	480,7	466,1
	Share (%)	2,27%	2,14%	2,69%	2,87%
Olympqiue Lyon	Depreciation	20,0	23,8	20,2	19,3
	Total operating costs	384,5	352,0	352,8	272,6
	Share (%)	5,21%	6,77%	5,73%	7,10%
Celtic	Depreciation	2,5	2,3	2,6	2,5
	Total operating costs	136,6	124,4	111,2	106,7
	Share (%)	1,82%	1,88%	2,38%	2,30%
FC Porto	Depreciation	7,7	6,6	4,0	4,1
	Total operating costs	147,1	176,5	166,0	145,1
	Share (%)	5,23%	3,77%	2,41%	2,80%
SL Benfica	Depreciation	5,3	5,5	5,6	5,8
	Total operating costs	226,7	204,8	206,4	192,4
	Share (%)	2,36%	2,69%	2,73%	3,00%
SS Lazio	Depreciation	1,9	1,4	1,3	1,3
	Total operating costs	163,2	183,6	168,2	164,6
	Share (%)	1,17%	0,78%	0,77%	0,80%

Source: Own study based on financial statements.

Table 10 presents the share of depreciation of tangible fixed assets in total operating costs for eight European football clubs in the period 2022–2025. The results show that depreciation represents a small proportion of total operating expenses across the analyzed clubs. For most

clubs, the share of depreciation remains between approximately 1% and 3% of operating costs. Manchester United, Juventus FC, Borussia Dortmund, Celtic, and SL Benfica fall within this range throughout the analyzed period. Manchester United shows a slight upward trend with the share increasing from 1.77% in 2022 to 2.14% in 2025. Juventus FC remains stable at around 2.5–2.7% while Borussia Dortmund records a slight decline from 2.87% in 2022 to 2.27% in 2025. Two clubs show significantly higher depreciation shares. Olympique Lyon records the highest values in the sample ranging from 5.21% to 7.10%, indicating a strong impact of infrastructure - related assets on the cost structure. Similarly FC Porto shows an increasing trend with the share rising from 2.80% in 2022 to 5.23% in 2025. The lowest share of depreciation is observed in SS Lazio where depreciation accounts for less than 1.2% of operating costs in all analyzed years. Overall the results indicate that although tangible fixed assets play a key role in the infrastructure of football clubs, their depreciation constitutes a small component of operating costs, with notable variation between clubs depending on the scale of infrastructure investments.

Conclusions

The aim of this study was to analyze the classification and accounting treatment of property, plant and equipment in selected European football clubs preparing financial statements in accordance with IFRS. Tangible fixed assets constitute an essential element of the operational infrastructure of sports organizations, as they include stadiums, training facilities, and other assets necessary for conducting sporting and commercial activities.

The analysis covered eight publicly listed football clubs and financial data from the reporting seasons 2021/2022–2024/2025. The results show that the importance of property, plant and equipment in the asset structure differs significantly between the analyzed entities. In various clubs, particularly Olympique Lyon, FC Porto and Celtic FC, tangible assets represent a substantial share of non-current assets, reflecting large infrastructure investments. In other clubs the share is lower, which may result from different stadium ownership models or the greater importance of other asset categories.

The study also indicates that buildings and sports facilities are the dominant class of property, plant, and equipment in most clubs. Other asset categories such as equipment, vehicles or administrative assets represent a much smaller portion of tangible assets. Additionally, a portion of clubs present assets under construction or right-of-use assets related to lease accounting under IFRS 16.

The analysis of depreciation shows that depreciation of tangible assets represents a small share of operating costs, usually between 1% and 3%. However, clubs with significant infrastructure investments may record higher depreciation shares. Overall the results confirm

that although tangible assets are not always the largest component of football clubs' asset structures. They remain crucial for their long-term development and operational activities. Future research could extend the analysis to a larger sample of sports organizations or examine the relationship between infrastructure investments and financial performance.

Literature

1. Abbasy S., Morskogen, (2024), How does ownership structure influence debt and liquidity for football club in Europe?
2. Ahtiainen S, Jarbva H. (2019) Has UFEA's financial fair play regulation in-creased football clubs' profitability? European Sport Management Quaterly, 22(4).
3. Amiraslani, H., Iatridis, G. E., & Pope, P. E. (2013). Accounting for asset im-pairment: A test for IFRS compliance across Europe. Cass Business School, London.
4. Anggraini, L. (2023). Acquisition and disposition of property, plant, and equipment (No. 4339259, p. 11).
5. Chatterjee, A., & Cohen, H. (2004). Accounting for commercial vehicles in urban transportation models. Cambridge Systematics (No. 6820.F44, pp. 50-59).
6. Hołda, A. (2013). MSR/MSSF w polskiej praktyce gospodarczej. Wydawnic-two C.H. Beck.
7. Kumor, I. (2014). Wycena środków trwałych jako materialny instrument poli-tyki rachunkowości w zakresie kształtowania całkowitego dochodu przedsię-biorstwa (No. 201, p. 163). Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach.
8. Kuzior, A. (2012). Prezentacja skutków wyceny i zmian w stanie środków trwałych w sprawozdaniu finansowym sporządzonym według MSSF. In T. Ce-browska & W. Dotkuś (Eds.), Środki trwałe – ujmowanie, wycena, prezenta-cja. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.
9. Łojek, P., & Kozioł, W. (2021). Podobieństwa i różnice wynikające z UOR a MSR w zakresie rzeczowych aktywów trwałych – ujęcie teoretyczne. Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie, 16.
10. Michalciuc, C. (2017). Accounting treatments for the valuation of tangible fixed assets (No. 41, p. 100). University of Suceava.
11. Międzynarodowy Standard Rachunkowości 16, 2020.
12. Międzynarodowy Standard Rachunkowości 23, 2007.
13. Mucomo, L. F. (2016). Identification of national and international regulations on accounting depreciation of tangible fixed assets. Fundatia Romana pentru Inteligenta Afacerii (No. 11, pp. 374-375).
14. Munthupandian, K. S. (2009). IAS 20 Accounting for Government Grants and Disclosure of Government Assistance – A Closer Look. The Institute of Cost and Works Accountants of India (No. 33518, p. 6).
15. Muthupandian, K. S. (2009). IAS 16 Property, Plant and Equipment – A Closer Look. The Institute of Cost and Works Accountants of India (No. 39902, p. 4).

16. Panagiotis E. Dimitropoulos, Evangelos Koumanakos, (2015). Intellectual capital and profitability in European football clubs. International Journal of Accounting, Auditing and Performance Evaluation vol. 11, No. 2.
17. Panagiotis E. Dimitropoulos (2011), Profitability of the Greek Football Clubs: Implications for Financial Decisions Making, Operations Management a Mod-ern Approach.
18. Pawłowski J., (2020), Financial condition of football clubs in the Polish Ekstraklasa. Journal of Physical Education and Sports Vol 20, No. 5.
19. Poniatowska, L. (2009). Metody i modele wyceny bilansowej aktywów i pa-sywów (No. 53, p. 164). Stowarzyszenie Księgowych w Polsce.
20. Prewysz-Kwinto, P., & Voss, G. (2018). Koszty finansowania zewnętrznego w świetle międzynarodowych regulacji rachunkowości i na przykładzie wybra-nych grup kapitałowych notowanych na GPW w Warszawie (No. 503, p. 389). Wyższa Szkoła Bankowa w Toruniu.
21. Shareef F., Davey H., (2005), Accounting for intellectual capital: Evidence from listed English football clubs, Journal of Applied Accounting Research 7(3).
22. Tsamis, A., & Liapis, K. (2014). Fair value and cost accounting, depreciation methods, recognition, and measurement for fixed assets. International Journal in Economics and Business Administration, 2(3), 123.
23. Weygandt, J. (2013). Financial accounting. John Wiley & Sons.
24. Zvekić, I. K. (2019). Tangible assets depreciation issues. Univerzitet u Zenici (No. 10, pp. 111-114).

DIAGNOSTYKA INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW I SYSTEMÓW OPTYCZNYCH

Michał PROŚCIEWICZ [1], Wiktor KOŁODZIEJCZYK [2], Julia KRÓL [3], Daniel KOWALEWSKI [4], Tomasz OSUCH [5], Bożena SZCZUCKA-LASOTA [6].

[1] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; mp312922@student.polsl.pl

[2] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; wk311333@student.polsl.pl

[3]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; jk304621@student.polsl.pl

[4]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; dk312982@student.polsl.pl

[5]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; to311358@student.polsl.pl

[6]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail: bozena.szczucka-lasota @polsl.pl; identyfikator ORCID - 0000-0003-3312-1864

* Korespondencja: : bozena.szczucka-lasota @polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych (BSP) w diagnostyce infrastruktury kolejowej. Transport kolejowy stanowi istotny element systemu transportowego ze względu na efektywność energetyczną oraz relatywnie niski wpływ na środowisko, jednak jego infrastruktura wymaga stałego monitorowania technicznego. Tradycyjne metody diagnostyczne są czasochłonne, kosztowne oraz obarczone ryzykiem dla pracowników. W odpowiedzi na te ograniczenia coraz większe znaczenie zyskują technologie dronowe. W opracowaniu omówiono zakres zastosowań BSP, obejmujący m.in. kontrolę torowisk, sieci trakcyjnej, obiektów inżynieryjnych oraz monitoring inwestycji. Szczególną uwagę poświęcono systemom optycznym, takim jak kamery RGB, termowizyjne oraz LiDAR, które umożliwiają dokładną analizę stanu infrastruktury. Istotnym elementem jest również wykorzystanie sztucznej inteligencji do automatycznego wykrywania uszkodzeń oraz prowadzenia analiz predykcyjnych. Przedstawiono architekturę systemu diagnostycznego, uwzględniającą drony, systemy komunikacji, jednostki przetwarzania danych oraz automatyczne stacje dokujące. Dokonano także analizy ryzyka, wskazując na zagrożenia związane z warunkami atmosferycznymi, awariami technicznymi, cyberbezpieczeństwem oraz ograniczeniami algorytmów. Omówiono koszty wdrożenia systemu, podkreślając wysoki próg inwestycyjny przy jednoczesnym potencjale długoterminowych oszczędności oraz wskazano również główne kierunki rozwoju technologii, takie jak autonomizacja systemów, integracja z sieciami 5G, rozwój sztucznej inteligencji oraz koncepcja cyfrowego bliźniaka. Zastosowanie BSP w diagnostyce kolejowej znacząco zwiększa bezpieczeństwo, efektywność oraz jakość utrzymania infrastruktury.

Słowa kluczowe: diagnostyka infrastruktury kolejowej; drony; systemy optyczne; kamery termowizyjne; LiDAR

1. Wprowadzenie

Transport kolejowy odgrywa istotną rolę w systemie transportowym wielu państw, w tym Polski. Charakteryzuje się wysoką efektywnością energetyczną, możliwością przewozu znacznych ilości ładunków oraz stosunkowo niewielkim wpływem na środowisko naturalne w porównaniu z transportem drogowym czy lotniczym. Infrastruktura kolejowa jest jednak systemem bardzo złożonym i wymagającym stałej kontroli technicznej. Obejmuje ona między innymi torowiska, sieć trakcyjną, urządzenia sterowania ruchem kolejowym, obiekty inżynieryjne, przejazdy kolejowe oraz systemy odwodnienia. Każdy z tych elementów podlega intensywnej eksploatacji oraz oddziaływaniu czynników atmosferycznych, takich jak opady, zmiany temperatury czy wiatr [1].

Tradycyjne metody diagnostyki infrastruktury kolejowej opierają się głównie na inspekcjach pieszych, przejazdach specjalistycznych pojazdów diagnostycznych oraz okresowych przeglądach technicznych, mają na celu wykrywanie nieprawidłowości , wad w szynach [2]. Metody te są jednak czasochłonne i kosztowne, a dodatkowo narażają pracowników na niebezpieczeństwo wynikające z pracy w pobliżu czynnych torów kolejowych. Obecnie w Polsce są przeprowadzone modernizacje, przebudowy linii kolejowych co wiąże się z wprowadzeniem pewnych zmian, w związku z tym, iż nowo wybudowane linie kolejowe nie potrzebują tak częstego dozorowania, ma to związek z usterkowością na liniach kolejowych.

Polskie Linie Kolejowe prowadzą obecnie największy w dziejach krajowej kolei program modernizacyjny, którego wartość sięga 180 mld zł i obejmuje perspektywę do lat 2030–2032. To ogromny zakres prac, który diametralnie odmieni infrastrukturę kolejową w Polsce, poprawiając warunki dla przewozów pasażerskich oraz tworząc stabilne fundamenty rozwoju transportu towarowego. Jak zaznacza prezes PKP PLK, Piotr Wyborski, **„***to dużo inwestycji, które całkowicie zmienią polską infrastrukturę kolejową i zapewnią lepszą perspektywę rozwojową dla przewozów pasażerskich, a także możliwość stabilnego rozwoju dla przewozów towarowych”* [3].

W ostatnich latach coraz większe znaczenie zyskuje wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w diagnostyce infrastruktury. Drony umożliwiają szybkie pozyskiwanie danych z dużych obszarów, docierają do miejsc trudno dostępnych oraz pozwalają na prowadzenie analiz z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Jak już wiadomo, statki bezzałogowe zostały wykorzystane już na liniach PKP PLK.

Od maja 2020 r. do czerwca 2021 r. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. przeprowadziły loty kontrolne z użyciem dronów na ponad 3,2 tysiącach kilometrów linii kolejowych w całym kraju. Jedenaście bezzałogowych statków powietrznych monitorowało postęp prac m.in. na stacji Warszawa Zachodnia oraz na modernizowanych trasach: Warszawa – Białystok, Poznań – Szczecin, Warszawa – Radom czy Trzebinia – Oświęcim. Drony wykorzystywano również do obserwacji budowy tunelu między stacjami Łódź Fabryczna, Żabieniec i Kaliska. Nadzór z powietrza prowadzono także na terenach inwestycji w portach w Gdańsku, Gdyni, Szczecinie i Świnoujściu. PLK nadal wykorzystują drony do monitorowania prac, a konkretne odcinki lotów są wybierane zgodnie z bieżącymi potrzebami inwestycyjnymi. Ujęcia z dronów pozwalają z góry ocenić stan placów budowy, sprawdzić zabezpieczenia terenu oraz przestrzeganie zasad BHP. Kolejarze mogą też obserwować ruch pociągów i pojazdów technicznych, a w razie nieprawidłowości szybko reagować. PLK wykorzystują drony również przed rozpoczęciem prac, by poznać ukształtowanie terenu i lepiej zaplanować harmonogram. Loty wykonują przeszkoleni pracownicy, a każde użycie dronu jest zgłaszane odpowiednim służbom. W strefach ograniczeń spółka uzyskuje dodatkowe zezwolenia [4].

2. Znaczenie diagnostyki infrastruktury kolejowej

Kolej jest bardzo ważną gałęzią transportu, która ma szczególne znaczenie militarne. Nad bezpieczeństwem kolei czuwają pracownicy Służby Ochrony Kolei. W ministerstwie infrastruktury kończą się prace nad przepisami, które umożliwią Straży Ochrony Kolei posługiwanie się tymi bezzałogowcami. O konieczności wzmocnienia ochrony mówi się od czasu aktu sabotażu. W połowie listopada 2025 r. doszło do aktu sabotażu na linii kolejowej Warszawa–Lublin. Minister infrastruktury Dariusz Klimczak potwierdził wówczas, że system ochrony kolei zostanie rozszerzony o wykorzystanie dronów [5]. Regularna diagnostyka infrastruktury kolejowej jest jednym z kluczowych elementów zapewnienia bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Uszkodzenia torów, sieci trakcyjnej lub elementów konstrukcyjnych mogą prowadzić do poważnych konsekwencji, takich jak opóźnienia pociągów, uszkodzenia taboru czy nawet wykolejenia. Głównym aspektem jest bezpieczeństwo.

Diagnostyka za pomocą dronów wydaje się szczególnie przydatna podczas ekstremalnych temperatur, inspekcję można wykonywać sprawniej i częściej, poprawiając bezpieczeństwo. Najczęściej występujące problemy infrastruktury kolejowej obejmują: pęknięcia szyn, zużycie powierzchni tocznej, deformacje toru, uszkodzenia podkładów, uszkodzenia sieci trakcyjnej, osuwiska i erozję skarp. Wczesne wykrycie takich usterek umożliwia przeprowadzenie działań zapobiegawczych oraz zmniejszenie kosztów utrzymania infrastruktury [6]. Trzeba też dodać problem pożarów w okresie suszy oraz wczesne wykrywanie podpaleń, co jest częstym zjawiskiem na liniach kolejowych w Polsce, inspekcja za pomocą (BSP) pozwala na

natychmiastowe obrazowanie termowizyjne, co kluczowo skraca czas reakcji, co pozwala na opanowanie ognia w jego wczesnej fazie.

3. Zastosowanie dronów w diagnostyce kolejowej

Bezzałogowe statki powietrzne znajdują coraz szersze zastosowanie w monitorowaniu infrastruktury krytycznej, w tym linii kolejowych. Drony mogą wykonywać inspekcje na dużych odległościach w stosunkowo krótkim czasie, co znacząco zwiększa efektywność procesów diagnostycznych. Do głównych zastosowań dronów w kolejnictwie należą: kontrola torowisk i elementów nawierzchni kolejowej, inspekcja sieci trakcyjnej, monitorowanie mostów i wiaduktów, kontrola skarp i nasypów, dokumentowanie postępów prac modernizacyjnych.

Na terenie lotniska w Przasnyszu przeprowadzono pierwsze udane testy w ramach projektu *System Monitorowania Stanu Infrastruktury Kolejowej (SMSIK) – UAVforRail*, realizowanego ze środków programu *BRIK NCBR*. Próby obejmowały weryfikację działania bezzałogowego statku powietrznego oraz opracowanej w ramach projektu automatycznej stacji dokująco-ładującej, które stanowią kluczowe elementy rozwijanego systemu monitorowania. Głównym celem testów było sprawdzenie poprawności współpracy pomiędzy BSP a stacją dokującą, ze szczególnym uwzględnieniem autonomicznego lądowania, precyzyjnego pozycjonowania oraz procesu ładowania akumulatorów. Uzyskane wyniki potwierdziły trafność założeń projektowych oraz wysoką stabilność działania opracowanych rozwiązań. Równolegle zweryfikowano możliwość automatycznego przesyłania danych pomiarowych do centrum obliczeniowego, gdzie będą one poddawane dalszej analizie z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji [7].

Przeprowadzone próby stanowią istotny etap w kierunku zwiększenia autonomii systemu oraz ograniczenia konieczności angażowania wykwalifikowanego personelu w proces monitorowania infrastruktury kolejowej. W kolejnych fazach projektu planowane są dalsze testy funkcjonalne, rozwój stacji dokująco-ładującej (Rys. 3.1.) oraz doskonalenie modeli analitycznych na podstawie danych pozyskiwanych podczas następnych oblotów testowych. Zastosowanie dronów oraz metod sztucznej inteligencji umożliwia szybsze, dokładniejsze i bardziej niezawodne wykrywanie usterek na liniach kolejowych. Automatyzacja procesu monitoringu pozwala jednocześnie obniżyć koszty operacyjne i zwiększyć poziom bezpieczeństwa infrastruktury [7].



Rys. 3.1. Automatyczna stacja dokująco- ładująca [7].

4. Systemy optyczne wykorzystywane w dronach

Systemy optyczne są kluczowym elementem wyposażenia bezzałogowych statków powietrznych stosowanych w diagnostyce infrastruktury kolejowej. Pozwalają one na zbieranie szczegółowych danych wizualnych, które następnie podlegają analizie w celu wykrywania uszkodzeń oraz oceny stanu technicznego torów i obiektów inżynieryjnych. W praktyce używa się różnych typów sensorów, które dobiera się w zależności od specyfiki prowadzonych badań oraz wymaganej precyzji pomiarów. Najczęściej stosowane są kamery RGB, kamery termowizyjne oraz systemy laserowego skanowania LiDAR.

Wykorzystanie wielu rodzajów sensorów jednocześnie umożliwia uzyskanie bardziej wszechstronnych informacji o stanie infrastruktury. Integracja danych z różnych źródeł zwiększa efektywność diagnostyki i pozwala na dokładniejsze wykrywanie nieprawidłowości, co jest kluczowe przy utrzymaniu infrastruktury kolejowej [8].

4.1 Kamery RGB

Kamery RGB stanowią podstawowe narzędzie w wizualnej inspekcji infrastruktury kolejowej. Rejestrują obraz w zakresie światła widzialnego, co pozwala na dokładną ocenę stanu torów, elementów nawierzchni oraz konstrukcji inżynieryjnych. Dzięki wysokiej

rozdzielczości możliwe jest wykrywanie pęknięć szyn, zużycia materiałów czy odkształceń torów. Użycie kamer RGB umożliwia również stosowanie metod fotogrametrycznych, dzięki którym można tworzyć ortofotomapy oraz modele 3D oglądanych obiektów. Dane te są szczególnie przydatne przy analizach geometrycznych oraz planowaniu prac konserwacyjnych, zwłaszcza w przypadku mostów i wiaduktów [9].

4.2 Kamery termowizyjne

Kamery termowizyjne pozwalają na rejestrację promieniowania podczerwonego emitowanego przez badane obiekty, co umożliwia analizę rozkładu temperatur. W diagnostyce infrastruktury kolejowej znajdują zastosowanie głównie w wykrywaniu przegrzanych elementów sieci trakcyjnej oraz uszkodzeń izolacji.

Dodatkowo używa się ich do identyfikowania zagrożeń pożarowych i monitorowania terenów trudno dostępnych, także w warunkach ograniczonej widoczności. Ich zastosowanie znacząco poprawia wykrywanie usterek niewidocznych dla światła widzialnego [10].

4.3 Systemy LiDAR

Systemy LiDAR bazują na impulsach laserowych do pomiaru odległości oraz tworzenia trójwymiarowych modeli terenu. Ta technologia pozwala na bardzo precyzyjne odwzorowanie infrastruktury kolejowej oraz jej otoczenia, w tym skarp, nasypów i konstrukcji inżynieryjnych.

Zaletą systemów LiDAR jest możliwość wykonywania pomiarów niezależnie od warunków oświetleniowych oraz częściowa penetracja przez roślinność, co umożliwia analizę ukształtowania terenu nawet w trudnych warunkach. Uzyskane dane wspierają wykrywanie deformacji torów oraz zagrożeń geotechnicznych, pomagając w utrzymaniu infrastruktury [11].

5. Analiza danych i sztuczna inteligencja

Rozwój technologii bezzałogowych statków powietrznych wiąże się bezpośrednio z koniecznością przetwarzania dużych zbiorów danych pozyskiwanych podczas inspekcji. Obrazy i dane przestrzenne wymagają zastosowania zaawansowanych metod analitycznych, z których istotną rolę odgrywa sztuczna inteligencja. Jej wykorzystanie umożliwia automatyzację procesów diagnostycznych oraz podniesienie ich precyzji.

Algorytmy uczenia maszynowego, w tym sieci neuronowe, pozwalają na automatyczne rozpoznawanie uszkodzeń infrastruktury kolejowej na podstawie danych obrazowych. Potrafią wykrywać pęknięcia szyn, deformacje torów oraz nieprawidłowości w sieci trakcyjnej. Stosowanie takich rozwiązań znacznie skraca czas analizy i ogranicza potrzebę zaangażowania operatora w proces diagnostyczny.

Istotną rolę odgrywa również integracja danych z różnych systemów pomiarowych, takich jak kamery optyczne, termowizyjne oraz systemy LiDAR. Połączenie informacji pozwala na tworzenie bardziej zaawansowanych modeli analitycznych oraz dokładniejsze określanie stanu technicznego infrastruktury.

Współczesne systemy diagnostyczne coraz częściej stosują podejście predykcyjne, które umożliwia przewidywanie potencjalnych awarii zanim one wystąpią. Takie rozwiązania są częścią rozwoju nowoczesnych systemów utrzymania infrastruktury kolejowej i przyczyniają się do zwiększenia bezpieczeństwa oraz efektywności eksploatacji sieci kolejowej.

Pomimo wielu zalet, wdrażanie systemów opartych na sztucznej inteligencji wiąże się z wyzwaniami, takimi jak zapewnienie wysokiej jakości danych, odpowiedniej mocy obliczeniowej oraz stałe ulepszanie modeli analitycznych. Jednak postęp tych technologii wskazuje, że w przyszłości staną się one standardem w diagnostyce infrastruktury kolejowej [12].

6. Architektura systemu diagnostycznego

Projektowanie systemu diagnostycznego z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych obejmuje zestaw sprzętowych i programowych komponentów, które współdziałają ze sobą na wielu poziomach. Celem tego układu jest zbieranie, przetwarzanie oraz analiza danych odnoszących się do stanu infrastruktury kolejowej, z naciskiem na efektywność tych procesów.

Podstawowym elementem tego systemu są oczywiście drony, wyposażone w różnego rodzaju sensory – na przykład w kamery RGB, kamery termowizyjne czy systemy LiDAR. To właśnie one realizują zadanie pozyskiwania informacji podczas inspekcji infrastruktury. Warto zaznaczyć, że takie bezzałogowce mogą być sterowane zarówno ręcznie, jak i działać autonomicznie, poruszając się po wcześniej ustalonych trasach. [14]

Kolejnym fragmentem architektury, na który trzeba zwrócić uwagę, jest system komunikacji umożliwiający przesyłanie danych pomiędzy dronem a stacją naziemną. W praktyce wykorzystuje się różnorodne technologie bezprzewodowe – w tym LTE, 5G, a czasem dedykowane łącza radiowe. Takie rozwiązania mają na celu utrzymanie ciągłości transmisji oraz zapewnienie możliwości monitorowania misji na bieżąco [17].

Sercem całej konstrukcji jest jednostka odpowiedzialna za przetwarzanie zebranych informacji. Najczęściej przybiera ona postać lokalnego serwera lub usługi chmurowej. Dane przesłane przez drony są tam poddawane dalszej analizie, zwykle z wykorzystaniem algorytmów bazujących na sztucznej inteligencji. Dzięki temu system automatycznie wykrywa uszkodzenia, klasyfikuje defekty, a na końcu generuje raporty, które wspomagają diagnostykę [18].

Także warto wspomnieć o automatycznych stacjach dokująco-ładujących, które wprowadzają odrobinę autonomii do całego przedsięwzięcia. Pozwalają one dronom na samodzielne lądowanie, ładowanie baterii i przygotowanie się do kolejnego lotu, bez udziału operatora. To rozwiązanie jest dosyć istotne, gdy chodzi o ograniczanie kosztów i zwiększenie efektywności monitoringu [14].

Połączenie wymienionych elementów daje system, który jest w stanie przeprowadzać ciągły monitoring infrastruktury kolejowej i szybko reagować na wykryte anomalie. Nie jest przecież wykluczone, że w przyszłości takie systemy osiągną pełną autonomię i stworzą podstawę dla bardziej zaawansowanych systemów zarządzania transportem.

7. Analiza ryzyka

Wprowadzanie systemów diagnostycznych opartych na dronach do monitorowania infrastruktury kolejowej nie jest pozbawione ryzyka – choć zyski bywają niemałe. Trzeba po prostu pamiętać o kilku potencjalnych problemach na etapie planowania i eksploatacji.

Pierwszym i chyba najbardziej oczywistym zagrożeniem są warunki pogodowe. Silny wiatr, deszcz, śnieg czy ograniczona widoczność często utrudniają, a czasem wręcz uniemożliwiają wykonanie zaplanowanych lotów. Naturalnie przekłada się to na niezawodność systemu i może przerywać cykliczne kontrole [15]. Nie można też pominąć kwestii technicznych. Awarie dronów, takie jak problemy z zasilaniem, uszkodzenia sensorów czy błędy w systemach sterowania, mogą prowadzić do utraty kontroli nad statkiem powietrznym. W najgorszym wypadku skończyć się to może uszkodzeniem torów lub zagrożeniem dla ruchu pociągów [16].

Rzecz, o której często się zapomina, to bezpieczeństwo cybernetyczne. System diagnostyczny wykorzystujący transmisję danych i analizy w chmurze stoi na celowniku potencjalnych ataków hackerskich – mogących skutkować przechwyceniem lub zmianą informacji. W rezultacie, błędne dane prowadzą do niewłaściwych decyzji dotyczących utrzymania infrastruktury [18].

Ważne jest też, żeby spojrzeć na ryzyko po stronie algorytmów sterujących analizą. Modele sztucznej inteligencji nie zawsze są doskonałe, a słaba jakość danych wejściowych może skutkować fałszywymi alarmami albo – co gorsza – niezauważeniem rzeczywistych usterek [18].

Na marginesie trzeba pamiętać o regulacjach prawnych i kwestiach organizacyjnych – chociażby o konieczności dopełniania formalności dotyczących zezwoleń na loty, przestrzeganiu przepisów ruchu lotniczego czy odpowiednich kwalifikacjach operatorów [13]. Aby ograniczyć ryzyko, niezbędne jest wdrożenie właściwych procedur bezpieczeństwa, regularne kontrole sprzętu, rozwój mechanizmów redundancji i ciągłe udoskonalanie algorytmów. Dopiero w takim układzie można sensownie i bezpiecznie korzystać z dronów w diagnostyce infrastruktury kolejowej.

8. Koszty wdrożenia systemu

Wdrożenie nowoczesnego systemu diagnostyki opartego na bezzałogowych statkach powietrznych (BSP) oraz zaawansowanych systemach optycznych wymaga precyzyjnego zaplanowania nakładów kapitałowych (CAPEX) oraz operacyjnych (OPEX). W kontekście realizowanego przez PKP Polskie Linie Kolejowe programu modernizacyjnego o wartości blisko 180 mld zł, inwestycje w cyfryzację nadzoru stanowią kluczowy element optymalizacji wydatków długoterminowych i zwiększenia efektywności zarządzania majątkiem sieciowym [20]. Całkowity koszt implementacji technologii dronowych w kolejnictwie można podzielić na cztery główne kategorie: zakup specjalistycznego sprzętu (hardware), rozwój i licencjonowanie oprogramowania (software), koszty operacyjne i szkoleniowe oraz infrastrukturę naziemną [21].

Pierwszym i najbardziej widocznym kosztem jest zakup platform latających klasy Enterprise. Profesjonalne drony wykorzystywane w przemyśle kolejowym, zdolne do stabilnego lotu w trudnych warunkach atmosferycznych i przenoszenia ciężkich sensorów LiDAR oraz kamer termowizyjnych, to wydatek rzędu od 50 000 do nawet 250 000 PLN za jedną jednostkę wraz z niezbędnym wyposażeniem zapasowym [21]. Kluczowym elementem drastycznie podnoszącym koszt są zaawansowane sensory. Systemy LiDAR klasy przemysłowej, niezbędne do tworzenia numerycznych modeli terenu (DTM) i wykrywania mikro deformacji torowisk, często przewyższają cenę samej platformy latającej [19]. Dodatkowo, projekt SMSIK – UAVforRail wskazuje na konieczność inwestycji w automatyczne stacje dokująco-ładujące (tzw. drony w pudełku), których koszt jednostkowy jest wysoki ze względu na wymagania dotyczące szczelności, systemów klimatyzacji ogniw oraz precyzyjnych mechanizmów pozycjonowania GPS RTK [19].

Warstwa oprogramowania i analizy danych stanowi drugi, równie kosztowny filar wydatków. Wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji (AI) do automatycznego wykrywania usterek (np. brakujących śrub, pęknięć izolatorów) wymaga nie tylko zakupu licencji, ale przede wszystkim inwestycji w infrastrukturę obliczeniową o wysokiej mocy lub dedykowane usługi chmurowe [20]. Przetwarzanie terabajtów danych z chmur punktów

pozyskanych z nalotów LiDAR generuje stałe koszty operacyjne. Należy jednak zaznaczyć, że automatyzacja procesów diagnostycznych docelowo redukuje koszty związane z zaangażowaniem wykwalifikowanego personelu w żmudne i niebezpieczne przeglądy manualne, co w skali dekady przynosi wymierne oszczędności [21].

Analiza porównawcza kosztów wskazuje na bardzo wysoką rentowność technologii BSP w dłuższej perspektywie. Tradycyjne metody, oparte na inspekcjach pieszych i specjalistycznych pociągach diagnostycznych, są niezwykle kosztowne ze względu na konieczność zamykania torów dla ruchu pociągów, co generuje ogromne straty dla przewoźników i zarządcy infrastruktury z tytułu kar za opóźnienia [21]. Drony wykonują inspekcje bez ingerencji w rozkład jazdy, co pozwala na radykalne obniżenie kosztów pośrednich. Przykładowo, wykrycie pęknięcia szyny lub usterki sieci trakcyjnej we wczesnej fazie, dzięki częstym i tanim nalotom predykcyjnym, pozwala uniknąć katastrof kolejowych, których koszty naprawy infrastruktury i odszkodowań liczone są w dziesiątkach milionów złotych [20].

Koszty szkolenia pracowników również stanowią istotną pozycję w budżecie wdrożeniowym. Uzyskanie uprawnień do lotów w kategorii szczególnej (scenariusze STS/BVLOS) dla personelu Straży Ochrony Kolei lub pracowników technicznych PLK wiąże się z nakładami na certyfikowane kursy i egzaminy [21]. Niemniej jednak, integracja dronów z systemem ochrony kolei pozwala na skuteczne ograniczenie strat wynikających z kradzieży elementów infrastruktury (np. kabli powrotnych, dławików) oraz aktów wandalizmu, co w skali roku stanowi kluczową pozycję po stronie zysków zarządcy [20]. Podsumowując, mimo wysokiego progu wejścia, systemy te stają się standardem rynkowym ze względu na szybki zwrot z inwestycji (ROI) wynikający z radykalnego wzrostu bezpieczeństwa i precyzji diagnostycznej [21].

9. Kierunki rozwoju technologii

Rozwój technologii diagnostyki kolejowej z wykorzystaniem dronów i systemów optycznych zmierza w stronę pełnej autonomizacji, głębokiej integracji z systemami zarządzania ruchem (ERTMS/ETCS) oraz wykorzystania nowych źródeł energii i transmisji danych. Obecne osiągnięcia projektu UAVforRail oraz testy operacyjne przeprowadzone przez PKP PLK na strategicznych liniach stanowią jedynie fundament pod przyszłe, znacznie bardziej zaawansowane ekosystemy nadzoru [19]. Głównym trendem rozwojowym jest całkowite odejście od lotów sterowanych ręcznie na rzecz w pełni autonomicznych misji realizowanych w trybie BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) na dystansach setek kilometrów [22].

Kluczowym kierunkiem jest doskonalenie systemów "Drone-in-a-Box". W przyszłości gęsta sieć automatycznych stacji dokujących, rozmieszczonych wzdłuż głównych magistrali kolejowych (np. E20 czy E30), pozwoli na ciągły monitoring infrastruktury bez fizycznej

obecności personelu na miejscu [22]. Rozwój ten będzie nierozerwalnie związany z implementacją sieci 5G i w przyszłości 6G, co umożliwi przesyłanie strumieniowe obrazu o rozdzielczości 8K oraz danych z LiDAR w czasie rzeczywistym bezpośrednio do centralnych ośrodków diagnostycznych. Pozwoli to na błyskawiczną reakcję na zagrożenia o charakterze nagłym, takie jak powalone drzewa po nawałnicach, osuwiska ziemi czy pożary w pasie kolejowym [22].

Sztuczna inteligencja przejdzie ewolucję od prostego rozpoznawania obiektów do zaawansowanej analityki predykcyjnej opartej na głębokim uczeniu maszynowym [20]. Przyszłe systemy będą w stanie nie tylko identyfikować istniejące usterki, ale na podstawie mikro-zmian w geometrii toru czy obrazie termowizyjnym, przewidywać zmęczenie materiału szyn lub przegrzewanie się elementów sieci trakcyjnej na wiele tygodni przed wystąpieniem awarii. Koncepcja "Digital Twin" (Cyfrowego Bliźniaka) całej sieci kolejowej, zasilanego codziennymi danymi z dronów, stanie się standardem. Pozwoli to na wirtualne symulowanie wpływu ekstremalnych zjawisk pogodowych na stabilność torowiska, co jest kluczowe w obliczu postępujących zmian klimatycznych [20].

Kolejnym istotnym kierunkiem jest miniaturyzacja sensorów i hybrydyzacja napędów. Dążenie do integracji skanerów LiDAR o zasięgu 500 metrów, kamer multispektralnych i systemów wykrywania wyładowań niezupełnych w jednej, lekkiej głowicy pozwoli na wykonywanie kompleksowej diagnostyki podczas jednego przelotu [19]. Jednocześnie prowadzone są zaawansowane prace nad dronami napędzanymi ogniwami wodorowymi. Technologia ta umożliwi wydłużenie czasu lotu z obecnych 40 minut do kilku godzin, co pozwoli na inspekcję odcinków o długości przekraczającej 200 kilometrów bez konieczności lądowania, co zrewolucjonizuje nadzór nad liniami o mniejszym natężeniu ruchu [19].

Rozwój technologii nie ograniczy się jedynie do sfery inżynieryjnej, ale obejmie także pełną integrację prawną i systemową w ramach europejskiego systemu U-Space [22]. Pozwoli to na bezpieczne i automatyczne współdzielenie przestrzeni powietrznej przez drony kolejowe, kurierskie oraz lotnictwo ratunkowe. W kontekście geopolitycznym, przyszłe systemy będą kłaść ogromny nacisk na cyberbezpieczeństwo i odporność łączności na zakłócanie (anty-jamming), co jest kluczowe dla ochrony infrastruktury krytycznej państwa przed zagrożeniami hybrydowymi [20]. Wszystkie te kierunki wskazują na to, że do 2032 roku diagnostyka dronowa stanie się "układem nerwowym" nowoczesnej kolei – działającym autonomicznie, nieprzerwanie i niemal niezauważalnie dla pasażera [22].

10. Podsumowanie

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w diagnostyce infrastruktury kolejowej stanowi istotny kierunek rozwoju nowoczesnych systemów utrzymania transportu szynowego. Technologie te umożliwiają szybkie i precyzyjne pozyskiwanie danych diagnostycznych, a także prowadzenie inspekcji w sposób bezpieczniejszy i mniej inwazyjny niż w przypadku metod tradycyjnych. Wykorzystanie dronów pozwala na monitorowanie rozległych obszarów infrastruktury w krótkim czasie oraz docieranie do miejsc trudno dostępnych, co znacząco zwiększa skuteczność działań kontrolnych.

Szczególne znaczenie ma integracja różnych systemów pomiarowych, takich jak kamery RGB, kamery termowizyjne oraz systemy LiDAR, które dostarczają komplementarnych informacji o stanie technicznym infrastruktury. Połączenie tych danych z algorytmami sztucznej inteligencji umożliwia automatyzację procesów diagnostycznych oraz rozwój metod predykcyjnych, pozwalających na identyfikację potencjalnych usterek jeszcze przed ich wystąpieniem.

Wdrażanie systemów opartych na dronach wiąże się jednak z określonymi wyzwaniami, obejmującymi m.in. wysokie koszty początkowe, konieczność zapewnienia odpowiedniej jakości danych, wymagania dotyczące infrastruktury teleinformatycznej oraz kwestie związane z bezpieczeństwem operacyjnym i cyberbezpieczeństwem. Pomimo tych ograniczeń, rozwój technologii oraz rosnące doświadczenie w ich implementacji wskazują na ich coraz większą dostępność i opłacalność w dłuższej perspektywie.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować następujące wnioski:

- Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w diagnostyce infrastruktury kolejowej znacząco zwiększa efektywność oraz częstotliwość inspekcji, jednocześnie ograniczając ryzyko dla personelu technicznego.
- Integracja danych z różnych systemów optycznych oraz zastosowanie metod sztucznej inteligencji umożliwiają bardziej precyzyjną ocenę stanu infrastruktury i rozwój utrzymania predykcyjnego.
- Pomimo wysokich kosztów wdrożenia, technologie dronowe w długim okresie przyczyniają się do obniżenia kosztów eksploatacyjnych oraz zwiększenia poziomu bezpieczeństwa ruchu kolejowego, co czyni je istotnym elementem przyszłych systemów zarządzania infrastrukturą.

Bibliografia:

1. Id-1 Instrukcja utrzymania nawierzchni kolejowej PKP PLK (2026), instrukcja dostępna na: https://www.plk-sa.pl/klienci-i-kontrahenci/akty-prawne-i-przepisy/instrukcje-pkp-polskich-linii-kolejowych-sa/linie-kolejowe (dostęp 19.03.2026)
2. Id-7 Instrukcja o dozorowaniu linii kolejowych PKP PLK, (2016), instrukcja dostępna na: https://www.plk-sa.pl/klienci-i-kontrahenci/akty-prawne-i-przepisy/instrukcje-pkp-polskich-linii-kolejowych-sa/linie-kolejowe (dostęp 19.03.2026)
3. „W 2026 r. PKP PLK planują podpisać umowy o wartości około 30 mld zł", Źródło: Newseria 25 lutego 2026, artykuł dostępny na: https://kolejowyportal.pl/w-2026-r-pkp-plk-planuja-podpisac-umowy-o-wartosci-okolo-30-mld-zl/?utm_source=copilot.com (dostęp 19.03.2026)
4. „ Drony monitorują inwestycje PLK" z dn. 20.07.21, artykuł dostępny na: ,https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/drony-monitoruja-inwestycje-plk-5930?utm_source=copilot.com (dostęp 19.03.2026)
5. „Drony będą czuwać na bezpieczeństwem kolei" z dn. 18.02.2026, artykuł dostępny na: htps://radioszczecin.pl/6,501310,drony-beda-czuwac-nad-bezpieczenstwem-polskiej-k (dostęp 19.03.2026)
6. Id-10 Instrukcja badań defektoskopowych szyn, spoin i zgrzein w torach kolejowych PKP PLK (D-16) (2025), instrukcja dostępna na: https://www.plk-sa.pl/klienci-i-kontrahenci/akty-prawne-i-przepisy/instrukcje-pkp-polskich-linii-kolejowych-sa/linie-kolejowe (dostęp 19.03.2026)
7. „Drony i sztuczna inteligencja w służbie kolei" – udane testy systemu UAV for Rail Politechnika Warszawska 6 lutego 2026, artykuł dostępny na: https://oblot.pw.edu.pl/2026/02/06/drony-i-sztuczna-inteligencja-w-sluzbie-kolei-udane-testy-systemu-uavforrail/(dostęp 19.03.2026)
8. „Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów", Problemy Kolejnictwa, Instytut Kolejnictwa (2020), artykuł dostępny na: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-f64cddd0-aa67-468a-9fe1-7ba6d230f34a (dostęp 19.03.2026)
9. „Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych", Przegląd Komunikacyjny (2020), artykuł dostępny na: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-bea2b3db-a750-4883-8959-1297fccaaf2b (dostęp 19.03.2026)

10. „Drony w inspekcji kolejowych obiektów inżynieryjnych”, Przegląd Komunikacyjny (2021), artykuł dostępny na: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-1957c584-89d3-4e14-b0d3-c846b483deac (dostęp 19.03.2026)
11. „Kolej testuje drony do monitoringu tras” (2026), artykuł dostępny na: https://elektronikab2b.pl/biznes/27845-kolej-testuje-drony-do-monitoringu-tras (dostęp 19.03.2026)
12. „Drony zamiast dróżników – UAVforRail” (2026), artykuł dostępny na: https://industryalarm.pl/drony-monitoring-infrastruktury-kolejowej-uavforrail/ (dostęp 19.03.2026)
13. „Drony monitorują inwestycje PLK” z dn. 20.07.2021, artykuł dostępny na: https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/drony-monitoruja-inwestycje-plk-5930 (dostęp 19.03.2026)
14. „Drony i sztuczna inteligencja w służbie kolei – udane testy systemu UAVforRail”, Politechnika Warszawska, 6 lutego 2026, artykuł dostępny na: https://oblot.pw.edu.pl/2026/02/06/drony-i-sztuczna-inteligencja-w-sluzbie-kolei-udane-testy-systemu-uavforrail/ (dostęp 19.03.2026)
15. „Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów”, Problemy Kolejnictwa, Instytut Kolejnictwa (2020), artykuł dostępny na: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-f64cddd0-aa67-468a-9fe1-7ba6d230f34a (dostęp 19.03.2026)
16. „Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych”, Przegląd Komunikacyjny (2020), artykuł dostępny na: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-bea2b3db-a750-4883-8959-1297fccaaf2b (dostęp 19.03.2026)
17. „Drony w inspekcji kolejowych obiektów inżynieryjnych”, Przegląd Komunikacyjny (2021), artykuł dostępny na: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-1957c584-89d3-4e14-b0d3-c846b483deac (dostęp 19.03.2026)
18. „Drony zamiast dróżników – UAVforRail” (2026), artykuł dostępny na: https://industryalarm.pl/drony-monitoring-infrastruktury-kolejowej-uavforrail/ (dostęp 19.03.2026)

19. „Program BRIK - Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej”, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (2026), artykuł dostępny na: https://www.gov.pl/web/ncbr/brik-ii-program-badawczy-dla-kolei (dostęp 21.03.2026)
20. „PKP PLK: Inwestycje w cyfryzację i AI to przyszłość utrzymania sieci”, Transport Publiczny (2026), artykuł dostępny na: https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/pkp-plk-inwestycje-w-cyfryzacje-i-ai-to-przyszlosc-utrzymania-sieci-78122.html (dostęp 21.03.2026)
21. „Drony w kolejnictwie: Analiza kosztów i korzyści wdrożenia systemów UAV”, Rynek Kolejowy (2025), artykuł dostępny na: https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/drony-w-kolejnictwie-analiza-kosztow-i-korzysci-wdrozenia-systemow-uav-112345.html (dostęp 21.03.2026)
22. „Technologia 5G i drony zmienią oblicze polskiej kolei”, Kurier Kolejowy (2026), artykuł dostępny na: https://www.kurier-kolejowy.pl/wiadomosci/42312/technologia-5g-i-drony-zmienia-oblicze-polskiej-kolei.html (dostęp 21.03.2026)
23. „Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów”, Problemy Kolejnictwa, Instytut Kolejnictwa (2020), artykuł dostępny na: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-f64cddd0-aa67-468a-9fe1-7ba6d230f34a (dostęp 21.03.2026)

DOSKONALENIE PROCESÓW OBSŁUGI NAZIEMNEJ W KONTEKŚCIE BEZPIECZEŃSTWA

Weronika JURECKA[1]

[1] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Cyfryzacji Przemysłu, Katowice; wj303464@student.polsl.pl, student

Streszczenie: Obsługa naziemna statków powietrznych stanowi złożony proces operacyjny, którego prawidłowa realizacja ma istotne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa w transporcie lotniczym. Proces ten obejmuje szereg współzależnych działań realizowanych w warunkach presji czasu oraz dużej zmienności środowiska pracy, co zwiększa podatność na występowanie zakłóceń i błędów operacyjnych. Celem artykułu jest identyfikacja oraz ocena ryzyka w procesie obsługi naziemnej z wykorzystaniem metody FMEA, a także wskazanie możliwości jego ograniczenia w oparciu o koncepcję Lean Manufacturing. Oryginalność pracy polega na połączeniu analizy ryzyka metodą FMEA z identyfikacją nieefektywności procesowych zgodnie z koncepcją Lean Manufacturing w procesie obsługi naziemnej statków powietrznych. W ramach badania przeanalizowano poszczególne etapy procesu obsługi naziemnej, identyfikując potencjalne zagrożenia, ich przyczyny oraz skutki. Następnie dokonano oceny ryzyka przy wykorzystaniu parametrów istotności skutków, prawdopodobieństwa wystąpienia oraz możliwości wykrycia, co umożliwiło wyznaczenie wskaźnika RPN. Uzyskane wyniki wskazują, że największe znaczenie dla poziomu ryzyka mają czynniki organizacyjne oraz informacyjne, w szczególności związane z przepływem informacji oraz koordynacją działań. Jednocześnie zidentyfikowane nieefektywności procesowe odpowiadają kategoriom marnotrawstwa definiowanym w koncepcji Lean Manufacturing. Wyniki analizy wskazują, że integracja podejścia procesowego, zarządzania ryzykiem oraz koncepcji Lean może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa oraz efektywności operacji naziemnych.

Słowa kluczowe: obsługa naziemna, bezpieczeństwo operacyjne, zarządzanie ryzykiem, lean management, analiza FMEA

GROUND HANDLING PROCESS IMPROVEMENT IN THE CONTEXT OF SAFETY

Abstract: Aircraft ground handling constitutes a complex operational process, the proper execution of which is essential for ensuring safety in air transport. The process involves a series

of interrelated activities performed under time pressure and in a highly dynamic working environment, which increases susceptibility to disruptions and operational errors. The aim of the article is to identify and assess risk in the ground handling process using the FMEA method, as well as to indicate possibilities for its reduction based on the Lean Manufacturing concept. The originality of this study lies in the integration of FMEA-based risk analysis with the identification of process inefficiencies according to the Lean Manufacturing concept in aircraft ground handling operations. The study analyzed individual stages of the ground handling process, identifying potential hazards, their causes, and effects. Subsequently, risk assessment was carried out using parameters of severity, occurrence, and detection, which enabled the determination of the Risk Priority Number (RPN). The results indicate that organizational and informational factors have the greatest impact on the level of risk, particularly those related to information flow and coordination of activities. At the same time, the identified process inefficiencies correspond to categories of waste defined in the Lean Manufacturing concept. The findings suggest that integrating a process-oriented approach, risk management, and Lean principles may contribute to improving both safety and efficiency of ground handling operations.

Keywords: ground handling, operational safety, risk management, lean management, FMEA analysis

1. Wprowadzenie

Transport lotniczy stanowi jeden z najbardziej złożonych systemów operacyjnych, w którym bezpieczeństwo jest nadrzędnym kryterium oceny funkcjonowania całej organizacji. W literaturze zwraca się uwagę na rozróżnienie pojęć safety i security, gdzie pierwsze odnosi się do stanu bezpieczeństwa osiągniętego w systemie, natomiast drugie do działań ukierunkowanych na jego zapewnienie i utrzymanie. W praktyce funkcjonowania transportu lotniczego oba podejścia są ze sobą ściśle powiązane i stanowią podstawę organizacji systemu bezpieczeństwa (Bielski i Krawczyk, 2010). W ujęciu systemowym bezpieczeństwo oznacza stan, w którym wszystkie elementy obejmujące zarówno człowieka, technikę jak i środowisko, współdziałają w sposób niegenerujący zagrożeń, a potencjalne nieprawidłowości są identyfikowane i ograniczane na możliwie wczesnym etapie (Kobaszyńska-Twardowska i Wantula, 2023). Takie podejście zakłada odejście od reaktywnego modelu zarządzania bezpieczeństwem, opartego na analizie zdarzeń, na rzecz podejścia proaktywnego, skoncentrowanego na przewidywaniu i zapobieganiu zagrożeniom.

Rozwój koncepcji zarządzania bezpieczeństwem w lotnictwie doprowadził do wdrożenia zintegrowanych systemów, takich jak Safety Management System (SMS), które obejmują wszystkie obszary działalności operacyjnej i organizacyjnej (Firlej i Augustyn, 2022). Systemy te opierają się na ciągłym monitorowaniu procesów, identyfikacji zagrożeń oraz ocenie ryzyka jako podstawie podejmowania decyzji. W tym kontekście zarządzanie ryzykiem nie stanowi odrębnego działania, lecz integralny element zarządzania operacyjnego, warunkujący skuteczność realizacji celów organizacji (Szczepankiewicz i Rożek, 2018).

Mimo licznych opracowań dotyczących bezpieczeństwa transportu lotniczego oraz zarządzania ryzykiem, w literaturze nadal występuje ograniczona liczba badań odnoszących się do procesów obsługi naziemnej statków powietrznych w ujęciu procesowym i operacyjnym. Dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na bezpieczeństwie lotów, czynniku ludzkim oraz technicznych aspektach funkcjonowania portów lotniczych, natomiast rzadziej analizowano zależność pomiędzy nieefektywnościami procesowymi a poziomem ryzyka operacyjnego w operacjach handlingowych. Ograniczona pozostaje również liczba opracowań integrujących metodę FMEA z założeniami Lean Manufacturing w analizie procesów obsługi naziemnej. Zidentyfikowana luka badawcza stanowiła podstawę do podjęcia badań przedstawionych w niniejszym artykule.

2. Obsługa naziemna

Obsługa naziemna statków powietrznych jest jednym z obszarów funkcjonowania portu lotniczego, obejmującym wszystkie działania realizowane pomiędzy przylotem a odlotem. Do podstawowych czynności zalicza się m.in. obsługę pasażerów, transport i sortowanie bagażu, operacje płytowe, tankowanie, załadunek oraz przygotowanie samolotu do kolejnego lotu (Türeli i in., 2019; Kwasiborska, 2010). Proces ten ma charakter wieloetapowy i wymaga ścisłej koordynacji działań wielu zespołów oraz synchronizacji zasobów technicznych i ludzkich. Przykładem złożoności operacyjnej jest system obsługi bagażu (BHS), który stanowi jeden z elementów infrastruktury lotniskowej i obejmuje pełny cykl przetwarzania bagażu - od rejestracji, przez kontrolę i sortowanie, aż po wydanie pasażerowi. Funkcjonowanie tego systemu zależy zarówno od rozwiązań technicznych, jak i decyzji operacyjnych podejmowanych przez personel, co dodatkowo zwiększa podatność na zakłócenia (Romanenko i in., 2020).

Z perspektywy organizacyjnej obsługa naziemna stanowi uporządkowany ciąg powiązanych czynności realizowanych w ramach łańcucha transportowego, którego celem jest zapewnienie ciągłości operacji lotniczych (Kozłowski i in., 2018). Poszczególne etapy procesu są ze sobą silnie powiązane, co oznacza, że zakłócenie jednego z nich może prowadzić do kumulacji problemów w dalszych fazach realizacji operacji. W praktyce oznacza to, że nawet niewielkie nieprawidłowości mogą skutkować opóźnieniami, zwiększonym obciążeniem personelu oraz wzrostem poziomu ryzyka. Złożoność operacji naziemnych wynika nie tylko z liczby realizowanych działań, lecz również z warunków, w jakich są one wykonywane. Procesy te odbywają się w środowisku charakteryzującym się dużą dynamiką, presją czasu oraz koniecznością jednoczesnego wykonywania wielu czynności (Rekiek, 2024). W takich warunkach szczególnego znaczenia nabiera sprawna organizacja pracy, dostępność zasobów oraz efektywna komunikacja między uczestnikami procesu.

Istotnym elementem wpływającym na bezpieczeństwo operacji naziemnych jest czynnik ludzki. Pomimo wysokiego poziomu zaawansowania technologicznego systemów lotniczych, człowiek pozostaje elementem najbardziej podatnym na błędy (Grenda i Turzyńska, 2016). Błędy te nie wynikają wyłącznie z braku wiedzy lub umiejętności, lecz często są konsekwencją warunków pracy, takich jak zmęczenie, monotonia, presja czasu czy nadmiar informacji. Dodatkowo istotną rolę odgrywają czynniki organizacyjne, w tym jakość komunikacji, współpraca zespołowa oraz sposób zarządzania procesem (Firlej, 2022).

W modelu człowiek-maszyna-środowisko człowiek pełni rolę centralną, odpowiadając zarówno za realizację działań operacyjnych, jak i za podejmowanie decyzji w sytuacjach niestandardowych (Uchronoński, 2020). Oznacza to, że błędy ludzkie należy analizować nie jako indywidualne uchybienia, lecz jako rezultat interakcji między człowiekiem a otoczeniem organizacyjnym i technicznym. Takie podejście wpisuje się w systemowe rozumienie bezpieczeństwa, w którym źródłem zagrożeń są nie tylko działania jednostki, lecz również niedoskonałości całego systemu.

W kontekście doskonalenia procesów operacyjnych istotne znaczenie ma podejście lean, koncentrujące się na identyfikacji i eliminacji nieefektywności procesowych. W środowisku obsługi naziemnej nieefektywności te mogą przyjmować różne formy, takie jak oczekiwanie na zasoby, zbędne przemieszczenia, błędy informacyjne czy brak synchronizacji działań (Chruściel, 2017). Każda z tych nieefektywności wpływa nie tylko na wydajność procesu, lecz również na poziom bezpieczeństwa operacyjnego, zwiększając ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych.

3. Ryzyko operacyjne

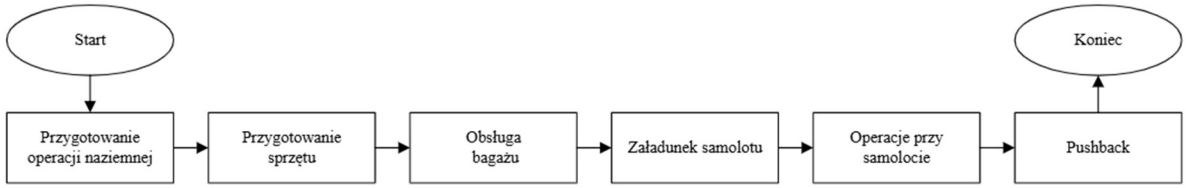
Ryzyko operacyjne należy rozumieć jako możliwość wystąpienia zakłóceń w realizacji procesu wynikających z niewystarczającej skuteczności działania systemu organizacyjnego (Zawiła-Niedźwiecki, 2013). W tym ujęciu ryzyko nie jest wyłącznie efektem pojedynczego zdarzenia, lecz wynikiem kumulacji nieprawidłowości w procesie, obejmujących zarówno aspekty techniczne, jak i organizacyjne oraz ludzkie. Zarządzanie ryzykiem operacyjnym polega na identyfikacji tych nieprawidłowości, ich analizie oraz wdrażaniu działań mających na celu ograniczenie ich wpływu na funkcjonowanie systemu. Proces zarządzania ryzykiem obejmuje zazwyczaj kilka etapów, w tym identyfikację zagrożeń, analizę ich wpływu oraz planowanie działań zaradczych (Szczepankiewicz i Rożek, 2018). W przypadku procesów operacyjnych szczególne znaczenie ma etap identyfikacji zagrożeń, który pozwala na wskazanie miejsc w procesie najbardziej podatnych na wystąpienie zakłóceń. W literaturze podkreśla się, że skuteczność zarządzania ryzykiem zależy w dużym stopniu od jakości danych oraz stopnia szczegółowości analizy procesów.

Jedną z metod umożliwiających szczegółową analizę ryzyka na poziomie procesu jest metoda FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Metoda ta stanowi systematyczne narzędzie identyfikacji potencjalnych błędów w procesie, ich przyczyn oraz skutków, umożliwiając podejmowanie działań zapobiegawczych jeszcze przed wystąpieniem niepożądanych zdarzeń (Mikulak i in., 2017). FMEA znajduje zastosowanie w wielu branżach, w tym w sektorze lotniczym, gdzie wykorzystywana jest do analizy niezawodności systemów oraz oceny ryzyka operacyjnego (Liu i in., 2023). Podstawą metody FMEA jest ocena trzech parametrów: istotności skutków błędu (Severity), częstości jego występowania (Occurrence) oraz możliwości jego wykrycia przed wystąpieniem skutków (Detection). Na podstawie tych parametrów wyznaczany jest wskaźnik priorytetu ryzyka (RPN - Risk Priority Number), który umożliwia uszeregowanie zidentyfikowanych zagrożeń oraz wskazanie obszarów wymagających interwencji (Mikulak i in., 2017; Liu i in., 2023). Zastosowanie tej metody pozwala nie tylko na ocenę poziomu ryzyka, lecz również na identyfikację jego źródeł oraz określenie kierunków doskonalenia procesu.

Zastosowanie FMEA w analizie procesów obsługi naziemnej umożliwia integrację podejścia procesowego z oceną ryzyka, co pozwala na kompleksową analizę bezpieczeństwa operacyjnego (Mikulak i in., 2017). Umożliwia to nie tylko wskazanie zagrożeń, lecz również określenie ich przyczyn oraz wpływu na funkcjonowanie całego systemu, co stanowi podstawę do formułowania działań doskonalących.

4. Charakterystyka procesu obsługi naziemnej

Proces obsługi naziemnej statków powietrznych obejmuje zestaw powiązanych działań realizowanych w określonej sekwencji czasowej, których celem jest przygotowanie statku powietrznego do kolejnej operacji lotniczej. Ze względu na konieczność zachowania ciągłości operacji oraz ograniczenia czasowe, proces ten wymaga ścisłej koordynacji działań oraz synchronizacji zasobów ludzkich i technicznych. Na podstawie przeprowadzonych wywiadów z pracownikami obsługi naziemnej zidentyfikowano główne etapy procesu, obejmujące: przygotowanie operacji, przygotowanie sprzętu, obsługę bagażu, załadunek oraz operacje wykonywane bezpośrednio przy statku powietrznym. Strukturę procesu przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat procesu obsługi naziemnej. Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie zidentyfikowanych etapów procesu przeprowadzono analizę nieefektywności z wykorzystaniem koncepcji Lean Manufacturing, której podstawowym założeniem jest eliminacja działań nieprzynoszących wartości dodanej w procesie (Womack
i Jones, 2003). Analiza skoncentrowana została na identyfikacji marnotrawstwa (muda), rozumianego jako wszelkie działania generujące straty czasu, zasobów lub jakości procesu.
W literaturze przedmiotu wyróżnia się klasyczne kategorie marnotrawstwa, obejmujące między innymi oczekiwanie, zbędny ruch, defekty czy nadmierne przetwarzanie (Chruściel, 2017).
Tabela 1. Nieefektywności Lean. Źródło: opracowanie własne.

Etap procesu	Problem	Typ nieefektywności	Opis nieefektywności	Skutek operacyjny
Przygotowanie operacji	Błędna informacja o stanowisku	Błędy	Nieprawidłowe przekazanie informacji o lokalizacji samolotu	Opóźnienie rozpoczęcia operacji
Przygotowanie sprzętu	Brak dostępnego sprzętu	Oczekiwanie	Konieczność poszukiwania sprzętu lub oczekiwania na jego dostępność	Przestoje operacyjne
Obsługa bagażu	Identyfikacja bagażu nieobecnego pasażera	Zbędny ruch, nadprocesowość	Konieczność ręcznego wyszukiwania i identyfikacji bagażu	Zatrzymanie procesu, wydłużenie czasu operacji
Załadunek	Brak synchronizacji zespołów	Oczekiwanie	Brak koordynacji działań zespołów obsługujących różne części samolotu	Wydłużenie czasu operacji
Operacje przy samolocie	Praca w strefie zagrożenia	Błędy	Wykonywanie czynności w warunkach podwyższonego ryzyka przy jednoczesnej presji czasu	Zagrożenie bezpieczeństwa pracowników

Przedstawione w tabeli 1 nieefektywności procesowe wskazują na występowanie problemów organizacyjnych, komunikacyjnych oraz operacyjnych wpływających na przebieg obsługi naziemnej statku powietrznego. Identyfikacja tych zjawisk umożliwia wskazanie obszarów wymagających usprawnienia zgodnie z założeniami Lean Manufacturing, a jednocześnie pozwala na określenie potencjalnych źródeł ryzyka operacyjnego w analizowanym procesie.

5. Metodyka badań

W celu oceny bezpieczeństwa operacji obsługi naziemnej oraz identyfikacji obszarów wymagających doskonalenia zastosowano podejście łączące analizę procesową, koncepcję

Lean Manufacturing oraz metodę FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Punktem wyjścia było odwzorowanie procesu obsługi naziemnej statku powietrznego w ujęciu etapowym, obejmującym działania realizowane od momentu przygotowania operacji do fazy pushback. Na tej podstawie przeprowadzono identyfikację potencjalnych nieefektywności procesowych
z wykorzystaniem klasyfikacji marnotrawstwa (muda), zgodnie z założeniami Lean Manufacturing. Zidentyfikowane problemy procesowe stanowiły podstawę do dalszej analizy ryzyka operacyjnego. W tym celu zastosowano metodę FMEA, umożliwiającą identyfikację potencjalnych błędów procesu, określenie ich przyczyn oraz ocenę skutków dla funkcjonowania systemu (Mikulak i in., 2017; Liu i in., 2023). Metoda FMEA opiera się na analizie trzech parametrów:

Severity (S) - znaczenie skutków błędu dla bezpieczeństwa operacji,

Occurrence (O) - prawdopodobieństwo wystąpienia błędu,

Detection (D) - możliwość wykrycia błędu przed wystąpieniem jego skutków.

Na podstawie wartości parametrów S, O i D wyznaczono wskaźnik priorytetu ryzyka RPN, zgodnie z zależnością: RPN=S×O×D. W badaniu zastosowano metodę FMEA dostosowaną do specyfiki branży lotniczej zgodnie z podejściem przedstawionym przez Fellnera i Mańkę (2015). Autorzy wskazują, że klasyczne skale FMEA wymagają adaptacji do realiów transportu lotniczego, szczególnie w zakresie interpretacji skutków zagrożeń, prawdopodobieństwa ich wystąpienia oraz możliwości detekcji błędów operacyjnych.
W badaniu wykorzystano dziesięciostopniowe skale oceny parametrów Severity, Occurrence oraz Detection dostosowane do specyfiki branży lotniczej na podstawie podejścia zaproponowanego przez Fellnera i Mańkę (2015).

Oceny parametrów S, O i D dokonano na podstawie wywiadów eksperckich przeprowadzonych z pracownikami obsługi naziemnej. W badaniu uczestniczyło pięciu ekspertów posiadających doświadczenie zawodowe w realizacji operacji handlingowych, obejmujących obsługę płytową, koordynację operacji naziemnych oraz nadzór nad bezpieczeństwem operacyjnym. Doboru ekspertów dokonano celowo, kierując się doświadczeniem praktycznym oraz znajomością analizowanych procesów. Wywiady miały charakter częściowo ustrukturyzowany i były ukierunkowane na identyfikację problemów operacyjnych, ich przyczyn oraz skutków. Dla każdego zidentyfikowanego problemu dokonano indywidualnej oceny kombinacji przyczyn oraz skutków, przypisując odrębne wartości parametrów Severity (S), Occurrence (O) oraz Detection (D). Takie podejście umożliwiło bardziej szczegółową ocenę ryzyka operacyjnego oraz uwzględnienie zróżnicowanego wpływu poszczególnych przyczyn i skutków na przebieg procesu obsługi naziemnej. W celu interpretacji wyników przyjęto rekomendacje Fellnera i Mańki (2015), zgodnie z którymi wartości RPN przekraczające poziom 120 wskazują na konieczność wdrożenia działań zapobiegawczych, natomiast wartości przekraczające poziom 155 wymagają podjęcia działań korygujących.

Tabela 2. Prawdopodobieństwo wystąpienia błędu - Occurance (O). Źródło: Fellner i Mańka (2015).

Prawdopodobieństwo	Opis prawdopodobieństwa	Wartość
Częste	Prawdopodobnie wystąpi (występowało) często	9-10
Sporadyczne	Prawdopodobnie wystąpi (występowało) sporadycznie	7-8
Niewielkie	Prawdopodobnie nie wystąpi, ale jest to możliwe (występowało rzadko)	5-6
Nieprawdopodobne	Bardzo mało prawdopodobne, że wystąpi (nie znany jest przypadek by wystąpiło)	3-4
Skrajnie nieprawdopodobne	Prawie niewyobrażalne, że kiedykolwiek może wystąpić	1-2

Tabela 3. Znaczenie skutków błędu dla bezpieczeństwa operacji - Saverity (S). Źródło: Fellner i Mańka (2015).

Dotkliwość zdarzenia (skutki - znaczenie)	Opis znaczenia zdarzenia	Wartość
Katastrofalna	- Wiele ofiar; - Zniszczenie sprzętu;	9-10
Niebezpieczna	- Duże obniżenie marginesu bezpieczeństwa, niemożność polegania na operatorach, by wykonywali obowiązki dokładnie i kompletnie ze względu na fizyczne obrażenia lub natłok pracy; - Poważne obrażenia ciała; - Duże straty w sprzęcie;	7-8
Poważna	- Znaczne obciążenie marginesu bezpieczeństwa, natłok pracy lub warunki obniżające wydajność operatorów, skutkujące ograniczeniem ich zdolności do radzenia sobie w niekorzystnych sytuacjach/warunkach; - Poważny incydent; - Obrażenia ciała;	5-6
Niewielka	- Uciążliwość; - Ograniczenia operacyjne; - Użycie procedur awaryjnych; - Incydenty;	3-4
Nieistotna	- Małe konsekwencje	1-2

Tabela 4. Możliwość wykrycia błędu przed wystąpieniem jego skutków - Detection (D). Źródło: Fellner i Mańka (2015).

Detekcja/ Zapobieganie	Opis prawdopodobieństwa wykrycia zdarzenia
1-2	Wykrycie wady jest pewne
3-4	Szanse wykrycia wady są duże, stosowany jest test z dużym prawdopodobieństwem wykrycia
5-6	Kontrola może wykryć wady, średnia wykrywalność. Kontrola optyczna wykonywana przez operatora
7-8	Wykrycie wady jest utrudnione. Kontrola wizualna przez operatora, defekt jest trudny do wykrycia.
9-10	Wykrycie wady jest niezmiernie trudne lub niemożliwe, lub nie przeprowadza się kontroli mogącej wykryć daną wadę

W kolejnym etapie dla każdego zidentyfikowanego problemu określono potencjalne tryby błędów, ich przyczyny oraz skutki dla procesu, a następnie wyznaczono wartości parametrów S, O i D oraz wskaźnik RPN. Uzyskane wyniki umożliwiły identyfikację krytycznych obszarów procesu obsługi naziemnej oraz stanowiły podstawę do sformułowania działań doskonalących ukierunkowanych na poprawę bezpieczeństwa i efektywności operacyjnej. Skale oceny parametrów Severity (S), Occurrence (O) oraz Detection (D), wykorzystane w analizie ryzyka, przedstawiono w tabelach 2-4.

6. Wyniki

Na podstawie przeprowadzonej analizy metodą FMEA określono wartości wskaźnika priorytetu ryzyka (RPN) dla zidentyfikowanych zagrożeń występujących w procesie obsługi naziemnej statku powietrznego. Wyniki zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki analizy FMEA dla procesu obsługi naziemnej. Źródło: opracowanie własne.

Etap procesu	Problem	Przyczyny	Skutki	S	O	D	RPN
Przygotowanie operacji	Nieaktualne informacje o planie operacji	Opóźnienia w przepływie informacji	Opóźnienia operacyjne	6	7	5	210
		Błędy komunikacyjne	Błędna organizacja pracy	7	6	6	252
		Brak synchronizacji systemów	Konieczność dodatkowych czynności	5	5	6	150
		Niewłaściwy przepływ informacji	Opóźnienia operacyjne	7	6	5	210

Etap procesu	Problem	Przyczyny	Skutki	S	O	D	RPN
	Nieprawidłowa koordynacja pracy zespołów	Brak standaryzacji komunikacji	Błędna realizacja czynności	8	5	6	240
		Presja czasu	Wzrost błędów organizacyjnych	7	7	6	294
	Niekompletna dokumentacja operacyjna	Błędy w przekazywaniu informacji	Opóźnienia operacji	6	6	5	180
		Presja czasu	Błędna realizacja czynności handlingowych	7	7	6	294
		Brak aktualizacji dokumentacji	Zakłócenie koordynacji pracy	6	5	6	180
Przygotowanie sprzętu	Brak dostępności wymaganego sprzętu	Niewłaściwe planowanie zasobów	Przestój operacyjny	6	7	4	168
		Równoczesna obsługa wielu operacji	Wydłużenie czasu obsługi	5	6	5	150
		Opóźnienia w zwrocie sprzętu	Zakłócenie harmonogramu operacji	6	5	5	150
	Niewłaściwy stan techniczny sprzętu	Intensywna eksploatacja	Przerwanie operacji	7	5	6	210
		Opóźnienia w serwisowaniu	Zwiększone ryzyko awarii	8	5	6	240
	Opóźnione podstawienie sprzętu	Niewłaściwa organizacja pracy	Opóźnienie obsługi	6	7	5	210
		Opóźnienia wcześniejszych operacji	Zakłócenie ciągłości procesu	7	6	5	210
		Ograniczona dostępność personelu	Wzrost presji czasu	5	6	6	180
	Niewłaściwe rozmieszczenie sprzętu handlingowego	Błędna koordynacja operacji	Wydłużenie czasu przygotowania operacji	5	6	5	150
		Ograniczona przestrzeń operacyjna	Dodatkowe ruchy operatorów	4	5	5	100
Obsługa bagażu	Nieprawidłowa identyfikacja bagażu	Nieczytelne oznaczenia	Załadunek niewłaściwego bagażu	8	5	6	240
		Błędy operatorów	Opóźnienia	6	6	5	180
		Presja czasu	Reklamacje pasażerów	5	7	6	210
	Nieprawidłowe rozmieszczenie bagażu	Błędna segregacja	Konieczność ponownego przeładunku	6	6	5	180

Etap procesu	Problem	Przyczyny	Skutki	S	O	D	RPN
		Niewłaściwa organizacja pracy	Wydłużenie operacji	5	6	5	150
		Brak kontroli procesu	Ryzyko uszkodzenia bagażu	7	5	6	210
	Uszkodzenie bagażu podczas obsługi	Niewłaściwe procedury transportu	Reklamacje pasażerów	5	5	6	150
		Pośpiech	Dodatkowe koszty operacyjne	6	6	5	180
		Nieprawidłowa obsługa sprzętu	Zakłócenie procesu obsługi	7	5	6	210
	Brak synchronizacji pomiędzy obsługą bagażu a boardingiem	Błędy komunikacyjne	Opóźnienie odlotu	8	6	7	336
		Niewłaściwa koordynacja działań	Konieczność dodatkowych kontroli	7	5	6	210
Załadunek samolotu	Nieskoordynowane działania zespołów	Brak synchronizacji pracy	Wydłużenie czasu operacji	7	6	6	252
		Błędy komunikacyjne	Zakłócenie przebiegu załadunku	7	5	6	210
		Presja czasu	Wzrost ryzyka błędów organizacyjnych	8	7	6	336
	Opóźnienia podczas załadunku	Niewłaściwa organizacja pracy	Opóźnienie odlotu	7	7	5	245
		Opóźnienia wcześniejszych operacji	Zakłócenie harmonogramu lotów	7	6	5	210
	Nieprawidłowe zabezpieczenie ładunku	Błędy proceduralne	Przemieszczenie ładunku	9	4	7	252
		Niewystarczająca kontrola	Konieczność dodatkowej kontroli	6	5	6	180
Operacje przy samolocie	Wykonywanie czynności w strefie zagrożenia	Presja czasu	Zagrożenie bezpieczeństwa personelu	9	6	6	324
		Nieuwaga	Zakłócenie przebiegu operacji	7	5	6	210
		Ograniczona widoczność	Zagrożenie bezpieczeństwa personelu	8	4	7	224
	Kolizja sprzętu z samolotem	Ograniczona przestrzeń operacyjna	Uszkodzenie samolotu	9	4	7	252
		Błędy operatorów	Opóźnienie operacji	7	5	6	210

Etap procesu	Problem	Przyczyny	Skutki	S	O	D	RPN
		Niewłaściwa koordynacja działań	Uszkodzenie samolotu	9	5	6	270
	Błędna komunikacja pomiędzy personelem operacyjnym	Hałas	Błędna realizacja operacji	7	7	6	294
		Brak standaryzacji komunikacji	Opóźnienia operacyjne	6	6	6	216
		Presja czasu	Wzrost ryzyka błędów organizacyjnych	8	7	6	336
	Nieprawidłowe wykonywanie procedur operacyjnych	Zmęczenie pracowników	Błędna realizacja czynności	8	5	6	240
		Pośpiech	Błędna realizacja czynności	6	6	5	180
		Niewystarczające szkolenia	Konieczność dodatkowej kontroli	8	4	7	224
	Niewłaściwe zabezpieczenie strefy operacyjnej	Brak kontroli	Ryzyko wtargnięcia osób nieuprawnionych	8	5	5	200
		Niewłaściwa organizacja pracy	Zakłócenie procesu obsługi	7	5	6	210
Pushback	Nieprawidłowe przekazanie komendy do załogi	Zakłócenia komunikacji	Błędna realizacja pushbacku	9	5	7	315
		Hałas	Zagrożenie bezpieczeństwa operacji	8	5	6	240
		Błędy personelu	Błędna realizacja pushbacku	9	4	6	216
	Nieprawidłowe podłączenie sprzętu	Pośpiech	Uszkodzenie sprzętu lub samolotu	8	5	6	240
		Błędy operatorów	Przerwanie operacji	7	5	5	175
		Niewystarczająca kontrola procedur	Opóźnienie odlotu	7	4	6	168
	Ograniczona widoczność	Warunki atmosferyczne	Zwiększone ryzyko kolizji, zagrożenie bezpieczeństwa	8	4	7	224
		Niewłaściwe oświetlenie	Utrudnienie realizacji operacji	6	5	6	180
	Błędne ustawienie trasy pushbacku	Niewłaściwa koordynacja działań	Ryzyko kolizji	9	4	7	252
		Błędy operatora	Opóźnienie operacji	6	5	6	180
		Nieaktualne informacje operacyjne	Zakłócenie ruchu operacyjnego	7	5	6	210

Na podstawie przeprowadzonej analizy FMEA uzyskano wartości wskaźnika RPN w przedziale od 150 do 336, co wskazuje na występowanie zagrożeń operacyjnych o zróżnicowanym poziomie ryzyka w analizowanym procesie obsługi naziemnej statku powietrznego. Najwyższe wartości wskaźnika RPN odnotowano dla kombinacji problemów, przyczyn oraz skutków związanych z komunikacją, synchronizacją działań oraz organizacją pracy. Najwyższą wartość RPN (336) uzyskano dla błędów komunikacyjnych powodujących brak synchronizacji pomiędzy obsługą bagażu a boardingiem, skutkujących opóźnieniem odlotu oraz koniecznością przeprowadzenia dodatkowych kontroli. Wysokie wartości wskaźnika RPN odnotowano również dla presji czasu wpływającej na wzrost ryzyka błędów organizacyjnych podczas załadunku samolotu i komunikacji pomiędzy personelem operacyjnym (RPN = 336), a także dla wykonywania czynności w strefie zagrożenia (RPN = 324) oraz nieprawidłowego przekazania komendy do załogi podczas operacji pushback (RPN = 315).

Uzyskane wyniki wskazują, że największy wpływ na poziom ryzyka mają czynniki organizacyjne, komunikacyjne oraz czynnik ludzki, związane przede wszystkim z presją czasu, niewłaściwą koordynacją działań oraz ograniczoną możliwością wykrycia błędów przed ich wystąpieniem. Podwyższone wartości RPN uzyskano również dla problemów związanych z realizacją operacji załadunkowych oraz obsługą sprzętu handlingowego. Nieprawidłowa identyfikacja bagażu, nieprawidłowe zabezpieczenie ładunku, kolizja sprzętu z samolotem oraz błędne ustawienie trasy pushbacku osiągnęły wartości RPN na poziomie 240-288. W analizowanych przypadkach istotne znaczenie miały zarówno potencjalne skutki dla bezpieczeństwa operacji, jak i ograniczona możliwość wcześniejszego wykrycia nieprawidłowości. Najniższe wartości wskaźnika RPN odnotowano dla problemów związanych z organizacją przestrzeni operacyjnej, rozmieszczeniem sprzętu handlingowego oraz uszkodzeniem bagażu podczas obsługi (RPN = 150-180). Wskazuje to na niższy poziom istotności operacyjnej tych zagrożeń w porównaniu z problemami dotyczącymi komunikacji, synchronizacji działań oraz bezpieczeństwa operacyjnego.

7. Dyskusja

Wyniki analizy potwierdzają, że źródła ryzyka w procesie obsługi naziemnej mają charakter organizacyjny i komunikacyjny oraz wynikają z interakcji pomiędzy człowiekiem, procedurami i środowiskiem operacyjnym. Jest to zgodne z podejściem systemowym do bezpieczeństwa w lotnictwie, gdzie zagrożenia operacyjne wynikają nie tylko z awarii technicznych, lecz również z niedoskonałości organizacji procesu oraz przepływu informacji (Firlej i Augustyn, 2022). Istotne znaczenie w analizowanych operacjach odgrywa również czynnik ludzki, który w warunkach presji czasu oraz wysokiej dynamiki pracy zwiększa

podatność procesu na występowanie błędów operacyjnych (Grenda i Turzyńska, 2016; Firlej, 2022). Problemy związane z komunikacją, synchronizacją działań oraz organizacją pracy stanowią istotny element ryzyka operacyjnego w procesach handlingowych. Wnioski te są zgodne z badaniami dotyczącymi obsługi naziemnej statków powietrznych, w których podkreśla się znaczenie prawidłowej koordynacji działań oraz identyfikacji zagrożeń operacyjnych dla zapewnienia bezpieczeństwa i ciągłości procesu obsługi (Kobaszyńska-Twardowska i Wantula, 2023; Kozłowski i in., 2018). Podobne zależności wskazuje Uchronoński (2020), zwracając uwagę na wpływ organizacji pracy oraz procedur operacyjnych na poziom bezpieczeństwa operacji handlingowych.

Uzyskane wyniki pozostają spójne z założeniami Lean Manufacturing, gdzie zakłócenia przepływu procesu, oczekiwanie, błędy organizacyjne oraz nieefektywny przepływ informacji stanowią źródło marnotrawstwa procesowego (Womack i Jones, 2003; Chruściel, 2017). Zastosowanie metody FMEA umożliwiło usystematyzowaną identyfikację zagrożeń oraz ocenę ich znaczenia w poszczególnych etapach procesu obsługi naziemnej. Potwierdza to przydatność metody FMEA w analizie ryzyka operacyjnego w branży lotniczej, co wskazywali również Fellner i Mańka (2015) oraz Mikulak i in. (2017). Przeprowadzona analiza pozwoliła na identyfikację obszarów ryzyka, które nie są bezpośrednio związane z aspektami technicznymi, lecz wynikają głównie z organizacji pracy i przepływu informacji. Wyniki wskazują, że czynniki organizacyjne mogą wywierać równie istotny wpływ na poziom bezpieczeństwa operacyjnego jak czynniki techniczne, dlatego działania ukierunkowane na poprawę komunikacji, koordynacji oraz organizacji pracy mogą stanowić ważny element doskonalenia procesów handlingowych.

8. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza metodą FMEA umożliwiła identyfikację zagrożeń występujących w procesie obsługi naziemnej statku powietrznego oraz ocenę poziomu ryzyka operacyjnego na poszczególnych etapach procesu. Uzyskane wartości wskaźnika RPN mieściły się w przedziale od 150 do 336, wskazując na występowanie zagrożeń wymagających działań zapobiegawczych oraz doskonalenia procesu. Najwyższe wartości RPN odnotowano dla problemów związanych z przepływem informacji, synchronizacją działań oraz komunikacją operacyjną, zwłaszcza w obszarze obsługi bagażu, operacji przy samolocie oraz procedury pushback. Wskazuje to na istotną rolę czynników organizacyjnych oraz czynnika ludzkiego w kształtowaniu poziomu ryzyka operacyjnego. Pomimo wysokiej istotności skutków części zagrożeń, poziom ryzyka był zróżnicowany w zależności od prawdopodobieństwa występowania oraz możliwości wykrycia błędów przed ich skutkami. Największy wpływ na poziom ryzyka w analizowanym procesie miały problemy związane z przepływem informacji,

synchronizacją działań oraz organizacją pracy. Jednocześnie zidentyfikowane problemy odpowiadają kategoriom marnotrawstwa charakterystycznym dla koncepcji Lean Manufacturing, obejmującym oczekiwanie, błędy oraz zbędne ruchy.

Wyniki potwierdzają, że integracja podejścia procesowego, zarządzania ryzykiem oraz założeń Lean Manufacturing może stanowić skuteczne narzędzie wspierające poprawę bezpieczeństwa i efektywności operacji naziemnych. Przeprowadzona analiza wskazuje na możliwość wykorzystania metody FMEA jako narzędzia wspierającego identyfikację i ocenę ryzyka operacyjnego w środowisku portu lotniczego oraz jako podstawy do dalszego doskonalenia procesów handlingowych. Ograniczeniem badania jest wykorzystanie ocen eksperckich, które mimo oparcia na doświadczeniu praktycznym mają charakter subiektywny. Dodatkowo analiza została przeprowadzona dla modelowego procesu obsługi naziemnej, bez uwzględnienia specyfiki konkretnego portu lotniczego lub operatora handlingowego.

Bibliografia

1. Bielski, M., and Krawczyk, A. (2010). Bezpieczeństwo ruchu lotniczego. *Zarządzanie i Ekonomia*, nr 4, pp. 9-12.
2. Chruściel, P. (2017). Instrumenty lean manufacturing i praktyki ich stosowania. *Management and Quality - Zarządzanie i Jakość*, 4(3), pp. 3-9.
3. Fellner, A., and Mańka, A. (2015). *Adjust the method of the FMEA to the requirements of the aviation industry*. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 89, pp. 19-25. DOI: 10.20858/sjsutst.2015.89.2
4. Firlej, M. (2022). Czynnik ludzki w operacjach naziemnych w porcie lotniczym.
5. Firlej, M., and Augustyn, S. (2022). Ewolucja podejścia do bezpieczeństwa w lotnictwie.
6. Grenda, B., and Turzyńska, H. (2016). *Czynnik ludzki i jego wpływ na bezpieczeństwo lotów*. Warszawa: Akademia Sztuki Wojennej.
7. Kobaszyńska-Twardowska, A., and Wantula, M. (2023). Hazard identification at airport ground handling locations. *WUT Journal of Transportation Engineering*, 136, pp. 50-52.
8. Kozłowski, M., Kruk, A., and Stelmach, A. (2018). Identyfikacja struktury krytycznych punktów procesu obsługi naziemnej samolotu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 122, pp. 49-53.
9. Kwasiborska, A. (2010). Modelling of ground handling operations at airport. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 17(3), pp. 253-255.
10. Liu, Z., Zhao, Y., and Liu, P. (2023). An integrated FMEA framework considering expert reliability for classification and its application in aircraft power supply system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123(B), 106319.
11. Mikulak, R.J., McDermott, R., and Beauregard, M. (2017). *The Basics of FMEA* (2nd ed.). CRC Press.
12. Rekiek, B. (2024). Airport Baggage Handling Systems: Using the Baggage Factory Approach to Support AI Optimisation, Decisions, and Design Processes. CRC Press.
13. Romanenko, V.A., Skorokhod, M.A., and Guzha, E.D. (2020). Fuzzy control in the simulation model of airport baggage handling systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 919, 042017.
14. Szczepankiewicz, E.I., and Rożek, M. (2018). Zarządzanie ryzykiem w porcie lotniczym jako obszar oceny w audycie wewnętrznym. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, nr 521, pp. 206-209.

15. Türeli, N.Ş., Durmaz, V., Bahçecik, Y.S., and Akay, S.S. (2019). An Analysis of Importance of Innovative Behaviors of Ground Handling Human Resources in Ensuring Customer Satisfaction. *Procedia Computer Science*, 158, pp. 1077-1087.
16. Uchronoński, P. (2020). Analysis of the operation of the ground handling agent in the aspect of safety. *Journal of KONBiN*, 50(1), pp. 320-322.
17. Womack, J.P., and Jones, D.T. (2003). *Lean Thinking*. Free Press.
18. Zawiła-Niedźwiecki, J. (2013). Zarządzanie ryzykiem operacyjnym w zapewnianiu ciągłości działania organizacji. Kraków-Warszawa: edu-Libri.

ATRAKCYJNOŚĆ I AKCEPTACJA SYMULACJI BIZNESOWYCH JAKO WARTOŚCIOWEGO NARZĘDZIA SZKOLENIOWEGO PRZEZ POKOLENIE CYFROWE

Konrad Kobierski

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Wydział Prawa i Nauk Społecznych;

kkobierski01@gmail.com; ORCID: 0009-0007-5646-0996

Streszczenie: Celem artykułu jest ocena akceptacji i atrakcyjności symulacji biznesowych jako narzędzi szkoleniowych w ocenie pokolenia cyfrowego. Z badania wykorzystującego uznany Model Akceptacji Technologii (TAM) wynika, że badana grupa prezentuje bardzo wysoki ogólny poziom akceptacji tego typu narzędzi, postrzeganych jako użyteczna alternatywa dla metod tradycyjnych. Analiza wykazuje, że doświadczenie ze złożoną rozrywką cyfrową sprzyja postrzeganiu symulacji jako merytorycznych i godnych zaufania narzędzi, a dorastanie w otoczeniu technologii informatycznych i biegłość technologiczna badanych przekłada się na wysoką akceptację komputerowej formy szkolenia.

Slowa kluczowe: symulacje biznesowe, Model Akceptacji Technologii (TAM), biegłość gamingowa, pokolenie cyfrowe.

ATRACTIVENESS AND ACCEPTANCE OF BUSINESS SIMULATIONS AS A VALUABLE TRAINING TOOL BY THE DIGITAL GENERATION

Abstract: The aim of this article is to assess the acceptance and appeal of business simulations as training tools among the digital generation. A study using the widely recognized Technology Acceptance Model (TAM) shows that the surveyed group exhibits a very high overall level of acceptance of these types of tools, which are perceived as a useful alternative to traditional methods. The analysis shows that experience with complex digital entertainment fosters the perception of simulations as substantive and trustworthy tools, and that growing up in an environment of information technology and the respondents' technological proficiency translate into high acceptance of computer-based training.

Keywords: business simulations, Technology Acceptance Model (TAM), gaming literacy, digital natives.

Wprowadzenie

W obliczu rosnącej złożoności procesów gospodarczych, organizacje stają przed bezprecedensowym wyzwaniem nieustannego podnoszenia kwalifikacji swoich kadr. Szlak do osiągnięcia trwałej wydajności wiedzie poprzez efektywne zarządzanie wiedzą oraz implementację innowacyjnych systemów kształcenia. W tym szerokim kontekście symulacje komputerowe oraz tzw. gry poważne (*Serious Games*) wyrastają na obiecujące, interdyscyplinarne i najszybciej rozwijające się rozwiązanie edukacyjne skierowanych do nowoczesnego pracownika (Gatti et al., 2019; Sultanova, and Sadullayev, 2024). Narzędzia te, integrujące zaawansowaną technologię informatyczną z najnowszymi odkryciami psychologii poznawczej i behawioralnej, odpowiadają na specyficzne, wysoce unikalne potrzeby nowych pokoleń na rynku pracy - w szczególności Milenialsów (Generacji Y) oraz wkraczającej z ogromnym impetem demograficznym Generacji Z, określanych zbiorczo jako pokolenie cyfrowe. Tradycyjne metody szkoleniowe, opierające się na biernym transferze wiedzy, ulegają głębokiej erozji w zderzeniu z oczekiwaniami "cyfrowych tubylców", dla których interaktywność, natychmiastowa informacja zwrotna i immersyjne środowiska wizualne stanowią naturalny ekosystem funkcjonowania (Shirazian et al., 2025).

Natomiast w badaniu nad użytecznością symulacji szkoleniowych szczególną wartość poznawczą wnosi tzw. „biegłość gamingowa” (*gaming literacy*). Umożliwia ona precyzyjną dekonstrukcję reguł algorytmicznych i struktur środowisk interaktywnych. Jest to wielowymiarowa kompetencja łącząca sprawność cyfrową z krytycznym potencjałem analitycznym, co pozwala na interpretację symulacji jako zaawansowanych reprezentacji złożonych zjawisk rzeczywistych. Tak ukształtowane zdolności poznawcze pozwalają użytkownikom na wyjście poza sferę biernej partycypacji w kierunku głębokiej dekonstrukcji ukrytych reguł i ograniczeń środowiska cyfrowego, co może prowadzić do bardziej rygorystycznej oceny stosowanego narzędzia. To właśnie ta zdolność do krytycznego dekodowania struktur wirtualnych oraz weryfikacji logicznego rygoru symulacji czyni tę grupę wyjątkowo miarodajnym i interesującym źródłem wiedzy w obszarze oceny atrakcyjności nowoczesnych systemów symulacyjnych (Glas et al. 2023; Grāvelsiņa, and Daniela, 2025).

Stąd też problem badawczy zgłębiany w ramach tego badania, został wyrażony przez pytanie: czy symulacje komputerowe są atrakcyjnym i akceptowanym narzędziem rozwoju w przez osoby młode, z bogatym doświadczeniem z grami komputerowymi? Natomiast celem badawczym było zmierzenie poziomu atrakcyjności i akceptacji symulacji komputerowych jako nowoczesnej formy rozwoju zawodowego przez graczy. W ujęciu modelu TAM zweryfikowano opinie respondentów na temat ich chęci do wyboru symulacji zamiast metod tradycyjnych oraz postrzeganą skuteczność narzędzia w procesie uczenia się.

Aby poznać odpowiedź na postawione powyżej pytanie badawcze i zrealizować założony cel badawczy przeprowadzone zostały następujące czynności:

- narracyjny przegląd literatury przedmiotu koncentrujący się na definicjach, ramach pojęciowych i klasyfikacji gier poważnych oraz symulacji biznesowych jako narzędzi opartych na algorytmach i nauce przez doświadczenie,
- charakterystykę potrzeb edukacyjnych pokoleń Y oraz Z, ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki ich struktur poznawczych oraz modelu akceptacji technologii (TAM) jako narzędzia pomiaru atrakcyjności i akceptacji wyżej wymienionych systemów cyfrowych w szkoleniu młodych, gamingowo zaawansowanych osób,
- ankietyzacja przeprowadzona online z wykorzystaniem kwestionariusza ankiety skonstruowanego na podstawie zidentyfikowanych wcześniej kwestii teoretycznych.

Zastosowanie tak sformułowanego aparatu badawczego umożliwiło identyfikację determinantów, które - w świetle modelu TAM oraz wysokiej biegłości gamingowej (*gaming literacy*) respondentów - decydują o atrakcyjności i akceptacji symulacji komputerowych nad tradycyjnymi formami rozwoju kompetencji.

Przegląd literatury

Aby w pełni zoperacjonalizować potencjał szkoleniowy nowoczesnych technologii, niezbędne jest precyzyjne nakreślenie granic pojęciowych pomiędzy cyfrową rozrywką a edukacją wspieraną technologicznie. Środowisko akademickie, badawcze i biznesowe posługuje się zróżnicowaną terminologią, co często prowadzi do nakładania się na siebie różnych koncepcji dydaktycznych. Wśród badaczy panuje jednak konsensus, że dominującymi terminami w tym obszarze są gry poważne (*Serious Games*) oraz ich węższa, wysoce sformalizowana kategoria - symulacje biznesowe (*Business Simulation Games - BSG*, czasem też określane po prostu jako symulacje szkoleniowe lub po prostu komputerowe) (Kurbjuhn, 2012).

Gry poważne (*Serious Games - SG*) to aplikacje interaktywne lub systemy cyfrowe, których głównym, nadrzędnym celem nie jest dostarczanie samej rozrywki, lecz realizacja z góry założonych, rygorystycznych celów edukacyjnych, treningowych, terapeutycznych, perswazyjnych lub informacyjnych (Mortara et al., 2014; Djaouti et al., 2011). Ich istota opiera się na stymulowaniu uczenia się poprzez doświadczenie, co znajduje odzwierciedlenie w koncepcji cyklu Kolba. Kluczowym atutem takich rozwiązań jest generowanie błyskawicznych informacji zwrotnych (feedback loop). Dzięki nim uczestnik może na bieżąco poddawać ocenie skuteczność swoich wyborów, wyciągać wnioski z niepowodzeń i systematycznie modyfikować przyjmowany model postępowania. Co istotne, cały ten proces zachodzi w bezpiecznym środowisku symulacyjnym, co eliminuje realne ryzyko finansowe czy operacyjne, z jakim wiązałoby się popełnianie analogicznych błędów w rzeczywistych warunkach korporacyjnych (National Research Council, 2000; Sedrakyan i in., 2020).

Symulacje biznesowe z kolei stanowią wysoce specyficzną i sformalizowaną podkategorię gier poważnych. Są to programy komputerowe zorientowane stricte na edukację menedżerską, finansową i operacyjną. Zgodnie z definicją przyjętą w naukach o zarządzaniu, aby dany system cyfrowy mógł zostać sklasyfikowany jako gra biznesowa, musi on obligatoryjnie opierać się na modelach matematycznych i algorytmach odzwierciedlających mechanizmy rynkowe. Gra taka musi integrować zestaw powiązanych akcji, z góry określone i nieprzekraczalne reguły brzegowe, jasno zdefiniowane cele oraz wyzwania konkurencyjne (Baldissin et al., 2013; Fraccascia et al., 2021). W niniejszym opracowaniu termin „symulacja" - traktowany tożsamo z pojęciami symulacji szkoleniowej, biznesowej oraz komputerowej - definiuje właśnie taki zaawansowany konstrukt algorytmiczny, którego nadrzędnym zadaniem jest odwzorowanie obiektywnej rzeczywistości gospodarczej.

Skuteczność implementacji nowoczesnych symulacji w procesach HR jest nierozerwalnie związana z rzetelnym profilowaniem socjologicznym i psychologicznym ich ostatecznych beneficjentów. Współczesny rynek pracy stał się areną koegzystencji wielu pokoleń o radykalnie odmiennych paradygmatach uczenia się, co wymusza na projektantach systemów szkoleniowych uwzględnienie potrzeb Milenialsów (pokolenia Y) oraz wkraczającej z ogromnym impetem demograficznym Generacji Z. Przedstawiciele Generacji Z, urodzeni w latach 1997-2017, dorastali w środowisku całkowitej immersji technologicznej, co doprowadziło do swoistego „okablowania" ich układu nerwowego i rozwinięcia obszarów mózgu odpowiedzialnych za dekodowanie złożonych obrazów wizualnych. Z analizy psychologicznej tej grupy wyłania się fascynujący paradoks edukacyjny: z jednej strony odrzucają oni tradycyjne, autorytarne metody narzucania wiedzy, wierząc w swoją wyższą sprawność technologiczną względem mentorów, z drugiej zaś odczuwają lęk przed porażką i oczekują precyzyjnych instrukcji oraz środowiska, w którym każdy postęp jest monitorowany przez system lub żywego mentora. Z kolei Milenialsi, urodzeni w latach 1981-1996, wnoszą do środowiska zawodowego silną orientację na współpracę, dzielenie się pomysłami oraz potrzebę ustrukturyzowanej, głębokiej informacji zwrotnej powiązanej z realną perspektywą awansu zawodowego (Shirazian et al., 2025).

Współczesna analiza uwarunkowań akceptacji technologii często posługuje się paradygmatem „cyfrowych tubylców", zakładającym istnienie specyficznych stylów poznawczych u osób dorastających w otoczeniu wysokich technologii (pokolenia Y i Z). Niemniej jednak, rygorystyczne ujęcie naukowe dystansuje się od postrzegania tej grupy jako jednorodnego monolitu, dowodząc, że sam fakt urodzenia w określonej kohorcie czasowej nie jest tożsamy z nabyciem spójnych kompetencji cyfrowych. (Vlachopoulos, and Makri, 2017; Marklund, and Taylor; 2016). W związku z powyższym, w niniejszej pracy za bardziej precyzyjne pojęcie uznano „pokolenie cyfrowe". Pojęcie to przesuwa akcent z daty urodzenia na socjalizację technologiczną zachodzącą w okresie gwałtownej ekspansji rozwiązań mobilnych, sieciowych oraz gier wideo, co trafniej oddaje charakter (Antón-Sancho et al., 2022).

Obcowanie ze złożonymi systemami cyfrowymi, które stanowią istotny element rozwoju reprezentantów pokolenia cyfrowego, determinuje rozwinięcie kluczowej z punktu widzenia tej pracy kompetencji (tj. oceny atrakcyjności symulacji i jej akceptacji) jaką jest biegłość gamingowa (*gaming literacy*). Jest to wielowymiarowa zdolność poznawcza integrująca rozumienie reguł i logiki światów cyfrowych, architekturę tych systemów oraz potrzebę zabawy mechanizmami gier (chęć interakcji i testowania granic oprogramowania). Kompetencja ta umożliwia użytkownikowi wyjście poza pasywną rolę i poddanie systemu procesom inżynierii wstecznej, co służy krytycznej walidacji spójności i logicznej poprawności mechanizmów sterujących symulacją (Glas et al. 2023; Grāvelsiņa, and Daniela, 2025; Apperley, and Walsh, 2012). (*affluent gaming experience*). Dla tak ukształtowanych odbiorców zbyt uproszczone mechaniki mogą prowadzić do frustracji i odrzucenia systemu.

Stąd sam fakt zaprojektowania genialnej z punktu widzenia dydaktycznego symulacji komputerowej, świetnie dopasowanej do potrzeb młodego odbiorcy, nie gwarantuje jej pomyślnego wdrożenia w przedsiębiorstwie. Systemy IT od zawsze borykały się z problemem oporu użytkowników przed adaptacją innowacji. Zrozumienie, dlaczego młodzi pracownicy decydują się (bądź odmawiają) w pełni zaangażować w cyfrowe systemy szkoleniowe, wymaga zastosowania rzetelnych narzędzi analitycznych, z ujęciem tejże właśnie specyficznej umiejętności jaką jest biegłość gamingowa.

Najpowszechniej wykorzystywanym i najlepiej przetestowanym instrumentem badawczym w dziedzinie systemów informacyjnych jest w tym kontekście Model Akceptacji Technologii (Technology Acceptance Model - TAM), zaprezentowany po raz pierwszy przez Freda Davisa w 1989 roku, wywodzący się z klasycznej Teorii Rozumnego Działania (*Theory of Reasoned Action*) (Granić, and Marangunić 2019; Montano, and Kasprzyk, 2015). Oryginalny model TAM koncentruje się na projektowaniu ukierunkowanym na użytkownika. Zakłada on, że rzeczywiste wykorzystanie nowej technologii i intencja behawioralna (*behavioral intention*) do jej ciągłego używania są kształtowane w głównej mierze przez dwa powiązane ze sobą konstrukty kognitywne - „postrzeganą użyteczność" (*Perceived Usefulness - PU*) oraz postrzeganą łatwość użytkowania (*Perceived Ease of Use - PEOU*).

Postrzegana użyteczność definiowana jest jako stopień postrzeganego subiektywnie prawdopodobieństwa, z jakim dana osoba wierzy, że użycie konkretnego systemu (w tym przypadku symulacji biznesowej) realnie zwiększy jej wydajność w pracy, ułatwi realizację celów zawodowych i podniesie jej produktywność. Innymi słowy, stanowi odpowiedź na pytanie: "Czy ta innowacja mi się po prostu opłaca z punktu widzenia kariery i efektywności?" (Granić, and Marangunić, 2019). Z kolei postrzegana łatwość użytkowania jest zdefiniowana jako stopień przekonania docelowego użytkownika o tym, że korzystanie z technologii będzie swobodne, płynne, pozbawione błędów i nie będzie wymagało od niego nadmiernego obciążenia oraz wysiłku mentalnego na naukę samego interfejsu. Inaczej: „Czy nauka interfejsu nie będzie zbyt frustrująca i czasochłonna?" (Granić, and Marangunić, 2019).

Ponadto**,** badania dowodzą, że przeprowadzone w świecie symulacji biznesowych wskazują, że „postrzegana łatwość użytkowania" (PEOU) nie jest tylko miłym dodatkiem, ale potężnym silnikiem napędowym „postrzeganej użyteczności" (PU). Analiza statystyczna modelu wykazuje, że łatwość obsługi ma bardzo silny wpływ na użyteczność, co oznacza, że im mniej gracz musi „walczyć" z interfejsem, tym bardziej wierzy, że gra realnie pomoże mu w nauce i pracy. Choć łatwość wpływa na intencję korzystania z systemu również bezpośrednio, to właśnie mechanizm mediacji przez użyteczność sprawia, że intuicyjne narzędzia są postrzegane jako bardziej profesjonalne i efektywne. Krótko mówiąc: jeśli symulacja jest „toporna", użytkownik zazwyczaj nie traci czasu na szukanie w niej głębszego sensu merytorycznego i szybko porzuca narzędzie (Pando-Garcia et al., 2016).

Ewolucja modelu (TAM2 i TAM3) rozszerzyła tę strukturę o czynniki społeczne (norma subiektywna, wizerunek) oraz poznawcze procesy instrumentalne (trafność zawodowa, jakość wyników). Wersja TAM3 dodatkowo uwzględnia tzw. „kotwice" indywidualne, takie jak lęk przed technologią czy zabawowość, które są weryfikowane przez doświadczenie i postrzeganą przyjemność z użytkowania. Prawdziwa akceptacja symulacji zachodzi zatem na styku merytorycznych korzyści zawodowych i psychologicznego komfortu użytkownika (Marikyan, and Papagiannidis, 2025).

Zintegrowana perspektywa tych modeli pokazuje, że sukces nowoczesnej symulacji biznesowej nie zależy wyłącznie od jej kodu źródłowego czy warstwy wizualnej. Prawdziwa akceptacja technologii zachodzi na styku korzyści zawodowych, wsparcia społecznego oraz psychologicznego komfortu użytkownika. Dla organizacji oznacza to, że skuteczne wdrożenie wymaga nie tylko dostarczenia narzędzia, ale też aktywnego zarządzania wizerunkiem innowacji i budowania wiary pracowników we własne kompetencje cyfrowe.

Metodologia badań

W celu zgromadzenia materiału empirycznego do rozwiązania wyznaczonego w pracy problemu badawczego posłużono się metodą ankietowania, która polega na udzielaniu przez wyraźnie określone osoby (respondentów) odpowiedzi na pytania tworzące świadomy, logiczny, konsekwentny i spójny zestaw odpowiedzi służących do rozwiązania problemu naukowego (Matejun, 2016).

Badanie zrealizowano przy użyciu techniki komputerowo wspomaganego wywiadu internetowego (CAWI). Głównym kryterium wyboru tej strategii był wysoki poziom komfortu i kontroli uczestnika, który mógł wypełnić formularz w dowolnym miejscu i czasie. Takie podejście pozwoliło na wyeliminowanie barier logistycznych oraz zredukowanie bezpośredniego wpływu badacza na postawę ankietowanych. Dodatkowym atutem była

wysoka efektywność ekonomiczna oraz łatwość obsługi systemów ankietowych, co umożliwiło sprawne zebranie danych (Staniszewska, 2013).

Narzędziem badawczym wykorzystanym w pracy był kwestionariusz ankiety internetowej, dystrybuowany drogą elektroniczną, które jest standardowym narzędziem stosowanym równolegle ze wskazaną powyżej techniką (Juszczyk, 2023).

Prezentowane wyniki stanowią integralną część wielomodułowego projektu badawczego, którego celem było precyzyjne zdiagnozowanie relacji między kompetencjami cyfrowymi a akceptacją nowoczesnych technologii szkoleniowych, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska biegłości gamingowej (*gaming literacy*). Całość przedsięwzięcia naukowego została zrealizowana w formie czterech komplementarnych projektów, spośród których w bieżącej pracy poddano analizie wymiar dotyczący postrzeganej atrakcyjności i akceptacji narzędzi z wykorzystaniem modelu TAM.

Dobór próby miał charakter celowy i był ukierunkowany na grupę młodych dorosłych (18-35 lat) wykazujących wysoką biegłość cyfrową. Wstępna procedura weryfikacji zgromadzonego materiału (styczeń-marzec 2026 r.) objęła eliminację arkuszy o szczątkowym udziale lub o deficycie pożądanych cech (osoby w wieku 35+, stanowiący grupę mniejszą niż 5% danych wstępnych oraz osoby bez kontaktu z grami, 4,4% pierwotnych danych). W rezultacie, do ostatecznej analizy zakwalifikowano ostateczną próbę 112 osób. Szczegółowy rozkład cech demograficznych respondentów przedstawia tabela 1.

Tabela 1.
Cechy demograficzne respondentów

Cecha demograficzna	Kategoria	Liczebność	Udział (%)
Płeć	Kobieta	45	40,2%
	Mężczyzna	67	59,8%
Wiek	18 - 21	32	28,6%
	22 - 25	38	33,9%
	26 - 29	24	21,4%
	30 - 35	18	16,1%
Wykształcenie	Wyższe (licencjat, inżynier)	56	50%
	Średnie	45	40,2%
	Wyższe (magisterskie i wyżej)	6	5,4%
	Zasadnicze zawodowe	5	4,5%

Ze względu na zastosowane zaokrąglenia do jednego miejsca po przecinku, suma wartości procentowych może nieznacznie odbiegać od 100%.

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

W ramach metryczki respondentów uwzględniono zmienne dotyczące ich doświadczeń z rozrywką cyfrową: częstotliwość interakcji, preferencje gatunkowe oraz wcześniejszą styczność z systemami symulacyjnymi. Celem tego zabiegu była wielowymiarowa charakterystyka profilu badanej grupy jako populacji ukształtowanej przez kulturę cyfrową. Pozwoliło to na osadzenie wyników w kontekście realnych nawyków odbiorców, dla których zaawansowane mechaniki gier komercyjnych stanowią naturalne środowisko poznawcze.

W badaniu przyjęto, że biegłość gamingowa (*gaming literacy*) nie jest mierzona wyłącznie czasem poświęconym na interakcję, lecz również stopniem złożoności poznawczej wybieranych środowisk cyfrowych. Toteż chociaż 30,4% wyselekcjonowanej grupy deklaruje grę codzienną, 25,9% częstą, a 22,3% od czasu do czasu, to kluczowym dowodem na posiadanie wymaganych kompetencji analitycznych jest struktura preferencji gatunkowych (tabela 2).

Tabela 2.
Preferencje gatunków gier komercyjnych wśród badanych

Gatunek gry	Procent wskazań	Typ preferencji	Obszary rzutujące na postrzeganą użyteczność (PU)
RPG / Fabularne (np. *Wiedźmin*, *Cyberpunk 2077, The Elder Scrolls, Red Dead Redemption*)	65,2%	Narracyjno-decyzyjny	Rozwiązywanie problemów, empatia, etyka wyboru
Gry logiczne (np. Sudoku, Tetris)	48,2%	Analityczno-logiczny	Myślenie krytyczne, koncentracja, analiza danych.
Gry akcji / e-sportowe (np. *Counter Strike*, *Battlefield, Valorant*)	42,9%	Zespołowo-dynamiczny	Praca w zespole, szybkość reakcji, komunikacja
Strategiczne (polegające głównie na realizacji określonych celów)	37,5%	Celowościowy	Planowanie strategiczne, determinacja w dążeniu do celu
Ekonomiczne (polegające głównie na zapewnieniu płynności finansowej i logistycznej w czasie nieskończonym)	25%	Optymalizacyjny	Zarządzanie zasobami, płynność logistyczna

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Dominacja formatów wymagających intensywnego zaangażowania, takich jak gry fabularne (65,2%) oraz logiczne (48,2%), świadczy o ukształtowaniu respondentów przez ekosystemy wymuszające ciągłą analizę danych i wielopoziomowe podejmowanie decyzji.

Warto w tym miejscu wspomnieć, że analiza preferencji ze względu na płeć wykazała, że chociaż baza gier fabularnych jest czynnikiem wspólnym, o tyle panowie częściej wskazywali na gry akcji i strategiczne jako ulubione, podczas gdy kobiety wolą gry logiczne i ekonomiczne.

Rozpiętość preferencji w sferze rozrywki cyfrowej znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w zróżnicowaniu hierarchii kryteriów stosowanych podczas ewaluacji systemów szkoleniowych co potwierdza literatura przedmiotu. Użytkownicy utożsamiający się z gatunkiem RPG, których profil kompetencyjny został ukształtowany przez kontakt ze złożonymi strukturami narracyjnymi, wykazują wzmożony krytycyzm wobec autentyczności interakcji społecznych oraz głębi psychologicznej. Dla odmiany, w przypadku zwolenników formatów logicznych, nadrzędne znaczenie zyskuje nieskazitelność architektury zasad. Sytuacja, w której racjonalne działanie prowadzi do niespójnego rezultatu (tzw. błąd mechaniki), stanowi dla tej grupy kluczowy czynnik obniżający postrzeganą użyteczność całego doświadczenia (Dörner i in., 2016).

W tym ujęciu profil gamingowy stanowi niezbędny kontekst dla postrzeganej użyteczności (*perceived usefulness*) narzędzia. Przykładowo, dominacja gatunku RPG przekłada się na wysoki rygoryzm względem spójności świata przedstawionego, natomiast dla graczy tytułów logicznych fundamentem akceptacji jest bezwzględna logika reguł algorytmicznych. Taki dobór preferencji uwiarygadnia tezę, że respondenci posiadają sprawność w deszyfrowaniu języka i logiki systemów ludycznych. Fakt regularnego obcowania z systemami, które pod względem mechanik są izomorficzne względem przedmiotu badania - szkoleniowych symulacji biznesowych - pozwala przyjąć, że sformułowane opinie nie są teoretycznymi przypuszczeniami, lecz poparte są praktycznym zrozumieniem interaktywnych struktur.

Wyniki badań

Zgodnie z przyjętym problemem badawczym, zmienną zależną - poziom akceptacji symulacji - poddano operacjonalizacji poprzez zestaw siedmiu twierdzeń, które respondenci oceniali za pomocą pięciopunktowej skali Likerta, gdzie 1 oznaczało całkowitą niezgodę, a 5 - zdecydowaną zgodę. Twierdzenia te zostały zaprezentowane w tabeli 3.

Tabela 3.
Pytania badające postawy respondentów względem symulacji

Numer pytania	Treść twierdzenia (bodziec)	Badany wymiar akceptacji
Q1	Uczenie się przez grę pozwoliłoby mi lepiej przyswoić wiedzę niż tradycyjne metody	Subiektywne przekonanie o skuteczności narzędzia
Q2	Uważam, że symulacja komputerowa mogłaby być skutecznym narzędziem do rozwoju moich umiejętności	Postrzegana użyteczność
Q3		Biegłość techniczna

Numer pytania	Treść twierdzenia (bodziec)	Badany wymiar akceptacji
	Wierzę, że opanowanie nowego interfejsu w grze szkoleniowej nie zajęłoby mi dużo czasu	
Q4	Uważam, że cyfrowa forma interakcji jest przyjemniejsza i mniej męcząca niż praca na tradycyjnych dokumentach	Atrakcyjność formy
Q5	Gdybym miał taką możliwość wybrałbym / wybrałabym szkolenia oparte na grach/symulacjach chętniej niż inne formy	Intencja behawioralna
Q6	Poleciłbym/abym szkolenie oparte na symulacji komputerowej moim znajomym/współpracownikom	Poziom akceptacji społecznej
Q7	Bardziej cenię symulacje, które dynamicznie generują nowe zadania, niż takie, które opierają się na powtarzalnych schematach	Jakość symulacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania

Konstrukcja pytań miała na celu nie tylko zmierzenie suchego poziomu akceptacji, ale również zidentyfikowanie źródeł atrakcyjności i akceptacji narzędzia. Przykładowo, zestawienie pytań Q1 i Q2 pozwala ocenić, czy badani postrzegają symulacje jako narzędzie „poważne" i merytoryczne. Z kolei pytanie Q7 pełni rolę kontrolną - weryfikuje, czy respondenci o wysokim gaming literacy akceptują symulacje bezwarunkowo, czy też ich uznanie jest uzależnione od jakości „silnika" matematycznego i dynamiki gry. Konkretny rozkład procentowy wystawionych ocen przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4.
Szczegółowy rozkład ocen na pytania dotyczące akceptacji i atrakcyjności symulacji.

Numer pytania	Treść pytania (skrócona)	5 (%)	4 (%)	3 (%)	2 (%)	1 (%)
Q1	Lepsze przyswajanie wiedzy	44,6	33,9	15,2	4,5	1,8
Q2	Skuteczność w rozwoju umiejętności	38,4	33,9	20,5	5,4	1,8
Q3	Szybkość opanowania interfejsu	58,0	30,4	8,9	1,8	0,9
Q4	Cyfrowa forma przyjemniejsza niż tradycyjna	49,1	33,0	12,5	3,6	1,8
Q5	Chętniejszy wybór symulacji	41,1	33,9	18,8	4,5	1,7
Q6	Polecenie współpracownikom	46,4	33,9	14,3	3,6	1,8

Numer pytania	Treść pytania (skrócona)	5 (%)	4 (%)	3 (%)	2 (%)	1 (%)
Q7	Preferencja symulacji dynamicznych	62,5	28,6	7,1	0,9	0,9

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Analiza empiryczna wykazała wysoki ogólny poziom akceptacji badanych narzędzi. Rzetelność wewnętrzna skali TAM została potwierdzona wysokim współczynnikiem Alfa Cronbacha ($\alpha = 0,84$). Suma odpowiedzi wskazujących na nastawienie pozytywne, czyli „raczej się zgadzam" (4) i „zdecydowanie się zgadzam (5) wskazywana jest dalej jako TOP2. Wskaźnik ten jak i inne statystyki opisowe dla poszczególnych zmiennych prezentuje Tabela 5.

Tabela 5.
Statystyki opisowe dla poszczególnych zmiennych (wymiarów akceptacji).

Numer pytania	Wymiar akceptacji	Średnia (M)	Odchylenie standardowe (SD)	Mediana (Me)	Wskaźnik TOP2
Q1	Postrzegana trafność edukacyjna	4,15	0,94	4,0	78,5%
Q2	Postrzegana użyteczność merytoryczna	4,02	0,98	4,0	72,3%
Q3	Postrzegana łatwość użytkowania	4,43	0,79	5,0	88,4%
Q4	Atrakcyjność formy cyfrowej	4,24	0,91	4,0	82,1%
Q5	Intencja behawioralna (chęć wyboru)	4,08	0,95	4,0	75,0%
Q6	Gotowość do rekomendacji	4,20	0,92	4,0	80,3%
Q7	Oczekiwanie dynamizmu (jakość)	4,51	0,74	5,0	91,1%

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Analiza poszczególnych składowych modelu TAM wskazuje na wysoki i wyrównany poziom akceptacji symulacji biznesowych wśród przedstawicieli pokolenia cyfrowego, przy czym najwyżej ocenionym wymiarem w całym badaniu okazała się postrzegana jakość i dynamizm narzędzia (Q7), gdzie średnia arytmetyczna wyniosła $M = 4,51$ przy najniższym w próbie odchyleniu standardowym $SD = 0,74$, a wskaźnik TOP2 osiągnął poziom 91,1%.

Drugi najwyższy wynik odnotowano w obszarze postrzeganej łatwości użytkowania (Q3), co dowodzi braku barier technologicznych - tutaj średnia ocen ukształtowała się na poziomie $M = 4,43$ ($SD = 0,79$), a 88,4% respondentów jednoznacznie zadeklarowało łatwość opanowania interfejsu narzędzia. Wysoką aprobatę zyskała również subiektywna atrakcyjność samej formy cyfrowej (Q4), uzyskując średnią $M = 4,24$ ($SD = 0,91$), przy czym 82,1% badanych opowiedziało się za wyraźną przewagą interaktywnego formatu nad dokumentacją

tradycyjną. Tendencja ta znajduje odzwierciedlenie w sferze akceptacji społecznej i rekomendacji (Q6), gdzie gotowość do polecenia szkolenia innym pracownikom zadeklarowało 80,3% respondentów przy średniej ocen M = 4,20 (SD = 0,92).

Wymiar postrzeganej trafności edukacyjnej (Q1) uzyskał średnią ocen M = 4,15 (SD = 0,94) i odsetek odpowiedzi pozytywnych na poziomie 78,5%, co nieznacznie wyprzedza deklarowaną intencję behawioralną (Q5), czyli bezpośrednią chęć wyboru symulacji jako preferowanej formy nauki, która uzyskała średnią M = 4,08 (SD = 0,95) oraz wskaźnik TOP2 rzędu 75,0%. Relatywnie najniższą, choć wciąż utrzymującą się powyżej progu neutralności średnią, odnotowano w przypadku postrzeganej użyteczności merytorycznej (Q2), która wyniosła M = 4,02 przy najwyższym w całym zestawieniu rozproszeniu odpowiedzi (SD = 0,98), gdzie pozytywnej oceny wiarygodności merytorycznej udzieliło 72,3% badanych.

W ramach pogłębionej analizy materiału empirycznego zbadano współwystępowanie preferencji gatunkowych z ogólnym wskaźnikiem akceptacji technologii (TAM_Avg), obliczonym jako średnia arytmetyczna odpowiedzi na pytania Q1-Q7. Zastosowanie współczynnika korelacji Pearsona (r) pozwoliło na zidentyfikowanie istotnych statystycznie różnic w postrzeganiu narzędzia w zależności od profilu gamingowego respondentów. Wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6.
Mapa ciepła korelacji (r-Pearsona) między preferencjami gatunkowymi a uśrednionym wskaźnikiem TAM.

Gatunek gier	Korelacja z uśrednionym wskaźnikiem akceptacji technologii
RPG / Fabularne	-0,32
Strategiczne	0,16
Ekonomiczne	0,04
Logiczne	0,01
Akcji / E-sport	-0,06

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Odnotowano umiarkowaną, ujemną korelację między preferencją gier fabularnych (RPG) a ogólnym poziomem akceptacji symulacji (r = -0,32). Przeciwną tendencję - korelację dodatnią - zaobserwowano w grupie entuzjastów gier strategicznych (r = 0,16).

Z kolei weryfikacja wewnętrznych powiązań w modelu TAM wykazała najsilniejszy związek między intencją behawioralną, rozumianą jako chęć wyboru szkolenia (Q5), a

gotowością do jego rekomendacji współpracownikom (Q6), gdzie współczynnik korelacji wyniósł r = 0,25. Natomiast drugie najmocniejsze powiązanie zachodzi pomiędzy subiektywnym przekonaniem o skuteczności narzędzia oraz chęcią jego polecenia (0,19). Szczegółowe relacje wykazano w tabeli 7.

Tabela 7.
Macierz korelacji między poszczególnymi pytaniami (wewnętrzne powiązania).

Zmienna	Q1 (Trafność)	Q2 (Użyteczność)	Q3 (Łatwość)	Q5 (Chęć wyboru)	Q6 (Rekomendacja)
Q1 (Trafność)	1				
Q2 (Użyteczność)	0,04	1			
Q3 (Łatwość)	0,02	-0,04	1		
Q5 (Chęć wyboru)	0,08	0,04	0,02	1	
Q6 (Rekomendacja)	**0,19**	0,05	0,04	**0,25**	1

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Natomiast analiza poziomu atrakcyjności w odniesieniu do częstotliwości interakcji z grami cyfrowymi ujawniła, że najwyższą średnią ocen (M = 4,31; SD = 0,35) prezentują osoby grające „czasami". Nieco niższe wskaźniki odnotowano w grupach grających „codziennie" (M = 4,25; SD = 0,33) oraz „często" (M = 4,22; SD = 0,24). Najniższy stopień atrakcyjności narzędzia wykazali respondenci grający „rzadko" (M = 4,13; SD = 0,39).

Dyskusja

Fundamentem wysokiej akceptacji symulacji biznesowych w badanej grupie jest głębokie zaufanie do ich skuteczności merytorycznej. Wyniki uzyskane w obszarach trafności edukacyjnej (Q1: 78,5%) oraz użyteczności merytorycznej (Q2: 72,3%) potwierdzają, że respondenci postrzegają te narzędzia jako pełnoprawną alternatywę dla tradycyjnych metod kształcenia. Wysoka ocena „poważnego" wymiaru symulacji ma znaczenie krytyczne w środowisku korporacyjnym - narzędzie przestaje być traktowane jedynie jako forma rozrywki, stając się wiarygodnym instrumentem rozwoju kompetencji zawodowych. Potwierdzają to najnowsze badania Facchino i in. (2025), które wskazują na wysoką skuteczność gier poważnych w procesach treningu psychologicznego i edukacyjnego, podkreślając ich zdolność do wywoływania autentycznego zaangażowania poznawczego.

Zjawisko to jest zapewne powiązane z biegłością gamingową (*gaming literacy*) badanych i ich doświadczeniem z produkcjami komercyjnymi klasy AAA. Respondenci, znając stopień złożoności mechanik w tytułach takich jak Wiedźmin 3, Cyberpunk 2077 czy serii gier strategicznych typu Sid Meier's Civilization, dysponują unikalnym punktem odniesienia dla oceny systemów profesjonalnych. Świadomość „mocy sprawczej" współczesnego oprogramowania pozwala badanym zakładać, że skoro komercyjne środowiska cyfrowe oferują zaawansowaną logikę systemową, to dedykowane symulacje mogą z powodzeniem modelować realne procesy korporacyjne. W tym kontekście warto zwrócić na ustalenia Chee i Wong (2017), którzy ostrzegają przed tzw. „barierą bogatego doświadczenia gamingowego" (*affluent gaming experience*). Dla tak ukształtowanych odbiorców zbyt uproszczone mechaniki mogą prowadzić do frustracji i odrzucenia systemu. Zbieżne wnioski płyną również z analiz Fraccascia i in. (2021), którzy udowodnili, że rzetelne odwzorowanie mechanizmów rynkowych wewnątrz gry jest warunkiem koniecznym dla transferu wiedzy do rzeczywistych procesów gospodarczych.

Jednocześnie dane potwierdzają, że dla przedstawicieli pokolenia cyfrowego technologia nie stanowi bariery wejścia (Q3: 88,4%). Dzięki rozwiniętej biegłości gamingowej bariera interfejsu praktycznie nie istnieje, co w połączeniu z wysoką gotowością do rekomendacji (Q6: 80,3%) czyni symulacje pożądanym elementem nowoczesnej kadry. Natomiast kluczowym elementem dla tak wymagającej grupy, warunkującym atrakcyjność i akceptację jest wymóg dynamizmu i nieliniowości scenariusza (Q7: 91,1%).

Z kolei analiza korelacji oraz profilu aktywności gamingowej respondentów na mechanizmy akceptacji symulacji w pokoleniu cyfrowym ukazuje istotne różnice w odbiorze między różnymi grupami graczy. Kluczowym odkryciem jest zidentyfikowany „filtr jakościowy" u miłośników gier fabularnych (RPG). Umiarkowana ujemna korelacja ($r = -0,32$) sugeruje, że im wyższe doświadczenie użytkownika z zaawansowaną narracją i wielowątkowością produkcji komercyjnych, tym wyższy rygoryzm względem wiarygodności algorytmicznej narzędzi szkoleniowych. Pogląd ten koresponduje ze przedstawionymi wcześniej analizami Chee i Wong (2017) - biegli gracze przenoszą wysokie standardy z gier AAA na grunt korporacyjny, co sprawia, że są oni najbardziej surowymi audytorami autentyczności systemu.

Zupełnie inną postawę wykazują entuzjaści gier strategicznych, u których odnotowano korelację dodatnią ($r = 0,16$). Może to wynikać z faktu, że gry strategiczne z natury opierają się na optymalizacji matematycznej i zarządzaniu zasobami, co jest strukturalnie zbieżne z logiką symulacji biznesowych (Zong et al., 2023). Symulacja może być przez tę grupę postrzegana jako naturalne środowisko testowania hipotez operacyjnych, co potencjalnie ułatwia im akceptację narzędzia.

Fascynujący wniosek płynie z analizy częstotliwości grania. Najwyższa średnia akceptacja u osób grających „czasami" (4,31) wskazuje na istnienie swoistego punktu optymalnego. Osoby te posiadają wystarczającą biegłość gamingową (*gaming literacy*), by swobodnie obsługiwać

system, ale nie wykazują jeszcze znużenia technologicznego ani skrajnego rygoryzmu cechującego graczy „codziennych” (4,25). Z kolei najniższy w zestawieniu - choć wciąż wskazujący na wysoką aprobatę - wynik u osób grających „rzadko” (4,13) sugeruje istnienie pewnego dystansu percepcyjnego wobec technologii. Osoby te, z racji braku bieżącej aktualizacji doświadczeń gamingowych, mogą opierać swoje oczekiwania na anachronicznych wzorcach sprzed lat. Nie znając pełni możliwości współczesnych systemów, wykazują one większą powściągliwość w ocenie symulacji jako zaawansowanego modelu rzeczywistości. Ich ocena, choć pozytywna, pozbawiona jest entuzjazmu wynikającego ze świadomości „mocy sprawczej” nowoczesnego oprogramowania, co czyni ich grupą o najniższym, relatywnym poziomie gotowości do pełnego wykorzystania immersyjnego potencjału narzędzia.

Wewnętrzna spójność modelu TAM w badanej grupie objawia się najsilniej w relacji między intencją wyboru szkolenia (Q5) a gotowością do jego rekomendacji (Q6, r = 0,25). Świadczy to o tym, że akceptacja symulacji ma charakter społeczny - osobiste przekonanie o wartości narzędzia niemal natychmiast przekłada się na chęć budowania kapitału wiedzy wewnątrz zespołu. Jest to wzmacniane przez korelację między postrzeganą subiektywną skutecznością edukacyjną a chęcią polecenia (r = 0,19), co sugeruje, że rzetelność merytoryczna jest głównym paliwem dla wirusowego szerzenia się innowacji w organizacji.

Podsumowując, respondenci pozytywne nastawienie młodych kadr pozwala wnioskować, że symulacje staną się nieodzownym elementem procesów rozwojowych, o ile - zgodnie ze wskazaniami Chernbumroong i in. (2026) - zapewnią one wiarygodność społeczną i merytoryczną, satysfakcjonującą grupę przyzwyczajoną do najwyższych wzorców interakcji cyfrowej.

Podsumowanie

Celem badawczym było zmierzenie poziomu atrakcyjności i akceptacji symulacji komputerowych przez graczy jako nowoczesnej formy rozwoju zawodowego. Dzięki przeprowadzonemu przeglądowi literatury i zgromadzonemu materiałowi empirycznemu udało się go zrealizować i osadzić w uznanej. Z analizy wynika, że dla młodych graczy symulacje biznesowe to wiarygodne narzędzie szkoleniowe, które w ich percepcji wykracza daleko poza sferę czystej rozrywki cyfrowej. Ponad 70% badanych wierzy, że taka forma nauki będzie skuteczna i

Wysoka atrakcyjność narzędzia dla badanych wynika z niskiego poziomu barier technologicznych wśród nich, co potwierdza 88,4% respondentów deklarujących łatwość opanowania interfejsu. Rozwinięta biegłość gamingowa sprawia, że cyfrowa forma interakcji jest dla nich przyjemniejsza i mniej męcząca (82,1%). Dane zebrane w trakcie badania pozwalają wnioskować, iż dla osób o wysokiej biegłości gamingowej postrzegana atrakcyjność

narzędzia szkoleniowego wydaje się być ściśle skorelowana z jakością jego warstwy algorytmicznej. Aż 91,1% respondentów oczekuje symulacji dynamicznych i nieliniowych. Respondenci zdają się preferować środowiska dynamiczne, co może wynikać z ich dotychczasowych doświadczeń w obcowaniu ze złożonymi i interaktywnymi systemami. Natomiast wysoki wskaźnik intencji polecenia szkolenia współpracownikom (80,3%) sugeruje, że symulacje komputerowe są postrzegane jako użyteczny i pożądany element nowoczesnego ekosystemu rozwoju zawodowego.

Poziom atrakcyjności i akceptacji symulacji biznesowych wśród młodych pracowników jest bardzo wysoki, co może wynikać z synergii między ich kapitałem edukacyjnym a zaawansowanymi kompetencjami cyfrowymi. Wynika to prawdopodobnie z połączenia ich wiedzy merytorycznej z dużą swobodą w korzystaniu z narzędzi cyfrowych. W ujęciu komparatywnym należy jednak założyć, że dla grup o deficytach w obszarze kompetencji cyfrowych lub pracowników z grup wiekowych o niższej ekspozycji na technologie (np. pokolenia 50+), kluczowym czynnikiem ograniczającym atrakcyjność może być postrzegany wysiłek mentalny oraz lęk przed nowymi systemami IT. W przeciwieństwie do badanych przedstawicieli pokolenia cyfrowego, dla których interfejs jest przezroczysty, starsze pokolenia mogą postrzegać barierę technologiczną jako dominującą nad merytoryczną użytecznością narzędzia. Wskazuje to na konieczność dywersyfikacji metod wdrożeniowych oraz zapewnienia dodatkowego wsparcia technicznego w procesach szkoleniowych kierowanych do specyficznych grup.

Bibliografia

1. Antón-Sancho, Á., Fernández-Arias, P., and Vergara, D. (2022). Assessment of virtual reality among university professors: Influence of the digital generation. *Computers*, *11*(6), 92, doi: 10.3390/computers11060092.
2. Apperley, T., and Walsh, C. (2012). What digital games and literacy have in common: a heuristic for understanding pupils' gaming literacy. *Literacy*, *46*, 115-122.
3. Baldissin, N., De Toni, A. F., and Nonino, F. (2013). What is a Business Game? Historical background and evolution of business games in serious games context. In N. Baldissin, and A. F. De Toni (Eds.), *Business game-based learning in management education* (pp. 3-23). The Business Game LTD.
4. Chee, C. M., and Wong, D. H. T. (2017). Affluent Gaming Experience Could Fail Gamification in Education: A Review. *IETE Technical Review*, 34. doi: 10.1080/02564602.2017.1315965.
5. Chernbumroong, S., Intawong, K., Asawimalkit, U., Puritat, K., and Julrode, P. (2026). Design and Evaluation of a Generative AI-Enhanced Serious Game for Digital Literacy: An AI-Driven NPC Approach. *Informatics*, 13(1). doi: 10.3390/informatics13010016.
6. Djaouti, D., Alvarez, J., and Jessel, J. P. (2011). Classifying serious games: the G/P/S model. In P. Felicia (Ed.), *Handbook of research on improving learning and motivation through educational games: Multidisciplinary approaches* (pp. 118-136). Hershey: IGI Global Scientific Publishing. doi: 10.4018/978-1-60960-495-0.ch006.
7. Dörner, R., Göbel, S., Effelsberg, W., and Wiemeyer, J. (2016). *Serious Games: Foundations, Concepts and Practice* Cham: Springer International Publishing.
8. Facchino, A. P., Marchetti, D., Colasanti, M., Fontanesi, L., and Verrocchio, M. C. (2025). The use of serious games for psychological education and training: a systematic review. *Frontiers in Education*, 10, 1511729. doi: 10.3389/feduc.2025.1511729.
9. Fraccascia, L., Sabato, A., and Yazan, D. M. (2021). An industrial symbiosis simulation game: Evidence from the circular sustainable business development class. *Journal of Industrial Ecology*, *25*, 1688-1706.
10. Gatti, L., Ulrich, M., and Seele, P. (2019). Education for Sustainable Development through Business Simulation Games. *Journal of Business Ethics*, *154*, 1-15. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.130.
11. Glas, R., van Vught, J., Fluitsma, T., De La Hera, T., and Gómez-García, S. (2023). Literacy at play: an analysis of media literacy games used to foster media literacy competencies. *Frontiers in Communication*, *8*, 1155840. doi: 10.3389/fcomm.2023.1155840.
12. Granić, A., and Marangunić, N. (2019). Technology acceptance model in educational context: A systematic literature review. *British Journal of Educational Technology*, *50*, 2031-2058. doi: 10.1111/bjet.12864.

13. Grāvelsiņa, E., and Daniela, L. (2025). From Facebook to Classroom: A Systematic Analysis of Educational Games Designed by Educators. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, *24*, 517-544. doi: 10.26803/ijlter.24.3.25.
14. Juszczyk, S. (2023). Wiarygodność badań online - refleksje metodologiczne. *Journal of Continuing Education*, *122*(3). doi: 10.34866/znes-vs56.
15. Kurbjuhn, B. (2012). Serious and Simulation Games - A Definition Approach. In W. Abramowicz, J. Domingue, and K. Węcel (Eds.), *Business Information Systems Workshops. BIS 2012* (pp. 132-139). Berlin, Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-34228-8_17.
16. Marikyan, D., and Papagiannidis, S. (2025). Technology Acceptance Model: A review. In S. Papagiannidis (Ed.), *TheoryHub Book* (pp. xx-xx). Miejscowość: Wydawca.
17. Marklund, B. B., and Taylor, A. S. A. (2016). Educational Games in Practice: The challenges involved in conducting a game-based curriculum. *Electronic Journal of e-Learning*, *14*, 122-135.
18. Matejun, M. (2016). Metodyka badań ankietowych w naukach o zarządzaniu - ujęcie modelowe. In M. Lisiński, and B. Ziębicki (Eds.), *Współczesne problemy rozwoju metodologii zarządzania* (pp. 341-354). Kraków: Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
19. Montano, D. E., and Kasprzyk, D. (2015). Theory of reasoned action, theory of planned behavior, and the integrated behavioral model. *Health Behavior: Theory, Research and Practice*, *70*, 231-240.
20. Mortara, M., Catalano, C., Bellotti, F., Fiucci, G., Panchetti, M., and Petridis, P. (2014). Learning cultural heritage by serious games. *Journal of Cultural Heritage*, *15*, 318-325. doi: 10.1016/j.culher.2013.04.004.
21. National Research Council. (2000). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School: Expanded Edition*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/9853.
22. Pando-Garcia, J., Periañez-Cañadillas, I., and Charterina, J. (2016). Business simulation games with and without supervision: An analysis based on the TAM model. *Journal of Business Research*, *69*, 1731-1736. doi: 10.1016/j.jbusres.2015.10.046.
23. Sedrakyan, G., Dennerlein, S., Pammer-Schindler, V., and Lindstaedt, S. (2020). Measuring Learning Progress for Serving Immediate Feedback Needs: Learning Process Quantification Framework (LPQF). In *European Conference on Technology Enhanced Learning* (pp. 443-448). Cham: Springer International Publishing.
24. Shirazian, S., Vatanpour, M., and Guity, P. (2025). Generation Z: Learners' Profiles and Teaching Challenges. *Frontiers in Dentistry*, *40*, 1-15. doi: 10.18502/fid.v22i40.19906.
25. Staniszewska, M. (2013). Internet jako narzędzie prowadzenia badań społecznych. *Acta Innovations*, *9*, 1-57.

26. Sultanova, O., and Sadullayev, S. (2024). Application of modern technologies in education of students. *Science and Innovation*, *3*, 431-433. doi: 10.5281/zenodo.10731035.
27. Tan, A., Dorneich, M. C., and Cotos, E. (2025). Developing and evaluating the fidelity of virtual reality-artificial intelligence (VR-AI) environment for situated learning. Frontiers in Virtual Reality, 6. doi: 10.3389/frvir.2025.1587768.
28. Vlachopoulos, D., and Makri, A. (2017). The effect of games and simulations on higher education: a systematic literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, *14*(1), 22. doi: 10.1186/s41239-017-0062-1.
29. Zong Y., Lin L., Wang S., Cui Z., Chen Y. (2023). Improvements and Challenges in StarCraft II Macro-Management: A Study on the MSC Dataset, „Journal of Theory and Practice of Engineering Science", 3(12), doi: 10.53469/jtpes.2023.03(12).05.

AUTOMATYZACJA I SZTUCZNA INTELIGENCJA W RACHUNKOWOŚCI – PERSPEKTYWA PRACOWNIKÓW DZIAŁÓW FINANSOWO-KSIĘGOWYCH

Mateusz Rzepiela

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Kraków;

231967@student.uek.krakow.pl

Streszczenie: W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost znaczenia automatyzacji oraz cyfryzacji procesów w branży finansowej. Głównym celem niniejszego artykułu jest zbadanie opinii pracowników branży finansowej w Polsce na temat wdrażanych procesów automatyzacji oraz wykorzystywanych narzędzi wspierających te rozwiązania w miejscu pracy. Badanie empiryczne przeprowadzono techniką elektroniczną (CAWI) za pomocą autorskiego kwestionariusza ankiety na próbie 101 respondentów związanych bezpośrednio z sektorem finansowym. Wyniki analizy wskazują, że automatyzacja wywiera wyraźnie pozytywny wpływ na codzienną pracę oraz organizację czasu, przede wszystkim poprzez redukcję zadań rutynowych i powtarzalnych. Wpływ technologii na ograniczenie błędów manualnych oceniono jako umiarkowany, co dowodzi, że stały nadzór człowieka nad systemami informatycznymi wciąż pozostaje niezbędny. Większość ankietowanych dostrzega w automatyzacji szansę na rozwój nowych kompetencji cyfrowych oraz zwiększenie swojej atrakcyjności na rynku pracy. Główne bariery wdrożeniowe zidentyfikowane w badaniu mają podłoże subiektywne i dotyczą niewystarczającego przeszkolenia personelu oraz znikomego udziału pracowników operacyjnych w procesie projektowania innowacyjnych rozwiązań. Skuteczna transformacja cyfrowa w obszarze rachunkowości wymaga od współczesnych organizacji systemowego inwestowania w kapitał ludzki oraz programy edukacyjne.

Slowa kluczowe: automatyzacja rachunkowości, sztuczna inteligencja, działy finansowo-księgowe, badanie ankietowe, systemy ERP

AI AND AUTOMATION IN ACCOUNTING: EMPLOYEES' PERSPECTIVES FROM FINANCIAL AND ACCOUNTING DEPARTMENTS

Abstract: In recent years, a dynamic increase in the importance of automation and digitisation of processes in the financial industry has been observed. The main objective of this article is to examine the opinions of financial industry employees in Poland regarding the implemented automation processes and the tools supporting these solutions in the workplace. The empirical

research was conducted using the electronic technique (CAWI) by means of an author's survey questionnaire on a sample of 101 respondents directly related to the financial sector. The results of the analysis indicate that automation exerts a clearly positive impact on daily work and time organisation, primarily through the reduction of routine and repetitive tasks. The impact of technology on limiting manual errors was assessed as moderate, which proves that continuous human supervision over information systems still remains necessary. The majority of the respondents perceive in automation an opportunity to develop new digital competencies and increase their attractiveness on the job market. The main implementation barriers identified in the study have a subjective basis and concern insufficient training of personnel and the negligible involvement of operational employees in the process of designing innovative solutions. Successful digital transformation in the area of accounting requires modern organisations to systematically invest in human capital and educational programmes.

Keywords: accounting automation, artificial intelligence **(AI)**, financial and accounting departments, survey research, ERP systems

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost znaczenia automatyzacji oraz cyfryzacji procesów w skali całej gospodarki. W branży finansowej zjawisko to nabiera szczególnego znaczenia ze względu na specyfikę realizowanych zadań, opierających się w dużej mierze na przetwarzaniu danych oraz powszechnym wykorzystaniu narzędzi cyfrowych. Zgodnie z raportem McKinsey & Company, wdrażanie rozwiązań automatyzacyjnych historycznie przyczyniało się do wzrostu produktywności, natomiast obecnie – w warunkach malejącego udziału ludności w wieku produkcyjnym – może stanowić istotny czynnik łagodzący negatywne skutki demograficzne dla współczesnej gospodarki(McKinsey, 2025).

W dyskusji dotyczącej transformacji cyfrowej dominującą perspektywą pozostaje jednak punkt widzenia przedsiębiorstw, podczas gdy zdecydowanie rzadziej przedmiotem analizy staje się jej bezpośredni wpływ na pracowników. Dotychczasowe badania w tym obszarze koncentrują się głównie na wysoko rozwiniętych gospodarkach krajów Europy Zachodniej oraz USA. Przykładem jest raport PwC, w którym wskazano, że 37% pracowników wyraża obawy przed utratą zatrudnienia w wyniku postępującej automatyzacji (PwC, 2018). Jednocześnie autorzy tego opracowania podkreślają, że proces ten nie powinien prowadzić do masowego wzrostu bezrobocia do 2030 roku, przynajmniej nie w większym stopniu, niż miało to miejsce w ostatnich dekadach zapoczątkowanych rewolucją cyfrową (PwC, 2018).

Głównym celem artykułu jest zbadanie opinii pracowników branży finansowej w Polsce na temat wdrażanych procesów automatyzacji oraz wykorzystywanych narzędzi wspierających opartych na sztucznej inteligencji w działach finansowo-księgowych. W związku z tak zarysowanym kontekstem, zasadne stało się postawienie następujących pytań badawczych:

- W jaki sposób automatyzacja wpływa na codzienną pracę pracowników działów finansowo-księgowych?

- Czy wdrażanie automatyzacji przyczynia się do poprawy jakości danych i ograniczenia liczby błędów?
- Jakie są najważniejsze bariery wdrażania automatyzacji w przedsiębiorstwach?
- Jakie są główne szanse i zagrożenia postrzegane przez pracowników w kontekście wdrażania automatyzacji?

Odpowiedzi na powyższe pytania zostaną zaprezentowane w dalszej części opracowania w oparciu o wyniki przeprowadzonego badania empirycznego oraz jego analizę.

W branży finansowej obserwuje się gwałtowny postęp w zakresie automatyzacji operacji (Zieniuk, 2020). Zjawisko to występuje zarówno w sektorze przedsiębiorstw prywatnych, jak i w sferze publicznej. W uproszczeniu można stwierdzić, że technologie automatyzacji mają na celu zastąpienie pracy człowieka w niektórych zadaniach realizowanych w ramach procesów gospodarczych(Filippi et al., 2023). Rachunkowość określana jest często mianem „języka biznesu", ponieważ umożliwia opis rzeczywistości gospodarczej oraz transfer znaczeń i informacji(Bąk et al., 2022; Kwiecień and Wójcik-Jurkiewicz, 2022). Jako gałąź rachunkowości najbardziej podatną na automatyzację wskazuje się zazwyczaj księgowość. Dostarcza ona kierownictwu i inwestorom kluczowych danych na temat funkcjonowania przedsiębiorstwa, dlatego też wykorzystanie systemów pozwalających na analizę wielkich zbiorów informacji jest w tym obszarze kluczowe(Gherman et al., 2021).

Termin RPA (Robotic Process Automation) to szerokie pojęcie, które obejmuje swoją definicją szereg narzędzi operujących na interfejsach innych systemów w sposób analogiczny do działania człowieka(van der Aalst et al., 2018). Jednym z kluczowych trendów jest obecnie transformacja
w kierunku informatyzacji i automatyzacji księgowości, a także wdrażania rozbudowanych systemów finansowo-księgowych oraz ERP(Hyży et al., n.d.). W literaturze i badaniach naukowych często dostrzega się także zalety wykorzystania chmury obliczeniowej, która umożliwia przechowywanie ogromnych ilości danych poza dyskiem lokalnym komputera(Khanom, 2017).

Na szczeblu państwowym obserwuje się również wdrażanie rozwiązań cyfrowych, takich jak Krajowy System e-Faktur (KSeF). Wdrożenie tego systemu stanowi kluczowy element cyfryzacji administracji podatkowej w Polsce, rozumianej jako zwiększenie efektywności administracji publicznej oraz dostosowanie jej do współczesnych wyzwań(Jabłońska, and Podlecki, 2025). Jedną z podstawowych konsekwencji wprowadzenia tego rozwiązania będzie automatyzacja czynności związanych z fakturowaniem transakcji sprzedaży i zakupu(Mierzejewska, 2025). Wśród kluczowych założeń projektodawcy znalazło się zwiększenie bezpieczeństwa obrotu gospodarczego oraz konkurencyjności podmiotów stosujących fakturowanie w ramach KSeF (Kobylski, 2025). Wdrażanie narzędzi cyfrowych i automatyzacja procesów finansowo-księgowych jest, według badań KPMG, uznawane za jedną z największych szans biznesowych przez 41% dyrektorów finansowych(KPMG, 2024). We współczesnych warunkach rynkowych wdrażanie racjonalnej automatyzacji staje się kluczowe

dla utrzymania konkurencyjności przedsiębiorstwa oraz poprawy efektywności zarządzania finansami.

Współczesne przedsiębiorstwa, chcąc utrzymać przewagę w coraz bardziej konkurencyjnym środowisku rynkowym, zmuszone są do wykorzystywania zróżnicowanych narzędzi pozwalających na automatyzację procesów finansowo-księgowych. Jednymi z najstarszych i najbardziej rozpowszechnionych rozwiązań, szczególnie w większych podmiotach gospodarczych, są systemy ERP. Architektura ERP pozwala na integrację wielu różnych procesów i funkcji biznesowych w ramach jednego systemu IT(Helmut et al., 2000). Wdrożenie tego typu platform umożliwia zintegrowanie obszarów takich jak logistyka, finanse, produkcja oraz kadry i płace (Lech, 2003). Z perspektywy obszaru finansowego, w zależności od stopnia rozbudowania danego modułu, system ten obejmuje księgę główną, raporty finansowe, controlling, zarządzanie środkami trwałymi oraz rachunek przepływów pieniężnych(Lech, 2003). Kolejnym, bardzo istotnym narzędziem jest technologia zautomatyzowanej robotyzacji procesów, czyli Robotic Process Automation (RPA). RPA można zdefiniować jako szybkie i relatywnie tanie oprogramowanie działające jako usługa sieciowa, które ma na celu zastąpienie człowieka w wykonywaniu określonych czynnośći (Fersht and Slaby, 2012). Rozwiązanie to może być w łatwy sposób skonfigurowane i wytrenowane do realizowania powtarzalnych, proceduralnych zadań o dużym wolumenie, zastępując w tym zakresie manualne działania ludzkie(Jędrzejka, 2019). Oprogramowanie to, w przeciwieństwie do klasycznego podejścia programistycznego, umożliwia przeprowadzenie automatyzacji wewnątrz organizacji bez konieczności dokonywania głębokich zmian w dotychczasowych systemach informatycznych (van der Aalst et al., 2018). Od 2016 roku obserwowalny jest szczególny wzrost zainteresowania tą technologią, zwłaszcza w sektorze prac biurowych (Pypłacz and Sasak, 2022). Najnowszym instrumentem wykorzystywanym w automatyzacji operacji z zakresu finansów i rachunkowości są modele językowe generatywnej sztucznej inteligencji. Tomasz Zalewski zdefiniował sztuczną inteligencję jako: „system, który pozwala na wykonywanie zadań wymagających procesu uczenia się i uwzględniania nowych okoliczności w toku rozwiązywania danego problemu i który może w różnym stopniu – w zależności od konfiguracji – działać autonomicznie oraz wchodzić w interakcję z otoczeniem” (Zalewski, 2020). Chociaż AI jest najczęściej postrzegane jako narzędzie wspierające automatyzację rutynowych zadań księgowych, niesie ono ze sobą również potencjał do transformacji całego zawodu księgowego (Jędrzejka, 2026; Wójcik-Jurkiewicz, 2015). Wymienione technologie stanowią jedynie najważniejsze przykłady rozwiązań stosowanych we współczesnych procesach automatyzacji, jako że w specyficznych sytuacjach gospodarczych wykorzystuje się szereg innych, dedykowanych narzędzi.

Zachodzący współcześnie proces automatyzacji oraz wdrażania rozwiązań opartych na generatywnej sztucznej inteligencji niesie ze sobą daleko idące skutki. Z jednej strony rewolucja ta oferuje niespotykane nigdy wcześniej możliwości, z drugiej zaś brak adaptacji do nowych warunków może nieść negatywne konsekwencje dla pracowników branży finansowej. Wśród zalet najczęściej wymienia się eliminację prostych i powtarzalnych zadań, co ma pozwolić na skupienie się na analizie oraz interpretacji bardziej wymagających danych, a w rezultacie poprawić efektywność pracy i satysfakcję z jej wykonywania(Kowalski, n.d.). Powiązaną z tym korzyścią, na którą w swoim raporcie zwracają uwagę Eckhard Voss i Hannah Riede, jest większa autonomia oraz skrócenie czasu pracy (Voss, and Riede, 2018). Z kolei zdaniem M. Łady „automatyzacja procesu jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym do pełnej autonomizacji procesu" (Łada and Martinek-Jaguszewska, 2023). Twierdzenie to bezpośrednio pokrywa się z przytoczonymi wyżej badaniami. Wdrożenie sztucznej inteligencji i procesów uczenia maszynowego pozwala na sprawne podejmowanie decyzji oraz skuteczne znajdowanie anomalii w dużych zestawach danych (Herath and Herath, 2024). Z perspektywy osób zajmujących się audytem niewątpliwą zaletą pozostaje fakt, że zintegrowane systemy księgowe umożliwiają monitorowanie pełnej historii wszystkich operacji i szybkie wykrywanie wszelkich nieprawidłowości (Burżacka, n.d.). Analizując wady wdrażania automatyzacji, należy zauważyć, że duży niepokój – szczególnie u osób młodych, dopiero wchodzących na rynek pracy – budzi kwestia znacznego spadku popytu na pracę. Młodzi pracownicy, nieposiadający jeszcze bogatego doświadczenia zawodowego, mogą stać się mniej atrakcyjni dla pracodawców, ponieważ większość prostych zadań, które dotychczas wykonywali, może zostać zautomatyzowana (Kowalski, n.d.). Potwierdzają to dane empiryczne; według badania przeprowadzonego przez EY, aż 74% przedsiębiorstw ograniczyło rekrutację w 2025 roku w związku z implementacją sztucznej inteligencji(EY, 2026). Największa redukcja zatrudnienia dotyczy w szczególności prac niewymagających dużego doświadczenia oraz zadań rutynowych, i wynosi odpowiednio 35% oraz 29%(EY, 2026). Z perspektywy bardziej doświadczonych pracowników głównym wyzwaniem wydaje się być konieczność ciągłego podnoszenia kwalifikacji oraz nauki obsługi nowych systemów w celu utrzymania konkurencyjności na rynku pracy. Proces ten może sprawiać problemy zwłaszcza starszym pracownikom, którzy przyzwyczajeni są do pewnych utrwalonych schematów działania. Niewątpliwą wadą omawianych narzędzi pozostaje również ich niemożność zrozumienia szerszego kontekstu, co sprawia, że udział człowieka w procesie podejmowania decyzji ekonomicznych nadal jest niezbędny(Li and Li, 2018). Ważnym aspektem w kontekście wykorzystania AI pozostają także kwestie etyki i transparentności. Modele sztucznej inteligencji działają bowiem na podstawie algorytmów, przez co mogą okazać się stronnicze i nieobiektywne(Altawalbeh et al., 2025).

Metody

Głównym celem przeprowadzonego badania była analiza znaczenia automatyzacji procesów rachunkowości w pracy działów finansowo-księgowych oraz ocena jej wpływu na wykonywanie codziennych obowiązków przez pracowników branży finansowej. W ramach celów szczegółowych podjęto próbę zbadania poziomu znajomości narzędzi wspierających rozwiązania automatyzacyjne, a także postrzeganych korzyści wynikających z ich wdrażania oraz potencjalnych zagrożeń związanych z rosnącą digitalizacją operacji finansowo-księgowych.

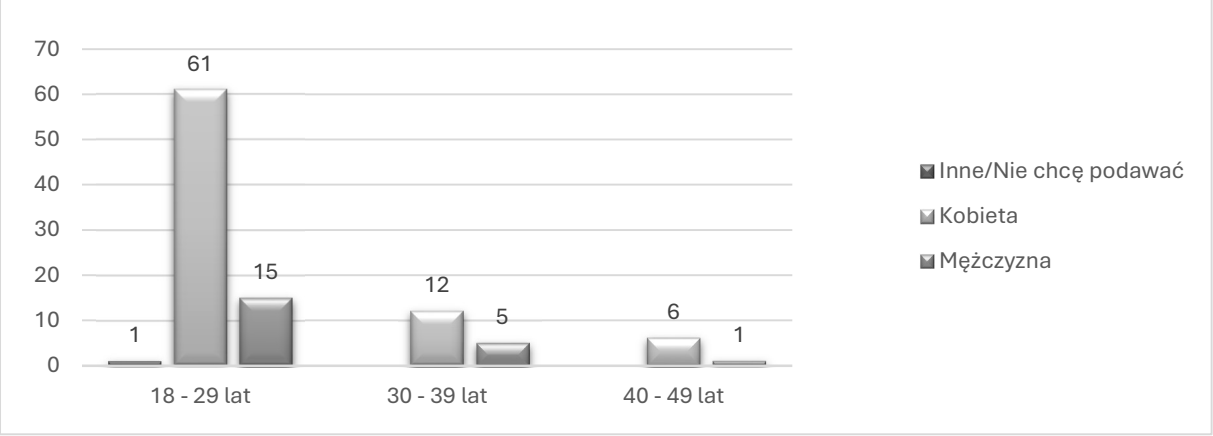
Przedmiotem badania jest wpływ automatyzacji procesów rachunkowości na funkcjonowanie działów finansowych oraz na zatrudnione w nich osoby. Z kolei podmiot badania stanowili pracownicy, a także osoby niepracujące obecnie, lecz posiadające wcześniejsze doświadczenie zawodowe w branży finansowej – w szczególności w obszarze księgowości, controllingu, audytu oraz pokrewnych struktur finansowo-księgowych.

Narzędziem badawczym był autorski kwestionariusz ankiety, opracowany na potrzeby niniejszego opracowania. Badanie zostało przeprowadzone techniką elektroniczną (CAWI), co umożliwiło dotarcie do szerokiego, zdywersyfikowanego grona respondentów w relatywnie krótkim czasie. Kwestionariusz składał się z 15 pytań, obejmujących formy jednokrotnego oraz wielokrotnego wyboru, a także pytania oparte na skali Likerta. Zakres merytoryczny pytań dotyczył m.in. znajomości dostępnych narzędzi cyfrowych, poziomu wdrożenia rozwiązań automatyzacyjnych w organizacjach, postrzeganych korzyści i zagrożeń, jak również wpływu tych procesów na codzienną pracę oraz rozwój kompetencji pracowników. W badaniu wzięło udział 101 respondentów związanych bezpośrednio z branżą finansową. Wśród ankietowanych znaleźli się pracownicy działów księgowości, controllingu, audytu oraz innych obszarów funkcjonalnych zorientowanych na finanse. Próba badawcza obejmowała osoby o zróżnicowanym stażu pracy i odmiennym doświadczeniu zawodowym, co pozwoliło na uzyskanie szerokiego spektrum opinii dotyczących informatyzacji operacji w komórkach finansowo-księgowych. Badanie miało charakter całkowicie dobrowolny i anonimowy.

Wyniki

W badaniu ankietowym wzięło udział 101 respondentów. W strukturze demograficznej badanej grupy zdecydowaną większość stanowiły kobiety, reprezentowane przez 79 osób, co stanowiło 78% ogółu próby. Mężczyźni stanowili grupę 21 ankietowanych (21%), natomiast jedna osoba (1%) zadeklarowała inną płeć lub zdecydowała o nieudzielaniu odpowiedzi na to pytanie. Biorąc pod uwagę kryterium wieku, wśród uczestników badania dominowały osoby młode, w przedziale 18–29 lat, które tworzyły 77% struktury (77 osób). Znacznie mniej liczne były pozostałe grupy wiekowe, obejmujące odpowiednio osoby w wieku 30–39 lat – 17% (17 osób) oraz od 40 do 49 lat – 7% (7 osób). Taki rozkład danych demograficznych pozwala stwierdzić, że zebrany materiał empiryczny w głównej mierze odzwierciedla perspektywę pokolenia wchodzącego na rynek pracy, które ukształtowało się już w realiach powszechnej cyfryzacji. Szczegółowy rozkład respondentów z uwzględnieniem ich wieku oraz płci odzwierciedla rysunek 1.

Rysunek 1.Struktura płci i wieku

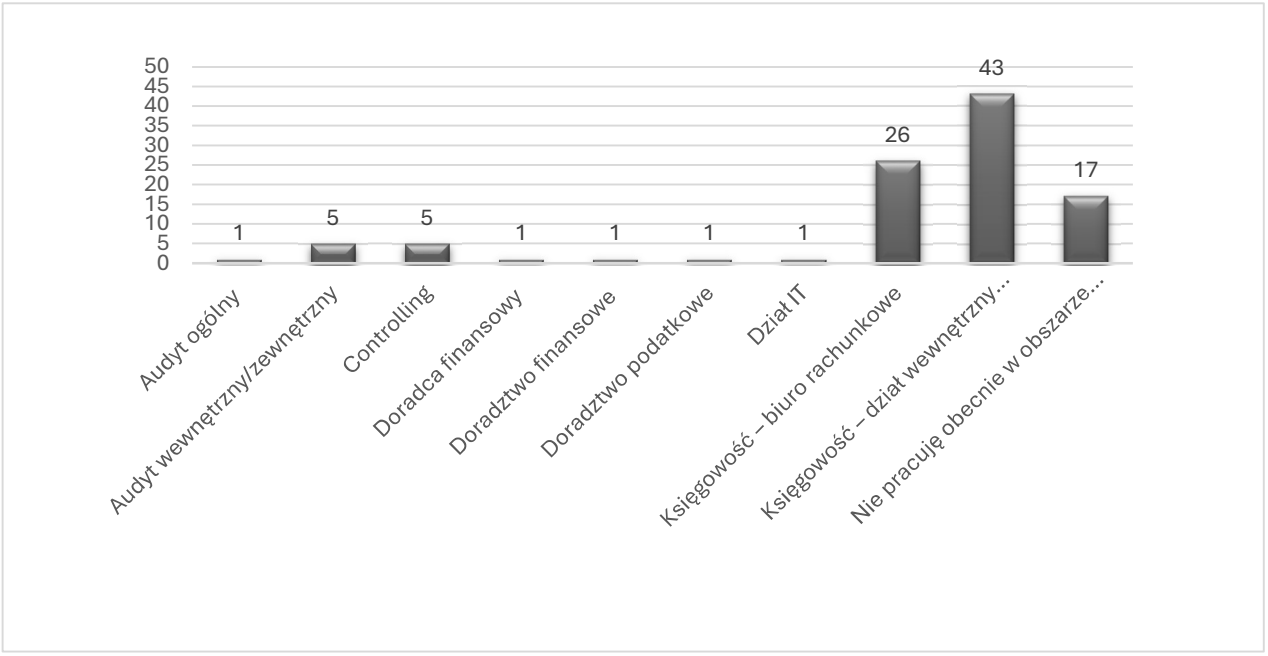


Źródło: opracowanie własne n =101

Uzyskana struktura demograficzna wskazuje na wyraźną dominację młodszych respondentów, co może mieć bezpośredni wpływ na postrzeganie automatyzacji – w szczególności jako zjawiska bardziej naturalnego i wspierającego codzienną pracę, ze względu na większą otwartość tej grupy na nowe technologie. Są to osoby dopiero zaczynające swoją ścieżkę na rynku pracy i nieposiadające jeszcze bogatego doświadczenia. Z kolei w przypadku reprezentantów starszych przedziałów wiekowych mamy do czynienia głównie ze specjalistami o wieloletnim stażu w branży. Dopełnieniem tak zarysowanego profilu jest analiza struktury zatrudnienia ankietowanych. Pozwala ona ustalić, z jakich dokładnie działów finansowych pochodzą

uczestnicy badania oraz czy zajmują się oni codzienną pracą operacyjną, czy też pełnią role bardziej analityczne. Wielopoziomowe ujęcie stanowisk zajmowanych przez respondentów umożliwia ocenę, w których obszarach organizacji zapotrzebowanie na cyfrowe wsparcie jest najbardziej zauważalne. Ponadto, zestawienie to pozwala zweryfikować, czy charakter wykonywanych obowiązków różnicuje podejście pracowników do nowoczesnych narzędzi informatycznych. Zbiorcze zestawienie obszarów aktywności zawodowej respondentów odzwierciedla rysunek 2.

Rysunek 2.Obszar zatrudnienia respondentów



Źródło: opracowanie własne n =101

Analizując obszar zatrudnienia respondentów, należy zauważyć, że największą grupę stanowili pracownicy księgowości, zarówno w działach wewnętrznych przedsiębiorstw, jak i w biurach rachunkowych. Łącznie grupy te obejmowały 69 respondentów (69%), co wskazuje na dominujący udział osób wykonujących zadania operacyjne w obszarze finansów.

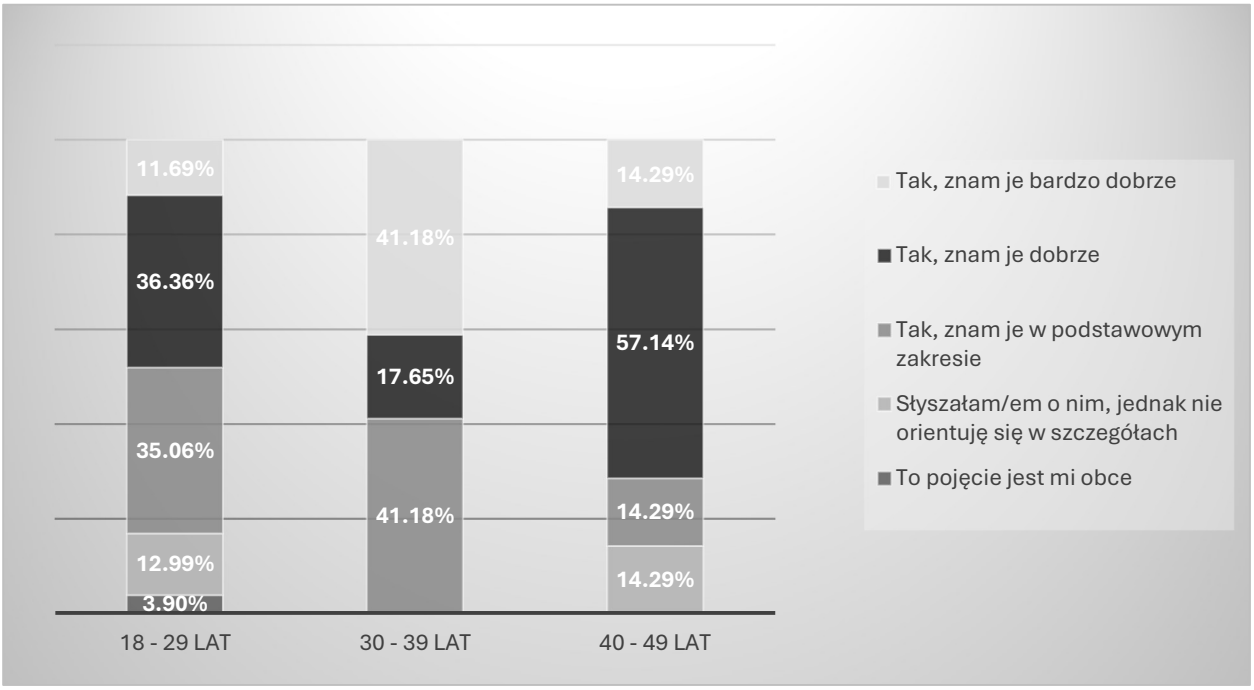
Istotną część próby badawczej stanowili również ankietowani, którzy obecnie nie pracują w obszarze finansów, jednak deklarują wcześniejsze doświadczenie w tej branży. Wśród pozostałych obszarów zatrudnienia wyróżnić można audyt (6%) oraz controlling (5%), które były reprezentowane w znacznie mniejszym stopniu.

Pod względem stażu pracy ponad połowę ankietowanych (55 osób, 54%) stanowili pracownicy posiadający mniej niż 2 lata doświadczenia zawodowego. Kolejną istotną grupę tworzyły osoby z doświadczeniem od 2 do 5 lat (23%), natomiast respondenci z dłuższym stażem pracy byli reprezentowani w ograniczonym zakresie. Uzyskana struktura próby wskazuje na dominację osób z relatywnie krótkim doświadczeniem zawodowym, co może mieć

wpływ na sposób postrzegania automatyzacji – w szczególności jako narzędzia wspierającego codzienną pracę oraz rozwój kompetencji.

W kontekście analizy automatyzacji istotne było również określenie poziomu znajomości tego zagadnienia wśród respondentów. Weryfikacja tego obszaru pozwala ocenić, na ile świadomie pracownicy podchodzą do wdrażanych technologii oraz czy wiek i doświadczenie zawodowe różnicują ich wiedzę w tym zakresie. Zrozumienie stopnia przygotowania merytorycznego kadr stanowi bowiem kluczowy punkt wyjścia do oceny efektywności samej implementacji systemów cyfrowych w strukturach przedsiębiorstwa. Szczegółowy rozkład odpowiedzi ankietowanych w podziale na poszczególne grupy wiekowe ilustruje rysunek 3.

Rysunek 3.Poziom znajomości automatyzacji wśród respondentów



Źródło: opracowanie własne

Prawie wszyscy respondenci mieli styczność z pojęciem automatyzacji w rachunkowości, przy czym zdecydowana większość deklaruje jego znajomość przynajmniej na poziomie podstawowym. Najwyższy poziom wiedzy w tym obszarze wskazują badani w wieku 40–49 lat, spośród których 71,43% ocenia swoją orientację jako co najmniej dobrą. W przypadku najmłodszej grupy wiekowej (18–29 lat) odsetek ten wynosi 48,05%. Na podstawie uzyskanych danych można by wnioskować, że starsze grupy ankietowanych charakteryzują się wyższym stopniem specjalizacji w zakresie nowoczesnych technologii niż osoby dopiero rozpoczynające karierę zawodową. Należy jednak uwzględnić strukturę próby badawczej, w której dominują osoby młode, natomiast starsi respondenci, reprezentowani w mniejszym stopniu, to głównie specjaliści posiadający bogate doświadczenie. Uwarunkowanie to może wpływać na zebrane

odpowiedzi i ograniczać ich reprezentatywność. Analiza zależności pomiędzy poziomem wiedzy na temat automatyzacji a jej wdrażaniem w przedsiębiorstwach wskazuje na wyraźną korelację pomiędzy tymi zmiennymi. Wśród osób deklarujących bardzo dobrą znajomość tej tematyki aż 88% wskazuje, że implementacja tego typu rozwiązań stanowi obecnie priorytet w ich organizacji. Wraz ze spadkiem poziomu wiedzy rośnie odsetek respondentów, którzy nie posiadają szczegółowych informacji na temat wdrażania systemów cyfrowych w swoich miejscach pracy lub wskazują na ich całkowity brak. Zebrane dane sugerują, że wyższy stopień informatyzacji w przedsiębiorstwie bezpośrednio sprzyja zwiększeniu świadomości pracowników w zakresie nowoczesnych narzędzi, co wynika z ich bieżącego kontaktu z technologią w środowisku zawodowym.

Wśród najczęściej wybieranych przez respondentów rozwiązań wspierających automatyzację rachunkowości dominują systemy ERP, algorytmy oparte na sztucznej inteligencji oraz aplikacje do e-fakturowania, takie jak KSeF. Platformy ERP oraz AI uzyskały po 64 wskazania, natomiast systemy e-fakturowania zostały wybrane 51 razy. Na kolejnych pozycjach w zestawieniu znalazły się narzędzia klasy Business Intelligence (35 wskazań) oraz zaawansowane funkcje arkuszy kalkulacyjnych, takich jak Excel (27 wskazań). Najrzadziej wybieraną kategorią okazały się technologie RPA, które odnotowały jedynie 5 wskazań. Taki rozkład głosów może wynikać z faktu, że robotyzacja procesów stanowi rozwiązanie wysoce specjalistyczne, wdrażane głównie w dużych podmiotach gospodarczych. Z kolei relatywnie niższa pozycja takich środowisk jak Excel czy Power BI wiąże się prawdopodobnie z ich powszechnym wykorzystaniem w codziennych obowiązkach, przez co pracownicy mogą nie postrzegać ich jako typowych, nowoczesnych narzędzi automatyzacyjnych. Na szczególną uwagę zasługuje wysoki poziom znajomości systemów opartych na sztucznej inteligencji, który zrównał się z popularnością systemów ERP, co bezpośrednio świadczy o rosnącej świadomości technologicznej personelu. Uzyskane dane empiryczne sugerują, że automatyzacja w realiach rynkowych wciąż opiera się na najbardziej podstawowych i rozpowszechnionych standardach, podczas gdy zaawansowane środowiska programistyczne, takie jak RPA, pozostają znacznie mniej znane. Warto dodać, iż w celu zwiększenia przejrzystości i czytelności końcowych wyników, w procesie weryfikacji pominięto deklaracje o braku znajomości jakichkolwiek systemów oraz niestandardowe odpowiedzi własne ankietowanych. Zarysowana w ten sposób struktura wiedzy technologicznej pozwala przypuszczać, że gotowość pracowników do cyfrowej transformacji zależy przede wszystkim od stopnia powszechności danego oprogramowania na rynku.

W celu przeprowadzenia pogłębionej analizy uzyskanych wyników badania, zidentyfikowane korzyści oraz zagrożenia zostały podzielone na trzy podstawowe kategorie: operacyjne, organizacyjne oraz osobiste. Taka wielopoziomowa klasyfikacja pozwala dokładniej ocenić, czy procesy automatyzacji wywierają silniejszy wpływ na codzienne, techniczne czynności pracowników, czy też determinują szersze funkcjonowanie całego przedsiębiorstwa. Ustrukturyzowanie opinii ankietowanych według tego klucza ułatwia

ponadto wskazanie obszarów, w których obawy przed transformacją cyfrową dominują nad potencjalnymi zyskami operacyjnymi. Zbiorcze zestawienie najczęściej pojawiających się odpowiedzi respondentów zawiera tabela 1.

Tabela 1.

Postrzegane korzyści i zagrożenia automatyzacji

Kategoria korzyści i zagrożeń	**Postrzegane korzyści**	**Postrzegane zagrożenia**	**Udział wskazań (%)**
Operacyjne	- ograniczenie powtarzalnych czynności - redukcja popełnianych błędów - lepsza organizacja pracy	- ryzyko awarii systemów - utrata wiedzy procesowej	47,1
Organizacyjne	- Łatwiejszy dostęp do informacji, dzięki systemom ERP - Większa kontrola nad procesami	- Brak odpowiednich szkoleń dla pracowników - Wzrost presji i oczekiwań wobec pracowników - Ryzyka związane z cyberbezpieczeństwem	26,7
Osobiste	- Rozwój kompetencji i zwiększenie atrakcyjności na rynku pracy - Większa satysfakcja z wykonywanej pracy - Skrócenie czasu pracy i lepszy work – life balance	- Znaczne zmniejszenie zapotrzebowania na młodych pracowników - Konieczność ciągłej nauki i podnoszenia kompetencji	26,2

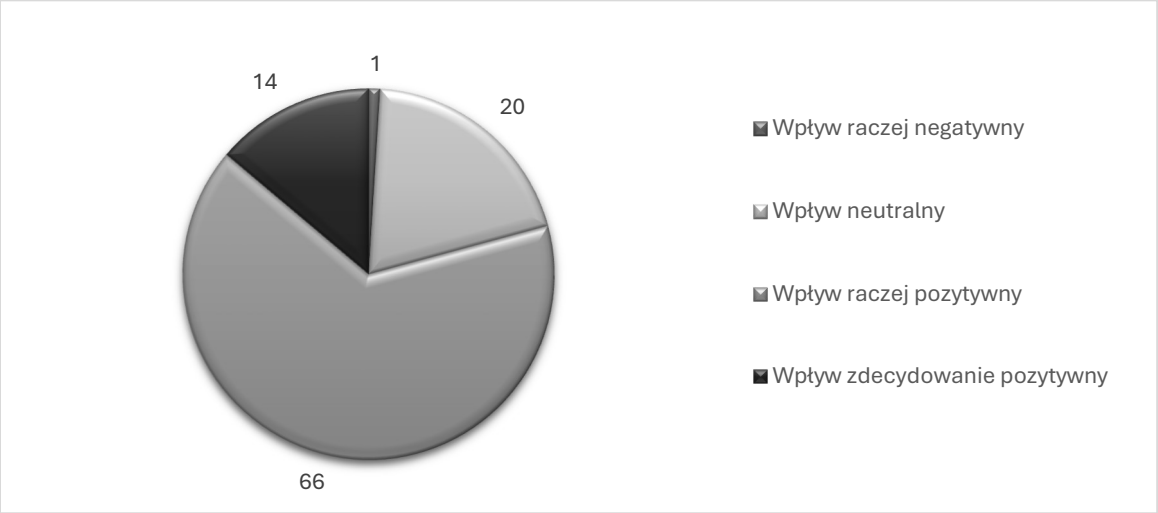
Źródło: opracowanie własne na podstawie badania ankietowego n=101

Największy udział wskazań respondentów przypadł na kategorię operacyjną, co potwierdza, że automatyzacja jest postrzegana przede wszystkim przez pryzmat usprawnienia codziennej pracy oraz bieżących obowiązków. Dalsze pozycje zajęły aspekty organizacyjne oraz osobiste; układ ten sugeruje, iż wpływ nowoczesnych technologii oceniany jest głównie w kontekście ułatwień technicznych, a w zdecydowanie mniejszym stopniu przez pryzmat globalnych zmian strukturalnych czy indywidualnego rozwoju personelu. Powyższa zależność może świadczyć o tym, że ankietowani koncentrują się w pierwszej kolejności na bezpośrednich, namacalnych efektach wdrażania systemów cyfrowych – takich jak bieżąca organizacja zadań czy wydajność wykonywanych czynności. Rzadziej natomiast dostrzegają oni długofalowe konsekwencje informatyzacji dla strategii całej instytucji oraz własnej ścieżki kariery. Taka perspektywa badanych jest typowa dla początkowych faz transformacji technologicznej, kiedy uwaga pracowników skupia się przede wszystkim na adaptacji do nowych narzędzi ekranowych.

Wdrożenie nowoczesnych technologii w obszarze finansowo-księgowym pociąga za sobą istotne zmiany o charakterze jakościowym. W kontekście prowadzonych badań kluczowe stało

się określenie, jak te przekształcenia wpływają na codzienną pracę ankietowanych, poziom ich kompetencji oraz stopień bezbłędności przetwarzanych danych. Ocena tych trzech obszarów pozwala zweryfikować, czy automatyzacja jest postrzegana przez praktyków jako realne wsparcie w ich obowiązkach. Pierwszym elementem poddanym analizie była ogólna ocena wpływu nowych rozwiązań na bieżące zadania pracowników, co obrazuje rysunek 4. Zbadanie tego fundamentalnego aspektu pozwala ustalić wyjściowy punkt widzenia respondentów na stopień informatyzacji ich środowiska pracy.

Rysunek 4.Ocena wpływu automatyzacji na pracę



Źródło: opracowanie własne

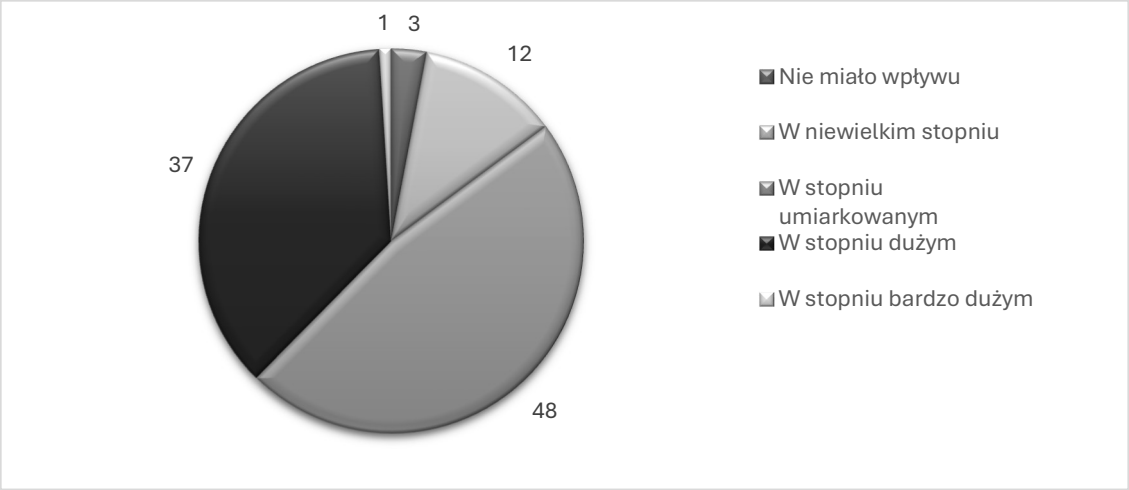
Pozytywny wpływ automatyzacji na codzienne obowiązki zadeklarowało 80 ze 101 respondentów, co stanowi wyraźny dowód na poprawę warunków oraz jakości pracy po wdrożeniu nowoczesnych narzędzi. Z kolei relatywnie niewielki udział odpowiedzi neutralnych i negatywnych stanowi interesującą płaszczyznę interpretacyjną. Może on bowiem wynikać ze zróżnicowanego stopnia zaawansowania technologicznego w poszczególnych przedsiębiorstwach lub z faktu, że część ankietowanych ma ograniczony kontakt z tego typu rozwiązaniami.

W konsekwencji niektórzy pracownicy mogą jeszcze nie odczuwać bezpośrednich efektów cyfryzacji w swojej bieżącej aktywności zawodowej. Podsumowując, uzyskane wyniki empiryczne pozwalają na sformułowanie wniosku, iż wdrażane technologie są w przeważającej mierze postrzegane jako czynnik usprawniający realizację zadań, a nie jako zagrożenie dla tradycyjnego charakteru pracy w działach finansowo-księgowych.

Ta powszechna aprobata dla cyfrowego wsparcia w obszarze organizacji czasu pracy skłania do postawienia pytania, czy równie wysokie oceny dotyczą precyzji generowanych informacji.

Z tego względu kolejnym krokiem badawczym było zweryfikowanie, w jakim stopniu automatyzacja przekłada się na realne ograniczenie pomyłek o charakterze manualnym.

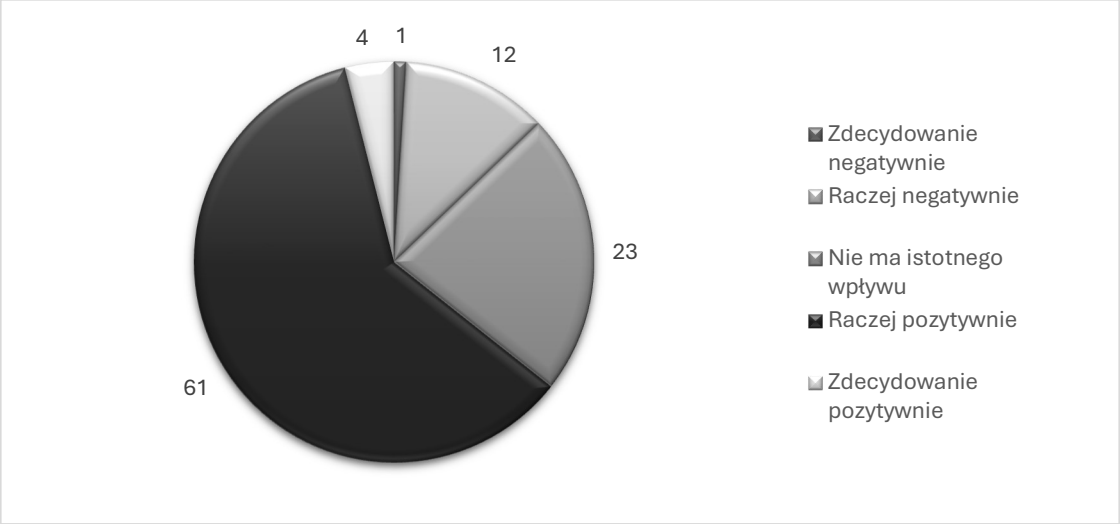
Rysunek 5.Ocena wpływu automatyzacji na liczbę popełnianych błędów



Źródło: opracowanie własne

Wdrożenie nowoczesnych technologii spotkało się z nieco bardziej umiarkowaną oceną w kontekście ograniczania pomyłek w pracy działów finansowych. Najczęstsze wskazywanie na umiarkowany stopień redukcji błędów sugeruje, że obecne oprogramowanie nie gwarantuje stuprocentowej bezbłędności . Najprawdopodobniej wiąże się to z faktem, że automatyzacja obejmuje tylko wybrane fragmenty procesów, przez co pozostałe czynności nadal wymagają bezpośredniego zaangażowania ze strony pracownika. Z tego względu stała kontrola i weryfikacja generowanych zestawień wciąż decydują o ich ostatecznej poprawności. Świadczy to o tym, że nowe systemy działają jako narzędzie wspomagające, a nie eliminujące człowieka, którego rola pozostaje niezmiennie kluczowa. Kolejnym etapem analizy, nierozerwalnie związanym
z charakterem wykonywanych zadań, było zbadanie wpływu automatyzacji na rozwój kompetencji pracowników. Weryfikacja tego obszaru pozwala ocenić, czy cyfryzacja rutynowych czynności zmusza kadrę do zdobywania nowej wiedzy z zakresu systemów IT, czy też prowadzi do deprecjacji tradycyjnych umiejętności księgowych. Ponadto, badanie to rzuca światło na to, jak sami zatrudnieni postrzegają swoją pozycję i perspektywę rozwoju w zautomatyzowanym środowisku pracy. To, jak ankietowani oceniają zmiany w zakresie swoich umiejętności, odzwierciedla rysunek 6.

Rysunek 6.Ocena wpływu automatyzacji na rozwój kompetencji

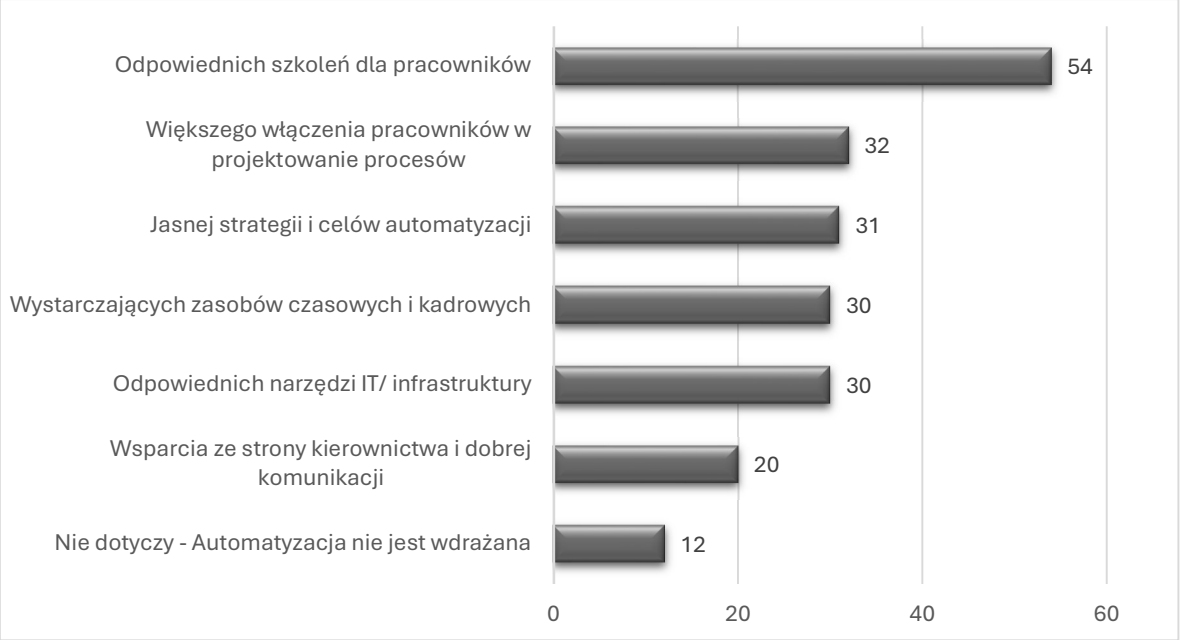


Źródło: opracowanie własne

W przypadku wpływu automatyzacji na rozwój kompetencji ponad 64% respondentów wyraziło opinię pozytywną. Wynik ten sugeruje, że korzystanie z nowoczesnych narzędzi sprzyja rozwijaniu umiejętności cyfrowych oraz zwiększa atrakcyjność pracowników na współczesnym rynku pracy. Powyższa zależność wiąże się bezpośrednio z faktem, iż wdrażanie systemów automatyzacyjnych wymusza konieczność nabywania nowej wiedzy, w szczególności w zakresie zaawansowanej obsługi systemów informatycznych oraz interpretacji danych. Uzyskane wyniki wskazują, że cyfryzacja nie jest postrzegana przez większość ankietowanych jako czynnik degradujący ich dotychczasowe kwalifikacje, lecz raczej jako szansa na ustawiczny rozwój osobisty i zdobywanie unikalnych sprawności zawodowych. Tym samym pracownicy dostrzegają potrzebę ewolucji swojej roli w strukturach przedsiębiorstwa i wykazują dużą gotowość do adaptacji. Otwartość ta i chęć samodoskonalenia napotykają jednak w praktyce gospodarczej na konkretne przeszkody o charakterze systemowym oraz organizacyjnym.

Wdrożenie automatyzacji w praktyce gospodarczej rzadko przebiega w sposób całkowicie bezproblemowy. Z tego względu w kwestionariuszu ankiety zwrócono uwagę na konkretne przeszkody, z jakimi mierzą się pracownicy w swoich organizacjach. Poznanie tych barier pozwala zrozumieć, dlaczego niektóre projekty informatyczne nie przynoszą oczekiwanych rezultatów. Identyfikacja czynników hamujących transformację cyfrową jest kluczowa dla optymalizacji procesów zarządczych i minimalizowania oporu struktur organizacyjnych. Pozwala to na precyzyjne oddzielenie ograniczeń o charakterze czysto technicznym od barier związanych z kapitałem ludzkim. Zbiorcze zestawienie najczęściej wskazywanych przez ankietowanych trudności odzwierciedla rysunek 7.

Rysunek 7.Bariery wdrażania automatyzacji



Źródło: opracowanie własne

W kwestii największych barier utrudniających implementację nowoczesnych systemów, zdaniem ankietowanych kluczową rolę odgrywa niewystarczające przeszkolenie personelu w zakresie wprowadzanych narzędzi. Drugim najczęściej wybieranym czynnikiem jest znikomy udział pracowników w procesie projektowania rozwiązań, które mają przecież bezpośredni wpływ na ich codzienną pracę. Na tej podstawie można wnioskować, że najpoważniejsze przeszkody mają podłoże subiektywne i są ściśle powiązane z kapitałem ludzkim. Kolejne istotne blokady odnoszą się do czynników organizacyjno-technologicznych, takich jak brak odpowiednich zasobów kadrowo-czasowych oraz niedostatki infrastruktury IT. Uwarunkowania te, choć bez wątpienia istotne, nie są jednak wskazywane jako krytyczne.

Mniejszą, choć wciąż zauważalną rolę odgrywa brak wsparcia ze strony kierownictwa oraz wadliwa komunikacja w procesie zarządzania zmianą. Tego typu sytuacja może działać demotywująco na zespół oraz prowadzić do poczucia chaosu organizacyjnego. Podsumowując, dominujące bariery wdrożeniowe w przedsiębiorstwach są związane przede wszystkim z poziomem wiedzy pracowników oraz stopniem ich partycypacji w całym procesie. Aby skutecznie cyfryzować procedury, organizacje powinny w pierwszej kolejności inwestować w programy szkoleniowe oraz aktywnie angażować kadry w projektowanie innowacji. Działania te mogą przyczynić się do szybszej i znacznie bardziej efektywnej integracji rozwiązań automatyzacyjnych w strukturach przedsiębiorstwa. Powyższe wnioski jasno dowodzą, że sukces transformacji cyfrowej w księgowości zależy nie tyle od doskonałości samej technologii, ile od stopnia przygotowania tworzących ją ludzi. Uznanie czynnika

ludzkiego za centralny element informatyzacji stanowi kluczowy wniosek z przeprowadzonego badania empirycznego.

Podsumowanie

Przeprowadzone badanie ankietowe oraz uzyskane na jego podstawie wyniki pozwalają na udzielenie jednoznacznych odpowiedzi na pytania badawcze sformułowane we wstępie niniejszego opracowania. Zgromadzony materiał empiryczny dowodzi, że automatyzacja wywiera korzystny wpływ na organizację pracy oraz przyczynia się do redukcji popełnianych błędów operacyjnych. Jednocześnie proces implementacji nowoczesnych systemów w wielu przypadkach nie przebiega w sposób całkowicie bezproblemowy, wykazując obecność istotnych barier związanych głównie z niewystarczającym przygotowaniem merytorycznym personelu oraz brakami w infrastrukturze IT. Z kolei w kontekście analizy największych szans i zagrożeń, w opiniach respondentów zdecydowanie dominują czynniki bezpośrednio zorientowane na codzienną aktywność zawodową oraz jej bieżącą strukturę.

Uzyskane wyniki wskazują, że automatyzacja procesów rachunkowości w sposób fundamentalny modyfikuje model funkcjonowania działów finansowo-księgowych. Z tego względu jej skuteczne i efektywne wdrażanie powinno być każdorazowo wspierane przez systemowy rozwój kompetencji cyfrowych pracowników oraz ich aktywne włączanie w proces współtworzenia nowych rozwiązań technologicznych. Tylko synergia zaawansowanych systemów informatycznych z odpowiednio przygotowanym i zaangażowanym kapitałem ludzkim pozwala na pełne wykorzystanie potencjału transformacji cyfrowej. Wdrożenie prezentowanych rekomendacji może zatem stanowić dla współczesnych przedsiębiorstw kluczowy czynnik budowania trwałej przewagi konkurencyjnej na dynamicznie zmieniającym się rynku.

Bibliografia

1. Altawalbeh, M., Al Frijat, Y., and Alhajaya, M. (2025). Pros and cons of using artificial intelligence in accounting: The dual effect and financial control. *International Review of Management and Marketing*, 202.
2. Bąk, M., Strojek-Filus, M., Kobiela-Pionner, K., and Mastalerz, M. (2022). *Narracje w sprawozdawczości finansowej i niefinansowej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.
3. Burżacka, M. (n.d.). E-KSIĘGOWOŚĆ: TREND CZY OBOWIĄZEK W NOWOCZESNYM ZARZĄDZANIU FINANSAMI?. *Przedsiębiorstwa W Gospodarce Cyfrowej*, 93.
4. EY (2026). Sztuczna inteligencja zmienia polityki zatrudnienia w firmach w Polsce. EY.
5. Fersht, P., and Slaby, J. (2012). Robotic automation emerges as a threat to traditional low-cost outsourcing. *Horses for Sources London*.
6. Filippi, E., Mariasole, B., and Sandro, T. (2023). Automation technologies and their impact on employment: A review, synthesis and future research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 191.
7. Gherman, M., Molociniuc, M., and Grosu, V. (2021). Digitalization of Accounting-trends and Perspectives. *Journal of Information Systems and Operations Management*, 104–113.
8. Helmut, K., Rosemann, M., and Gable, G. (2000). What is ERP. *Information Systems Frontiers*, 141–162.
9. Herath, S., and Herath, L. (2024). Emerging trends and challenges in the digital transformation of accounting: A review of the literature. *Global Journal of Accounting and Economic Research*, 122.
10. Hyży, M., Grabowska-Kaczmarczyk, E., Jędrczuk, E., and Obrzeżgiewicz, D. (n.d.). *Rachunkowość i zawód księgowego wobec zmian w podatkach i automatyzacji* (2021st ed.). IUS PUBLICUM, Katowice.
11. Jabłońska, M., and Podlecki, M. (2025). Krajowy System e-Faktur – innowacja w polskim systemie podatkowym. *Progress*, 16, 207–220.
12. Jędrzejka, D. (2019). Robotic process automation and its impact on accounting. *Zeszyty Teoretyczne Rachunkowości*, 105, 137–166.
13. Jędrzejka, D. (2026). The AI paradox: How AI dependence may erode accounting expertise. *Zeszyty Teoretyczne Rachunkowości*, 67.

14. Khanom, T. (2017). Cloud accounting: a theoretical overview. *Journal of Business and Management*, 31–38.
15. Kobylski, P. (2025). Krajowy System e-Faktur–bariery i wyzwania transformacji fakturowania. *Palestra*, 90–101.
16. Kowalski, J. (n.d.). Automatyzacja w Księgowości: Szanse i Zagrożenia dla Kariery Pokolenia Z.
17. KPMG (2024). Nowoczesny CFO w transformującej się firmie.
18. Kwiecień A.,Wójcik-Jurkiewicz M. (2022). Corporate Governance as a Tool Supporting Management During a Crisis. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie*, z. 158, s. 337-353.
19. Łada, M., and Martinek-Jaguszewska, K. (2023). The autonomization of accounting processes. *Theoretical Journal of Accounting*, 473.
20. Lech, P. (2003). Zintegrowane systemy zarządzania ERP/ERP II. Wykorzystanie w biznesie, wdrażanie. Difin, Warszawa.
21. Li, Z., and Li, Z. (2018). The impact of artificial intelligence on accounting. *Atlantis Press*.
22. McKinsey (2025). A Future That Works: Automation, Employment, And Productivity. McKinsey Company.
23. Mierzejewska, M. (2025). Krajowy System e-Faktur jako akcelerator automatyzacji rachunkowości. *Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów*, 9–27.
24. PwC (2018). Will robots really steal our jobs?. *PwC*.
25. Pypłacz, P., and Sasak, J. (2022). RPA jako narzędzie automatyzacji i optymalizacji procesów. *Organizacja i Kierowanie*, 191, 173–188.
26. Wójcik-Jurkiewicz, M. (2015). Ethical Dimension of Accountant's Job - Invention or Intention [W:] Krasodomska J. & Świetla K. (red.), Współczesne uwarunkowania sprawozdawczości i rewizji finansowej, Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego, 465-475.
27. van der Aalst, W. M. P., Bichler, M., and Heinzl, A. (2018). Robotic process automation. *Business & Information Systems Engineering*.
28. Voss, E., and Riede, H. (2018). Digitalisation and workers participation: What trade unions, company level workers and online platform workers in Europe think.
29. Zalewski, T. (2020). Rozdział I. Definicja sztucznej inteligencji. *Prawo Sztucznej Inteligencji*.
30. Zieniuk, P. (2020). Ewolucja cech jakościowych informacji sprawozdawczej - w kierunku zapewnienia użyteczności dla interesariuszy [W:] Chłapek K., Krajewska S. & Zieniuk P. (red.), Ewolucja sprawozdawczości a potrzeby informacyjne interesariuszy, Wydawnictwo Difin, 15-29.

FORMAL AND INFORMAL AUTHORITY OF THE MANAGER AS A PREDICTOR OF ORGANIZATIONAL EFFECTIVENESS

Marcin TYL[1], Iwona ULENBERG[1]* and Maksymilian PRZERWA[2]

[1] Uniwersytet Gdański, Instytut Psychologii, Gdańsk; ORCID: 0009-0004-4026-4315 (Tyl M.), ORCID: 0009-0005-8473-2771 (Ulenberg I.)

[2] Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Instytut Psychologii, Lublin; mprzerwa123@student.kul.pl; ORCID: 0009-0003-1503-5046

Correspondence: m.tyl.378@studms.ug.edu.pl; Tel.:0048518374415

Abstract: This paper examines how formal and informal managerial authority shape effectiveness at the team and organizational levels, and under what conditions each form contributes to beneficial outcomes. Drawing on an integrative review of organizational research, experimental evidence, and related studies on team functioning, the paper uses Raven's (2004) bases-of-power framework as its main analytical axis, complemented by Kelman's (1958) model, Tyler's (1997) legitimacy perspective, and Self-Determination Theory (Ryan and Deci, 2000; Gagné and Deci, 2005). Formal authority, rooted in hierarchical position and institutional role, is primarily associated with coordination, role clarity, and accountability. Informal authority, grounded in perceived competence, credibility, and interpersonal trust, is linked to socially recognized influence that supports voluntary acceptance, engagement, and more internalized motivation. The review identifies four moderators of these relationships: the nature of work, organizational culture, team maturity, and employee competence. Rather than suggesting the universal superiority of either form, the analysis supports a contingency-based pattern in which both contribute to effectiveness in different ways. The originality of the paper lies in integrating previously fragmented literatures on authority, leadership, legitimacy, and motivation into one framework, while treating informal authority as a distinct construct rather than merely a correlate of broader relational processes. Practical implications concern leader selection, managerial development, and the creation of organizational conditions that foster credibility, trust, and recognized expertise alongside formal role-based authority.

Keywords: formal authority, informal authority, organizational effectiveness, managerial influence, legitimacy.

AUTORYTET FORMALNY I NIEFORMALNY MENEDŻERA JAKO PREDYKTOR EFEKTYWNOŚCI ORGANIZACYJNEJ

Streszczenie: Artykuł analizuje, w jaki sposób formalny i nieformalny autorytet menedżerski kształtują efektywność na poziomie zespołu i organizacji oraz w jakich warunkach każda z tych form przyczynia się do osiągania korzystnych rezultatów. Opierając się na integracyjnym przeglądzie badań organizacyjnych, dowodów eksperymentalnych oraz powiązanych badań nad funkcjonowaniem zespołów, artykuł wykorzystuje model podstaw władzy Ravena (2004) jako główną oś analityczną, uzupełnioną modelem Kelmana (1958), perspektywą legitymizacji Tylera (1997) oraz teorią autodeterminacji (Ryan i Deci, 2000; Gagné i Deci, 2005). Autorytet formalny, zakorzeniony w pozycji hierarchicznej i roli instytucjonalnej, jest przede wszystkim związany z koordynacją, jasnością ról i odpowiedzialnością. Autorytet nieformalny, oparty na postrzeganych kompetencjach, wiarygodności i zaufaniu interpersonalnym, wiąże się ze społecznie uznawanym wpływem, który sprzyja dobrowolnej akceptacji, zaangażowaniu oraz bardziej zinternalizowanej motywacji. Przegląd identyfikuje cztery moderatory tych zależności: charakter pracy, kulturę organizacyjną, dojrzałość zespołu oraz kompetencje pracowników. Zamiast sugerować uniwersalną wyższość którejkolwiek z tych form, analiza wspiera model zależności, zgodnie z którym obie przyczyniają się do efektywności na różne sposoby. Oryginalność artykułu polega na zintegrowaniu wcześniej rozproszonych nurtów literatury dotyczących autorytetu, przywództwa, legitymizacji i motywacji w spójne ramy teoretyczne, przy jednoczesnym traktowaniu autorytetu nieformalnego jako odrębnego konstruktu, a nie jedynie korelatu szerszych procesów relacyjnych. Implikacje praktyczne dotyczą doboru liderów, rozwoju menedżerskiego oraz tworzenia takich warunków organizacyjnych, które wspierają wiarygodność, zaufanie i uznawaną ekspertyzę obok formalnego autorytetu wynikającego z roli.

Słowa kluczowe: autorytet formalny, autorytet nieformalny, efektywność organizacyjna, wpływ menedżerski, legitymizacja.

1. Introduction: Authority as the Foundation of Managerial Influence

Authority in organizations is commonly understood as a legitimate form of influence connected to formal role, organizational structure, and the expectation of compliance, although the concept has not been defined uniformly across disciplines (Barnard, 1938; Yukl, 2013). In organizational economics, a useful distinction is made between formal authority, understood as the right to decide, and real authority, understood as effective control over decisions resulting from the distribution of information and initiative (Aghion and Tirole, 1997). In organizational psychology and management, authority is more often discussed in relation to the bases of social power. French and Raven (1959) distinguished reward, coercive, legitimate, expert, and referent power, while Raven (2004) further clarified the conceptual status of these bases in leadership and organizational settings. For the purpose of this paper, formal authority is used to denote role-based and institutionally legitimized influence associated with hierarchical position, whereas informal authority refers to influence that is socially conferred and grounded in expertise, credibility, and interpersonal recognition rather than formal office (Raven, 2004; Serrat, 2017; Yukl, 2013). Leadership is treated here as a related but broader construct that may

coincide with formal authority, but does not depend on it by definition (Kotter, 1990; Yukl, 2013).

The acceptance of authority depends on psychological processes that extend beyond positional designation alone. Barnard (1938) emphasized that authority is effective only insofar as it is accepted by those to whom directives are addressed. Tyler (1997) argued that voluntary deference to authorities is shaped importantly by perceived legitimacy and by the fairness of procedures through which authority is exercised. Kelman (1958), in turn, distinguished compliance, identification, and internalization as three qualitatively different processes through which social influence may operate. Taken together, these perspectives suggest that the effectiveness of authority depends not only on formal status, but also on how authority is perceived, legitimized, and enacted (Tyler, 1997; Tyler and De Cremer, 2005). In this paper, organizational effectiveness is understood broadly as goal attainment and functional performance at the team and organizational levels, including such dimensions as coordination, execution quality, and adaptive functioning (Marks et al., 2001; Yukl, 2013).

Research on formal, positional authority has typically focused on hierarchy and decision rights (Aghion and Tirole, 1997), whereas research on informal influence has more often examined relational exchange and credibility (Graen and Uhl-Bien, 1995; Serrat, 2017). Recent reviews note that the literatures on power and leadership have often developed along partially separate paths and would benefit from stronger conceptual integration (Sturm et al., 2021). For this reason, the present review treats formal and informal authority as analytically distinct but potentially complementary mechanisms whose joint contribution to effectiveness remains insufficiently specified in the literature.

This diagnostic has a longer intellectual history. House and Aditya (1997), in a comprehensive review of the social scientific study of leadership, noted both the breadth of theoretical development in the field and the persistence of important conceptual gaps, including insufficient integration across major perspectives and mechanisms. Their review covered trait, behavioral, situational, and neo-charismatic approaches, while suggesting that newer paradigms did not always build explicitly enough on earlier contributions. The present paper adopts an integrative strategy in response to this broader problem by locating formal and informal authority within a common framework of social influence processes (Kelman, 1958), legitimacy (Tyler, 1997), and autonomous motivation (Ryan and Deci, 2000), thereby aligning with more recent calls for stronger conceptual integration across the literatures on power and leadership (House and Aditya, 1997; Sturm et al., 2021).

2. Methodology

This paper follows the integrative review methodology, because the problem addressed here does not concern one narrowly defined predictor, but the relationship between two distinct yet potentially complementary forms of managerial influence - formal and informal authority - and their contribution to organizational effectiveness under different conditions. As the article indicates, research on formal authority has focused mainly on hierarchy, decision rights, coordination, and compliance, whereas research relevant to informal authority has more often developed around relational exchange, credibility, trust, and emergent influence. The problem is therefore not only empirical, but also conceptual: the relevant evidence is dispersed across partially separate literatures and lacks sufficient integration. An integrative review was therefore selected as the most appropriate approach, because it allows the joint synthesis of empirical findings, conceptual contributions, and adjacent theoretical literatures relevant to the focal question.

The literature search was conducted between 1 November 2025 and 1 March 2026. Records were identified through PsycINFO, Google Scholar, and Research Rabbit, and the database search was supplemented by backward and forward citation tracing. The search strategy combined four keyword blocks corresponding to the central concepts developed in the article: formal authority, informal authority, managerial influence, and organizational effectiveness. The core search logic was based on the following string, adapted where necessary to the syntax of individual databases: ("formal authority" OR "legitimate power" OR "role-based authority" OR hierarchy OR "decision rights") AND ("informal authority" OR "expert power" OR "referent power" OR credibility OR trust OR "leader-member exchange" OR LMX OR "shared leadership" OR "identity leadership") AND (manager OR leader OR "managerial influence") AND ("organizational effectiveness" OR performance OR coordination OR motivation OR cooperation OR "team effectiveness"). Additional targeted searches were conducted for constructs that were not treated as direct operationalizations of informal authority, but were theoretically relevant to its mechanisms, including psychological safety, autonomy-supportive leadership, and empowering leadership.

Selection proceeded in three stages. First, records retrieved from the databases and citation searches were screened for obvious irrelevance and duplicates. Second, titles and abstracts were reviewed against the topic of the paper, with priority given to English-language scholarly sources directly addressing authority, power, leadership, influence, or effectiveness in work, management, or team settings. Third, potentially relevant texts were examined in full, and only those making a clear conceptual, empirical, or integrative contribution to the distinction

between role-based and socially conferred influence were retained. The final corpus comprised 56 records, corresponding to the sources included in the bibliography. More specifically, Stage 2 broadened the review to studies that did not define informal authority directly, but were theoretically important for explaining the relational, motivational, and interactional mechanisms through which it may emerge, stabilize, or become organizationally consequential. This step was necessary because informal authority remains a relatively intangible and under-specified construct in the literature and is therefore often approached indirectly through adjacent constructs and processes rather than measured in a standalone manner. For this reason, the review retained selected studies on leader-member exchange, trust-based and informal networks, psychological safety, empowering and autonomy-supportive leadership, shared leadership, identity leadership, informal feedback seeking, and relationally grounded influence processes, as they helped illuminate mechanisms relevant to informal authority without being treated as direct substitutes for its definition. In the present bibliography, this second-stage logic is reflected especially in the inclusion of works such as Graen and Uhl-Bien (1995), Gerstner and Day (1997), Edmondson (1999), Kuipers (2009), Mertens et al. (2020), van der Rijt et al. (2013), Drescher et al. (2014), Martin et al. (2016), Fransen et al. (2018), Slemp et al. (2018), Lee et al. (2018), Aggarwal et al. (2020), Clarke et al. (2022), and Fransen et al. (2022).

The inclusion criteria followed from the purpose of the review. Priority was given to English-language peer-reviewed journal articles, scholarly book chapters, and academic monographs directly relevant to authority, power, leadership, influence, and effectiveness in organizational, managerial, or team contexts. A limited number of adjacent studies were also retained when they were theoretically informative for the focal problem and when their inferential limits were explicitly acknowledged in the text. Exclusion criteria followed the same logic. Excluded were sources focused exclusively on influence outside organizational, managerial, or team settings; publications unrelated to effectiveness, coordination, motivation, cooperation, or team functioning; non-scholarly materials; and studies addressing only very broad leadership categories without helping distinguish role-based influence from socially conferred influence. Adjacent studies from sport, student, entrepreneurial, or self-managing contexts were retained only as supplementary evidence, not as equivalent to direct workplace evidence. Stage 3 consisted of the final full-text selection of works to be included in the review proper. At this stage, studies were retained only when they made a sufficiently clear contribution to at least one of three purposes: (a) defining the boundaries of formal or informal authority, (b) clarifying mechanisms through which these forms of influence may affect organizational or team functioning, or (c) supporting the integrative comparison between role-based and socially conferred influence. Conversely, studies were excluded when they were too conceptually distant from informal authority, did not address relational aspects of management, authority, or influence, or did not meaningfully connect these processes to effectiveness-related outcomes. This final-stage filter was especially important for preventing conceptual

overexpansion of informal authority into a loose umbrella category covering any positive relational leadership phenomenon. In this sense, adjacent constructs were included only when they illuminated the mechanism of the focal construct; they were not treated as equivalent operationalizations of informal authority itself. The final corpus comprised 56 records. In terms of source type, it included 23 primary empirical studies, 8 meta-analyses or quantitative reviews, 8 narrative or conceptual review papers, 7 theoretical articles, 6 scholarly books or monographs, and 4 book chapters or encyclopedia entries. No conference proceedings, dissertations, policy reports, or other forms of grey literature were retained. This composition reflects the integrative character of the review: some sources provided direct empirical evidence on organizational influence and effectiveness, whereas others were retained for definitional, theoretical, or mechanism-clarifying purposes, especially in relation to the under-specified construct of informal authority.

Informal authority is difficult to operationalize as a single directly observable construct, since it is reducible neither to formal role occupancy nor to any one stable leadership behavior. For this reason, the literature rarely measures it in a strict standalone sense. Instead, it is usually approached through adjacent constructs such as Leader Member Exchange (LMX), psychological safety, shared leadership, identity leadership, or autonomy-supportive influence. Accordingly, the present review does not treat all retained studies as direct measures of informal authority, but as partial indicators of its mechanisms and manifestations. The consequence is interpretive caution: the literature supports the relevance of informal authority, but its construct boundaries remain insufficiently settled and its distinct empirical contribution is still harder to isolate precisely than in the case of formal authority. On this basis, informal authority is treated in the revised conceptualization on two analytically separable levels: definitional sources (Farmer, 2008; Serrat, 2017; Adams-Robinson, 2022) and adjacent constructs that illuminate its mechanisms and correlates without substituting for its definition.

3. Formal Authority - Characteristics and Influence Mechanisms

Formal authority refers to the legitimate right to direct and coordinate the work of subordinates by virtue of one's organizational position (Yukl, 2013). In managerial settings, this form of authority is embedded in hierarchy, rules, and role structure; compliance is expected not because of personal admiration, but because the manager occupies a sanctioned role within the institutional system (Raven, 2004; Yukl, 2013). Raven (2004) identifies legitimate power - grounded in accepted social structures and role obligations - as one of the foundational bases of organizational influence, conceptually distinct from coercive, reward-based, or expert forms of power. The foundational taxonomy of social power was originally proposed by French and

Raven (1959), who identified five bases - reward, coercive, legitimate, referent, and expert - whose relative activation was theorized to determine the form and durability of influence in interpersonal relationships. The authors imply that managerial influence may rest on more than formal position alone (French and Raven, 1959). However, stronger claims about the limits of formal authority and the socially contingent acceptance of authority are more directly aligned with Barnard (1938). As established in the Introduction, legitimacy and procedural fairness set a key boundary condition for formal authority: compliance is most durable when enacted through fair procedures (Tyler, 1997; Tyler and De Cremer, 2005).

Kelman (1958) described compliance as a form of influence in which behavior is shaped primarily by external contingencies rather than personal endorsement of the induced action. In organizational contexts, this logic helps explain why formal authority may be effective when work depends on standardized procedures, clear expectations, and coordinated role performance. In this sense, formal authority can help translate organizational objectives into coordinated action through role definitions and reporting relationships (Yukl, 2013).

Research suggests that formal authority can support effectiveness by structuring responsibilities and clarifying expectations, particularly where coordination across roles is required (Yukl, 2013). In multiteam systems, DeChurch and Marks (2006) found that leader strategizing and coordinating improved interteam coordination and system performance under conditions of high task interdependence, underscoring the importance of coordination functions in such settings. It should be noted that this study employed a laboratory simulation with 384 undergraduate students executing an F-22 air-combat task, and its generalizability to naturalistic organizational hierarchies therefore requires caution. In a more specific bureaucratic context, Bandiera et al. (2021) showed that reallocating decision rights within a formal hierarchy, by reducing approval requirements and increasing officers' purchasing autonomy - lowered procurement costs without reducing quality. This latter finding is best interpreted as evidence about how formal authority can be distributed within hierarchies, rather than as a general estimate of formal authority effects across organizational settings.

Another important mechanism through which formal authority affects employee behavior is accountability. Because managers with formal authority often oversee performance evaluation, control access to rewards and resources, and possess at least some authority over sanctions, employees may regulate their behavior in accordance with organizational expectations (Yukl, 2013). At the same time, the motivational consequences of such influence depend not only on whether power is used, but also on what kind of power is emphasized. Peyton et al. (2019) more directly support a distinction between hard and soft power than strong conclusions about each single power base: hard power is associated more often with sub-optimal motivational outlooks, whereas soft power is associated with more optimal motivation and generally more favorable work intentions. Reward power, although classified as a hard

power form, appears more mixed and should therefore be interpreted cautiously (Peyton et al., 2019). De Cremer and Tyler (2005), reviewing evidence on procedural justice and cooperation, argue that fair procedures are an important means of managing cooperation because they strengthen trust, support a shift from self-interest toward group-oriented goals, and thereby increase voluntary cooperation with group authorities and decisions. The effectiveness of accountability as a mechanism therefore depends not only on the availability of sanctions, rewards, and resource control, but also on whether the exercise of authority is experienced as procedurally fair and therefore legitimate (Tyler, 1997; Tyler and De Cremer, 2005).

Evidence also suggests that the effects of formal authority are context-dependent rather than uniformly positive. In more structured environments, formal authority may support coordination and role clarity (Yukl, 2013). However, in settings requiring initiative, innovation, or decentralized problem-solving, more participative forms of leadership may be advantageous (Somech, 2006). Work design research suggests that dimensions such as autonomy, task interdependence, and feedback are important for understanding how job characteristics shape employee attitudes and performance-related outcomes across organizational contexts (Humphrey et al., 2007). Reviewing the validity of consideration and initiating structure in leadership research, Judge et al. (2004) showed meta-analytically that both dimensions are meaningfully related to leadership outcomes, but with different profiles of association. Consideration was more strongly related to follower satisfaction, motivation, and leader effectiveness, whereas initiating structure was only slightly more strongly related to more task-focused criteria such as leader job performance and group-organization performance. The meta-analytic findings of Judge et al. (2004) therefore support treating consideration and initiating structure as distinct leadership dimensions that show different patterns of association across criteria, rather than as evidence that initiating structure is broadly superior for effectiveness.

Taken together, the cited studies suggest that formal authority is especially useful when work requires coordination across interdependent units and when authority is exercised in ways perceived as legitimate and procedurally fair (Tyler, 1997; Tyler and De Cremer, 2005; DeChurch and Marks, 2006; Bandiera et al., 2021). At the same time, the cited evidence does not support treating its effects as uniform across settings. Rather, the consequences of formal authority appear to vary depending on how power is exercised, on whether team outcomes are defined in terms of innovation or in-role performance, and on whether fair procedures help sustain voluntary cooperation (Tyler and De Cremer, 2005; Somech, 2006; Peyton et al., 2019). Formal authority should therefore not be treated as uniformly effective across organizational settings, although this broader contingency conclusion remains an integrative inference drawn from the cited literature rather than a direct finding of any single study (Tyler and De Cremer, 2005; DeChurch and Marks, 2006; Somech, 2006; Bandiera et al., 2021).

4. Informal Authority - Characteristics and Influence Mechanisms

4.1 The Construct of Informal Authority

Building on the working definition introduced in the Introduction, this section specifies the construct of informal authority in greater depth (Raven, 2004; Serrat, 2017). In this sense, informal authority is not merely the absence of formal authority, but a distinct mode of influence whose force depends on interpersonal recognition and repeated acceptance by others. Beyond these foundational theoretical sources, informal authority has also been addressed as a definitionally distinct phenomenon in dedicated treatments by Serrat (2017), who frames it explicitly as influence exercised in the workplace independently of positional mandate, by Adams-Robinson (2022), who conceptualises it as "silent authority" rooted in informal leadership during organizational change, and by Farmer (2008), who describes it as the operative influence circulating through the "invisible organization" of informal networks. These sources are treated here as primary definitional anchors of the construct, whereas LMX, psychological safety, shared leadership and identity leadership are treated only as adjacent correlates.

This distinction is consistent with the broader conceptual framework of the present paper. Within Raven's (2004) bases-of-power approach, informal authority is more closely aligned with expert and referent bases of power than with legitimate power rooted in role structure. The source of influence is therefore not institutional entitlement, but the perception that a given actor is knowledgeable, trustworthy, respectable, or worthy of identification. If authority is understood not only as the right to direct others, but also as the capacity to secure meaningful acceptance of influence, then informal authority becomes a central rather than peripheral organizational phenomenon.

The organizational relevance of this form of influence is especially visible in the literature on informal leadership and informal networks. Adams-Robinson (2022) examines the role of the informal leader in change dynamics, particularly when formal leaders are new to a team and seek to implement new initiatives. Her account is relevant here because it shows that the practical success of formal leadership during change may depend substantially on the relationship between the formal leader and actors who already possess socially conferred standing within the team. Farmer (2008), in turn, emphasizes that organizational change does not unfold only through formal structures, but also through informal employee networks, local influencers, and communication patterns that operate beyond the organizational chart. Taken together, these sources are consistent with the claim that the enacted effectiveness of authority depends on more than its formal possession.

A methodological qualification is nonetheless necessary. A substantial share of the empirical literature does not measure informal authority as a strictly standalone construct, but approaches it indirectly through adjacent phenomena - informal leadership in change contexts (Adams-Robinson, 2022), informal and trust-based networks (Farmer, 2008; Kuipers, 2009), or recurring patterns of feedback seeking among non-hierarchical actors (van der Rijt et al., 2013). Crucially for the conceptual economy of this review, informal authority is not exhausted by these indirect operationalizations. Serrat (2017), Adams-Robinson (2022) and Farmer (2008) provide treatments in which informal authority is defined on its own terms, as non-positional, socially granted, and relationally sustained influence. In what follows, the construct is therefore discussed on two analytically separable levels: as a phenomenon captured by works that define it directly, and as a phenomenon whose mechanisms, correlates and boundary conditions are illuminated by adjacent research. The indirect literature helps specify the conditions under which informal authority emerges and stabilizes; it does not substitute for its definition. Adjacent relational constructs that illuminate the mechanisms of informal authority without being identical to it, together with the integrative synthesis of the section, are addressed in subsection 4.2 below.

4.1 Adjacent Relational Variables and Integrative Synthesis

Among the most useful contributions in this respect is Kuipers' (2009) distinction between friendship networks and trust networks. Evidence from the cited study shows that not all informal relations in the workplace have the same relevance for attachment outcomes. Friendship networks are based on liking and sociability, whereas trust networks are more strongly tied to loyalty, respect, the exchange of delicate information, and the possibility of risk-taking without fear of negative consequences. This distinction matters because it suggests that informal authority rests more securely on trust than on social affinity alone. A well-liked organizational member is not necessarily an authority figure; by contrast, an actor embedded in trust relations is structurally closer to what the present paper conceptualizes as informal authority.

Kuipers' (2009) findings also help connect the discussion of informal authority to the theoretical frameworks already established in the article. She shows that tighter coupling between trust networks and formal authority networks is positively related to both organizational identification and internalization, and that trust-based overlap is more influential than friendship-based in predicting identification. This is theoretically important for two reasons. First, it reinforces the idea that informal authority becomes organizationally consequential when it intersects with formal structure rather than remaining socially peripheral.

Second, it is consistent with Kelman's (1958) distinction between compliance, identification, and internalization. In this respect, trust-based informal influence appears more compatible with identification and internalization than with compliance alone, although that latter point remains a theoretical inference rather than a direct finding of Kuipers' (2009) study.

This line of reasoning also aligns with the legitimacy perspective introduced earlier in the article. Tyler (1997) argues that voluntary deference is shaped not only by power or sanction, but by whether authority is perceived as legitimate and fairly exercised. Although Tyler's framework is usually applied to formal authorities, it is broadly consistent with the possibility that informal authority can acquire a form of social legitimacy through recognition, trust, and relational credibility in everyday interaction. In organizational settings, actors may therefore defer to an informal authority figure not because they are formally obligated to do so, but because they perceive that person's judgments as credible, fair, or more closely aligned with the realities of the work context.

A complementary explanation is provided by Self-Determination Theory. Ryan and Deci (2000) and Gagné and Deci (2005) argue that more internalized forms of regulation are associated with more effective functioning and better-quality motivation, and that autonomy-supportive rather than controlling managerial influence is more conducive to internalization in work settings. This perspective is consistent with the possibility that informal authority may produce durable effects even when it lacks formal enforcement capacity. Because it is grounded in credibility, trust, and recognized competence rather than external control, informal authority is plausibly better positioned to support voluntary endorsement and sustained engagement than influence based primarily on positional obligation.

The same logic is visible in more routine organizational interaction patterns. Van der Rijt et al. (2013) show that informal feedback seeking is shaped by employees' position in the organizational hierarchy: employees frequently seek feedback from colleagues in the same department, but managers or leaders seek significantly less feedback from colleagues in the same department and from coaches than employees in other positions. At the same time, the study also shows that feedback from managers or leaders, coaches, and colleagues in the same department is perceived as particularly useful. Although this study does not examine informal authority directly, it illuminates an everyday interactional setting in which influence becomes differentiated across hierarchical roles and valued sources of input. In this sense, it is broadly consistent with the view that organizational members do not orient themselves only to formal reporting lines, but also to actors whose feedback is perceived as especially useful or authoritative in practice, although stronger claims about the stabilization of informal authority remain interpretive rather than directly tested by this study.

At the same time, the present section should preserve the conceptual distinction between informal authority and adjacent constructs such as LMX, psychological safety, shared leadership, or identity leadership. High-quality LMX helps explain how influence may operate relationally within formal dyads, but it presupposes formal hierarchy and is therefore better treated as a related relational context than as informal authority itself (Graen and Uhl-Bien, 1995; Martin et al., 2016). Psychological safety captures a climate of interpersonal openness that may enable informal influence to be voiced and accepted, but it is a team condition rather than an authority structure in its own right (Edmondson, 1999). Shared and identity-based leadership likewise illuminate how influence can become socially distributed or grounded in a shared sense of "us," yet they are best interpreted here as broader relational manifestations or extensions of the same non-positional logic rather than as strict equivalents of informal authority (Drescher et al., 2014; Fransen et al., 2018; Fransen et al., 2022). Retaining these distinctions improves conceptual precision and prevents the section from dissolving informal authority into a loose family of neighboring constructs. To make these boundaries more explicit: LMX is a dyadic construct measuring the quality of exchange within an already-existing formal superior-subordinate relationship (Dansereau et al., 1975; Graen and Uhl-Bien, 1995; Gerstner and Day, 1997; Martin et al., 2016) - it therefore presupposes the very positional structure that informal authority can operate across or around, and a high-LMX subordinate is not thereby an informal authority. Psychological safety (Edmondson, 1999) is a shared team-level climate perception about the interpersonal cost of speaking up; it is an enabling condition for informal influence to be voiced, not the influence itself. Shared leadership (Ensley et al., 2006; Drescher et al., 2014; Fransen et al., 2018) refers to a distribution of leadership functions across team members and is compatible with, but not identical to, the emergence of specific informal authorities recognized by others. Identity leadership (Mertens et al., 2020; Fransen et al., 2022) locates influence in the leader's capacity to represent a shared "us", which is one psychological pathway through which informal authority may be granted, but again not the construct itself. Informal authority, by contrast, refers specifically to recognized non-positional influence attributed to a particular actor on the basis of expertise, trust, and social credibility (Raven, 2004; Serrat, 2017; Adams-Robinson, 2022).

As an integrative synthesis of the literature reviewed in subsections 4.1 and 4.2, the cited literature supports treating informal authority as a substantive and organizationally consequential form of influence rather than as a vague supplement to formal role power. Its defining feature is that it secures acceptance without relying primarily on institutional entitlement. Its theoretical logic is most compatible with expert and referent influence (Raven, 2004), with identification and internalization rather than compliance (Kelman, 1958), with legitimacy understood as socially granted credibility rather than office alone (Tyler, 1997), and with more autonomous rather than controlled forms of motivation (Ryan and Deci, 2000; Gagné and Deci, 2005). Research suggests that this form of influence becomes especially visible in

change contexts, in trust-based network structures, and in recurring interaction patterns through which some actors become reliable points of orientation for others (Farmer, 2008; Kuipers, 2009; van der Rijt et al., 2013; Adams-Robinson, 2022). This is presented as an integrative reading across studies that adopt different operational lenses. For that reason, organizational effectiveness is unlikely to be fully explained by structural role authority alone. The practical force of authority depends also on who is trusted, who is consulted, and who is able to shape acceptance, interpretation, and action without relying exclusively on formal mandate.

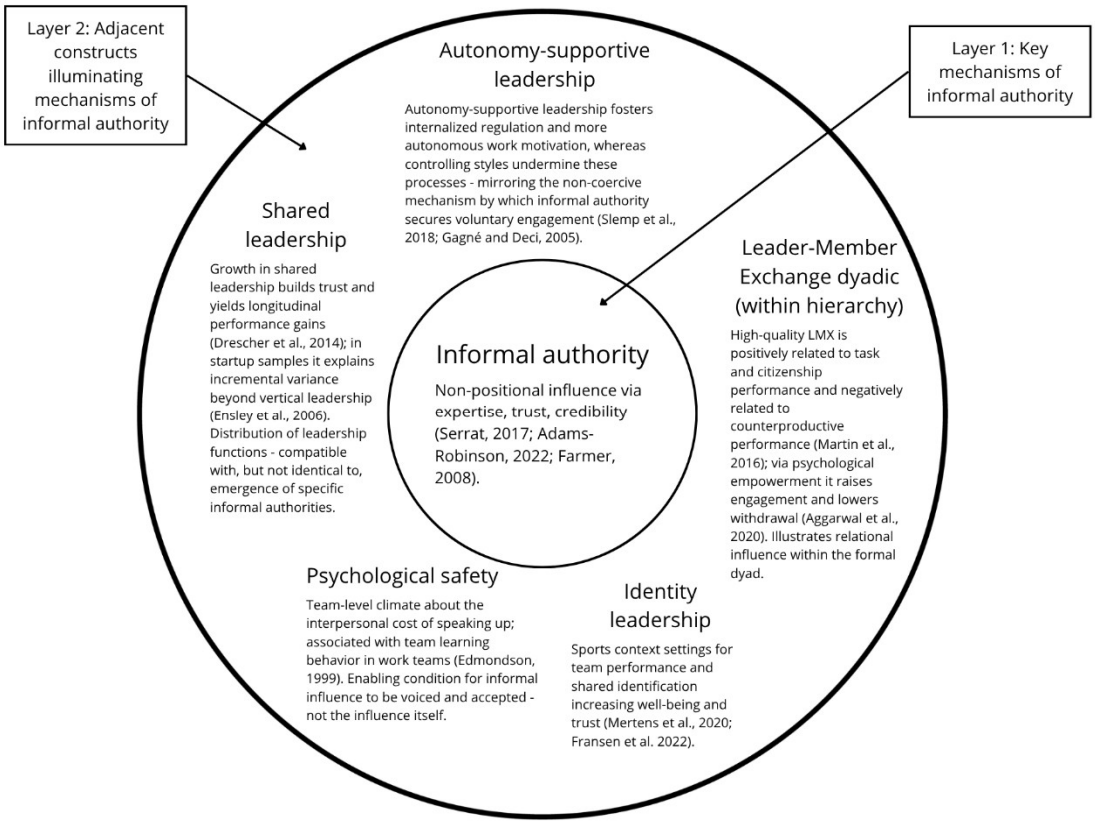


Diagram 1: Informal authority and its adjacent constructs: an integrative conceptual map.

5. Authority and Team Effectiveness - Analysis of Relationships

Team effectiveness is a multidimensional construct encompassing output and target attainment, work quality, adaptive performance, and team-process quality (Yukl, 2013). Marks et al. (2001), drawing on a temporally based framework, propose that different categories of team process - transition, action, and interpersonal - serve distinct functions in how teams pursue goals over time, highlighting that effectiveness cannot be reduced to a single outcome indicator. Because formal and informal authority operate through distinct psychological

mechanisms, as established in the preceding sections, their effects may be expected to vary systematically across these effectiveness dimensions.

Formal authority may be especially useful for coordination-related outcomes in contexts characterized by task interdependence and the need for structured execution. By clarifying responsibilities and enabling coordination across roles, it can help reduce ambiguity and support collective performance (Yukl, 2013). As discussed in Section 3, the laboratory evidence from DeChurch and Marks (2006) points in this direction, though its generalizability to ongoing organizational teams warrants caution. Within the team-process framework of Marks et al. (2001), these effects are most plausibly relevant to transition and action processes, although that taxonomy does not itself test formal authority as a predictor.

Informal authority appears particularly relevant in environments that require collaboration, learning, and adaptive problem solving, although this broader claim is integrative rather than directly tested by any single cited study. Research on high-quality relational exchange, psychological safety, participative leadership, identity leadership, and the motivational consequences of different power uses converges on the view that relationally grounded influence supports trust, learning, motivation, and adaptive functioning, though drawing on a mix of workplace and adjacent team contexts (Graen and Uhl-Bien, 1995; Gerstner and Day, 1997; Edmondson, 1999; Drescher et al., 2014; Martin et al., 2016; Peyton et al., 2019; Aggarwal et al., 2020; Fransen et al., 2022). An important qualification is warranted for Somech (2006): in a field study of 136 primary care teams, participative leadership increased team innovation through reflection, but simultaneously decreased standard in-role performance, particularly in high-heterogeneity teams. The pattern is therefore conditional on both team composition and the criterion of effectiveness under consideration, rather than uniformly positive. Within the Marks et al. (2001) framework, these findings are most consistent with interpersonal processes and with transition processes involving reflection and adaptation, though the underlying studies do not operationalize informal authority in exactly those terms. From an SDT perspective, such a pattern is broadly consistent with the view that contexts supporting autonomy, competence, and relatedness facilitate internalization and sustained discretionary effort (Ryan and Deci, 2000; Gagné and Deci, 2005).

The relationship between formal and informal authority may therefore be better understood as potentially interactive rather than merely additive. A useful illustration is provided by Clarke et al. (2022), who found that leaders central in both advice and friendship networks predicted stronger gains in team performance over time than leaders central in only one domain. This study was conducted in 84 administrative service teams at a single public university, and the outcome measure was performance change over two years rather than absolute performance level; generalization beyond this specific public-sector context therefore warrants caution. Procedural fairness also strengthens cooperation within formally structured groups (De Cremer

and Tyler, 2005), while shared and vertical leadership have both been linked to performance-relevant outcomes in organizational and entrepreneurial team settings (Ensley et al., 2006). Together, these findings are consistent with the view that formal structure and relational influence can complement one another, even though the cited studies do not test that interaction directly.

The available evidence is broadly consistent with the view that stronger team outcomes are most likely when formal leadership provides direction and coordination in interdependent work systems (DeChurch and Marks, 2006; Ensley et al., 2006), whereas relational and participative influence processes contribute through more specific pathways. High-quality relational exchange is positively related to task and citizenship performance and negatively related to counterproductive performance and has also been linked in organizational research to psychological empowerment, work engagement, and lower psychological withdrawal (Martin et al., 2016; Aggarwal et al., 2020). Psychological safety is associated with team learning behavior in organizational work teams (Edmondson, 1999). Growth in shared leadership has been linked longitudinally to growth in trust and subsequent performance improvement over time (Drescher et al., 2014). Participative leadership has been associated with innovation through team reflection, although at the cost of lower in-role performance in high-heterogeneity teams (Somech, 2006). Shared leadership has also been linked to team proactivity under supportive cultural conditions (Erkutlu, 2012). Taken together, these studies suggest that formal and more relationally distributed forms of influence may make distinct contributions to effectiveness, depending on whether the focal criterion is coordination, performance, learning, trust, innovation, or proactivity.

6. Factors Moderating the Authority - Effectiveness Relationship

The relationship between managerial authority and organizational effectiveness is best understood as context-dependent rather than universal. This contingency logic is consistent with a broader tradition in leadership research: House's (1971) Path-Goal Theory proposes that leader effectiveness depends on the fit between leader behavior and characteristics of subordinates and their environment, while Fiedler's contingency model (1967) likewise argues that leadership effectiveness varies with situational favorability. House and Mitchell (1974) elaborated the path-goal framework by specifying that directive, supportive, participative, and achievement-oriented leader behaviors differentially motivate subordinates depending on task and subordinate characteristics - a logic closely paralleling the moderating role of work nature and employee competence developed in this section. Kerr and Jermier (1978) further proposed that certain situational characteristics - including subordinate ability, task feedback, and

professionalization - can substitute for or neutralize leadership, suggesting that the very conditions identified here as moderators may at times render formal authority redundant where informal expertise-based influence suffices. Accordingly, neither formal nor informal authority should be treated as universally superior; their effectiveness is likely to depend on the extent to which a given form of influence matches the psychological and structural demands of the environment. The roots of this contingency logic extend to some of the earliest systematic reviews in leadership science. Stogdill (1948), surveying over one hundred trait-based leadership studies accumulated between 1904 and 1947, concluded that leadership could not be explained by personal characteristics alone and that the relevance of such characteristics depended on the situation. This observation helped shift the field away from universal trait accounts toward above mentioned contingency-oriented approaches. The present analysis extends this tradition by specifying how the formal-informal distinction in authority maps onto four key organizational conditions.

The nature of work - particularly the extent to which tasks are routine or require creativity and adaptation - may be treated as an important moderator of authority effects. In more routine and standardized contexts, formal authority may support effectiveness by clarifying roles and structuring execution, whereas more adaptive contexts may increase the relevance of expertise- and relationship-based influence (Raven, 2004; Somech, 2006; Lorinkova et al., 2013; Yukl, 2013; Peyton et al., 2019). To keep this moderator empirically testable, it may be operationalized through work-design dimensions such as autonomy, task interdependence, and feedback-related features, which help specify why some settings may amplify or attenuate different authority mechanisms (Humphrey et al., 2007). In this sense, routineness and coordination demands can be treated as conditions likely to favor more formal structuring, whereas adaptiveness and innovation demands can be treated as conditions likely to increase the relevance of relational and participative forms of influence (Judge et al., 2004; DeChurch and Marks, 2006; Somech, 2006; Lorinkova et al., 2013).

Organizational culture - particularly the degree to which formal coordination is balanced with collaborative and informal influence processes - can be treated as a second moderator. Where formal authority is perceived as legitimate and fairly exercised, it is more likely to elicit voluntary deference and coordinated cooperation (Tyler, 1997). At the same time, previously mentioned sources suggest that some organizational settings rely not on formal structure alone, but on a balance between formal and informal mechanisms. Farmer (2008) argues that business change is best managed through a balanced implementation of formal and informal networks, while Kummelstedt (2023), in a participatory action research study of a self-managing organization, further shows that hierarchical and collective forms of leadership can coexist in a dynamic that sustains self-management. Taken together, these sources are consistent with the view that organizational culture may shape which form of authority becomes more salient and

how formal and informal influence relate, although this broader conclusion remains integrative rather than directly tested as a single model.

Team maturity - the extent to which team members have had time to develop stable role relationships, mutual trust, psychologically safe interaction, and a more socially distributed pattern of influence, can be treated as a third moderator. Whereas the first two moderators concern the task and the normative reception of authority, this one concerns the team's own developmental trajectory. Evidence most directly relevant to this point comes from research on leadership development over time. In newly formed teams with an initial vertical-leadership structure, leadership became more distributed over the course of a 24-week project, indicating that socially shared influence can become more viable as members gain time to understand one another's capabilities (Fransen et al., 2018). This developmental interpretation is consistent with earlier role-making research showing that leadership relations evolve over time within vertical dyads (Dansereau et al., 1975), as well as with LMX theory's emphasis on the development of mature leadership partnerships (Graen and Uhl-Bien, 1995). It is also consistent with evidence that psychologically safe team climates support learning behavior in ongoing work teams (Edmondson, 1999), that leaders embedded simultaneously in advice and friendship networks predict stronger gains in team performance over time than leaders central in only one domain (Clarke et al., 2022), and that empowering leadership may yield stronger long-term performance improvement than directive leadership as team learning, coordination, and empowerment develop over time (Lorinkova et al., 2013). Available longitudinal evidence is therefore consistent with the proposition that newly formed teams rely more heavily on formal leadership structure and role-making clarity, whereas over time coordination can increasingly shift toward relationally grounded and more socially distributed influence (Dansereau et al., 1975; Lorinkova et al., 2013; Fransen et al., 2018).

Employee competence - the degree to which employees possess the knowledge, experience, and self-regulatory capacity needed to work with limited supervision and to benefit from more autonomous forms of influence, constitutes a fourth moderator. Ryan and Deci (2000), reviewing evidence on self-motivation and psychological development, argue that more internalized and autonomous forms of regulation are associated with greater persistence, well-being, and performance quality when individuals have the capacity to exercise meaningful discretion. Gagné and Deci (2005), applying Self-Determination Theory to organizational settings, similarly argue that autonomy-supportive managerial behavior is more conducive to autonomous motivation and internalization, whereas controlling managerial styles undermine these processes - an effect particularly relevant for competent employees who possess the capacity to direct their own effort. Employees with lower competence or less experience, by contrast, may benefit more from formal authority, since clearer supervision, defined responsibilities, and structured performance control can reduce uncertainty and guide behavior

more directly (Yukl, 2013). Lower competence or lower developmental readiness may increase the usefulness of directive structuring and role clarification, whereas autonomy-supportive influence tends to be especially valuable for fostering autonomous motivation, proactivity, and longer-term performance trajectories; however, direct evidence that it is relatively more effective specifically for highly competent employees remains mixed (Ahearne et al., 2005; Lorinkova et al., 2013; Slemp et al., 2018). In particular, Ahearne et al. (2005) operationalized empowerment readiness directly, but their interaction results did not support a simple linear expectation that more readiness always strengthens the positive effects of empowering leadership, which makes this source more useful as support for caution than for a one-directional claim.

These four moderators interact in organizational practice; their effects are interdependent and often mutually reinforcing in shaping which form of influence becomes most effective (Ahearne et al., 2005; Somech, 2006; Lorinkova et al., 2013; Fransen et al., 2018). A team performing routine or otherwise familiar work in a more hierarchical context and with relatively inexperienced members will likely benefit more from formal authority that provides direction, accountability, and role clarity (DeChurch and Marks, 2006; Lorinkova et al., 2013). A capable and cohesive team operating in a supportive or participatory context and performing adaptive work will likely benefit more from informal authority grounded in expertise, trust, and shared identification (Somech, 2006; Lorinkova et al., 2013; Slemp et al., 2018; Fransen et al., 2022), although direct evidence for the competence component remains less consistent (Ahearne et al., 2005). Crucially, the most effective arrangements are typically not those in which formal and distributed forms of influence operate in isolation, but those in which formal leadership provides structure and coordination while relationally grounded influence reinforces engagement, identification, and performance over time (DeChurch and Marks, 2006; Ensley et al., 2006; Lorinkova et al., 2013). Ensley et al. (2006) are especially useful here because, in two startup samples, both vertical and shared leadership predicted performance, while shared leadership explained additional variance beyond vertical leadership. The authority-effectiveness relationship is therefore best understood as contingent on organizational context - a conclusion consistent with the contingency tradition in leadership research (Fiedler, 1967; House, 1971).

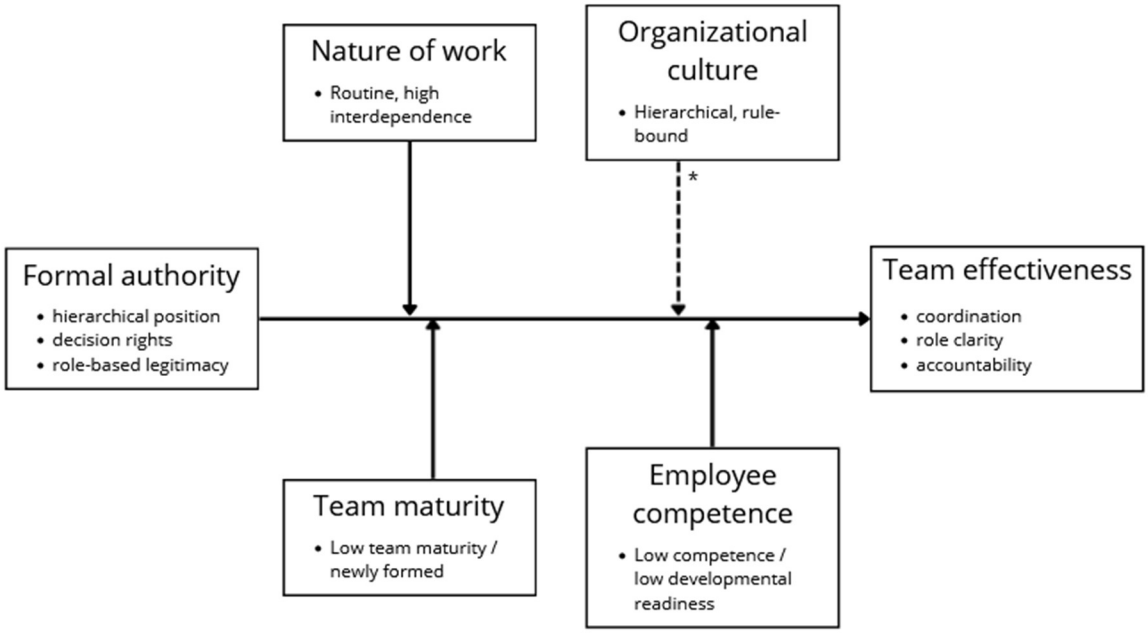


Diagram 2: Contextual moderators of the relationship between formal authority and team effectiveness.

*Note: *Moderation inferred integratively from adjacent constructs, not empirically tested as a standalone variable.*

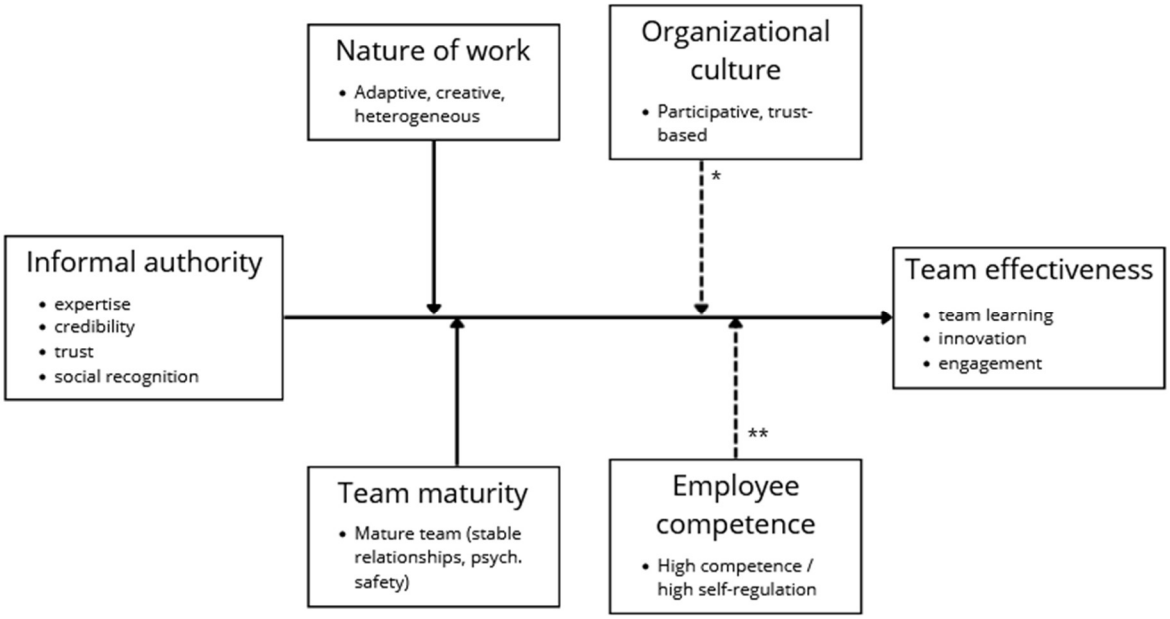


Diagram 3: Contextual moderators of the relationship between informal authority and team effectiveness.

*Note: *Moderation inferred integratively from adjacent constructs, not empirically tested as a standalone variable. **Results for competence moderation within informal authority's effect remains mixed, interpretive caution is advised, as it should not be treated as standalone variable without wider context.*

7. Authority as an Element of Management Strategy

When authority is treated as a component of management strategy, organizational influence is seen to emerge not from formal role design alone but from the interaction between that design and the informal recognition that teams grant to their leaders (Raven, 2004; Tyler and De Cremer, 2005; Yukl, 2013). Managers who rely exclusively on positional authority without attending to informal bases of their influence may achieve compliance in the short term while undermining the motivational and relational conditions necessary for sustained team effectiveness (Kelman, 1958; Tyler and De Cremer, 2005; Peyton et al., 2019). Four strategic dimensions follow from the evidence reviewed in this paper.

Building informal authority through managerial competence development constitutes the first strategic lever. As the preceding sections established, autonomy-supportive managerial behavior fosters internalization and more autonomous work motivation, whereas controlling styles undermine these processes (Gagné and Deci, 2005). Meta-analytic evidence on empowering leadership further indicates positive outcomes at both individual and team levels, including performance, organizational citizenship behavior, and creativity (Lee et al., 2018). At the same time, the organizational case for leadership development should be framed at the appropriate level of analysis. Subramony et al. (2018) are most useful as evidence that bundles of leadership development practices can strengthen organizational human capital and social capital and, through these pathways, support organizational performance, rather than as direct evidence about informal authority or individual relational credibility. Smither et al. (2005), in turn, are better treated as support for the cautious developmental value of multisource feedback systems: their meta-analysis suggests that performance improvement following multisource feedback is generally modest, but more likely when recipients recognize the need for change, respond constructively to feedback, believe change is feasible, and take developmental action. Organizations may therefore plausibly benefit from leadership development infrastructures that combine autonomy-supportive management, empowering leadership practices, coaching and mentoring, and developmental feedback processes. These implications of the broader framework help build the specific credibility on which informal authority rests; it should nonetheless be noted that informal authority as a construct was not a direct variable in the cited studies.

The congruence between formal position and team recognition may be treated as a second strategic dimension. Formal authority does not automatically translate into legitimacy in the eyes of employees; when legitimacy is present, directives are more likely to be accepted with less resistance and less need for repeated enforcement (Tyler, 1997; Tyler and De Cremer, 2005). A related implication is that expertise and relational credibility should become visible in the organizational setting in which leadership is exercised. Brass (1984) is most useful here as

evidence that network position in workflow, communication, and friendship relations is strongly associated with perceived influence, which suggests that influential patterns in teams are not reducible to formal role assignment alone. In this sense, organizations may plausibly benefit from structures and routines that make influential patterns more visible and easier to interpret.

The risks of authority disproportion - high formal authority combined with low informal authority - constitute the third strategic concern. A manager with strong positional power but low interpersonal credibility may obtain surface-level compliance while failing to generate genuine commitment, manifesting over time in reduced discretionary effort, disengagement, or passive resistance. The mechanism is the one introduced earlier via Kelman (1958): role-based influence stabilizes only as surveillance-contingent compliance, whereas socially conferred influence supports identification and internalization, which hold without direct monitoring. Tyler (1997), reviewing evidence on legitimacy and voluntary deference, further shows that when authority is not perceived as legitimate and procedurally fair, voluntary deference declines; De Cremer and Tyler (2005) similarly argue that fair procedures and the relational quality of authority help sustain cooperation, trust, and group-oriented motivation. Organizations may benefit from treating substantial discrepancies between formal and informal authority not as incidental personnel matters but as governance risks with systematic consequences for team motivation and sustained effectiveness.

The organizational structure itself shapes the conditions under which informal authority can be earned and recognized, constituting the fourth strategic consideration. The point about decision-right allocation has been introduced earlier as evidence that the effects of formal authority depend partly on how decision rights are distributed within hierarchy (Bandiera et al., 2021). A related implication from the substitutes-for-leadership perspective is that, under conditions such as high subordinate competence, strong task-provided feedback, cohesive interdependent work groups, or high organizational formalization, direct supervisory influence may become less necessary (Kerr and Jermier, 1978). Taken together, these sources suggest that structural design can either preserve reliance on positional control or create conditions in which nonhierarchical sources of guidance and coordination become more consequential. Stronger recommendations about cross-functional assignments, peer-recognition systems, or performance-review design should therefore be presented as applied implications of this framework rather than as direct findings of the cited studies.

Adjacent evidence from the management control literature points in a similar direction. In an in-depth qualitative study of product innovation processes, Pan Fagerlin and Lövstål (2020) showed that top managers relied not only on formal mechanisms such as stage-gate structures, reporting systems, and project-management tools, but also on informal practices including coaching, cross-functional connecting, problem-solving involvement, and trust-based

interaction with team members. Importantly, these forms of influence were not used uniformly across the innovation process. Authority as a management strategy appears most robust when the organizational system supports informal authority development through deliberate competence investment, when formal appointments are congruent with socially recognized leadership, when structural design enables influence to be observed and recognized, and when organizations treat the gap between formal and informal authority as a systematic governance concern rather than an incidental personnel matter (Tyler and De Cremer, 2005; Lee et al., 2018; Subramony et al., 2018; Clarke et al., 2022).

8. Discussion

The review advances three interrelated conceptual moves that together distinguish it from earlier treatments of managerial influence. First, it places positional and socially conferred authority within a single analytic frame, using Raven's (2004) bases-of-power scheme as the organizing axis and treating Kelman (1958), Tyler (1997), and Self-Determination Theory (Ryan and Deci, 2000; Gagné and Deci, 2005) as complementary explanatory layers rather than competing alternatives. Second, it specifies four moderators - work nature, organizational culture, team maturity, and employee competence, as a patterned contingency structure that extends the situational tradition inaugurated by Stogdill (1948) and developed by Fiedler (1967), House (1971), House and Mitchell (1974), and Kerr and Jermier (1978). Third, it treats informal authority as a substantive mode of influence rather than a residual by-product of hierarchy, anchoring this claim in the definitional work of Serrat (2017), Adams-Robinson (2022), and Farmer (2008) while maintaining its analytic separation from adjacent relational constructs. Together, these moves respond to the diagnoses of House and Aditya (1997) and Sturm et al. (2021), who argued that the study of power and the study of leadership have matured along partially disconnected paths and would benefit from the kind of integrative treatment pursued here.

Across otherwise separate research traditions, several lines of evidence converge on this integrative reading. Along the motivational axis, Peyton et al. (2019) map onto Raven's (2004) and French and Raven's (1959) taxonomies by linking softer bases of influence to more autonomous motivational outlooks, a pattern that aligns with Kelman's (1958) distinction between compliance and internalization and with the SDT motivational continuum (Ryan and Deci, 2000; Gagné and Deci, 2005). Along the legitimacy axis, Tyler (1997), De Cremer and Tyler (2005), Tyler and De Cremer (2005) jointly position procedural fairness as the psychological hinge between formal designation and voluntary deference - a conclusion broadly consistent with Barnard's (1938) older claim that authority becomes operative only once it is

accepted. Along the structural axis, Brass (1984) and Clarke et al. (2022) show that network position, especially where advice and friendship ties overlap, predicts perceived influence beyond formal designation. Along the developmental axis, Dansereau et al. (1975), Fransen et al. (2018), and Lorinkova et al. (2013) each suggest that the weight of relational influence grows as teams mature, while meta-analytic work on leader-member exchange (Graen and Uhl-Bien, 1995; Gerstner and Day, 1997; Martin et al., 2016) and the field evidence reported by Aggarwal et al. (2020) confirm that relationally grounded influence tracks consequential outcomes even when formal structure is held constant.

The most prominent tension concerns the effects of participative and empowering approaches: Somech (2006) reports that participative leadership improves innovation but simultaneously reduces standard in-role performance in heterogeneous teams, whereas Lee et al. (2018) and Ahearne et al. (2005) report largely favorable outcomes for empowering leadership - though the latter's readiness interaction was not uniformly supportive. This contrast dissolves only when moderators are introduced, which strengthens rather than weakens the contingency argument developed here. A parallel divergence separates DeChurch and Marks (2006), whose laboratory simulation isolated leader strategizing effects under controlled conditions, from Bandiera et al. (2021), whose field experiment demonstrated efficiency gains from reallocating decision rights within a formal hierarchy: both inform Aghion and Tirole's (1997) distinction between formal and real authority, yet their inferential reach differs substantially. Lorinkova et al. (2013) add a temporal qualification - directive leadership accelerates early performance while empowering leadership overtakes it later, complementing Judge et al.'s (2004) meta-analytic evidence that consideration and initiating structure are empirically distinct dimensions. Further sources of unevenness stem from conceptual and contextual heterogeneity rather than from direct contradiction: Kuipers' (2009) finer-grained distinction between trust and friendship networks has not been uniformly adopted in subsequent network research; Subramony et al. (2018) and Smither et al. (2005) address developmental questions at different analytic levels (HR practice bundles and multisource feedback respectively), which resists straightforward comparison; Pan Fagerlin and Lövstål (2020) demonstrate that formal and informal controls shift in weight across the innovation cycle; Kummelstedt (2023) documents the persistence of hierarchy inside ostensibly self-managing organizations, unsettling the assumption that formal and distributed forms of influence are mutually exclusive; Erkutlu (2012) qualifies shared leadership as culturally contingent; and Mertens et al. (2020) and Fransen et al. (2022), despite methodological strengths, require cautious extrapolation from sport to workplace contexts. Taken together, these tensions do not destabilize the integrative reading of this article; they specify the conditions under which it applies.

The methodological choice to use adjacent relational constructs - LMX, psychological safety (Edmondson, 1999), shared leadership (Ensley et al., 2006; Drescher et al., 2014), identity leadership, empowering leadership, and autonomy-supportive leadership (Slemp et al., 2018), to illuminate the mechanisms of informal authority, yields clear gains at nontrivial cost. On the gain side, this strategy anchors conceptual claims in a substantial meta-analytic base (Gerstner and Day, 1997; Humphrey et al., 2007; Martin et al., 2016; Lee et al., 2018; Slemp et al., 2018) and enables triangulation across research traditions that developed in partial isolation, partially compensating for the difficulty of operationalizing informal authority as a standalone variable; it locates the review within the integrative response envisaged by House and Aditya (1997) and Sturm et al. (2021), while complementing the classical syntheses of Stogdill (1948), Kotter (1990), Yukl (2013), and Judge et al. (2002) with an explicitly relational-processual layer framed by van der Rijt et al. (2013) on everyday feedback dynamics. On the cost side, the same move risks conceptual overextension, in which informal authority gradually absorbs every positive relational phenomenon rather than retaining tight analytic boundaries. Adjacent constructs also operate at different levels of analysis - dyadic for LMX, team-level for psychological safety, organizational for culture, and across settings ranging from laboratory simulations to sport teams, advising caution with direct comparison.

9. Conclusions

The evidence reviewed in this paper supports treating formal and informal authority as analytically distinct yet functionally connected forms of managerial influence. Their difference lies not only in source - institutional position versus socially recognized credibility, but also in the mode through which influence is translated into organizational behavior. Authority in organizations is therefore not exhausted by formal role occupancy: effectiveness depends not only on who is entitled to direct others, but also on whether influence is accepted, legitimized, and sustained through relational processes (Kelman, 1958; Tyler, 1997; Ryan and Deci, 2000; Raven, 2004; Tyler and De Cremer, 2005). Neither form of authority is universally superior; what emerges more consistently is a contingency pattern in which the contribution of authority depends on the structural and psychological demands of the context in which it is exercised (House, 1971; Somech, 2006; Humphrey et al., 2007; Lorinkova et al., 2013).

This conclusion carries a restrained practical implication. If informal authority is a meaningful contributor to effectiveness rather than a residual by-product of hierarchy, the organizational task is not merely how to allocate formal authority but how to create conditions in which formal role authority and informal influence develop in a compatible way (Brass, 1984; Gagné and Deci, 2005; Tyler and De Cremer, 2005; Lee et al., 2018; Subramony et al.,

2018). Three distinguishable levers follow. First, selection procedures should assess not only formal role competence but also the relational and expert bases from which informal authority is ordinarily conferred, including credibility signals such as demonstrated expertise and consistent, trustworthy conduct under uncertainty (Brass, 1984; Clarke et al., 2022). Second, managerial development should cultivate procedural fairness, autonomy-supportive behavior, and routines of feedback-seeking and feedback-giving, whose motivational effects are among the best-documented correlates of socially conferred influence (Ahearne et al., 2005; Smither et al., 2005; van der Rijt et al., 2013; Slemp et al., 2018). Third, organizational design should avoid pitting formal and informal authority against each other, particularly in settings that combine hierarchical accountability with distributed expertise, such as product-innovation units or partially self-managing teams, where the coexistence of both forms appears to be the empirical norm rather than an anomaly (Pan Fagerlin and Lövstål, 2020; Kummelstedt, 2023).

Several limitations qualify the strength of these conclusions. First, a substantial portion of the evidence remains vulnerable to common method bias in cross-sectional self-report designs (Podsakoff et al., 2003), while construct boundaries around informal authority remain insufficiently settled in relation to transformational leadership, identity leadership, charismatic leadership, and LMX - a concern echoing Yukl's (1999) diagnosis of construct proliferation (Graen and Uhl-Bien, 1995; Gerstner and Day, 1997; Judge et al., 2002). Future research should therefore examine how formal and informal authority co-develop over time and define and measure informal authority more precisely, so that its distinct contribution can be evaluated with greater construct validity. Second, part of the evidence used to illuminate relational and shared influence processes comes from adjacent rather than strictly workplace settings, which supports theoretical convergence but limits direct organizational generalization (Mertens et al., 2020; Fransen et al., 2022). Third, the integrative review methodology, while appropriate for conceptual integration across partially separate literature, does not yield pooled effect estimates and cannot statistically adjudicate the relative weight of formal and informal authority; its output is organizing and interpretive rather than confirmatory, and should be read as a scaffolding for subsequent empirical testing. The four contingency moderators have also not been jointly tested in any single empirical design, so their relative weight and mutual interaction remain open questions.

Beyond these caveats, the wider significance of the review lies in offering a shared vocabulary for research programmes that have, until now, conversed only indirectly. By positioning the economics-oriented distinction between formal and real authority (Aghion and Tirole, 1997) alongside the psychology of legitimacy (Tyler, 1997; Tyler and De Cremer, 2005) and the internalization processes posited by self-determination theory (Ryan and Deci, 2000; Gagné and Deci, 2005), the framework proposed here can scaffold multilevel and longitudinal designs that track, within the same organizational settings, how role-based authority and

socially conferred influence coevolve rather than compete. In applied terms, it offers practitioners a diagnostic lens for identifying cases in which apparent managerial failure is rooted less in the absence of formal authority than in a deficit of the relational and motivational conditions under which that authority can be accepted and sustained - a diagnostic that points to developmental rather than structural remedies (Subramony et al., 2018). For contemporary organizational forms characterized by hybrid work, distributed expertise, and partial delayering, informal authority is not ornamental: it clarifies why hierarchy alone is neither dispensable nor sufficient, and directs future inquiry toward the architecture of conditions under which formal and informal authority jointly produce effectiveness (Sturm et al., 2021; Clarke et al., 2022; Kummelstedt, 2023).

Bibliography

1. Adams-Robinson, B. J. (2022). Informal Leadership, Strategy and Organizational Change: The Power of Silent Authority. Routledge. doi: 10.4324/9780429319969
2. Aggarwal, A., Chand, P. K., Jhamb, D., and Mittal, A. (2020). Leader-member exchange, work engagement, and psychological withdrawal behavior: The mediating role of psychological empowerment. Frontiers in Psychology, 11, Article 423. doi: 10.3389/fpsyg.2020.00423
3. Aghion, P., and Tirole, J. (1997). Formal and Real Authority in Organizations. Journal of Political Economy, 105(1), 1-29. doi: 10.1086/262063
4. Ahearne, M., Mathieu, J., and Rapp, A. (2005). To empower or not to empower your sales force? An empirical examination of the influence of leadership empowerment behavior on customer satisfaction and performance. Journal of Applied Psychology, 90(5), 945-955. doi: 10.1037/0021-9010.90.5.945
5. Bandiera, O., Best, M. C., Khan, A. Q., and Prat, A. (2021). The allocation of authority in organizations: A field experiment with bureaucrats. Quarterly Journal of Economics, 136(4), 2195-2242. doi: 10.1093/qje/qjab029
6. Barnard, C. I. (1938). The Functions of the Executive. Cambridge, MA: Harvard University Press.
7. Brass, D. J. (1984). Being in the right place: A structural analysis of individual influence in an organization. Administrative Science Quarterly, 29(4), 518-539. doi: 10.2307/2392937
8. Clarke, R., Richter, A. W., and Kilduff, M. (2022). One tie to capture advice and friendship: Leader multiplex centrality effects on team performance change. Journal of Applied Psychology, 107(6), 968-986. doi: 10.1037/apl0000979
9. Dansereau, F., Graen, G., and Haga, W. J. (1975). A vertical dyad linkage approach to leadership within formal organizations: A longitudinal investigation of the role making process. Organizational Behavior and Human Performance, 13(1), 46-78. doi: 10.1016/0030-5073(75)90005-7
10. De Cremer, D., and Tyler, T. R. (2005). Managing group behavior: The interplay between procedural justice, sense of self, and cooperation. In M. P. Zanna (Ed.), Advances in Experimental Social Psychology, 37, 151-218. Elsevier Academic Press. doi: 10.1016/S0065-2601(05)37003-1
11. DeChurch, L. A., and Marks, M. A. (2006). Leadership in multiteam systems. Journal of Applied Psychology, 91(2), 311-329. doi: 10.1037/0021-9010.91.2.311

12. Drescher, M. A., Korsgaard, M. A., Welpe, I. M., Picot, A., and Wigand, R. T. (2014). The dynamics of shared leadership: Building trust and enhancing performance. Journal of Applied Psychology, 99(5), 771-783. doi: 10.1037/a0036474
13. Edmondson, A. C. (1999). Psychological safety and learning behavior in work teams. Administrative Science Quarterly, 44(2), 350-383. doi: 10.2307/2666999
14. Erkutlu, H. (2012). The impact of organizational culture on the relationship between shared leadership and team proactivity. Team Performance Management, 18(1/2), 102-119. doi: 10.1108/13527591211207734
15. Ensley, M. D., Hmieleski, K. M., and Pearce, C. L. (2006). The importance of vertical and shared leadership within new venture top management teams: Implications for the performance of startups. The Leadership Quarterly, 17(3), 217-231. doi: 10.1016/j.leaqua.2006.02.002
16. Farmer, N. (2008). The Invisible Organization: How Informal Networks can Lead Organizational Change (1st ed.). Farnham, England: Gower Publishing.
17. Fiedler, F. E. (1967). A theory of leadership effectiveness. New York, NY: McGraw-Hill.
18. Fransen, K., Delvaux, E., Mesquita, B., and Van Puyenbroeck, S. (2018). The emergence of shared leadership in newly formed teams with an initial structure of vertical leadership: A longitudinal analysis. Journal of Applied Behavioral Science, 54(2), 140-170. doi: 10.1177/0021886318756359
19. Fransen, K., Boen, F., Haslam, S. A., McLaren, C. D., Mertens, N., Steffens, N. K., and Bruner, M. W. (2022). Unlocking the power of 'us': Longitudinal evidence that identity leadership predicts team functioning and athlete well-being. Journal of Sports Sciences, 40(24), 2768-2783. doi: 10.1080/02640414.2023.2193005
20. French, J. R. P., and Raven, B. H. (1959). The bases of social power. In D. Cartwright (Ed.), Studies in social power, 150-167. Ann Arbor, MI: Institute for Social Research.
21. Gagné, M., and Deci, E. L. (2005). Self-determination theory and work motivation. Journal of Organizational Behavior, 26(4), 331-362. doi: 10.1002/job.322
22. Gerstner, C. R., and Day, D. V. (1997). Meta-analytic review of leader-member exchange theory: Correlates and construct issues. Journal of Applied Psychology, 82(6), 827-844. doi: 10.1037/0021-9010.82.6.827
23. Graen, G. B., and Uhl-Bien, M. (1995). Relationship-based approach to leadership: Development of leader-member exchange (LMX) theory of leadership over 25 years. Applying a multi-level multi-domain perspective. Leadership Quarterly, 6(2), 219-247. doi: 10.1016/1048-9843(95)90036-5
24. House, R. J. (1971). A path goal theory of leader effectiveness. Administrative Science Quarterly, 16(3), 321-339. doi: 10.2307/2391905
25. House, R. J., and Aditya, R. N. (1997). The social scientific study of leadership: Quo vadis? Journal of Management, 23(3), 409-473. doi: 10.1177/014920639702300306

26. House, R. J., and Mitchell, T. R. (1974). Path-goal theory of leadership. Journal of Contemporary Business, 9, 81-97.
27. Humphrey, S. E., Nahrgang, J. D., and Morgeson, F. P. (2007). Integrating motivational, social, and contextual work design features: A meta-analytic summary and theoretical extension of the work design literature. Journal of Applied Psychology, 92(5), 1332-1356. doi: 10.1037/0021-9010.92.5.1332
28. Judge, T. A., Bono, J. E., Ilies, R., and Gerhardt, M. W. (2002). Personality and leadership: A qualitative and quantitative review. Journal of Applied Psychology, 87(4), 765-780. doi: 10.1037/0021-9010.87.4.765
29. Judge, T. A., Piccolo, R. F., and Ilies, R. (2004). The Forgotten Ones? The Validity of Consideration and Initiating Structure in Leadership Research. Journal of Applied Psychology, 89(1), 36-51. doi: 10.1037/0021-9010.89.1.36
30. Kelman, H. C. (1958). Compliance, identification, and internalization: Three processes of attitude change. Journal of Conflict Resolution, 2(1), 51-60. doi: 10.1177/002200275800200106
31. Kerr, S., and Jermier, J. M. (1978). Substitutes for leadership: Their meaning and measurement. Organizational Behavior and Human Performance, 22(3), 375-403. doi: 10.1016/0030-5073(78)90023-5
32. Kuipers, K. J. (2009). Formal and Informal Network Coupling and its Relationship to Workplace Attachment. Sociological Perspectives, 52(4), 455-479. doi: 10.1525/sop.2009.52.4.455
33. Kotter, J. P. (1990). A force for change: How leadership differs from management. New York, NY: Free Press.
34. Kummelstedt, C. (2023). The role of hierarchy in realizing collective leadership in a self-managing organization. Systemic Practice and Action Research, 36, 355-375. doi: 10.1007/s11213-022-09615-x
35. Lee, A., Willis, S., and Tian, A. W. (2018). Empowering leadership: A meta-analytic examination of incremental contribution, mediation, and moderation. Journal of Organizational Behavior, 39(3), 306-325. doi: 10.1002/job.2220
36. Lorinkova, N. M., Pearsall, M. J., and Sims, H. P., Jr. (2013). Examining the differential longitudinal performance of directive versus empowering leadership in teams. Academy of Management Journal, 56(2), 573-596. doi: 10.5465/amj.2011.0132
37. Marks, M. A., Mathieu, J. E., and Zaccaro, S. J. (2001). A temporally based framework and taxonomy of team processes. Academy of Management Review, 26(3), 356-376. doi: 10.5465/amr.2001.4845785
38. Martin, R., Guillaume, Y., Thomas, G., Lee, A., and Epitropaki, O. (2016). Leader-member exchange (LMX) and performance: A meta-analytic review. Personnel Psychology, 69(1), 67-121. doi: 10.1111/peps.12100

39. Mertens, N., Boen, F., Steffens, N. K., Cotterill, S. T., Haslam, S. A., and Fransen, K. (2020). Leading together towards a stronger 'us': An experimental test of the effectiveness of the 5R Shared Leadership Program (5RS) in basketball teams. Journal of Science and Medicine in Sport, 23(8), 770-775. doi: 10.1016/j.jsams.2020.01.010
40. Pan Fagerlin, W., and Lövstål, E. (2020). Top managers' formal and informal control practices in product innovation processes. Qualitative Research in Accounting and Management, 17(4), 497-524. doi: 10.1108/QRAM-02-2019-0042
41. Peyton, T., Zigarmi, D., and Fowler, S. N. (2019). Examining the relationship between leaders' power use, followers' motivational outlooks, and followers' work intentions. Frontiers in Psychology, 9, Article 2620. doi: 10.3389/fpsyg.2018.02620
42. Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J. Y., and Podsakoff, N. P. (2003). Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. Journal of Applied Psychology, 88(5), 879-903. doi: 10.1037/0021-9010.88.5.879
43. Raven, B. H. (2004). Six bases of power. In G. R. Goethals, G. J. Sorenson, and J. M. Burns (Eds.), Encyclopedia of Leadership, 1242-1249. Thousand Oaks, CA: Sage.
44. Ryan, R. M., and Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. American Psychologist, 55(1), 68-78. doi: 10.1037/0003-066X.55.1.68
45. Serrat, O. (2017). Informal authority in the workplace. In Knowledge solutions: Tools, methods, and approaches to drive organizational performance, 725-730. Springer. doi: 10.1007/978-981-10-0983-9_79
46. Slemp, G. R., Kern, M. L., Patrick, K. J., and Ryan, R. M. (2018). Leader autonomy support in the workplace: A meta-analytic review. Motivation and Emotion, 42(5), 706-724. doi: 10.1007/s11031-018-9698-y
47. Smither, J. W., London, M., and Reilly, R. R. (2005). Does performance improve following multisource feedback? A theoretical model, meta-analysis, and review of empirical findings. Personnel Psychology, 58(1), 33-66. doi: 10.1111/j.1744-6570.2005.514_1.x
48. Somech, A. (2006). The effects of leadership style and team process on performance and innovation in functionally heterogeneous teams. Journal of Management, 32(1), 132-157. doi: 10.1177/0149206305277799
49. Stogdill, R. M. (1948). Personal factors associated with leadership: A survey of the literature. The Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied, 25, 35-71. doi: 10.1080/00223980.1948.9917362
50. Sturm, R. E., Herz, H., and Antonakis, J. (2021). The science of leader power. The Leadership Quarterly, 32(4), Article 101550. doi: 10.1016/j.leaqua.2021.101550
51. Subramony, M., Segers, J., Chadwick, C., and Shyamsunder, A. (2018). Leadership development practice bundles and organizational performance: The mediating role of

human capital and social capital. Journal of Business Research, 83, 120-129. doi: 10.1016/j.jbusres.2017.09.044

52. Tyler, T. R. (1997). The psychology of legitimacy: A relational perspective on voluntary deference to authorities. Personality and Social Psychology Review, 1(4), 323-345. doi: 10.1207/s15327957pspr0104_4
53. Tyler, T. R., and De Cremer, D. (2005). Process-based leadership: Fair procedures and reactions to organizational change. The Leadership Quarterly, 16(4), 529-545. doi: 10.1016/j.leaqua.2005.06.001
54. Van der Rijt, J., Van den Bossche, P., and Segers, M. S. R. (2013). Understanding informal feedback seeking in the workplace: The impact of the position in the organizational hierarchy. European Journal of Training and Development, 37(1), 72-85. doi: 10.1108/03090591311293293
55. Yukl, G. (1999). An evaluation of conceptual weaknesses in transformational and charismatic leadership theories. The Leadership Quarterly, 10(2), 285-305. doi: 10.1016/S1048-9843(99)00013-2
56. Yukl, G. A. (2013). Leadership in organizations (8th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.

WDROŻENIE I REALIZACJA SYSTEMU SUGESTII PRACOWNICZYCH W PRZEDSIĘBIORSTWIE Z BRANŻY OBUWNICZEJ

Kordian BANAŚ[1], Krzysztof KNOP[1*]

[1] Wydział Zarządzania, Politechnika Częstochowska, Częstochowa; Studenckie Koło Naukowe „Promotor Jakości i Bezpieczeństwa", 12kordian12@wp.pl

[2] Wydział Zarządzania, Politechnika Częstochowska, Częstochowa; krzysztof.knop@wz.pcz.pl, ORCID ID: 0000-0003-0842-9584

* Korespondencja: krzysztof.knop@wz.pcz.pl

Streszczenie: W artykule zaprezentowano proces wdrożenia oraz realizacji systemu sugestii pracowniczych – indywidualnych i zespołowych – w przedsiębiorstwie z branży obuwniczej, specjalizującym się w produkcji cholewek damskich. W ramach badań zaproponowano szczegółowe procedury i formularze zgłaszania sugestii, dostosowane do warunków funkcjonowania małego zakładu produkcyjnego, osadzone w filozofii Kaizen. System sugestii pracowniczych wykorzystano do analizy i rozwiązania rzeczywistych problemów produkcyjnych oraz organizacyjnych zidentyfikowanych w badanym przedsiębiorstwie. Zastosowanie systemu sugestii umożliwiło efektywne wykorzystanie potencjału kreatywnego pracowników zarówno w wymiarze indywidualnym, jak i zespołowym, przyczyniając się do poprawy jakości, doskonalenia procesów oraz wzmocnienia kultury organizacyjnej opartej na ciągłym doskonaleniu. Wykazano, że system sugestii pracowniczych, dzięki swojej prostocie, angażowaniu pracowników różnych szczebli oraz możliwości wdrożenia bez znacznych nakładów finansowych, może być z powodzeniem stosowany w małych przedsiębiorstwach produkcyjnych jako narzędzie wspierające identyfikację i eliminację problemów procesowych i jakościowych.

Slowa kluczowe: branża obuwnicza, doskonalenie, Kaizen, system sugestii pracowniczych, rozwiązywanie problemów.

IMPLEMENTATION AND REALIZATION OF AN EMPLOYEE SUGGESTION SYSTEM IN A FOOTWEAR INDUSTRY ENTERPRISE

Abstract: This article presents the process of implementing and implementing an employee suggestion system – individual and team – in a footwear company specializing in the production of women's uppers. The study proposed detailed procedures and forms for submitting suggestions, adapted to the operating conditions of a small production facility and grounded in the Kaizen philosophy. The employee suggestion system was used to analyze and solve real-

world production and organizational problems identified in the studied company. Implementing the suggestion system enabled the effective utilization of employee creative potential, both individually and collectively, contributing to improved quality, process refinement, and a strengthened organizational culture based on continuous improvement. It was demonstrated that the employee suggestion system, thanks to its simplicity, the involvement of employees at various levels, and the possibility of implementation without significant financial outlays, can be successfully used in small manufacturing companies as a tool supporting the identification and elimination of process and quality issues.

Keywords: footwear industry, improvement, Kaizen, employee suggestion system, problem-solving.

Wprowadzanie

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne działające w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu gospodarczym stają przed rosnącą presją nieustannego doskonalenia swoich procesów, produktów i organizacji pracy (Blikle, 2014). Jakość produktu odgrywa kluczową rolę w budowaniu satysfakcji klienta i utrzymaniu silnej reputacji producenta. Jakość nie tylko wpływa na postrzeganą wartość produktu, ale także na decyzje konsumentów i lojalność wobec marki (Leby, Knop 2025). Zdolność do identyfikowania i skutecznego rozwiązywania problemów – zarówno produkcyjnych, jak i jakościowych – staje się jednym z kluczowych czynników decydujących o konkurencyjności i przetrwaniu firmy na rynku (Chwist i Ingaldi, 2024; Dahlgaard, Kristensen, Kanji 2000; Ingladi, 2014). Brak sprawnych mechanizmów doskonalenia skutkuje nie tylko stratami finansowymi i obniżeniem jakości wyrobów, lecz także ogranicza zaangażowanie pracowników i hamuje rozwój kultury organizacyjnej opartej na ciągłym uczeniu się (Imai 2007).

W literaturze naukowej i praktyce zarządzania szczególne miejsce zajmuje koncepcja Kaizen – japońska filozofia ciągłego doskonalenia opierająca się na przekonaniu, że trwały postęp organizacji jest możliwy dzięki systematycznym, małym usprawnieniom dokonywanych przez wszystkich zatrudnionych, na każdym szczeblu hierarchii organizacyjnej (Imai 2007; Kosieradzka 2012). Ciągłe doskonalenia inicjowane przez pracownika lub zespół pracowników tworzą razem fundament kultury ciągłego doskonalenia, w której zarówno indywidualne sugestie pracownicze, jak i zespołowe rozwiązywanie problemów stają się naturalnymi elementami codziennej pracy (Kosieradzka 2012; Kosieradzka 2019). Jak podkreślają Krząstek i Niemczyk (2022), do głównych barier wdrażania filozofii Kaizen należą: brak odpowiedniej kultury organizacyjnej opartej na zaangażowaniu pracowników na wszystkich szczeblach organizacji, niedostateczne uwzględnianie przez kadrę menedżerską propozycji usprawnień zgłaszanych przez pracowników oraz brak rozwiązań organizacyjnych wspierających proces ciągłego doskonalenia. Podobne stanowisko prezentują Gabryelewicz, Gawłowicz i Sadłowska-Wrzesińska (2015), wskazując, że skuteczność zastosowania Kaizen zależy od specyfiki zakładu, w którym wdrażane są metody ciągłego doskonalenia, a także od

zaangażowania pracowników i ich otwartości na zmiany. Istotną rolę w tym procesie odgrywa menedżer, ponieważ to od jego postawy zależy, czy współpraca z pracownikami będzie sprzyjała swobodnemu dzieleniu się pomysłami i spostrzeżeniami, bez obawy przed brakiem akceptacji. Barierą wdrażania Kaizen może być zatem nie tylko brak odpowiednich narzędzi organizacyjnych, lecz także niewłaściwy styl zarządzania, niski poziom zaufania oraz opór pracowników wynikający z braku zmiany mentalności. Kaizen należy bowiem traktować nie jako jednorazowe działanie usprawniające, ale jako kulturę codziennego, systematycznego doskonalenia. Bez zmiany sposobu myślenia ludzi oraz bez rzeczywistego zaangażowania większości pracowników trudno osiągnąć trwały sukces we wdrażaniu tej filozofii.

Kluczowym narzędziem transformacji filozofii Kaizen w przedsiębiorstwie jest system sugestii pracowniczych, obejmujący zorganizowane procedury zgłaszania, oceniania i wdrażania usprawnień – zarówno indywidualnych, jak i grupowych (Dziuba i in., 2017). System sugestii indywidualnych umożliwia każdemu pracownikowi aktywne uczestnictwo w procesie doskonalenia własnego stanowiska pracy, podczas gdy system sugestii zespołowych – realizowany przez tzw. małe grupy – pozwala na wspólne analizowanie problemów wykraczających poza zakres odpowiedzialności pojedynczej osoby (Kosieradzka 2012; Kosieradzka 2019). Jak zauważa Imai (2007), poza oczywistymi korzyściami ekonomicznymi wynikającymi z wdrożenia usprawnień organizacja odnosi również korzyści niematerialne: rozwój wiedzy i kwalifikacji personelu, wzrost zaangażowania pracowników oraz poprawę komunikacji wewnętrznej.

Twórcze rozwiązywanie problemów – zarówno indywidualne, jak i zespołowe – jest fundamentem skutecznego systemu sugestii (Proctor, 2002). Jak podkreślają Mikołajczyk (2001), Chauvet (1997) oraz Jasiński (1998), działalność twórcza ma z natury charakter zespołowy, a znacznie lepsze rezultaty uzyskuje się dzięki zastosowaniu metod twórczego myślenia właśnie w zespołach. Efekt synergii wynikający z połączenia wielodyscyplinarnych kwalifikacji, różnorodnych doświadczeń zawodowych i odmiennych perspektyw członków grupy sprawia, że suma wiedzy i pomysłów zespołu jest większa niż prosta suma wiedzy posiadanych przez poszczególnych jego członków (Kosieradzka 2012). W kontekście organizacyjnym Armstrong (1998) wskazuje, że efektywny zespół rozwiązujący problemy charakteryzuje się demokratycznym stylem zarządzania, klimatem wzajemnego szacunku, otwartością na krytykę pozbawioną ataków personalnych oraz dążeniem do konsensusu przy podejmowaniu decyzji.

Kluczową rolę w sprawnym funkcjonowaniu systemu sugestii odgrywa właściwy proces rozwiązywania problemu przez zespół. Powszechnie stosowanym podejściem jest schemat postępowania oparty na cyklu PDCA (Plan – Wykonaj – Sprawdź – Działaj), który stanowi jedno z podstawowych narzędzi systematycznego doskonalenia procesów (Dahlgaard, Kristensen, Kanji 2000; Kosieradzka 2012). Równolegle z wdrażaniem kolejnych usprawnień niezbędne jest stosowanie cyklu SDCA (Standaryzuj – Wykonaj – Sprawdź – Działaj), mającego na celu stabilizację i utrwalenie wprowadzonych zmian w postaci zaktualizowanych

standardów pracy (Knop, Mielczarek 2015; Kosieradzka, Smagowicz 2009). Dopiero ustabilizowanie procesu po wprowadzeniu jednej zmiany tworzy warunki do planowania kolejnych usprawnień.

Motywowanie pracowników do aktywnego uczestnictwa w systemie sugestii wymaga starannie zaprojektowanego systemu oceny i wynagradzania zgłaszanych wniosków. System ten powinien być przejrzysty, sprawiedliwy i obejmować zarówno nagrody materialne, jak i niematerialne – nagrody symboliczne, uznanie publiczne, udział w szkoleniach czy zgłaszanie najlepszych projektów do konkursów (Kosieradzka 2012). Zgodnie z koncepcją hierarchii potrzeb Maslowa, omawianą m.in. przez Stonera, Freemana i Gilberta (1997) oraz Miler-Zawodniak (2012), skutecznie zaprojektowany system motywacyjny wspierający program Kaizen powinien odnosić się do różnych poziomów potrzeb pracowników: od potrzeby bezpieczeństwa, przez potrzebę przynależności i uznania, aż po potrzebę samorealizacji. Podstawą takiego systemu jest zapewnienie bezpiecznych, ergonomicznych i czystych warunków pracy, które zaspokajają potrzebę bezpieczeństwa. Ważnym elementem jest również docenianie pomysłów zgłaszanych przez pracowników, także tych drobnych, ponieważ wzmacnia to ich poczucie przynależności do organizacji oraz buduje przekonanie, że ich wiedza, doświadczenie i zaangażowanie są zauważane i cenione. Filozofia Kaizen może także wspierać potrzebę samorealizacji, ponieważ daje pracownikom realny wpływ na sposób wykonywania pracy, umożliwia rozwijanie umiejętności, pobudza kreatywne myślenie oraz pozwala uczestniczyć we wdrażaniu własnych propozycji usprawnień.

W praktyce przedsiębiorstw produkcyjnych system sugestii pracowniczych napotyka szereg wyzwań wdrożeniowych. Do najczęściej wskazywanych barier należą: niewystarczające zaangażowanie kadry kierowniczej, brak odpowiedniej kultury organizacyjnej sprzyjającej zgłaszaniu pomysłów, niedostateczna informacja zwrotna dla pracowników, zbyt skomplikowany proces zgłaszania i oceny sugestii oraz brak przejrzystych zasad dotyczących dalszego postępowania z pomysłami. Szczególnie demotywujące jest to, gdy pracownik po zgłoszeniu usprawnienia nie otrzymuje żadnej odpowiedzi lub gdy procedura jest na tyle rozbudowana, że zniechęca do aktywnego udziału w programie sugestii. W efekcie system, który powinien wspierać zaangażowanie i ciągłe doskonalenie, może stać się rozwiązaniem formalnym, mało atrakcyjnym dla pracowników i nieskutecznym organizacyjnie (CreAction, b.d.; Imai, 2007; Stoner, Freeman i Gilbert, 1997). W przypadku małych i średnich przedsiębiorstw produkcyjnych, takich jak zakłady z branży obuwniczej, dodatkową trudność stanowi ograniczona liczba pracowników oraz brak formalnych struktur zarządzania jakością (Banaś, Knop 2025a; Banaś, Knop 2025b), co wymaga szczególnie starannego dostosowania systemu sugestii do specyfiki organizacyjnej danego zakładu. Męcfel (2024) w studium przypadku systemu sugestii wdrożonego w dużej firmie OKNOPLAST wskazuje, że mimo formalnych struktur zarządzania jakością i wieloletniego doświadczenia we wdrażaniu Kaizen, po początkowym entuzjazmie odnotowano tam wyraźny spadek liczby zgłaszanych wniosków, a kluczowym czynnikiem odwrócenia tego trendu okazało się bezpośrednie zaangażowanie

kierowników liniowych w mobilizowanie pracowników. Potwierdza to, że skuteczność systemu sugestii zależy w dużym stopniu od codziennej postawy przełożonych i motywowania pracowników w zakresie zgłaszania pomysłów. Z kolei Jagodziński i Ostrowski (2020) pokazują na przykładzie przedsiębiorstwa zajmującego się regeneracją, że skuteczność systemu sugestii bywa zróżnicowana nawet w obrębie jednej firmy, w zależności od specyfiki danego działu – co dodatkowo potwierdza, że gotowe wzorce trudno przenosić bezrefleksyjnie, bez uwzględnienia lokalnych uwarunkowań organizacyjnych. Maarof i Mahmud (2016), w odniesieniu do małych i średnich przedsiębiorstw, wskazują ze opór wobec zmian, brak motywacji pracowników, brak zrozumienia strategicznej ścieżki rozwoju firm oraz trudności w zarządzaniu ciągłym doskonaleniem stanowiły główne bariery skutecznego wdrażania narzędzi Kaizen.

Przemysł obuwniczy, charakteryzujący się dużym udziałem operacji manualnych, wieloetapowością procesów wytwarzania oraz wysoką wrażliwością jakości wyrobu końcowego na właściwości stosowanych materiałów (Banaś i Knop, 2025a; Banaś i Knop, 2025b), stwarza szczególnie sprzyjające warunki do wdrażania systemu sugestii pracowniczych. W tego typu środowisku produkcyjnym wiele problemów jakościowych, organizacyjnych i technologicznych ujawnia się bezpośrednio na stanowiskach pracy, dlatego pracownicy produkcyjni posiadają unikalną wiedzę praktyczną dotyczącą rzeczywistych przyczyn zakłóceń oraz możliwych sposobów ich eliminacji. Wiedza ta, oparta na codziennym doświadczeniu, często nie jest w pełni wykorzystywana przez formalne kanały komunikacji. Sprawnie funkcjonujący system sugestii może zatem stanowić mechanizm przekształcania obserwacji i pomysłów pracowników w konkretne działania usprawniające, ukierunkowane na poprawę organizacji pracy, ograniczenie błędów i strat oraz podnoszenie jakości procesów i wyrobów obuwniczych.

Celem badań jest przedstawienie procesu wdrożenia oraz realizacji systemu sugestii pracowniczych – indywidualnych i zespołowych – w wybranym przedsiębiorstwie z branży obuwniczej, specjalizującym się w produkcji cholewek damskich. Przeprowadzone badanie ma charakter studium przypadku, obejmującego opracowanie i implementację procedur oraz formularzy systemu sugestii, a następnie jego praktyczne zastosowanie do identyfikacji i rozwiązywania rzeczywistych problemów produkcyjnych i organizacyjnych w badanym zakładzie.

Nowość naukowa niniejszego opracowania polega na empirycznym sprawdzeniu, czy manualny model systemu sugestii (Kosieradzka, 2019) można skutecznie zaadaptować do specyficznych warunków mikro- i małego przedsiębiorstwa z branży obuwniczej, w którym brakuje formalnych struktur zarządzania jakością typowych dla dużych organizacji. Artykuł stanowi kontynuację i uzupełnienie wcześniejszych badań autorów prowadzonych w tym samym przedsiębiorstwie (Banaś, Knop 2025a; Banaś, Knop 2025b), pokazując, jak w praktyce można wdrażać różnego rodzaju narzędzia ciągłego doskonalenia w małym zakładzie branży obuwniczej.

Metodyka badań

Badaniem objęto wybrane przedsiębiorstwo z branży obuwniczej, specjalizujące się w produkcji cholewek damskich. Firma działa w formie jednoosobowej działalności gospodarczej, została założona w 1994 roku i mieści się w województwie śląskim. Zatrudnia ona obecnie 7 osób. Struktura organizacyjna jest płaska – właściciel pełni jednocześnie funkcję kierownika i menedżera, nadzorując bezpośrednio pięć działów: zamówień, produkcji manualnej, produkcji maszynowej, magazynowy oraz transportowy. Taki układ, choć wymaga od właściciela dużego zaangażowania, sprzyja szybkiemu obiegowi informacji i bezpośredniej komunikacji z pracownikami, co miało istotne znaczenie przy wdrażaniu opisywanego w dalszej części artykułu systemu sugestii. Wdrożenie pierwszych formularzy systemu sugestii przypadło na drugą połowę 2024 roku, a od tego czasu system funkcjonuje w firmie na bieżąco, obejmując zarówno zgłoszenia indywidualne, jak i zespołowe. Firma prowadzi działalność w zakresie wytwarzania komponentów obuwia, koncentrując się przede wszystkim na procesach krojenia, zszywania oraz wykończania cholewek. Ze względu na ręczny charakter wielu operacji oraz istotne znaczenie precyzji i powtarzalności wykonania, przedsiębiorstwo to cyklicznie zmaga się z problemami o charakterze jakościowym i organizacyjnym pojawiającymi się na różnych etapach procesu produkcyjnego (Banaś, Knop 2025a; Banaś, Knop 2025b).

Celem przeprowadzonych badań było wdrożenie i realizacja systemu sugestii pracowniczych – indywidualnych oraz zespołowych – jako narzędzia pobudzania kreatywności i angażowania pracowników w procesie ciągłego doskonalenia organizacji. Badanie przeprowadzono zgodnie z podejściem diagnostycznym (Mikołajczyk 2001; Martyniak 1996), polegającym na szczegółowej analizie stanu dotychczasowego, identyfikacji nieprawidłowości w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa oraz zaprojektowaniu i wdrożeniu niezbędnych usprawnień. Podejście to uznano za adekwatne do charakteru badanego obiektu, gdyż przedsiębiorstwo nie posiadało wcześniej żadnych formalnych procedur zarządzania sugestiami pracowniczymi, co uniemożliwiało zastosowanie podejścia prognostycznego opartego na koncepcji systemu idealnego (Kosieradzka 2012).

Badanie miało charakter studium przypadku i składało się z pięciu głównych etapów. Etap pierwszy obejmował analizę stanu wyjściowego przedsiębiorstwa: przeprowadzono obserwacje na hali produkcyjnej, wywiady z pracownikami i kierownikiem, a także przegląd dotychczasowych sposobów dokumentowania i reagowania na problemy. Etap drugi polegał na opracowaniu szczegółowych procedur systemu sugestii – odrębnie dla sugestii indywidualnych i sugestii zespołowych – wraz z towarzyszącymi im formularzami Kaizen. W etapie trzecim przeprowadzono szkolenie pracowników i kierownictwa z zakresu zasad działania systemu, sposobów wypełniania formularzy oraz kryteriów oceny zgłaszanych wniosków. Etap czwarty obejmował praktyczną realizację systemu – zgłaszanie, ocenę i

wdrażanie sugestii pracowniczych w warunkach rzeczywistego funkcjonowania przedsiębiorstwa. Etap piąty to weryfikacja skuteczności wdrożonych rozwiązań oraz ocena funkcjonowania systemu z perspektywy uczestników.

System sugestii indywidualnych opracowano zgodnie z wzorcową koncepcją formularza Kaizen opisywaną przez Kosieradzką (2019). Polega on na składaniu przez pracowników pisemnych wniosków dotyczących usprawnień w obrębie własnego stanowiska pracy lub bezpośredniego otoczenia produkcyjnego. Zgodnie z założeniami Kaizen zorientowanego na jednostkę, propozycje te powinny dotyczyć rozwiązywania problemów o lokalnym zasięgu: usprawniania pracy pod kątem wydajności, bezpieczeństwa, wygody i komfortu oraz oszczędności wykorzystywanych zasobów, a ich wdrożenie powinno być niskokosztowe lub wręcz beznakładowe (Kosieradzka 2012; Kosieradzka 2019). Każdy wniosek indywidualny podlega ocenie punktowej według pięciu kryteriów: kreatywności i oryginalności rozwiązania, wysiłku włożonego w testowanie rozwiązania, możliwości adaptacji na innych stanowiskach, wymiernych efektów (wzrost wydajności, obniżka kosztów) oraz efektów niewymiernych (poprawa jakości, bezpieczeństwa, komfortu pracy). Suma punktów wynosi 100, a ocena jest korygowana współczynnikiem uwzględniającym, czy usprawnienie dotyczy własnego czy innego stanowiska pracy.

System sugestii zespołowych opracowano w oparciu o model małych grup, stanowiących podstawę Kaizen zorientowanego na zespół (Kosieradzka 2012; Kosieradzka 2019; Imai 2007). Małe grupy tworzone są przez kilku pracowników jednej komórki organizacyjnej, którzy wspólnie identyfikują problem, analizują jego przyczyny i opracowują propozycje usprawnień o szerszym zasięgu niż możliwy do uchwycenia z perspektywy jednego stanowiska. Zespół działa zgodnie ze schematem cyklu PDCA, obejmującym: sformułowanie problemu, uzgodnienie planu działania, zebranie i analizę danych, wybór najlepszego pomysłu usprawnienia, jego wdrożenie oraz obserwację wyników w codziennym funkcjonowaniu (Dahlgaard, Kristensen, Kanji 2000; Kosieradzka, Smagowicz 2009; Szwedzka, Lipniak 2017). Wnioski zespołowe, podobnie jak indywidualne, zgłaszane są w formie pisemnej na formularzach Kaizen, a ocena punktowa podzielona jest między członków grupy proporcjonalnie do ich wkładu w opracowanie rozwiązania.

Procedurę zgłaszania sugestii zaprojektowano możliwie prosto, aby nie stanowiła bariery dla pracowników. Gotowe formularze dostępne są w wyznaczonych miejscach na hali produkcyjnej; wypełniony wniosek pracownik składa bezpośrednio kierownikowi lub wrzuca do przeznaczonej do tego skrzynki. Ocena sugestii indywidualnych prowadzona jest przez bezpośredniego zwierzchnika pracownika, który równocześnie nadzoruje obszar objęty wnioskiem. Sugestie wykraczające poza obszar odpowiedzialności jednej komórki przekazywane są do rozpatrzenia w ramach systemu sugestii zespołowych. Każdy pracownik powinien otrzymać informację zwrotną o decyzji dotyczącej zgłoszonego wniosku; w przypadku jego odrzucenia niezbędne jest podanie uzasadnienia, co ma istotne znaczenie motywacyjne i buduje zaufanie do systemu (Kosieradzka 2012; Kosieradzka 2019; Imai 2007).

Skuteczność systemu sugestii jest ściśle powiązana z przejrzystym i sprawiedliwym systemem motywacyjnym. W opracowanym systemie wynagradzania uwzględniono zarówno bodźce materialne – nagrody finansowe odpowiadające uzyskanej punktacji – jak i niematerialne, w tym publiczne uznanie osiągnięć, co pozwala zaspokoić potrzeby wyższego rzędu pracowników: potrzebę przynależności, uznania oraz samorealizacji w rozumieniu hierarchii potrzeb Maslowa (Miler-Zawodniak, 2012; Stoner, Freeman, Gilbert 1997). Istotnym elementem systemu jest także nagradzanie wniosków odrzuconych lub wstrzymanych symboliczną nagrodą, co podkreśla wartość samego działania i zachowania postawy proaktywnej, a nie tylko efektu końcowego (Kosieradzka 2012; Kosieradzka 2019).

Wdrożone usprawnienia są dokumentowane i prezentowane zgodnie z wzorem „Historii rozwiązania problemu" (Kosieradzka 2012; Kosieradzka 2019; Petersen, Hillkirk 1993), który na jednym arkuszu pozwala przedstawić: temat projektu, źródło problemu, cel, analizę przyczyn, zastosowane środki zaradcze, ocenę skuteczności oraz plan dalszych działań. Taka forma dokumentacji służy zarówno zachowaniu wiedzy organizacyjnej, jak i motywowaniu pracowników przez upowszechnianie dobrych przykładów. Wdrożone standardy są następnie aktualizowane zgodnie z cyklem SDCA, zapewniającym stabilizację procesu przed przystąpieniem do kolejnych etapów doskonalenia (Knop, Mielczarek 2015; Kosieradzka, Smagowicz 2009).

Szkolenie pracowników i kadry kierowniczej z zasad działania systemu sugestii stanowiło integralna część procesu wdrożenia. Jak podkreśla Kosieradzka (2012), skuteczność systemu zależy nie tylko od wiedzy fachowej pracowników, ale również od znajomości prostych metod i technik identyfikowania i rozwiązywania problemów, dlatego szkolenie obejmowało zarówno teoretyczne wprowadzenie do filozofii Kaizen, jak i praktyczne ćwiczenia z wypełniania formularzy oraz prowadzenia sesji zespołowych. Zgodnie z zalecaną przez Kosieradzką (2012) metodą system szkolenia trenerów wewnętrznych (ang. *train the trainer*), kierownik zakładu, po zapoznaniu się z założeniami systemu, przyjął rolę wewnętrznego promotora zmian i przekazał wiedzę pracownikom bezpośrednio produkcyjnym.

Wyniki badań

W ramach przeprowadzonych badań opracowano i wdrożono w badanym przedsiębiorstwie z branży obuwniczej kompletny system sugestii pracowniczych, obejmujący dwa wzajemnie uzupełniające się podsystemy: system sugestii indywidualnych oraz system sugestii zespołowych. Dla każdego z nich zaprojektowano dedykowane formularze Kaizen, dostosowane do specyfiki organizacyjnej i produkcyjnej zakładu, a następnie przeprowadzono ich praktyczną realizację, dokumentując rzeczywiste przypadki zgłoszonych i wdrożonych usprawnień.

Pierwszym rezultatem badań jest zaimplementowanie wzoru formularza wniosku indywidualnego (Kosieradzka, 2019), stanowiącego narzędzie systemu sugestii indywidualnych wdrożonego w badanym przedsiębiorstwie. Formularz przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.
Wzór formularza wniosku indywidualnego

Logo firmy	**Kaizen - Formularz wniosku indywidualnego**
Data	
Dane wnioskodawcy: - imię i nazwisko, - stanowisko, - dział.	**Temat propozycji zmian:**
Metoda stosowana: przed usprawnieniem - krótki opis, - rysunek/schemat.	**Proponowana metoda usprawnienia:** - opis nowego podejścia/metody (rysunek, schemat, opis działania)
Czego dotyczy problem:	**Rezultat usprawnienia:**
Ocena wniosku według kryteriów obowiązujących w przedsiębiorstwie	
Lp.	**Kryterium**
1.	Kreatywność i oryginalność rozwiązania [maks. 20 pkt]
2.	Wysiłek włożony w testowanie rozwiązania [maks. 20 pkt]
3.	Możliwość adaptacji rozwiązania w innych obszarach [maks. 10 pkt]
4.	Efekty wymierne (oszczędności, efektywność) [maks. 30 pkt]
5.	Efekty niewymierne (jakość, komfort, bezpieczeństwo) [maks. 20 pkt]
Razem	**[maks. 100 pkt]**
Decyzja: - wdrożenie, - wdrożenie z modyfikacją, - przekazanie do dalszej analizy, - wstrzymanie wdrożenia, - odrzucenie.	**Cele usprawnienia:** 1) poprawa jakości, 2) redukcja pracochłonności, 3) poprawa BHP, 4) oszczędność materiałów i/lub energii, 5) poprawa bezpieczeństwa, 6) zwiększenie wydajności i trwałości maszyn/urządzeń, 7) usprawnienie pracy biurowej, 8) inne.
Wdrożenie: data wdrożenia …… lub planowany termin wdrożenia ……	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Kosieradzka 2019).

Opracowany formularz wniosku indywidualnego, przedstawiony w tabeli 1, stanowi pełną adaptację wzorcowego formularza Kaizen zaproponowanego przez Kosieradzką (2019) do warunków badanego przedsiębiorstwa obuwniczego. W toku analizy uznano, że struktura tego formularza w wystarczającym stopniu odpowiada potrzebom małego przedsiębiorstwa produkcyjnego, dlatego nie wprowadzono zmian w jego układzie ani zakresie informacyjnym. Decyzja ta wynikała z faktu, że formularz zawiera kluczowe elementy niezbędne do

skutecznego zgłaszania, oceny i dokumentowania propozycji usprawnień, a jednocześnie zachowuje prostą i przejrzystą formę, co ma szczególne znaczenie w organizacjach o ograniczonych zasobach kadrowych i administracyjnych.

Struktura zaimplementowanego w badanym przedsiębiorstwie formularza systemu sugestii indywidualnych obejmuje cztery zasadnicze części. Część pierwsza gromadzi dane identyfikacyjne: datę zgłoszenia, dane wnioskodawcy (imię i nazwisko, stanowisko pracy, dział) oraz temat propozycji zmian. Część druga służy opisowi istoty sugestii: pracownik zobowiązany jest do zwięzłego scharakteryzowania metody stosowanej przed usprawnieniem (krótki opis i rysunek/schemat) oraz proponowanej metody usprawnienia wraz z opisem działania. Opis musi też zawierać wskazanie czego dotyczy problem oraz oczekiwanego rezultatu usprawnienia. Taka symetryczna struktura opisu stanu obecnego i stanu po usprawnieniu nawiązuje bezpośrednio do wzorca formularza indywidualnego zaproponowanego przez Kosieradzką (2019), w którym zestawienie obu stanów ma ułatwiać oceniającemu trafną ocenę wartości propozycji. Część trzecia zawiera tabelę oceny punktowej wniosku według pięciu kryteriów: kreatywności i oryginalności rozwiązania (maks. 20 pkt), wysiłku włożonego w testowanie rozwiązania (maks. 20 pkt), możliwości adaptacji rozwiązania w innych obszarach (maks. 10 pkt), efektów wymiernych – oszczędności i efektywności (maks. 30 pkt) oraz efektów niewymiernych – jakości, komfortu i bezpieczeństwa (maks. 20 pkt). Suma maksymalna wynosi 100 punktów i stanowi podstawę obliczenia należnej pracownikowi nagrody. Część czwarta formularza obejmuje decyzję w sprawie wniosku (wdrożenie, wdrożenie z modyfikacją, przekazanie do dalszej analizy, wstrzymanie wdrożenia lub odrzucenie), wskazanie celu usprawnienia spośród ośmiu zdefiniowanych kategorii oraz datę wdrożenia lub planowany termin realizacji.

Wzór formularza wniosku zespołowego, będący podstawą systemu sugestii zespołowych w badanym przedsiębiorstwie, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2.
Wzór formularza wniosku zespołowego

Logo firmy	**Kaizen - Formularz wniosku zespołowego**	
Data:		
Dane grupy: - nazwa grupy, - komórka organizacyjna.	**Dane o autorach:** - imię i nazwisko	**Komórka org. / stanowisko:**
Temat propozycji zmian:		
Metoda stosowana przed usprawnieniem: - krótki opis, - rysunek/schemat.	**Proponowana metoda usprawnienia:** - opis nowego podejścia/metody (rysunek, schemat, opis działania).	
Czego dotyczy problem:	**Rezultat usprawnienia:**	
Ocena wniosku według kryteriów obowiązujących w przedsiębiorstwie:		

Lp. / Kryterium:	**Punktacja przyznana:**	**Punktacja maksymalna:**
1. Kreatywność i oryginalność rozwiązania		200
2. Efekty wymierne (oszczędności, efektywność)		300
3. Poprawa jakości		200
4. Efekty niewymierne (jakość, komfort, bezpieczeństwo)		200
5. Możliwość adaptacji rozwiązania na inne stanowiska		100
Razem / Liczba osób w zespole / Punkty na osobę:		**1000**
Decyzja: - wdrożenie, - wdrożenie z modyfikacją, - przekazanie do dalszej analizy, - wstrzymanie wdrożenia, - odrzucenie, **Wdrożenie:** data wdrożenia …… data oceny ……	**Cele usprawnienia:** 1) poprawa jakości, 2) redukcja pracochłonności, 3) poprawa BHP, 4) oszczędność materiałów i/lub energii, 5) poprawa bezpieczeństwa, 6) zwiększenie wydajności i trwałości maszyn/urządzeń, 7) usprawnienie pracy biurowej. 8) inne.	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Kosieradzka 2019).

Opracowany formularz wniosku zespołowego, przedstawiony w tabeli 2, stanowi pełną adaptację wzorcowego formularza Kaizen zaproponowanego przez Kosieradzką (2019) do warunków badanego zakładu obuwniczego. Przyjęto jego strukturę bez modyfikacji, ponieważ uznano, że odpowiada ona potrzebom małego przedsiębiorstwa produkcyjnego. Formularz obejmuje kluczowe informacje niezbędne do zgłoszenia, oceny i dokumentowania propozycji usprawnienia, a jednocześnie zachowuje prostą i przejrzystą formę, ograniczając ryzyko nadmiernej biurokratyzacji procesu.

Wzór zaimplentowanego formularza wniosku zespołowego (tabela 2) zachowuje logiczną spójność z formularzem indywidualnym (tabela 1), ponieważ oba formularze powinny być ze sobą kompatybilne, aby umożliwić jednolitą obsługę systemu sugestii w całym przedsiębiorstwie. Formularz zespołowy zawiera dodatkowe elementy wynikające ze specyfiki pracy grupowej: dane grupy (nazwa i komórka organizacyjna) oraz dane wszystkich autorów wniosku z wyszczególnieniem komórki organizacyjnej i stanowiska każdego z nich, co umożliwia sprawiedliwy podział punktów między członków zespołu. Skala oceny punktowej jest dziesięciokrotnie wyższa niż w formularzu indywidualnym (maksimum 1000 pkt zamiast 100 pkt), co odzwierciedla potencjalnie szerszy zakres i głębszy wpływ sugestii wypracowanych przez cały zespół. Kryteria oceny wniosku zespołowego obejmują:

kreatywność i oryginalność rozwiązania (maks. 200 pkt), efekty wymierne (maks. 300 pkt), poprawę jakości (maks. 200 pkt), efekty niewymierne (maks. 200 pkt) oraz możliwość adaptacji rozwiązania na inne stanowiska (maks. 100 pkt). Wyraźnie wyższy udział efektów wymiernych w ocenie wniosku zespołowego wynika z założenia, że usprawnienia wypracowane zbiorowo mają większy potencjał generowania mierzalnych korzyści ekonomicznych dla całego przedsiębiorstwa (Kosieradzka 2019; Imai 2007).

Opracowane formularze zostały praktycznie wykorzystane do udokumentowania i oceny rzeczywistych zgłoszeń pracowniczych w badanym przedsiębiorstwie. Przykład zastosowania systemu sugestii indywidualnych w badanym przedsiębiorstwie z branży obuwniczej przedstawia wypełniony formularz wniosku zgłoszonego przez jednego z pracowników przedsiębiorstwa (tabela 3).

Tabela 3.
Przykład zastosowania formularza wniosku indywidualnego w badanym przedsiębiorstwie

Logo firmy	**Kaizen - Formularz wniosku indywidualnego**
Data:	*05.07.2024*
Dane wnioskodawcy: *- JK.* *- Operator prasy do wykrawania.* *- Dział produkcji maszynowej.*	**Temat propozycji zmian:** *Zmniejszenie strat materiałowych podczas wykrawania elementów cholewek.*
Metoda stosowana przed usprawnieniem: *Pracownik ręcznie kładzie formy wykrojników na skórze i następnie korzysta z prasy do wycinania elementów. Układ form nie jest zoptymalizowany, co prowadzi do powstawania dużych odpadów materiałowych między poszczególnymi wykrojami.*	**Proponowana metoda usprawnienia:** *Zastosowanie przezroczystej matrycy z nadrukowanymi szablonami w skali 1:1, która pomaga operatorowi wizualnie optymalizować rozmieszczenie form przed ich wykrawaniem. Matryca jest nakładana na skórę i wskazuje najlepszy układ, minimalizując odpady.*
Czego dotyczy problem: *Straty materiałowe wynikające z nieefektywnego rozmieszczenia form, które powodują, że niewykorzystane fragmenty skóry pozostają odpadem.*	**Rezultat usprawnienia:** *- Redukcja strat materiałowych.* *- Oszczędność kosztów.* *- Zmniejszenie czasu potrzebnego na ustawienie formy.*
Ocena wniosku według kryteriów obowiązujących w przedsiębiorstwie:	
Kryterium:	**Punktacja przyznana / Punktacja maksymalna:**
1. Kreatywność i oryginalność rozwiązania	*15 / 20*
2. Wysiłek włożony w testowanie rozwiązania	*17 / 20*
3. Możliwość adaptacji rozwiązania w innych obszarach	*8 / 10*
4. Efekty wymierne (oszczędności, efektywność)	*27 / 30*
5. Efekty niewymierne (jakość, komfort, bezpieczeństwo)	*18 / 20*
Razem:	***85 / 100***
Decyzja: *wdrożenie.* **Wdrożenie:** data wdrożenia: *01.08.2024.*	**Cele usprawnienia:** *1) redukcja pracochłonności,* *2) oszczędność materiałów i/lub energii,*

Logo firmy	Kaizen - Formularz wniosku indywidualnego
	3) zwiększenie wydajności i trwałości maszyn/urządzeń.

Źródło: Opracowanie własne

Wniosek indywidualny (tabela 3) został zgłoszony 05.07.2024 roku przez pracownika przedsiębiorstwa – operatora prasy do wykrawania z działu produkcji maszynowej. Tematem propozycji było zmniejszenie strat materiałowych podczas wykrawania elementów cholewek. Problem polegał na tym, że pracownik ręcznie układał formy wykrojników na skórze przed użyciem prasy, jednak brak optymalnego rozmieszczenia powodował powstawanie dużych odpadów materiałowych w przestrzeniach między poszczególnymi wykrojami. Niewykorzystane fragmenty skóry zostawały odpadem, generując straty materiałowe i finansowe. Proponowanym rozwiązaniem było zastosowanie przezroczystej matrycy z nadrukowanymi szablonami w skali 1:1, nakładanej bezpośrednio na skórę. Matryca umożliwia operatorowi wizualną optymalizację rozmieszczenia form przed wykrawaniem, wskazując najlepszy układ minimalizujący odpady. Spodziewanymi rezultatami usprawnienia są: redukcja strat materiałowych, oszczędność kosztów surowca oraz skrócenie czasu potrzebnego na ustawienie formy wykrojnika.

Ocena wniosku zgłoszonego przez operatora prasy wykazała jego wysoką wartość: pracownik uzyskał łącznie 85 punktów na możliwe 100, co świadczy o praktyczności i użyteczności propozycji. Najwyżej oceniono efekty wymierne – oszczędności i efektywność (27/30 pkt) oraz wysiłek włożony w testowanie rozwiązania (17/20 pkt), co wskazuje, że wniosek był oparty na faktycznej obserwacji procesu i weryfikacji w warunkach produkcyjnych. Kreatywność i oryginalność rozwiązania oceniono na 15/20 pkt, efekty niewymierne na 18/20 pkt, a możliwość adaptacji w innych obszarach na 8/10 pkt. Kierownik podjął decyzję o wdrożeniu wniosku. Cele usprawnienia zakwalifikowano w kategoriach: redukcja pracochłonności, oszczędność materiałów i/lub energii oraz zwiększenie wydajności i trwałości maszyn/urządzeń. Formularz wniosku indywidualnego potwierdził tym samym swoją funkcję jako narzędzia jasnego i precyzyjnego opisu problemu oraz systematycznej oceny wartości proponowanego rozwiązania, co umożliwia trafne podejmowanie decyzji o wdrożeniu usprawnień (Kosieradzka 2019).

Przykład praktycznego zastosowania systemu sugestii zespołowych w badanym przedsiębiorstwie z branży obuwniczej przedstawia wypełniony formularz wniosku opracowanego przez trzyosobowy zespół produkcyjny (tabela 4).

Tabela 4.
Przykład zastosowania formularza wniosku zespołowego w badanym przedsiębiorstwie

Logo firmy	Kaizen - Formularz wniosku zespołowego
Data:	*09.08.2024*

Dane grupy: *- Zespół produkcyjny.* *- Dział produkcji.*	*JK* *KB* *AN*	*Produkcja maszynowa / Operator prasy do wykrawania* *Produkcja manualna / Klejenia ręcznego* *Produkcja maszynowa / Operator maszyny do szycia*
Temat propozycji zmian: *Optymalizacja procesu szycia cholewek poprzez poprawę organizacji stanowisk pracy*		
Metoda stosowana przed usprawnieniem: *Aktualne stanowiska pracy w obszarze produkcji cholewek są rozmieszczone w sposób chaotyczny. Pracownicy często tracą czas na przemieszczanie się między maszynami i stołami do przygotowania materiałów.*	**Proponowana metoda usprawnienia:** *Zmiana układu stanowisk pracy na bardziej ergonomiczną organizację, zgodnie z zasadami Lean Manufacturing. Każde stanowisko zostanie odpowiednio wyposażone w niezbędne narzędzia, materiały i komponenty do produkcji cholewek.*	
Czego dotyczy problem: *Zmniejszenie wydajności pracy spowodowane nieergonomicznym rozmieszczeniem stanowisk oraz brakiem porządku na obszarze produkcji.*	Rezultat usprawnienia: *- Skrócenie czasu wykonywania cholewek.* *- Zmniejszenie zmęczenia pracowników.* *- Zwiększenie wydajności produkcyjnej.*	
Ocena wniosku według kryteriów obowiązujących w przedsiębiorstwie:		
Kryterium	**Punktacja przyznana**	**Punktacja maksymalna**
1. Kreatywność i oryginalność rozwiązania	*120*	*200*
2. Efekty wymierne (oszczędności, efektywność)	*260*	*300*
3. Poprawa jakości	*170*	*200*
4. Efekty niewymierne (jakość, komfort, bezpieczeństwo)	*170*	*200*
5. Możliwość adaptacji rozwiązania na inne stanowiska	*90*	*100*
Razem: Liczba osób w zespole: *3* Punkty na osobę: *270*	*810*	*1000*
Decyzja: *wdrożenie* **Wdrożenie:** data wdrożenia: *02.09.2024*, data oceny: *19.08.2024.*	**Cele usprawnienia:** *1) poprawa jakości* *2) redukcja pracochłonności* *3) poprawa bezpieczeństwa* *4) zwiększenie wydajności i trwałości maszyn/urządzeń*	

Źródło: Opracowanie własne

Wniosek zespołowy (tabela 4) został opracowany i zgłoszony 09.08.2024 roku przez trzyosobowy zespół produkcyjny z działu produkcji, w skład którego weszli: operator prasy do wykrawania, pracownik klejenia ręcznego oraz operator maszyny do szycia. Wielodyscyplinarny skład grupy, obejmujący pracowników z różnych etapów procesu produkcyjnego, wpisuje się w charakterystykę małych grup opisywaną przez Kosieradzką (2019), według której różnorodność doświadczeń i kwalifikacji członków zespołu sprzyja

generowaniu kompleksowych i innowacyjnych rozwiązań. Tematem propozycji była optymalizacja procesu szycia cholewek poprzez poprawę organizacji stanowisk pracy.

Zidentyfikowany problem dotyczył chaotycznego rozmieszczenia stanowisk pracy w obszarze produkcji cholewek: pracownicy tracili czas na przemieszczanie się między maszynami i stołami do przygotowania materiałów, co przekładało się na obniżenie wydajności pracy i wzrost zmęczenia. Propozycja zespołu zakładała przeprojektowanie układu stanowisk pracy zgodnie z zasadami Lean Manufacturing, tak, aby każde stanowisko zostało odpowiednio wyposażone w niezbędne narzędzia, materiały i komponenty do produkcji cholewek, zlokalizowane w bezpośredniej dostępności operatora. Oczekiwane rezultaty to: skrócenie czasu wykonywania cholewek, zmniejszenie zmęczenia pracowników oraz wzrost wydajności produkcyjnej.

Ocena wniosku zespołowego wyniosła 810 punktów na możliwe 1000 (co daje 270 pkt na każdego z trzech członków zespołu), co świadczy o wysokiej wartości propozycji. Najwyżej ocenione zostały efekty wymierne – oszczędności i efektywność (260/300 pkt), co odzwierciedla bezpośredni wpływ zmiany organizacji stanowisk na mierzalną wydajność procesu. Poprawa jakości i efekty niewymierne uzyskały po 170/200 pkt każda, kreatywność i oryginalność rozwiązania 120/200 pkt, a możliwość adaptacji rozwiązania na inne stanowiska 90/100 pkt – co wskazuje na wysoki potencjał upowszechnienia wypracowanej koncepcji w innych obszarach przedsiębiorstwa. Decyzja o wdrożeniu wniosku została podjęta, a samo wdrożenie zrealizowano. Cele usprawnienia sklasyfikowano w kategoriach: poprawa jakości, redukcja pracochłonności, poprawa bezpieczeństwa oraz zwiększenie wydajności i trwałości maszyn/urządzeń.

Formularz wniosku zespołowego, dzięki swojej przejrzystej strukturze, umożliwił zebraniu trzem pracownikom z różnych obszarów produkcji – operatorowi prasy, pracownikowi ręcznej produkcji oraz operatorowi maszyny do szycia – odmiennych perspektyw na ten sam problem, co pozwoliło na sformułowanie propozycji uwzględniającej cały ciąg technologiczny, a nie tylko wybrane jego ogniwo. Tak zaprojektowany formularz sprzyja budowaniu współpracy między pracownikami i pomaga kierownictwu w podejmowaniu decyzji dotyczących wdrożeń, co jest zgodne z założeniami systemu sugestii zespołowych opartego na filozofii Kaizen (Kosieradzka 2019; Imai 2007).

Wdrożenie obu systemów sugestii w badanym przedsiębiorstwie potwierdziło, że możliwe jest efektywne wykorzystanie potencjału kreatywnego pracowników zarówno w wymiarze indywidualnym, jak i zespołowym. System sugestii indywidualnych okazał się szczególnie cennym narzędziem w przypadkach, gdy pracownik samodzielnie identyfikuje problem na własnym stanowisku i dysponuje konkretnym pomysłem jego rozwiązania, którego wdrożenie nie wymaga dużych nakładów ani interdyscyplinarnej analizy. Z kolei system sugestii zespołowych sprawdził się przy problemach wielowymiarowych, dotyczących organizacji pracy na poziomie kilku stanowisk lub procesów, gdzie dopiero współpraca pracowników z różnych obszarów produkcji pozwoliła na sformułowanie propozycji adekwatnej do złożoności

zagadnienia (Imai 2007; Kosieradzka 2012). Obydwa systemy, uzupełniając się wzajemnie, przyczyniają się do poprawy atmosfery pracy, wzmocnienia relacji wewnętrznych oraz budowania przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa.

Podsumowanie

Celem badań było wdrożenie i realizacja systemu sugestii pracowniczych –indywidualnych i zespołowych – w wybranym przedsiębiorstwie z branży obuwniczej, specjalizującym się w produkcji cholewek damskich. Przedstawiono opracowane procedury oraz wzory formularzy Kaizen dla obu podsystemów, uwzględniające specyfikę funkcjonowania małego zakładu produkcyjnego, a następnie pokazano sposób ich praktycznego zastosowania do rzeczywistych problemów zidentyfikowanych w badanym przedsiębiorstwie.

Wartością dodaną prowadzonych badań jest dostarczenie opisu pełnego cyklu wdrożenia systemu sugestii w warunkach mikroprzedsiębiorstwa branży obuwniczej, obejmującego zarówno projektowanie procedur, jak i faktyczne, udokumentowane przypadki zgłoszonych oraz wdrożonych usprawnień wraz z ich oceną punktową. Przedstawiona kompleksowa dokumentacja studium przypadku wdrożenia systemu sugestii – od etapu diagnozy, przez wdrożenie, po ocenę zgłoszonych usprawnień – może być użyteczna dla innych małych przedsiębiorstw planujących wdrożenie tego rozwiązania Kaizen.

Wdrożony system sugestii indywidualnych umożliwił pracownikom formalne zgłaszanie propozycji usprawnień dotyczących własnych stanowisk pracy. Przykład wniosku operatora prasy do wykrawania – dotyczący zastosowania przezroczystej matrycy z szablonami w celu optymalizacji rozmieszczenia form wykrojników i redukcji strat skórzanego materiału – potwierdził, że pracownicy bezpośrednio produkcyjni dysponują cenną wiedzą praktyczną, której formalne kanały komunikacji często nie są w stanie samodzielnie zagospodarować. Wniosek uzyskał 85 punktów na 100 możliwych i został wdrożony, przynosząc wymierne efekty w postaci redukcji strat materiałowych, oszczędności kosztów surowca oraz skrócenia czasu ustawiania formy wykrojnika.

System sugestii zespołowych, realizowany w oparciu o model małych grup inspirowany filozofią Kaizen, sprawdził się przy problemach o szerszym zasięgu, wymagających wieloaspektowej analizy i współpracy pracowników z różnych obszarów produkcji. Trzyosobowy zespół złożony z operatora prasy, pracownika klejenia ręcznego oraz operatora maszyny do szycia opracował propozycję reorganizacji stanowisk pracy zgodnie z zasadami Lean Manufacturing, uzyskując 810 punktów na 1000 możliwych. Wdrożenie tej sugestii doprowadziło do skrócenia czasu wykonywania cholewek, zmniejszenia zmęczenia pracowników i wzrostu wydajności produkcyjnej. Wielodyscyplinarny skład zespołu potwierdził tezę Kosieradzkiej (2019) o synergicznym efekcie zespołowego rozwiązywania

problemów: suma wiedzy i doświadczeń członków grupy pozwoliła na sformułowanie propozycji uwzględniającej cały ciąg technologiczny, niemożliwej do wypracowania z perspektywy jednego stanowiska.

Przeprowadzone badanie dowodzi, że wdrożenie systemu sugestii pracowniczych jest możliwe i skuteczne nawet w małych przedsiębiorstwach produkcyjnych, nieposiadających sformalizowanych struktur zarządzania jakością. Kluczowymi czynnikami sukcesu okazały się: prostota opracowanych procedur i formularzy, transparentność systemu oceny punktowej, zaangażowanie właściciela zakładu w roli wewnętrznego promotora zmian oraz rzetelna i szybka informacja zwrotna udzielana pracownikom w sprawie zgłoszonych wniosków. Elementy te wpisują się w zalecenia Imai (2007) i Kosieradzkiej (2019) dotyczące warunków skutecznego funkcjonowania Kaizen w organizacji.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że system sugestii pracowniczych oparty na filozofii Kaizen może funkcjonować skutecznie nawet w mikroprzedsiębiorstwie pozbawionym formalnych struktur zarządzania jakością. Niniejsze badanie pokazuje, że kluczowe czynniki sukcesu – prostota procedur, zaangażowanie kierownictwa oraz szybka informacja zwrotna – mają charakter uniwersalny i sprawdzają się niezależnie od skali organizacji. Potwierdza to również studium przypadku OKNOPLAST (Męcfel, 2024), w którym mimo znacznie większej skali działalności decydującym czynnikiem wzrostu liczby i jakości zgłoszeń okazało się bezpośrednie zaangażowanie kierowników liniowych.

Z przeprowadzonych badań wynika ponadto, że skuteczność systemu sugestii zależy nie tyle od stopnia jego formalizacji czy automatyzacji, ile od dopasowania narzędzia do realnej skali i kultury organizacyjnej przedsiębiorstwa – co jest zgodne z wnioskami Maarof i Mahmud (2016) dotyczącymi barier wdrażania Kaizen w małych i średnich przedsiębiorstwach. Niezależnie od wielkości organizacji istotną rolę odgrywa również rzetelna i szybka informacja zwrotna dotycząca zgłoszonego usprawnienia. Jak pokazuje przykład OKNOPLAST, wizualizacja wyników, tablice z bieżącymi projektami oraz prezentowanie miesięcznych rezultatów obok zgłoszonych pomysłów mają bezpośredni wpływ na wzrost zaangażowania pracowników (Męcfel, 2024) – rozwiązania te, mimo że wdrożone w dużej organizacji, wydają się równie łatwe do zaadaptowania w warunkach małego przedsiębiorstwa.

Wykazano ponadto, że oba podsystemy – indywidualny i zespołowy – nie konkurują ze sobą, lecz pełnią komplementarne funkcje: system indywidualny sprzyja identyfikowaniu lokalnych problemów na poziomie stanowiska pracy i budowaniu nawyku proaktywnego podejścia do własnej pracy, natomiast system zespołowy umożliwia podejmowanie bardziej złożonych wyzwań organizacyjnych, wzmacnia integrację pracowników i buduje kulturę organizacyjną opartą na wspólnym dążeniu do doskonałości (Imai 2007; Stoner, Freeman, Gilbert 1997). Łączne stosowanie obu form sugestii tworzy kompletny ekosystem ciągłego doskonalenia, obejmujący wszystkich pracowników i wszystkie poziomy organizacji – od pojedynczego stanowiska pracy po wielostanowiskowe procesy produkcyjne.

Ograniczeniem przeprowadzonego badania jest jego charakter studium przypadku dotyczącego jednego przedsiębiorstwa. Weryfikacja uniwersalności uzyskanych wyników wymagałaby objęcia badaniem większej liczby zakładów z branży obuwniczej lub szerzej – sektora lekkiego przemysłu.

Kierunkiem przyszłych badań może być również analiza długofalowych efektów funkcjonowania systemu sugestii: zmian w kulturze organizacyjnej, poziomu zaangażowania pracowników oraz mierzalnych wskaźników jakości i wydajności obserwowanych w perspektywie rocznej lub dłuższej. Naturalnym kierunkiem dalszych badań byłoby także prześledzenie, czy poziom zaangażowania pracowników w zgłaszanie sugestii utrzyma się w dłuższej perspektywie, oraz porównanie wyników z innymi mikroprzedsiębiorstwami branży lekkiej. Warto byłoby także zbadać wpływ różnych systemów motywacyjnych – w szczególności proporcji między nagrodami materialnymi a niematerialnymi – na aktywność pracowników w zgłaszaniu sugestii, co stanowi istotną zmienną moderującą skuteczność całego systemu.

Bibliografia

1. Armstrong, M. (1998). *Zarządzanie zasobami ludzkimi: strategia i działanie*. Kraków: Wydawnictwo Profesjonalnej Szkoły Biznesu.
2. Banaś, K., Knop, K. (2025a). Wykorzystanie narzędzi kreatywnego myślenia do rozwiązywania problemów w firmie obuwniczej, *Management and Quality – Zarządzanie i Jakość*, *7*(4), 75-99.
3. Banaś, K., Knop, K. (2025b). Implementacja metody 5 Why w przedsiębiorstwie z branży obuwniczej, W E. Staniewska, M. Suliga (red.), *Współczesne wyzwania w inżynierii materiałowej i zarządzaniu produkcją* (s. 188-203). Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
4. Blikle, A.J. (2014). Doktryna Jakości – rzecz o skutecznym zarządzaniu. Gliwice: Helion.
5. Chauvet, A. (1997). *Metody zarządzania.* Warszawa: Poltext.
6. Chwist, K., Ingaldi, M. (2024). Complaint analysis as a tool for product improvement: A case study of baby stroller manufacturing. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, *(195)*, 9-29.
7. CreAction (b.d.). *7 błędów przy wdrażaniu systemu sugestii, które zabijają zaangażowanie pracowników*. Pobrano 12 maja 2026 z https://creaction.com.pl/resources/bledy-wdrozenia-systemu-sugestii
8. Dahlgaard, J., Kristensen, K., Kanji, G. (2000). *Podstawy zarządzania jakością*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
9. Dziuba, S. T., Cierniak-Emerych, A., Ingaldi, M., Kadłubek, M. (2017). The use of suggestion system for quality improvement in production enterprises in different countries. In T. Kliestik (Ed.), *Globalization and its socio-economic consequences 2017: Proceedings (Part I)* (pp. 391-398). University of Zilina.
10. Gabryelewicz, I., Gawłowicz, P., Sadłowska-Wrzesińska, J. (2015). Kaizen jako skuteczna metoda wspomagająca efektywne zarządzanie przedsiębiorstwem. *Problemy Profesjologii*, *(2)*, 139-148.
11. Imai, M. (2007). Kaizen. Klucz do konkurencyjnego sukcesu Japonii. Warszawa: MT Biznes.
12. Ingaldi, M. (2014). Analysis of the quality problems during production process of the stud frame of the stretching station. *Production Engineering Archives, 2*(1), 2-5.
13. Jagodziński, J., Ostrowski, D. (2020). Operation of an employee suggestion system in administration and production departments of a remanufacturing company. *Journal of Remanufacturing*, 10, 173-188.

14. Jasiński, Z. (red.) (1998). Motywowanie w przedsiębiorstwie. Uwalnianie ludzkiej produktywności. Warszawa: Wydawnictwo Placet.
15. Knop, K., Mielczarek, K. (2015). The improvement on the basis of PDCA and SDCA cycles. *Quality. Production. Improvement, 2*(3), 60-71.
16. Kosieradzka, A. (2012). *Zarządzanie produktywnością w przedsiębiorstwie*. Warszawa: Wydawnictwo C.H. Beck.
17. Kosieradzka, A. (2019). *Metody i techniki pobudzania kreatywności*. Warszawa: Wyd. edu-Libri.
18. Kosieradzka, A., Krupa, A. (2009). Wdrażanie standaryzacji pracy w przedsiębiorstwach produkcyjnych. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, *(1)*, 38-50.
19. Kosieradzka, A., Smagowicz, J. (2009). Ciągłe doskonalenie procesów produkcyjnych z wykorzystaniem standaryzacji pracy. W R. Knosala (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie* (t. 2). Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
20. Leby, C. L., Knop, K. (2025). The impact of control plan on quality management in the automotive industry. *Archives of Engineering Knowledge, 11*(1), 25-29.
21. Krząstek, A., Niemczyk, A. (2022). Znaczenie filozofii kaizen i kaizen costing w przedsiębiorstwie. *Management and Quality – Zarządzanie i Jakość, 4*(3), 15-171.
22. Maarof, M.G., Mahmud, F. (2016). A Review of Contributing Factors and Challenges in Implementing Kaizen in Small and Medium Enterprises. *Procedia Economics and Finance*, 35, 522-531.
23. Martyniak, Z. (1996). *Metody organizowania procesów pracy*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
24. Męcfel, E. (2024). Case study: Development of Employee Suggestion System at OKNOPLAST Manufacturing Company as Element of Process Improvement. *Decision Making in Manufacturing and Services, Special Issue*, 49-58.
25. Mikołajczyk, Z. (2001). *Techniki organizatorskie w rozwiązywaniu problemów zarządzania*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe (PWN).
26. Miler-Zawodniak, A. (2012). Teorie potrzeb jako współczesne teorie motywacji. *Obronność. Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania i Dowodzenia Akademii Obrony Narodowej*, *(4)*, 101-116.
27. Petersen, D., Hillkirk, J. (1993). *Praca zespołowa. Nowe pomysły zarządzania na lata 90.* Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
28. Proctor, T. (2002). Twórcze rozwiązywanie problemów. Podręcznik dla menedżerów. Gdańsk: Wydawnictwo GWP.
29. Stoner, J., Freeman, E., Gilbert, D. (1997). *Kierowanie*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne S.A.
30. Szwedzka K., Lipniak J. (2017). Model PDCA w procesie implementacji zmian w przedsiębiorstwie. *Zarządzanie przedsiębiorstwem*, *20*(2), 26-33.

BARIERY WIARYGODNOŚCI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH JAKO NARZĘDZIA SZKOLENIOWEGO - PERSPEKTYWA OSÓB BIEGŁYCH GAMINGOWO

Konrad Kobierski

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Wydział Prawa i Nauk Społecznych;

kkobierski01@gmail.com; ORCID: 0009-0007-5646-0996

Streszczenie: Celem artykułu jest identyfikacja aspektów symulacji szkoleniowych, które w percepcji osób wysokiej biegłości gamingowej (*gaming literacy*) stanowią barierę w uznaniu ich za wiarygodne narzędzie rozwoju. Metodyka opierała się na narracyjnym przeglądzie literatury oraz badaniu CAWI na grupie 112 osób. Respondenci deklarują wysokie zaufanie do logiki matematyczno-ekonomicznej systemów (78,5%), jednak wykazują znaczny sceptycyzm wobec realizmu społeczno-behawioralnego (67,0%). Analiza pozwala przypuszczać, że doświadczenia z grami klasy AAA czynią z badanych surowych audytorów autentyczności, którzy łatwo identyfikują uproszczenia narracyjne oraz „sztywne skrypty", które obniżają wiarygodność systemów. Artykuł wskazuje na konieczność ewolucji symulacji w stronę modeli nieliniowych, aby sprostać oczekiwaniom ekspertów-użytkowników.

Słowa kluczowe: symulacje biznesowe, bariery wiarygodności, pokolenie cyfrowe, biegłość gamingowa, rozwój zawodowy.

CREDIBILITY BARRIERS OF SIMULATIONS AS TOOLS FOR SKILL DEVELOPMENT: THE PERSPECTIVE OF A GAMING-SAVVY GENERATION

Abstract: The article aims to identify aspects of training simulations that, in the perception of employees with high gaming literacy, constitute a barrier to their recognition as a credible development tool. The methodology was based on a narrative literature review and a CAWI survey. While respondents declare high trust in the mathematical logic of systems (78.5%), they exhibit significant skepticism towards socio-behavioral realism (67.0%). The analysis suggests that experience with AAA games makes respondents rigorous auditors of authenticity, easily identifying narrative simplifications and „hard-coded scripts". The article points to the necessity of evolving simulations toward non-linear models to meet the expectations of expert-users.

Keywords: business simulations, fidelity barriers, digital natives, gaming literacy. professional development.

Wprowadzenie

W dobie gospodarki opartej na wiedzy, organizacje stają przed koniecznością systematycznego podnoszenia kompetencji kadr poprzez nowoczesne mechanizmy kształcenia. W tym procesie symulacje komputerowe oraz gry poważne (*Serious Games*) wyłaniają się jako kluczowy paradygmat edukacyjny, łączący efektywność zarządzania wiedzą z innowacyjnymi metodami dydaktycznymi (Gatti et al., 2019; Sultanova, and Sadullayev, 2024). Jednak złożoność współczesnych szkoleń opartych na zaawansowanych silnikach symulacyjnych generuje w literaturze przedmiotu istotne dyskusje na temat granic wierności (*fidelity*) oraz autentyczności środowiska uczącego. Z jednej strony podkreśla się, że symulacja nie musi być idealnym odwzorowaniem rzeczywistości, by zachować swoją wartość dydaktyczną. Z drugiej strony, kluczowym wyzwaniem pozostaje zapewnienie wiarygodności, czyli stopnia w jakim narzędzie replikuje mechanizmy rynkowe i społeczne. Percepcja tej autentyczności przez użytkowników, zwłaszcza w obszarze czynników ludzkich i emocjonalnych, stanowi obecnie jedną z głównych barier akceptacji tych technologii w profesjonalnym rozwoju zawodowym (Strickland, 2023).

Jest to szczególnie istotne z perspektywy unikalnych potrzeb pokolenia cyfrowego. Zbiorowość ta reprezentowana głównie przez późnych Milenialsów oraz Generację Z to grupa, której ramy poznawcze uformowały się w dobie gwałtownej ekspansji technologii mobilnych, mediów interaktywnych oraz sieci szerokopasmowych. Konwencjonalne modele edukacyjne, oparte na pasywnej transmisji wiedzy, tracą na efektywności w zderzeniu z wymaganiami „cyfrowych tubylców", dla których naturalny ekosystem funkcjonowania stanowią środowiska o wysokim stopniu immersji, interaktywności oraz dynamicznej informacji zwrotnej (Shirazian et al., 2025). Co ważniejsze, ukształtowanie się pokolenia cyfrowego w warunkach intensywnej ekspozycji technologicznej zaowocowało wykształceniem biegłości gamingowej (*gaming literacy*) - unikalnej kompetencji poznawczej wykraczającej poza standardową obsługę systemów. Pozwala ona na krytyczną dekonstrukcję architektury cyfrowej oraz wnikliwą analizę zależności technicznych i narracyjnych wewnątrz modeli wirtualnych. W konsekwencji przedstawiciele tej grupy ewoluują z pasywnych odbiorców treści w stronę analitycznych audytorów, zdolnych do rzetelnej weryfikacji logiki oraz wierności wdrażanych narzędzi szkoleniowych (Glas et al. 2023; Grāvelsiņa, and Daniela, 2025).

Stąd też problem badawczy zgłębiany w ramach tego badania, został wyrażony przez pytanie: jakie aspekty symulacji szkoleniowych stanowią dla osób o wysokim *gaming literacy* główne bariery w uznaniu ich za wiarygodne narzędzie rozwoju kompetencji? Natomiast celem

badawczym była identyfikacja i analiza sceptycyzmu poznawczego respondentów względem zidentyfikowanych ograniczeń symulacji.

Aby poznać odpowiedź na postawione powyżej pytanie badawcze i zrealizować założony cel badawczy przeprowadzone zostały następujące czynności:

- Narracyjny przegląd literatury ukierunkowany na zdefiniowane gier poważnych, symulacji biznesowych, identyfikację ram teoretycznych dla określenia barier wiarygodności tychże symulacji, w tym w szczególności klasyfikację wymiarów wierności (*fidelity*), ze wskazaniem na prymat realizmu psychologicznego, określenie specyfiki osób o wysokiej biegłości gamingowej (*gaming literacy*) i wpływu tego parametru na potencjalną ocenę ograniczeń symulacji w oczach badanych.
- Ankietyzacja przeprowadzona online z wykorzystaniem kwestionariusza ankiety skonstruowanego na podstawie zidentyfikowanych wcześniej kwestii teoretycznych.

Integracja perspektywy teoretycznej z opiniami ekspertów-użytkowników pozwoliła na precyzyjne wskazanie punktów styku, w których technologiczne ograniczenia symulacji konfrontują się z pokoleniem cyfrowym, którego wymagania i standardy jakości zostały ukształtowane przez wysokobudżetowe produkcje komercyjne.

Przegląd literatury

Zgodnie z obecnym stanem literatury z zakresu nauk o zarządzaniu, gry poważne definiuje się jako zaawansowane systemy cyfrowe, w których priorytetem projektowym nie jest dostarczanie samej przyjemności z rozgrywki, lecz osiągnięcie konkretnych rezultatów pozaludycznych. Ich struktura integruje angażujące cechy oprogramowania interaktywnego z rygorystycznymi wymogami edukacyjnymi, treningowymi lub badawczymi, tworząc narzędzie do profesjonalnego kształtowania kompetencji (Mortara et al., 2014; Djaouti et al., 2011).

Skuteczność edukacyjna symulacji szkoleniowych wynika z faktu, że stanowią one platformę do pełnego odzwierciedlenia etapów modelu uczenia się przez doświadczenie D. Kolba. Kluczowym elementem jest tu możliwość krytycznej analizy własnych decyzji, podejmowanych w pozbawionym ryzyka świecie wirtualnym. Poprzez dostarczanie natychmiastowej odpowiedzi na bodźce decyzyjne, narzędzia te stymulują proces ciągłego doskonalenia strategii użytkownika. Mechanika ta tworzy bezpieczną przestrzeń nauki, pozwalając na wyciąganie wniosków z niepowodzeń bez realnego obciążenia kosztami biznesowymi (Kempen et al., 2024).

Wewnątrz szerokiego spektrum gier poważnych wyodrębnia się symulacje szkoleniowe (w niniejszej pracy stosowane zamiennie z określeniami: biznesowe oraz komputerowe). Ich kluczowym atrybutem jest wysoki stopień wierności (*fidelity*) względem procesów zachodzących w świecie rzeczywistym. O ile ogólne gry poważne (czyli spektrum gier poza

symulacjami) dopuszczają modyfikację praw ekonomii w celu uatrakcyjnienia rozgrywki, o tyle wartość dydaktyczna symulacji jest nierozerwalnie związana z rzetelnością jej silnika matematycznego. Każde odstępstwo od obiektywnej logiki rynkowej jest tu postrzegane jako bariera merytoryczna, podważająca sens całego procesu kształcenia. Dodatkowo, struktura takiej symulacji musi obejmować zestaw powiązanych zależności decyzyjnych oraz jasno określone cele, które w teorii powinny zapewniać wysoki poziom realizmu, niezbędnego do efektywnego transferu wiedzy. (Baldissin et al., 2013; Fraccascia et al., 2021).

Aby precyzyjnie zdiagnozować bariery wiarygodności systemów symulacyjnych, należy w pierwszej kolejności zdefiniować specyfikę aparatu poznawczego i percepcyjnego ich głównych odbiorców. Dyskurs naukowy często odwołuje się do koncepcji „cyfrowych tubylców" (*digital natives*), wprowadzonej przez Marka Prensky"ego na początku XXI wieku. Prensky argumentował, że osoby urodzone i wychowane w dobie powszechnego dostępu do internetu, komputerów i gier wideo wykształciły odmienne style uczenia się, oparte na stymulacji wielosensorycznej, płynności medialnej (*media fluency*) oraz natychmiastowej gratyfikacji i responsywności. Należy jednak zaznaczyć, że współczesna literatura krytycznie ocenia traktowanie pokolenia cyfrowego jako monolitu. Badacze wskazują, że sam wiek i ekspozycja na technologie nie gwarantują jednorodnych kompetencji cyfrowych, a termin „*digital native*" może zacierać złożoną różnorodność w obrębie populacji studenckiej i zawodowej (Vlachopoulos, and Makri, 2017; Marklund, and Taylor; 2016).

Zdecydowanie bardziej precyzyjnym i użytecznym analitycznie pojęciem w kontekście symulacji szkoleniowych jest „*gaming literacy*" („biegłość gamingowa"). Termin ten, silnie zakorzeniony w badaniach nad kompetencjami medialnymi (*media literacy*), wykracza poza podstawową zdolność operowania oprogramowaniem. Biegłość gamingowa łączy w sobie trzy kluczowe koncepty: rozumienie reguł i logiki światów cyfrowych (innymi słowy świadomość algorytmów informatycznych stojących za programami i ich ograniczeń), mechanikę i dynamikę zabawy oraz chęć testowania granic (*play*) oraz architekturę projektowania systemów (*design*). *Gaming literacy* to wysoce złożona kompetencja kognitywna, która pozwala użytkownikowi nie tylko na partycypację w środowisku wirtualnym, ale przede wszystkim na zrozumienie jego ukrytych reguł, struktur i ograniczeń (Glas et al. 2023; Grāvelsiņa, and Daniela, 2025). Użytkownik wyposażony w takie kompetencje podchodzi do każdego nowego systemu cyfrowego - w tym do symulatora medycznego, platformy zarządzania kryzysowego czy wirtualnej giełdy - jak do zagadki systemowej, którą należy zdekodować (Sperl, 2025).

Taka postawa poznawcza rodzi potężne implikacje dla postrzegania wiarygodności. Kiedy osoba o wysokim *gaming literacy* rozpoczyna interakcję z symulacją szkoleniową, automatycznie, a często podświadomie, poddaje ją inżynierii wstecznej (*reverse engineering*). Umysł takiego użytkownika nieustannie testuje granice oprogramowania, poszukując wzorców, schematów deterministycznych, luk algorytmicznych oraz granic swobody decyzyjnej. Jeśli student ekonomii korzysta z symulacji rynkowej, nie satysfakcjonuje go samo

kliknięcie przycisku „zwiększ cenę” i obserwowanie animacji wzrostu zysków. Jego umysł natychmiast weryfikuje, czy system uwzględnia elastyczność cenową popytu, nasycenie rynku, działania konkurencji oraz opóźnienia w reakcji łańcucha dostaw (Glas et al. 2023, Stenros, 2015).

Z drugiej strony, wysokie *gaming literacy* wiąże się z ogromną plastycznością percepcyjną w zakresie tzw. zawieszenia niewiary (*suspension of disbelief*). Użytkownicy z dużym doświadczeniem w grach potrafią bez trudu zaakceptować skrajnie uproszczoną oprawę graficzną, abstrakcyjne interfejsy użytkownika czy komiksową stylistykę, o ile tylko logika leżąca u podstaw symulacji jest spójna, rzetelna i angażująca intelektualnie. Doskonale rozumieją oni konwencję uproszczenia (abstrahowania rzeczywistości), wiedząc, że wektory i zmienne mogą być reprezentowane przez proste symbole, o ile relacje między nimi zachowują matematyczny i logiczny rygor. Ta właśnie zdolność do ignorowania braków w realizmie wizualnym na rzecz poszukiwania realizmu systemowego stanowi fundament do zredefiniowania kryteriów walidacji środowisk edukacyjnych dla nowoczesnych kadr (Feinstein, and Cannon, 2002).

Jeśli chodzi o proces walidacji symulacji, to w literaturze przedmiotu nie jest on traktowany jako pojęcie jednowymiarowe, lecz jako złożony konstrukt wieloaspektowy. Pionierskim i do dziś kanonicznym ujęciem tego problemu jest model opracowany przez Feinsteina i Cannona (2001, 2002). Rozróżnili oni rygorystycznie procesy weryfikacji oprogramowania od jego walidacji, a także wprowadzili gradację wierności systemu. Poniższa tabela (tabela 1) stanowi syntetyczne ujęcie kluczowych kryteriów tego modelu, stanowiących punkt wyjścia dla dalszych, pogłębionych rozważań.

Tabela 1.
Kluczowe kryteria walidacji systemu symulacji.

Kryterium Walidacji	Opis i cel (Co jest badane?)	Pytanie sprawdzające
Weryfikacja (Verification)	Sprawdzenie czy model matematyczny i algorytmy zostały poprawnie zaimplementowane w kodzie	Czy symulacja działa zgodnie z założeniami technicznymi (bez błędów w liczeniu)?
Walidacja Modelu Koncepcyjnego	Ocena, czy założenia gry (zasady, mechanizmy ekonomiczne) są oparte na rzetelnych teoriach	Czy logika gry (np. wpływ ceny na popyt) jest spójna z wiedzą ekonomiczną?
Walidacja Wyników (Results Validation)	Porównanie zachowań i wyników generowanych przez grę z rzeczywistymi danymi rynkowymi	Czy wyniki symulacji są statystycznie zbieżne z danymi z realnego świata?

Kryterium Walidacji	Opis i cel (Co jest badane?)	Pytanie sprawdzające
Trafność Wewnętrzna (Internal Validity)	Stopień, w jakim symulacja jest dokładną reprezentacją zjawiska (simulandu). Może obejmować poprawną implementację procesów zespołowych	Czy relacje między zmiennymi wewnątrz systemu precyzyjnie oddają strukturę badanego problemu?
Trafność Zewnętrzna (External Validity)	Stopień, w jakim zachowania i wyniki wypracowane w symulacji można przenieść na sytuacje w świecie rzeczywistym	Czy strategie, które zadziałały w grze, będą równie skuteczne w realnej pracy zawodowej?
Wierność (Fidelity)	Stopień, w jakim gra replikuje rzeczywistość (fizycznie, funkcjonalnie i psychologicznie)	Czy poziom szczegółowości gry jest adekwatny do celów edukacyjnych?

Źródło: opracowanie własne na podstawie Feinstein, and Cannon (2001).

Analiza modelu Feinsteina i Cannona wymaga uwzględnienia dwóch fundamentalnych zasad. Po pierwsze, walidacja systemu ma charakter relatywny - jej trafność zależy od konkretnego celu edukacyjnego, a nie parametrów absolutnych (Miller et al., 2013). Przykładowo, narzędzie zwalidowane pod kątem nauki zarządzania zespołem może być merytorycznie bezwartościowe w obszarze prognozowania finansowego. Zrozumienie tej specyfiki przez osoby o wysokim *gaming literacy* jest kluczowe dla uniknięcia frustracji wynikającej z błędnego odczytania założeń modelu.

Po drugie, skuteczna symulacja nie wymaga fotorealizmu. Jej nadrzędnym obowiązkiem jest wierne odwzorowanie mechanizmów przyczynowo-skutkowych w środowisku „ograniczonego kontekstu" (Stenros, 2015). Kluczowe znaczenie ma tu wierność psychologiczna, która gwarantuje, że procesy poznawcze i emocjonalne użytkownika odpowiadają wyzwaniom świata rzeczywistego. Często wymaga to celowej redukcji realizmu zjawisk pobocznych, aby uwydatnić rdzeń merytoryczny symulacji (Stenros, 2015). Nadmierna złożoność może bowiem przysłaniać cele dydaktyczne i prowadzić do utraty zaangażowania (Chasteen et al., 2018). Zjawisko to sugeruje, że priorytetem projektowym powinien być realizm relacyjny i funkcjonalny - biegły użytkownik akceptuje uproszczoną oprawę graficzną, o ile system zachowuje logiczną spójność i oferuje możliwość budowania relacji społecznych

Rozpatrywanie wiarygodności systemów informatycznych w edukacji wymaga głębokiej dekonstrukcji tego, co użytkownik postrzega jako „realne". W środowiskach syntetycznych realizm nie jest wartością jednorodną. Pęknięcia w poszczególnych jego warstwach generują zróżnicowane bariery asymilacji wiedzy, szczególnie silnie odczuwane przez osoby o rozwiniętych kompetencjach cyfrowych. Literatura naukowa dekonstruuje wierność na kilka

precyzyjnych i funkcjonalnie odmiennych wymiarów, z których każdy pełni inną rolę w procesie kognitywnym użytkownika:

1. Wierność fizyczna (*Physical Fidelity / Sensory Fidelity*): Obejmuje środowiskowe, wizualne, dźwiękowe i sensoryczne komponenty symulacji. Określa ona wprost, jak dalece projekt sali wirtualnej, wygląd maszyn, oświetlenie czy dźwięk alarmu przypominają rzeczywistość (Tan et al., 2025).
2. Wierność funkcjonalna (*Functional Fidelity*): Stanowi miarę dynamicznej interakcji pomiędzy użytkownikiem a środowiskiem wirtualnym. Określa, czy obiekty, wirtualne panele kontrolne czy narzędzia zachowują się zgodnie ze swoimi fizycznymi parametrami i czy system generuje odpowiednie sprzężenia zwrotne (bodźce) w odpowiedzi na akcje szkolonego. W odniesieniu do symulacji biznesowych oznacza czy model wiernie odwzorowuje zachowania rynkowe. (Tan et al., 2025).
3. Wierność psychologiczna (*Psychological / Cognitive Fidelity*): Najważniejszy wymiar w kontekście edukacyjnym. Reprezentuje stopień, w jakim zadania i procedury w symulacji angażują te same procesy poznawcze, wywołują podobne stany emocjonalne (stres, koncentrację) i wymagają tych samych strategii myślowych, co zadania w świecie realnym. Wierność psychologiczna warunkuje tzw. realizm poznawczy (*cognitive realism*) (Tan et al., 2025).
4. Wierność interakcyjna / społeczna (*Interactional / Social Fidelity*): Odnosi się do precyzyjnych schematów koordynacji, dynamiki i wzorców współpracy w obrębie wirtualnego zespołu, odzwierciedlając realizm relacji międzyludzkich (Tan et al., 2025).

Zasadniczo, na bazie powyższego można podzielić realizm symulacji opiera się na dwa następujące filary: merytoryczny (oparty na wierności funkcjonalnej i fizycznej) i społeczno-behawioralny (oparty na wierności psychologicznej i interakcyjnej, decydujący o autentyczności doświadczenia i zaangażowaniu użytkownika w relacje wirtualne).

Realizm merytoryczny stanowi twardy, matematyczny kręgosłup każdej poważnej symulacji. Opiera się on bezpośrednio na wiarygodności algorytmicznej, której zadaniem jest badanie, czy zbudowany model generuje poprawne, przewidywalne i zgodne z dziedzinowymi teoriami wartości matematyczne. Realizm ten charakteryzuje się dążeniem do wysokiej dokładności w odwzorowywaniu rzeczywistości fizycznej, rynkowej lub biologicznej, którą program ma reprezentować. Wymaga on bezwzględnego zachowania trafności wewnętrznej, gdzie relacje implementowane między zmiennymi w modelu precyzyjnie odzwierciedlają prawdziwą przyczynowość zjawisk (Miller et al., 2013; Linder, 2020).

Dla pokolenia cyfrowego, żyjącego w architekturze wszechobecnych algorytmów sztucznej inteligencji, systemów rekomendacyjnych i skomplikowanych silników gier, tzw. wiarygodność algorytmiczna (*algorithmic credibility*) urosła do rangi kluczowego kryterium zaufania. Młodzi użytkownicy wykazują rosnący sceptycyzm wobec cyfrowych informacji i mechanizmów sterujących ich środowiskiem. Zjawisko tzw. epistemicznej niepewności

(*epistemic uncertainty*) kształtuje ich strategie weryfikacji danych (Ökten, 2026). Co więcej, badania nad interakcją człowiek-komputer (*Human-Computer Interaction*) definiują zjawisko „awersji algorytmicznej" (*algorithmic aversion*). Kiedy użytkownicy napotykają na zautomatyzowany system, którego proces decyzyjny jest ukryty w tzw. „czarnej skrzynce" (*black box*) i którego decyzje wydają się arbitralne lub sprzeczne z intuicją ekspercką, ich zaufanie drastycznie maleje. W zaawansowanych symulatorach, brak transparentności co do logiki algorytmicznej podważa cały sens szkolenia (Shin, 2022).

Jeżeli realizm merytoryczny jest zaburzony, student szybko to zidentyfikuje. Przykładowo, w rozbudowanej symulacji zarządzania łańcuchem dostaw, gracz może zdecydować się na drastyczne obniżenie cen produktów przy jednoczesnym wstrzymaniu dostaw surowców. Zgodnie z realizmem merytorycznym, system powinien wygenerować potężny kryzys podażowy, spadek zaufania konsumentów i ostatecznie bankructwo wirtualnego przedsiębiorstwa. Jeśli jednak algorytm symulacji jest wadliwie skonstruowany i opiera się na płaskich, niezależnych od siebie skryptach liniowych (gdzie niższa cena zawsze generuje zysk bez względu na zapasy w magazynie), użytkownik z wysokim *gaming literacy* zorientuje się w tym błyskawicznie. Efektem nie będzie nauka logistyki, lecz tzw. „*gaming the system*" - optymalizacja działań wyłącznie pod kątem znalezienia luki w kodzie, by sztucznie zawyżyć wynik (Petre et al., 2019). W tym momencie ważność operacyjna i aplikacyjna symulacji spada do zera, mimo że system może wyglądać oszałamiająco od strony wizualnej.

Podczas gdy realizm merytoryczny dba o poprawność matematyczną modelu, realizm społeczno-behawioralny koncentruje się na równie ważnej, lecz znacznie trudniejszej do kwantyfikacji sferze. Koncentruje się on na istotnych czynnikach ludzkich, interakcyjnych oraz emocjonalnych, które towarzyszą uczestnikowi szkolenia podczas rozgrywki. Ten wymiar bezpośrednio odnosi się do trafności operacyjnej, badającej, czy postawy, reakcje i zachowania generowane wewnątrz wirtualnego modelu odpowiadają normom rzeczywistym (Tan et al., 2025).

Kluczowym aspektem tego realizmu jest zapewnienie wysokiej wierności psychologicznej (poznawczej). Reprezentuje ona stopień, w jakim zadania i procedury w symulacji angażują te same procesy poznawcze oraz wywołują podobne stany emocjonalne (stres, koncentrację), co zadania w świecie realnym. Dla użytkownika o wysokim *gaming literacy*, realizm ten decyduje o tym, czy wirtualne środowisko zdoła obudzić w nim adekwatne poczucie odpowiedzialności, empatii i presji czasu. Bez zachowania tej warstwy, symulacja - mimo poprawnej logiki - staje się jedynie „jałowym" ćwiczeniem analitycznym, pozbawionym autentycznego ładunku decyzyjnego (Tan et al., 2025)..

Symulacje w swej istocie mają pełnić funkcję bezpiecznych poligonów doświadczalnych. Umożliwiają one kadrze specjalistycznej bezpośrednią konfrontację z okolicznościami stresogennymi oraz incydentami kryzysowymi, które rzadko występują w rutynowej praktyce zawodowej. Dzięki temu uczestnicy unikają realnego ryzyka popełnienia krytycznych błędów, co jest szczególnie istotne w sektorach takich jak medycyna, lotnictwo czy zarządzanie

sytuacjami nadzwyczajnymi. Ostateczna wartość dydaktyczna takich rozwiązań zależy od realizmu społeczno-behawioralnego, który determinuje zdolność wirtualnego środowiska do wywołania u odbiorcy autentycznego poczucia odpowiedzialności, empatii oraz presji czasu (Vatral, 2022).

Przedstawiciele pokolenia cyfrowego, ukształtowani przez tysiące godzin spędzonych w światach MMORPG oraz skomplikowanych ekosystemach e-sportowych, dysponują unikatowym kapitałem doświadczeń w obszarze zarządzania dynamiką wirtualnych zespołów. Ich kompetencje obejmują sprawne delegowanie zadań w warunkach silnego stresu oraz zaawansowaną komunikację zapośredniczoną technologicznie. Tak wysoki poziom obycia sprawia, że oczekiwania tej grupy względem autentyczności interakcji w symulatorach szkoleniowych są bezkompromisowe (Easterling, 2021; Tan et al., 2025).

Kluczową barierę poznawczą stanowi w tym kontekście fenomen behawioralnej doliny niesamowitości. Efekt ten manifestuje się szczególnie silnie w środowiskach dążących do wysokiej wierności sensorycznej i fizycznej. Gdy awatar prezentuje wysoki stopień realizmu wizualnego, lecz jednocześnie operuje w oparciu o mało elastyczne algorytmy pozbawione niuansów emocjonalnych, u odbiorcy dochodzi do narastającego poczucia dysonansu poznawczego. Takie „pozbawione duszy" postacie niezależne (NPC), cechujące się brakiem psychologicznej głębi, drastycznie obniżają wiarygodność narzędzia, co w konsekwencji może prowadzić do marginalizacji celów dydaktycznych (Tan et al., 2025).

Choć koncepcja doliny niesamowitości wywodzi się z klasycznej robotyki, współczesny dyskurs naukowy dotyczący systemów syntetycznych adaptuje ją do opisu deficytów wierności interakcyjnej. W percepcji biegłych użytkowników zjawisko to objawia się poprzez odrzucenie modeli, które mimo fotorealistycznej oprawy, zawodzą w obszarze realizmu poznawczego. Funkcjonowanie postaci cyfrowych według uproszczonych schematów postępowania czyni je w oczach graczy jedynie martwymi elementami interfejsu, a nie wiarygodnymi partnerami do profesjonalnego treningu kompetencji (Tan et al., 2025).

Podsumowując wierność (*fidelity*) to stopień, w jakim system symulacyjny replikuje docelowe środowisko rzeczywiste. W komercyjnym i marketingowym dyskursie branży ed-tech pojęcie to uległo silnemu zawężeniu i spłaszczeniu, będąc najczęściej utożsamianym niemal wyłącznie z rozdzielczością tekstur, jakością modeli 3D i fotorealizmem. Takie redukcjonistyczne podejście jest w świetle rygorystycznych standardów walidacji naukowych całkowicie błędne i może stanowić poważną barierę dla efektywności procesu uczenia się.

Metodyka badań własnych

W celu zgromadzenia materiału empirycznego posłużono się metodą badania ankietowego. Polega ona na uzyskiwaniu od wyraźnie określonej grupy osób (respondentów) odpowiedzi na pytania tworzące świadomy, logiczny i spójny zestaw twierdzeń, służących rozwiązaniu postawionego problemu naukowego (Matejun, 2016). Badanie zrealizowano techniką Computer-Assisted Web Interviewing (CAWI), co pozwoliło na zebranie danych w naturalnym dla respondentów środowisku cyfrowym. Wybór tej techniki sprzyjał uzyskaniu rzetelnych, krytycznych opinii - brak bezpośredniego kontaktu z ankieterem zapewnia większą swobodę wypowiedzi i ogranicza lęk przed oceną, co jest kluczowe przy badaniu sceptycyzmu wobec nowoczesnych narzędzi szkoleniowych. Narzędziem badawczym był ustrukturyzowany kwestionariusz, który udostępniono online w okresie od stycznia do marca 2026 roku. Autor ma przy tym świadomość ograniczeń metody, takich jak utrudniona weryfikacja tożsamości uczestników oraz ryzyko udziału osób spoza zdefiniowanej próby celowej (Staniszewska, 2013; Juszczyk, 2023).

Prezentowane badanie stanowi integralną część szerokiego projektu badawczego, w ramach którego poddano analizie cztery różne, aczkolwiek komplementarne obszary (aspekty) rzutujące na proces adaptacji nowoczesnych technologii szkoleniowych przez młode osoby o wysokim *gaming literacy*. Ta praca skupia się na postrzeganiu barier symulacji jako przeszkody w uznaniu ich za wiarygodne narzędzie rozwoju kompetencji przez ww. osoby.

W celu zapewnienia wysokiej homogeniczności próby celowej, zgromadzony materiał poddano procedurze weryfikacji i czyszczenia danych. Z ostatecznej analizy wyłączono respondentów niespełniających kluczowych kryteriów: osoby deklarujące brak doświadczenia z grami (ok. 4,4% zgłoszeń) oraz grupę osób powyżej 35. roku życia, stanowiącą statystyczny margines, również poniżej 5% pierwotnego zbioru. Ostatecznie badaniu poddano 112 osób, z czego większość stanowili przedstawiciele pokolenia Z i późnych Milenialsów (18 - 35 lat). Struktura wykształcenia próby jest wysoka - ponad połowa respondentów legitymuje się dyplomem uczelni wyższej (55,4%), co w połączeniu z ich kompetencjami cyfrowymi tworzy profil świadomego i wymagającego odbiorcy technologii. Warto nadmienić również, że badaniu podlegali reprezentanci społeczności tylko polskich graczy. Szczegółowe dane dotyczące rozkładu cech demograficznych respondentów umieszczone zostały w tabeli 2.

Tabela 2.
Cechy demograficzne respondentów.

Cecha demograficzna	Kategoria	Liczebność	Udział (%)
Płeć	Kobieta	45	40,2%
	Mężczyzna	67	59,8%
Wiek	18 - 21	32	28,6%
	22 - 25	38	33,9%
	26 - 29	24	21,4%
	30 - 35	18	16,1%
Wykształcenie	Wyższe (licencjat, inżynier)	56	50%
	Średnie	45	40,2%
	Wyższe (magisterskie i wyżej)	6	5,4%
	Zasadnicze zawodowe	5	4,5%

Ze względu na zastosowane zaokrąglenia do jednego miejsca po przecinku, suma wartości procentowych może nieznacznie odbiegać od 100%.

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

W części metryczkowej kwestionariusza uwzględniono sekcję dotyczącą doświadczeń respondentów w obszarze rozrywki cyfrowej. Pozwoliło to na osadzenie wyników w kontekście realnych nawyków „cyfrowych tubylców", dla których zaawansowane mechaniki gier komercyjnych stanowią naturalny ekosystem poznawczy. Najliczniejsze grupy stanowią osoby deklarujące kontakt z grami codziennie (30,4%) oraz często (25,9%). Profil badanej grupy charakteryzuje się zaawansowanym poziomem *gaming literacy*, rozumianym jako biegłość w interpretowaniu skomplikowanych algorytmów i systemów reguł systemów cyfrowych (Apperley i Walsh, 2012). Umiejętność ta wykracza poza samą obsługę interfejsu, obejmując zdolność do krytycznego wykorzystywania logiki środowisk wirtualnych.

Doświadczenie w obcowaniu z nieliniowymi systemami rozrywkowymi sprawia, że respondenci są grupą przygotowaną do oceny stopnia wiarygodności modeli szkoleniowych w sposób szczególny. Istotny jest tu rozkład preferencji gatunkowych oraz powiązane z nim obszary rygorystycznej oceny (tabela 3). Zróżnicowanie w tym zakresie determinuje specyficzne priorytety w ocenie symulacji. Przykładowo, respondenci preferujący gry fabularne (RPG), ukształtowani przez kontakt z zaawansowanymi narracjami, wykazują wyższy rygoryzm względem realizmu społecznego oraz wiarygodności postaci niezależnych (NPC). Z kolei dla graczy gier logicznych kluczowa jest wewnętrzna spójność reguł - każda sytuacja, w której logiczna decyzja przynosi nielogiczny skutek (tzw. błąd w mechanice), jest dla nich czynnikiem silnie demotywującym (Dörner et al., 2016). W tym ujęciu profil

gatunkowy badanych stanowi niezbędny kontekst interpretacyjny dla prezentowanych wyników.

Tabela 3.

Preferencje gatunków gier komercyjnych wśród badanych

Gatunek gry	Procent wskazań	Typ preferencji	Obszary mogące podlegać bardziej rygorystycznej ocenie
RPG / Fabularne (np. *Wiedźmin*, *Cyberpunk 2077, The Elder Scrolls. Red Dead Redemption*)	65,2%	Narracyjno-decyzyjny	Realizm interakcji społecznych, wiarygodność psychologiczna postaci (NPC), spójność narracyjna scenariusza
Gry logiczne (np. Sudoku, Tetris)	48,2%	Analityczno-logiczny	Spójność logiczna algorytmów, precyzja reguł systemowych, brak błędów w strukturze matematycznej
Gry akcji / e-sportowe (np. *Counter Strike*, *Battlefield, Valorant*)	42,9%	Zespołowo-dynamiczny	Efektywność koordynacji zespołowej, przejrzystość podziału ról, jakość systemów komunikacji i synchronizacji działań grupowych.
Strategiczne (polegające głównie na realizacji określonych celów)	37,5%	Celowościowy	Złożoność wieloczynnikowa modelu, realizm procesów decyzyjnych w długiej perspektywie czasowej
Ekonomiczne (polegające głównie na zapewnieniu płynności finansowej i logistycznej w czasie nieskończonym)	25%	Optymalizacyjny	Wierność wskaźników rynkowych, rzetelność odzwierciedlenia mechanizmów finansowych i logistycznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania i (Dörner et al., 2016).

Podsumowując, codzienne doświadczenia z grami czynią badanych naturalnych odbiorców systemów cyfrowych. Zrozumienie logiki, mechanik i architektury gier sprawia, że ich oczekiwania względem trafności operacyjnej symulacji są poparte praktyką, a nie jedynie teoretycznymi założeniami. Stanowi to solidny punkt wyjścia do badania postaw młodych wobec barier wiarygodności symulacji.

Wyniki badań

Analiza sceptycyzmu poznawczego respondentów wymagała dekonstrukcji opinii ankietowanych na temat realizmu matematycznego oraz społeczno-behawioralnego środowisk cyfrowych. Pominięto kwestie związane z oprawą graficzną symulacji, gdyż jak wykazało badanie literaturowe - nie stanowią one istotnego elementu z punktu widzenia procesu edukacyjnego i nie powinny mieć znaczenia dla badanej grupy.

W ramach przeprowadzonej ankiety respondentom przedstawiono zestaw twierdzeń dotyczących potencjalnych ograniczeń i wad symulacji szkoleniowych. Każde z nich zostało ocenione przy użyciu pięciostopniowej skali Likerta, gdzie:

- 1 oznaczało „Zdecydowanie się nie zgadzam".
- 5 oznaczało „Zdecydowanie się zgadzam".

Taki dobór skali pozwolił na precyzyjne określenie natężenia sceptycyzmu oraz identyfikację obszarów, w których respondenci wykazują największą niepewność merytoryczną. Głównym parametrem analitycznym wykorzystanym do interpretacji wyników jest wskaźnik TOP2. Reprezentuje on sumę odpowiedzi afirmatywnych, czyli odsetek osób, które wybrały opcje 4 („Raczej się zgadzam") oraz 5 („Zdecydowanie się zgadzam"). Skupienie się na tym wskaźniku pozwala na wyodrębnienie realnych, ugruntowanych przekonań badanych i oddzielenie ich od odpowiedzi neutralnych („nie mam zdania"), co jest kluczowe przy analizie barier i wiarygodności narzędzia. W kwestionariuszu wyodrębniono sześć kluczowych obszarów (tabela 4), które bezpośrednio uderzają w pojęcie wierności (*fidelity*) i autentyczności szkolenia.

Tabela 4.
Zestawienie i opis badanych barier wiarygodności symulacji szkoleniowych.

Numer pytania	Badana bariera	Opis (charakter pytania)	TOP2 %	Opcja 3	Opcja 4	Opcja 5
B1	Realizm matematyczno-ekonomiczny	Afirmacja: Wiara w zdolność symulacji do wiernego odwzorowania praw ekonomii	78,5%	14,3%	44,6%	33,9%
B2	Realizm społeczno-behawioralny	Sceptycyzm: Obawa o brak rzetelnego odzwierciedlenia czynników ludzkich i emocjonalnych	67%	18,8%	39,3%	27,7%
B3	Luka atrakcyjności	Sceptycyzm: Obawa przed nudą w zestawieniu z komercyjnymi grami wideo	70,5%	15,2%	60,7%	9,8%

Numer pytania	Badana bariera	Opis (charakter pytania)	TOP2 %	Opcja 3	Opcja 4	Opcja 5
B4	Transfer wiedzy	Sceptycyzm: Wątpliwość czy doświadczenie z symulacji przełoży się na realną sytuację w pracy (nadmierne uproszczenie reguł symulacji względem świata realnego)	67,9%	20,5%	42,9%	25%
B5	Specjalizacja merytoryczna narzędzia	Sceptycyzm: Przekonanie o niskiej przydatności symulacji dla zaawansowanych specjalistów (postrzeganie symulacji jako narzędzi wstępnych)	54,5%	25%	35,7%	18,8%
B6	Deficyt interakcji ludzkiej	Sceptycyzm: Brak kontaktu z drugim człowiekiem wpływa negatywnie na rozwój umiejętności miękkich	22,3%	44,6%	15,2%	7,1%

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Analiza zgromadzonych danych pozwala na zdiagnozowanie tzw. „luki wiarygodności". Co istotne, nie wynika ona z oceny konkretnego oprogramowania, co z porównania potencjału współczesnych technologii z wyobrażeniem o standardzie korporacyjnym.

W obszarze merytorycznym respondenci wykazują bardzo wysokie zaufanie do samej możliwości wiernego oddania realiów ekonomicznych przez systemy cyfrowe (B1: 78,5% TOP2). Wynik ten można interpretować przez pryzmat deklarowanych preferencji gatunkowych - blisko połowa badanych wskazuje na gry logiczne (48,2%) oraz strategiczne (37,5%), w których kluczowym elementem jest wewnętrzna spójność reguł i precyzja algorytmów. Zgodnie z koncepcją *gaming literacy*, gracze ci potrafią poddać systemy swoistej „inżynierii wstecznej". Świadomość, że komercyjne silniki zarządzają tysiącami zmiennych, może skłaniać ich do wniosku, iż stworzenie wiarygodnego modelu ekonomicznego w symulacji szkoleniowej jest technologicznie osiągalne, co stanowi swoisty kredyt zaufania wystawiony technologii jako takiej. To kredyt zaufania wystawiony tej technologii.

Jednak w obszarze realizmu społeczno-behawioralnego odnotowano wysoki stopień obawy o tę płaszczyznę symulacji (B2: 67,0% TOP2). Tak wysoki rygoryzm znajduje ilościowe uzasadnienie w profilu próby - aż 65,2% badanych deklaruje preferencje wobec gier RPG i fabularnych. Wynik ten można interpretować jako przejaw ograniczonego zaufania w zakresie kreowania autentycznych narracji i postaci przez projektantów symulacji korporacyjnych. Do

tej pory interakcje społeczne z NPC (zarówno w grach komercyjnych, jak i poważnych) oparte były na zamkniętych drzewach decyzyjnych, przez co występuje tzw. zjawisko „wyczerpania opcji dialogowych". Tradycyjne postacie niezależne (NPC) opierają się na „sztywno zakodowanych skryptach" (*hard-coded scripts*) oraz „z góry ustalonych ścieżkach dialogowych". Prowadzi to do powtarzalnych interakcji, w których NPC powielają te same kwestie niezależnie od działań gracza, co sprawia, że rozmowa staje się przewidywalna i traci na autentyczności (Chernbumroong et al., 2026). Stąd też użytkownik o wysokim poziomie *gaming literacy*, który obcuje z najbardziej zaawansowanymi postaciami cyfrowymi w grach komercyjnych, może obawiać się, że korporacyjne NPC będą działać jako „bezduszne automaty", jedynie „podające określony tekst w zależności od wybranej opcji". Respondenci mogą zakładać (z resztą słusznie), że w warunkach szkoleniowych bariera ta może być nie do przeskoczenia. Skoro największe studia gier wideo, dysponujące olbrzymimi budżetami i wielkimi zespołami scenarzystów, grafików oraz programistów AI, nie przeskoczyły dotąd tej bariery technologicznej, trudniej uwierzyć, że zrobią to twórcy symulacji biznesowych (Chee i Wong, 2017). To znacząco uderza w wiarygodność korporacyjnych narzędzi szkoleniowych i tłumaczy wysoki sceptycyzm w tym zakresie.

Dodatkowo, z punktu widzenia procesu szkoleniowego, ta przewidywalność rodzi poważne ryzyko dydaktyczne. Ankietowani jako doświadczeni gracze prawdopodobnie szybko i bezbłędnie zidentyfikują „sztywny skrypt" i przewidywalność ścieżek wyboru. Może wówczas nastąpić tzw. „ogrywanie systemu" (*gaming the system***)**. Jeśli ścieżki dialogowe są skończone i łatwe do zdekodowania, uczestnicy szkolenia zamiast trenować kompetencje miękkie, zaczynają szukać matematycznie optymalnej ścieżki wyboru. Ostatecznie w modelu opartym na skryptach pierwszy uczestnik szkolenia może łatwo przekazać innym „poprawne" odpowiedzi, co całkowicie niweluje sens symulacji jako laboratorium bezpiecznej porażki (*safe-fail environment*).

Wynik 70,5% dla obawy przed nudą w porównaniu do gier komercyjnych (B3), można interpretować jako wyraz braku zaufania co do zdolności twórców rozwiązań biznesowych do zachowania należytej homeostazy między dydaktyką a rozrywką. Respondenci, ukształtowani przez złożone światy gier komercyjnych, mogą obawiać się, że twórcy rozwiązań korporacyjnych - którzy nie władają tak biegle „językiem gier" jak deweloperzy rozwiązań komercyjnych - dostarczą produkt zbyt skoncentrowany na aspekcie edukacyjnym, a pomijającym istotne elementy ludyczne, do których są przyzwyczajeni z gier komercyjnych. Istnieje realne ryzyko, że w opinii osób o wysokim *gaming literacy*, nadmierny prymat celów edukacyjnych doprowadzi do powstania narzędzi schematycznych i „suchych" merytorycznie, co w konsekwencji zmarginalizuje istotne dla nich elementy ludyczne. Dla pokolenia cyfrowego, przyzwyczajonego do wysokich standardów interakcji, produkt zbyt mocno skoncentrowany na samym przekazie wiedzy staje się mało angażujący. W tym kontekście obawa przed utratą nieliniowości i głębi mechaniki na rzecz sztywnych skryptów edukacyjnych jawi się jako znacząca bariera, która może drastycznie obniżyć ich zainteresowanie.

Istotny poziom sceptycyzmu odnotowano w obszarze transferu wiedzy (B4: 67,9% TOP2), co wskazuje na głęboką obawę badanych czy nabyte w środowisku wirtualnym kompetencje znajdą odzwierciedlenie w realiach zawodowych. Respondenci, ukształtowani przez nieliniowość i złożoność systemów komercyjnych, najprawdopodobniej identyfikują ryzyko nadmiernego uproszczenia reguł w narzędziach szkoleniowych. W ich percepcji sukces w symulacji może wynikać raczej z opanowania specyficznego, „sztywnego" algorytmu niż z rzeczywistego zrozumienia mechanizmów biznesowych, co budzi wątpliwość, czy wypracowane strategie okażą się skuteczne w zderzeniu z chaosem realnego rynku.

Zjawisko to może bezpośrednio korespondować z postrzeganiem specjalizacji merytorycznej narzędzi (B5). Ponad połowa badanych (54,5% TOP2) traktuje symulacje jedynie jako rozwiązania wstępne, o niskiej przydatności dla zaawansowanych specjalistów. Taką postawę można interpretować przez pryzmat „awersji algorytmicznej" - jeśli logika narzędzia pozostaje nieprzejrzystą „czarną skrzynką", eksperci-użytkownicy odrzucają je jako niewiarygodne źródło weryfikacji profesjonalnych kompetencji. Dla tej grupy badanych, posiadającej wysoki poziom *gaming literacy*, warunkiem uznania narzędzia za profesjonalne jest zachowanie wysokiej wierności funkcjonalnej i psychologicznej, która rzuci wyzwanie ich zaawansowanym modelom mentalnym.

Najbardziej unikalną strukturę odpowiedzi zaobserwowano w przypadku deficytu interakcji ludzkiej (B6), gdzie jedynie 22,3% badanych wyraziło sceptycyzm, przy dominującej postawie neutralnej (44,6% dla opcji 3). Taki rozkład głosów sugeruje, że respondenci nie zajmują jednoznacznego stanowiska i w zasadzie nie są pewni, czy brak bezpośredniego kontaktu z drugim człowiekiem stanowi w tym kontekście realną barierę. Można przypuszczać, że badani znajdują się w stanie wspomnianej wcześniej niepewności epistemicznej - dla pokolenia ukształtowanego przez zaawansowane systemy komunikacji zapośredniczonej, brak fizycznej obecności mentora czy współpracownika może nie być postrzegany jako problematyczny sam w sobie. Niska wartość wskaźnika TOP2 pozwala sądzić, że „cyfrowi tubylcy" mogą mieć trudność z jednoznaczną oceną, czy i w jakim stopniu brak „czynnika ludzkiego" faktycznie obniża wiarygodność profesjonalnego szkolenia, traktując go raczej jako naturalną cechę środowisk cyfrowych niż ich krytyczną wadę.

Podsumowanie

Przeprowadzone badanie pozwoliło odpowiedzieć na postawione pytanie badawcze i zrealizować zamierzony cel badawczy jakim była analiza barier, które determinują poziom (nie)wiarygodności symulacji komputerowych w oczach młodych, biegłych gamingowo osób. Analiza zgromadzonych danych ujawnia istotną „lukę wiarygodności", którą tłumaczyć można wysoką biegłością gamingową badanej próby. Istotne jest spostrzeżenie, że bariera ta nie

wynika z oceny konkretnego oprogramowania, lecz prawdopodobnie z porównania technologicznego potencjału znanego z gier klasy AAA z wyobrażeniem o standardzie rozwiązań korporacyjnych

W obszarze technicznym respondenci wykazują wysokie zaufanie do samej możliwości wiernego oddania realiów ekonomicznych przez systemy cyfrowe (B1: 78,5% TOP2). Choć większość badanych mogła nie mieć bezpośredniej styczności z profesjonalnymi symulatorami biznesowymi, ich bogate doświadczenie w grach strategicznych i RPG (łącznie ponad 65% wskazań) pozwala przypuszczać, że postrzegają oni logikę matematyczną jako sferę, w której technologia potrafi osiągnąć bezbłędność. Zgodnie z koncepcją *gaming literacy*, użytkownicy ci mogą poddawać systemy swoistej „inżynierii wstecznej". Świadomość, że komercyjne silniki gier zarządzają tysiącami zmiennych, może skłaniać ich do wniosku, iż stworzenie wiarygodnego modelu ekonomicznego w symulacji szkoleniowej jest technologicznie w pełni osiągalne. Stanowi to swoisty kredyt zaufania wystawiony technologii jako takiej.

O ile respondenci ufają precyzji algorytmicznej i modelom matematycznym (B1: 78,5% dla wiary w możliwości obliczeniowej symulacji), o tyle pozostają głęboko sceptyczni wobec realizmu społeczno-behawioralnego (B2: 67,0% dla obawy o ten wymiar odwzorowania rzeczywistości). Jak wskazuje literatura - zapewne obawiają się regresu do przewidywalnych, „sztywnych skryptów", co korespondowałoby z oczekiwaniem dynamicznie generowanych zadań (wspomniany wątek został zbadany w ramach tego samego projektu, jednak analiza tego zjawiska znajduje się w osobnej publikacji, publikowanej równolegle z tą jako komplementarna część projektu badawczego). Dodatkowo, przewidywalność ścieżek decyzyjnych może skłaniać biegłych graczy do poszukiwania matematycznie optymalnych wyników (tzw. *gaming the system*) kosztem realnego treningu kompetencji.

Wysoki wynik dla luki atrakcyjności (B3: 70,5% TOP2) może świadczyć o braku zaufania do zdolności twórców rozwiązań biznesowych do zachowania homeostazy między dydaktyką a rozrywką. Respondenci ukształtowani przez złożone światy komercyjne prawdopodobnie obawiają się, że produkt zbyt mocno skoncentrowany na samym przekazie wiedzy stanie się schematyczny i mało angażujący. W ich percepcji nadmierny prymat celów edukacyjnych może prowadzić do marginalizacji istotnych elementów ludycznych, co jawi się jako znacząca bariera akceptacji narzędzia.

Sceptycyzm w obszarze transferu wiedzy (B4: 67,9% TOP2) wskazuje na obawę, czy nabyte wirtualnie kompetencje znajdą odzwierciedlenie w realiach zawodowych. Może to sugerować stan tzw. niepewności epistemicznej opisanej w literaturze - badani wierzą w model matematyczny, lecz mogą wątpić, czy uproszczone reguły przygotują ich na chaos rzeczywistego biznesu. Zjawisko to koreluje z postrzeganiem specjalizacji merytorycznej (B5: 54,5% TOP2), gdzie symulacje są często traktowane jedynie jako rozwiązania wstępne. Można to tłumaczyć zjawiskiem opisanej w rozdziale teoretycznym „awersji algorytmicznej" - jeśli logika narzędzia nie jest transparentna, eksperci-użytkownicy mogą odrzucać je jako niewiarygodne źródło weryfikacji umiejętności.

Najniższy poziom sceptycyzmu, przy jednoczesnej wysokiej neutralności ocen, odnotowano w obszarze deficytu interakcji ludzkiej (B6: 22,3% TOP2; 44,6% wskazań neutralnych). Tak specyficzny rozkład odpowiedzi sugeruje, że badani wykazują największą powściągliwość w ocenach właśnie w tym wymiarze, co może wskazywać na brak pewności czy deficyt bezpośredniego kontaktu z drugim człowiekiem stanowi realną przeszkodę w procesie dydaktycznym. Pozwala to przypuszczać, że dla „cyfrowych tubylców" zapośredniczenie technologiczne nie jest postrzegane jako bariera sama w sobie. Brak fizycznego kontaktu może nie być interpretowany jako deficyt obniżający wiarygodność narzędzia, o ile system zapewnia odpowiednią wierność interakcyjną oraz społeczną. W tej perspektywie, kluczowe dla użytkowników o wysokim *gaming literacy* staje się nie tyle fizyczne obcowanie z nauczycielem czy współgraczami, co rzetelność i głębia relacji symulowanych wewnątrz cyfrowego ekosystemu.

Zidentyfikowane deficyty i luki wskazują, że tradycyjne, oparte na sztywnych skryptach symulacje wyczerpują swoją formułę w oczach pokolenia cyfrowego. Młodzi akceptują cyfrowy model świata, ale odrzucają jego społeczne uproszczenia. Skuteczna implementacja symulacji wymaga zatem zbliżenia standardów projektowych do jakości znanej z rynku rozrywki, przy jednoczesnym zachowaniu rygoru merytorycznego.

Bibliografia

1. Apperley, T., and Walsh, C. (2012). What digital games and literacy have in common: a heuristic for understanding pupils' gaming literacy. *Literacy*, *46*, 115-122.
2. Baldissin, N., De Toni, A. F., and Nonino, F. (2013). What is a Business Game? Historical background and evolution of business games in serious games context. In N. Baldissin, and A. F. De Toni (Eds.), *Business game-based learning in management education* (pp. 3-23). The Business Game LTD.
3. Chasteen, L., Szot, J., and Teach, R. (2018). Simulations for strategy courses: difficulty vs. realism. *Developments in Business Simulation and Experiential Learning*, *45*.
4. Chee, C. M., and Wong, D. H. T. (2017). Affluent Gaming Experience Could Fail Gamification in Education: A Review. *IETE Technical Review*, *34*, 593-597. doi: 10.1080/02564602.2017.1315965.
5. Chernbumroong, S., Intawong, K., Asawimalkit, U., Puritat, K., and Julrode, P. (2026). Design and Evaluation of a Generative AI-Enhanced Serious Game for Digital Literacy: An AI-Driven NPC Approach. *Informatics*, *13*(1), 16. doi: 10.3390/informatics13010016.
6. Djaouti, D., Alvarez, J., and Jessel, J. P. (2011). Classifying serious games: the G/P/S model. In P. Felicia (Ed.), *Handbook of research on improving learning and motivation through educational games: Multidisciplinary approaches* (pp. 118-136). Hershey: IGI Global Scientific Publishing. doi: 10.4018/978-1-60960-495-0.ch006.
7. Dörner, R., Göbel, S., Effelsberg, W., and Wiemeyer, J. (2016). *Serious Games: Foundations, Concepts and Practice* Cham: Springer International Publishing.
8. Easterling, A. (2021). Digital Game-Based Learning: Teacher Training, Perceptions, Benefits, and Barriers (Doctoral dissertation). St. Cloud State University, Education Administration and Leadership, St. Cloud.
9. Feinstein, A. H., and Cannon, H. M. (2001). Fidelity, verifiability, and validity of simulation: Constructs for evaluation. *Developments in Business Simulation and Experiential Learning*, *28*.
10. Feinstein, A. H., and Cannon, H. M. (2002). Constructs of simulation evaluation. *Simulation & Gaming*, *33*, 425-440. doi: 10.1177/1046878102238606.
11. Fraccascia, L., Sabato, A., and Yazan, D. M. (2021). An industrial symbiosis simulation game: Evidence from the circular sustainable business development class. *Journal of Industrial Ecology*, *25*, 1688-1706.

12. Gatti, L., Ulrich, M., and Seele, P. (2019). Education for Sustainable Development through Business Simulation Games. *Journal of Business Ethics*, *154*, 1-15. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.130.
13. Glas, R., van Vught, J., Fluitsma, T., De La Hera, T., and Gómez-García, S. (2023). Literacy at play: an analysis of media literacy games used to foster media literacy competencies. *Frontiers in Communication*, *8*, 1155840. doi: 10.3389/fcomm.2023.1155840.
14. Grāvelsiņa, E., and Daniela, L. (2025). From Facebook to Classroom: A Systematic Analysis of Educational Games Designed by Educators. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, *24*, 517-544. doi: 10.26803/ijlter.24.3.25.
15. Juszczyk, S. (2023). Wiarygodność badań online - refleksje metodologiczne. *Journal of Continuing Education*, *122*(3). doi: 10.34866/znes-vs56.
16. Kempen, E., Labuschagne, M. J., and Jama, M. P. (2024). Elements of a safe learning environment: A student perspective. *African Journal of Health Professions Education*, *16*, 58-62.
17. Linder, H. (2020). Emergo Train System: Evaluation of a paediatric trauma victim bank (Bachelor thesis). Linköping University, Linköping.
18. Marklund, B. B., and Taylor, A. S. A. (2016). Educational Games in Practice: The challenges involved in conducting a game-based curriculum. *Electronic Journal of e-Learning*, *14*, 122-135.
19. Matejun, M. (2016). Metodyka badań ankietowych w naukach o zarządzaniu - ujęcie modelowe. In M. Lisiński, and B. Ziębicki (Eds.), *Współczesne problemy rozwoju metodologii zarządzania* (pp. 341-354). Kraków: Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
20. Miller, W., Rein, D. B., O'Grady, M. J., Jean-Ezra, Y., Eichner, J., and McMahon, M. (2013). *A review and analysis of economic models of prevention benefits*. Chicago: NORC at the University of Chicago.
21. Mortara, M., Catalano, C., Bellotti, F., Fiucci, G., Panchetti, M., and Petridis, P. (2014). Learning cultural heritage by serious games. *Journal of Cultural Heritage*, *15*, 318-325. doi: 10.1016/j.culher.2013.04.004.
22. Ökten, B. E. (2026). Social Media Distrust and Turn to Artificial Intelligence among Generation Z: A Qualitative Model Linking Digital Minimalism and Financial Discipline with Social Policy Recommendations. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *9*, 1684312. doi: 10.3389/frai.2026.1684312.
23. Petre, C., Duffy, B. E., and Hund, E. (2019). "Gaming the system": Platform paternalism and the politics of algorithmic visibility. *Social Media Society*, *5*(4). 2056305119879995.

24. Shin, D. (2022). How do people judge the credibility of algorithmic sources? *Ai & Society*, *37*, 81-96. doi: 10.1007/s00146-021-01158-4.
25. Shirazian, S., Vatanpour, M., and Guity, P. (2025). Generation Z: Learners' Profiles and Teaching Challenges. *Frontiers in Dentistry*, *22*, 1-15. doi: 10.18502/fid.v22i40.19906.
26. Sperl, G. D. (2025). The Effects of Playing Tabletop Roleplaying Games in the Classroom on the Academic Literacy of Secondary Students (Doctoral dissertation). Wayne State University, Detroit. doi: 10.5281/zenodo.15801329.
27. Staniszewska, M. (2013). Internet jako narzędzie prowadzenia badań społecznych. *Acta Innovations*, *9*, 1-57.
28. Stenros, J. (2015). *Playfulness, Play, and Games: A Constructionist Ludology Approach* (Acta Universitatis Tamperensis; No. 2049). Tampere: Tampere University Press.
29. Strickland, P. (2023). Business-Simulation Pedagogy, Assessments, and Barriers to Entry in an Australian Educational Environment. *International Journal of Smart Business and Technology*, *11*, 1-14. doi: 10.21742/ijsbt.2023.11.2.01.
30. Sultanova, O., and Sadullayev, S. (2024). Application of modern technologies in education of students. *Science and Innovation*, *3*, 431-433. doi: 10.5281/zenodo.10731035.
31. Tan, A., Dorneich, M. C., and Cotos, E. (2025). Developing and evaluating the fidelity of virtual reality-artificial intelligence (VR-AI) environment for situated learning. *Frontiers in Virtual Reality*, *6*, 1587768. doi: 10.3389/frvir.2025.1587768.
32. Vatral, C., Biswas, G., Cohn, C., Davalos, E., and Mohammed, N. (2022). Using the DiCoT framework for integrated multimodal analysis in mixed-reality training environments. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *5*, 941825. doi: 10.3389/frai.2022.941825.
33. Vlachopoulos, D., and Makri, A. (2017). The effect of games and simulations on higher education: a systematic literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, *14*(1), 22. doi: 10.1186/s41239-017-0062-1.

CZYNNIK LUDZKI VERSUS TECHNOLOGIA W INTEGRACJI BUDŻETOWANIA I CONTROLLINGU OPERACYJNEGO – ANALIZA EMPIRYCZNA

Piotr Pyrgies

Instytut Informatyki, Rachunkowości i Controllingu; Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie;
232055@student.uek.krakow.pl

Streszczenie: Celem artykułu jest empiryczna weryfikacja stopnia integracji procesu budżetowania z controllingiem operacyjnym w praktyce gospodarczej oraz ocena, w jakim stopniu ten zintegrowany system zaspokaja bieżące, wielowymiarowe potrzeby informacyjne współczesnej kadry zarządzającej. Przyjęto procedurę badawczą opartą na metodzie indukcyjnej. W pracy wykorzystano krytyczną analizę literatury przedmiotu oraz badania ilościowe o charakterze pierwotnym. Badanie zrealizowano metodą ankietową (technika CAWI) na próbie 108 respondentów, reprezentujących głównie praktykę biznesową (pracownicy działów finansowych, kadra zarządzająca, piony operacyjne) oraz środowisko akademickie. Wyniki badań potwierdzają ewolucję roli controllera w kierunku analitycznego partnera biznesowego oraz odchodzenie od modelu nakazowo-kontrolnego na rzecz dialogu biznesowego i reakcji korygujących. Wbrew pozorom, najmniejszą przeszkodą w integracji systemów okazała się bariera technologiczna (infrastruktura IT). Najpoważniejsze wyzwania w przedsiębiorstwie stanowią bariery związane z czynnikiem ludzkim, komunikacyjna oraz kompetencyjna. Mimo tych trudności organizacyjnych ogólna ocena efektywności zintegrowanego systemu. Zauważalny jest też wyraźny trend odchodzenia od sztywnych rocznych planów na rzecz budżetowania elastycznego i kroczącego. Opracowanie rzuca nowe światło na uwarunkowania wdrażania zintegrowanych systemów informacyjnych, dowodząc empirycznie, że w dobie zaawansowanej cyfryzacji sukces integracji instrumentów zarządczych zależy w głównej mierze od czynnika ludzkiego, a nie od samego zaplecza technologicznego.

Słowa kluczowe: controlling operacyjny, budżetowanie, czynnik ludzki, rachunkowość zarządcza, system informacji zarządczej

THE HUMAN FACTOR VERSUS TECHNOLOGY IN THE INTEGRATION OF BUDGETING AND OPERATIONAL CONTROLLING: EVIDENCE FROM AN EMPIRICAL STUDY

Abstract: The purpose of this article is to empirically verify the degree of integration of the budgeting process with operational controlling in business practice, and to assess the extent to which this integrated system satisfies the current, multidimensional information needs of modern management. The research procedure adopted is based on the inductive method. The study utilized a critical analysis of the literature and primary quantitative research. The research was conducted using a survey method (CAWI technique) on a sample of 108 respondents, primarily representing business practice (financial department employees, management staff, operational divisions) and academia. The research results confirm the evolution of the controller's role towards an analytical business partner and a departure from the command-and-control model in favor of business dialogue and corrective actions. Contrary to appearances, the technological barrier (IT infrastructure) proved to be the smallest obstacle to system integration. The most serious challenges in the enterprise are barriers related to the human factor: communication and competence. Despite these organizational difficulties, the overall assessment of the integrated system's effectiveness is highly positive. There is also a noticeable trend of moving away from rigid annual plans towards flexible and rolling budgeting. This study sheds new light on the conditions for implementing integrated information systems, demonstrating empirically that in the era of advanced digitalization, the success of integrating management instruments depends mainly on the human factor, rather than on the technological background itself.

Keywords: operational controlling, budgeting, human factor, human factor, management information systems

Budżetowanie jako narzędzie controllingu operacyjnego

Współczesne otoczenie rynkowe jest bardzo zmienne co wpływa na decyzje przedsiębiorstw, które w nim funkcjonują. Tempo zmian oraz złożoność zjawisko gospodarczych sprawia, że tradycyjne metody zarządzania stają się wielokrotnie niewystarczające. Na te wyzwania z odpowiedzią przychodzi controlling. Słowo to wywodzi się z języka angielskiego i oznacza sterowanie, panowanie oraz trzymanie sytuacji pod kontrolą (Materac, 2020). W literaturze naukowej wyodrębnia się dwie wiodące szkoły controllingu. W szkole niemieckiej controlling przyjmuje praktycznie całkowicie funkcję zarządzania, dodając do niej własne metody. Natomiast w szkole amerykańskiej pełni jedynie pomocniczą funkcję w zarządzaniu (Nesterak 2015). Badacze z reguły dzielą ten system na dwa poziomy: operacyjny i strategiczny. Controlling operacyjny koncentruje się na bieżącym sterowaniu

wynikiem finansowym, kontroli rentowności oraz dbałości o utrzymanie płynności w krótkim horyzoncie czasowym. Z kolei controlling strategiczny zajmuje się, długimi wieloletnimi okresami, poszukiwaniem szans rynkowych i unikaniu zewnętrznych zagrożeń (Kwiecień, Wójcik-Jurkiewicz, 2022).

Menadżerowie w celu skutecznego sterowania przedsiębiorstwem opierają się na twardych koncepcjach zorganizowanego działania. W myśl zasad prakseologii, które opisał Tadeusz Kotarbiński, w każdej ludzkiej pracy możemy wyróżnić podstawowe trzy fazy: przygotowania, wykonania oraz kontroli (Krzemiński, 2017). Brak planu skutkuje działaniom dającym jedynie chwilową poprawę, chaotycznym i co za tym idzie bardzo mało skutecznym. Aby tego uniknąć nowoczesny controlling wychodzi ponad wyłączne bazowanie na biernym liczeniu kosztów. Wypełnia on trzy zintegrowane i aktywne funkcje w podmiotach gospodarczych: planowania, kontroli oraz dostarczenia decydentom informacji potrzebnych do podejmowania kluczowych decyzji. Jednakże informację w systemie controllingu nie należą do statycznych, prostych zbiorów danych. Są to dogłębnie przeanalizowane i przetworzone wiadomości, które ilustrują odbiorcy sytuację i realnie wspierają jego proces decyzyjny. Dzięki nim przedsiębiorstwo może spójnie realizować wyznaczone sobie cele, a także zawczasu wykrywać błędy w zarządzaniu.

Najważniejszym narzędziem controllingu operacyjnego, który odpowiada za realizację tej funkcji, jest budżetowanie (Pietrzak, 2013, Wójcik-Jurkiewicz, 2018). System ten dostarcza organizacji wiele kwantyfikowalnych korzyści. Zmusza on menadżerów do rozsądnego podziału ograniczonych zasobów i racjonalnego przewidywania przyszłości. Budżetowanie skutecznie wspiera koordynację działań pomiędzy niepołączonymi, niezależnymi od siebie działami. Sam proces budżetowania dzielony jest na dwie odmienne grupy działań. Pierwsza z nich to zadanie ex ante. Należą do nich prowadzenie negocjacji wewnątrzfirmowych, przygotowywanie budżetów cząstkowych oraz zatwierdzanie planu głównego. Kolejna, druga grupa to działania ex post. Obejmują one bieżącą realizację budżetu, analizę ewentualnych odchyleń, stała kontrola oraz wprowadzanie wymaganych działań korygujących.

Pomyślne wdrożenie planów finansowych wymaga szczególnej uwagi do adaptacji struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa (Chojnacka-Komorowska, 2011). Łączy się to nieodzownie z głęboką decentralizacją zarządzania (Jarosz, 2021). Decentralizacja opiera się na wyodrębnieniu w organizacji mniejszych jednostek, ośrodków (centrów) odpowiedzialności. Badacze wyróżniają najczęściej centra przychodów, zysków, kosztów i inwestycji (Nesterak, 2015). Kluczową rolę pełnią centra inwestycji. Ponieważ osoby odpowiedzialne za nie dzierżą pieczę nad relacją między zainwestowanym kapitałem a wygenerowanym zyskiem. Zarząd bacznie przygląda się i krytycznie ocenia efektywność tych centrów za pomocą szerokiej gamy wskaźników finansowych. Należą do nich między innymi zwrot z inwestycji (ROI), a także ekonomiczna wartość dodana (EVA) (Pawlak, 2016). Zalety takiej struktury to przeniesienie odpowiedzialności równomiernie na wszystkie szczeble menadżerskie i co za tym idzie, znaczące uelastycznienie organizacji.

Aby współpraca pomiędzy poszczególnymi centrami decyzyjnymi zachodziła sprawnie, bez powielania wzajemnie błędów, podmiot gospodarczy powinien spisać ustalone procedury oraz instrukcję w jednym oficjalnym dokumencie. Zbiór takich regulacji nosi nazwę Księgi budżetowania (Kubacka, 2017). W jej skład wchodzą między innymi ujednolicone wzory formularzy, instrukcje sporządzania budżetu oraz precyzyjnie określone zasady obiegu dokumentów (Pawlak, 2016). Jest wskazane aby ten dokument zawierał specjalne słowniki pojęć, co drastycznie niweluje niepotrzebne nieporozumienia między poszczególnymi parownikami wynikające z subiektywnych interpretacji. Księga także szczegółowo określa zasady rozliczenia i oceny osób, które ponoszą odpowiedzialność za egzekucje planów finansowych. Formalizacja systemu za pomocą Księgi Budżetowania stanowi bazę wydajnego controlling.

Nieodzownym etapem procesu budżetowania jest kontrola jego realizacji. Nad wykonaniem planu trzyma pieczę controller, który sprawuję funkcję głównego doradcy ekonomicznego zarządu (Sierpińska-Sawicz, 2015). Regularnie porównuje on wartości założone w budżecie z stanem faktycznym w przedsiębiorstwie (Nesterak, 2015). W ten sposób wszelakie odchylenia są identyfikowane precyzyjnie i szybko. W razie pojawienia się odchyleń obowiązkiem controllera jest współpraca z kierownikami odpowiednich działów i wspólne wypracowanie wymaganych decyzji korygujących. Dzięki podjęciu szybkich działań naprawczych przedsiębiorstwo skutecznie rozwiązuje problemy potencjalnie przynoszące straty. Poprzez tak zorganizowaną integrację budżetowanie przestaje być jedynie martwym zestawieniem liczba, a zmienia się w wartościowy instrument aktywnego sterowania wynikiem finansowym.

Modele i uwarunkowania współpracy budżetowania z controllingiem operacyjnym

Budżetowanie to fundamentalny instrument controllingu operacyjnego. Narzędzie to zajmuje się procesem alokacji zasobów i tworzeniem planów. Pozwala ono również znacznie efektywniej koordynować działaniami poszczególnych działów oraz motywować pracowników, nie tylko na stanowiskach menadżerskich (Bochenek, 2018). Dzięki tej współpracy controlling ma możliwość działania ponad rejestrację zdarzeń gospodarczych, typową dla rachunkowości. Staje się on nawigatorem, aktywnym doradcą, który stanowi kluczowe wsparcie dla procesów decyzyjnych zachodzących w przedsiębiorstwie (Zygmański, 2018). Jego pozytywny wpływ dotyczy również całej kadry kierowniczej, poprawiając jakość pracy od najniższych do najwyższych szczebli. Współczesne badania empiryczne potwierdzają, że przedsiębiorstwa wykorzystują controlling jak jedno z kluczowych metod zarządzania całą organizacją. Między narodowe analizy przekrojowe,

które obejmują prawie trzy tysiące organizacji z Polski, Szwajcarii i USA, pokazują, że aż około 80% badanych podmiotów (Bieńkowska, and Tworek, 2020). W Polsce narzędzie to najrzadziej stosują najmniejsze organizacje. Sytuacja w Stanach Zjednoczonych posiada podobne właściwości. Zastosowanie wzrasta wraz z rozmiarem przedsiębiorstwa. Jednak aby controlling skutecznie wspierał zachodzące w przedsiębiorstwach procesy zarządcze, należy zastosować odpowiedni model budżetowania. Taki, który będzie dopasowany zarówno do otoczenia rynkowego jak również charakterystyki danego podmiotu gospodarczego.

Praktycy biznesowi i naukowcy klasyfikują modele integracji budżetowania z controllingiem na podstawie różnych kryteriów. Jednym z nich jest kierunek, w jakim zarządu ustala cele. Wyróżniamy tu dwa modele, tradycyjny odgórny (top-down) oraz oddolny (partycypacyjny, bottom-up) (Kuchciak, 2008). Innym przyjętym kryteriów jest baza planistyczna. W tym ujęciu przedsiębiorstwa najczęściej stosują budżetowanie przyrostowe, które operuje na danych historycznych. Bardzo pracochłonną alternatywą jest budżetowanie od zera (ZBB - Zero Based Budgeting), które zmusza do analizy każdego wydatku od nowa (Kowalewski, 2015).

Tradycyjne, statyczne budżety roczne coraz częściej znajdują się w ogniu krytyki badaczy. Ich główną wadą jest mocno ograniczona elastyczność organizacji, a także częste rozminięcie się z jej celami strategicznymi (Kuchciak, 2008). Ponadto sztywne plany finansowe sprzyjają powstawaniu patologii behawioralnych (Pawlak, 2016). Należą do nich między innymi celowe zawyżanie kosztów albo zaniżanie przychodów (tworzenie tzw. Luki budżetowej) czy bezproduktywne wydawanie pozostałych środków pod koniec roku, aby przedsiębiorstwo nie obcięło ich w kolejnym budżecie. W celu rozwiązania tych problemów, specjaliści proponują dwa kierunki zmian, które się wykluczają:

- Ewolucyjne, kładące nacisk na udoskonalenie procesu budżetowego, które przekłada się na uelastycznienie obecnego systemu operacyjnego
- Rewolucyjne, odrzucenie tradycyjnego budżetowania na rzecz zupełnie nowych elastycznych modeli zarządzania

Pierwszy, ewolucyjny kieruje się koncepcją budżetowania na rachunku kosztów działań (Activity-Based Budgeting – ABB) (Pietrzak, 2013). Podejście to opiera się na Modelu Pętli Zamkniętej (Closed Loop Model). Dzięki temu algorytmowi menadżerowie są zmuszenie do stworzenie wykonalnego planu operacyjnego przed przystąpieniem do generowania budżetu finansowego. Model precyzyjnie łączy dostępną pojemność zasobów (capacity) z faktycznym popytem na nie. Pozwala to zapobiec tworzenia danych poprzez mechaniczne kopiowanie danych historycznych. Model Pętli Zamkniętej bazuje na obiektywnych, fizycznych relacjach między nakładami a wynikami. Aby podnieść jakość prognoz wiele organizacji decyduje się na wprowadzenie budżetów kroczących (rolling budgets). Zapewniają ciągła aktualizację planów na kolejne miesiące, co pomaga znacząco zniwelować niepewność rynkową (Cyrene, 2021).

Z goła odmienne i bardzo radykalne podejście prezentują propagatorzy ruchu Beyond Budgeting – J. Hope i R. Fraser (Bochenek, 2018). Koncepcja ta przyjmuje, że główną

przyczyną dysfunkcji w podmiotach gospodarczych jest roczna pułapka dokonań (annual performance trap). Wiąże się ona z patologicznym zachowaniem pracowników. Wynikają one z tego że, zarząd na podstawie sztywnych celów budżetowych rygorystycznie ocenia menadżerów. Cele te w dynamicznych środowisku szybko się dezaktualizują. Ruch Beyond Budgeting oponuje, aby organizacje całkowicie porzuciły tradycyjne budżety. Jako alternatywę proponowana jest ocena pracowników z perspektywy czasu na tle rynku, a nie na podstawie sztywnego planu (Pawlak, 2016). Aby nadal tworzyć plany przedsiębiorstwo używa oddzielne narzędzie – niezależne prognozy kroczące (rolling forecasts) (Cyrene, 2021).

Choć literatura naukowa nierzadko krytykuje budżetowanie, badanie empiryczne z Ameryki Północnej pokazują inny obraz faktyczny. Znacząca większość badanych podmiotów gospodarczych wykorzystuje budżety do celów kontrolnych i nie zamierza z nich rezygnować (Libby, 2010). System budżetowania jest wysoko oceniany przez kadry kierownicze. Okazuje się, że rygorystyczne rozliczanie ze sztywnych budżetów nie należy do popularnych zjawisk. W większości przedsiębiorstw przełożeni wykazują elastyczność i zrozumienie. To dowodzi, że problemy z budżetowaniem są spowodowane najczęściej niepoprawnym wdrożeniem, a nie wynikające z natury narzędzia.

Aby wdrożenie zmodernizowanego systemu okazało się sukcesem, organizacja musi spełnić ścisłe wymagania behawioralne i technologiczne, W dobie globalnej cyfryzacji integracja budżetowania z controllingiem wymaga wprowadzenia zintegrowanych systemów klasy ERP (Enterprise Recource Planning) (Kluge, and Kuždowicz, 2017). Niezbędne są równie hurtownie danych o wysokim poziomie zaawansowania, a także rozwiązania analityczne Business Intelligence (BI) (Maciejewski, and Szynkarczuk, 2018). Rozbudowana i sprawna infrastruktura IT skraca czas, który jest potrzebny menadżerom na podjęcie, nie raz, kluczowych decyzji. Zintegrowane systemy istotnie przyczyniają się do automatyzacji przepływu informacji oraz dają możliwość wielowymiarowych analiz odchyleń (Chojnacka-Komorowska, 2011).

Równie ważnym czynnikiem wpływającym na sukces są aspekty psychologiczne (Zygmański, 2018). Wdrażanie controllingu często napotyka się na silną barierę behawioralną. U pracowników nie rzadko pojawia się niepokój i lęk przed obiektywną oceną oraz obawa i opór przed utratą dotychczasowej swobody działania (Nesterak, 2015). Aby wdrożenie controllingu przebiegło płynnie, przedsiębiorstwo musi wprowadzić kulturę otwartej komunikacji. Organy zarządcze winny traktować odchylenia jako sygnały wczesnego ostrzegania, które motywują do działań korygujących. Jednym z błędów jest traktowanie ich jak powód do karania pracowników. Tylko dzięki spełnieniu obu wymogów organizacja może w pełni wykorzystywać controlling operacyjny do budowania wartości dodanej.

Metodyka procesu badawczego i charakterystyka respondentów

Głównym celem artykułu jest ocena stopnia integracji procesu budżetowania z systemem controllingu operacyjnego, który stanowi kluczowy element zintegrowanego systemu informacyjnego jednostki gospodarczej. Praca obejmuje zagadnienia, które mają bezpośredni wpływ na podejmowanie w organizacjach optymalnych i słusznych decyzji ekonomicznych, przyczyniając się tym samym do sprawnego funkcjonowania przedsiębiorstwa oraz osiągania założonych przez nie celów. Autor podejmuje próbę transferu dotychczasowej wiedzy o instrumentach zarządczych na poziomie mikroekonomicznym, pojedynczego podmiotu gospodarczego, ze szczególnym uwzględnieniem zaspokojenia indywidualnych potrzeb informacyjnych współczesnej kadry kierowniczej. Efektem badania ma być zdiagnozowanie, w jaki sposób to powiązanie weryfikowane jest w praktyce biznesowej oraz jak skutecznie pozwala ono minimalizować niepewność i ryzyko prowadzonej działalności gospodarczej. Mając na uwadze szeroki i wieloaspektowy charakter omawianego zagadnienia, niniejsza praca nie wyczerpuje w pełni tematu, lecz ma stanowić przede wszystkim solidny punkt wyjścia oraz inspirację do kontynuowania empirycznych dociekań naukowych w tym temacie.

Metodologia niniejszej pracy została ukształtowana bezpośrednio przez proces konceptualizacji i strukturyzacji problemu badawczego, co pozwoliło na dokładne dopasowanie technik do specyfiki badanego obszaru:

1. Analiza źródeł wtórnych – krytyczna, przekrojowa analiza literatury przedmiotu
2. Badania ilościowe o charakterze pierwotnym – zrealizowane przy pomocy metody ankietowej z wykorzystaniem techniki CAWI (Computer-Assisted Web Interview)
3. Analiza zjawisk gospodarczych oraz synteza uzyskanych wyników
4. Technikę graficznej oraz tabelarycznej prezentacji danych

Krytyczna analiza literatury posłużyła przede wszystkim do oceny aktualnego stanu wiedzy dotyczącego mechanizmów budżetowania, uwarunkowań controllingu operacyjnego oraz efektu, jakie niesie ze sobą powiązanie tych narzędzi w ramach zintegrowanego systemu informacyjnego wspierającego kadrę zarządzającą.

Proces badawczy w niniejszym opracowaniu oparto na podejściu indukcyjnym. W praktyce oznaczało to wyjście od szczegółowej obserwacji oraz dokumentacji realnych zjawisk zachodzących w praktyce gospodarczej, by na tej podstawie formułować wnioski ogólne, zachodzące prawidłowości i tezy. Fundamentalnym elementem danych pierwotnych były w tym przypadku badania empiryczne przeprowadzone poprzez ankiety internetowe (CAWI).

Ostatni etap prac badawczych obejmował strukturyzację danych przy pomocy tabeli i wykresów, ich wnikliwą interpretację oraz końcową syntezę. Zarówno struktura, jak i warstwa merytoryczna pracy zostały całkowicie podporządkowane osiągnięciu celu oraz weryfikacji

przyjętych hipotez. Należy także podkreślić, że celowy dobór grupy badawczej uniemożliwia bezpośrednie przeniesienie uzyskanych wyników na ogół podmiotów gospodarczych. Jednakże, zebrany materiał stanowi wartościową bazę i punkt wyjścia dla dalszych analiz w tym zakresie.

Do przeprowadzenia badań wykorzystano autorski kwestionariusz ankiety, skierowany zarówno do środowiska akademickiego, jak i czynnych przedstawicieli praktyki gospodarczej (pracowników oraz kadr zarządzających). Narzędzie to zostało wypełnione przez 108 osób, co zapewniło solidną bazę do dalszych analiz.

Tabela 1. Struktura badanej próby respondentów

Kryterium	Odpowiedzi	Liczba odpowiedzi	Odsetek (%)
Płeć	Kobieta	71	65,74%
	Mężczyzna	36	33,33%
	Wolę nie odpowiadać	1	0,93%
Wiek	18-25	58	50,70%
	26-34	25	23,15%
	35-49	14	12,96%
	50-64	11	10,19%
Wykształcenie	Wyższe	61	56,48%
	Średnie	43	39,81%
	Zawodowe	4	3,70%
Doświadczenie zawodowe	Brak	11	10,19%
	Poniżej 2 lat	38	35,19%
	2-5 lat	19	17,59%
	5-10 lat	16	14,81%
	Powyżej 10 lat	24	22,22%
Profil zawodowy	Zarząd i dyrekcja	7	6,48%
	Dział finansowy i controllingu	27	25,00%
	Pion operacyjny	25	23,15%
	Środowisko akademickie	40	37,04%
Wielkość ocenianej organizacji	Mikro i małe	23	21,30%
	Średnie	30	27,78%
	Duże	26	24,07%
	Odpowiedź ogólna	29	26,85%
	Wewnętrzna	64	59,26%

Kryterium	Odpowiedzi	Liczba odpowiedzi	Odsetek (%)
Perspektywa oceny	Zewnętrzna	5	4,63%
	Edukacyjna	22	20,37%
	Teoretyczna	17	15,74%

Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z danych zaprezentowanych na w powyższej Tabeli 1, grupa badawcza była zróżnicowana, co zagwarantowało wielowymiarowy i możliwie obiektywny obraz analizowanego zjawiska. Wśród respondentów dominowały kobiety oraz osoby młode, co jest naturalnym efektem zaangażowania studentów, jednak istotny analitycznie odsetek stanowili również praktycy z ugruntowanym stażem zawodowym. Absolutna większość ankietowanych legitymowała się wykształceniem wyższym lub średni, co było ważnym elementem dla właściwego zrozumienia specjalistycznych pojęć z zakresu controllingu użytych w kwestionariuszu.

Oceniane w badaniu jednostki gospodarcze charakteryzowały się pożądaną z punktu widzenia analizy dywersyfikacją w udzielanych odpowiedziach. Respondenci analizowali systemy z perspektywy mikro i małych przedsiębiorstw, podmiotów średnich, a także dużych korporacji zatrudniających powyżej 250 pracowników. Ponadto zdecydowana większość badanych opierała się na bardzo wiarygodnej perspektywie wewnętrznej (odnoszącej się do byłego lub obecnego miejsca pracy), a jedynie część opierała się na wiedzy edukacyjnej opartej na analizie przypadków rynkowych (case study) lub teorii.

Ocena poziomu integracji budżetowania z controllingiem w świetle zgromadzonych materiałów empirycznych

Przedsiębiorstwa projektując swoje systemy informacyjne, dążą do tego, aby miały one charakter zintegrowany i skutecznie wspierały proces podejmowania decyzji. Zgromadzone dane empiryczne pozwalają zweryfikować badane zjawisko w realiach praktyki gospodarczej oraz sprawdzić, na ile tak połączone mechanizmy odpowiadają bieżącym potrzebą informacyjnym kadr zarządzających. Kluczowe dla tak rozumianej integracji jest odpowiednio dobrana forma planowania oraz zaplecze technologiczne. Jak wskazują wyniki ankiet, w badanej zbiorowości najczęściej odchodzi się od tradycyjnych, sztywnych planów rocznych na rzecz budżetów elastycznych i kroczących. Zapewnia to organizacją szybką adaptację do ciągłych zmian zachodzących na rynku. Warunkiem ich skutecznego zastosowania jest odpowiednia integracja systemów informatycznych. W badanej próbie wyłaniające się realia są silnie różne. Znacząca grupa przedsiębiorstw stosuje integrację częściową, wykorzystując moduły systemów ERP, lub pełną automatyzację poprzez narzędzia klasy Business

Intelligence. Z drugiej strony zauważalny odsetek podmiotów nadal stosuje metody oparte na manualnym przenoszeniu danych na arkusze kalkulacyjne.

Dalsza analiza częstotliwości raportowania wykonania budżetów oraz charakteru reakcji organizacji na pojawiające się odchylenia. Ankietowani najczęściej wskazywali na systematyczne raportowanie w cyklu miesięcznym. Podejmowane działania na skutek pojawienia się odchyleń od zaplanowanych wartości w znacznej większości polegały na reakcji korygującej, poprzez wdrażanie analizę przyczyn oraz wprowadzanie odpowiednich działań naprawczych. Zauważalny jest niestety również odsetek przedsiębiorstw, w których systemy informacyjne wywołują negatywną reakcję, poprzez represje lub doraźne działania.

Tabela 2. Częstotliwość raportowania a charakter reakcji na odchylenia w badanych przedsiębiorstwach

Częstotliwość raportowania/Charakter reakcji	Reakcja korygująca	Reakcja doraźna	Reakcja represyjna	Brak reakcji	Razem
Bieżąca/Tygodniowa	6	0	0	0	6
Miesięczna	41	7	1	2	51
Kwartalna	22	4	4	2	32
Nieregularna/Sporadyczna	4	3	4	8	19
Razem	73	14	9	12	108

Źródło: opracowanie własne

Na pytania dotyczące charakteru komunikacji wyników finansowych wewnątrz organizacji, respondenci wskazywali zróżnicowane modele. Najczęściej pojawiającym się modelem jest dialog biznesowy oraz raportowanie wyjaśniające, które zmusza menagerów do ścisłego tłumaczenia się z osiągniętych wyników. Zjawiskiem negatywnym, ale nadal niezmiennie pojawiającym się w praktyce rynkowej, jest komunikacja w formie monologu lub wręcz brak zorganizowanej komunikacji w tym obszarze. Badając z kolei, jak szczegółowość danych dostarczanych przez zintegrowane systemy dostarcza kluczowych informacji wspierających proces decyzyjny, ankietowani najczęściej zaznaczali występowanie pełnej analityki przyczynowej, pomagające w precyzyjnym odnalezieniu przyczyn powstania odchyleń. Kolejno respondenci wskazywali na dopasowanie analityczne, charakteryzujące się podziałem na strukturę kosztów i przychodów, oraz dopasowanie podstawowe, powalające sprawdzić, które z działów przekroczyły ustalony budżet. Świadczy to o stosunkowo dużej przydatności gromadzonych danych. Zjawisko to w zestawieniu z modelami komunikacji ilustruje Tabela 3.

Tabela 3. Charakter komunikacji wyników a stopień dopasowania

Charakter komunikacji/Szczegółowość danych	Pełna analityka przyczynowa	Dopasowanie analityczne	Dopasowanie podstawowe	Niedopasowanie	Razem
Dialog biznesowy	36	11	5	3	55
Raportowanie wyjaśniające	5	10	11	1	27
Monolog zarządu	5	2	5	6	18
Brak komunikacji	0	2	2	4	8
Razem	46	25	23	14	108

Źródło: opracowanie własne

Bardzo ważny zdaniem respondentów jest również wpływ zintegrowanego budżetowania na same procesy decyzyjne. Większość badanych oceniła ten wpływ jako kluczowy (fundament podejmowania decyzji) lub istotny (ważny punkt odniesienia do osiąganych wyników). Do rzadkości należą opinie uznające budżetowanie jedynie za formalność. Wyniki te korespondują z postrzeganiem roli controllingu w jednostce gospodarczej. Dominującą odpowiedzią u ankietowanych jest postrzeganie jego zadania przez pryzmat roli partnerskiej oraz analitycznej. Rzadko jest redukowany i wyłącznie do funkcji nadzorczej czy administracyjnej.

Wdrażając zintegrowane systemy informacyjne przedsiębiorstwa napotykają na liczne przeszkody. Pytani o główne bariery utrudniające skuteczne łączenie budżetowania z controllingiem operacyjnym, respondenci w równym stopniu wskazywali na barierę komunikacyjną oraz barierę kompetencji. Mniej odpowiedzi uzyskała bariera metodologiczna, a na końcu plasuje się bariera technologiczna. Dowodzi to, że same systemy informatyczne nie stanowią dla współczesnego przedsiębiorstwa tak dużej przeszkody, jak brak wypracowanej kultury współpracy oraz wymiany wiedzy. Pomimo wymienionych problemów, które mogą napotkać modele integracji controllingu operacyjnego z budżetowaniem, przeważająca część ankietowanych ocenia je pozytywnie. Badani uznali najczęściej, że system wykazuje pozytywną efektywność, a co za tym idzie stanowi wysoką wartość dodaną, fundamentalną dla sukcesu organizacji. Odpowiedzi traktujące ten proces jak nieefektywny stanowiły mniejszość.

Interpretacja wyników badania oraz wnioski końcowe

Konfrontacja teoretycznych modeli z realiami rynkowymi pozwala na rzetelną weryfikację ich faktycznej użyteczności. Jak dowodzą zebrane materiały empiryczne, zintegrowane systemy informacyjne nie są jedynie elementem rozważań teoretycznych lecz stał się kluczowym narzędziem zaspokajającym wielowymiarowe potrzeby informacyjne współczesnej kadry zarządczej. Skrupulatna analiza wyników przeprowadzonych badań ankietowych pokazuje ewolucję controllingu operacyjnego identyfikuje najważniejsze wyzwania związane z jego implementacja. Przede wszystkim z zgromadzonych danych wynika iż rola controllingu i specjalistów zajmujących się ów dziedziną przechodzi pożądaną ewolucję. Przedsiębiorstwa wyraźnie odchodzą od tradycyjnego modelu nakazowo-kontrolnego, stawiając na reakcje korygujące i partnerki dialog biznesowy. W nowoczesnym ujęciu controller przybiera rolę proaktywnego „nawigatora" i analitycznego partnera wspierającego zarząd w podejmowaniu decyzji, przestaje być wyłącznie rejestratorem zdarzeń gospodarczych.

Najbardziej poznawczo wartościowym rezultatem przeprowadzonego badania jest diagnoza barier wdrożeniowych, która ukazuje niespodziewane wyniki. W dobie ciągłego i dynamicznego rozwoju cyfryzacji mogłoby się wydawać, że główną przeszkodą wdrażania zintegrowanego systemu informacyjnego będą braki w nowoczesnym, szybko zmieniającym się oprogramowaniu czy wysokie koszty infrastruktury IT. Ankietowani pytani o bariery utrudniające skuteczne łączenie budżetowania z controllingiem operacyjnym jednoznacznie wskazywali na trudności leżące po stronie ludzkiej i organizacyjnej. Najwięcej odpowiedzi zebrała bariera komunikacyjna, wynikająca z braków w komunikacji między kadrą menadżerską a działem finansowym, oraz bariera kompetencji wiążąca się z brakiem zrozumienia celów budżetowych przez pracowników. Oznacza to, że zaawansowane systemy informatyczne są dziś szeroko dostępne, natomiast ich wdrożenie spotyka opór psychospołeczny oraz ujawnia braki w kompetencjach, potrzebnych do ich sprawnego wykorzystywania. Potwierdzeniem dążenia do uelastycznienia procesów zarządczych jest odchodzenie badanych przedsiębiorstw od statycznych budżetów rocznych, które nie sprawdzają się w dynamicznym otoczeniu. Organizacje coraz częściej cenią zwinność w planowaniu, implementując budżety elastyczne oraz kroczące, które ułatwiają ciągłą adaptację do rynkowej rzeczywistości.

Wynikiem przeprowadzonych badań jest sformułowanie wniosków końcowych, ze wskazaniem dla szerokorozumianej praktyki gospodarczej:

1. Integracja warunkiem skutecznego zarządzania. Informacje historyczne rejestrowane przez tradycyjną rachunkowość są niewystarczające. Kadra kierownicza do minimalizowania

ryzyka potrzebuje zintegrowanego systemu dostarczającego informacji planistycznych, co gwarantuje połączenie budżetowania z controllingiem operacyjnym.

2. Czynnik ludzki dominuje nad ograniczeniami IT. Sukces wdrożenia controllingu w znacznie większym stopniu zależy od pokonania barier komunikacyjnych i kompetencyjnych niż od zaplecza technologicznego. Wymaga to przełamania leku pracowników przed oceną, budowy kultury otwartego dialogu oraz stałego rozwoju kompetencji.

3. Konieczność uelastycznienia budżetowania. Sztywne budżetowanie traci rację bytu w zmiennym otoczeniu rynkowym. Utrzymanie użyteczności controllingu wymaga stosowania budżetów elastycznych oraz kroczących, pozwalających na szybką aktualizację założeń.

4. Ewolucja roli controllera. Profil controllera w polskich przedsiębiorstwach trwale ewoluuje od funkcji czysto ewidencyjnych w stronę roli biznesowego partnera, który dostarcza zintegrowaną analitykę niezbędną od podejmowania trafnych decyzji operacyjnych.

5. Wysoka użyteczność połączonego systemu. Pomimo zdiagnozowanych przeszkód komunikacyjnych i kompetencyjnych, badani respondenci pozytywnie oceniają efektywność zintegrowanego systemu budżetowania i controllingu, uznając go za wartość dodaną determinującą rynkowy sukces.

Skonstruowane konkluzje oraz zaprezentowane wyniki analizy mogą stanowić wartościowy punkt wyjścia oraz istotny fundament poznawczy dla przyszłych dociekań naukowych. Podsumowując niniejsze rozważania, należy stwierdzić, iż zebrany materiał empiryczny pozwala na pozytywne zweryfikowanie założenia, że ścisła integracja procesu budżetowania z controllingiem operacyjnym w sposób znaczący usprawnia procesy decyzyjne i dostarcza kluczowe informacje dla współczesnych przedsiębiorstw.

Bibliografia

1. Janik, W., Paździor, A. (2012) Rachunkowość zarządcza i controlling, Politechnika Lubelska.
2. Nesterak, J. (2015) Controlling zarządczy. Projektowanie i wdrażanie, Oficyna Wolters Kluwer buisness.
3. Bieńkowska, A. (2020). Controlling Effectiveness Model – empirical reaserch results regarding the influence of controlling on organisational performance, Engineering Management in Production and Services, vol. 12, nr 3, s. 28-42.
4. Bieńkowska, A., Tworek, K. (2020) The use of controlling in organizations operating in Poland; Switzerland and the USA – a comparative study, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, vol. 64, nr 6, s. 38-48.
5. Bochenek, M. (2018) Ocena systemu budżetowania w przedsiębiorstwie, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 513, s. 25-34.
6. Buriak, P., Czerewko, G., Dołyńskyj, S., & Czerewko, D. (2007) Istota i efektywność prowadzenia kontrolingu w przedsiębiorstwie, Rocznik wydziału Nauk Prawnych i Ekonomicznych KUL, Tom III, zeszyt 2.
7. Chodasová, Z., Tekulová, Z., & Jacková, A. (2013) Controlling – the Current Menagment Tools in the Enterprise, Nierówności Społeczne a Wzrost Gospodarczy, nr 31, s. 392-402.
8. Chojnacka-Komorowska, A. (2011) Informatyczny system controllingu operacyjnego w procesie budżetowania kosztów w przedsiębiorstwie, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 159, s. 32-42.
9. Dźwigoł, H., Bezchasnyi, O. (2018) Controlling in the Process of Managing a Modern Enterprise, Multidisciplinary Aspects of Production Engineering, vol. 1, nr 1, s. 577-585.
10. Kluge, P. D., Kuźdowicz, P. (2017) Controlling w małych i niewielkich średnich przedsiębiorstwach – teoria i praktyka, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 471, s. 203-225.
11. Kowalewski, M. (2015) Koncepcja beyond budgeting jak alternatywa dla tradycyjnego budżetowania, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, nr 854, s. 113-121.
12. Krzemiński, P. (2017) Znaczenie funkcji controllingu w procesie zarządzania przedsiębiorstwem, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Organizacja i Zarządzanie, nr 108, s. 215-228.

13. Kubacka, M. (2017) Księga budżetowania w controllingu operacyjnym przedsiębiorstwa budowlanego, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 471, s. 279-287.
14. Kuchciak, I. (2008) Budżetowanie jako narzędzie wspomagające efektywne funkcjonowanie przedsiębiorstwa, Acta Universitatis Lodziensis. Folia Oeconomica, nr 218, s. 175-192.
15. Kwiecień A. & Wójcik-Jurkiewicz M. (2022). Corporate Governance as a Tool Supporting Management During a Crisis. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie, z. 158, s. 337-353.
16. Libby, T., Lindsay, R. M. (2010) Beyond budgeting or budgeting reconsidered? A survey of North-American budgeting practice, Management Accounting Research 21, s. 56-75.
17. Maciejewski, J., Szynkarczuk, M. (2018) Wykorzystanie metodyki business proces management w automatyzacji i mapowaniu procesów controllingu, Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, nr 1, s. 144-156.
18. Maj, A. (2018) The organisation of the controlling system in an enterprise, Organizacja i Zarządzanie : kwartalnik naukowy, nr 2, s. 33-40.
19. Materac, J. (2020) Controlling jako koncepcja zorientowana na wyniki, Zeszyty Naukowe ZPSB Firma i Rynek, nr 1(57), s. 53-63.
20. Pawlak, P. M., (2016) Hybrydowy model budżetowania operacyjnego w wydawnictwie, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Łódzki.
21. Pietrzak, Ż. (2013) Traditional versus Activity-based Budgeting in Non-manufacturing Companie, ISSN 1822-7260 Social Sciences, nr 4.
22. Sierpińska-Sawicz, A. (2015) Zadania i miejsce komórki controllingu w przedsiębiorstwie, Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Ekonomika i Organizacja Gospodarki Żywnościowej, nr 112, s. 125-136.
23. Zygmański, T. (2018) Psychologiczne uwarunkowania budżetowania – wybrane zagadnienia, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 513, s. 478-488.
24. Cyrene, S., Adarsh, T. (2021) Impact of rolling budgets and activity-based budgeting, Researchgate, Pobrano z lokalizacji https://www.researchgate.net/publication/356392748_Impact_of_rolling_budgets_and_activity-based_budgeting
25. Jarosz, S. (2021) System controllingu w przedsiębiorstwie – budżet oraz centrum inwestycji, Researchgate, Pobrano z lokalizacji https://www.researchgate.net/publication/349821842_System_Controllingu_w_przedsiebiorstwie_-_budzet_oraz_centrum_inwestycji

26. Wójcik-Jurkiewicz M. (2018) Budżetowanie jako metoda zarządzania [w:] Sadowska B. (red.), *Rachunkowość zarządcza w systemie informacyjnym przedsiębiorstwa* (s. 237-271) CeDeWu.

MECHANIKI GRYWALIZACJI W KORPORACYJNYCH SYMULACJACH SZKOLENIOWYCH A POTRZEBY GAMINGOWO ZAAWANSOWANEGO POKOLENIA CYFROWEGO

Konrad Kobierski

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Wydział Prawa i Nauk Społecznych;

kkobierski01@gmail.com; ORCID: 0009-0007-5646-0996

Streszczenie: Celem artykułu była identyfikacja oraz ocena hierarchii ważności konkretnych mechanik grywalizacji w korporacyjnych symulacjach szkoleniowych z perspektywy pokolenia cyfrowego o wysokiej biegłości gamingowej. Przeprowadzono badanie CAWI, na próbie 112 osób, wykorzystując ramy Teorii Autodeterminacji (SDT). Przeanalizowano, w jakim stopniu projektowanie środowisk szkoleniowych zaspokaja wrodzone potrzeby autonomii, kompetencji i pokrewieństwa użytkowników. Wyniki wykazują, że dla zaawansowanych użytkowników tradycyjna „punktyfikacja" (*pointification*) jest niewystarczająca i może prowadzić do spadku motywacji wewnętrznej. Kluczowymi czynnikami angażującymi okazały się mechaniki wspierające sprawstwo, takie jak nieliniowość narracyjna, możliwość bezpiecznego popełniania błędów oraz dynamiczna informacja zwrotna. Badanie dowodzi, że skuteczna grywalizacja w organizacjach wymaga odejścia od prostych systemów nagród zewnętrznych na rzecz głębokiego projektowania doświadczeń (*meaningful play*), odpowiadającego standardom komercyjnej rozrywki cyfrowej. Wyniki badania mogą być przydatne dla projektantów cyfrowych systemów szkoleniowych.

Słowa kluczowe: grywalizacja, symulacje szkoleniowe, pokolenie cyfrowe, Teoria Autodeterminacji (SDT).

GAMIFICATION FACTORS IN TRAINING SIMULATIONS - THE PREFERENCES OF THE GAMING-SAVVY DIGITAL GENERATION

Abstract: The article identifies and evaluates the hierarchy of importance of specific gamification mechanics in corporate training simulations from the perspective of the gaming-savvy digital generation. Using the theoretical framework of Self-Determination Theory (SDT), it analyzes the extent to which the design of training environments satisfies the innate needs for autonomy, competence, and relatedness of users. The results indicate that for advanced users, traditional „pointification" is insufficient and can lead to a decrease in intrinsic motivation. Key engaging factors turned out to be mechanics supporting agency, such as narrative non-linearity, the possibility of safe failure, and dynamic feedback. The study proves that effective

gamification in organizations requires moving away from simple external reward systems toward deep experience design (meaningful play) that meets the standards of commercial digital entertainment.

Keywords: gamification, training simulations, digital generation, meaningful play, gaming literacy.

Wprowadzenie

Ewolucja paradygmatów edukacji korporacyjnej wskazuje na technologię symulacji szkoleniowych i gry poważne jako kluczowe narzędzia łączące zarządzanie zasobami informacyjnymi z nowoczesną dydaktyką. Implementacja tych innowacyjnych systemów kształcenia jest niezbędna do osiągnięcia poprawy wydajności organizacji w gospodarce opartej na wiedzy. W tym szerokim kontekście technologie symulacyjne, gamifikacja i gry poważne (*Serious Games*) wyrastają na jeden z najszybciej rozwijających się i najbardziej obiecujących kierunków nowoczesnych narzędzi edukacyjnych (Sultanova, and Sadullayev, 2024; Gatti et al., 2019). Integracja technologii teleinformatycznych z psychologią poznawczą pozwala na zaspokojenie potrzeb poznawczych pokoleń Y oraz Z, które stanowią obecnie dominującą siłę na globalnym rynku pracy. Tradycyjne modele transmisyjne, opierające się na biernym transferze wiedzy poprzez wykłady, standardowe moduły e-learningowe typu „wskaż i kliknij" oraz linearną prezentację tekstu, wykazują daleko idącą dysfunkcyjność wobec oczekiwań pokolenia cyfrowego, dla którego naturalnym środowiskiem są immersyjne ekosystemy oparte na wielowymiarowej interaktywności, adaptacyjnych wyzwaniach i natychmiastowej informacji zwrotnej (Shirazian et al., 2025).

Rozwój technologiczny i powszechna dostępność zaawansowanych urządzeń mobilnych oraz stacjonarnych platform gamingowych sprawiły, że współcześni młodzi dorośli zostali ukształtowani kognitywnie przez interakcję z systemami o niespotykanym dotąd poziomie złożoności narracyjnej, wizualnej i mechanicznej. Oczekiwania tej populacji względem środowisk cyfrowych są niezwykle wyśrubowane. Wdrażanie płytkich mechanizmów grywalizacyjnych, które nie korespondują z rzeczywistym poziomem umiejętności analitycznych i przestrzennych użytkowników, jest postrzegane jako trywializacja procesu edukacyjnego (Chee, and Wong, 2017).

Stąd też problem badawczy zgłębiany w ramach tego badania, został wyrażony przez pytanie: które z mechanik grywalizacji są postrzegane przez gamingowo biegłych przedstawicieli pokolenia cyfrowego jako najistotniejsze? Głównym celem niniejszego artykułu była identyfikacja oraz hierarchizacja mechanik grywalizacji w korporacyjnych symulacjach szkoleniowych z ich perspektywy. Badanie zmierza do określenia, które elementy są kluczowe dla zachowania zaangażowania młodych użytkowników o gamingowo zaawansowanym profilu.

Aby poznać odpowiedź na postawione powyżej pytanie badawcze i zrealizować założony cel badawczy przeprowadzone zostały następujące czynności:

- Narracyjny przegląd literatury ukierunkowany na zdefiniowanie pojęcia gamifikacji (grywalizacji) i gier poważnych, identyfikację teoretycznych fundamentów projektowania symulacji (*game design*) szczególnie pod kątem mechanik o charakterze grywalizacyjnym oraz analizę psychologicznych mechanizmów motywacji wewnętrznej w oparciu o Teorię Autodeterminacji (SDT). Skupiono się na zderzeniu tradycyjnych technik grywalizacyjnych z zaawansowanymi potrzebami kognitywnymi pokolenia cyfrowego o wysokim poziomie *gaming literacy* (pojęcie wyjaśniane w dalszej części pracy).
- Ankietyzacja przeprowadzona online z wykorzystaniem kwestionariusza ankiety skonstruowanego na podstawie zidentyfikowanych wcześniej kwestii teoretycznych.

Zastosowana sekwencja działań badawczych pozwoliła na sformułowanie wniosków dotyczących optymalizacji systemów szkoleniowych i mechanik grywalizacji, zmierzających do zastąpienia powierzchownych mechanizmów motywacyjnych rozwiązaniami o głębokim projekcie doświadczeń, odpowiadającymi na realne potrzeby kognitywne osób o wysokiej biegłości gamingowej (*gaming literacy*).

Przegląd literatury

Zrozumienie mechanizmów angażujących ludzi w środowiskach cyfrowych wymaga osadzenia w literaturze z zakresu psychologii poznawczej oraz teorii projektowania gier. Zacząć należy od tego, że dyskurs akademicki i praktyka korporacyjna cierpią na brak precyzji terminologicznej, w której pojęcia takie jak grywalizacja, gry poważne i symulacje są traktowane jako synonimy. Tymczasem stanowią one odrębne, choć krzyżujące się, paradygmaty projektowania doświadczeń edukacyjnych.

Gry poważne to pełnoprawne aplikacje interaktywne, w których element rozrywkowy jest podporządkowany nadrzędnemu celowi nierozrywkowemu, takiemu jak edukacja, trening miękki, terapia czy rozwiązywanie problemów naukowych (Mortara et al., 2014; Djaouti et al., 2011). Kluczowym założeniem jest tu nauka w oparciu o praktykę, bazująca na cyklu Kolba. Gra dostarcza uczestnikom natychmiastowej informacji zwrotnej, co pozwala im bezpiecznie testować i modyfikować swoje strategie. Dzięki temu mogą oni na bieżąco analizować błędy i wyciągać z nich wnioski w bezpiecznym środowisku (tzw. *safe fail environment*) - bez realnego ryzyka i konsekwencji, z jakimi wiązałyby się podobne decyzje w prawdziwym świecie (Kempen et al., 2024).

Węższą grupę w ramach gier poważnych stanowią symulacje (określane w niniejszej pracy zamiennie jako komputerowe, biznesowe czy po prostu szkoleniowe). Są to systemy, których

naczelną wartością jest realizm i wierność psychologiczna lub fizyczna (*fidelity*) odwzorowywanych procesów. O ile gry poważne mogą celowo naginać prawa fizyki czy ekonomii dla uatrakcyjnienia rozgrywki, o tyle symulacja traci swoją wartość edukacyjną, jeśli jej silnik matematyczny nie odzwierciedla rzeczywistości (Baldissin et al., 2013; Fraccascia et al., 2021).

Z kolei gamifikacja (grywalizacja) jest definiowana jako celowe, systematyczne wykorzystanie elementów projektowania gier (*game design elements*), mechanik, dynamik i ram estetycznych w kontekstach niezwiązanych z grami, w celu wywołania zaangażowania, motywacji i modyfikacji zachowań docelowych (Koivisto, and Hamari, 2014; Muntean, 2011). Istotą gamifikacji nie jest zatem stworzenie w pełni wyizolowanego, wirtualnego świata, do którego pracownik „wchodzi" w celu rozrywki, ale nałożenie warstwy interaktywnej na rzeczywiste procesy - takie jak rozwiązywanie problemów logistycznych, odbywanie obowiązkowych szkoleń BHP czy uczestnictwo w procesie wdrażania (*onboarding*) (Bizzi, 2023).

Architektura gamifikacji opiera się zazwyczaj na klasyfikacji elementów gier stworzonej przez K. Werbacha i D. Huntera, którzy wyróżniają trzy poziomy strukturalne: dynamiki, mechaniki i komponenty (Werbach, and Hunter, 2012). Dynamiki stanowią najwyższy poziom abstrakcji i obejmują narrację, ograniczenia czasowe oraz progresję. Mechaniki to procesy napędzające akcję, takie jak wyzwania, kooperacja, rywalizacja czy pętle informacji zwrotnej. Komponenty natomiast to najbardziej widoczne, podstawowe elementy interfejsu: punkty, odznaki, awatary, tabele wyników (tzw. triada PBL - *Points, Badges, Leaderboards*) oraz poziomy doświadczenia (Mauroner, 2019).

Integracja tych trzech płaszczyzn staje się obecnie najważniejszym trendem badawczym. Najbardziej innowacyjne korporacyjne programy edukacyjne wykorzystują realistyczne symulatory, które są obudowane narracją charakterystyczną dla gier poważnych, a całe to doświadczenie jest zintegrowane z firmowym systemem gamifikacyjnym wspierającym rozwój ścieżki kariery. Taka fuzja pozwala na osiągnięcie niespotykanego dotąd poziomu retencji wiedzy (Larson, 2020).

Wynika to z faktu, że edukacja w nowoczesnych organizacjach mierzy się współcześnie z bezprecedensowym wyzwaniem demograficznym, ponieważ to Generacja Millenialsów (Pokolenie Y) oraz Pokolenie Z stanowią trzon nowoczesnej gospodarki (Tran et al., 2020). To tzw. pokolenie cyfrowe, definiowane jako osoby, które dorastały w środowisku nasyconym innowacjami takimi jak komputery, Internet, telefony komórkowe i gry wideo, co uczyniło z technologii ich „język ojczysty" i trwale ukształtowało ich oczekiwania względem procesów uczenia się (Tran et al., 2020). Badania z zakresu neuronauki kognitywnej dowodzą, że wieloletnia, wczesna i intensywna ekspozycja na media cyfrowe wywołała specyficzne zmiany w architekturze poznawczej i neuroplastyczności tych pokoleń, co przejawia się m.in. w preferowaniu komunikacji graficznej, wielozadaniowości oraz potrzebie natychmiastowej

gratyfikacji. To sprawia, że tradycyjne, linearne metody edukacyjne stają się dla nich nieatrakcyjne i mało efektywne (Tran et al., 2020).

Biorąc to pod uwagę, kluczem do zrozumienia, dlaczego pewne systemy gamifikacyjne odnoszą spektakularny sukces, podczas gdy inne wywołują opór użytkowników, staje się Teoria Autodeterminacji (*Self-Determination Theory* - SDT), opracowana przez E. Deciego i R. Ryana (Deci, and Ryan, 2008). SDT stanowi ramy teoretyczne opisujące ludzką motywację, wskazując, że istoty ludzkie wykazują wrodzoną tendencję do psychologicznego wzrostu, internalizacji kulturowej i proaktywnego angażowania się w otoczenie. W odróżnieniu od klasycznego behawioryzmu, który postrzega człowieka jako pasywnego odbiorcę bodźców i nagród, SDT kładzie nacisk na jakość motywacji, wprowadzając rozróżnienie na motywację autonomiczną (wewnętrzną) oraz kontrolowaną (zewnętrzną) (Niemiec, and Ryan, 2009).

W świetle teorii autodeterminacji (SDT), skuteczność symulacji szkoleniowych i systemów grywalizacyjnych zależy od stopnia, w jakim zaspokajają one trzy wrodzone potrzeby psychologiczne: autonomii, kompetencji oraz pokrewieństwa (Jeno i in., 2017). Potrzeba autonomii, definiowana jako poczucie woli i psychologicznej wolności w podejmowaniu działań, jest wspierana w środowiskach cyfrowych poprzez oferowanie uczestnikom nieliniowych ścieżek rozwiązywania problemów oraz możliwości wyboru kolejności zadań (Seaborn i Fels, 2015). Przykładem takiego podejścia są aplikacje mobilne pozwalające na dynamiczny proces nauki, w którym użytkownik sam decyduje, od których cech obiektu zacznie analizę, co sprzyja przesunięciu umiejscowienia przyczynowości z zewnętrznego na wewnętrzne (Jeno i in., 2017). Metody takie jak *business wargaming* dodatkowo wzmacniają tę potrzebę, angażując decydentów w aktywny proces testowania różnych taktyk i sekwencji ruchów, co pozwala im „przeżyć" przyszłe scenariusze w namacalny sposób i uniknąć poczucia bycia zaskoczonym przez dynamikę rynku (Schwarz i in., 2019).

Z kolei potrzeba kompetencji, czyli odczuwanie skuteczności w interakcji ze środowiskiem, jest w symulacjach zaspokajana przede wszystkim dzięki dostarczaniu natychmiastowej i adekwatnej informacji zwrotnej o postępach (Jeno i in., 2017). Dobrze zaprojektowana grywalizacja w środowisku korporacyjnym pozwala na jasne zdefiniowanie celów i obiektywizację oceny wyników, co sprawia, że pracownicy postrzegają system zarządzania jako bardziej sprawiedliwy i użyteczny (Bizzi, 2023). Takie podejście redukuje stres związany z niejasnością ról i przekształca systemy oceniania z narzędzi potencjalnego nadzoru w mechanizmy wspierające rozwój osobisty i zawodowy (Bizzi, 2023). Symulacje strategiczne pozwalają uczestnikom na bezpieczne eksperymentowanie z ograniczonymi zasobami, co buduje ich pewność siebie przed podejmowaniem rzeczywistych, ryzykownych decyzji biznesowych (Schwarz i in., 2019).

Natomiast potrzeba pokrewieństwa, dotycząca dążenia do tworzenia znaczących więzi z innymi, jest realizowana poprzez dynamikę wspólnej gry (*co-playing*) oraz interakcje społeczne wbudowane w systemy grywalizacyjne (Seaborn i Fels, 2015). W zaawansowanych symulacjach szkoleniowych pokrewieństwo jest budowane przez techniki odgrywania ról (*role-*

playing), gdzie zespoły muszą wcielić się w role konkurentów lub innych interesariuszy (Schwarz i in., 2019). Wymaga to od uczestników zrozumienia motywacji i perspektyw innych osób, co sprzyja integracji zespołu i budowaniu wspólnoty celu w obliczu niepewnych scenariuszy przyszłości (Schwarz i in., 2019). Ostatecznie, zaangażowanie użytkowników w odpowiednio zaprojektowane symulacje nie tylko zwiększa ich motywację wewnętrzną, ale także prowadzi do lepszych wyników nauczania i trwałej poprawy wydajności w miejscu pracy (Jeno i in., 2017; Bizzi, 2023).

Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia osób, które wypracowały wysoki poziom biegłości w komercyjnych grach wideo, zwłaszcza typu akcyjnego, strategicznego czy nowoczesnego RPG, ponieważ wiąże się to z istotnymi i mierzalnymi różnicami w funkcjonowaniu poznawczym w stosunku do osób niegrających (Latham et al., 2013). Badania neurokognitywne wskazują, że gracze posiadający długoterminowe doświadczenie z grami charakteryzują się wyższą pojemnością pamięci roboczej wzrokowo-przestrzennej oraz wyższą plastycznością uwagi selektywnej, co pozwala im na sprawniejsze alokowanie zasobów poznawczych w dynamicznym środowisku (Pallavicini et al., 2018; Latham et al., 2013). Nowoczesne gry, w tym współczesne RPG integrujące elementy akcji, wymagają od użytkownika ciągłego monitorowania wielu zmiennych i szybkiego czasu reakcji na bodźce peryferyjne, co przekłada się na lepsze zdolności przełączania się między zadaniami (*task-switching*) (Latham et al., 2013). Z perspektywy kognitywnej, komercyjne produkcje to skomplikowane systemy zarządzania obciążeniem poznawczym (*cognitive load*), które wymuszają na graczu optymalizację zasobów, dekonstrukcję reguł wirtualnej ekonomii oraz syntezę napływających informacji w czasie rzeczywistym (Latham et al., 2013; Pallavicini et al., 2018).

Biorąc to pod uwagę, pokolenie cyfrowe wytworzyło bardzo specyficzny zestaw oczekiwań i potrzeb kognitywnych w środowisku edukacyjnym (Shirazian et al., 2025):

1. W przeciwieństwie do tradycyjnego cyklu rocznej oceny pracowniczej czy wyników testu podawanych po tygodniu, pokolenie Z oczekuje mikrosprzężeń zwrotnych mierzonych w sekundach, które na bieżąco korygują ich wektory działań.
2. Mózgi uwarunkowane przez nawigowanie w internecie preferują swobodne przeskakiwanie między blokami wiedzy na podstawie własnych asocjacji, odrzucając narzucone, sztywne podręcznikowe narracje.
3. Ze względu na zjawisko habituacji, standardowy tekst czy wykład wideo nie generuje wystarczającego pobudzenia dopaminergicznego, by utrzymać stan koncentracji. Niskie obciążenie percepcyjne skutkuje rozproszeniem i poszukiwaniem bodźców zastępczych.

Współczesna edukacja korporacyjna zderza się z zjawiskiem określanym jako *affluent gaming experience* (bariera bogatego doświadczenia gamingowego) (Chee, and Wong, 2017). Dla użytkowników, o którzy spędzają czas w złożonych ekosystemach gier komercyjnych (RPG, strategie), proste systemy oparte na „punktyfikacji" (*pointification*) wywołują głęboki

dysonans kognitywny. Redukcja procesu uczenia się do zbierania odznak za proste testy jest postrzegana przez tę grupę jako trywializacja, co prowadzi do frustracji i manipulowania systemem (*gaming the system*) zamiast realnego przyswajania wiedzy (Chee, and Wong, 2017).

Odpowiedzią na ten impas jest przejście od powierzchownej grywalizacji w stronę znaczących mechanik (*Academically Meaningful Play* - AMP). Model ten zakłada, że zaangażowanie biegłego gracza zależy od tego, czy jego wybory w symulacji są autentycznie „sensowne" (Clark et al., 2023). Wymaga to implementacji projektowania wewnętrznego (*intrinsic/endogenous design*), w którym mechanizmy nauki są nierozerwalnie wplecione w strukturę świata gry, a nie stanowią jedynie zewnętrzny dodatek (tzw. powierzchowne nakładanie mechanik gier, metaforycznie określane jako „brokuły w czekoladzie"). Aby mechaniki były postrzegane jako znaczące, muszą spełniać dwa parametry: dostrzegalność (*discernability) oraz* integrację (*integration*). Pierwsze z nich odnosi się do tego, że rezultaty decyzji gracza muszą być jasno komunikowane, pozwalając na zrozumienie konsekwencji działań w kontekście merytorycznym. Druga parametr mówi o tym, że wybory muszą realnie wpływać na dalszy stan symulacji, tworząc spójną progresję uczenia się (Clark et al., 2023).

Metodyka badań własnych

W celu zgromadzenia materiału empirycznego do rozwiązania wyznaczonego w pracy problemu badawczego posłużono się metodą badania ankietowego, która polega na udzielaniu przez wyraźnie określone osoby (respondentów) odpowiedzi na pytania tworzące świadomy, logiczny, konsekwentny i spójny zestaw twierdzeń służących do rozwiązania problemu naukowego (Matejun, 2016).

Badanie przeprowadzono techniką CAWI (*Computer-Assisted Web Interviewing*). Wybór tego rozwiązania podyktowany był możliwością pełnej automatyzacji procesu gromadzenia danych oraz redukcją kosztów i barier logistycznych przy jednoczesnym szybkim dotarciu do precyzyjnie określonej grupy celowej. Zastosowanie kanału internetowego wyeliminowało ograniczenia czasowo-przestrzenne, oferując respondentom elastyczność w udzielaniu odpowiedzi, co przełożyło się na wysoką dynamikę pozyskiwania materiału dowodowego (Staniszewska, 2013)

Narzędziem badawczym był ustrukturyzowany kwestionariusz, który udostępniono przez internet w miesiącach styczeń - marzec 2026 roku. Mimo zalet takich jak wysoka efektywność i dotarcie do specyficznej grupy odbiorców, trzeba na uwadze ograniczenia metody, m.in. brak możliwości bezpośredniej weryfikacji tożsamości uczestników (Juszczyk, 2023).

Niniejsze badanie jest elementem szerszego projektu naukowego, mającego na celu kompleksową diagnozę postaw pokolenia cyfrowego wobec symulacji biznesowych. W ramach

podjętych działań badawczych poddano analizie cztery uzupełniające się obszary. W tej pracy skupiono się na ocenie mechanik grywalizacji.

Dobór próby o charakterze celowym, koncentrujący się na osobach w przedziale wiekowym 18 - 35 lat, jest merytorycznie uzasadniony faktem, że grupa ta stanowi obecnie trzon nowoczesnej gospodarki i reprezentuje pokolenie cyfrowe (*digital natives*). Wybór ten jest kluczowy dla badania mechanizmów gamifikacji, ponieważ osoby te wykazują specyficzną architekturę poznawczą ukształtowaną przez neuroplastyczność i wieloletnią ekspozycję na technologie interaktywne. Przewaga osób z wykształceniem wyższym (55,4% łącznie) zapewnia, że respondenci posiadają zdolności analityczne niezbędne do zrozumienia skomplikowanych mechanik gier i symulacji.

Wykluczenie osób powyżej 35. roku życia (stanowiących <5% próby) oraz osób niemających doświadczenia z grami (4,4% wstępnych wyników) pozwoliło zachować homogeniczność grupy w kontekście badanych barier, minimalizując wpływ „cyfrowego podziału" między „tubylcami" a „imigrantami cyfrowymi". W ostatecznej analizie wzięto pod uwagę 112 wypełnionych poprawnie kwestionariuszy. Należy nadmienić, że badaną próbę stanowiły osoby o polskiej narodowości, o różnym położeniu geograficznym. Szczegółowe dane dotyczące rozkładu cech demograficznych respondentów umieszczone zostały w tabeli 1.

Tabela 1.
Cechy demograficzne respondentów

Cecha demograficzna	Kategoria	Liczebność	Udział (%)
Płeć	Kobieta	45	40,2%
	Mężczyzna	67	59,8%
Wiek	18 - 21	32	28,6%
	22 - 25	38	33,9%
	26 - 29	24	21,4%
	30 - 35	18	16,1%
Wykształcenie	Wyższe (licencjat, inżynier)	56	50%
	Średnie	45	40,2%
	Wyższe (magisterskie i wyżej)	6	5,4%
	Zasadnicze zawodowe	5	4,5%

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Analiza potencjału uczestników w obszarze symulacji szkoleniowych została oparta na weryfikacji ich zaangażowania w zaawansowaną rozrywkę interaktywną, co pozwoliło na określenie ich gotowości do interakcji z nieliniowymi strukturami cyfrowymi. Zgromadzone dane potwierdzają dominację grupy „cyfrowych tubylców" (*digital natives*), charakteryzującej się wyjątkowo wysoką biegłością technologiczną: 30,4% respondentów operuje w

środowiskach cyfrowych codziennie, a 25,9% z dużą częstotliwością. Taki poziom ekspozycji na media interaktywne wywołuje specyficzne zmiany w architekturze poznawczej, czyniąc z technologii naturalne środowisko procesów myślowych tej grupy.

Wyróżnikiem analizowanej populacji jest wysoki poziom biegłości gamingowej (*gaming literacy)*, rozumianego jako poznawcza naturalność w operowaniu specyficzną logiką i strukturą systemów ludycznych. Kompetencja ta wykracza poza czystą sprawność techniczną, obejmując zdolność do pogłębionej interpretacji oraz analizy zarówno mechanik, jak i warstwy narracyjnej gier. W ujęciu badawczym pojęcie to definiuje się jako synergię umiejętności operacyjnych oraz zdolności do krytycznej dekonstrukcji środowisk cyfrowych (Apperley, and Walsh, 2012. Pozwala to respondentom na postrzeganie gier jako złożonych układów funkcjonalnych, co jest kluczowe dla ich roli jako ekspertów zdolnych do rzetelnej ewaluacji profesjonalnych narzędzi symulacyjnych.

Kluczowym celem identyfikacji stażu w grach komputerowych respondentów było potwierdzenie, że posiadają oni wiedzę i umiejętności niezbędne do merytorycznej oceny projektowanych mechanik grywalizacyjnych. Dodatkowo, dzięki wysokiemu poziomowi *gaming literacy*, badani potrafią krytycznie dekodować procesy zachodzące wewnątrz złożonych struktur cyfrowych, co pozwala im na precyzyjne wskazywanie rozwiązań zwiększających zaangażowanie oraz tych, które są nieefektywne lub archaiczne.

Istotny jest również rozkład preferencji gatunkowych (tabela 2), w którym dominują tytuły wymagające głębokiej analizy i wielopoziomowego decydowania, czyli gry RPG (65,2%) oraz logiczne (48,2%). Doświadczenie w obcowaniu z tak złożonymi, nieliniowymi ekosystemami – często przewyższającymi stopniem skomplikowania systemy szkoleniowe stosowane w organizacjach – sprawia, że respondenci stają się krytycznymi audytorami wdrażanych mechanik grywalizacyjnych. Zróżnicowanie w tym zakresie determinuje specyficzne priorytety w ocenie symulacji. Przykładowo, dominacja gier fabularnych (RPG) ukształtowała oczekiwania względem wysokiej autonomii decyzyjnej oraz głębi narracyjnej, podczas gdy preferencje wobec gier logicznych przekładają się na rygoryzm w zakresie spójności reguł i precyzji pętli informacji zwrotnej (Dörner i in., 2016). Warto przy tym zwrócić uwagę na różnice w zależności od płci - respondentki istotnie częściej wskazywały gry logiczne i ekonomiczne, podczas gdy w grupie mężczyzn silniej zaznaczyły się wybory gier akcji oraz strategicznych. Dla obu grup natomiast bazę stanowią gry fabularne. W tym ujęciu profil gatunkowy badanych stanowi niezbędny kontekst interpretacyjny dla hierarchii ważności elementów grywalizacji.

Tabela 2.

Preferencje gatunków gier komercyjnych wśród badanych

Gatunek gry	Procent wskazań	Typ preferencji	Preferowane mechaniki grywalizacji
	65,2%	Narracyjno-decyzyjny	Rozbudowana narracja, nieliniowość, wysoka autonomia decyzyjna

Gatunek gry	Procent wskazań	Typ preferencji	Preferowane mechaniki grywalizacji
RPG / Fabularne (np. *Wiedźmin*, *Cyberpunk 2077, The Elder Scrolls, Red Dead Redemption*)			
Gry logiczne (np. Sudoku, Tetris)	48,2%	Analityczno-logiczny	Precyzyjne pętle informacji zwrotnej, jasny system reguł i wyzwań
Gry akcji / e-sportowe (np. *Counter Strike*, *Battlefield, Valorant*)	42,9%	Zespołowo-dynamiczny	Rywalizacja, współpraca zespołowa, dynamika interakcji
Strategiczne (polegające głównie na realizacji określonych celów)	37,5%	Celowościowy	Poczucie kontroli nad systemem, planowanie długofalowe
Ekonomiczne (polegające głównie na zapewnieniu płynności finansowej i logistycznej w czasie nieskończonym)	25%	Optymalizacyjny	Zarządzanie zasobami, optymalizacja wyników, transparentność wskaźników

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania oraz (Dörner et al., 2016).

Reasumując, systematyczny kontakt z grami strategicznymi i logicznymi pozycjonuje badanych jako świadomych i wymagających odbiorców systemów grywalizacyjnych. Ich biegłość gamingowa (*gaming literacy*) sprawia, że oczekiwania dotyczące symulacji szkoleniowych są osadzone w bogatym doświadczeniu praktycznym, co umożliwia im precyzyjne odróżnienie efektywnych mechanik od rozwiązań nieatrakcyjnych lub powierzchownych.

Wyniki badań

W celu realizacji celu badawczego, respondenci zostali poproszeni o dokonanie subiektywnej oceny ważności siedmiu kluczowych elementów grywalizacyjnych w kontekście ich przydatności w symulacjach komputerowych. Wykorzystano pięciostopniową skalę Likerta, gdzie 1 oznaczało element „wcale nieważny", a 5 - element „bardzo ważny". Takie podejście pozwoliło na kwantyfikację preferencji kognitywnych i behawioralnych „cyfrowych tubylców" oraz na zidentyfikowanie mechanik o najwyższym potencjale angażującym. Badane elementy i średnie ocen dla każdego z nich przedstawione zostały w tabeli 3 już w formie zhierarchizowanej (gdzie element pierwszy na liście jest najważniejszy, a ostatni najmniej istotny).

Tabela 3.
Zhierarchizowana ocena ważności elementów grywalizacyjnych w percepcji badanych.

Lp	Badany element grywalizacji	Średnia ocen	Powiązanie z paradygmatami z przeglądu literatury
1	Poczucie kontroli nad światem gry i autonomia decyzyjna	4,78	Potrzeba autonomii
2	Możliwość popełniania błędów w bezpiecznym środowisku	4,71	*Safe-fail environment* / Kompetencje
3	Obecność jasnej historii, fabuły lub misji	4,65	Narracja / *Meaningful Play*
4	Natychmiastowa i jasna informacja zwrotna o podjętych decyzjach	4,55	Potrzeba kompetencji
5	Możliwość współpracy z zespołem	4,38	Potrzeba pokrewieństwa
6	Możliwość rywalizacji	4,12	Motywacja zewnętrzna / Punktyfikacja
7	Możliwość personalizacji (awatar, nazwa firmy)	3,15	Zaangażowanie estetyczne / Tożsamość

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Otrzymane wyniki stanowią silne przesłanki do tego by stwierdzić, że dla pokolenia cyfrowego o wysokiej biegłości gamingowej (*gaming literacy*), skuteczna grywalizacja musi opierać się na głębokich mechanikach wspierających motywację wewnętrzną, a nie na powierzchownych systemach nagród.

Wysokie noty przypisane przez respondentów kontroli nad światem gry (4,78) oraz obecności historii i misji (4,65) pozwalają przypuszczać, że w percepcji tej grupy symulacja szkoleniowa powinna być konstruowana jako „znacząca opowieść, w której uczestnik posiada realne sprawstwo". Sugestia ta wydaje się znajdować uzasadnienie w charakterystyce badanej próby, w której znaczną część stanowią entuzjaści gier RPG (65,2%). Można zatem domniemywać, że dla użytkowników przyzwyczajonych do złożonych narracji, warstwa fabularna nie jest jedynie opcjonalnym dodatkiem, lecz istotnym regulatorem sensu, który chroni proces dydaktyczny przed trywializacją i sprzyja budowaniu tzw. *meaningful play*. W tym ujęciu wiarygodna historia stanowiłaby niezbędne tło, które – poprzez redukcję poczucia sztuczności – może ułatwiać transfer wiedzy do realiów zawodowych.

Wysoka ranga przypisana możliwości popełniania błędów (4,71) sugeruje, że w opinii respondentów symulacja powinna pełnić funkcję bezpiecznego laboratorium doświadczalnego (*safe-fail environment*). Taka ocena może wskazywać na potrzebę zaspokojenia potrzeby kompetencji poprzez naukę opartą na doświadczeniu, pozbawioną realnego ryzyka zawodowego. W połączeniu z zapotrzebowaniem na natychmiastową informację zwrotną (4,55), mechanika ta wydaje się tworzyć optymalne ramy dla procesu edukacyjnego, w którym błąd jest interpretowany jako wartościowa lekcja, a nie zdarzenie podlegające sankcji.

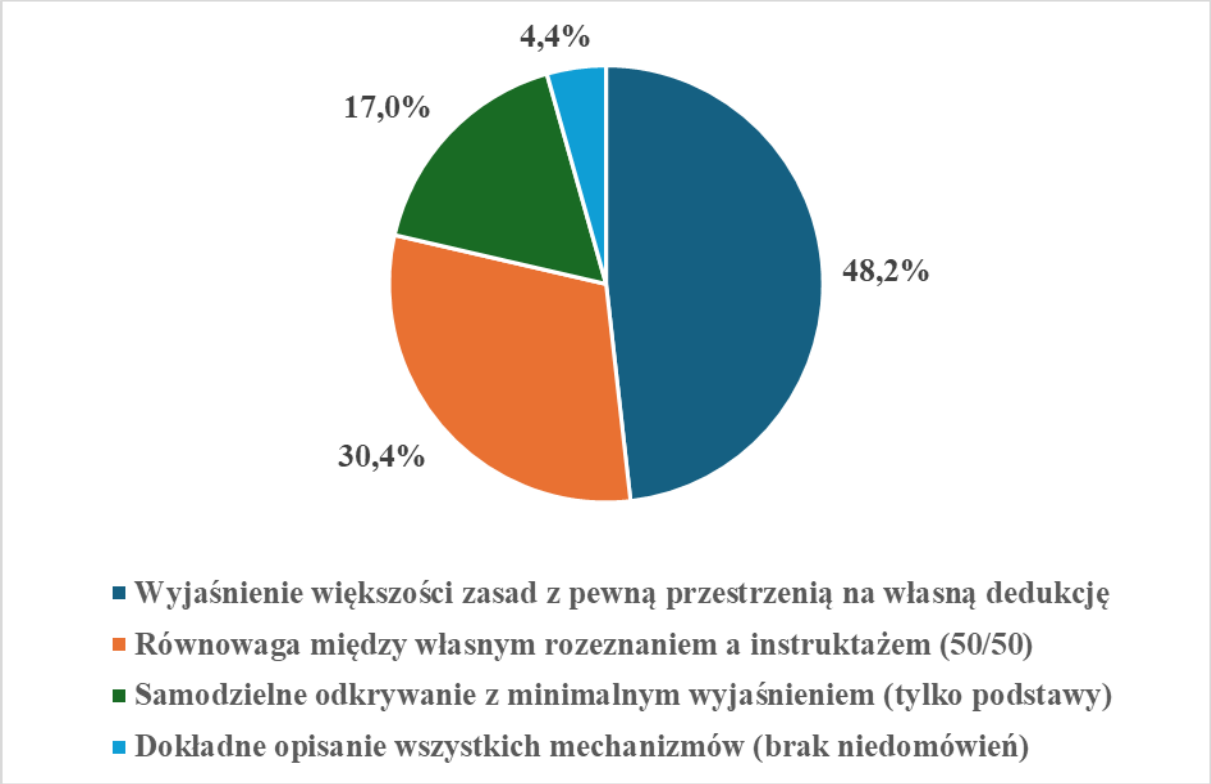
Wynik uzyskany dla możliwości rywalizacji (4,12), określony jako „raczej ważny", pozwala postawić hipotezę, iż badani postrzegają symulację jako profesjonalną arenę weryfikacji własnych umiejętności. Potencjalnym wyjaśnieniem wysokiej rangi tego elementu może być profil demograficzny próby (dominacja mężczyzn - 59,8%), w której częściej wskazywano na preferencję gier akcji i strzelanek. Dla tej części badanych rywalizacja może stanowić źródło autentycznego zaangażowania, dostarczając satysfakcji porównywalnej z doświadczeniami e-sportowymi.

Istotnym uzupełnieniem analizy wymiaru społecznego jest wysoka ranga przypisana możliwości współpracy zespołowej (4,38), która została oceniona wyżej niż bezpośrednia rywalizacja. Taki rozkład akcentów pozwala sugerować, że dla gamingowo biegłych pracowników symulacja nie jest jedynie narzędziem indywidualnego treningu czy walki o pozycję w rankingu, ale przede wszystkim platformą budowania relacji i wspólnego rozwiązywania problemów. Wysoka ocena tego elementu może wskazywać na silną potrzebę zaspokojenia potrzeby pokrewieństwa (*relatedness*), kluczowej w ramach teorii SDT.

Można przypuszczać, że dla badanej próby, ukształtowanej przez gry sieciowe typu *multiplayer*, współdziałanie w dążeniu do wspólnego celu jest naturalnym i pożądanym trybem funkcjonowania w środowisku cyfrowym. Potencjalnym wyjaśnieniem tego zjawiska jest fakt, że w środowisku korporacyjnym respondenci mogą postrzegać kooperację jako mechanizm urealniający symulację - w rzeczywistym biznesie sukces rzadko jest wynikiem działań jednostki, a częściej efektem synergii zespołu. W tym ujęciu współpraca zespołowa wydaje się być postrzegana nie tylko jako element uatrakcyjniający, ale jako istotny czynnik podnoszący trafność operacyjną szkolenia, pozwalający na testowanie kompetencji komunikacyjnych w kontrolowanych warunkach.

Zupełnie inaczej kształtuje się percepcja możliwości personalizacji (3,15), która uzyskała najniższą notę. Sugeruje to, że dla użytkowników o wysokim poziomie *gaming literacy* swobodna modyfikacja wyglądu awatara czy nazwy firmy może być postrzegana jedynie jako zbędny dodatek estetyczny. Niska ocena tego parametru pozwala wnioskować, że w kontekście rozwoju zawodowego „cyfrowi tubylcy" poszukują przede wszystkim głębi merytorycznej. Można przypuszczać, że personalizacja nieprzekładająca się na logikę szkolenia jest przez nich traktowana jako element nieistotny dla wiarygodności całego procesu.

Ważnym uzupełnieniem analizy jest zidentyfikowany rozkład preferencji dotyczący modelu poznawania zasad działania systemu (tzw. *onboarding*) (rysunek 1).



Rysunek 1: Procentowy rozkład odpowiedzi na pytanie o preferowany model poznawania reguł i mechanizmów symulacji.

Badani zdają się wykazywać pragmatyczne podejście do nabywania wiedzy. Dominujące wskazanie na model, w którym większość zasad zostaje wyjaśniona na wstępie (48,2%), sugeruje, że w warunkach korporacyjnych wysoka biegłość gamingowa nie musi oznaczać bezwarunkowej chęci samodzielnego odkrywania zasad symulacji. Potencjalnym wyjaśnieniem tej postawy jest świadomość, że niejasność reguł stanowiłaby zbędną barierę utrudniającą realizację celów szkoleniowych. Wydaje się, że respondenci priorytetyzują sprawne podniesienie kompetencji nad wielogodzinną eksplorację mechaniki narzędzia. Skoro badani przypisali kluczowe znaczenie możliwości popełniania błędów, mogą oni jednocześnie oczekiwać rzetelnej wiedzy o tym, w jaki sposób te błędy są mierzone. Wyjaśnienie reguł buduje w ich odczuciu bezpieczne środowisko nauki, pozwalające odróżnić eksperyment merytoryczny od pomyłki wynikającej jedynie z nieznajomości technicznej strony narzędzia. Jednak kwestia ta jako oparta na autorskiej interpretacji, wymagałaby weryfikacji w ramach odrębnych badań.

Podsumowanie

Przeprowadzone badanie pozwoliło na identyfikację hierarchii potrzeb kognitywnych i motywacyjnych „cyfrowych tubylców" w kontekście korporacyjnych systemów szkoleniowych. Wyniki dowodzą, że dla osób o wysokim poziomie *gaming literacy*, tradycyjna „punktyfikacja" (np. rankingi czy odznaki) jest niewystarczająca i może być postrzegana jako trywializacja procesu edukacyjnego. Analiza zgromadzonego materiału pozwala na sformułowanie następujących wniosków końcowych.

Najwyższe noty przypisane autonomii decyzyjnej (4,78) oraz możliwości popełniania błędów (4,71) pozwalają sugerować, iż fundamentem zaangażowania badanej grupy jest zaspokojenie potrzeb sprawstwa i kompetencji, zgodnie z założeniami Teorii Autodeterminacji (SDT). Wyniki te dają podstawy do sformułowania wniosku, że dla pokolenia o wysokiej biegłości gamingowej symulacja szkoleniowa powinna funkcjonować jako „bezpieczne laboratorium" (*safe-fail environment*), pozwalające na aktywne eksperymentowanie bez obawy o realne konsekwencje zawodowe czy finansowe. Tak wysoka ranga autonomii decyzyjnej sugeruje, że respondenci wykazują silną potrzebę brania odpowiedzialności za proces podejmowania decyzji w środowisku wirtualnym, co pozwala przypuszczać, iż narzucone, liniowe ścieżki edukacyjne są postrzegane przez użytkowników biegłych cyfrowo jako ograniczające. W tym ujęciu to nieliniowość i swoboda wyboru stają się czynnikami bezpośrednio budującymi wiarygodność narzędzia.

Jednocześnie wysoka ocena dopuszczalności pomyłek wskazuje na to, że badani traktują błąd nie jako porażkę, lecz jako niezbędny element procesu poznawczego. Sugeruje to, że w percepcji pracowników ukształtowanych przez gry, możliwość testowania skrajnych scenariuszy - nawet tych kończących się niepowodzeniem - jest kluczowa dla pełnego zrozumienia mechanizmów biznesowych. W tej perspektywie wspomniane „bezpieczne laboratorium" staje się przestrzenią, w której redukcja lęku przed oceną pozwala na głębszą analizę przyczynowo-skutkową i wyciąganie konstruktywnych wniosków.

Wysoka ranga przypisana warstwie fabularnej (4,65) oraz jej wyraźna korelacja z preferencjami gatunkowymi badanej grupy (65,2% entuzjastów gier fabularnych) pozwalają sugerować wysokie zapotrzebowanie na tzw. *meaningful play*. W percepcji respondentów historia w symulacji nie jest jedynie tłem, lecz mechanizmem nadającym merytoryczny sens podejmowanym działaniom, co w ich opinii ułatwia transfer wiedzy do rzeczywistych sytuacji zawodowych i chroni proces dydaktyczny przed poczuciem sztuczności.

Wysokie oceny dla obecności misji i fabuły mogą wskazywać na to, że narracja ułatwia „zakotwiczenie" abstrakcyjnych pojęć biznesowych w konkretnych i łatwych do zapamiętania kontekstach. Pozwala to na sformułowanie sugestii, że proces edukacyjny zachodzi sprawniej,

gdy użytkownik nie rozwiązuje abstrakcyjnego „zadania nr 5”, lecz bierze udział w „misji ratowania kondycji finansowej przedsiębiorstwa”. Taka konstrukcja nadaje działaniom profesjonalną wagę, sprawiając, że decyzje podejmowane w świecie wirtualnym zdają się mieć realne odzwierciedlenie w logice biznesu, co jest kluczowe dla budowania wiarygodności narzędzia.

Można domniemywać, że wiarygodna historia stanowi barierę chroniącą przed wrażeniem obcowania jedynie ze „sztywnym arkuszem danych”. Fakt, że większość próby to entuzjaści gier fabularnych (65,2%), pozwala postawić hipotezę, iż badani oczekują od symulacji spójności świata przedstawionego i logicznych konsekwencji swoich wyborów. Dla tej grupy „opowieść” wydaje się być naturalnym środowiskiem testowania hipotez, co sprawia, że symulacja staje się w ich oczach bardziej autentyczna i angażująca.

Wyniki dotyczące sposobu poznawania reguł gry (blisko 80% wskazań na modele z istotnym udziałem instruktażu) wskazują na potencjalnie dojrzałe podejście badanych do rozwoju zawodowego. Z uwagi na świadomość celów szkoleniowych, respondenci nie chcą tracić czasu na deszyfrowanie niejasnych mechanik systemowych, lecz oczekują przejrzystych ram, które pozwolą im efektywnie skupić się na merytorycznych wyzwaniach.

Wynik uzyskany dla możliwości rywalizacji (4,12) pozwala postawić hipotezę, iż badani traktują symulację jako profesjonalną arenę weryfikacji własnych umiejętności, co może być powiązane z profilem męskiej części próby (59,8%), która wyraża duże zainteresowanie w komercyjnej rozgrywce kompetytywnej (gry akcji / e-sportowe). Co istotne, jeszcze wyższa ranga przypisana współpracy zespołowej (4,38) sugeruje, że dla gamingowo biegłych młodych osób symulacja jest przede wszystkim platformą budowania relacji i wspólnego rozwiązywania problemów, co wskazuje na potrzebę zaspokojenia potrzeby pokrewieństwa (*relatedness*).

Istotna przewaga tych dwóch czynników społecznych nad personalizacją (3,15) pozwala przypuszczać, że dla badanego pokolenia symulacja stanowi przede wszystkim profesjonalne narzędzie weryfikacji kompetencji. W tym ujęciu rankingi oraz porównywanie wyników z innymi uczestnikami pełnią funkcję obiektywnej miary ich profesjonalizmu, co w percepcji respondentów jest znacznie istotniejsze niż powierzchowne aspekty wizualne.

Podsumowując, skuteczna implementacja symulacji szkoleniowych wymaga odejścia od powierzchownych systemów nagród na rzecz projektowania wewnętrznego (*intrinsic design*). Nowoczesne systemy HR powinny oferować pracownikom wysoką autonomię i prawo do błędu wewnątrz wiarygodnej, merytorycznej narracji. Tylko takie podejście pozwala w pełni wykorzystać potencjał kognitywny „cyfrowych tubylców” i zapewnić trwały transfer kompetencji w dynamicznym środowisku biznesowym.

Bibliografia

1. Apperley, T., and Walsh, C. (2012). What digital games and literacy have in common: a heuristic for understanding pupils' gaming literacy. Literacy, 46, 115-122.
2. Assis, L. S., and Freitas, S. A. (2023). Gamification in organizational contexts: a systematic literature review. In International Conference on Human-Computer Interaction (pp. 331-352). Cham: Springer.
3. Baldissin, N., De Toni, A. F., and Nonino, F. (2013). What is a Business Game? Historical background and evolution of business games in serious games context. In N. Baldissin, and A. F. De Toni (Eds.), Business game-based learning in management education (pp. 3-23). The Business Game LTD.
4. Bizzi, L. (2023). Why to gamify performance management? Consequences of user engagement in gamification. Information & Management, 60, 103762. doi: 10.1016/j.im.2023.103762.
5. Chee, C. M., and Wong, D. H. T. (2017). Affluent Gaming Experience Could Fail Gamification in Education: A Review. IETE Technical Review, 34, 593-597. doi: 10.1080/02564602.2017.1315965.
6. Clark, D. B., Hernández-Zavaleta, J. E., and Becker, S. (2023). Academically meaningful play: Designing digital games for the classroom to support meaningful gameplay, meaningful learning, and meaningful access. Computers & Education, 194, 104704. doi: 10.1016/j.compedu.2022.104704.
7. Deci, E. L., and Ryan, R. M. (2008). Self-determination theory: A macrotheory of human motivation, development, and health. Canadian Psychology / Psychologie canadienne, 49, 182-185. doi: 10.1037/a0012801.
8. Djaouti, D., Alvarez, J., and Jessel, J. P. (2011). Classifying serious games: the G/P/S model. In P. Felicia (Ed.), Handbook of research on improving learning and motivation through educational games: Multidisciplinary approaches (pp. 118-136). Hershey: IGI Global Scientific Publishing. doi: 10.4018/978-1-60960-495-0.ch006.
9. Dörner, R., Göbel, S., Effelsberg, W., and Wiemeyer, J. (2016). *Serious Games: Foundations, Concepts and Practice* Cham: Springer International Publishing.
10. Fraccascia, L., Sabato, A., and Yazan, D. M. (2021). An industrial symbiosis simulation game: Evidence from the circular sustainable business development class. Journal of Industrial Ecology, 25, 1688-1706.
11. Jeno, L. M., Grytnes, J. A., and Vandvik, V. (2017). The effect of a mobile-application tool on biology students' motivation and achievement in species identification: A Self-Determination Theory perspective. Computers & Education, 107, 1-12. doi: 10.1016/j.compedu.2016.12.011.

12. Juszczyk, S. (2023). Wiarygodność badań online - refleksje metodologiczne. Journal of Continuing Education, 122(3). doi: 10.34866/znes-vs56.
13. Kempen, E., Labuschagne, M. J., and Jama, M. P. (2024). Elements of a safe learning environment: A student perspective. African Journal of Health Professions Education, 16, 58-62.
14. Koivisto, J., and Hamari, J. (2014). Demographic differences in perceived benefits from gamification. Computers in Human Behavior, 35, 179-188. doi: 10.1016/j.chb.2014.03.007.
15. Larson, K. (2020). Serious games and gamification in the corporate training environment: A literature review. TechTrends, 64, 319-328. doi: 10.1007/s11528-019-00446-7.
16. Latham, A. J., Patston, L. L. M., and Tippett, L. J. (2013). The virtual brain: 30 years of video-game play and cognitive abilities. Frontiers in Psychology, 4, 629.
17. Matejun, M. (2016). Metodyka badań ankietowych w naukach o zarządzaniu - ujęcie modelowe. In M. Lisiński, and B. Ziębicki (Eds.), Współczesne problemy rozwoju metodologii zarządzania (pp. 341-354). Kraków: Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
18. Mauroner, O. (2019). Gamification in management and other non-game contexts-understanding game elements, motivation, reward systems, and user types. Open Journal of Business and Management, 7, 1815-1830.
19. Mortara, M., Catalano, C., Bellotti, F., Fiucci, G., Panchetti, M., and Petridis, P. (2014). Learning cultural heritage by serious games. Journal of Cultural Heritage, 15, 318-325. doi: 10.1016/j.culher.2013.04.004.
20. Muntean, C. I. (2011). Raising engagement in e-learning through gamification. In Proc. 6th international conference on virtual learning ICVL (Vol. 1, pp. 323-329).
21. Niemiec, C. P., and Ryan, R. M. (2009). Autonomy, competence, and relatedness in the classroom: Applying self-determination theory to educational practice. Theory and Research in Education, 7, 133-144. doi: 10.1177/1477878509104318.
22. Pallavicini, F., Ferrari, A., and Mantovani, F. (2018). Video Games for Well-Being: A Systematic Review on the Application of Computer Games for Cognitive and Emotional Training in the Adult Population. Frontiers in Psychology, 9, 2127.
23. Schwarz, J. O., Ram, C., and Rohrbeck, R. (2019). Combining scenario planning and business wargaming to better anticipate future competitive dynamics. Futures, 105, 133-142. doi: 10.1016/j.futures.2018.10.001.
24. Seaborn, K., and Fels, D. I. (2015). Gamification in theory and action: A survey. International Journal of Human-Computer Studies, 74, 14-31. doi: 10.1016/j.ijhcs.2014.09.006.
25. Shirazian, S., Vatanpour, M., and Guity, P. (2025). Generation Z: Learners' Profiles and Teaching Challenges. Frontiers in Dentistry, 22, 1-15. doi: 10.18502/fid.v22i40.19906.

26. Staniszewska, M. (2013). Internet jako narzędzie prowadzenia badań społecznych. Acta Innovations, 9, 1-57.
27. Tran, T., Ho, M. T., Pham, T. H., Nguyen, M. H., Nguyen, K. L. P., Vuong, T. T., and Vuong, Q. H. (2020). How digital natives learn and thrive in the digital age: Evidence from an emerging economy. Sustainability, 12, 3819.
28. Werbach, K., and Hunter, D. (2012). For the Win: How Game Thinking Can Revolutionize Your Business. Philadelphia: Wharton Digital Press.

NATURE AS PERFECT ENGINEER. HOW BIOMIMETICS SHAPE FLIGHT AND SPACE EXPLORATION

Eryk BOJUR[1], Wojciech DEMCZUK[2], Gabriela KRUPA[3], Mykhailo BRODII[4], Stanisław MAREK[5], Jacek PROWOLIK[6] Patrycja LASOTA[7], Tomasz WĘGRZYN[8],

Politechnika Śląska, Wydział Srodowiska i Energetyki; student(ka);

Politechnika Śląska, Wydział Srodowiska i Energetyki, e-mail:eb318792@student.polsl.pl

identyfikator ORCID -

[11] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; mk318720@student.polsl.pl

[12] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej; student, ORCID – 0009-0005-8536-5539;

pl315065@student.polsl.pl

[13] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail: tomasz.węgrzyn@polsl.pl;
identyfikator ORCID - 0000-0003-2296-1032
* Korespondencja: tomasz.wegrzyn@polsl.pl; Tel.: +48 504 816 362

Abstract: The aerospace industry faces challenges in optimizing fuel efficiency, reducing noise, or enhancing structural integrity. As traditional engineering approach its theoretical limits, biomimetics - idea of "copying" functional design from nature shows up. Over billion years nature has refined biological systems to operate with maximum efficiency and minimal energy use. The translation of complex, multifunctional biological systems into synthetic engineering applications encounters significant technological barriers. Emulating soft biological tissues with artificial actuators, as well as overcoming power supply limitations in micro-systems, represent just a few of the prevailing issues. The paper concludes with a critical analysis of these challenges, identifying future research directions that are essential to fully harness the potential of biomimetics in the future of aviation.

Keywords: Nature, Aerodynamics, Smart materials, 3D printing.

1. Introduction

For many centuries nature has operated as a development and research laboratory. It was shaping and perfecting design, aerodynamics and thermal regulations in many, often extreme environments. These days, aviation and aerospace engineering face growing pressure to invent lighter, faster, and more economic machines. Here we introduce Biomimetics: science of looking up to nature, to solve complex engineering problems. From a silent, stealthy flight of an owl to the porous high strength of bird bones, this shows that nature provides excellent

solutions to modern problems. In this article we will explore how engineers reverse-engineer secrets of the natural world to revolutionize skies and push boundaries of space exploration. (Bhushan, Bharat, 15 March 2009)

2. Mastering Aerodynamics: Drag Reduction and Lift

Mastering aerodynamics represents the pinnacle of modern aerospace engineering, serving as the critical differentiator between a merely functional design and a highly efficient, high-performance aircraft. At its core, this discipline focuses on the intricate manipulation of airflow to optimize the two primary aerodynamic forces that govern flight: lift and drag. Lift is the upward force required to overcome the gravitational weight of the aircraft, while drag is the inevitable resistance encountered as the vehicle moves through the atmospheric fluid. Achieving a high lift-to-drag ratio, often referred to as aerodynamic efficiency or finesse, is the ultimate goal for aeronautical engineers. This ratio dictates the aircraft's fuel consumption, operational range, payload capacity, and overall environmental impact. (Fu Zhang Wang, I. L. Animasaun, Taseer Muhammad, S. S. Okoya, 18.04.2024)

2.1. The Mechanics of Lift Generation

The generation of lift is a highly complex physical phenomenon that is most accurately explained through the synthesis of several fundamental principles of fluid dynamics, notably Bernoulli's principle and Newton's third law of motion. As air flows over the asymmetric, curved surface of an airfoil, the flow is constricted and forced to travel at a higher velocity over the upper surface compared to the lower surface. According to Bernoulli's equation, this increase in kinetic energy results in a corresponding drop in static pressure on top of the wing. This pressure differential across the airfoil produces a net upward force. Simultaneously, the geometry and angle of attack of the wing deflect the incoming free-stream air downwards, creating downwash. By Newton's principle of action and reaction, this downward acceleration of mass yields a powerful upward reactive force. Advanced aerodynamic design relies on optimizing the airfoil camber and the precise location of the maximum thickness to maximize the lift coefficient while delaying the onset of flow separation and stall at high angles of attack. (Fu Zhang Wang, I. L. Animasaun, Taseer Muhammad, S. S. Okoya, 18.04.2024)

2.2. Categorization and Impact of Aerodynamic Drag

The pursuit of maximum lift is inextricably linked to the generation of drag, an undesirable force that must be continuously overcome by the aircraft's propulsion system. Drag is generally categorized into parasitic drag and induced drag. Parasitic drag is most prominent at high airspeeds and consists of form drag, skin friction drag, and interference drag. Form drag arises from the macroscopic shape of the aircraft and the pressure difference between its leading and trailing edges. Skin friction drag is a direct result of the air's viscosity and the microscopic roughness of the aircraft's surface, acting tangentially across the wetted area. Interference drag occurs at the junctions of different structural components, such as where the wing meets the fuselage, due to mixing and colliding airflows. Induced drag, on the other hand, is the unavoidable penalty for producing lift. Because of the pressure difference between the upper and lower wing surfaces, air spills over the wingtips from bottom to top, creating powerful, rotating trailing vortices. These wingtip vortices alter the local airflow field, tilting the net aerodynamic force vector slightly backward and creating a substantial drag component that is particularly severe at low speeds and high angles of attack. (Mohsen Jahanmiri, 2011)

2.3. Engineering Solutions for Drag Reduction

Mitigating drag requires a multifaceted engineering approach. To reduce drag, designers employ highly streamlined, teardrop-like fuselage shapes that allow the separated air to close smoothly behind the aircraft, minimizing the turbulent, low-pressure wake. To combat skin friction, meticulous attention is paid to surface finish, and advanced flush-riveting techniques are used. More importantly, engineers strive to design airfoils that maintain laminar boundary layer flow—where air moves in orderly, parallel layers—over as much of the chord length as possible before transitioning to chaotic turbulent flow, which exponentially increases friction. To address induced drag, increasing the wing's aspect ratio (creating long, narrow wings) is highly effective, as it reduces the relative proportion of the wing affected by the tip vortices. Furthermore, the almost universal implementation of winglets and blended tip extensions in modern aviation serves to physically impede the spanwise flow and break up the formation of severe vortices, effectively recovering energy and improving overall flight efficiency. (Mohsen Jahanmiri, 2011)

2.4. Specific Challenges for Micro Air Vehicles

While large commercial aircraft operate at high speeds and altitudes, Micro Air Vehicles (MAVs) and small drones face a distinctly different aerodynamic reality governed by low Reynolds numbers. In this regime, the viscous forces of the air dominate over inertial forces, meaning the air feels exceptionally "thick" to the small vehicle. This makes MAVs highly susceptible to early boundary layer separation, drastic reductions in lift, and disproportionate increases in drag. Traditional airfoil shapes designed for large aircraft perform poorly at these scales. Consequently, current research in drone aerodynamics is heavily focused on biomimicry—studying the flight of birds and insects—and developing active flow control mechanisms, such as synthetic jet actuators or morphing wing structures, to dynamically manipulate the boundary layer. Overcoming these low-Reynolds-number challenges is crucial for the next generation of autonomous swarm systems and miniaturized sensor platforms. (Hassanalian M., Abdelkefi A. , 2023)

3. Wing design and structural efficiency

Thousands of species of warm-blooded vertebrates, as well as almost a million species of insects, have developed an ability to fly using sophisticated structures made up of wings to generate and maintain lift (muscles to flap, twist, and plunge; and sensing systems for guidance and maneuverability). Structural design of wings allows them to adapt to sudden changes in the environment, such as wind gusts, giving them incredible flight stability and control. Researchers have studied the morphological characteristics and functions of biological flight, recognizing a chance to improve airplane design. And now, designers are beginning to model wing and aircraft designs off the ones found on birds, bats, and insects. Applications of animal flight to its mechanical counterparts would make aircrafts faster, as well as more efficient and ecofriendly.

Whether an aircraft or flying animal flies fast, is more agile/maneuverable, or is more energy efficient depends on thrust and the flier’s ability to generate lift. This is affected by a range of factors, such as the camber (or curve), size, and thickness of a wing, as well as its positioning on the fuselage and its angle relative to the body. In case of flying animals, different wing configurations perform best for different types of flight. One of the most important aspects of these configurations are flaps and ailerons. Flaps increase lift or drag depending on their configuration, while ailerons change roll, the rotation around the axis running from nose to tail. The stabilizers on the tail of the aircraft have components which control pitch (lift and drag),

nose (up or down), and yaw (left or right). (Uzun M, Özdemir M, Yıldırım CV, Çoban S. A Novel, 2022)(NASA / Cheung K., 03.11.2016)

Natural selection has fine-tuned the animals' flight systems, allowing them to truly optimize the balance between the forces constituting the flight. Unlike the defined components on a manmade wing, birds' wings are one fluid entity, connected seamlessly to their muscles. To pitch up or down, birds simply angle their wings up or down; to control yaw, they twist their wing tips left or right. This is accomplished through an ability to modify wing shape to accommodate different aerodynamic requirements, called wing morphing. An aircraft with morphing wings would have greater agility and aerodynamic efficiency than one that requires separate, hinged panels to control motion.

Such an aircraft wing has been designed by NASA and MIT researchers. The design uses tiny lightweight pieces of material building the whole of the structure. They ensure that the whole wing shape can be altered with the activation of motors, which apply a pressure to each wingtip that twists the wing uniformly along its length. Previous attempts at morphing wings failed, which, according to the MIT CBA's director, was caused by using mechanical structures to deform the wing. These structures were so heavy that any efficiency advantages provided by the smoother wing surface were lost. In collaboration with students from the Massachusetts Institute of Technology, Cornell University, UC Santa Cruz, UC Berkeley, and UC Davis, the team of NASA researchers and students used emerging composite material manufacturing methods to build and demonstrate an ultra-light wing that actively changes shape. The wing's building-block units are made of advanced carbon fiber composite materials. These building blocks are assembled into a lattice, or arrangement of repeating structures. The way that they are arranged determines how they flex. The wing also features actuators and computers that make it morph and twist to achieve the desired wing shape during flight. [Fig. 1]

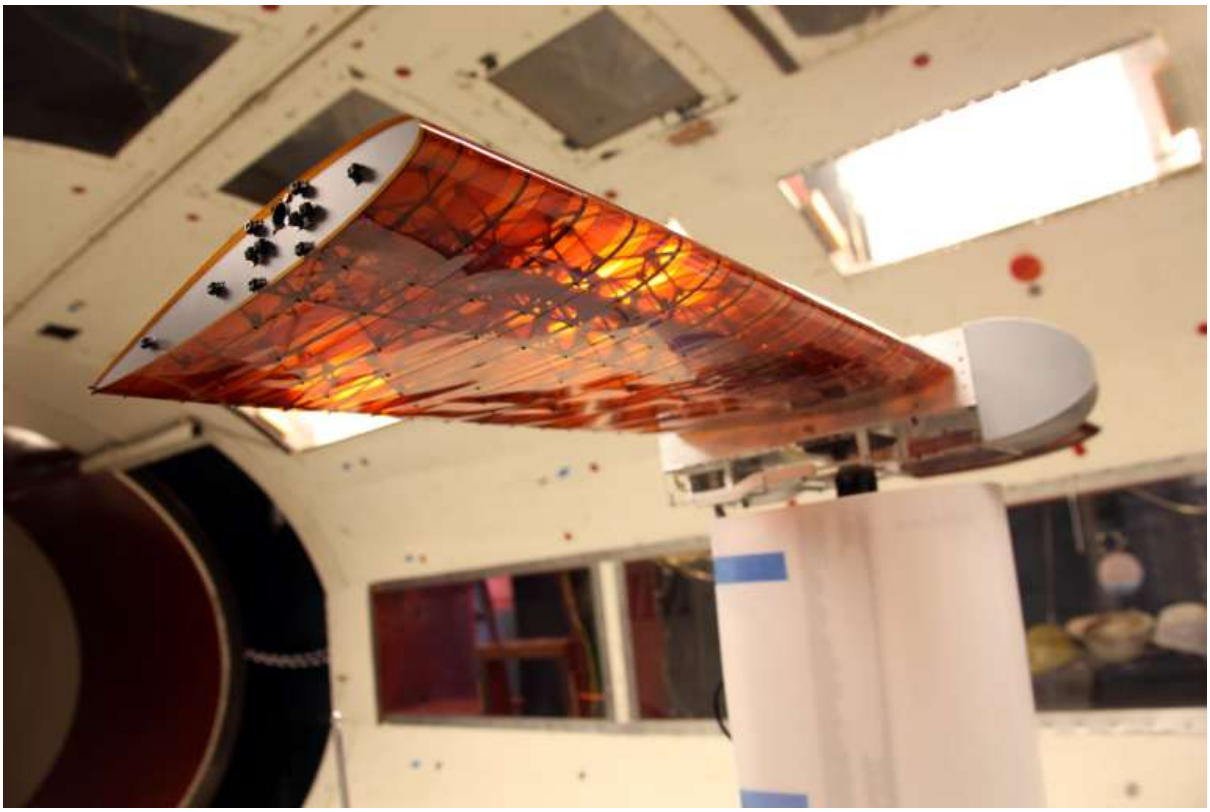


Figure 1- Wing constructed from building-block units made of advanced carbon fiber composite materials.

Other scientists have chosen another approach, focusing on the fact that a bird wing is composed not only of an integrated musculo-skeletal system but is also covered in overlapping feathers. These feathers employ a folding mechanism that serve as an extension of the morphing wing. These biomimetic designs have developed past research and into industry. At the forefront of biomimicry and airplane flight is the aerospace company Airbus. Airbus' "Bird of Prey" conceptual airliner is inspired by the eagle. As stated by Airbus, this powerfully built bird has long, broad wings that contribute to faster flight. Eagles, like albatrosses, are soaring birds, which means they can provide engineers with a lot of insight into dealing with wind gusts, and more.

The theoretical design is a hybrid-electric, turbo-propeller aircraft for regional air transportation, which mimics the eagle's wing and tail structure, and features individually controlled feathers that provide active flight control. Although Bird of Prey is not intended to represent an actual aircraft, it provides insight into what a future regional aircraft could look like based on technologies that currently form the basis of Airbus research. This includes hybrid-electric propulsion, active control systems and advanced composite structures. As reported by the company, aircraft move by pushing air around their wings to create lift forward. A shark moves in the similar way - it moves forward by swinging its tail back and forth, which pushes water around its fins. Sharks also have dorsal fins that work exactly like the vertical stabilizer wing on an aircraft, giving it exceptional maneuverability. In 2013, Airbus introduced

"sharklets" (vertical wing-tip extensions that resemble a shark's dorsal fin) as a retrofit to its A320 Family aircraft. These aerodynamic surfaces, which are mounted vertically at the wingtips, significantly reduce the size of the wingtip vortex, thus reducing drag. Today, all members of the A320neo Family are fitted with sharklets as a standard. (Tabor A., 26.07.2023)(Airbus, 12.03.2020)

4. Micro Air Vehicles and Drones in Modern Logistics and Transport

This point presents a detailed analysis of Micro Air Vehicles (MAVs) and drones in modern logistics and transport systems. The paper focuses on their technological characteristics, practical applications, and their impact on improving efficiency in transport processes. Special attention is given to their role in last-mile delivery and integration with existing logistics infrastructure. The advantages, limitations, and future development trends of these technologies are also discussed.

4.1. Introduction to Drone Logistics

The rapid development of unmanned aerial technologies has significantly transformed modern logistics and transport systems. In recent years, drones have become an important tool in optimizing delivery processes, especially in the context of growing e-commerce and global trade. Companies are constantly seeking ways to reduce delivery time, minimize operational costs, and improve customer satisfaction. Traditional transport systems rely on road, rail, sea, and air transport, which often involve multiple stages and complex logistics operations. These systems, although effective, can be inefficient in certain situations, particularly in densely populated urban areas or remote locations. Drones provide an alternative approach by enabling direct and fast delivery without the need for extensive infrastructure. As a result, the use of MAVs and drones is becoming increasingly relevant in modern logistics systems. According to recent logistics industry trends, the demand for same-day and next-day delivery services has increased significantly due to the expansion of e-commerce platforms. This has created pressure on logistics companies to develop faster and more efficient transport systems. Autonomous aerial delivery systems are therefore considered one of the most promising innovations in modern logistics. [Fig. 2] (Austin R. , 2021)(FAA, 2025)



Figure 2. Drone-based last-mile delivery in an urban logistics system

4.2. Characteristics of Micro Air Vehicles (MAVs)

Micro Air Vehicles are small unmanned aerial systems designed to perform specialized tasks such as surveillance, monitoring, inspection, and transportation of lightweight goods. They are characterized by compact dimensions, low weight, and high operational flexibility. Modern MAVs are typically constructed from lightweight composite materials that provide durability while minimizing total mass. Most systems are equipped with advanced technologies, including cameras, GPS modules, sensors, communication systems, and autonomous navigation software. One of the main advantages of MAVs is their ability to operate in environments that are inaccessible or inefficient for traditional vehicles. This makes them highly useful in urban logistics, disaster response operations, military applications, and remote-area transport. (Hassanalian M., Abdelkefi A. , 2023)(Austin R. , 2021)

4.3. Types of MAVs

MAVs can be divided into several categories depending on their construction and operational characteristics. Fixed-Wing Drones resemble conventional aircraft and are capable of covering long distances with relatively low energy consumption. They are suitable for large-area monitoring and long-range delivery operations, but require a runway or launch system. Rotary-Wing Drones, such as quadcopters and hexacopters, use rotating propellers to generate lift. These drones are highly maneuverable and capable of vertical takeoff and landing (VTOL).

Their flexibility makes them ideal for urban delivery systems and warehouse operations. Hybrid Drones combine features of fixed-wing and rotary-wing systems. They can perform vertical takeoff while maintaining the efficiency of fixed-wing flight during long-distance operations. (Hassanalian M., Abdelkefi A. , 2023)

4.4. Navigation, Control, and Energy Systems

Modern MAVs use advanced navigation technologies to ensure accurate and safe operation. Global Positioning System (GPS) modules provide precise positioning, while LiDAR sensors and cameras support obstacle detection and avoidance. Autonomous flight systems use artificial intelligence algorithms to optimize routes, detect hazards, and adapt to changing environmental conditions in real time. Communication systems allow drones to exchange data continuously with operators and logistics centers. Regarding energy supply, it remains one of the most important technological challenges. Most MAVs use lithium-ion batteries because of their relatively low weight and high energy density. However, battery limitations significantly affect flight time and operational range. Researchers are currently developing alternative energy systems, including hydrogen fuel cells and solar-powered drones, which may significantly improve operational efficiency in the future. [Fig. 3] (ICAO, 2024)

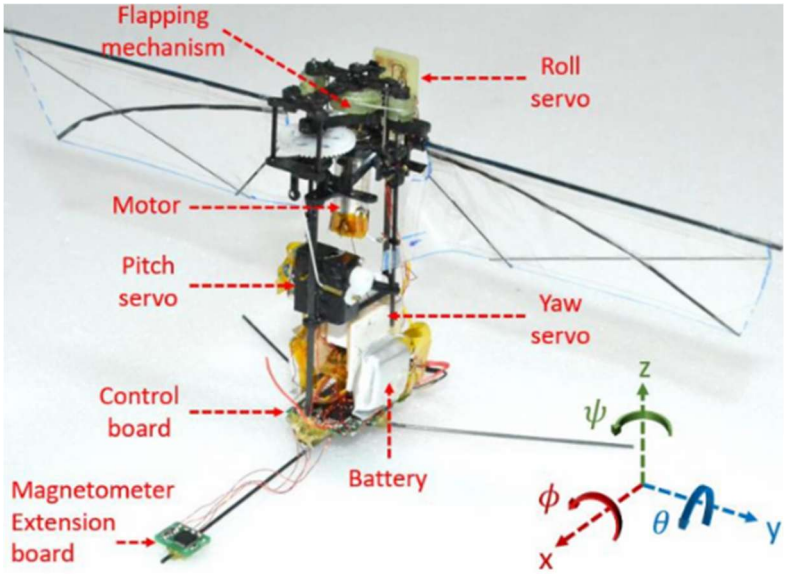


Figure 3. Main components of a Micro Air Vehicle (MAV)

4.5. Applications and Integration in Logistics

Drones are increasingly being used in logistics for a wide range of applications, primarily parcel delivery. In Last-Mile Delivery, which is often considered the most expensive and time-consuming part of the process, drones provide an effective solution by transporting small packages directly to customers, bypassing urban traffic congestion. In Warehouse Management, equipped drones monitor inventory levels and update systems in real time, improving accuracy and workplace safety. In Medical and Emergency Applications, drones transport medicines, vaccines, and blood samples quickly, especially during natural disasters. Furthermore, in Supply Chain Monitoring, drones equipped with sensors provide real-time tracking and infrastructure inspections.

Drones do not replace traditional transport systems but rather complement them, balancing speed and operational cost for short-range operations. Integration with multimodal logistics systems—combining automated sorting systems, autonomous vehicles, and drone technologies—is becoming increasingly important to improve efficiency and reduce operational complexity. [Tab. 1] (Smith J. , 2023)(Zhang Y. , 2025)(DHL, 2024)

Table 1. Comparison of Transport Methods

Transport Type	**Speed**	**Operational Cost**	**Range**	**Environmental Impact**
Road Transport	Medium	Medium	High	High
Rail Transport	Medium	Low	High	Medium
Air Transport	Very High	Very High	High	High
Drone Transport	High	Low-Medium	Low	Low

The integration of drones with multimodal logistics systems is becoming increasingly important. Modern logistics centers combine automated sorting systems, autonomous vehicles, and drone technologies to improve efficiency and reduce operational complexity. [Fig. 4]

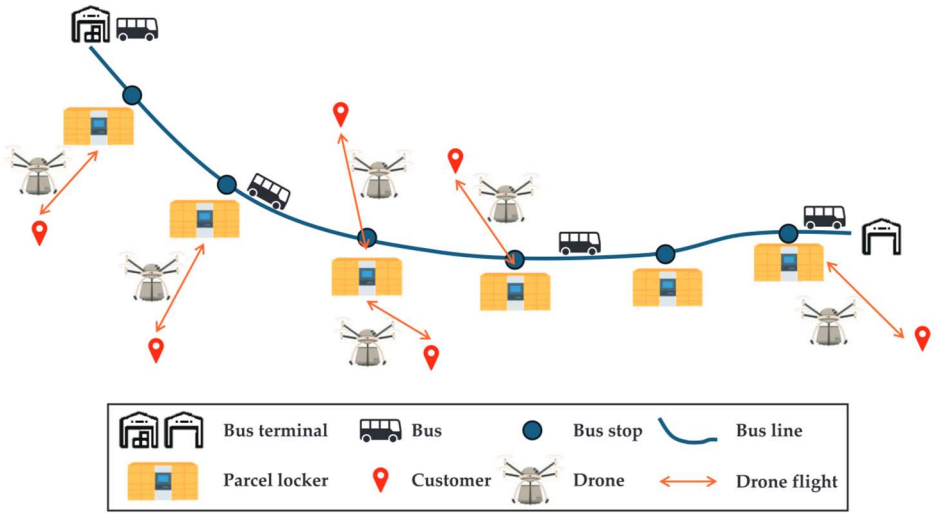


Figure 4. Integration of drones into multimodal transport systems

4.6. Advantages, Limitations and Future Development

The use of drones in logistics offers numerous advantages. One of the most important benefits is delivery speed. Drones can significantly reduce transportation time, especially in urban environments. Another major advantage is automation. Autonomous drone systems require minimal human intervention, which lowers labor costs and increases operational efficiency. Drones also reduce the need for extensive infrastructure such as roads and parking areas. This contributes to lower environmental impact and reduced traffic congestion. Furthermore, drones consume relatively low amounts of energy and generate lower carbon emissions compared to conventional delivery vehicles. This supports the development of sustainable logistics systems.

Despite their advantages, drones also face several important limitations. One of the primary challenges is regulation. Many countries impose strict legal restrictions regarding drone operations, particularly in densely populated urban areas. Battery limitations remain another significant issue. Most commercial drones can operate for only a limited period before requiring recharging. This restricts their range and payload capacity. Weather conditions also strongly influence drone performance. Wind, rain, snow, and extreme temperatures may reduce operational safety and reliability. Cybersecurity is another important concern. Autonomous drones rely heavily on communication systems and software, making them vulnerable to hacking or signal interference. Privacy concerns additionally affect public acceptance of drones. Many people express concerns regarding aerial surveillance and data collection. Finally, payload limitations mean that drones are currently most suitable for lightweight deliveries rather than large-scale cargo transportation. [Fig. 5](Hassanalian M., Abdelkefi A. , 2023)(ICAO, 2024)(Smith J. , 2023)(Zhang Y. , 2025)

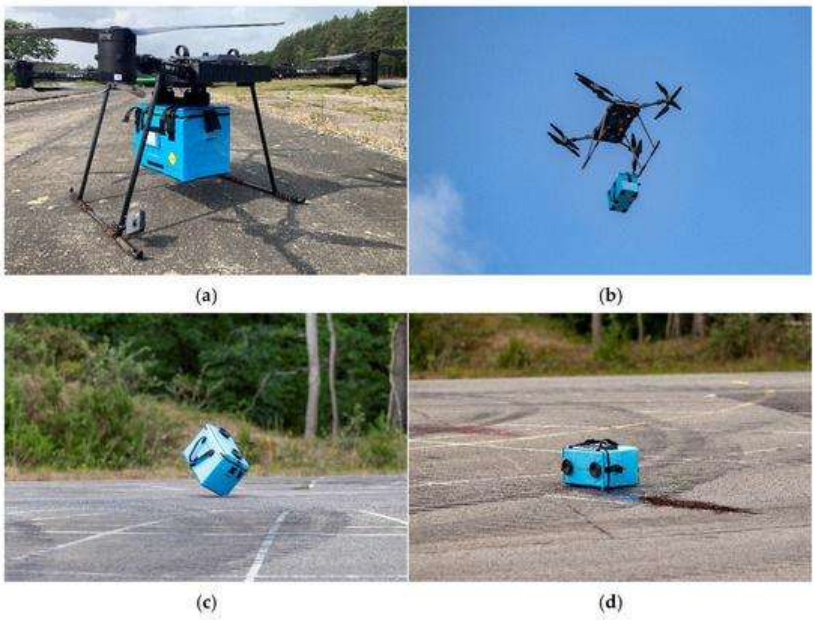


Figure 5. Main operational limitations of logistics drones

Environmental sustainability has become one of the key priorities in modern logistics systems. Traditional transport methods contribute significantly to greenhouse gas emissions and urban pollution. Drone delivery systems may reduce fuel consumption and lower carbon dioxide emissions, especially in short-distance operations. Electric propulsion systems generate less pollution compared to combustion-engine delivery vehicles. Additionally, drones may reduce urban congestion by decreasing the number of delivery vehicles operating on roads. This can improve traffic flow and reduce noise pollution in densely populated areas. From an economic perspective, drones can reduce operational costs associated with fuel, labor, and infrastructure maintenance. Although the initial investment in drone systems is relatively high, long-term operational savings may be significant. However, economic viability depends on factors such as battery technology, maintenance costs, regulatory frameworks, and operational scale. [Fig. 6]

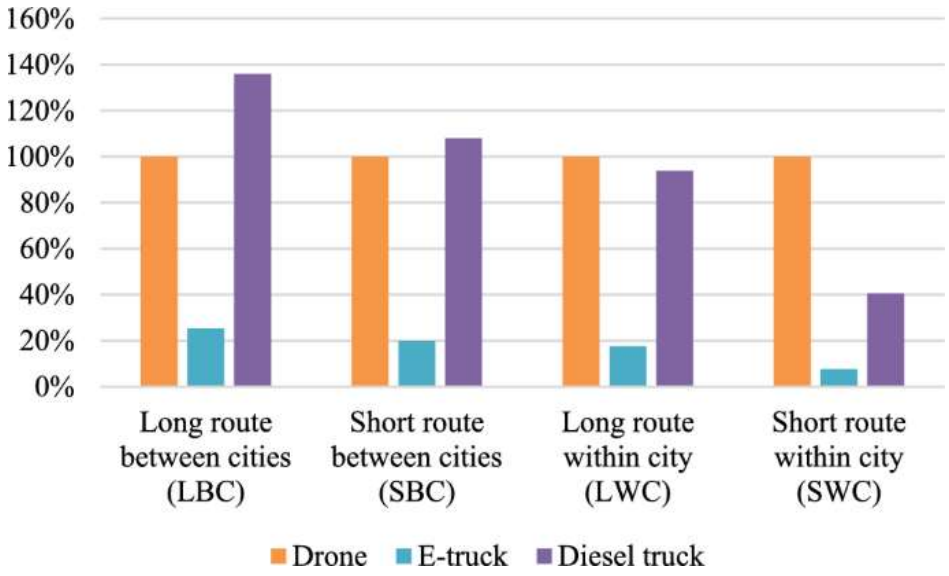


Figure 6. Environmental impact comparison between traditional delivery and drone delivery

4.7 Future Development of MAVs and Drones

The future development of drones in logistics is closely related to advancements in artificial intelligence, battery technology, communication systems, and smart city infrastructure. Artificial intelligence will enable drones to operate fully autonomously, optimize routes dynamically, and make real-time operational decisions. Machine learning algorithms may additionally improve obstacle detection and predictive maintenance. Battery technology is expected to improve significantly in the coming years. Higher-capacity batteries and alternative energy sources such as hydrogen fuel cells may increase flight time and payload capacity. The integration of drones with smart city systems represents another important trend. Future urban environments may include dedicated drone corridors, automated delivery stations, and centralized traffic management systems. The implementation of 5G communication networks will further enhance drone capabilities by enabling faster data exchange and lower communication latency. Researchers are also developing swarm drone technologies, where multiple drones cooperate autonomously to perform complex logistics operations more efficiently. In the future, drones may become a standard component of integrated transport systems, working together with autonomous ground vehicles and intelligent infrastructure.

4.8 Conclusion

Micro Air Vehicles and drones are becoming increasingly important elements of modern logistics and transport systems. Their ability to improve delivery speed, reduce operational costs, and increase transport flexibility makes them highly valuable in today's global economy. Drones are particularly effective in last-mile delivery operations, warehouse management, infrastructure inspection, and emergency logistics applications. Their integration with modern automated logistics systems significantly improves operational efficiency and supply chain transparency. Despite existing limitations related to regulations, battery technology, weather sensitivity, and payload capacity, continuous technological advancements are gradually overcoming these challenges. Future developments in artificial intelligence, energy systems, and smart infrastructure are expected to further expand the role of drones in logistics and transportation. As autonomous technologies continue to evolve, drones may become a standard component of future transport networks, transforming the global logistics industry. (Hassanalian M., Abdelkefi A. , 2023)(Zhang Y. , 2025)

5. Navigation sensors and swarm intelligence

Traditional aerospace navigation relies heavily on GPS and radar. Nature has developed ways to navigate different environments even in places where GPS might get jammed or be unavailable. Some insects use the polarization pattern of the sky to navigate themselves. Dragonflies do not calculate distance in meters as humans do, they calculate the speed at which objects move across their retina. Nature has found many ways to help insects navigate through environments and today engineers try to implement these solutions into their own designs. (Ran W, Nantogma S, Zhang S, Xu Y., 2025)

5.1. Navigation

Biomimicry in recent years has become a very important subject when talking about navigation. Conventional systems, like GPS, radar or lidar are highly effective but may struggle in dense environments underground, underwater or during signal interference. Nature created numerous animals that can navigate themselves without satellite infrastructure, and they inspire engineers to find new alternate sensing technologies. One major source of inspiration is insect vision. Honeybees and dragonflies possess eyes that are made of thousands of tiny visual units

which are called ommatidia. They are very effective at detecting motion and changes in direction. Honeybees estimate distance traveled by measuring the apparent movement of surrounding objects,
inspiring optical flow sensors used in autonomous drones to maintain stable flight without GPS.

Bird migration has also heavily influenced aerospace navigation technologies. Many species can travel tens of thousands of kilometers with remarkable accuracy using sun positioning, star patterns, polarized light, and Earth's magnetic field. They use specialized proteins called cryptochromes in their retinas to sense magnetic fields, inspiring research into magnetic navigation systems. Furthermore, echolocation used by bats and dolphins has advanced sonar and radar technologies, which are highly useful for drones operating in smoke, caves, and disaster zones. Desert ants inspire path integration algorithms for planetary rovers operating in featureless terrains. (Dupeyroux J, Viollet S, Serres JR., 2019)

5.2. Swarm intelligence

Swarm intelligence refers to the collective behavior of decentralized systems inspired by social insects, flocking birds and schooling fish. These systems rely on local interactions between individuals, producing effective coordinated group behavior without the need of having a leader. One of the most influential animals in this field is starling, thanks to its flocking behavior. Large groups of starlings can create coordinated aerial formations rapidly changing direction without collisions. Each bird follows simple behavioral rules: maintaining distance, aligning direction, and remaining close. These principles have been adapted to computational models such as the "Boids" algorithm for drone swarm coordination.

Ant colonies discovering efficient routes using pheromone trails have inspired algorithms that help autonomous vehicles cooperate. Honeybees demonstrating advanced collective decision-making through waggle dances have aided the creation of algorithms enabling drone fleets and satellite constellations to operate even when communication with central command is lost. In space exploration, swarm concepts are becoming highly popular, introducing groups of small autonomous satellites or robotic agents instead of single expensive spacecrafts. Despite challenges such as communication delays, cybersecurity risks, and collision avoidance in large swarms, artificial intelligence and machine learning continue to improve swarm coordination, actively shaping the next generation of flight and exploration systems. (Rasouli S, Dautenhahn K, Nehaniv CL., 2024)(Baker CJ, Smith GE, Balleri A, Holderied M, Griffiths HD., 2014)

Bibliografia

1. Bhushan, Bharat (15 March 2009). "Biomimetics: lessons from nature-an overview". Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 367 (1893): 1445–1486. Bibcode:2009RSPTA.367.1445B. doi:10.1098/rsta.2009.0011. PMID 19324719. S2CID 25035953.
2. Sylwia Kieszkowska, (07.01.2026) Biomimicry – What It Is and How It Inspires Science, Technology, and Education https://naturallybalanced.org/en/biomimicry-what-it-is-and-how-it-inspires-science-technology-and-education/
3. Uzun M, Özdemir M, Yıldırım CV, Çoban S. A Novel (2022) Biomimetic Wing Design and Optimizing Aerodynamic Performance. J Aviat. 2022;6(1):12-25. doi: 10.30518/jav.11031989
4. Tabor A. [updated 2023 Jul 26; cited 2024 May 22] Go, go, green wing! Mighty morphing materials in aircraft design. National Aeronautics and Space Administration. 2016 Nov 3 . Available from: https://www.nasa.gov/aeronautics/go-go-green-wing-mighty-morphing-materials-in-aircraft-design/
5. Airbus 2020 Mar 12 [cited 2024 May 22]. Biomimicry: a fresh approach to aircraft innovation [Internet]. Leiden: Airbus; Available from: https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-03-biomimicry-a-fresh-approach-to-aircraft-innovation
6. NASA / Cheung K., 2016 Nov 3 [cited 2024 May 22], MADCAT morphing wing: building-block units [image on the Internet]. Washington (DC): National Aeronautics and Space Administration. Available from: https://www.nasa.gov/aeronautics/go-go-green-wing-mighty-morphing-materials-in-aircraft-design/
7. Austin R. , 2021, (20), Unmanned Aircraft Systems: UAV Design, Development and Deployment, Wiley.
8. Clarke R., Moses L., 2022, “The Regulation of Civilian Drones”, Computer Law & Security Review, Vol. 30.
9. Hassanalian M., Abdelkefi A. , 2023, “Classifications, Applications, and Design Challenges of Drones”, Progress in Aerospace Sciences.
10. DHL, 2024. Drone Delivery in Logistics Report, 2024.
11. FAA, 2025. Unmanned Aircraft Systems Regulations and Guidelines.
12. ICAO, 2024. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems, International Civil Aviation Organization.
13. Smith J. , 2023, Modern Drone Logistics Systems, Springer.
14. Zhang Y. , 2025, “Autonomous Drone Navigation in Smart Cities”, Journal of Intelligent Transportation Systems.
15. Ran W, Nantogma S, Zhang S, Xu Y. (2025). Bio-inspired UAV swarm operation approach towards decentralized aerial electronic defense. Applied Soft Computing.
16. Dupeyroux J, Viollet S, Serres JR. (2019). An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation. Robotics and Autonomous Systems.
17. Rasouli S, Dautenhahn K, Nehaniv CL. (2024). Simulation of a Bio-Inspired Flocking-Based Aggregation Behaviour in Swarm Robotics.
18. Baker CJ, Smith GE, Balleri A, Holderied M, Griffiths HD. (2014). Biomimetic

Echolocation With Application to Radar and Sonar Sensing. Proceedings of the IEEE.
19. Fu Zhang Wang, I. L. Animasaun, Taseer Muhammad, S. S. Okoya (18.04.2024) Recent Advancements in Fluid Dynamics: Drag Reduction, Lift Generation, Computational Fluid Dynamics, Turbulence Modelling, and Multiphase Flow
20. Mohsen Jahanmiri (2011) Aircraft Drag Reduction: An Overview

CZAS PRACY KIEROWCÓW I TACHOGRAFY

Filip JĘDRZEJCZAK[1], Filip PODPINKA[2], Kacper URBAŃCZYK[3], Adrian WOŹNIK[4], Karolina ŁĄTKA[5], Bożena SZCZUCKA-LASOTA[6]

[1-4] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak

[5]Politechnika Śląska, Katowice, e-mail: karolina.latka7@gmail.com; identyfikator ORCID - brak

[6]Politechnika Śląska, Katowice, e-mail: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl; identyfikator ORCID - 0000-0003-3312-1864

*Korespondencja: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł omawia przepisy dotyczące czasu pracy kierowców zawodowych oraz funkcjonowanie tachografów stosowanych w transporcie drogowym. Głównym celem regulacji jest zapewnienie bezpieczeństwa kierowców, pasażerów i innych uczestników ruchu drogowego poprzez ograniczenie zmęczenia podczas prowadzenia pojazdu. Przepisy określają maksymalny czas jazdy, obowiązkowe przerwy oraz okresy odpoczynku dziennego i tygodniowego. Czas pracy obejmuje nie tylko prowadzenie pojazdu, ale także załadunek, rozładunek, czynności administracyjne czy obsługę techniczną pojazdu. Maksymalny dzienny czas jazdy wynosi zazwyczaj 9 godzin, z możliwością wydłużenia do 10 godzin dwa razy w tygodniu. Kierowca musi również korzystać z obowiązkowych przerw i odpoczynków. W artykule opisano także tachografy cyfrowe i inteligentne. Tachografy rejestrują aktywność kierowcy, czas jazdy oraz prędkość pojazdu. Nowoczesne tachografy inteligentne wykorzystują lokalizację GNSS i komunikację bezprzewodową, co umożliwia zdalną kontrolę przez służby transportowe. Ostatnia część dotyczy odpowiedzialności kierowców i przedsiębiorców za naruszenia przepisów. Za przekroczenie czasu pracy lub manipulację tachografem grożą wysokie kary finansowe zarówno dla kierowców, jak i firm transportowych.

Słowa kluczowe: czas pracy kierowców, czas jazdy, odpoczynek kierowcy, tachograf inteligentny, tachograf cyfrowy,

DRIVERS' WORKING HOURS AND TACHOGRAPHS

Abstract: The article discusses regulations concerning the working hours of professional drivers and the operation of tachographs used in road transport. The main purpose of these regulations is to ensure the safety of drivers, passengers, and other road users by reducing fatigue during driving. The rules define maximum driving times, mandatory breaks, and daily and weekly rest periods. Working time includes not only driving but also loading, unloading, administrative duties, and vehicle maintenance activities. The maximum daily driving time is generally 9 hours, with the possibility of extending it to 10 hours twice a week. Drivers are also

required to take mandatory breaks and rest periods. The article also describes digital and smart tachographs. Tachographs record driver activity, driving time, and vehicle speed. Modern smart tachographs use GNSS location systems and wireless communication, enabling remote inspections by transport authorities. The final part of the article focuses on the responsibility of drivers and transport companies for violations of the regulations. Exceeding driving time limits or manipulating tachographs may result in significant financial penalties for both drivers and transport companies.

Keywords: drivers' working time, driving time, driver rest, digital tachograph, smart tachograph

Wprowadzenie

Normy prowadzenia pojazdów zostały szczegółowo określone w unijnym rozporządzeniu (WE) nr 561/2006. Ich głównym założeniem i kluczowym celem jest zapewnienie bezpieczeństwa dla kierowcy, pasażerów, innych użytkowników dróg oraz przewożonego ładunku (CSK, 5.06.2015). Długi czas prowadzenia pojazdu, w szczególności połączony ze zmęczeniem pozostałymi obowiązkami oraz autostradową monotonią, wpływa w znaczący sposób na zdolność postrzegania oraz czas reakcji kierowcy.

Dozwolony czas jazdy ma za zadanie chronić kierowców przed nieuczciwym traktowaniem ze strony pracodawców, ale i powstrzymywać ich własne, ewentualne zamiary nadwyrężania swoich organizmów. Co więcej, unormowanie czasu jazdy pomaga zapewnić zdrową konkurencję, ponieważ identyczne zasady obowiązują każdego kierowcę zawodowego.

Normy czasu jazdy i odpoczynku

Na wstępie warto wspomnieć o różnicy między czasem pracy, a czasem jazdy kierowcy zawodowego.

Czas pracy to czas, na który składają się wszystkie obowiązki kierowcy wykonywane pomiędzy odpoczynkami dziennymi lub tygodniowymi (EwiCenter,18.04.2024). Właściwa praca kierowcy to jazda i czynności poza nią, jak na przykład załadunek, rozładunek, lub czynności serwisowe. Czas jazdy to z kolei czas spędzony *stricte* za kierownicą.

Czas pracy kierowcy

Jako czas pracy definiowany jest czas od rozpoczęcia do zakończenia pracy, który obejmuje wszystkie czynności związane z wykonywaniem przewozu drogowego,

a w szczególności:

- Prowadzenie pojazdu
- Załadowywanie i rozładowywanie oraz nadzór nad załadunkiem i wyładunkiem
- Nadzór oraz pomoc osobom wsiadającym i wysiadającym
- Czynności spedycyjne
- Obsługa codzienna pojazdów, przyczep lub naczep
- Inne prace podejmowane w celu wykonania zadania służbowego lub zapewnienia bezpieczeństwa osób, pojazdu i rzeczy
- Formalności administracyjne
- Utrzymanie pojazdu w czystości

Do czasu pracy kierowcy wlicza się 15 minut przerwy, jeżeli jego czas pracy przekracza 6 godzin w danym dniu. Z kolei sam rozkład czasu pracy jest zależny od stosunku pracy,

w jakim zatrudniony jest kierowca.

Podstawowy system czasu pracy, czyli 8 godzin na dobę i przeciętnie 40 godzin

w 5-dniowym tygodniu pracy jest rzadko spotykany, podobnie jak system zadaniowy lub przerywany. Najpopularniejszym na rynku jest system równoważny, który pozwala na przedłużenie wymiaru czasu pracy do 12 godzin na dobę, przy czym przedłużenie to jest równoważone skróconym czasem pracy w innych dniach lub dniami wolnymi od pracy.

Jeszcze inaczej wygląda sytuacja z kierowcami zatrudnionymi na podstawie umowy zlecenia, którzy muszą pilnować konieczności wykorzystania swojego odpoczynku w każdym 24-godzinnym okresie (ABC Szkolenia, 16.09.2025).

Tygodniowy czas pracy kierowcy wynosi maksymalnie 60 godzin, jednak istotne jest tu wzięcie pod uwagę całego okresu rozliczeniowego, który powoduje, że średnio na każdy tydzień nie może przypaść więcej niż 48 godzin pracy (już z godzinami nadliczbowymi).

W skrócie oznacza to, że jeśli w danym tygodniu kierowca pracuje dłużej, w pozostałych będzie pracował na tyle krótko, by nie nastąpiło przekroczenie czasu pracy.

Czas jazdy kierowcy

Podstawowy, dzienny czas jazdy dla kierowcy zawodowego to maksymalnie 9 godzin, z możliwym wyjątkiem w postaci wydłużenia czasu do 10 godzin dwa razy w tygodniu kalendarzowym. Po zsumowaniu wszystkich godzin jazdy w przeciągu tygodnia nie wolno przekroczyć 56 godzin, które są maksymalnym tygodniowym czasem jazdy kierowcy. Ponieważ maksymalny czas **pracy** to 60 godzin w tygodniu, kierowca, który wykorzystał 56 godzin na jazdę, może wykonywać inne obowiązki służbowe najwyżej 4 godziny (ABC Szkolenia, 16.09.2025).

Czas jazdy ograniczony jest także w kontekście dwóch następujących po sobie tygodni – nie może on wtedy przekroczyć 90 godzin. Jako przykład posłuży poniższa tabela przedstawiająca kolejne cztery tygodnie pracy kierowcy.

Tabela 1.

Czas jazdy kierowcy z uwzględnieniem czterech kolejnych tygodni

<table>
<tr><th>Tydzień 1</th><th>Tydzień 2</th><th>Tydzień 3</th><th>Tydzień 4</th></tr>
<tr><td>48 godzin jazdy</td><td>42 godziny jazdy</td><td>48 godzin jazdy</td><td>42 godziny jazdy</td></tr>
<tr><td colspan="2">Maksymalnie 90 godzin jazdy</td><td colspan="2">Maksymalnie 90 godzin jazdy</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Maksymalnie 90 godzin jazdy</td><td></td></tr>
</table>

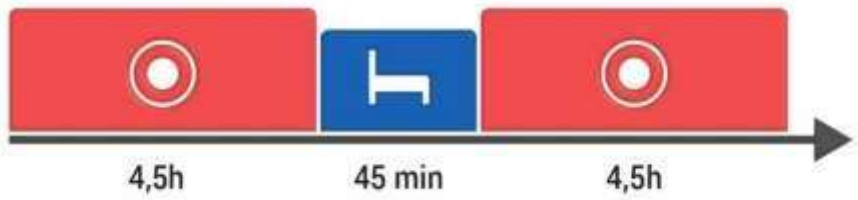
Praca nocna

Zgodnie z definicją pory nocnej, zawartej w ustawie o czasie pracy kierowców (Sejm.gov.pl, 16.04.2004), praca nocna mieści się w okresie czterech wybranych godzin pomiędzy godziną 00:00, a 07:00. Jeżeli czas pracy kierowcy przypada na wyznaczoną w przedsiębiorstwie porę nocną z wyżej wymienionej ustawy, kierowcę tego dnia obowiązuje maksymalny czas 10 godzin pracy (jazdy oraz pozostałych obowiązków).

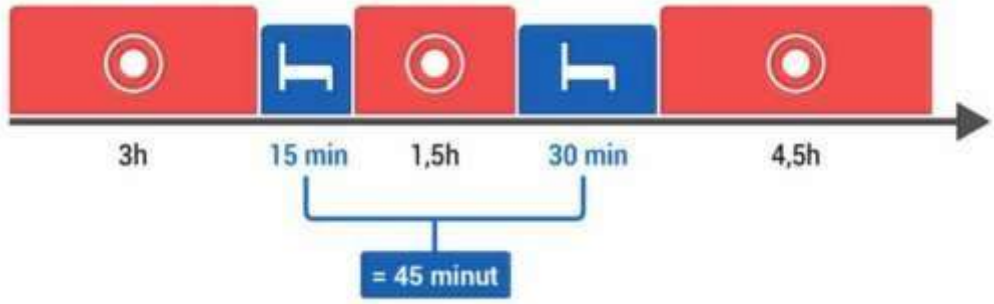
Przerwy i odpoczynek

Czas jazdy, choć maksymalnie może wynosić 9-10 godzin, nie może być wykonywany jednym ciągiem. Po maksymalnie 4,5 godziny kierowca jest zobowiązany rozpocząć przerwę

o długości minimum 45 minut. Przerwę można także podzielić na 15 i 30 minut, jednak muszą być one zawarte w wyżej wymienionych 4,5 godziny jazdy.



Rysunek 1. Czas jazdy przedzielony jedną, 45-minutową przerwą. Źródło: ABC Szkolenia, 16.09.2025



Rysunek 2. Czas jazdy przedzielony przerwami 15- i 30-minutową. Źródło: ABC Szkolenia, 16.09.2025

Uwzględnić należy także całkowity czas **pracy**. Ten nie może przekraczać 13 godzin w ciągu jednego dnia, lecz może zostać wydłużony do 15 godzin, maksymalnie trzy razy między okresami odpoczynku tygodniowego. Co więcej, jeżeli od początku swojej zmiany kierowca nie odebrał przerwy wynikającej z czasu **jazdy**, powinien ją rozpocząć najpóźniej po 6 godzinach **pracy**. W takim przypadku przerwa musi trwać 30 lub 45 minut, aczkolwiek jej krótszy wariant może zostać użyty wyłącznie, gdy czas pracy kierowcy wynosi nie więcej niż 9 godzin.

Kierowcy przysługuje obowiązkowy odpoczynek dzienny. Regularny wynosi 11 godzin, podczas gdy skrócony – 9 godzin. Odpoczynek dzienny może zostać skrócony maksymalnie trzy razy między okresami odpoczynku tygodniowego.



Rysunek 3. Od podjęcia pracy w danym dniu kierowca ma 24 godziny na to, by wykonać swój obowiązkowy odpoczynek dzienny. Na przykład: zaczynając pracę o godzinie 6:00, najwyżej do 6:00 następnego dnia musi zmieścić się jego wymagany odpoczynek. Źródło: ABC Szkolenia, 16.09.2025

Najdłuższym okresem obowiązkowego odpoczynku jest odpoczynek tygodniowy.

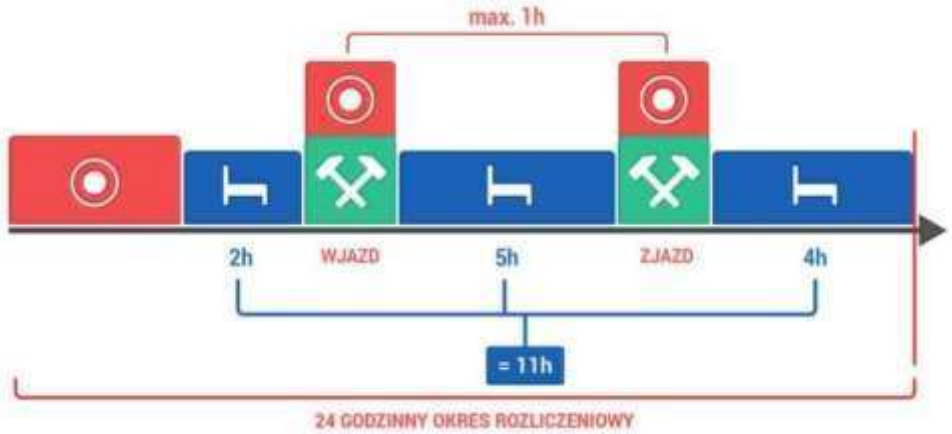
Ten – w swojej regularnej postaci – wynosi minimum 45 godzin, a w skróconej 24 godziny. W każdym dwutygodniowym okresie pracy kierowca powinien wykorzystać dwa pełne odpoczynki regularne po co najmniej 45 godzin, lub jeden odpoczynek regularny na co najmniej 45 godzin i jeden odpoczynek skrócony (co najmniej 24-godzinny). Zaległą rekompensatę za odpoczynek skrócony, kierowca ma obowiązek wykorzystać jednorazowo przed upływem trzeciego tygodnia następującego po tygodniu, w którym wystąpiło skrócenie odpoczynku (Mexem, 08.10.2023). Co również istotne, odpoczynek regularny i każdy inny trwający dłużej niż 45 godzin musi zostać odbyty poza kabiną pojazdu, a pracodawca jest zobowiązany zapewnić kierowcy miejsce do spania i pokryć koszt zakwaterowania, jeśli takowy odpoczynek zastanie kierowcę w trasie.

Odpoczynek na promie lub kolei

W przypadku podróży, która wiąże się z zaparkowaniem pojazdu na pokładzie promu lub pociągu, istnieje możliwość odbioru odpoczynku dziennego w czasie przeprawy. Warunkiem koniecznym w takiej sytuacji jest zapewnienie miejsca do spania poza pojazdem, tj. w koi lub kuszetce.

Jeżeli podróż promem lub koleją nie trwa na tyle długo, by wykorzystać dzienny odpoczynek w pełnym wymiarze – na przykład przez kanał La Manche – można odpoczynek przerwać i dokończyć go na lądzie. Należy jednak spełnić następujące warunki:

- musi być to regularny, dzienny odpoczynek (min. 11 godzin lub w częściach 3 godziny + 9 godzin),
- całość odpoczynku musi zawierać się w 24 godzinach od początku pracy w danym dniu,
- przerwanie odpoczynku na wjazd i zjazd z pokładu nie trwa dłużej niż 1 godzinę łącznie.



Rysunek 4. Przykładowy czas pracy kierowcy z wliczoną przeprawą promową. Źródło: ABC Szkolenia, 16.09.2025

Podczas przeprawy dozwolone jest również wykorzystanie odpoczynku tygodniowego skróconego (minimum 24 godziny) na tych samych zasadach, co odpoczynek dzienny.

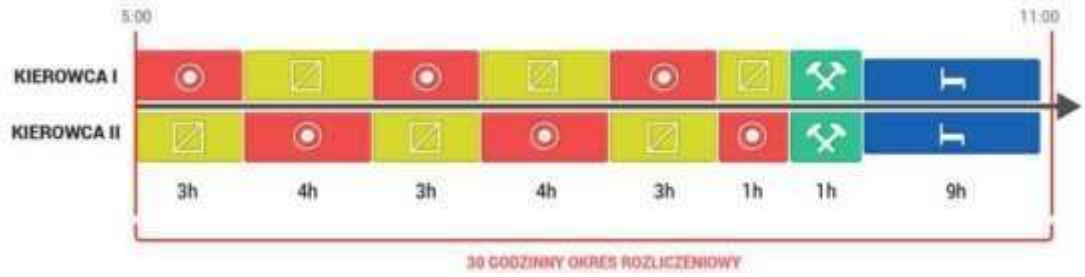
Odpoczynek tygodniowy regularny (minimum 45 godzin) jest dozwolony pod warunkiem, że podróż promem jest zaplanowana na przynajmniej 8 godzin, a pozostałe części odpoczynku zostaną wykorzystane poza pojazdem, w miejscu zapewnionym przez pracodawcę.

Praca w załodze

Praca w załodze, potocznie nazywana również „jazdą w podwójnej obsadzie", pozwala wydłużyć dobę pracy kierowców z 24 do 30 godzin. To znaczy, że mają oni 30 godzin od rozpoczęcia pracy na wykorzystanie odpoczynku dziennego (ABC Szkolenia,

16.09.2025). Nie obowiązuje także limit skróceń odpoczynków – te mogą wynosić za każdym razem 9 godzin.

Wszystkie inne ograniczenia pozostają takie same. Kierowcy nadal mogą prowadzić pojazd maksymalnie przez 9 godzin dziennie (i 10 godzin do dwóch razy w tygodniu), przez maksymalnie 4,5 godziny bez przerwy.



Rysunek 5. Przykładowy czas pracy w podwójnej załodze z 30-godzinowym okresem rozliczeniowym. Źródło: ABC Szkolenia, 16.09.2025

Wydłużenie czasu jazdy

20 sierpnia 2020 r. wszedł w życie tak zwany Pakiet Mobilności, wprowadzający szereg nowych przepisów odnośnie czasu jazdy kierowców zawodowych.

Jednym z nich – powszechnie stosowanym – jest wydłużenie czasu jazdy o jedną lub dwie godziny w przypadku, gdy kierowca kieruje się do bazy lub miejsca swojego zamieszkania. Przed zastosowaniem dodatkowej godziny lub dwóch, kierowca powinien także wykonać 30- lub 45-minutową przerwę.

Powyższy przepis nie ma zastosowania dla załóg wieloosobowych. Co więcej, wykorzystana godzina (lub dwie) powinna zostać odebrana w ciągu trzech tygodni (Tachospeed, 24.03.2025).

Tachografy

Tachograf to – w skrócie – urządzenie rejestrujące aktywność pojazdu oraz kierowcy poruszającego się nim. Tachografy są obowiązkowe w pojazdach ciężarowych, których dopuszczalna masa całkowita przekracza 3,5 tony, oraz w pojazdach przeznaczonych do przewozu więcej niż 9 osób, łącznie z kierowcą. Wszelkie kwestie związane z tachografami reguluje rozporządzenie UE nr 165/2014 oraz ustawa o tachografach (TIMOCOM, 7.07.2025).

Tachograf cyfrowy

W 1998 roku zaczęto stopniowo wprowadzać tachografy cyfrowe, które zastąpiły używane dotychczas „tarczki", czyli tachografy analogowe. Od 2006 roku montaż urządzeń cyfrowych stał się obowiązkowy. Ze względu na swoją naturę działania i postać fizyczną, „tarczki" pozwalały na stosunkowo prostą manipulację zapisywanymi danymi.

Tachograf cyfrowy automatycznie rejestruje prędkość pojazdu, pokonaną odległość, oraz czas pracy i czas jazdy kierowcy. Aby tachograf rozpoczął rejestrowanie danych na temat kierowcy, wymagane jest włożenie tak zwanej karty kierowcy. Owa karta jest plastikowym dokumentem, wydawanym przez Polską Wytwórnię Papierów Wartościowych, wymaganym od każdego, kto pracuje prowadząc pojazd wyposażony w tachograf cyfrowy (autoDNA, 20.05.2024).

Dzięki dużemu stopniu automatyzacji, tego rodzaju tachograf wspomaga kierowcę przypominając mu o konieczności zrealizowania odpoczynku, czy o przekroczeniu dozwolonej prędkości. Nie wykonuje jednak funkcji związanych z niektórymi obowiązkami, np. rejestracji przekroczenia granicy państwa, wobec czego kierowca musi zatrzymać się w pierwszym, bezpiecznym miejscu i ręcznie wybrać „kraj rozpoczęcia".

Tachograf cyfrowy jest także wyposażony w drukarkę, która może zostać użyta do sporządzenia kopii przebiegu czasu pracy. Jest to szczególnie przydatne w przypadkach, gdy czas pracy zostanie przekroczony i kierowca musi ręcznie opisać tego przyczynę.



Rysunek 6. Tachograf cyfrowy. Źródło: gov.pl

Tachograf inteligentny

Od 21 sierpnia 2023 r. obowiązkowym wyposażeniem stały się tachografy inteligentne drugiej generacji. Do końca 2024 r. wszystkie ówcześnie używane tachografy analogowe i cyfrowe musiały zostać wymienione na tachografy inteligentne.

Najbardziej kluczową różnicą, jaka dzieli urządzenia inteligentne od cyfrowych, jest zwiększenie przepływu danych za pomocą anten DSRC (Dedicated Short-Range Communication) oraz określanie pozycji pojazdu za pomocą lokalizacji GNSS (Global Navigation Satellite System). Ta druga funkcjonalność wyeliminowała konieczność zatrzymywania się, by zarejestrować przekroczenie granicy państwa, a także pozwoliła na rejestrację miejsc załadunku i rozładunku. Pierwsza funkcjonalność z kolei zrewolucjonizowała kontrole czasu pracy kierowców, ponieważ dzięki łączności bezprzewodowej nie jest wymagane zatrzymanie pojazdu, by móc go skontrolować – systemy inspekcji transportu drogowego (np. polskie ITD, niemieckie BAG) komunikują się z tachografem inteligentnym i sczytują jego dane – wystarczy, że pojazd inspektorów porusza się w pobliżu pojazdu do potencjalnej kontroli. Co więcej, ze względu na zwiększone zasoby pamięci, tachografy inteligentne rozszerzyły okres kontrolny czasu pracy z 28 dni do 56 dni wstecz (Kwartalnik Policyjny, 30.09.2024).

Odpowiedzialność i kary

Powyższe opisy działania tachografów kierują nas w stronę następnej kwestii, jaką są potencjalne kary za wykroczenia związane z czasem jazdy i czasem pracy – zarówno dla kierowców, jak i ich pracodawców.

Nieoczywistym faktem jest, że w pewnych przypadkach pociągnięte do odpowiedzialności mogą być także osoby zarządzające transportem, włącznie ze spedytorem, nadawcą, odbiorcą, podmiotem wykonującym czynności ładunkowe, organizatorem wycieczki, organizatorem transportu, operatorem publicznym transportu zbiorowego, oraz podwykonawcą – jeśli byli oni świadomi lub, w świetle wszystkich ważnych okoliczności, powinni byli wiedzieć, że zlecone przez nich usługi wiążą się z naruszeniem przepisów. W praktyce jednak najczęściej mandaty związane z czasem pracy kierowcy nakładane są na kierowcę, firmę transportową na rzecz której wykonywana jest usługa i na zarządzającego transportem (w przypadku większego naruszenia) (TransUp, 25.10.2024).

Odpowiedzialność przedsiębiorcy

Podstawowym obowiązkiem przedsiębiorstw transportowych, wynikającym z art. 10 rozporządzenia nr 561/2006, jest organizowanie czasu pracy kierowców w nich zatrudnionych lub pozostających w dyspozycji takich przedsiębiorstw w taki sposób, by kierowcy ci mogli przestrzegać przepisów dotyczących czasu prowadzenia pojazdu, przerw i okresów odpoczynku, oraz przepisów w sprawie tachografów stosowanych w transporcie drogowym. Przedsiębiorstwa są zobowiązane do wydawania kierowcom odpowiednich poleceń oraz przeprowadzania regularnych kontroli przestrzegania tychże norm (KT Legaltrans, 4.06.2021).

Przedsiębiorca nie ponosi jednak odpowiedzialności za **każde** naruszenie przepisów przez zatrudnionego przez niego kierowcę. Jeżeli podmiot wykonujący przewóz drogowy wykaże zapewnienie właściwej organizacji i dyscypliny pracy ogólnie wymaganej w stosunku do prowadzenia przewozów drogowych, nie nakłada się na niego kary pieniężnej.

Kary nie nakłada się ponadto, jeżeli okoliczności sprawy i dowody wskazują, że podmiot wykonujący przewozy lub inne czynności związanych z przewozem nie miał wpływu na powstanie naruszenia, a naruszenie powstało wskutek zdarzeń i okoliczności, których podmiot nie był w stanie przewidzieć. Nie nakłada się kary także, jeśli za stwierdzone naruszenie została nałożona kara przez inny uprawniony organ, lub jeżeli od daty ujawnienia naruszenia upłynęło więcej niż 2 lata.

Przykładowe kary dla kierowcy

- Nieokazanie wykresówki za dzień, który podlega kontroli: 500 zł
- Nieokazanie więcej niż 15 wykresówek za dni podlegające kontroli: 1500 zł
- Przekroczenie maksymalnego dziennego okresu prowadzenia pojazdu do 1 godziny oraz za każdą rozpoczętą godzinę: 100 zł
- Przekroczenie tygodniowego czasu prowadzenia pojazdu od 4 godzin do 9

godzin: 300 zł

- Samowolna ingerencja w pracę urządzenia rejestrującego zainstalowanego w pojeździe, wskutek której nastąpiła zmiana wskazań urządzenia w zakresie prędkości pojazdu, aktywności kierowcy lub przebytej drogi: 3000-12000 zł
- Jednoczesne używanie kilku wykresówek lub kart kierowców, albo cudzej wykresówki lub karty kierowcy: 8000 zł

Przykładowe kary dla przedsiębiorcy

- Naruszenia czasu pracy kierowcy (np. przekroczenie dziennego czasu prowadzenia pojazdu, skrócenie odpoczynku): od 50 do 12000 zł, zależnie od wagi naruszenia
- Nieprawidłowości w tachografie (brak danych, manipulacja, brak wykresówek lub karty kierowcy): od 50 do 12000 zł za naruszenie
- Brak ewidencji czasu pracy kierowców: od 500 zł do kilku tysięcy złotych, zależnie od klasyfikacji naruszenia
- Maksymalna suma kar podczas kontroli (firma do 10 kierowców): do 15000 zł
- Maksymalna suma kar podczas kontroli (10-50 kierowców): do 20000 zł
- Maksymalna suma kar podczas kontroli (powyżej 50 kierowców): do 30000 zł (TIMOCOM, 13.02.2026)

Podsumowanie i wnioski

Czas pracy kierowców oraz zasady korzystania z tachografów stanowią jeden z kluczowych elementów organizacji transportu drogowego. Przepisy dotyczące maksymalnego czasu jazdy, obowiązkowych przerw oraz odpoczynków dziennych i tygodniowych mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo kierowców, pasażerów, przewożonych ładunków oraz pozostałych uczestników ruchu drogowego. Ich głównym celem jest ograniczenie zmęczenia kierowców, które może prowadzić do obniżenia koncentracji, wydłużenia czasu reakcji i zwiększenia ryzyka wystąpienia wypadków.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że prawidłowe planowanie pracy kierowcy wymaga uwzględnienia wielu ograniczeń prawnych i organizacyjnych. Do najważniejszych należą limity dziennego i tygodniowego czasu jazdy, obowiązek wykonywania przerw po określonym czasie prowadzenia pojazdu, zasady odpoczynku dziennego i tygodniowego, a także szczególne przypadki, takie jak praca w załodze, przeprawa promowa lub kolejowa oraz możliwość wydłużenia czasu jazdy w wyjątkowych sytuacjach. Oznacza to, że organizacja przewozu nie może opierać się wyłącznie na czasie przejazdu i odległości, ale musi również uwzględniać realne możliwości pracy kierowcy zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Istotną rolę w kontroli przestrzegania tych zasad odgrywają tachografy. Urządzenia te umożliwiają rejestrowanie czasu jazdy, przerw, odpoczynków, prędkości pojazdu oraz innych aktywności kierowcy. Rozwój tachografów cyfrowych i inteligentnych znacząco zwiększył

możliwości nadzoru nad transportem drogowym. Szczególnie tachografy inteligentne drugiej generacji, wykorzystujące lokalizację GNSS oraz komunikację bezprzewodową, pozwalają na skuteczniejszą kontrolę pracy kierowców i ograniczenie możliwości manipulowania danymi.

W artykule wykazano również, że odpowiedzialność za przestrzeganie przepisów nie spoczywa wyłącznie na kierowcy. Istotne obowiązki mają także przedsiębiorcy transportowi oraz osoby zarządzające transportem. To na nich ciąży konieczność właściwego organizowania pracy, wydawania odpowiednich poleceń, prowadzenia kontroli oraz zapobiegania naruszeniom. Nieprzestrzeganie przepisów może skutkować wysokimi karami finansowymi, zarówno dla kierowców, jak i dla przedsiębiorstw transportowych.

Podsumowując, skuteczne zarządzanie czasem pracy kierowców oraz prawidłowe wykorzystywanie tachografów mają zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa i legalności przewozów drogowych. Przestrzeganie obowiązujących norm pozwala ograniczyć ryzyko wypadków, poprawia organizację pracy kierowców, chroni przedsiębiorstwa przed sankcjami oraz wpływa na profesjonalizację całego sektora transportu drogowego. Współczesny transport wymaga więc nie tylko znajomości przepisów, ale także odpowiedzialnego planowania, systematycznej kontroli i wykorzystywania nowoczesnych narzędzi wspierających bezpieczeństwo przewozów.

Bibliografia

1. ABC Szkolenia. (2025). Czas pracy kierowców – najważniejsze informacje. Dostęp z dnia 10.04.2026 z: https://abc-szkolenia.com/czas-pracy-kierowcownajwazniejszeinformacje/
2. autoDNA. (2024). Tachograf cyfrowy – kompletny przewodnik. Dostęp z dnia 15.04.2026 z: https://www.autodna.pl/blog/tachograf-cyfrowy/
3. CSK. (2015). Czas pracy kierowców – rozporządzenie 561/2006. Dostęp z dnia 10.04.2026 z: https://csk.pl/czas-pracy-kierowcow-w-pl-i-ue/
4. EwiCenter. (2024). Czas pracy kierowcy: poradnik dla kierowców i spedytorów. Dostęp z dnia 10.04.2026 z: https://ewicenter.pl/blog/artykuly/czaspracykierowcy-poradnik-dla-kierowcow-i-spedytorow/
5. Idec, E., Spinek, B. (2024). Tachografy inteligentne drugiej generacji. Kwartalnik Policyjny. Dostęp z dnia 16.04.2026 z: https://kwartalnik.csp.edu.pl/kp/archiwum-1/2024/kwart/6026,Tachografyinteligentne-drugiej-generacji.html
6. KT Legaltrans. (2021). Odpowiedzialność przedsiębiorstw transportowych. Dostęp z dnia 17.04.2026 z: https://kt-legaltrans.pl/odpowiedzialnoscprzedsiebiorstwtransportowych/
7. Mexem. (2023). Czas pracy kierowcy. Dostęp z dnia 11.04.2026 z: https://mexem.com.pl/baza-wiedzy/czas-pracy-kierowcy/
8. Sejm.gov.pl. (2004). Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o czasie pracy kierowców. Dostęp z dnia 11.04.2026 z: https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20040920879/U/D20040879Lj.pdf
9. Tachospeed. (2025). Przedłużenie czasu prowadzenia pojazdu: co to jest i jakie ma konsekwencje? Dostęp z dnia 11.04.2026 z: https://tachospeed.pl/blog/przedluzenieczasu-prowadzenia-pojazdu-co-to-jest-ijakie-ma-konsekwencje/
10. TIMOCOM. (2025). Czy tachograf jest obowiązkowy? Dostęp z dnia 15.04.2026 z: https://www.timocom.pl/blog/czy-tachograf-jest-obowiazkowy-i-kiedy-gomontowac-794950
11. TIMOCOM. (2026). Kontrola ITD 2026 – jak się przygotować? Dostęp z dnia 17.04.2026 z: https://www.timocom.pl/blog/kontrola-itd-2025-jaksi%C4%99przygotowac-praktyczny-poradnik-829064

12. TransUp. (2024). Kary za naruszenia czasu pracy kierowców – wysokość, tryb, jak się bronić. Dostęp z dnia 17.04.2026 z: https://transup.eu/kary-zanaruszeniaczasu-pracy-kierowcow-wysokosc-tryb-jak-sie-bronic

ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ I EKOLOGIA W TRANSPORCIE

Gabriela SUCHAŃSKA[1], Maksymilian WITKOWSKI[2], Maksymilian KOWALCZYK[3], Michał PAUKSZTO[4], Patryk JAROSZ[5], Wojciech MASIAREK[6], Bożena SZCZUCKA-LASOTA[7]*

[1] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak, mail: gs319508@student.polsl.pl

[2] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak, mail: mw310162@student.polsl.pl

[3] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak, mail: mk319518@student.polsl.pl

[4] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak, mail: mp319509@student.polsl.pl

[5] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak, mail: pj307726@student.polsl.pl

[6] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak, mail: wm321415@student.polsl.pl

[7]Uniwersytet WSB Merito Gdańsk, e-mail:marek.ozarowski@gdansk.merito.pl;

Identyfikator ORCID 0009-0002-6682-9498

[8]Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail:bozena.szczucka-lasota@polsl.pl;

Identyfikator ORCID – 0000-0003-3312-1864

* Korespondencja: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl; Tel.: +48 32 603 43 89

Streszczenie: Artykuł dotyczy zrównoważonego rozwoju w transporcie drogowym, ze szczególnym naciskiem na emisje gazów cieplarnianych (CO_2/CO_2e) w segmencie pojazdów ciężkich. Celem artykułu jest identyfikacja głównych źródeł emisji oraz wskazanie działań i technologii umożliwiających ich ograniczanie. W pierwszej części przedstawiono ujęcie systemowe emisji, rozróżniając podejścia tank-to-wheel (TTW) i well-to-wheel (WTW). Następnie omówiono kluczowe cele i regulacje UE kształtujące dekarbonizację transportu (m.in. normy CO_2 dla HDV, Euro 7, AFIR oraz ETS2). W dalszej części zaprezentowano technologie i nośniki energii obniżające emisje w ujęciu całego łańcucha dostaw energii: elektromobilność bateryjną, wodór, paliwa odnawialne oraz paliwa syntetyczne. Uzupełnieniem są działania organizacyjne i logistyczne, takie jak optymalizacja tras, ograniczanie pustych przebiegów, telematyka i eco-driving, wspierające redukcję zużycia paliwa w warunkach rzeczywistych. Wskazano, że trwała redukcja emisji wymaga równoległego rozwoju technologii pojazdów, infrastruktury oraz rozwiązań zarządczych w przedsiębiorstwach transportowych.

Słowa kluczowe: zrównoważony transport; emisja CO_2; paliwa alternatywne; elektromobilność; transport drogowy

SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ECOLOGY IN TRANSPORT

Abstract: The article addresses sustainable development in road transport, with a focus on greenhouse gas emissions (CO_2/CO_2e) in the heavy-duty vehicle (HDV) segment. The aim is to identify key emission drivers and outline practical mitigation measures. First, the paper clarifies system boundaries for emission assessment by contrasting tank-to-wheel (TTW) and well-to-wheel (WTW) approaches. Next, it summarizes major European Union policy and regulatory drivers shaping decarbonization, including CO_2 standards for HDVs, Euro 7, the Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR), and the EU emissions trading extension (ETS2). The analysis then reviews main low-carbon technology pathways across the energy supply chain, covering battery-electric mobility, hydrogen fuel cells, renewable fuels, and synthetic fuels. Finally, selected organizational and logistics measures—such as route optimization, reduction of empty runs, telematics, and eco-driving—are discussed as complementary levers to reduce real-world energy use. The paper concludes that effective emission reduction requires parallel progress in vehicle technologies, infrastructure deployment, and transport management practices.

Keywords: sustainable transport; CO_2 emissions; alternative fuels; electromobility; road transport

1. Wstęp

Transport drogowy stanowi podstawowy komponent systemu mobilności, zapewniając wysoką dostępność przestrzenną oraz elastyczność realizacji przewozów. Jednocześnie jest on jednym z najtrudniejszych do dekarbonizacji sektorów gospodarki ze względu na dominację paliw kopalnych, długie cykle życia pojazdów oraz silne powiązanie popytu na transport z aktywnością gospodarczą. W warunkach zaostrzającej się polityki klimatycznej Unii Europejskiej oraz rosnących wymagań dotyczących jakości powietrza, ocena i ograniczanie emisji w transporcie drogowym stają się zagadnieniami priorytetowymi.

Znaczenie problematyki emisji w transporcie drogowym wynika z kilku nakładających się trendów. Po pierwsze, wraz ze wzrostem natężenia ruchu oraz wolumenu przewozów rośnie presja środowiskowa, zarówno w postaci emisji gazów cieplarnianych, jak i oddziaływań lokalnych (hałas, zanieczyszczenia powietrza, kongestia). Po drugie, w wielu państwach UE obserwuje się ograniczony potencjał dalszych redukcji emisji w sektorach takich jak energetyka czy przemysł przy jednoczesnym utrzymywaniu wysokiego popytu na przewozy drogowe. W rezultacie transport – jako sektor trudny do elektryfikacji w pełnym zakresie – staje się kluczowym obszarem działań klimatycznych (EEA, 2025; IPCC, 2022). W polskich uwarunkowaniach krajowy bilans emisji gazów cieplarnianych oraz ich trendy są raportowane m.in. w ramach Krajowego Raportu Inwentaryzacyjnego przygotowywanego przez KOBiZE (KOBiZE, 2024). Warto podkreślić, że warunki ruchu (w tym nasilających się korków) wpływają na zużycie paliwa i emisje w warunkach rzeczywistych; w badaniach opartych na danych trajektorii pojazdów stwierdzano wzrost zużycia paliwa w warunkach kongestii rzędu ok. 80% względem ruchu płynnego (Treiber i in., 2008).

Szczególną rolę w bilansie emisyjnym odgrywa transport ciężki, który realizuje znaczną część pracy przewozowej w gospodarce, a jednocześnie charakteryzuje się wysokim zużyciem energii wynikającym z masy ładunku, oporów ruchu oraz długich przebiegów rocznych. Z tego względu nawet relatywnie niewielkie usprawnienia w efektywności energetycznej pojazdów ciężarowych, organizacji logistyki czy ograniczaniu pustych przebiegów mogą przynosić wymierne efekty w postaci zmniejszenia zużycia paliwa i ograniczenia emisji CO_2. Jednocześnie segment HDV jest bardziej wrażliwy na ograniczenia technologiczne związane z magazynowaniem energii, zasięgiem i infrastrukturą, co wpływa na tempo dekarbonizacji (transformacji energetycznej) transportu drogowego.

Istotnym elementem analizy jest właściwy dobór granic systemu oceny emisji. Skupienie się wyłącznie na emisjach bezpośrednich (tank-to-wheel, TTW) może prowadzić do niepełnych wniosków, w szczególności przy porównywaniu napędów alternatywnych, dla których część emisji jest „przeniesiona" do sektora wytwarzania energii lub produkcji paliw. W ujęciu well-to-tank (WTT) uwzględnia się emisje związane z pozyskaniem surowców, wytworzeniem paliwa/energii oraz ich dostarczeniem do pojazdu (zbiornika lub baterii). Z kolei well-to-wheel (WTW) obejmuje łącznie WTT + TTW i stanowi podstawę do porównań technologii w sposób bardziej obiektywny, z uwzględnieniem miksu energetycznego oraz strat w łańcuchu dostaw energii (Prussi i in., 2020).

Równolegle do uwarunkowań technologicznych rośnie znaczenie otoczenia regulacyjnego, które wyznacza ramy dla producentów pojazdów oraz operatorów transportowych. Przykładem są normy emisji CO_2 dla nowych pojazdów ciężkich ustanowione w Rozporządzeniu (UE) 2019/1242 oraz wymagania związane z homologacją i trwałością emisyjną ujęte w regulacji Euro 7 (Parlament Europejski i Rada UE, 2019; Parlament Europejski i Rada UE, 2024). W tym kontekście część 2 porządkuje podstawowe pojęcia i zależności emisyjne w transporcie drogowym, stanowiąc punkt wyjścia do dalszych analiz.

Celem artykułu jest analiza uwarunkowań emisyjności transportu drogowego (ze szczególnym uwzględnieniem pojazdów ciężkich) oraz porównanie głównych ścieżek redukcji emisji CO_2/CO_2e, obejmujących rozwiązania regulacyjne, technologiczne i organizacyjne, w ujęciu TTW/WTW.

Zakres artykułu obejmuje przede wszystkim emisje związane ze zmianą klimatu, tj. emisje CO_2 (oraz w ujęciu równoważnika CO_2e tam, gdzie jest to zasadne). Emisje zanieczyszczeń lokalnych (np. NOx, PM) są traktowane jako kontekst regulacyjny i środowiskowy, ponieważ wpływają na kierunek rozwoju technologii (np. Euro 7). Skróty użyte w tekście oznaczają: HDV – heavy-duty (pojazdy ciężkie), LDV – light-duty (pojazdy lekkie), BEV – battery-electric vehicle (pojazd bateryjny), FCEV – fuel cell electric vehicle (pojazd z ogniwem paliwowym), TTW – tank-to-wheel (emisje w eksploatacji), WTT – well-to-tank (emisje w wytwarzaniu i dostawach energii/paliwa), WTW – well-to-wheel (TTW+WTT), CO_2e – równoważnik CO_2, AFIR – Alternative Fuels Infrastructure Regulation, ETS2 – system handlu

uprawnieniami do emisji dla paliw w transporcie i budynkach, TEN-T – transeuropejska sieć transportowa, SCR – selektywna redukcja katalityczna, DPF – filtr cząstek stałych.

2. Emisja CO_2 w transporcie drogowym – ujęcie systemowe

Transport drogowy odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu współczesnej gospodarki, umożliwiając sprawny przepływ osób i towarów oraz integrację rynków lokalnych, krajowych i międzynarodowych. Jednocześnie sektor ten stanowi jedno z głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych, w szczególności dwutlenku węgla (CO_2), który jest uznawany za podstawowy czynnik odpowiedzialny za postępujące zmiany klimatu. W skali globalnej emisje bezpośrednie z transportu odpowiadają za około 23% energetycznych emisji CO_2, z czego blisko 70% pochodzi z pojazdów drogowych (IPCC, 2022).

W ujęciu europejskim znaczenie transportu drogowego dla bilansu emisyjnego jest jeszcze bardziej widoczne. Zgodnie z danymi Europejskiej Agencji Środowiska sektor transportu pozostaje jedynym obszarem gospodarki, w którym w ostatnich dekadach nie osiągnięto trwałego trendu spadkowego emisji gazów cieplarnianych. Transport drogowy odpowiada obecnie za około 73% całkowitych emisji transportowych w Unii Europejskiej, a tempo ich redukcji jest niewystarczające do realizacji celów neutralności klimatycznej wyznaczonych na rok 2050 (EEA, 2025).

Źródłem emisji CO_2 w transporcie drogowym jest przede wszystkim spalanie paliw kopalnych w silnikach spalinowych, takich jak olej napędowy i benzyna. Wielkość emisji zależy od szeregu czynników technicznych i eksploatacyjnych, do których należą m.in. masa pojazdu, opory ruchu, warunki drogowe, styl jazdy kierowcy, prędkość jazdy oraz sprawność układu napędowego. Szczególnie istotną rolę odgrywa transport ciężki, który charakteryzuje się wysoką emisją jednostkową w przeliczeniu na pojazdokilometr, wynikającą z dużej masy całkowitej zestawów pojazdów oraz intensywnej eksploatacji (IPCC, 2022; GUS, 2024).

Rzetelna ocena wpływu transportu drogowego na klimat wymaga podejścia systemowego, uwzględniającego nie tylko emisje powstające bezpośrednio podczas eksploatacji pojazdu (tank-to-wheel, TTW), lecz również emisje związane z pozyskiwaniem, przetwarzaniem i dystrybucją energii lub paliwa (well-to-tank, WTT). Dopiero pełne ujęcie well-to-wheel (WTW) umożliwia obiektywne porównanie różnych technologii napędowych, w tym pojazdów spalinowych, hybrydowych, elektrycznych oraz wykorzystujących paliwa alternatywne (Prussi i in., 2020).

W kontekście dekarbonizacji transportu drogowego szczególne znaczenie mają również regulacje prawne wprowadzane na poziomie Unii Europejskiej. Do kluczowych aktów należą Rozporządzenie (UE) 2019/1242 ustanawiające normy emisji CO_2 dla nowych pojazdów ciężkich oraz regulacja Euro 7, która rozszerza wymagania emisyjne i trwałościowe w

odniesieniu do pojazdów oraz – pośrednio – wspiera poprawę efektywności energetycznej (Parlament Europejski i Rada UE, 2019; Parlament Europejski i Rada UE, 2024).

Technologie oczyszczania spalin, takie jak układy selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) czy filtry cząstek stałych (DPF), skutecznie ograniczają emisję zanieczyszczeń lokalnych, w tym tlenków azotu oraz cząstek stałych. Ich wpływ na redukcję emisji CO_2 jest jednak pośredni i ograniczony, ponieważ zależy głównie od zużycia paliwa. Realne obniżenie emisji dwutlenku węgla wymaga przede wszystkim poprawy efektywności energetycznej pojazdów, optymalizacji procesów logistycznych, zwiększenia wykorzystania transportu intermodalnego oraz stopniowej zmiany źródeł energii wykorzystywanych w transporcie (IPCC, 2022; Prussi i in., 2020).

Podsumowując, emisja CO_2 w transporcie drogowym stanowi złożone zagadnienie wymagające zintegrowanego podejścia. Skuteczne działania redukcyjne muszą łączyć instrumenty regulacyjne, rozwój i upowszechnianie nowoczesnych technologii napędowych oraz działania organizacyjne i infrastrukturalne. W kolejnym rozdziale omówiono główne regulacje i cele klimatyczne UE, które wyznaczają ramy dla tych działań.

3. Regulacje i cele klimatyczne UE dla transportu drogowego

Polityka klimatyczna Unii Europejskiej wyznacza kierunek transformacji sektora transportu drogowego poprzez połączenie celów redukcyjnych, instrumentów rynkowych oraz wymagań technicznych dla pojazdów i paliw. Podstawą jest cel neutralności klimatycznej do 2050 r. oraz pośredni cel redukcji emisji netto o co najmniej 55% do 2030 r. względem poziomu z 1990 r. (pakiet „Fit for 55”). Dla transportu drogowego oznacza to konieczność szybkiego ograniczania emisji zarówno w segmencie samochodów osobowych i dostawczych, jak i w segmencie pojazdów ciężkich.

Kluczową rolę w kształtowaniu emisyjności floty pełnią normy emisji CO_2 dla nowych pojazdów. W przypadku samochodów osobowych i lekkich pojazdów dostawczych (LDV) obowiązują standardy emisyjne dla producentów, które w perspektywie 2030–2035 prowadzą do bardzo głębokiej redukcji średniej emisji z nowych rejestracji. Równolegle dla pojazdów ciężkich (HDV) stosuje się odrębny reżim prawny, w którym cele redukcji są przypisane do kategorii pojazdów oraz okresów referencyjnych, a monitorowanie odbywa się m.in. z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych oraz danych raportowanych przez producentów. Podejście to ma skłaniać rynek do wdrażania efektywniejszych układów napędowych i zwiększania udziału pojazdów zeroemisyjnych.

Istotnym uzupełnieniem standardów CO_2 są przepisy dotyczące emisji zanieczyszczeń lokalnych oraz wymagań trwałościowych. Regulacja Euro 7 wzmacnia podejście „całościowe” poprzez rozszerzenie wymagań w zakresie trwałości układów ograniczania emisji, emisji w

warunkach rzeczywistych, a także poprzez uwzględnienie źródeł niepochodzących ze spalania paliwa (np. emisji z hamulców i opon). Choć Euro 7 nie jest instrumentem bezpośrednio ukierunkowanym na CO_2, w praktyce może wpływać na dobór technologii oraz parametry eksploatacyjne pojazdów, a tym samym na zużycie energii.

Na tempo redukcji emisji oddziałują również regulacje wspierające rozwój infrastruktury oraz instrumenty ekonomiczne. Rozporządzenie AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) ustanawia minimalne wymagania dotyczące dostępności infrastruktury ładowania i tankowania paliw alternatywnych w sieci TEN-T, co ma zmniejszać bariery wdrożeniowe dla elektromobilności i wodoru w transporcie ciężkim. Z kolei rozszerzenie systemu handlu uprawnieniami do emisji na paliwa stosowane w budynkach i transporcie drogowym (ETS2) wprowadza bodziec cenowy ograniczający zużycie paliw kopalnych, wzmacniając opłacalność inwestycji w poprawę efektywności energetycznej oraz w technologie niskoemisyjne.

Podsumowując, regulacje UE tworzą wielopoziomowy system oddziaływania: z jednej strony narzucają producentom wymogi dotyczące emisyjności nowych pojazdów, z drugiej – kształtują warunki rynkowe dla operatorów transportowych poprzez standardy infrastrukturalne i instrumenty kosztowe. W rezultacie redukcja emisji CO_2 w transporcie drogowym jest determinowana nie tylko przez postęp technologiczny, lecz także przez spójność i przewidywalność polityki publicznej, w tym tempo wdrażania infrastruktury oraz dostępność energii i paliw alternatywnych. W świetle przedstawionych regulacji kluczowe staje się przeanalizowanie dostępnych technologii i nośników energii oraz ich efektów emisyjnych w ujęciu well-to-wheel (WTW), co stanowi przedmiot rozdziału 4.

4. Technologie i paliwa ograniczające emisje – ujęcie WTW

Dobór technologii napędowej i rodzaju nośnika energii ma bezpośrednie przełożenie na emisje CO_2/CO_2e w transporcie drogowym. W ocenie skuteczności rozwiązań niskoemisyjnych kluczowe jest rozróżnienie emisji bezpośrednich w fazie użytkowania pojazdu (tank-to-wheel, TTW) oraz emisji w łańcuchu dostaw energii (well-to-tank, WTT). Dopiero ich suma – ujęcie well-to-wheel (WTW) – pozwala porównywać technologie w sposób spójny, zwłaszcza gdy część emisji „przenosi się" do sektora elektroenergetycznego, rafineryjnego lub do procesów produkcji paliw alternatywnych (Ramachandran & Stimming, 2015; Prussi i in., 2020).

- **BEV** (battery-electric vehicle) – pojazdy bateryjne ładowane z sieci; emisje TTW = 0, natomiast emisje WTW zależą od miksu energetycznego.
- **FCEV** (fuel cell electric vehicle) – pojazdy z ogniwem paliwowym zasilane wodorem; emisje TTW = 0, a emisje WTW zależą głównie od sposobu produkcji wodoru.

- **Biopaliwa** (np. FAME, HVO) – mogą obniżać emisje WTW w istniejącej flocie, przy spełnieniu kryteriów zrównoważonego pochodzenia.
- **Paliwa syntetyczne** (e-fuels) – potencjalnie niskoemisyjne w WTW, lecz zależne od dostępu do niskoemisyjnej energii i CO_2.
- **Paliwa gazowe** (CNG/LNG, w tym biometan) – efekt klimatyczny w WTW zależy m.in. od emisji metanu w łańcuchu dostaw oraz udziału komponentu odnawialnego.

Tabela 1. Porównanie wybranych technologii i paliw ograniczających emisje w transporcie drogowym (ujęcie TTW/WTW)

Technologia	TTW	WTW	Zalety	Wady / ograniczenia
BEV	0	Zależne od miksu energii	Brak emisji spalin lokalnie; wysoka sprawność napędu; potencjał dużych redukcji WTW przy niskoemisyjnej energii.	Masa i koszt baterii; czas ładowania; wymagania infrastruktury (moc); ograniczenia zasięgu w części zastosowań HDV.
FCEV (H_2)	0	Silnie zależne od produkcji H_2	Krótki czas tankowania; potencjalnie duży zasięg; brak emisji spalin lokalnie.	Wysoki koszt; mała dostępność infrastruktury; emisje WTW wysokie przy „szarym" wodorze; straty w łańcuchu dostaw.
Biopaliwa (np. HVO/FAME)	>0	Zależne od surowca i procesu	Możliwość redukcji WTW w istniejącej flocie; szybkie wdrożenie bez wymiany pojazdów.	Ograniczona podaż zrównoważonej biomasy; ryzyka środowiskowe (ILUC); zróżnicowana jakość i dostępność.
E-fuels	>0	Niskie tylko przy OZE + CO_2	Kompatybilność z flotą i infrastrukturą paliw ciekłych; potencjał niskich emisji WTW przy niskoemisyjnej energii.	Wysokie koszty i energochłonność produkcji; ograniczona podaż; potrzeba taniej, niskoemisyjnej energii.
CNG/LNG / biometan	>0	Zależne od udziału biometanu i emisji metanu	Możliwe korzyści lokalne; potencjał redukcji WTW przy wysokim udziale biometanu.	Ryzyko emisji metanu w łańcuchu dostaw; efekt WTW niejednoznaczny przy paliwie kopalnym.

Pojazdy bateryjne (BEV) charakteryzują się zerową emisją spalin w miejscu użytkowania (TTW), co ma szczególne znaczenie w obszarach zurbanizowanych. Ich ślad węglowy w ujęciu WTW zależy jednak od miksu wytwarzania energii elektrycznej oraz strat w przesyle i ładowaniu. W warunkach wysokiego udziału źródeł odnawialnych BEV mogą zapewniać istotne redukcje emisji WTW, natomiast w systemach elektroenergetycznych opartych na

paliwach kopalnych efekt redukcyjny jest mniejszy, co ma znaczenie także w warunkach Polski (KOBiZE, 2024). Dla transportu ciężkiego barierami pozostają masa i koszt baterii, czas ładowania oraz dostępność infrastruktury o odpowiedniej mocy, dlatego zastosowania BEV są obecnie najbardziej obiecujące na trasach regionalnych i w dystrybucji miejskiej.

Alternatywą dla magazynowania energii w akumulatorach są pojazdy wodorowe z ogniwami paliwowymi (FCEV). Podobnie jak BEV, w ujęciu TTW nie emitują CO_2, natomiast w ujęciu WTW ich emisyjność zależy od sposobu wytwarzania wodoru. Wodór produkowany z elektrolizy zasilanej energią odnawialną („zielony") może prowadzić do bardzo niskich emisji WTW, podczas gdy wodór z reformingu gazu ziemnego bez wychwytu CO_2 („szary") wiąże się z wysokim śladem węglowym. Istotne są również straty na etapie sprężania, skraplania, dystrybucji i konwersji energii w ogniwie paliwowym, co wpływa na ogólną sprawność łańcucha WTW. Zaletą FCEV w segmencie HDV może być krótki czas tankowania i potencjalnie większy zasięg względem BEV, jednak barierą pozostają koszty technologii oraz ograniczona infrastruktura tankowania (Cullen et al., 2021).

W krótkiej i średniej perspektywie istotną rolę w ograniczaniu emisji mogą odgrywać paliwa ciekłe kompatybilne z istniejącą flotą, takie jak biopaliwa (np. FAME) i uwodornione oleje roślinne (HVO), a także paliwa syntetyczne (e-fuels) wytwarzane z wykorzystaniem wodoru i CO_2. Ich przewaga polega na możliwości ograniczania emisji WTW bez konieczności natychmiastowej wymiany pojazdów, co jest ważne ze względu na długi okres eksploatacji ciężarówek i pojazdów użytkowych. Efekt klimatyczny zależy jednak od pochodzenia surowców, technologii wytwarzania oraz konkurencji o zasoby biomasy, dlatego w ocenie należy uwzględniać kryteria zrównoważonego pozyskania i ryzyko pośredniej zmiany użytkowania gruntów.

Paliwa gazowe, takie jak CNG i LNG, były w ostatnich latach postrzegane jako rozwiązanie przejściowe, pozwalające ograniczyć część emisji zanieczyszczeń lokalnych oraz – w wybranych warunkach – emisji CO_2 względem oleju napędowego. W ujęciu WTW wynik redukcyjny zależy jednak od szczelności łańcucha dostaw (emisje metanu) oraz od udziału biometanu/biogazu w mieszance paliwowej. Z perspektywy dekarbonizacji kluczowe staje się więc zwiększanie udziału odnawialnych paliw gazowych, przy równoczesnej kontroli emisji metanu w całym łańcuchu (wydobycie, przesył, tankowanie).

Wnioskiem z analizy WTW jest brak jednego, uniwersalnego rozwiązania dla całego transportu drogowego. Elektryfikacja bateryjna najlepiej sprawdza się w zastosowaniach o przewidywalnych przebiegach i dostępie do infrastruktury ładowania, wodór może być konkurencyjny w części zastosowań dalekobieżnych, natomiast paliwa ciekłe i gazowe o niskim śladzie węglowym mogą wspierać redukcję emisji w okresie przejściowym oraz w segmentach trudnych do elektryfikacji. W przeglądzie dotyczącym ciężkiego transportu drogowego wskazywano, że ciężkie pojazdy bateryjne oraz wodorowe (z zielonym wodorem) mogą redukować emisje CO_2 w ujęciu well-to-wheel rzędu ok. 27–58% względem ciężarówek z silnikiem Diesla, przy czym wyniki są silnie zależne od miksu energii i technologii

wytwarzania paliwa (Zhang i in., 2025). W praktyce skuteczna redukcja emisji będzie wymagała równoległego rozwoju technologii pojazdów, infrastruktury oraz źródeł energii o niskiej emisyjności. Niezależnie od wybranej ścieżki technologicznej istotne pozostają również działania organizacyjne i logistyczne, które mogą ograniczać zużycie energii w warunkach rzeczywistych, co omówiono w rozdziale 5.

5. Działania organizacyjne i logistyczne wspierające redukcję emisji

Redukcja emisji CO_2 (a szerzej: emisji gazów cieplarnianych wyrażanych jako CO_2e) w transporcie drogowym nie jest determinowana wyłącznie przez zmianę technologii napędowych. Duży potencjał tkwi również w działaniach organizacyjnych i logistycznych, które poprawiają efektywność wykorzystania pojazdów oraz ograniczają zużycie energii w warunkach rzeczywistych. W segmencie przewozów towarowych oznacza to przede wszystkim zmniejszanie liczby przejazdów wykonywanych bez ładunku, zwiększanie stopnia wykorzystania przestrzeni ładunkowej, ograniczanie postojów i strat czasu oraz poprawę płynności ruchu na trasach.

Podstawowym narzędziem ograniczania emisji CO_2/CO_2e jest optymalizacja planowania przewozów, w tym dobór tras o korzystnym profilu, unikanie odcinków o wysokiej kongestii oraz konsolidacja ładunków. Integracja danych o zleceniach, dostępności pojazdów i ograniczeniach czasowych dostaw umożliwia redukcję kilometrów przejechanych „na pusto" oraz lepsze dopasowanie typu pojazdu do masy i gabarytów ładunku. W konsekwencji spada jednostkowe zużycie paliwa w przeliczeniu na tonokilometr, co jest szczególnie istotne w transporcie ciężkim, gdzie emisje są silnie skorelowane z masą zestawu i charakterem ruchu.

Współczesne systemy telematyczne pozwalają na bieżący monitoring parametrów eksploatacyjnych (prędkości, przyspieszeń, czasu pracy na biegu jałowym, zużycia paliwa) oraz identyfikację zachowań kierowców wpływających na emisyjność. Programy eco-drivingu, wsparte analizą danych i szkoleniami, mogą przynosić oszczędności paliwa, szczególnie w ruchu miejskim i w dystrybucji (NCST, 2015). Uzupełnieniem są działania z zakresu utrzymania floty: prawidłowe ciśnienie w oponach, dobór opon o niskich oporach toczenia, regularna obsługa układu napędowego oraz aerodynamika (np. spojlery, deflektory) – elementy te wpływają na straty energii i emisje w cyklu użytkowania.

Dodatkowy potencjał redukcji emisji wynika ze współpracy uczestników łańcucha dostaw, w tym dzielenia informacji o popycie, oknach czasowych i możliwościach konsolidacji. Lepsza koordynacja pomiędzy nadawcami, operatorami logistycznymi i odbiorcami ogranicza liczbę kursów ekspresowych oraz pozwala na stabilniejsze planowanie. W skali systemu transportowego znaczenie ma także rozwój transportu intermodalnego, w którym odcinek drogowy pełni funkcję dowozowo-odwozową do terminali, a zasadnicza część trasy jest

realizowana koleją lub żeglugą śródlądową. W rezultacie działania organizacyjne stanowią istotne uzupełnienie transformacji technologicznej, zapewniając redukcje emisji niezależnie od tempa wymiany floty.

6. Podsumowanie i wnioski

Transport drogowy pozostaje jednym z kluczowych sektorów wpływających na emisje gazów cieplarnianych, a jednocześnie – ze względu na dominację paliw kopalnych, strukturę floty i wymagania operacyjne – należy do obszarów najtrudniejszych do szybkiej dekarbonizacji. Przedstawione rozważania potwierdzają, że skuteczna redukcja emisji CO_2 (CO_2/CO_2e w zależności od przyjętych granic systemu) wymaga podejścia systemowego, łączącego ocenę emisji w ujęciu łańcuchowym (WTW), działania regulacyjne na poziomie UE oraz równoległe wdrażanie rozwiązań technologicznych i organizacyjnych.

- Należy oceniać emisyjność technologii napędowych w ujęciu WTW, ponieważ analiza emisji w miejscu użytkowania (TTW) może prowadzić do niepełnych wniosków, szczególnie przy porównywaniu BEV i FCEV z napędami konwencjonalnymi.
- Należy traktować regulacje UE (standardy CO_2, Euro 7, AFIR oraz mechanizmy cenowe, takie jak ETS2) jako spójne ramy przyspieszające transformację, przy czym skuteczność tych instrumentów zależy od tempa rozwoju infrastruktury oraz dostępności niskoemisyjnej energii.
- W segmencie HDV redukcja emisji wymaga miksu rozwiązań: elektryfikacji w zastosowaniach regionalnych i miejskich, potencjalnego wykorzystania wodoru w części przewozów dalekobieżnych oraz rosnącego udziału paliw odnawialnych i syntetycznych w okresie przejściowym.
- Należy wdrażać działania organizacyjne i logistyczne (optymalizacja tras, ograniczanie pustych przebiegów, telematyka, eco-driving, intermodalność) równolegle z inwestycjami technologicznymi, ponieważ stanowią one istotne źródło redukcji emisji niezależnie od tempa wymiany floty.

W dalszych pracach zasadne jest pogłębienie analiz ilościowych dla wybranych scenariuszy (np. typowe trasy regionalne i dalekobieżne) z wykorzystaniem danych o zużyciu energii w warunkach rzeczywistych oraz aktualnych wskaźników emisyjności energii i paliw. Pozwoli to lepiej oszacować potencjał redukcyjny w polskich uwarunkowaniach miksu energetycznego i struktury przewozów, a także porównać koszty i bariery wdrożenia poszczególnych technologii w horyzoncie 2030–2050.

Bibliografia

1. European Commission. (2016). A European strategy on Cooperative Intelligent Transport Systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility (COM(2016) 766 final).
2. European Commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe (COM(2020) 301 final).
3. European Environment Agency. (2025). Greenhouse gas emissions from transport in Europe [wskaźnik]. Dostęp: 27.03.2026.
4. Główny Urząd Statystyczny. (2024). Transport drogowy w Polsce w latach 2022 i 2023. GUS. https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/transport-i-lacznosc/transport/transport-drogowy-w-polsce-w-latach-2022-i-2023,6,8.html
5. International Energy Agency. (2019). The Future of Rail: Opportunities for energy and the environment. IEA.
6. International Energy Agency. (2024). Global EV Outlook 2024. IEA.
7. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC (AR6), Chapter 10: Transport. Cambridge University Press.
8. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE). (2024). Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2024. Inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988–2022. Raport syntetyczny. Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy. https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/NIR_2024_raport_syntetyczny_PL.pdf
9. McKinnon, A. (2018). Decarbonizing Logistics: Distributing Goods in a Low-Carbon World. Kogan Page.
10. National Center for Sustainable Transportation (NCST). (2015). Reducing the Carbon Footprint of Heavy-Duty Trucks through Eco-Driving [policy brief]. https://ncst.ucdavis.edu/research-product/reducing-carbon-footprint-heavy-duty-trucks-through-eco-driving
11. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2019). Rozporządzenie (UE) 2019/1242 z dnia 20 czerwca 2019 r. ustanawiające normy emisji CO_2 dla nowych pojazdów ciężkich (Dz.U. UE L 198 z 25.07.2019, s. 202–240).
12. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2019). Rozporządzenie (UE) 2019/631 z dnia 17 kwietnia 2019 r. ustanawiające normy emisji CO_2 dla nowych samochodów

osobowych i nowych lekkich pojazdów użytkowych oraz uchylające rozporządzenia (WE) nr 443/2009 i (UE) nr 510/2011 (Dz.U. UE L 111 z 25.04.2019).
13. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2021). Komunikat Komisji: „Fit for 55": realizacja unijnego celu klimatycznego na 2030 r. na drodze do neutralności klimatycznej. COM(2021) 550 final.
14. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2023). Dyrektywa (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r. zmieniająca dyrektywę (UE) 2018/2001, rozporządzenie (UE) 2018/1999 i dyrektywę 98/70/WE w odniesieniu do promowania energii ze źródeł odnawialnych (RED III) (Dz.U. UE L 2023/2413 z 31.10.2023).
15. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2023). Dyrektywa (UE) 2023/959 z dnia 10 maja 2023 r. zmieniająca dyrektywę 2003/87/WE ustanawiającą system handlu uprawnieniami do emisji w Unii (m.in. wprowadzająca ETS2) (Dz.U. UE L 130 z 16.05.2023).
16. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2023). Rozporządzenie (UE) 2023/1804 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych (AFIR) (Dz.U. UE L 234 z 22.09.2023).
17. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2024). Rozporządzenie (UE) 2024/1257 z dnia 24 kwietnia 2024 r. (Euro 7) w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych i silników oraz układów, komponentów i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do takich pojazdów w odniesieniu do emisji i trwałości baterii (Dz.U. UE L 2024/1257 z 08.05.2024).
18. Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., & Edwards, R. (2020). JEC Well-To-Wheels report v5: Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context (EUR 30284 EN). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/100379
19. Ramachandran, S., & Stimming, U. (2015). Well-to-wheel analysis of low-carbon alternatives for road traffic. Energy & Environmental Science, 8(11), 3313–3324. https://doi.org/10.1039/C5EE01512J
20. Treiber, M., Kesting, A., & Thiemann, C. (2008). How much does traffic congestion increase fuel consumption and emissions? Applying a fuel consumption model to the NGSIM trajectory data. Transportation Research Board (TRB) 87th Annual Meeting paper.
21. Zhang, S., Zhao, P., Wang, F., Basma, H., Rodriguez, F., Wallington, T. J., Keoleian, G. A., & Wu, Y. (2025). Feasibility, cost and decarbonization potential of clean pathways for heavy-duty road transportation. Nature Reviews Clean Technology, 1, 846–860. https://doi.org/10.1038/s44359-025-00119-0

MIĘDZY STABILIZACJĄ A ADAPTACJĄ: SATYSFAKCJA Z PRACY, ZAANGAŻOWANIE ORGANIZACYJNE I ZAANGAŻOWANIE W PRACĘ W WARUNKACH KRYZYSU W BRANŻY PALIWOWEJ

Piotr IMAŃSKI[1], Liliana HAWRYSZ[2*]

[1] Akademia WSB, Dąbrowa Górnicza; piotr.imanski@student.wsb.edu.pl;
[2] Politechnika Wrocławska, Wrocław; liliana.hawrysz@pwr.edu.pl; identyfikator ORCID 0000-0002-0357-9930
* Korespondencja: liliana.hawrysz@pwr.edu.pl

Streszczenie: Celem artykułu była analiza satysfakcji z pracy, zaangażowania afektywnego, zaangażowania trwania oraz zaangażowania w pracę w warunkach kryzysowych w branży paliwowej. Badanie osadzono w kontekście nakładających się kryzysów związanych z pandemią COVID-19, napięciami geopolitycznymi oraz wojną w Ukrainie, które istotnie zwiększyły poziom niepewności organizacyjnej i presji środowiskowej. Badanie przeprowadzono w przedsiębiorstwie funkcjonującym w branży paliwowej. Analizie poddano cztery kluczowe konstrukty związane z postawami pracowników wobec pracy i organizacji: satysfakcję z pracy, zaangażowanie organizacyjne afektywne, zaangażowanie organizacyjne trwania oraz zaangażowanie w pracę. Uzyskane wyniki wskazują, że wpływ kryzysu miał przede wszystkim charakter stabilizujący, a nie destrukcyjny. Nie odnotowano istotnego spadku satysfakcji z pracy ani zaangażowania afektywnego pomimo długotrwałej niepewności i turbulencji otoczenia. Jednocześnie zaobserwowano wzrost zaangażowania trwania, co może wskazywać na wzrost znaczenia bezpieczeństwa zatrudnienia oraz postrzeganych kosztów odejścia z organizacji. Wyniki pokazały również dodatni profil zaangażowania w pracę, obejmujący wzrost gotowości do wysiłku, orientacji na jakość, otwartości na nowe sposoby pracy oraz ambicji zawodowej. Uzyskane rezultaty sugerują, że zasoby organizacyjne, stabilność relacji organizacyjnych oraz poczucie bezpieczeństwa mogą pełnić funkcję mechanizmów adaptacyjnych ograniczających negatywne skutki kryzysu. Badanie wnosi wkład do literatury dotyczącej zachowań organizacyjnych w warunkach kryzysowych poprzez integrację różnych wymiarów postaw pracowniczych w jednym modelu analitycznym oraz rozszerzenie wiedzy na temat funkcjonowania pracowników w sektorze paliwowym. Wyniki wskazują również, że pozytywne postawy pracowników mogą stanowić mikrofundamenty zdolności adaptacyjnych i odporności organizacyjnej w sektorach funkcjonujących w warunkach wysokiej niepewności i ryzyka operacyjnego.

Słowa kluczowe: kryzys, postawy związane z pracą, zaangażowanie organizacyjne, zaangażowanie w pracę, satysfakcja z pracy.

BETWEEN STABILIZATION AND ADAPTATION: JOB SATISFACTION, ORGANIZATIONAL COMMITMENT AND WORK ENGAGEMENT IN CRISIS CONDITIONS IN THE FUEL INDUSTRY

Abstract: The aim of the article was to analyse job satisfaction, affective commitment, continuance commitment, and work engagement under crisis conditions in the fuel industry. The study was conducted in the context of overlapping crises related to the COVID-19 pandemic, geopolitical tensions, and the war in Ukraine, which significantly increased organizational uncertainty and environmental pressure. The research was carried out in a company operating in the fuel sector. Four key constructs related to employees' attitudes toward work and the organization were analysed: job satisfaction, affective organizational commitment, continuance organizational commitment, and work engagement. The results indicate that the impact of the crisis was primarily stabilizing rather than destructive. No significant decline in job satisfaction or affective commitment was observed despite prolonged uncertainty and environmental turbulence. At the same time, continuance commitment increased, suggesting the growing importance of job security and perceived costs of leaving the organization. The findings also revealed a positive profile of work engagement, including greater willingness to exert effort, quality orientation, openness to new ways of working, and professional ambition. The results suggest that organizational resources, stable organizational relationships, and a sense of security may mitigate the negative effects of crisis conditions. The study contributes to the literature on organizational behaviour under crisis conditions by integrating different dimensions of employee attitudes within a single analytical model and extending knowledge about employee functioning in the fuel sector. The findings also indicate that positive employee attitudes may constitute microfoundations of adaptive capabilities and organizational resilience in sectors operating under high uncertainty and operational risk.

Keywords: crisis, work-related attitudes, organizational commitment, work engagement, job satisfaction.

Wprowadzanie

Kryzysy organizacyjne stanowią wielowymiarowe zjawiska, które w istotny sposób przekształcają warunki pracy, percepcję pracowników oraz funkcjonowanie organizacji. Spowolnienia gospodarcze, niestabilność geopolityczna, pandemie, kryzysy energetyczne oraz turbulencje rynkowe generują niepewność, nasilają obciążenie pracą, zwiększają presję psychiczną oraz osłabiają poczucie stabilności i przewidywalności zatrudnienia (Schaufeli, 2016; De Cuyper *et al.*, 2019). Sytuacje kryzysowe często zmuszają organizacje do wdrażania procesów restrukturyzacyjnych, redukcji zatrudnienia, zmiany organizacji pracy oraz zwiększania presji operacyjnej, co może znacząco wpływać na postawy pracowników wobec pracy i organizacji (Chanana, 2021). W branżach szczególnie podatnych na zmienność otoczenia, takich jak sektor paliwowo-energetyczny, konsekwencje kryzysów mogą być jeszcze bardziej odczuwalne ze względu na silne uzależnienie od globalnych łańcuchów

dostaw, wahań cen energii, napięć geopolitycznych, regulacji środowiskowych oraz wysokiego poziomu ryzyka operacyjnego. Z perspektywy zachowań organizacyjnych kryzysy wpływają nie tylko na dobrostan psychologiczny pracowników, ale również na ich postawy i zachowania związane z pracą. Do najważniejszych postaw związanych z pracą analizowanych w literaturze przedmiotu należą satysfakcja z pracy, zaangażowanie afektywne, zaangażowanie trwania oraz zaangażowanie w pracę (work engagement). Dotychczasowe badania wskazują, że niepewność i niestabilność mogą obniżać poziom zaufania pracowników do organizacji, osłabiać więź emocjonalną oraz negatywnie wpływać na satysfakcję i poziom zaangażowania (Meyer and Allen, 2012; Spector, 2014). Jednocześnie kryzysy mogą wzmacniać niektóre formy przywiązania organizacyjnego, szczególnie zaangażowanie trwania, ponieważ pracownicy dostrzegają ograniczone możliwości zatrudnienia poza organizacją i stają się bardziej zależni od stabilności zatrudnienia w okresach niepewności (Allen and Meyer, 1990). W konsekwencji kryzysy generują złożone i wielokierunkowe efekty w odniesieniu do postaw pracowniczych, co wymaga wielowymiarowej analizy psychologicznych konstruktów związanych z pracą. Warto jednak podkreślić, że kryzysy nie oddziałują na wszystkie postawy pracownicze w jednakowy sposób. Poszczególne postawy różnią się zarówno mechanizmami psychologicznymi, jak i dynamiką reakcji na niepewność oraz utratę zasobów organizacyjnych. Satysfakcja z pracy oraz zaangażowanie w pracę (work engagement) należą do konstruktów szczególnie wrażliwych na wzrost wymagań zawodowych, przeciążenie pracą, stres oraz ograniczenie zasobów organizacyjnych. Satysfakcja z pracy odnosi się do stopnia, w jakim pracownicy pozytywnie oceniają i emocjonalnie doświadczają swojej pracy (Spector, 2014). Odzwierciedla ona percepcję pracowników dotyczącą warunków pracy, wynagrodzenia, relacji ze współpracownikami, uznania oraz wsparcia organizacyjnego. W sytuacjach kryzysowych satysfakcja z pracy może ulegać obniżeniu na skutek zwiększonego obciążenia pracą, stresu, niepewności oraz pogorszenia warunków pracy (Yu *et al.*, 2020). Zaangażowanie w pracę (work engagement), definiowane jako pozytywny, związany z pracą stan psychiczny charakteryzujący się wigorem, oddaniem oraz absorpcją wykonywaną pracą (Schaufeli *et al.*, 2002). Zaangażowani pracownicy wykazują wyższy poziom energii, wytrwałości oraz aktywnego uczestnictwa w realizacji zadań pomimo niesprzyjających warunków. Jednak długotrwała ekspozycja na niepewność, nadmierne obciążenie pracą oraz presję psychiczną może prowadzić do spadku zaangażowania oraz wzrostu ryzyka wypalenia zawodowego (Schaufeli *et al.*, 2002). Zgodnie z modelem Job Demands–Resources (JD-R) nadmierne wymagania przy jednoczesnym ograniczeniu wsparcia organizacyjnego prowadzą do szybkiego spadku energii, motywacji oraz pozytywnych ocen pracy (Bakker and Demerouti, 2007, 2017). W konsekwencji satysfakcja z pracy oraz zaangażowanie w pracę reagują stosunkowo szybko na pogorszenie warunków pracy oraz wzrost niepewności organizacyjnej. Jednocześnie część badań wskazuje, że wsparcie organizacyjne oraz pozytywne relacje interpersonalne mogą częściowo ograniczać negatywne skutki kryzysu i podtrzymywać poziom satysfakcji pracowników i ich zaangażowania (Eisenberger *et al.*, 1997; Zeffane, Melhem and

Baguant, 2018; Imran *et al.*, 2020). Odmienny charakter posiada zaangażowanie afektywne, które w większym stopniu zależy od jakości relacji organizacyjnych, identyfikacji z organizacją oraz poczucia wspólnoty wartości (Allen, 1990; Meyer and Allen, 1991). Pracownicy o wysokim poziomie zaangażowania afektywnego pozostają w organizacji, ponieważ chcą w niej pracować i dostrzegają zgodność pomiędzy własnymi wartościami a wartościami organizacji (Beck and Wilson, 2000). Sytuacje kryzysowe mogą osłabiać zaangażowanie afektywne ze względu na wzrost poczucia zagrożenia, niepewność, restrukturyzację organizacyjną oraz spadek zaufania wobec kierownictwa (Chanana, 2021). Brak komunikacji, utrata zaufania do kierownictwa lub poczucie niesprawiedliwości organizacyjnej mogą prowadzić do istotnego osłabienia zaangażowania afektywnego, nawet jeśli inne postawy pozostają względnie stabilne. Jeszcze odmienny mechanizm dotyczy zaangażowania trwania, które opiera się przede wszystkim na kalkulacji kosztów odejścia z organizacji, a nie na emocjonalnym przywiązaniu czy energii do działania (Meyer and Allen, 2012). Zaangażowanie trwania odzwierciedla ocenę potencjalnych strat związanych z opuszczeniem organizacji, takich jak utrata bezpieczeństwa finansowego, świadczeń, pozycji zawodowej lub ograniczone możliwości znalezienia alternatywnego zatrudnienia. W warunkach kryzysowych zaangażowanie trwania może więc wzrastać nawet wtedy, gdy satysfakcja z pracy lub zaangażowanie w pracę ulegają osłabieniu. Oznacza to, że pracownicy mogą pozostawać w organizacji nie dlatego, że są zmotywowani i emocjonalnie związani z organizacją, ale dlatego, że postrzegają odejście jako zbyt ryzykowne lub kosztowne. W ostatnich latach coraz częściej podkreśla się również, że wpływ kryzysów na postawy pracowników nie musi mieć wyłącznie charakteru destrukcyjnego. Część organizacji rozwija bowiem zdolności adaptacyjne i mechanizmy odporności organizacyjnej (organizational resilience), które pozwalają utrzymywać względną stabilność funkcjonowania nawet w warunkach wysokiej turbulencji otoczenia (Vogus and Sutcliffe, 2007; Weick and Sutcliffe, 2007). W tym ujęciu szczególnego znaczenia nabierają zasoby organizacyjne, jakość relacji społecznych, zaufanie organizacyjne, poczucie bezpieczeństwa oraz zdolność organizacji do podtrzymywania pozytywnych postaw pracowników pomimo wzrostu presji środowiskowej. Literatura dotycząca organizacyjnej odporności wskazuje, że satysfakcja z pracy, zaangażowanie organizacyjne oraz zaangażowanie w pracę mogą pełnić funkcję mikrofundamentów zdolności adaptacyjnych organizacji, wspierając utrzymanie ciągłości działania, elastyczność organizacyjną oraz gotowość do adaptacji w sytuacjach kryzysowych (Zakrzewska-Bielawska, 2017, 2021; Hawrysz *et al.*, 2024). Podobne wnioski pojawiają się również w badaniach dotyczących efektywności pracy i zachowań organizacyjnych prowadzonych w warunkach kryzysowych, które wskazują, że postawy związane z pracą mogą stanowić istotny mechanizm pośredniczący pomiędzy praktykami zarządczymi, warunkami organizacyjnymi a efektywnością funkcjonowania pracowników i organizacji (Bieńkowska and Tworek, 2020; Bieńkowska, Koszela and Tworek, 2021; Bieńkowska *et al.*, 2022). Z perspektywy tej koncepcji kluczowe staje się więc nie tylko identyfikowanie negatywnych skutków kryzysów dla pracowników, ale również analiza mechanizmów pozwalających

organizacjom podtrzymywać pozytywne postawy pracownicze w warunkach długotrwałej niepewności. Dotychczasowe badania szeroko analizowały wybrane postawy pracowników w sytuacjach kryzysowych. Badania prowadzone w czasie pandemii COVID-19 koncentrowały się przede wszystkim na pracownikach ochrony zdrowia, nauczycielach, pracownikach sektora publicznego oraz organizacjach usługowych (Chen *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2020; Chanana, 2021). Wyniki tych badań wskazywały najczęściej, że kryzysy negatywnie wpływają na satysfakcję z pracy, dobrostan emocjonalny oraz zaangażowanie w pracę, jednocześnie zwiększając poziom stresu, niepewności zatrudnienia oraz intencji odejścia z organizacji. Badania potwierdziły również, że wsparcie organizacyjne oraz jakość przywództwa mogą ograniczać negatywne skutki kryzysów (Eisenberger *et al.*, 1997; Rhoades and Eisenberger, 2002; Kurtessis *et al.*, 2017; Zeffane, Melhem and Baguant, 2018; Imran *et al.*, 2020). Ponadto analizy osadzone w teorii zaangażowania organizacyjnego wskazują, że zaangażowanie afektywne ma tendencję do osłabiania się w okresach niestabilności, podczas gdy zaangażowanie trwania może wzrastać na skutek poczucia niepewności zatrudnienia oraz ograniczonych alternatyw na rynku pracy (Meyer and Allen, 1991; Meyer and Allen, 2012). Pomimo rosnącej liczby badań dotyczących postaw pracowników w warunkach kryzysowych, nadal istnieje kilka istotnych luk badawczych. Po pierwsze, dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na sektorze ochrony zdrowia, edukacji, usługach oraz administracji publicznej, podczas gdy branża paliwowa pozostaje relatywnie słabo rozpoznana. Jest to szczególnie zaskakujące, biorąc pod uwagę fakt, że sektor paliwowy doświadczał w ostatnich latach nakładających się kryzysów związanych z pandemią COVID-19, napięciami geopolitycznymi, zakłóceniami dostaw energii, presją inflacyjną oraz transformacją energetyczną i środowiskową. Po drugie, wcześniejsze badania najczęściej analizowały pojedyncze konstrukty, takie jak satysfakcja z pracy lub zaangażowanie w pracę, bez jednoczesnego uwzględnienia różnych wymiarów postaw organizacyjnych w jednym modelu analitycznym. W rezultacie wiedza dotycząca tego, w jaki sposób satysfakcja z pracy, zaangażowanie afektywne, zaangażowanie trwania oraz zaangażowanie w pracę współwystępują i zmieniają się w warunkach kryzysowych, pozostaje ograniczona. Szczególnie mocno ograniczenie widoczne jest w sektorze paliwowym w Polsce – autorzy niniejszego opracowania nie odnaleźli w literaturze przedmiotu badań dotyczących wpływu kryzysu na postawy związane z pracą osób zatrudnionych w branży paliwowej. Po trzecie, literatura przedmiotu w niewystarczającym stopniu wyjaśnia mechanizmy psychologiczne kształtujące postawy pracowników w sektorach charakteryzujących się wysokim poziomem ryzyka operacyjnego, zmiennością ekonomiczną oraz strategicznym znaczeniem dla gospodarki, takich jak branża paliwowa. Pracownicy tego sektora funkcjonują w warunkach podwyższonej niepewności, wysokiej presji bezpieczeństwa oraz niestabilności rynkowej, co może generować specyficzne mechanizmy kształtowania postaw odmienne od obserwowanych w sektorach usługowych. W związku z tym konieczne są dalsze badania empiryczne pozwalające lepiej zrozumieć wpływ sytuacji kryzysowych na emocjonalne przywiązanie

pracowników do organizacji, poczucie konieczności pozostania w organizacji, satysfakcję z pracy oraz poziom zaangażowania w pracę w kontekście branży paliwowej. W odpowiedzi na wskazane luki badawcze celem niniejszego artykułu jest analiza satysfakcji z pracy, zaangażowania afektywnego, zaangażowania trwania oraz zaangażowania w pracę w warunkach kryzysowych w branży paliwowej.

Metodyka

Badanie oparto na analizie przypadku polskiego oddziału międzynarodowego koncernu paliwowego. Badanie przeprowadzono w wybranym przedsiębiorstwie ze względu na jego wielkość oraz zasięg działania – jest to jedno z największych przedsiębiorstw paliwowych na świecie i jedno z trzech największych działających na polskim rynku. Dodatkowo badanie zostało przeprowadzone wśród etatowych pracowników badanego podmiotu a zatrudnienie osób obsługujących stacje paliw bezpośrednio przez koncerny na podstawie umów o pracę nie jest w warunkach krajowych zjawiskiem powszechnym, albowiem w przeważającej części osoby takie są zatrudniane przez franczyzobiorców będących małymi podmiotami. Celem badań empirycznych była identyfikacja i ocena postaw związanych z pracą (job-related attitudes) w warunkach kryzysowych wywołanych pandemią COVID-19 oraz wybuchem konfliktu zbrojnego w Ukrainie. Badanie przeprowadzono w przedsiębiorstwie funkcjonującym w branży paliwowej w Polsce, wykorzystując metodę CAWI (Computer-Assisted Web Interview). Narzędzie badawcze stanowił ustrukturyzowany kwestionariusz ankietowy obejmujący zwalidowane skale pomiarowe opracowane na podstawie przeglądu literatury przedmiotu. Kwestionariusz umożliwiał pomiar satysfakcji z pracy, zaangażowania afektywnego, zaangażowania trwania, zaangażowania w pracę. Wszystkie zastosowane skale charakteryzowały się wysoką rzetelnością pomiaru. Wskaźniki α Cronbacha dla poszczególnych konstruktów osiągnęły wartości równe lub wyższe niż 0,70, spełniając tym samym rekomendowane w literaturze kryteria akceptowalnej spójności wewnętrznej. Pozycje kwestionariusza zostały pierwotnie opracowane w języku angielskim, a następnie przetłumaczone na język polski przez autorów badania. Kwestionariusz został udostępniony wszystkim pracownikom badanego przedsiębiorstwa za pośrednictwem wewnętrznego systemu komunikacji organizacyjnej, co ograniczało możliwość udziału osób niezwiązanych zawodowo z badaną organizacją. W badaniu uczestniczyło 409 respondentów, co stanowiło 16,36% populacji zatrudnionych w przedsiębiorstwie. W celu potwierdzenia, że respondenci postrzegali pandemię COVID-19 oraz konflikt zbrojny w Ukrainie jako sytuacje kryzysowe dla organizacji, zastosowano pytanie filtrujące: „Czy uważasz, że pandemia COVID-19 lub wojna w Ukrainie spowodowały, że firma musiała stawić czoła kryzysowi?”. Jedynie osoby, które udzieliły odpowiedzi twierdzącej, mogły przejść do dalszej części kwestionariusza.

Poszczególne postawy związane z pracą analizowano w perspektywie zmian wywołanych kryzysem. W tym celu zastosowano siedmiostopniową skalę Likerta, której krańce opisano jako: „zdecydowanie gorzej/trudniej/mniej niż przed kryzysem" oraz „zdecydowanie lepiej/łatwiej/bardziej niż przed kryzysem". Udział w badaniu miał charakter całkowicie dobrowolny. Respondenci mogli w dowolnym momencie zrezygnować z udziału bez żadnych konsekwencji. Badanie było w pełni anonimowe, a żadne dane umożliwiające identyfikację uczestników nie były gromadzone. Zebrany materiał empiryczny poddano analizie ilościowej z wykorzystaniem metod statystyki opisowej. Taka forma analizy umożliwiła identyfikację dominujących opinii oraz głównych tendencji dotyczących postaw związanych z pracą w warunkach kryzysowych. Interpretację wyników osadzono w dorobku nauk o zarządzaniu i jakości, natomiast podstawę teoretyczną badania stanowił przegląd literatury przedmiotu.

Satysfakcję z pracy mierzono trójelementową skalą opracowaną przez Peter Warr i Roy Payne (Warr and Payne, 1983). Afektywne zaangażowanie organizacyjne oceniano przy użyciu dziewięcioelementowej, zwalidowanej skali opracowanej przez John Cook i Toby Wall (Cook and Wall, 1980). Skala ta ujmuje postawę wobec organizacji poprzez trzy wymiary: lojalność wobec organizacji, gotowość do podejmowania wysiłku na jej rzecz oraz identyfikację organizacyjną.

Do pomiaru zaangażowania trwania wykorzystano pięcioelementową skalę opracowaną przez Natalie Allen i John Meyer (Allen and Meyer, 1990). Wymiar ten odnosi się do kalkulacji kosztów i ryzyka związanego z opuszczeniem organizacji, dlatego – w odróżnieniu od zaangażowania afektywnego – może wzrastać nawet przy braku wzrostu emocjonalnego przywiązania do organizacji.

Zaangażowanie w pracę mierzono skalą opracowaną przez Christopher Thomas (Thomas, 2007), wykorzystaną również w badaniach nad funkcjonowaniem pracowników w warunkach kryzysowych przez Abolnasser et al. (2023). Narzędzie składało się z dziewięciu pozycji i ujmowało zaangażowanie pracownika jako względnie trwałą, pozytywną relację z organizacją, przejawiającą się w gotowości do podejmowania wysiłku, rozwoju zawodowego oraz wysokiego poziomu inwestycji w wykonywane obowiązki.

Ze względu na osadzenie badania w kontekście kryzysowym związanym z pandemią COVID-19 oraz wybuchem wojny w Ukrainie, odpowiedzi respondentów interpretowane będą jako deklarowane zmiany względem okresu prekryzysowego. Taka operacjonalizacja umożliwi analizę nie tyle bezwzględnego poziomu postaw związanych z pracą, ile kierunku i natężenia ich zmian w warunkach kryzysowych.

W konsekwencji rozkład odpowiedzi dotyczących zaangażowania afektywnego będzie interpretowany jako wskaźniki stabilizacji lub erozji więzi organizacyjnej w warunkach niepewności i presji organizacyjnej. W przypadku zaangażowania trwania uzyskane odpowiedzi odzwierciedlać będą deklarowane zmiany związane z postrzeganiem bezpieczeństwa zatrudnienia, stabilności organizacyjnej, benefitów lub ograniczonej dostępności alternatyw zawodowych. Natomiast odpowiedzi odnoszące się do zaangażowania

w pracę interpretowane będą jako deklarowane zmiany poziomu inwestycji pracownika w wykonywane obowiązki, stanowiące wskaźnik stabilizacji, wzmocnienia lub osłabienia zaangażowania w warunkach zwiększonych wymagań adaptacyjnych.

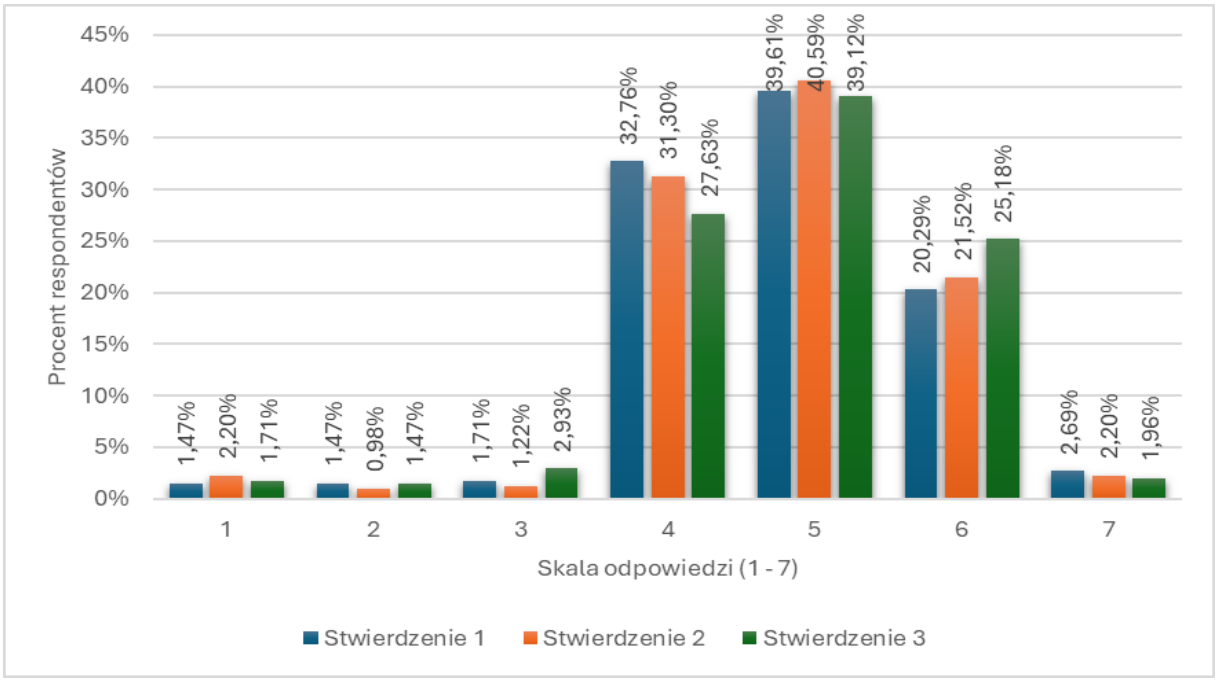
Wyniki badań

1.12. 3.1 Satysfakcja z pracy

W przypadku wszystkich pozycji badających satysfakcję z pracy (*„Lubię swoją pracę”*, *„Moja praca daje mi satysfakcję”*, *„Jestem zadowolona/y ze swojej pracy”*. dominowały odpowiedzi wskazujące na stabilizację lub umiarkowany wzrost satysfakcji względem okresu prekryzysowego. Największy odsetek respondentów deklarował, że lubi swoją pracę „trochę bardziej” niż przed kryzysem, natomiast odpowiedzi wskazujące na pogorszenie satysfakcji występowały marginalnie. Analogiczny profil odpowiedzi odnotowano zarówno dla ogólnego zadowolenia z pracy, jak i poczucia satysfakcji z wykonywanych obowiązków. Rozkład odpowiedzi na poszczególne sformułowania badające satysfakcję z pracy przedstawiono na wykresie 1.

Wykres 1.

Rozkład odpowiedzi na stwierdzenia badające satysfakcję z pracy



Źródło: opracowanie własne

Uzyskany rozkład odpowiedzi sugeruje, że warunki wysokiej niepewności związane z pandemią COVID-19 oraz wojną w Ukrainie nie doprowadziły do osłabienia satysfakcji zawodowej pracowników badanego przedsiębiorstwa. Wręcz przeciwnie, w wielu przypadkach

widoczna była tendencja do jej umiarkowanego wzrostu. Może to wskazywać, że organizacja skutecznie utrzymała poczucie bezpieczeństwa zatrudnienia i stabilności organizacyjnej, które w warunkach turbulencji zewnętrznych nabierają szczególnego znaczenia dla postrzegania jakości środowiska pracy.

1.13. 3.2 Zaangażowanie afektywne

W przypadku zaangażowania afektywnego dominowały odpowiedzi wskazujące na brak zmian lub umiarkowane wzmocnienie więzi organizacyjnej. Profil odpowiedzi sugeruje, że kryzys nie wywołał systematycznej erozji identyfikacji organizacyjnej, lojalności wobec przedsiębiorstwa ani gotowości do podejmowania wysiłku na rzecz organizacji. W większości analizowanych pozycji odsetek deklaracji pozytywnych wyraźnie przewyższał odpowiedzi wskazujące na pogorszenie badanych postaw (tabela 1).

Tabela 1.
Rozkład odpowiedzi na stwierdzenia badające zaangażowanie organizacyjne afektywne

Stwierdzenie	**Odp.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**N**
Jestem dość dumna/y mogąc powiedzieć ludziom dla jakiej firmy pracuję	Ilość	5	7	2	200	124	65	6	409
	Udział %	1,22%	1,71%	0,49%	48,90%	30,32%	15,89%	1,47%	
Czasami czuję, że chcę odejść z tej firmy	Ilość	46	112	81	119	33	9	9	409
	Udział %	11,25%	27,38%	19,80%	29,10%	8,07%	2,20%	2,20%	
Jestem skłonna/y do poświęceń dla dobra firmy	Ilość	7	4	4	192	141	58	3	409
	Udział %	1,71%	0,98%	0,98%	46,94%	34,47%	14,18%	0,73%	
Nawet gdyby firma nie była w zbyt dobrej kondycji finansowej nie byłabym/byłbym skłonna/y zmienić pracodawcę	Ilość	4	6	13	179	129	74	4	409
	Udział %	0,98%	1,47%	3,18%	43,77%	31,54%	18,09%	0,98%	
Czuję się częścią firmy	Ilość	7	3	4	180	130	80	5	409
	Udział %	1,71%	0,73%	0,98%	44,01%	31,78%	19,56%	1,22%	
W pracy lubię czuć, że wkładam wysiłek nie tylko dla siebie, ale również dla firmy	Ilość	4	2	2	222	109	66	4	409
	Udział %	0,98%	0,49%	0,49%	54,28%	26,65%	16,14%	0,98%	
Oferta nieco lepszych zarobków u innego pracodawcy nie skłoniłaby mnie do zmiany pracy	Ilość	5	9	19	167	127	74	8	409
	Udział %	1,22%	2,20%	4,65%	40,83%	31,05%	18,09%	1,96%	
Poleciłabym/poleciłbym przyjacielowi pracę w mojej firmie	Ilość	8	3	6	69	92	214	17	409
	Udział %	1,96%	0,73%	1,47%	16,87%	22,49%	52,32%	4,16%	
Świadomość, że moja praca przyczynia się dla dobra firmy spodobałaby mi się	Ilość	4	2	2	206	119	69	7	409
	Udział %	0,98%	0,49%	0,49%	50,37%	29,10%	16,87%	1,71%	

Źródło: opracowanie własne

Na uwagę zasługuje również niski poziom deklarowanego wzrostu intencji odejścia z organizacji. Większość respondentów wskazywała, że kryzys nie zwiększył ich skłonności do zmiany pracodawcy, a znaczna część badanych deklarowała wręcz spadek chęci odejścia z firmy. Wyniki te można interpretować zarówno jako przejaw utrzymania lojalności

organizacyjnej, jak i efekt wzrostu znaczenia stabilności zatrudnienia w warunkach niestabilności otoczenia gospodarczego oraz ograniczonej przewidywalności rynku pracy.

Najbardziej wyrazisty profil odpowiedzi odnotowano w przypadku gotowości do rekomendowania badanego przedsiębiorstwa jako pracodawcy. Zdecydowana większość respondentów deklarowała większą skłonność do polecenia pracy w organizacji niż przed kryzysem. Taki rozkład odpowiedzi może świadczyć o pozytywnej ocenie sposobu zarządzania organizacją w warunkach turbulencji oraz relatywnie wysokim poziomie zaufania organizacyjnego i bezpieczeństwa psychologicznego pracowników. Również w obszarze gotowości do podejmowania wysiłku na rzecz organizacji dominowały odpowiedzi wskazujące na stabilizację lub wzrost zaangażowania. Pracownicy deklarowali większą skłonność do poświęceń dla dobra organizacji oraz utrzymanie wysokiego poziomu satysfakcji z działań realizowanych nie tylko na rzecz własnych celów, ale również dobra przedsiębiorstwa. Wyniki te mogą wskazywać na utrzymanie norm wzajemności organizacyjnej i relatywnie wysokiego poziomu solidarności organizacyjnej w warunkach presji adaptacyjnej.

3.3 Zaangażowanie trwania

W przypadku zaangażowania organizacyjnego trwania uzyskane wyniki wskazują na wzrost znaczenia bezpieczeństwa zatrudnienia oraz postrzeganych kosztów odejścia z organizacji. W większości analizowanych pozycji dominowały odpowiedzi sugerujące wzrost odczuwanych barier związanych ze zmianą miejsca pracy. Szczególnie widoczne było to w odniesieniu do postrzeganych zakłóceń życiowych związanych z potencjalnym odejściem z organizacji, utraty benefitów oraz trudności związanych ze zmianą pracodawcy (tabela 2). Uzyskane wyniki sugerują, że w warunkach wysokiej niepewności wzrosło znaczenie stabilizacji zatrudnienia oraz bezpieczeństwa organizacyjnego. W przeciwieństwie do zaangażowania afektywnego, komponent trwania może wzmacniać się nie tylko wskutek pozytywnej więzi emocjonalnej z organizacją, lecz również w efekcie wzrostu postrzeganego ryzyka związanego z odejściem oraz ograniczenia dostępności alternatyw zawodowych. Jednocześnie odpowiedzi dotyczące postrzegania alternatyw na rynku pracy miały bardziej zróżnicowany charakter, co może wskazywać, że wpływ kryzysu na percepcję możliwości zawodowych był niejednorodny.

Tabela 2.
Wyniki odpowiedzi na stwierdzenia badające zaangażowanie trwania

Stwierdzenie	Odpowiedzi	1	2	3	4	5	6	7	N
Zbyt wiele w moim życiu uległoby zakłóceniu gdybym się zdecydował/a teraz odejść z firmy	Ilość	8	4	2	93	139	150	13	409
	Udział %	1,96%	0,98%	0,49%	22,74%	33,99%	36,67%	3,18%	
Jednym z głównych powodów dla których ciągle pracuję w tej firmie jest to że odejście wymagałoby zbyt wielu osobistych poświęceń - inna organizacja mogłaby nie dać mi tylu benefitów ile mam tutaj	Ilość	6	1	3	69	128	186	16	409
	Udział %	1,47%	0,24%	0,73%	16,87%	31,30%	45,48%	3,91%	
Obecnie pozostanie w firmie jest w równym stopniu kwestią konieczności jak i pragnień	Ilość	6	10	16	145	115	111	6	409
	Udział %	1,47%	2,44%	3,91%	35,45%	28,12%	27,14%	1,47%	
Byłoby mi ciężko odejść teraz z firmy nawet gdybym tego chciał/a	Ilość	7	5	4	72	125	181	15	409
	Udział %	1,71%	1,22%	0,98%	17,60%	30,56%	44,25%	3,67%	
Czuję, że mam zbyt mało opcji, aby rozważać odejście z firmy	Ilość	5	72	51	156	49	71	5	409
	Udział %	1,22%	17,60%	12,47%	38,14%	11,98%	17,36%	1,22%	

Źródło: opracowanie własne

3.4 Zaangażowanie w pracę

W obszarze zaangażowania w pracę dominowały odpowiedzi wskazujące na wzrost orientacji na rozwój, jakość oraz gotowość do intensywnego wykonywania obowiązków zawodowych. Szczególnie wyraźny dodatni profil odpowiedzi odnotowano w przypadku deklaracji dotyczących ambicji zawodowych, dążenia do poprawy wyników pracy oraz otwartości na nowe sposoby wykonywania obowiązków. Znaczna część respondentów deklarowała również wzrost ekscytacji związanej z wdrażaniem nowych rozwiązań zwiększających efektywność pracy (tabela 3). Podobny rozkład odpowiedzi odnotowano dla pozycji związanych z gotowością do ponadstandardowego wysiłku, pełnego zaangażowania w wykonywane obowiązki oraz wkładania „całego serca" w pracę. W większości przypadków deklaracje wskazujące na wzrost tych postaw wyraźnie przewyższały odpowiedzi negatywne, które występowały marginalnie. Uzyskane wyniki mogą świadczyć o relatywnie wysokiej odporności organizacyjnej pracowników badanego przedsiębiorstwa oraz zdolności adaptacyjnej wobec zmian wywołanych przez sytuacje kryzysowe. Pozytywny profil odpowiedzi widoczny był również w obszarze orientacji na jakość oraz poczucia dumy z wykonywanej pracy. Większość respondentów deklarowała wzrost znaczenia jakości wykonywanych obowiązków oraz większą dumę z pracy dla badanego przedsiębiorstwa w porównaniu z okresem sprzed kryzysu. Wyniki te mogą sugerować, że organizacja skutecznie utrzymała motywacyjne i jakościowe aspekty funkcjonowania pracowników pomimo presji wynikającej z niestabilności otoczenia.

Tabela 3.
Wyniki odpowiedzi na stwierdzenia badające zaangażowanie w pracę

Stwierdzenie	Odpowiedzi	1	2	3	4	5	6	7	N
Jestem naprawdę chętna/y do osiągania ambitnych celów zawodowych	Ilość	4	2	3	127	186	79	8	409
	Udział %	0,98%	0,49%	0,73%	31,05%	45,48%	19,32%	1,96%	
Jestem gotowa/y w pełni poświęcić się wykonywanym obowiązkom	Ilość	5	1	7	168	158	65	5	409
	Udział %	1,22%	0,24%	1,71%	41,08%	38,63%	15,89%	1,22%	
Jestem podekscytowana/y na myśl o nowych sposobach pracy które zwiększą moją efektywność	Ilość	4	4	5	98	121	160	17	409
	Udział %	0,98%	0,98%	1,22%	23,96%	29,58%	39,12%	4,16%	
Jestem entuzjastycznie nastawiona/y do dostarczania produktów i usług wysokiej jakości	Ilość	3	2	5	94	113	175	17	409
	Udział %	0,73%	0,49%	1,22%	22,98%	27,63%	42,79%	4,16%	
Jestem zawsze gotowa/y iść "o krok dalej" aby dobrze wykonywać swoją pracę	Ilość	2	4	4	242	129	24	4	409
	Udział %	0,49%	0,98%	0,98%	59,17%	31,54%	5,87%	0,98%	
Próba ciągłej poprawy moich wyników w pracy jest dla mnie bardzo ważna	Ilość	3	2	2	130	186	81	5	409
	Udział %	0,73%	0,49%	0,49%	31,78%	45,48%	19,80%	1,22%	
Moja praca jest dla mnie powodem do dumy	Ilość	8	3	4	148	166	72	8	409
	Udział %	1,96%	0,73%	0,98%	36,19%	40,59%	17,60%	1,96%	
Zależy mi na tym aby wszystkie swoje obowiązki wykonywać kompleksowo i dokładnie	Ilość	2	1	1	139	185	76	5	409
	Udział %	0,49%	0,24%	0,24%	33,99%	45,23%	18,58%	1,22%	
Jestem gotowa/y wkładać całe serce w swoją pracę	Ilość	5	1	5	165	181	49	3	409
	Udział %	1,22%	0,24%	1,22%	40,34%	44,25%	11,98%	0,73%	

Źródło: opracowanie własne

Dyskusja

Uzyskane wyniki wskazują, że wpływ kryzysu związanego z pandemią COVID-19 oraz wybuchem wojny w Ukrainie na postawy związane z pracą w badanej organizacji miał przede wszystkim charakter stabilizujący, a nie destrukcyjny. Na poziomie syntetycznym widoczne są trzy zasadnicze prawidłowości. Po pierwsze, satysfakcja z pracy oraz zaangażowanie organizacyjne afektywne nie uległy istotnemu osłabieniu pomimo długotrwałych turbulencji i wysokiej niepewności otoczenia. Po drugie, silniejszy wzrost odnotowano w przypadku zaangażowania organizacyjnego trwania, co sugeruje wzrost znaczenia bezpieczeństwa zatrudnienia, stabilności organizacyjnej oraz postrzeganych kosztów odejścia z organizacji (Allen and Meyer, 1990; Meyer and Herscovitch, 2001). Po trzecie, zaangażowanie w pracę przyjęło wyraźnie dodatni profil, obejmujący wzrost gotowości do wysiłku, orientacji na jakość, otwartości na nowe sposoby pracy oraz ambicji zawodowej. Taki układ wyników

pozwala interpretować badany przypadek nie jako przykład erozji postaw pracowniczych pod wpływem kryzysu, lecz raczej jako przejaw organizacyjnej odporności, rozumianej jako zdolność organizacji do utrzymania względnej stabilności funkcjonowania oraz podtrzymywania pozytywnych postaw pracowników w warunkach presji zewnętrznej (Weick and Sutcliffe, 2007; Vogus and Sutcliffe, 2007).

Wyniki dotyczące satysfakcji z pracy częściowo pozostają zgodne z klasycznym dorobkiem (Warr and Payne, 1983), jednak jednocześnie wykraczają poza dominujący w literaturze schemat interpretacyjny, zgodnie z którym kryzys prowadzi przede wszystkim do pogorszenia ocen pracy i dobrostanu pracowników (Gutiérrez Banegas *et al.*, 2022),. Dotychczasowe badania wskazują, że do głównych mechanizmów obniżających satysfakcję zawodową w warunkach kryzysowych należą wzrost niepewności, przeciążenie pracą, stres oraz poczucie zagrożenia zatrudnienia. W badanym przedsiębiorstwie nie zaobserwowano jednak dominacji negatywnych odpowiedzi, co może sugerować, że kryzys nie musi automatycznie prowadzić do pogorszenia satysfakcji z pracy (Abolnasser *et al.*, 2023), jeśli organizacja utrzymuje względnie wysoki poziom bezpieczeństwa, przewidywalności działania oraz poczucia sensu pracy. Interpretacja ta pozostaje spójna z modelem JD-R, zgodnie z którym zasoby organizacyjne mogą amortyzować negatywne skutki presji środowiskowej i podtrzymywać pozytywne postawy związane z pracą (Bakker and Demerouti, 2007). W świetle modelu JD-R szczególnego znaczenia nabiera zdolność organizacji do utrzymania zasobów pracy i zasobów osobistych, które w warunkach wysokich wymagań stają się podstawowym źródłem motywacji oraz dobrostanu pracowników (Schaufeli and Bakker, 2004; Bakker and Demerouti, 2017). Szczególnie interesująca jest relacja pomiędzy zaangażowaniem organizacyjnym afektywnym a zaangażowaniem organizacyjnym trwania. Z jednej strony widoczny był wzrost komponentu kalkulacyjnego związanego z kosztami odejścia i wartością stabilizacji zatrudnienia, z drugiej jednak utrzymaniu lub nawet wzmocnieniu uległa emocjonalna więź pracowników z organizacją. Respondenci częściej deklarowali dumę z pracy dla przedsiębiorstwa, gotowość rekomendowania pracodawcy oraz poczucie przynależności organizacyjnej. Wyniki te pozostają zgodne z koncepcją zaangażowania organizacyjnego zaproponowaną przez Allen i Meyer (1990) oraz późniejszym ujęciem Meyera i Herscovitcha (2001), zgodnie z którym zaangażowanie stanowi siłę wiążącą jednostkę z określonym kierunkiem działania, choć może opierać się na odmiennych mechanizmach psychologicznych afektywnych, normatywnych lub kalkulatywnych. W badanym przypadku wzrost zaangażowania trwania można interpretować nie wyłącznie jako efekt oportunistycznej kalkulacji kosztów odejścia, lecz również jako adaptacyjny mechanizm zabezpieczający ciągłość funkcjonowania jednostki w warunkach podwyższonej niepewności. Jednocześnie relatywnie wysokie wyniki komponentu afektywnego sugerują, że relacja organizacji z pracownikami nie została zredukowana do wymiaru wyłącznie transakcyjnego (Tworek *et al.*, 2023). Wynik ten koresponduje także z badaniami polskich autorów poświęconymi modelom efektywności pracy w czasie kryzysu, którzy wykazują, że postawy związane z pracą mogą stanowić kluczowy mechanizm

pośredniczący między praktykami zarządczymi a wynikami pracy (Bieńkowska and Tworek, 2020; Bieńkowska, Koszela and Tworek, 2021; Bieńkowska *et al.*, 2022). Uzyskane wyniki można osadzić również w szerszych rozważaniach dotyczących funkcjonowania organizacji w turbulentnym otoczeniu. Zakrzewska-Bielawska podkreśla, że współczesne organizacje funkcjonujące w warunkach wysokiej zmienności i nieprzewidywalności muszą rozwijać zdolności dynamiczne oraz elastyczne mechanizmy adaptacyjne (Zakrzewska-Bielawska, 2017, 2021). Wnioski płynące z niniejszego badania pozostają zgodne z tym podejściem. Utrzymanie więzi organizacyjnych, wzrost orientacji na jakość oraz otwartość pracowników na nowe sposoby pracy mogą być interpretowane jako mikrofundamenty zdolności adaptacyjnych organizacji. Podobne mechanizmy wskazywane są również w badaniach nad odpornością organizacyjną, które podkreślają znaczenie zaufania, stabilności relacji organizacyjnych oraz satysfakcji zawodowej dla skutecznego funkcjonowania organizacji w warunkach kryzysowych (Hawrysz *et al.*, 2024).

Na szczególną uwagę zasługują wyniki dotyczące zaangażowania w pracę. Pracownicy badanego przedsiębiorstwa nie przyjęli postawy defensywnej charakterystycznej dla części organizacji funkcjonujących w warunkach kryzysowych. Wręcz przeciwnie, odnotowano wzrost gotowości do wysiłku, orientacji na rozwój, otwartości na nowe rozwiązania organizacyjne oraz koncentracji na jakości wykonywanej pracy. Wyniki te pozostają zgodne z nurtem work engagement rozwijanym przez Schaufeliego i Bakkera, zgodnie z którym zaangażowanie stanowi względnie trwały, pozytywny stan związany z pracą, przejawiający się wigorem, oddaniem oraz absorpcją (Schaufeli and Bakker, 2004; Bakker and Demerouti, 2008). W tym ujęciu dostępność zasobów organizacyjnych, możliwość uczenia się oraz poczucie wpływu mogą prowadzić do wzrostu zaangażowania nawet w warunkach wysokiej presji środowiskowej. Uzyskane rezultaty sugerują zatem, że kryzys może pełnić nie tylko funkcję destabilizującą, lecz również uruchamiać mechanizmy mobilizacji i adaptacji, wzmacniające aktywność oraz orientację rozwojową pracowników. Celem niniejszego artykułu jest analiza satysfakcji z pracy, zaangażowania afektywnego, zaangażowania trwania oraz zaangażowania w pracę w warunkach kryzysowych w branży paliwowej. Poprzez integrację wymienionych konstruktów w ramach jednego modelu analitycznego badanie wnosi wkład do literatury dotyczącej zachowań organizacyjnych w czasie kryzysu oraz dostarcza praktycznych implikacji dla zarządzania pracownikami w strategicznie istotnych i silnie turbulentnych sektorach gospodarki.

Implikacje teoretyczne

Uzyskane wyniki wnoszą wkład do literatury dotyczącej postaw związanych z pracą w warunkach kryzysowych, wskazując, że długotrwałe turbulencje nie muszą prowadzić do erozji więzi organizacyjnych ani spadku zaangażowania pracowników. Badanie rozszerza dotychczasowe ujęcia koncentrujące się przede wszystkim na negatywnych konsekwencjach kryzysów organizacyjnych dla dobrostanu i funkcjonowania pracowników, pokazując, że w

określonych warunkach organizacyjnych możliwe jest utrzymanie, a nawet wzmocnienie wybranych postaw związanych z pracą. Wyniki badania wspierają również założenia modelu JD-R, zgodnie z którym zasoby organizacyjne mogą amortyzować skutki wysokich wymagań środowiskowych oraz podtrzymywać pozytywne postawy pracowników nawet w warunkach długotrwałej presji. Jednocześnie badanie rozwija literaturę dotyczącą zaangażowania organizacyjnego poprzez pokazanie, że komponent afektywny i komponent trwania mogą wzmacniać się równolegle, choć opierają się na odmiennych mechanizmach psychologicznych. Uzyskane rezultaty sugerują ponadto, że zaangażowanie trwania w warunkach kryzysowych nie powinno być interpretowane wyłącznie jako przejaw kalkulacyjnego oportunizmu, lecz może pełnić funkcję adaptacyjną, stabilizującą funkcjonowanie jednostki oraz organizacji. Badanie wnosi również wkład do rozwijającego się nurtu badań nad odpornością organizacyjną, wskazując, że utrzymanie pozytywnych postaw pracowników może stanowić jeden z mikrofundamentów zdolności adaptacyjnych organizacji funkcjonujących w warunkach wysokiej niepewności. Badanie wnosi również wkład do ograniczonej dotychczas literatury dotyczącej funkcjonowania postaw pracowniczych w branży paliwowej, która pozostaje relatywnie słabo rozpoznanym kontekstem badań nad zachowaniami organizacyjnymi w warunkach kryzysowych. Uzyskane wyniki sugerują, że w sektorach charakteryzujących się wysokim poziomem ryzyka operacyjnego, silną presją bezpieczeństwa oraz dużą zmiennością otoczenia mechanizmy kształtowania postaw pracowniczych mogą przyjmować odmienny charakter niż w organizacjach usługowych lub administracyjnych. W szczególności utrzymanie satysfakcji z pracy oraz zaangażowania afektywnego przy jednoczesnym wzroście zaangażowania trwania może odzwierciedlać adaptacyjne mechanizmy psychologiczne charakterystyczne dla organizacji funkcjonujących w sektorach strategicznych i wysokiego ryzyka

Implikacje praktyczne

Uzyskane wyniki wskazują, że sposób reagowania organizacji na sytuacje kryzysowe może odgrywać kluczową rolę w utrzymaniu pozytywnych postaw pracowników. W szczególności istotne znaczenie mogą mieć działania wzmacniające poczucie bezpieczeństwa zatrudnienia, stabilności organizacyjnej, jakości komunikacji oraz sensu wykonywanej pracy. Wyniki sugerują również, że w warunkach turbulencji organizacje nie powinny koncentrować się wyłącznie na minimalizowaniu negatywnych skutków kryzysu, lecz również na wzmacnianiu zasobów organizacyjnych i relacyjnych sprzyjających adaptacji pracowników. Z perspektywy zarządzania zasobami ludzkimi szczególnie istotne wydaje się wspieranie kultury organizacyjnej opartej na zaufaniu, transparentnej komunikacji oraz podtrzymywaniu identyfikacji organizacyjnej. Uzyskane wyniki pokazują również, że nawet w warunkach wysokiej niepewności możliwe jest utrzymanie orientacji na jakość, rozwoju kompetencji oraz otwartości pracowników na zmiany organizacyjne i nowe sposoby pracy. Oznacza to, że

organizacje mogą traktować sytuacje kryzysowe nie wyłącznie jako zagrożenie, lecz również jako impuls do wzmacniania zdolności adaptacyjnych i rozwojowych pracowników.

Ograniczenia badania i kierunki dalszych badań

Niniejsze badanie posiada kilka ograniczeń, które należy uwzględnić przy interpretacji wyników. Po pierwsze, badanie miało charakter pojedynczego studium przypadku, obejmującego jedno przedsiębiorstwo funkcjonujące w branży paliwowej, co ogranicza możliwość generalizacji rezultatów na inne organizacje i sektory gospodarki. Po drugie, zastosowane podejście opierało się na deklaracjach respondentów, co wiąże się z ryzykiem wystąpienia subiektywizmu ocen. Po trzecie, badanie miało charakter przekrojowy, przez co nie pozwala na analizę zmian postaw pracowników w czasie ani na identyfikację zależności przyczynowo-skutkowych. W przyszłych badaniach zasadne byłoby przeprowadzenie analiz longitudinalnych umożliwiających obserwację dynamiki postaw związanych z pracą w różnych fazach kryzysu i okresach pokryzysowych. Warto również rozszerzyć zakres badań o organizacje reprezentujące odmienne sektory gospodarki oraz różne modele organizacyjne, co pozwoliłoby na identyfikację czynników kontekstowych wpływających na odporność postaw pracowniczych. Interesującym kierunkiem dalszych badań byłoby także uwzględnienie zmiennych pośredniczących i moderujących, takich jak przywództwo, wsparcie organizacyjne, kultura organizacyjna, odporność psychologiczna pracowników czy poziom zaufania organizacyjnego. Dalsze badania mogłyby również pogłębić analizę relacji pomiędzy zaangażowaniem organizacyjnym afektywnym i zaangażowaniem trwania w warunkach długotrwałej niepewności organizacyjnej.

Podsumowanie

Podsumowując, wyniki analizy zmian w zakresie satysfakcji z pracy, zaangażowania afektywnego i trwania oraz zaangażowania w pracę wskazują, że w warunkach wielowymiarowego kryzysu związanego zarówno z pandemią COVID-19, jak i wybuchem wojny w Ukrainie, postawy pracowników badanego przedsiębiorstwa uległy przede wszystkim stabilizacji, a w niektórych obszarach nawet wzmocnieniu. Pomimo nasilonej presji środowiskowej oraz wysokiego poziomu niepewności nie zaobserwowano istotnej erozji satysfakcji z pracy ani zaangażowania afektywnego. Jednocześnie odnotowano wyraźny wzrost zaangażowania trwania, co wskazuje na większe znaczenie czynników związanych z bezpieczeństwem zatrudnienia, stabilnością organizacyjną oraz postrzeganymi kosztami odejścia z organizacji.

Uzyskane wyniki podkreślają znaczenie zasobów organizacyjnych jako mechanizmów amortyzujących negatywne skutki kryzysu. Czynniki takie jak jakość komunikacji

organizacyjnej, poczucie bezpieczeństwa, stabilność zatrudnienia czy sposób zarządzania mogą odgrywać kluczową rolę w podtrzymywaniu pozytywnych postaw pracowników w warunkach turbulencji. Szczególnie istotny wydaje się dodatni profil zmian dotyczących zaangażowania w pracę. Wzrost gotowości do wysiłku, otwartości na nowe sposoby pracy, orientacji na jakość oraz ambicji zawodowej sugeruje obecność mechanizmów proaktywnych i adaptacyjnych. Oznacza to, że w warunkach kryzysowych pracownicy nie ograniczają się wyłącznie do ochrony własnej pozycji zawodowej, lecz mogą również intensyfikować działania ukierunkowane na rozwój, poprawę efektywności oraz utrzymanie wysokiej jakości pracy. W konsekwencji uzyskane wyniki sugerują, że postawy pracowników w warunkach długotrwałych turbulencji nie muszą podlegać degradacji, lecz mogą przechodzić proces rekonfiguracji, w ramach którego współwystępują mechanizmy zabezpieczające, adaptacyjne i motywacyjne. Zrozumienie tych mechanizmów wydaje się szczególnie istotne z perspektywy budowania odporności organizacyjnej oraz zdolności adaptacyjnych organizacji funkcjonujących w dynamicznym i nieprzewidywalnym otoczeniu. Jednocześnie uzyskane rezultaty należy interpretować z ostrożnością. Pozytywny profil analizowanych postaw może pozostawać związany ze specyfiką badanego przedsiębiorstwa, jego kulturą organizacyjną, pozycją rynkową, charakterystyką branży oraz stosowanymi praktykami zarządczymi. W związku z tym wyniki nie powinny być automatycznie generalizowane na wszystkie organizacje funkcjonujące w warunkach kryzysowych. Zasadne wydaje się prowadzenie dalszych badań porównawczych obejmujących różne sektory gospodarki oraz odmienne typy organizacji. Szczególnie wartościowe byłyby również badania longitudinalne, pozwalające ocenić trwałość obserwowanych wzorców postaw pracowniczych oraz określić, czy stanowią one specyficzną cechę badanego przypadku, czy też bardziej uniwersalny mechanizm adaptacji organizacyjnej do kryzysów o długotrwałym i wielowymiarowym charakterze.

Bibliografia

1. Abolnasser, M. S. A. *et al.* (2023) ‘Transformational Leadership, Employee Engagement, Job Satisfaction, and Psychological Well-Being among Hotel Employees after the Height of the COVID-19 Pandemic: A Serial Mediation Model’, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4). doi: 10.3390/ijerph20043609.
2. Allen, N. J. and Meyer, J. P. (1990) ‘The measurement and antecedents of affective, continuance and normative commitment to the organization’, *Journal of Occupational Psychology*, 63(1). doi: 10.1111/j.2044-8325.1990.tb00506.x.
3. Bakker, A. B. and Demerouti, E. (2007) ‘The Job Demands-Resources model: state of the art’, *Journal of Managerial Psychology*, 22(3), pp. 309–328. doi: 10.1108/02683940710733115.
4. Bakker, A. B. and Demerouti, E. (2008) ‘Towards a model of work engagement’, *Career Development International*, 13(3), pp. 209–223. doi: 10.1108/13620430810870476.
5. Bakker, A. B. and Demerouti, E. (2017) ‘Job demands–resources theory: Taking stock and looking forward.’, *Journal of Occupational Health Psychology*, 22(3), pp. 273–285. doi: 10.1037/ocp0000056.
6. Beck, K. and Wilson, C. (2000) ‘Development of Affective Organizational Commitment: A Cross-Sequential Examination of Change with Tenure’, *Journal of Vocational Behavior*, 56(1). doi: 10.1006/jvbe.1999.1712.
7. Bieńkowska, A. *et al.* (2022) ‘COVID-19 oriented HRM strategies influence on job and organizational performance through job-related attitudes’, *PLoS ONE*. Public Library of Science, 17(4 April). doi: 10.1371/journal.pone.0266364.
8. Bieńkowska, A., Koszela, A. and Tworek, K. (2021) ‘Verification of the Job Performance Model based on Employees’ Dynamic Capabilities in organisations under the COVID-19 pandemic crisis’, *Engineering Management in Production and Services*, 13(3). doi: 10.2478/emj-2021-0022.
9. Bieńkowska, A. and Tworek, K. (2020) ‘Job performance model based on Employees’ Dynamic Capabilities (EDC)’, *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). doi: 10.3390/su12062250.
10. Chanana, N. (2021) ‘The impact of COVID-19 pandemic on employees organizational commitment and job satisfaction in reference to gender differences’, *Journal of Public Affairs*, 21(4). doi: 10.1002/pa.2695.

11. Chen, H. *et al.* (2020) ‘Are you tired of working amid the pandemic? The role of professional identity and job satisfaction against job burnout’, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24). doi: 10.3390/ijerph17249188.
12. Cook, J. and Wall, T. (1980) ‘New work attitude measures of trust, organizational commitment and personal need non-fulfilment’, *Journal of Occupational Psychology*, pp. 39–52. doi: 10.1111/j.2044-8325.1980.tb00005.x.
13. De Cuyper, N. *et al.* (2019) ‘Job insecurity, employability and satisfaction among temporary and permanent employees in post-crisis Europe’, *Economic and Industrial Democracy*, 40(2). doi: 10.1177/0143831X18804655.
14. Eisenberger, R. *et al.* (1997) ‘Perceived organizational support, discretionary treatment, and job satisfaction’, *Journal of Applied Psychology*, 82(5). doi: 10.1037/0021-9010.82.5.812.
15. Gutiérrez Banegas, A. *et al.* (2022) ‘Job satisfaction factors during an economic crisis. A systematic review’, *Visión de Futuro*. Universidad Nacional de Misiones, (26, No 2-2022), pp. 22–35. doi: 10.36995/j.visiondefuturo.2022.26.02.001.en.
16. Hawrysz, L. *et al.* (2024) ‘Perceived environmental uncertainty and job involvement: the mediating role of digital technology and organizational trust - a cross-sectional study in primary care facilities in the UK’, *BMC health services research*, 24(1), p. 1151. doi: 10.1186/s12913-024-11596-7.
17. Imran, M. Y. *et al.* (2020) ‘Impact of perceived organizational support on work engagement: Mediating mechanism of thriving and flourishing’, *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(3). doi: 10.3390/JOITMC6030082.
18. Kurtessis, J. N. *et al.* (2017) ‘Perceived Organizational Support: A Meta-Analytic Evaluation of Organizational Support Theory’, *Journal of Management*, 43(6). doi: 10.1177/0149206315575554.
19. Meyer, J. and Allen, N. (2012) Commitment in the Workplace: Theory, Research, and Application, Commitment in the Workplace: Theory, Research, and Application. doi: 10.4135/9781452231556.
20. Meyer, J. P. and Allen, N. J. (1991) ‘A three-component conceptualization of organizational commitment’, *Human Resource Management Review*, 1(1). doi: 10.1016/1053-4822(91)90011-Z.
21. Meyer, J. P. and Herscovitch, L. (2001) ‘Commitment in the workplace: Toward a general model’, *Human Resource Management Review*, 11(3). doi: 10.1016/S1053-4822(00)00053-X.
22. Rhoades, L. and Eisenberger, R. (2002) ‘Perceived organizational support: A review of the literature’, *Journal of Applied Psychology*, 87(4). doi: 10.1037/0021-9010.87.4.698.
23. Schaufeli, W. B. *et al.* (2002) ‘The Measurement of Engagement and Burnout: A Two Sample Confirmatory Factor Analytic Approach’, *Journal of Happiness Studies*, 3(1). doi: 10.1023/a:1015630930326.

24. Schaufeli, W. B. (2016) ‘Heavy work investment, personality and organizational climate’, *Journal of Managerial Psychology*, 31(6). doi: 10.1108/JMP-07-2015-0259.
25. Schaufeli, W. B. and Bakker, A. B. (2004) ‘Job demands, job resources, and their relationship with burnout and engagement: a multi-sample study’, *Journal of Organizational Behavior*, 25(3), pp. 293–315. doi: 10.1002/job.248.
26. Spector, P. (2014) Job Satisfaction: Application, Assessment, Causes, and Consequences, Job Satisfaction: Application, Assessment, Causes, and Consequences. doi: 10.4135/9781452231549.
27. Thomas, C. H. (2007) ‘A new measurement scale for employee engagement: scle development, pilot test, and replication.’, *Academy of Management Proceedings*, 2007(1), pp. 1–6. doi: 10.5465/ambpp.2007.26501848.
28. Tworek, K. *et al.* (2023) ‘The Model of Organizational Performance Based on Employees’ Dynamic Capabilities-Verification During Crisis Caused by Black Swan Event’, *IEEE Access*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 11, pp. 45039–45055. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3273608.
29. Vogus, T. J. and Sutcliffe, K. M. (2007) ‘Organizational Resilience: Towards a Theory and Research Agenda’, in *Organizational resilience: Towards a theory and research agenda*, pp. 3418–3422.
30. Warr, P. and Payne, R. (1983) ‘Social Class and Reported Changes in Behavior After Job Loss’, *Journal of Applied Social Psychology*, 13(3). doi: 10.1111/j.1559-816.1983.tb01735.x.
31. Weick, K. E. and Sutcliffe, K. M. (2007) *Managing the Unexpected. Resilient performance in an age of uncertainty*. 2nd editio. San Francisco: Jossey-Bass.
32. Yu, X. *et al.* (2020) ‘Factors Associated With Job Satisfaction of Frontline Medical Staff Fighting Against COVID-19: A Cross-Sectional Study in China’, *Frontiers in Public Health*, 8. doi: 10.3389/fpubh.2020.00426.
33. Zakrzewska-Bielawska, A. (2017) ‘Ambidexterity jako zdolność dynamiczna w odpowiedzi na niepewność otoczenia’, *STUDIA OECONOMICA POSNANIENSIA*, 5(9), pp. 174–190. doi: 10.18559/SOEP.2017.9.11.
34. Zakrzewska-Bielawska, A. (2021) Ambidextrous Strategy Antecedents, Strategic Choices, and Performance. Routledge.
35. Zeffane, R., Melhem, S. B. and Baguant, P. (2018) ‘The impact of job satisfaction, trust, gender and supervisor support on perceived organizational performance: An exploratory study in the UAE service sector’, *International Journal of Business Excellence*, 14(3). doi: 10.1504/IJBEX.2018.089796.

SOFT SKILLS AND THE EMERGENCE OF INFORMAL LEADERS IN ORGANIZATIONAL TEAMS: AN INTEGRATIVE THEORETICAL REVIEW

Iwona ULENBERG[1] and Maksymilian PRZERWA[2]*

[1] Uniwersytet Gdański, Instytut Psychologii, Gdańsk; i.ulenberg.374@studms.ug.edu.pl; ORCID: 0009-0005-8473-2771

[2] Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Instytut Psychologii, Lublin; przerwa.maks@gmail.com; ORCID: 0009-0003-1503-5046

* Correspondence: przerwa.maks@gmail.com; Tel.: +48-515-126-640

Abstract: This article examines the role of interpersonal and socio-emotional competencies, commonly referred to as soft skills, in the emergence of informal leaders in organizational teams. The aim of the article is to develop an integrative distal-proximal framework explaining how soft skills contribute to informal leader emergence through affective, socio-cognitive, relational, and network-based mechanisms. The article is based on an integrative, theory-driven literature review of 35 peer-reviewed publications selected from research on leader emergence, informal leadership, emotional intelligence, political skill, social perception, trust, and social network approaches to leadership. The synthesis indicates that soft skills should not be treated as direct and universal contributing factors of informal leadership status. Rather, they operate as distal antecedents that influence leader emergence through proximal mechanisms such as affective regulation, competence and warmth perceptions, trust formation, relational embeddedness, and network centrality. The analysis also identifies key boundary conditions, including task interdependence, cultural norms, virtuality, status hierarchy, and team structure. The proposed framework clarifies that informal leader emergence is a dynamic and multilevel process in which interpersonal competencies become socially consequential only when they are recognized, granted, and stabilized within team networks. The article contributes to leader emergence theory by integrating interpersonal, perceptual, relational, and network-based explanations into one process-oriented model and by distinguishing between leadership emergence and leadership effectiveness.

Keywords: leader emergence; informal leadership; soft skills; interpersonal competence; social networks

KOMPETENCJE MIĘKKIE I POJAWIANIE SIĘ NIEFORMALNYCH LIDERÓW W ZESPOŁACH ORGANIZACYJNYCH: INTEGRACYJNY PRZEGLĄD TEORETYCZNY

Streszczenie: Artykuł analizuje rolę kompetencji interpersonalnych i społeczno-emocjonalnych, określanych potocznie jako kompetencje miękkie, w procesie wyłaniania się nieformalnych liderów w zespołach organizacyjnych. Celem artykułu jest opracowanie integracyjnego modelu wyjaśniającego, w jaki sposób kompetencje miękkie mogą sprzyjać uzyskiwaniu nieformalnego wpływu w zespole poprzez mechanizmy emocjonalne, poznawcze, relacyjne i sieciowe. Artykuł opiera się na integracyjnym, ukierunkowanym teoretycznie przeglądzie 35 recenzowanych publikacji z zakresu wyłaniania się przywództwa, przywództwa nieformalnego, inteligencji emocjonalnej, umiejętności politycznych, percepcji społecznej, zaufania oraz sieciowych koncepcji przywództwa. Synteza literatury wskazuje, że kompetencje miękkie nie powinny być traktowane jako bezpośrednie i uniwersalne predyktory statusu nieformalnego lidera. Ich znaczenie polega raczej na tym, że tworzą warunki sprzyjające rozpoznaniu danej osoby jako potencjalnego źródła wpływu. Oddziałują poprzez takie procesy, jak regulacja emocji, postrzeganie kompetencji i życzliwości, budowanie zaufania, osadzanie się w relacjach zespołowych oraz zajmowanie centralnej pozycji w sieciach wpływu. Analiza wskazuje również kluczowe warunki kontekstowe, takie jak współzależność zadań, normy kulturowe, komunikacja wirtualna, hierarchia statusu oraz struktura zespołu. Zaproponowany model pokazuje, że wyłanianie się nieformalnego lidera jest procesem dynamicznym i wielopoziomowym, w którym kompetencje interpersonalne stają się istotne dopiero wtedy, gdy zostają zauważone, uznane i utrwalone w relacjach oraz strukturach zespołowych.

Słowa kluczowe: wyłanianie się przywództwa; przywództwo nieformalne; kompetencje miękkie; kompetencje interpersonalne; sieci społeczne

Introduction

Informal leader emergence refers to the process through which some team members acquire discretionary influence—being perceived as leaders and granted de facto authority—without formal appointment or positional power. Rather than being the result of formal hierarchy, informal leadership reflects socially constructed recognition processes in which influence is voluntarily conferred by peers through repeated interaction episodes. Contemporary reviews emphasize that emergence is dynamic, interactional, and multilevel, governed not only by individual differences but also by the temporal unfolding of social perception, relational exchanges, and team structures. (Gardner et al., 2024; Badura et al., 2022). Recent process-oriented models further argue that leader emergence should be conceptualized as a pattern of

influence granting and claiming behaviors that accumulate over time, rather than as a one-shot nomination or rank-order outcome (DeRue & Ashford, 2010; Sparrowe, 2020).

A persistent theoretical gap concerns why "soft skills" (better framed in scholarly terms as interpersonal competencies or socio-emotional competencies) should predict leader emergence beyond traits such as extraversion or dominance and beyond performance signals. Meta-analytic syntheses show that traditional individual differences reliably predict emergence in leaderless contexts, but they also underscore heterogeneity in effects and substantial room for proximal, process-based explanations (Ensari et al., 2011; Badura et al., 2022). Moreover, research on personality–leadership relationships indicates that broad traits such as extraversion operate partially through interpersonal visibility and social engagement mechanisms, suggesting that more proximal socio-emotional competencies may account for additional variance in influence granting (Judge et al., 2002; Haslam et al., 2023). Thus, clarifying whether and how interpersonal competencies predict emergence beyond dispositional dominance represents a theoretically necessary refinement of leader emergence theory.

Beyond theoretical interest, the organizational consequences of informal leader emergence are substantial. Informal leaders often shape coordination patterns, information flow, and voice behavior independent of formal authority, thereby affecting team performance, adaptive capacity, and error management (Carter et al., 2015; Morgeson et al., 2010; Humphrey et al., 2009). When emergent influence aligns with task-relevant expertise and relational competence, teams exhibit stronger shared leadership structures, greater resilience under uncertainty, and higher contextual performance (Wang et al., 2014; Xu et al., 2022). Conversely, misaligned or dominance-based emergence can centralize influence in less competent actors, potentially undermining decision quality and psychological safety. Therefore, identifying antecedents that predict adaptive, relationally effective emergence is not merely a theoretical endeavor but a strategic organizational concern.

The core argument advanced here is mechanistic rather than correlational: soft skills may contribute to informal leader emergence because they shape the social micro-processes by which influence is granted, specifically by (a) improving the accuracy and strategic timing of emotion- and relationship-relevant behavior, (b) increasing perceived competence and warmth in evaluative judgments, (c) accelerating trust formation and social exchange depth, and (d) positioning the individual advantageously in emergent influence networks. Each of these pathways is theoretically grounded and empirically consistent with leader-emergence research in teams (Côté et al., 2010; DeRue et al., 2015; Carter et al., 2015). Importantly, this framing treats interpersonal competencies as distal antecedents that exert influence through proximal socio-cognitive and relational mechanisms, consistent with distal–proximal models of leadership processes (Judge et al., 2002; Gardner et al., 2024). This perspective shifts the explanatory focus from static traits to relational micro-processes and provides the basis for the review questions guiding the article.

Accordingly, this integrative review is guided by three review questions rather than statistically testable hypotheses. This formulation is appropriate because the article does not report original empirical data, but synthesizes existing theoretical and empirical evidence to clarify the mechanisms linking soft skills with informal leader emergence.

RQ1. How do interpersonal and socio-emotional competencies contribute to the emergence of informal leaders in organizational teams?

RQ2. Through which affective, socio-cognitive, relational, and network-based mechanisms do soft skills become socially consequential in informal leader emergence?

RQ3. Which contextual conditions may strengthen, weaken, or redirect the relationship between soft skills and informal leader emergence?

Methodological Approach

This article adopts an integrative, theory-driven review methodology. This approach was selected because the focal problem does not concern a single narrowly defined predictor, but rather the relationship between interpersonal and socio-emotional competencies and the emergence of informal leadership in organizational teams. The relevant evidence is dispersed across several related research domains, including leader emergence, informal leadership, emotional intelligence, political skill, social perception, trust formation, and social network approaches to leadership. An integrative review was therefore considered appropriate because it enables the synthesis of empirical findings, conceptual models, and theoretical perspectives needed to explain how soft skills may become socially consequential in team-based influence processes.

The literature search was conducted between 9 January 2026 and 7 March 2026. Records were identified using the Scopus and EBSCO databases, as well as Google Scholar. The database search was supplemented by backward and forward citation tracing, particularly for influential theoretical and review papers relevant to leader emergence, informal leadership, and socio-emotional competencies.

The search strategy combined three keyword blocks. The first referred to leadership emergence and informal influence processes: “leader emergence,” “informal leadership,” “emergent leadership,” “shared leadership,” and “influence granting.” The second referred to interpersonal and socio-emotional competencies: “soft skills,” “interpersonal competence,” “socio-emotional competence,” “emotional intelligence,” “political skill,” “empathy,” and “perspective taking.” The third referred to mechanisms and team-level processes: “social networks,” “network centrality,” “trust,” “social perception,” “warmth and competence,” “team dynamics,” and “influence processes.”

The core search logic was based on the following structure, adapted where necessary to the syntax of individual databases:

("leader emergence" OR "informal leadership" OR "emergent leadership" OR "shared leadership")

AND

("soft skills" OR "interpersonal competence" OR "socio-emotional competence" OR "emotional intelligence" OR "political skill" OR empathy)

AND

("social networks" OR trust OR "social perception" OR "team dynamics" OR "influence processes")

The selection process proceeded in three stages. First, duplicate records and publications clearly unrelated to leadership, team processes, or organizational behavior were removed. Second, titles and abstracts were screened for relevance to the role of interpersonal and socio-emotional competencies in informal leader emergence. Third, potentially relevant publications were reviewed in full text and retained when they contributed to at least one of the following areas: conceptual definition of leader emergence, operationalization of soft skills or related interpersonal competencies, mechanisms of influence granting, relational or network-based leadership processes, or contextual moderators of informal leadership emergence.

Priority was given to peer-reviewed journal articles published in English, especially meta-analyses, integrative reviews, longitudinal studies, and empirical research from organizational psychology, management, leadership, and team science. Foundational theoretical publications were included when necessary to define key constructs or explain core mechanisms.

The inclusion criteria required that studies (a) addressed leader emergence, informal leadership, shared leadership, or informal influence processes; (b) examined interpersonal, emotional, relational, or socio-emotional competencies; and (c) were theoretically or empirically relevant to organizational, managerial, team, or work-related contexts. Publications were excluded if they focused exclusively on non-organizational contexts without clear relevance to team-based leadership emergence, discussed leadership only in broad terms without addressing informal influence mechanisms, or did not contribute to the conceptual model developed in the article.

The final body of literature included 35 publications. These sources were synthesized conceptually rather than analyzed through statistical meta-analysis. The review therefore does not aim to estimate effect sizes or validate a measurement model, but to organize existing evidence into a theoretically coherent explanatory framework. Accordingly, the article should be read as an integrative theoretical synthesis, not as a systematic review or formal quantitative test of predictive effects. A key limitation of this approach is that "soft skills" do not constitute a single uniformly operationalized construct; therefore, the reviewed evidence is interpreted as referring to a family of partially overlapping interpersonal and socio-emotional competencies relevant to informal leader emergence.

Theoretical framework

A synthesis that treats soft skills as antecedents requires a framework that explains how individual-level competencies become collectively recognized leadership. Recent integrative reviews recommend explicitly separating distal antecedents from proximal processes and specifying the relevant level(s) of emergence (dyadic, group, and network), because leader emergence can be global (a single person), compositional (aggregated individual effects), or compilational (configurations and patterns) (Gardner et al., 2024; Badura et al., 2022).

Three complementary theoretical lenses are particularly generative. First, leadership identity construction models conceptualize emergence as a claiming–granting process: individuals claim leadership through influence attempts, while observers grant leader identity by endorsing those claims. This lens implies that soft skills should matter precisely because they increase the probability that leadership claims are interpreted as legitimate rather than as overreach (DeRue & Ashford, 2010; Kwok et al., 2018).

Second, social perception and status allocation perspectives explain why being influential depends on how one is categorized and evaluated. In organizational judgments, perceptions of competence and warmth are central, shaping downstream attributions, approach/avoidance responses, and resource allocation. In leader emergence contexts, these judgments become the immediate currency of "who should lead" (Cuddy et al., 2011; DeRue et al., 2015).

Third, network and relational process approaches treat leadership as embedded in evolving patterns of interaction and influence. In this view, interpersonal skills should predict emergence insofar as they build centrality, brokerage, or dense reciprocal ties—structures that make influence visible and consequential (Carter et al., 2015; Balkundi & Kilduff, 2006).

These lenses converge on the assumption that interpersonal and socio-emotional competencies shape the proximal social-information processes through which informal leader emergence unfolds. This logic also clarifies the mechanisms and boundary conditions developed in the following sections (Badura et al., 2022; Miao et al., 2018).

The proposed integrative model is presented in Figure 1. It synthesizes the distal-proximal logic developed above by showing how interpersonal and socio-emotional competencies function as distal antecedents of informal leader emergence through three proximal mechanisms: affective regulation, social perception, and network positioning. The model also indicates that the strength of these pathways is shaped by contextual boundary conditions.

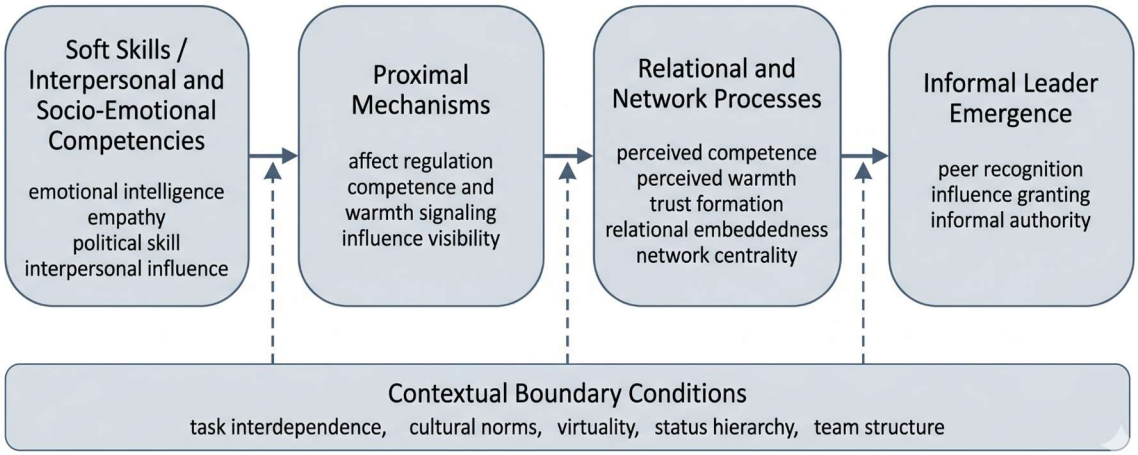


Figure 1. Integrative distal-proximal model of soft skills as antecedents of informal leader emergence. Note. The model conceptualizes interpersonal and socio-emotional competencies as distal antecedents that influence informal leader emergence through proximal affective, socio-cognitive, relational, and network-based mechanisms. Contextual boundary conditions may strengthen, weaken, or redirect these pathways.

To clarify the analytical structure of the model, three levels of analysis are distinguished. At the individual level, the model includes interpersonal and socio-emotional competencies, such as emotional intelligence, empathy, political skill, and interpersonal influence. At the relational level, these competencies are translated into peer perceptions, trust, and influence granting. At the team and network level, repeated relational processes may become stabilized as network centrality, relational embeddedness, and informal leadership structures. Contextual conditions, including task interdependence, communication medium, cultural norms, status hierarchy, and team structure, are treated as factors that may shape the strength and direction of these relationships.

Construct Operationalization

A coherent synthesis depends on specifying how constructs are defined and measured in the peer-reviewed literature. Interpersonal and Socio-Emotional Competencies (soft skills). In organizational research, the most empirically tractable subset of soft skills is indexed by constructs that explicitly involve (a) perceiving and interpreting socio-emotional cues, (b) regulating emotion to enable goal-directed interaction, and (c) enacting influence through adaptive interpersonal behavior. Emotional intelligence (EI) appears in both leadership and

work psychology as a family of constructs spanning ability-based and mixed/competency approaches; meta-analytic work highlights common conceptual boundaries and redundancies with personality and cognitive ability, while also identifying contexts where EI predicts performance through emotion-related mechanisms (Joseph & Newman, 2010; Miao et al., 2016).

Operationalizations of soft skills used in leader-emergence research include (but are not limited to):

- emotion recognition/understanding and emotion regulation as resources for coordinating group affect and behavior (Joseph & Newman, 2010; Pescosolido, 2002).
- empathy and perspective-taking capacity as inputs to both task and relational leadership (Humphrey, 2002; Cha & Edmondson, 2006).
- political skill (social astuteness, interpersonal influence, networking ability, apparent sincerity) as a social effectiveness capability that translates into relationship quality, perceived competence, and influence (Ferris et al., 2005; Munyon et al., 2015).

Informal Leader Emergence. Measurement approaches depend on the form of emergence being modeled. Common operationalizations include peer nominations and ratings of leadership (often in leaderless discussion designs), consensus-based informal leadership status measures, and network-analytic indicators of influence or centrality (Ensari et al., 2011; Shaughnessy et al., 2017; Kwok et al., 2018).

Critically, these operationalizations can capture distinct phenomena: being seen as a leader (perceptions), being embedded as a leader (network position), and being effective as a leader (outcomes). Contemporary reviews caution that leader emergence and leader effectiveness are related but conceptually separable; therefore, soft skills should be theorized as contributing factors of recognition and granting, not merely performance (Badura et al., 2022; Gardner et al., 2024).

To clarify how the reviewed publications were integrated, Table 1 synthesizes the main literature streams represented in the final corpus of 35 publications, indicating their analytical level, key constructs, and contribution to the proposed framework of informal leader emergence.

Table 1.
Comparative synthesis of the main literature streams informing the proposed model of informal leader emergence

Literature stream	Analytical level	Key constructs	Main contribution to the proposed framework	Example sources
Leader emergence and leadership identity construction	Individual, dyadic, team	Leader emergence, claiming-granting processes, peer recognition, informal influence	Defines leader emergence as a dynamic social process in which influence is claimed by individuals and granted by others over repeated interaction episodes. This stream provides the theoretical foundation for treating informal leadership as socially constructed rather than formally assigned.	DeRue & Ashford, 2010; Badura et al., 2022; Gardner et al., 2024
Individual differences and traditional contributing factors of emergence	Individual	Extraversion, dominance, personality traits, leadership potential	Establishes that stable individual differences predict leader emergence, but also reveals the need for more proximal, process-based explanations. This stream justifies examining soft skills as mechanisms that may explain how individual characteristics become socially recognized influence.	Judge et al., 2002; Ensari et al., 2011; Badura et al., 2022
Emotional intelligence and affective leadership	Individual, relational	Emotional intelligence, emotion recognition, emotion regulation, affective coordination	Explains how socio-emotional competencies help individuals regulate group affect, reduce interpersonal friction, and become coordination points in teams. This stream supports the affective regulation pathway in the model.	Joseph & Newman, 2010; Côté et al., 2010; Pescosolido, 2002; Humphrey et al., 2008
Political skill and interpersonal influence	Individual, relational	Political skill, social astuteness, interpersonal influence, networking ability,	Explains how socially skilled actors shape others' interpretations of competence, credibility, and intent. This stream supports the claim that soft skills influence	Ferris et al., 2005; Munyon et al., 2015; Liu et al., 2025

Literature stream	Analytical level	Key constructs	Main contribution to the proposed framework	Example sources
		apparent sincerity	leader emergence through relational credibility and strategic influence behavior.	
Social perception and status allocation	Relational, dyadic	Perceived competence, warmth, credibility, status judgments	Explains how team members evaluate who is competent, trustworthy, and socially acceptable as a source of influence. This stream supports the competence and warmth signaling pathway.	Cuddy et al., 2011; DeRue et al., 2015; Loignon & Kodydek, 2022
Trust and psychological safety	Relational, team	Trust, benevolence, integrity, interpersonal risk, psychological safety	Explains why influence granting requires relational safety and willingness to accept dependence. This stream supports the argument that soft skills facilitate leader emergence by increasing trust and reducing perceived interpersonal risk.	Mayer et al., 1995; Edmondson, 1999; Pescosolido, 2002
Social network approaches to leadership	Network, team	Network centrality, brokerage, advice ties, relational embeddedness, shared leadership networks	Explains how repeated dyadic influence grants accumulate into structural positions of informal authority. This stream supports the network positioning and influence visibility pathway.	Balkundi & Kilduff, 2006; Carter et al., 2015; Kwok et al., 2018; Xu et al., 2022
Boundary conditions of informal leader emergence	Team, organizational, contextual	Task interdependence, culture, virtuality, communication medium, status hierarchy	Specifies when soft skills are more or less likely to translate into informal leader emergence. This stream highlights that the effect of interpersonal competencies is context-dependent rather than universal.	Balthazard et al., 2009; Miao et al., 2016; Miao et al., 2018; Loignon & Kodydek, 2022; Xu et al., 2022

Taken together, these literature streams provide the basis for the mechanism-focused analysis developed in the next section.

Mechanisms and Boundary Conditions of Informal Leader Emergence

Mechanisms specify how interpersonal and socio-emotional competencies become socially consequential in organizational teams. In the proposed framework, soft skills are understood as antecedent capacities that shape affective, socio-cognitive, relational, and network-based processes through which influence is recognized, granted, and stabilized over time (DeRue & Ashford, 2010; Carter et al., 2015; Gardner et al., 2024).

5.1 Affective Regulation and Socio-Emotional Coordination

The first pathway concerns affective regulation and socio-emotional coordination. Teams do not process information in a purely cognitive manner; they also manage tension, uncertainty, emotional contagion, and motivation during interaction. Individuals who are able to perceive, interpret, and regulate affective cues can reduce interpersonal friction, stabilize group interaction, and become focal points for coordination and influence. In this sense, emotional competence may increase the likelihood that a team member is perceived as someone capable of guiding collective action under uncertainty (Pescosolido, 2002; Joseph & Newman, 2010).

The Emotions-as-Social-Information model provides an additional micro-foundation for this process. Emotional expressions influence observers through inferential and affective routes, shaping how behavior is interpreted by others. Consequently, emotionally skilled actors are more likely to calibrate their emotional displays in ways that are interpreted as confidence rather than dominance, concern rather than weakness, and composure rather than detachment (van Kleef, 2009; Côté et al., 2010). This helps explain why socio-emotional competencies may support leader emergence not merely by creating positive affect, but by shaping the meaning that team members attribute to influence attempts.

5.2 Competence, Warmth, and Trust-Based Influence Granting

The second pathway concerns social perception and trust-based influence granting. In ambiguous or time-pressured team situations, members often rely on interpersonal cues to infer who is competent, credible, and safe to follow. Soft skills may function as credibility signals: empathic responsiveness and perspective taking increase perceived warmth, whereas adaptive influence behavior and emotional regulation may strengthen perceived competence. Since competence and warmth are central dimensions of social judgment, they become proximal

mechanisms through which interpersonal competencies affect leadership attribution (Cuddy et al., 2011; DeRue et al., 2015).

Trust formation further strengthens this process. Informal leader emergence requires more than visibility; it requires others to accept some degree of dependence and relational risk. Trust theory identifies ability, benevolence, and integrity as central antecedents of trust, implying that socio-emotional competencies can facilitate leader emergence by shaping perceptions of both capability and intent (Mayer et al., 1995). Psychological safety provides a complementary mechanism: when team members experience interpersonal risk as lower, they are more willing to speak up, coordinate, and grant influence to actors who support constructive interaction (Edmondson, 1999). Thus, the pathway from soft skills to leader emergence is partly mediated by perceived competence, perceived warmth, trust, and relational safety.

5.3 Network Positioning and Structural Stabilization of Influence

The third pathway concerns network positioning and the structural stabilization of influence. Informal leadership is not only a matter of individual attributes or isolated peer perceptions; it is enacted through repeated interaction patterns. Individuals with strong interpersonal competencies are more likely to build advice ties, maintain reciprocal relationships, bridge subgroups, and become visible as coordination hubs. Social network approaches to leadership therefore suggest that leader emergence depends on both capability and access: influence must be socially recognized and structurally available within the team network (Balkundi & Kilduff, 2006; Carter et al., 2015).

Empirical work supports this dynamic logic. Leader role identity has been shown to predict leader emergence through network centrality, indicating that identity-related and relational processes operate jointly (Kwok et al., 2018). Recent research on political skill similarly suggests that socially skilled individuals may emerge as informal leaders through relationship quality, perceived competence, and outcome interdependence (Liu et al., 2025). Shared leadership research further shows that leadership networks develop over time through distributed patterns of expertise recognition and influence granting (Xu et al., 2022). Taken together, these findings indicate that soft skills may operate as structural accelerators: they shape not only how individuals are evaluated in single interactions, but also how their influence becomes embedded and reproduced within team networks.

5.4 Contextual Boundary Conditions

The strength and direction of these mechanisms are contingent upon contextual boundary conditions. Soft skills do not translate into informal leadership emergence automatically or universally. Their influence depends on task, cultural, technological, and status-related conditions that determine whether socio-emotional cues are valued, visible, and interpreted as legitimate. Task interdependence is one central moderator. When team members' outcomes are strongly coupled and coordination failures are costly, relational alignment, trust, and communication quality become more important. In such contexts, interpersonal competencies should have stronger effects on leader emergence because they directly support coordination and reduce interactional uncertainty (Xu et al., 2022; Liu et al., 2025).

Cultural norms also shape how soft skills are interpreted. Meta-analytic evidence on emotional intelligence suggests that the effects of leader emotional intelligence vary across cultural dimensions such as collectivism, power distance, and uncertainty avoidance (Miao et al., 2016; Miao et al., 2018). Thus, the same socio-emotional behavior may be interpreted as appropriate influence in one cultural context and as insufficiently assertive or overly intrusive in another.

Communication medium represents another important boundary condition. In virtual or technology-mediated teams, cue transmission is restricted, and leader emergence depends more strongly on communication clarity, timing, and the ability to encode socio-emotional intent through reduced-bandwidth channels. Evidence from virtual decision teams suggests that leadership emergence processes differ across communication environments, which implies that interpersonal competencies may require different behavioral expressions in virtual contexts than in face-to-face teams (Balthazard et al., 2009).

Finally, status hierarchies and ascriptive cues may amplify or suppress the effects of soft skills. Social categorization processes can shape whose influence claims are perceived as legitimate, even when interpersonal competencies are comparable. Research on interpersonal perceptions and social class indicates that status-relevant cues affect leadership emergence, suggesting that soft-skill effects may be unequally rewarded across differently positioned actors (DeRue et al., 2015; Loignon & Kodydek, 2022).

Overall, interpersonal and socio-emotional competencies contribute to informal leader emergence through affective, perceptual, relational, and network-based processes. These pathways are context-dependent, as task, cultural, technological, and status-related conditions may strengthen, weaken, or redirect the translation of soft skills into informal influence. This mechanism-focused interpretation provides the basis for the discussion that follows.

Discussion

The integrative synthesis developed in this article supports the view that interpersonal and socio-emotional competencies contribute to informal leader emergence through a distal-proximal process rather than through a direct and universal predictive pathway. Soft skills do not automatically produce informal leadership status. Instead, they shape the affective, socio-cognitive, relational, and network-based mechanisms through which influence becomes visible, accepted, and stabilized within teams. This interpretation is consistent with the model presented in Figure 1 and with the literature synthesis summarized in Table 1.

Theoretical Contribution

The first theoretical contribution of this article is the reconceptualization of soft skills as distal antecedents of informal leader emergence. Previous research has shown that relatively stable individual differences, such as personality traits and dominance-related characteristics, predict leader emergence in leaderless or team-based settings. However, this literature does not fully explain how individual attributes are translated into socially recognized influence. The present synthesis addresses this gap by positioning interpersonal and socio-emotional competencies as capacities that operate through proximal mechanisms: affect regulation, competence and warmth signaling, trust formation, and network positioning.

The second contribution concerns the integration of social perception and network perspectives. Leader emergence is not only a matter of being individually competent or socially skilled; it also depends on how others interpret one's behavior and how repeated interaction patterns become embedded in the team's relational structure. The proposed framework therefore connects micro-level interaction episodes with meso-level network processes. In this view, influence granting begins in dyadic perception and exchange, but becomes more stable when it is reproduced across multiple relationships and reflected in network centrality.

The third contribution is the distinction between emergence legitimacy and emergence accuracy. A person may be granted influence because they are perceived as competent, warm, trustworthy, or socially central, yet these perceptions do not always guarantee superior task expertise or optimal leadership allocation. This distinction is important because it prevents the assumption that informal leader emergence is inherently beneficial. Soft skills may facilitate adaptive coordination, but under some conditions they may also support the emergence of socially skilled actors whose influence is not fully aligned with objective expertise or team needs.

Practical Implications

The practical implications of this framework are relevant for leadership development, team design, and talent assessment. First, organizations should distinguish between leadership emergence and leadership effectiveness. Being recognized as an informal leader does not necessarily mean that the person will make the best decisions, possess the strongest expertise, or improve team outcomes. Therefore, talent systems should not rely only on visibility, confidence, or peer popularity as indicators of leadership potential.

Second, assessment practices should include peer-based and network-based indicators of influence. Since informal leader emergence is socially constructed, it is insufficient to measure it only through self-reports or formal supervisor evaluations. Peer nominations, social network measures, and indicators of advice-seeking or influence centrality may better capture how leadership is actually granted and stabilized in teams.

Third, leadership development should focus on calibrated interpersonal behavior rather than generic "soft skills" training. The value of socio-emotional competence depends on context. In highly interdependent teams, skills such as perspective taking, trust building, affect regulation, and conflict management may be especially important. In expertise-driven contexts, however, interpersonal visibility should be balanced with mechanisms that ensure alignment between influence and task-relevant competence.

Limitations and Future Research Directions

Several limitations should be acknowledged. First, this article is an integrative theoretical review rather than a systematic review or a meta-analysis. The reviewed studies were synthesized conceptually to develop a distal-proximal framework, but the article does not provide a quantitative estimate of the predictive strength of specific soft skills. As a result, the proposed model should be treated as a theoretically grounded framework requiring further empirical testing.

For this reason, the model should not be interpreted as an empirically tested measurement framework. Its purpose is conceptual integration rather than direct operational validation. The article specifies theoretically plausible pathways linking interpersonal and socio-emotional competencies with informal leader emergence, but the empirical operationalization of these pathways requires separate research designs. Future studies should therefore translate the proposed mechanisms into measurable variables using longitudinal, multilevel, and social network approaches.

Second, the construct of "soft skills" is broad and not uniformly operationalized across the literature. The studies reviewed refer to partially overlapping constructs, including emotional intelligence, empathy, political skill, interpersonal influence, trust-building behaviors, and relational competence. This conceptual heterogeneity limits direct comparison across studies and indicates the need for more precise operational definitions in future research.

Third, much of the leader emergence literature relies on cross-sectional, self-report, or short-term group designs. Such methods are limited because leader emergence is a dynamic process that unfolds over time. Future research should therefore use longitudinal designs, multilevel modeling, and social network analysis to examine how interpersonal competencies shape influence granting across repeated interactions.

Future studies should also test the boundary conditions identified in this article. Task interdependence, virtual communication, cultural norms, team maturity, and status hierarchies may strengthen, weaken, or distort the relationship between soft skills and informal leader emergence. Particularly important is the question of emergence accuracy: whether individuals who emerge as informal leaders are also those whose expertise and judgment best match the team's needs. Addressing this question would help clarify when soft skills support adaptive leadership emergence and when they may contribute to misallocated influence.

Conclusions

This article developed an integrative distal-proximal framework explaining how interpersonal and socio-emotional competencies may contribute to informal leader emergence in organizational teams. The central conclusion is that soft skills should not be treated as direct and universal contributing factors of informal leadership status. Rather, they function as distal antecedents that influence leader emergence through proximal mechanisms, including affective regulation, competence and warmth perceptions, trust formation, relational embeddedness, and network centrality.

The synthesis indicates that informal leader emergence is a dynamic and multilevel process. Individual competencies become socially consequential only when they are interpreted by others as credible, trustworthy, and useful for collective functioning. Over time, repeated influence granting may stabilize into informal authority when dyadic perceptions become embedded in broader team networks.

At the same time, the relationship between soft skills and informal leader emergence is context-dependent. Task interdependence, cultural norms, communication medium, status hierarchy, and team structure may strengthen, weaken, or redirect the influence of interpersonal competencies. This means that soft skills can support adaptive leadership emergence, but they may also contribute to misallocated influence when social visibility is mistaken for expertise.

The main theoretical contribution of the article lies in integrating interpersonal, socio-cognitive, relational, and network-based explanations into one process-oriented model. For organizational practice, the analysis suggests that leadership development and talent assessment should move beyond generic soft skills training and include peer-based, network-sensitive, and context-specific indicators of informal influence.

Future research should empirically test the proposed framework using longitudinal, multilevel, and social network designs. Such studies are necessary to determine not only who emerges as an informal leader, but also whether emergence accurately reflects task-relevant expertise and contributes to team effectiveness.

References

1. Badura, K. L., Galvin, B. M., & Lee, M. Y. (2022). Leadership emergence: An integrative review. Journal of Applied Psychology, 107(11), 2069–2100. https://doi.org/10.1037/apl0000997
2. Balkundi, P., & Kilduff, M. (2006). The ties that lead: A social network approach to leadership. The Leadership Quarterly, 17(4), 419–439. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2006.01.001
3. Balthazard, P. A., Waldman, D. A., & Warren, J. E. (2009). Predictors of the emergence of transformational leadership in virtual decision teams. The Leadership Quarterly, 20(5), 651–663. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2009.06.008
4. Brass, D. J., Galaskiewicz, J., & Greve, H. R. (2004). Taking stock of networks and organizations: a multilevel perspective. Academy of Management Journal, 47(6), 795–817. https://doi.org/10.2307/20159624
5. Carter, D. R., DeChurch, L. A., Braun, M. T., & Contractor, N. S. (2015). Social network approaches to leadership: An integrative conceptual review. Journal of Applied Psychology, 100(3), 597–622. https://doi.org/10.1037/a0038922
6. Cha, S. E., & Edmondson, A. C. (2006). When values backfire: Leadership, attribution, and disenchantment in a values-driven organization. The Leadership Quarterly, 17(1), 57–78. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2005.10.006
7. Côté, S., Lopes, P. N., Salovey, P., & Miners, C. T. H. (2010). Emotional intelligence and leadership emergence in small groups. The Leadership Quarterly, 21(3), 496–508. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2010.03.012
8. Cuddy, A. J. C., Glick, P., & Beninger, A. (2011). The dynamics of warmth and competence judgments, and their outcomes in organizations. Research in Organizational Behavior, 31, 73–98. https://doi.org/10.1016/j.riob.2011.10.004
9. DeRue, D. S., & Ashford, S. J. (2010). Who will Lead and Who will Follow? A Social Process of Leadership Identity Construction in Organizations. Academy of Management Review, 35(4), 627–647. https://doi.org/10.5465/amr.35.4.zok627
10. DeRue, D. S., Nahrgang, J. D., & Ashford, S. J. (2015). Interpersonal Perceptions and the Emergence of Leadership Structures in Groups: A Network Perspective. Organization Science, 26(4), 1192–1209. https://doi.org/10.1287/orsc.2014.0963
11. Edmondson, A. (1999). Psychological Safety and Learning Behavior in Work Teams. Administrative Science Quarterly, 44(2), 350–383. https://doi.org/10.2307/2666999
12. Ensari, N., Riggio, R. E., Christian, J., & Carslaw, G. (2011). Who emerges as a leader? Meta-analyses of individual differences as predictors of leadership emergence.

Personality and Individual Differences, 51(4), 532–536. https://doi.org/10.1016/j.paid.2011.05.017

13. Ferris, G. R., Treadway, D. C., Kolodinsky, R. W., Hochwarter, W. A., Kacmar, C. J., Douglas, C., & Frink, D. D. (2005). Development and Validation of the Political Skill Inventory. Journal of Management, 31(1), 126–152. https://doi.org/10.1177/0149206304271386
14. Gardner, W. L., Hanna, A. A., Noghani, F., & Cogliser, C. C. (2024). Leadership Emergence: Answering the "How" and "Why" Questions by Considering Levels of Analysis and Form of Emergence. Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior, 11(1), 139–164. https://doi.org/10.1146/annurev-orgpsych-110721-040430
15. Haslam, S. A., Reicher, S. D., Selvanathan, H. P., Gaffney, A. M., Steffens, N. K., Packer, D., Van Bavel, J. J., Ntontis, E., Neville, F., Vestergren, S., Jurstakova, K., & Platow, M. J. (2023). Examining the role of Donald Trump and his supporters in the 2021 assault on the U.S. Capitol: A dual-agency model of identity leadership and engaged followership. The Leadership Quarterly, 34(2), 101622. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2022.101622
16. Hoobler, J. M., Masterson, C. R., Nkomo, S. M., & Michel, E. J. (2018). The Business Case for Women Leaders: Meta-Analysis, Research Critique, and Path Forward. Journal of Management, 44(6), 2473–2499. https://doi.org/10.1177/0149206316628643
17. Humphrey, R. H. (2002). The many faces of emotional leadership. The Leadership Quarterly, 13(5), 493–504. https://doi.org/10.1016/S1048-9843(02)00140-6
18. Humphrey, R. H., Pollack, J. M., & Hawver, T. (2008). Leading with emotional labor. Journal of Managerial Psychology, 23(2), 151–168. https://doi.org/10.1108/02683940810850790
19. Humphrey, S. E., Morgeson, F. P., & Mannor, M. J. (2009). Developing a theory of the strategic core of teams: A role composition model of team performance. Journal of Applied Psychology, 94(1), 48–61. https://doi.org/10.1037/a0012997
20. Joseph, D. L., & Newman, D. A. (2010). Emotional intelligence: An integrative meta-analysis and cascading model. Journal of Applied Psychology, 95(1), 54–78. https://doi.org/10.1037/a0017286
21. Judge, T. A., Bono, J. E., Ilies, R., & Gerhardt, M. W. (2002). Personality and leadership: A qualitative and quantitative review. Journal of Applied Psychology, 87(4), 765–780. https://doi.org/10.1037/0021-9010.87.4.765
22. Kwok, N., Hanig, S., Brown, D. J., & Shen, W. (2018). How leader role identity influences the process of leader emergence: A social network analysis. The Leadership Quarterly, 29(6), 648–662. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2018.04.003
23. Liu, S., Summers, J. K., Guo, N., Li, X., & Wang, H. (2025). Political skill and informal leader emergence: The role of relationships, competence and outcome interdependence.

Journal of Occupational and Organizational Psychology, 98(1), e12560. https://doi.org/10.1111/joop.12560

24. Loignon, A. C., & Kodydek, G. (2022). The Effects of Objective and Subjective Social Class on Leadership Emergence. Journal of Management Studies, 59(5), 1162–1197. https://doi.org/10.1111/joms.12769
25. Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An Integrative Model of Organizational Trust. The Academy of Management Review, 20(3), 709. https://doi.org/10.2307/258792
26. Miao, C., Humphrey, R. H., & Qian, S. (2016). Leader emotional intelligence and subordinate job satisfaction: A meta-analysis of main, mediator, and moderator effects. Personality and Individual Differences, 102, 13–24. https://doi.org/10.1016/j.paid.2016.06.056
27. Miao, C., Humphrey, R. H., & Qian, S. (2018). A cross-cultural meta-analysis of how leader emotional intelligence influences subordinate task performance and organizational citizenship behavior. Journal of World Business, 53(4), 463–474. https://doi.org/10.1016/j.jwb.2018.01.003
28. Morgeson, F. P., DeRue, D. S., & Karam, E. P. (2010). Leadership in Teams: A Functional Approach to Understanding Leadership Structures and Processes. Journal of Management, 36(1), 5–39. https://doi.org/10.1177/0149206309347376
29. Munyon, T. P., Summers, J. K., Thompson, K. M., & Ferris, G. R. (2015). Political Skill and Work Outcomes: A Theoretical Extension, Meta-Analytic Investigation, and Agenda for the Future. Personnel Psychology, 68(1), 143–184. https://doi.org/10.1111/peps.12066
30. Pescosolido, A. T. (2002). Emergent leaders as managers of group emotion. The Leadership Quarterly, 13(5), 583–599. https://doi.org/10.1016/S1048-9843(02)00145-5
31. Shaughnessy, B. A., Treadway, D. C., Breland, J. W., & Perrewé, P. L. (2017). Informal Leadership Status and Individual Performance: The Roles of Political Skill and Political Will. Journal of Leadership & Organizational Studies, 24(1), 83–94. https://doi.org/10.1177/1548051816657983
32. Sparrowe, R. T. (2020). LMX and welfare trade-off ratios: An evolutionary perspective on leader-member relations. The Leadership Quarterly, 31(2), 101271. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2018.11.001
33. Van Kleef, G. A. (2009). How Emotions Regulate Social Life: The Emotions as Social Information (EASI) Model. Current Directions in Psychological Science, 18(3), 184–188. https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01633.x
34. Wang, D., Waldman, D. A., & Zhang, Z. (2014). A meta-analysis of shared leadership and team effectiveness. Journal of Applied Psychology, 99(2), 181–198. https://doi.org/10.1037/a0034531

35. Xu, N., Ghahremani, H., Lemoine, G. J., & Tesluk, P. E. (2022). Emergence of shared leadership networks in teams: An adaptive process perspective. The Leadership Quarterly, 33(6), 101588. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2021.101588

INTERAKCJA CZŁOWIEK – MASZYNA W SYSTEMACH AOI: WPŁYW DECYZJI OPERATORA NA DETEKCJĘ DEFEKTÓW PCBA

Justyna PIETRASZKO[1]

[1] Koło Naukowe Logistyki i Jakości Quallog, Uniwersytet Bielsko-Bialski, 43-309 Bielsko- Biała, ul. Willowa 2;
* Korespondencja: justynapietraszko9090@gmail.com;

Streszczenie: Produkcja elektroniki wymaga odpowiednich kontroli już od wczesnych etapów wytwarzania. Jedną z metod inspekcji PCBA (ang. Printed Board Circuit Assembly), jest AOI (ang. Automated Optical Inspection). Mimo, iż jest narzędziem automatycznej weryfikacji, wciąż bazuje na doświadczeniu operatora i jego ostatecznym zakwalifikowaniu określonego defektu. Artykuł ma na celu przedstawienie jakie rodzaje błędów analizuje AOI, co dzieję się w przypadku wykrycia błędu, a także reakcji operatora na wysyłane przez maszynę komunikaty. W artykule dokonano oceny efektywności systemu AOI w identyfikacji defektów oraz przeanalizowano wpływ czynnika ludzkiego na proces podejmowania decyzji w kontroli jakości. W badaniu zastosowano analizę literatury przedmiotu oraz metody empiryczne bazujące na danych pochodzących z systemu AOI dla produktu X w 2025 roku. Uzyskane rezultaty wskazują, że spośród 448 zarejestrowanych sygnałów jedynie 59 odpowiadało rzeczywistym defektom (FAIL), podczas gdy aż 389 przypadków stanowiło fałszywe alarmy (FALSE FAIL). Oznacza to, że na jeden faktyczny błąd przypada ponad 6,5 nieprawidłowych wskazań systemu. Uzyskane wyniki wskazują, że wysoki poziom fałszywych alarmów prowadzi do powstawania „szumu informacyjnego", który może obniżać czujność operatora i zwiększać ryzyko błędnej kwalifikacji defektów. Przedstawione wyniki mogą znaleźć zastosowanie zarówno wśród producentów elektroniki oraz firm wykorzystujących systemy AOI w kontroli jakości, jak i w środowisku naukowo-badawczym zajmującym się doskonaleniem procesów produkcyjnych. Mogą one przyczynić się do usprawnienia systemów inspekcji, ograniczenia liczby fałszywych alarmów oraz zwiększenia efektywności współpracy człowieka z rozwiązaniami automatycznymi.

Słowa kluczowe: PCBA, jakość, AOI, inspekcja, IPC

HUMAN – MACHINE INTERACTION IN AOI SYSTEMS: THE IMPACT OF OPERATOR DECISIONS ON PCBA DEFECT DETECTION

Abstract: Electronics manufacturing requires appropriate quality control measures from the early stages of production. One of the inspection methods used for PCBA (Printed Circuit Board Assembly) is AOI (Automated Optical Inspection). Although AOI is an automated verification

tool, it still relies heavily on the operator's experience and final classification of detected defects. This article presents the types of defects analyzed by AOI, the procedures followed when an error is detected, and the operator's response to system-generated alerts. It also evaluates the effectiveness of the AOI system in defect identification and analyzes the impact of the human factor on decision-making processes in quality control. The study is based on a literature review and empirical methods using data collected from the AOI system for product X in 2025. The results indicate that out of 448 recorded signals, only 59 corresponded to actual defects (FAIL), while as many as 389 cases were classified as false alarms (FALSE FAIL). This means that for every real defect, there were more than 6.5 incorrect system indications. The findings show that a high level of false alarms generates "information noise," which may reduce operator alertness and increase the risk of incorrect defect classification. The presented results may be useful for electronics manufacturers and companies employing AOI systems in quality control, as well as for the scientific community focused on improving production processes. They may contribute to enhancing inspection systems, reducing the number of false alarms, and improving the efficiency of human–machine interaction.

Keywords: PCBA, quality, AOI, inspection, IPC

Wprowadzanie

Rdzeniem każdego produktu elektronicznego są płyty drukowane PCBA. Obecnie produkcja zarówno PCB (ang. Printed Board Circuit) i PCBA jest w dużym stopniu zautomatyzowana, jednak nie może obejść się bez współpracy człowieka i maszyny. Maszyny potrafią wykonywać zadania w sposób dużo szybszy i bardziej precyzyjny niż człowiek, dodatkowo są bardziej powtarzalne, np. lutowanie robotem bądź agregatem lutowniczym jest dużo bardziej powtarzalnym procesem niż lutowanie ręczne za pomocą lutownicy. Złożoność produkcji PCBA, jej wieloetapowość oraz ilość i rozmiar zastosowanych komponentów sprawiają, że weryfikacja poprawności montażu jest jednym z kluczowych aspektów wytwarzania elektroniki. Dzięki monitorowaniu jakości w poszczególnych procesach i wyrobach, można poprawić ich wydajność, dokonywać ulepszeń oraz osiągać coraz lepsze wyniki zarówno jakościowe jak i produkcyjne, dodatkowo zwiększając konkurencyjność na tle innych podmiotów (Sampaio i in., 2023). Podczas produkcji płyt drukowanych przedsiębiorstwa korzystają z wielu metod inspekcji. Wybór odpowiedniej formy weryfikacji jest zależny od złożoności samej płyty, jak również specyficznych wymagań klientów określonych w ich CSRach (ang. Customer Specific Requirements). Zakres jest dość szeroki, można skupić się na inspekcji wizualnej pod mikroskopem, jak również zaimplementować bardziej złożone systemy oparte na algorytmach i sztucznej inteligencji. Jednym z narzędzi, któremu bliżej przyjrzano się w niniejszym artykule jest automatyczna inspekcja optyczna (AOI). Może wydawać się, że użycie słowa „automatyczny" jest powiązane z nieomylnością oraz wysoką dokładnością systemu weryfikacji. Należy jednak pamiętać, że są one projektowane przez człowieka i często poprawne działanie narzędzia, a także wykrywanie

odpowiednich defektów spoczywa właśnie na pracowniku. Analiza AOI jest podejściem powszechnie stosowanym ze względu na niskie koszty wdrożenia i utrzymania, a także wysoką wydajność urządzenia. Dynamiczny rozwój metod deep learnig spowodował, że łączenie AOI z zaawansowanymi algorytmami detekcji stało się dominującym podejściem w dziedzinie inspekcji elektroniki (Wang i in., 2025). Tradycyjne systemy AOI oparte na regułach często borykają się z wyzwaniami związanymi z wysokim odsetkiem fałszywych błędów (false fail) (Goti, 2025), które w kolejnym kroku są weryfikowane przez operatora i to właśnie jego opinia kwalifikuje zgłoszony błąd jako prawdziwy lub nie. Widać zatem, jak bardzo skuteczność oceny jest uzależniona od człowieka oraz jego doświadczenia.

W niniejszej pracy zastosowano podejście badawcze o charakterze empiryczno-ilościowym, uzupełnione o analizę literatury przedmiotu dotyczącej wykorzystania metody AOI w produkcji elektroniki. Badania empiryczne bazowały na rzeczywistych danych produkcyjnych rejestrowanych przez system automatycznej inspekcji optycznej 3D. Przeprowadzono ilościową analizę wykrytych defektów, ze szczególnym naciskiem na udział zgłoszeń fałszywie pozytywnych oraz ich wpływ na proces weryfikacji kontynuowany przez operatora. Możliwość wykonania badań w warunkach rzeczywistej produkcji pozwoliła na gruntowną ocenę funkcjonowania systemu AOI oraz roli człowieka w ostatecznej kwalifikacji niezgodności.

Metody inspekcji w przemyśle

Podczas weryfikacji poprawności wykonanych procesów, przedsiębiorstwa produkcyjne mogą korzystać z wielu metod inspekcji. Dobór zależy od złożoności produktu, specyficznych wymagań klientów, ale również parku technologicznego i wyposażenia danej firmy. W tabeli 1 przedstawiono możliwe metody kontroli z krótkim opisem poszczególnych zadań, a także możliwym zastosowaniem.

Tabela 1.
Klasyfikacja metod inspekcji.

Metoda inspekcji	Opis	Zastosowanie
Badanie ultradźwiękowe (ang. Ultrasonic Testing)	Badania ultradźwiękowe są nieniszczącą metodą wolumetryczną wykorzystującą fale sprężyste o częstotliwości powyżej 20 kHz do oceny stanu całej objętości badanego elementu. Umożliwiają wykrywanie i charakterystykę niezgodności, takich jak pęknięcia, braki przetopu, wtrącenia czy pęcherze, a także określenie ich liczby, wielkości i rozmieszczenia (Nowak, Bonek, 2017).	- Przemysł lotniczy; - Energetyka; - Budowa konstrukcji stalowych; - Kontrola spoin; - Przemysł motoryzacyjny; - W produkcji PCB/PCBA, metoda UT może być wykorzystywana do wykrywania rozwarstwień

Metoda inspekcji	Opis	Zastosowanie
		laminatów oraz nieciągłości strukturalnych w materiałach kompozytowych.
Badanie prądami wirowymi (ang. Eddy current)	Generowanie prądów wirowych zależy od pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez cewkę oraz od właściwości badanego materiału, przede wszystkim jego konduktywności (σ) i przenikalności magnetycznej (μ), które są uwarunkowane m.in. składem chemicznym i technologią wytwarzania. Parametry te determinują konstrukcję sondy oraz ustawienia badania, a także pozwalają określić standardową i efektywną głębokość wnikania prądów wirowych; w przypadku materiałów o złożonej mikrostrukturze konieczna jest dodatkowa walidacja z użyciem wzorców kalibracyjnych (Wocial, 2019).	- Przemysł lotniczy; - Energetyka; - Kontrola rur; - Przemysł motoryzacyjny; - W produkcji PCB metoda prądów wirowych może być wykorzystywana do kontroli ciągłości ścieżek przewodzących, wykrywania mikropęknięć w warstwach miedzi czy oceny jakości powłok metalicznych.
Badania penetracyjne (ang. Dye Penetring Testing)	Badania penetracyjne należą do podstawowych metod kontroli nieniszczącej i służą do identyfikacji nieciągłości występujących na powierzchni materiału, takich jak wgłębienia, pęknięcia o różnej szerokości, rysy, pory czy nieszczelności. Metoda ta może być stosowana w odniesieniu do większości materiałów, z wyjątkiem materiałów o wysokiej porowatości (Ordon, Bonek, 2017).	- Lotnictwo; - Motoryzacja - Energetyka; - Kontrola odlewów i elementów obrabianych mechanicznie; - W produkcji PCB/PCBA badania penetracyjne mają ograniczone zastosowanie, gdyż płytki drukowane są materiałami warstwowymi i częściowo porowatymi. Sporadycznie można wykorzystać tę metodę do wykrywania pęknięć powierzchniowych w elementach metalowych (np. obudowach, radiatorach), czy kontroli jakości mechanicznych elementów montażowych.
Inspekcja termograficzna (ang. Termography)	Metoda termograficzna umożliwia nieinwazyjne wskazanie na termogramie stref, w których zachodzi niekontrolowana utrata ciepła spowodowana przenikaniem lub infiltracją powietrza (Stachniewicz, 2022).	- Energetyka i instalacje elektryczne; - Budownictwo i izolacje termiczne; - Przemysł mechaniczny; - Medycyna; - W produkcji PCB/PCBA termografia stosowana jest do identyfikacji przegrzewających się komponentów, diagnostyki układów pod obciążeniem czy oceny poprawności rozkładu mocy.

Metoda inspekcji	Opis	Zastosowanie
X-RAY	Badanie rentgenowskie (X-ray) jest nieniszczącą techniką inspekcji materiałów i elementów elektronicznych, polegającą na prześwietlaniu obiektu promieniowaniem X w celu identyfikacji wad wewnętrznych, nieciągłości oraz nieprawidłowości w montażu (Michalska, 2021).	- Przemysł lotniczy i motoryzacyjny; - Przemysł metalurgiczny i maszynowy; - Medycyna i stomatologia; - Półprzewodniki; - W produkcji PCB/PCBA stosowany do kontroli połączeń lutowanych (szczególnie BGA) oraz wykrywania mikropęknięć i zwarć.
Testy Flying Probe, In Circuit Test	Zarówno jedna, jak i druga metoda służą do detekcji błędów oraz kontroli poprawności działania zmontowanych płytek drukowanych. Może weryfikować np. otwarte obwody, zwarcia, odchylenia wartości komponentów czy brakujące komponenty. Test ICT jest metodą bardziej miarodajną i często stosowana jest do dużych produkcji, tymczasem Flying Probe częściej wybierany jest dla produkcji niskoseryjnych bądź prototypowych (JM-EMS, 2024).	- Stosowane w elektronice, do weryfikacji poprawności montażu PCB/PCBA.
Inspekcja optyczna	Wady powierzchniowe rozpoznawane są na podstawie oceny wizualnej. Kontrola optyczna może być prowadzona ręcznie przez inspektora bądź automatycznie przy użyciu systemów wizyjnych i algorytmów przetwarzania obrazu (Ebayyeh, Muosavi, 2020).	- Produkcja tworzyw sztucznych i kompozytowych; - Przemysł lotniczy i motoryzacyjny; - Produkcja elektroniki; - Przemysł metalowy i maszynowy; - Przemysł farmaceutyczny i spożywczy; - W produkcji PCB/PCBA stosuje się oba warianty inspekcji wizualną oraz automatyczną do weryfikacji poprawności montażu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie cytowanych źródeł.

Produkując elektronikę, przedsiębiorstwa korzystają z całego dostępnego wachlarza możliwych metod kontrolnych, od inspekcji wizualnej, przez automatyczne testy optyczne, po złożone testy elektryczne, test środowiskowe, wytrzymałościowe, inspekcję materiałów w wejściowych czy EOL (ang. End of Life). Choć temat doboru narzędzi kontrolnych oraz ich wpływu na ostateczną ocenę produktu jest bardzo ciekawy i złożony, w niniejszej pracy skupiono się na testach AOI. W tabeli 2 przedstawiono podział inspekcji AOI w rozróżnieniu na kilka kryteriów.

Tabela 2.
Podział testów AOI.

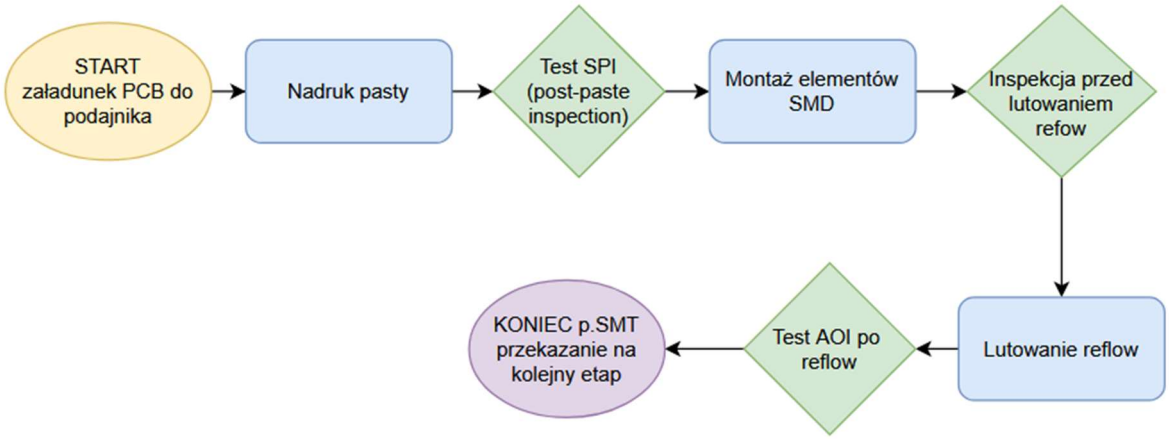
Rodzaj	Opis	Ograniczenia
Technologia obrazowania		
AOI 2D (dwuwymiarowe)	AOI 2D bazuje na kamerach o dużej rozdzielczości, które podczas kontroli wykonują dwuwymiarowe zdjęcia płytek PCB. Oprogramowanie zestawia zarejestrowane obrazy z wzorcem referencyjnym i identyfikuje odchylenia mogące wskazywać na wady. Istotne znaczenie ma odpowiednio dobrane oświetlenie, ponieważ pozwala ono wyraźnie podkreślić szczegóły oraz ewentualne defekty na powierzchni. Metoda ta wykorzystuje obraz z jednego kąta widzenia, a więc obejmuje wyłącznie elementy dostrzegalne z góry. Dzięki temu możliwa jest szybka inspekcja dużych wolumenów produkcji, co czyni tę technologię odpowiednią dla linii o wysokiej przepustowości. Zastosowanie: Inspekcja nieskomplikowanych, typowych płytek PCB z przewagą elementów montowanych w technologii SMT; Identyfikacja oczywistych wad, takich jak brak komponentów, odwrócona polaryzacja czy błędne umiejscowienie elementów (I.C.T., 2025).	Choć AOI 2D oferuje wiele korzyści, posiada też istotne ograniczenia. Nie zapewnia pełnej kontroli współpłaszczyznowości elementów ani nie umożliwia analizy objętości spoin lutowniczych. W zestawieniu z bardziej zaawansowanymi systemami częściej generuje również fałszywe alarmy. Do najczęściej występujących trudności należą: - Niemożność oceny ukrytych połączeń lutowniczych oraz wad zlokalizowanych pod obudowami komponentów. - Ograniczone możliwości pomiaru wysokości, co utrudnia kontrolę elementów wysokich lub o niestandardowych kształtach. - Trudności w wykrywaniu drobnych i niewidocznych defektów lutowniczych, takich jak małe pustki. - Większa liczba błędnych wskazań wymagających dodatkowej kontroli i potwierdzenia (I.C.T., 2025).
AOI 3D (trójwymiarowe)	Systemy AOI 3D korzystają z nowoczesnych metod obrazowania, aby uzyskać szczegółowe informacje o płytkach PCB. Wykorzystują one wiele kamer oraz światło strukturalne, co pozwala skanować płytkę pod różnymi kątami. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne mierzenie wysokości, objętości oraz współpłaszczyznowości połączeń lutowniczych i komponentów. Zaawansowane algorytmy przetwarzają dane 3D, określając wysokość wyprowadzeń, menisku lutowniczego oraz wykrywając mostki lutownicze. Obrazowanie i inspekcja odbywają się równocześnie, co zapewnia szybkie i dokładne pomiary trójwymiarowe. Wykorzystanie analizy głębi znacząco zwiększa skuteczność wykrywania wad, zmniejszając liczbę fałszywych alarmów i przeoczeń defektów (I.C.T., 2025).	Mimo licznych zalet, AOI 3D posiada także swoje ograniczenia. Systemy te są bardziej złożone i kosztowne niż AOI 2D, co wiąże się z wyższymi nakładami inwestycyjnymi oraz kosztami eksploatacji. Przetwarzanie dużych zbiorów danych 3D wymaga większej mocy obliczeniowej, co może spowalniać tempo inspekcji. Techniki skanowania, takie jak triangulacja laserowa, polegają na szczegółowym skanowaniu powierzchni, co może obniżać wydajność w porównaniu z AOI 2D. Z tego powodu AOI 3D jest mniej odpowiednie dla prostych, szybkich linii produkcyjnych, gdzie kluczowe są koszty i szybkość. Producenci muszą brać pod uwagę te ograniczenia przy decyzji o wykorzystaniu AOI 3D do zaawansowanej detekcji defektów i kompleksowej kontroli jakości (I.C.T., 2025).
Lokalizacja w linii produkcyjnej		
AOI Inline (w linii)	Online AOI jest w pełni zintegrowany z linią produkcyjną, instalowany po etapach nanoszenia pasty lutowniczej,	- Systemy Online AOI wiążą się z wyższymi kosztami zakupu i instalacji w

Rodzaj	Opis	Ograniczenia
	montażu komponentów i lutowania w piecu reflow, i umożliwia inspekcję płytek PCB na bieżąco w trakcie produkcji. Dzięki temu, że działa jako część linii, zapewnia stałą kontrolę jakości, co czyni go idealnym rozwiązaniem dla produkcji wysokiej jakości w dużych seriach (POE-PCBA, 2025).	porównaniu do systemów offline. - Nie sprawdzają się dobrze w produkcji małoseryjnej ani przy częstych zmianach ustawień inspekcji. - Działanie systemów online wymaga przeznaczenia określonej przestrzeni na linii produkcyjnej (POE-PCBA, 2025).
AOI Offline (stanowiskowe)	Offline AOI to samodzielny system kontroli, niezależny od linii produkcyjnej. Po opuszczeniu linii płytka PCBA jest ręcznie wprowadzana do urządzenia w celu przeprowadzenia inspekcji. Kontrola w trybie offline odbywa się jako oddzielny etap, co jest szczególnie przydatne przy próbkowaniu lub produkcji małoseryjnej. Dzięki niezależnej konstrukcji system można zainstalować w dowolnym miejscu w zakładzie (POE-PCBA, 2025).	- Płytki PCBA wymagają ręcznego załadunku i rozładunku, co podnosi koszty pracy i zwiększa możliwość popełnienia błędów. - Niższa wydajność: Brak integracji z linią produkcyjną oznacza, że kontrola jakości nie odbywa się w trybie ciągłym w trakcie produkcji (POE-PCBA, 2025).
Etap kontroli		
Post-paste AOI (SPI-Solder paste inspection)	Inspekcja pasty lutowniczej (SPI, ang. Solder Paste Inspection) stanowi istotny etap kontroli jakości w procesie montażu elektroniki, realizowany po naniesieniu pasty na płytki PCB. Systemy optyczne oceniają objętość, rozmieszczenie i jednolitość pasty, co pomaga zapobiegać defektom lutowniczym, takim jak zwarcia czy niepełne połączenia. Jako integralny element linii SMT, SPI zwiększa efektywność produkcji, wykrywając problemy jeszcze przed lutowaniem w piecu reflow i gwarantując niezawodność końcowego produktu elektronicznego (JT-int.com, 2025)	System SPI skutecznie kontroluje objętość, wysokość, położenie i równomierność pasty lutowniczej, jednak ustawienie dolnych i górnych progów limitów dopuszczenia ilości pasty, generuje dodatkowe alarmy, które mogą zostać zignorowane przez operatora.
Pre-reflow AOI (po obłożeniu komponentów SMD)	Umieszczenie systemu AOI po montażu komponentów, lecz przed lutowaniem w piecu reflow, jest kolejnym kluczowym etapem kontroli jakości. Na tym etapie system weryfikuje obecność komponentów, ich orientację oraz prawidłowe ustawienie. Nawet niewielkie przesunięcie komponentu może skutkować nieprawidłowym lutowaniem, a wczesne wykrycie takich błędów pozwala uniknąć defektów powstałych podczas reflow i kosztownych poprawek (AllElectroHub, 2025).	Pre-reflow AOI skutecznie wykrywa brakujące, źle ustawione lub obrócone komponenty SMD, jednak nie ocenia jakości połączeń lutowniczych ani objętości pasty. Dokładność systemu może być ograniczona przez kształt, rozmiar i ułożenie komponentów oraz czynniki procesowe i środowiskowe, a prawidłowe działanie wymaga regularnej kalibracji i konserwacji.

Rodzaj	Opis	Ograniczenia
Post-reflow AOI (końcowe, po lutowaniu w piecu)	Po procesie reflow, system AOI kontroluje jakość połączeń lutowniczych, identyfikując defekty takie jak tombstoning, mostki lutownicze czy niewystarczającą ilość lutowia. Ta końcowa inspekcja gwarantuje, że płytka spełnia wymagania jakościowe przed testami funkcjonalnymi lub dalszym montażem, a przy gęsto upakowanych komponentach jest niezbędna AllElectroHub, 2025).	AOI przeprowadzane po reflow efektywnie wykrywa defekty lutownicze czy brakujące ilości lutowia, jednak nie zawsze ujawnia wady wewnętrzne komponentów ani problemy elektryczne. Skuteczność inspekcji może być ograniczona przez gęsto upakowane elementy, odbicia światła od komponentów oraz ustawienia oświetlenia i systemu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie cytowanych źródeł.

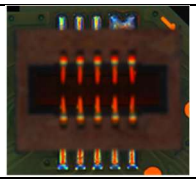
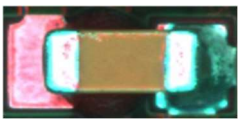
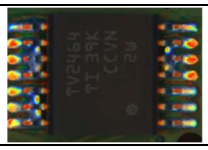
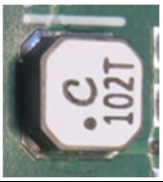
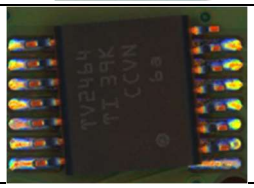
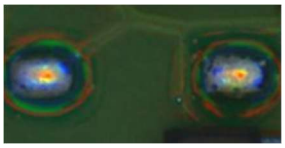
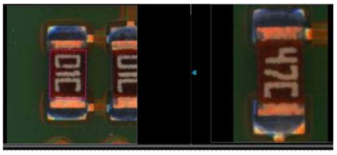
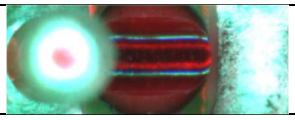
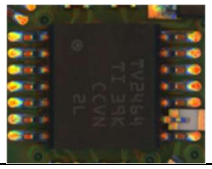
Aby lepiej zobrazować proces montażu SMT oraz miejsca, w których stosuje się inspekcje optyczne, na rysunku 1 przedstawiono schemat przepływu procesu.

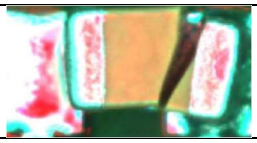


Rysunek 1. Diagram przepływu dla procesu SMT. Źródło: Opracowanie własne.

Z powyższego diagramu można zauważyć, że optymalna ilość automatycznych inspekcji podczas produkcji SMT wynosi 3. Podczas zwolnienia pierwszej sztuki, operator dokonuje również dodatkowej wizualnej/manualnej weryfikacji PCBA pod kątem poprawności polaryzacji kierunków montowanych komponentów oraz ich położenie przez dyszę. W celu przedstawienia i usystematyzowania możliwych błędów wykrywanych przez urządzenie AOI 3D, w tabeli 3 zebrano przykładowe defekty.

Tabela 3.
Przykłady defektów wykrywanych przez AOI 3D.

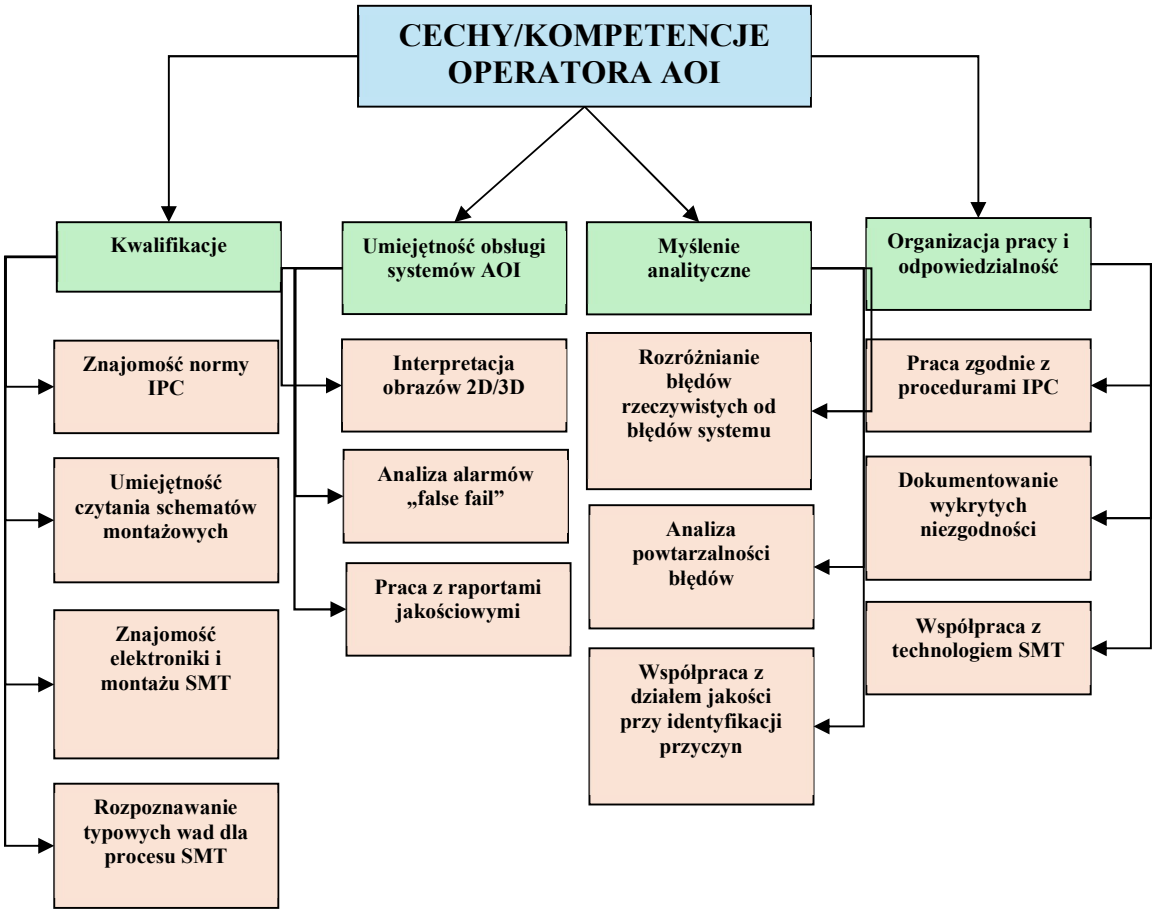
Rodzaj defektu	Opis	Przykład
Mostek lutowniczy (zwarcie)	Połączenia lutownicze między sąsiednimi padami lub nóżkami komponentów.	
Niewystarczające lutowanie	Zbyt mała ilość lutowia w połączeniu między komponentem a padem, mogąca prowadzić do przerw w obwodzie.	
Nadmiar lutowia	Nadmiar lutowia może powodować potencjalne powstawanie zwarć, uszkadzanie obudów komponentów w czasie reflow.	
Niewłaściwa polaryzacja komponentu	Niewłaściwa polaryzacja komponentu wiąże się z obłożeniem komponentu w niezgodnym kierunku co do schematu montażowego, co w rezultacie może prowadzić do utraty poprawnego działania płyty.	
Komponent przesunięty na padach	Przesunięcia komponentów na padach są dość powszechną sytuacją, wynikają z niepoprawnego obłożenia przez dyszę lub przesunięcia podczas reflow.	
Brak komponentu	Całkowity brak komponentu na padach PCB, może być spowodowane brakiem komponentu w rolce, upuszczeniem komponentu przez dyszę w czasie przejazdu bądź odpadnięciem z PCB podczas lutowania.	
Niewłaściwy opis na komponencie	Wiele z komponentów, np. układy scalone, transformatory, switche i inne posiadają na swoich obudowach opisy, które są weryfikowane przez AOI. Dzięki temu można wykryć, gdy np. został umieszczony niezgodny MPN (ang. Manufacturing Part Number) na laminacie.	
Podniesienie komponentu (tzw. tombstoning)	Podnoszenie się jednego końca komponentu pasywnego podczas lutowania.	
Dodatkowy komponent	Obok komponentów zamontowanych zgodnie ze schematem montażowym znajdują się również dodatkowe komponenty, nie ujęte w spisie elementów.	
Komponent zamontowany odwrotnie („na plecach”)	Komponent zamontowany odwrotnie, dolna strona komponentu, która powinna być zamontowana do laminatu, znajduje się z drugiej strony (tzw. montaż „na plecach”).	

Rodzaj defektu	Opis	Przykład
Uszkodzenie komponentu	Uszkodzenia mechaniczne komponentów, pęknięcia, przerwane zwoje, itd.	

Źródło: opracowanie własne. Fotografie własne autorki.

Z tabeli 3 wynika, że AOI 3D weryfikuje większość problemów, które mogą pojawić się podczas produkcji PCBA. Niestety system ten nie jest idealny i jak już zostało wspomniane wcześniej, ostateczne zakwalifikowanie defektu zgłoszonego jako fail, jest ustalane przez operatora pracującego na danej linii.

Rola operatora w procesie automatycznej inspekcji PCBA jest kluczowa, choć często niedoceniana i marginalizowana. Operator zajmuje się oceną i weryfikacją rezultatów automatycznej inspekcji, identyfikując zgłoszone przez system defekty oraz rozróżniając, które z nich wymagają korekty, a które stanowią fałszywe alarmy. Przed przystąpieniem do pracy przy weryfikacji danych z AOI, operator jest szkolony w zakresie IPC-A-610 oraz rozróżniania potencjalnych defektów. Na rysunku 2 zebrano cechy/kompetencje operatora gotowego do współpracy z systemem AOI.



Rysunek 2. Cechy/kompetencje operatora AOI. Źródło: Opracowanie własne.

Weryfikując dane zawarte na rysunku 2 można zauważyć, że dobry operator pracujący z maszyną AOI, powinien posiadać kompleksowe umiejętności i kwalifikacje. Od jego decyzji zależy, czy dany błąd zostanie zakwalifikowany jako defekt i naprawiony zanim opuści fabrykę.

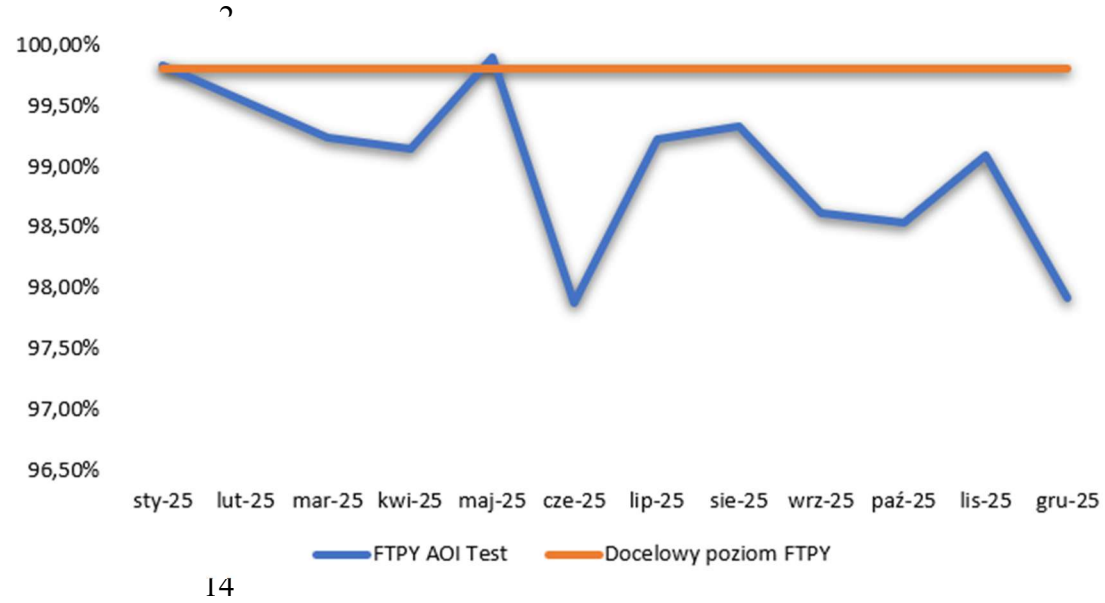
Opis przeprowadzonych badan i uzyskane wyniki

Do badania wybrano PCBA X, który jest jednym z tzw. high runner'ów (czyli produktów wysoko rotujących) w przedsiębiorstwie produkującym elektronikę. PCBA składa się z 356 komponentów SMD (187 rezystorów, 61 kondensatorów, 37 diod, 6 złącz, 25 układów scalonych, 1 oscylator, 2 ferryty i 37 tranzystorów). Analiza została oparta o dane z 2025 roku (zakres danych: styczeń-grudzień 2025, wartość dla lutego 0 - w tym miesiącu nie produkowano tej płyty). W okresie od stycznia do grudnia 2025 wyprodukowano 6750 produktów X. Wskaźnik FTPY (ang. First Time Pass Yeld, wskaźnik jakości w produkcji, określający procent wyrobów, które przechodzą przez dany etap procesu za pierwszym razem, bez konieczności poprawek, napraw ani ponownych testów), za ten okres wyniósł 99,13%. Łączna ilość wyników oznaczonych jako PASS (pozytywny) wynosiła 6691, natomiast FAIL (negatywny) 59. W tabeli 4 został przedstawiony miesięczny raport z testów AOI dla wyrobu X.

Tabela 4.
Dane AOI dla produktu X za rok 2025.

Miesiąc	Ilość łączna	PASS	FAIL	FALSE FAIL	FTPY AOI Test	Docelowy poziom FTPY
sty-25	618	617	1	58	99,84%	99,80%
lut-25	0	0	0	0	0%	99,80%
mar-25	660	655	5	38	99,24%	99,80%
kwi-25	816	809	7	22	99,14%	99,80%
maj-25	966	965	1	34	99,90%	99,80%
cze-25	330	323	7	19	97,88%	99,80%
lip-25	642	637	5	26	99,22%	99,80%
sie-25	750	745	5	41	99,33%	99,80%
wrz-25	504	497	7	54	98,61%	99,80%
paź-25	684	674	10	49	98,54%	99,80%
lis-25	444	440	4	27	99,10%	99,80%
gru-25	336	329	7	21	97,92%	99,80%
Razem	**6750**	**6691**	**59**	**389**	**99,13%**	**99,80%**

Źródło: opracowanie własne.



Wykres 1. Wykres FTP YELD AOI dla wyrobu X za 2025 rok. Źródło: opracowanie własne.

Uwaga: FTP YELD (ang. First Time Pass Yeld, wskaźnik jakości w produkcji, określający procent wyrobów, które przechodzą przez dany etap procesu za pierwszym razem, bez konieczności poprawek, napraw ani ponownych testów).

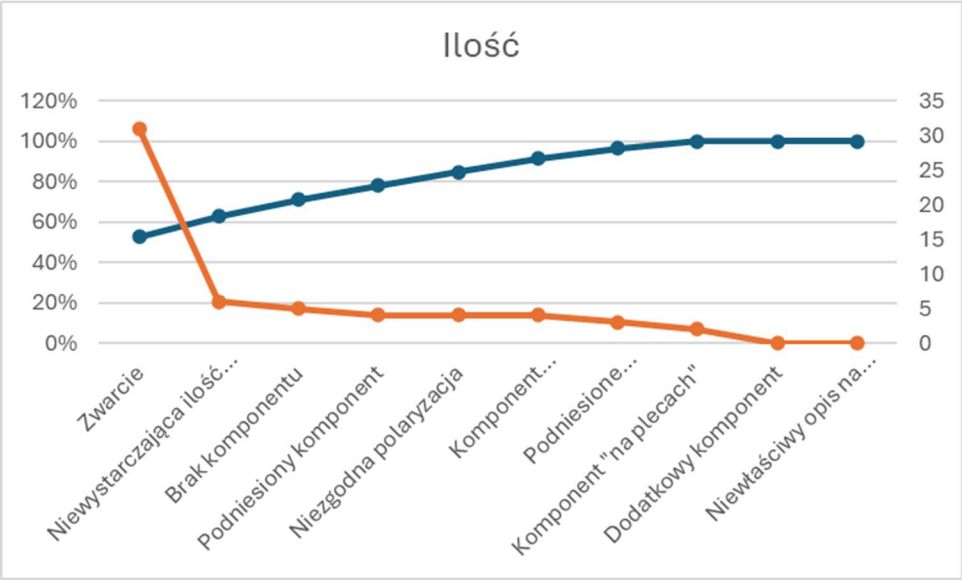
Przedstawione dane w tabeli 4 oraz na wykresie 1 pokazują ilość defektów jaka została zgłoszona przez urządzenie AOI oraz zweryfikowana przez operatora jako FAIL/PASS. Ogólny wynik FTPY dla tego wyrobu jest na bardzo dobrym poziomie i nie odbiega znacząco od normy (99,13%). Warto zwrócić uwagę na kolumnę z ilością błędów False Fail, która jest dość imponująca w stosunku do ilości prawdziwych błędów. Porównując dane z obu kolumn, można zauważyć jak wiele decyzji musi podjąć operator. W tabeli 5 zostały przedstawione defekty oraz ilości poszczególnych błędów. Dodano również kolumnę z potwierdzeniem ilości potwierdzonych niezgodności.

Tabela 5.

Zidentyfikowane defekty dla wyrobu X.

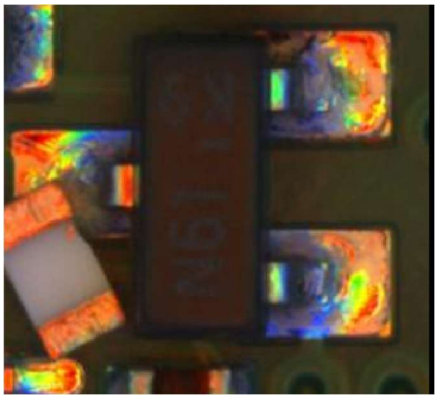
Wada	Ilość	Ilość potwierdzona
Zwarcie	31	31
Brak komponentu	5	5
Podniesiony komponent	4	4
Niewystarczająca ilość lutowia	6	6
Podniesione wyprowadzenie	3	3
Niezgodna polaryzacja	4	4
Komponent "na plecach"	2	2
Komponent skręcony/przesunięty	4	4
Dodatkowy komponent	0	1
Niewłaściwy opis na komponencie	0	0
Razem	**59**	**60**

Źródło: opracowanie własne.



Wykres 2. Wykres PARETO dla zidentyfikowanych defektów w wyrobie X za 2025rok. Źródło: opracowanie własne.

Dane w tabeli 5 pokazują, że jeden z parametrów został źle zakwalifikowany przez operatora. Weryfikując wszystkie dane/zdjęcia wygenerowane przez AOI dla poszczególnych defektów, zauważono, że operator zakwalifikował dodatkowy komponent jako błąd nieprawdziwy (rysunek nr 3). Jest to bardzo istotny błąd, który został błędnie zinterpretowany bądź pominięty. Wysłanie PCBA z takim defektem do klienta może przysporzyć wielu problemów poczynając od reklamacji, segregowania stanów magazynowych, weryfikacji danych, po utratę reputacji. W tym przypadku błąd został wykryty na testach ICT i nie opuścił fabryki dostawcy, co nie zmienia faktu, że taki błąd nie powinien być zakwalifikowany przez operatora jako fałszywy. Doświadczenie operatora na stanowisku - 1,5 roku, błąd wygenerowany na zmianie nocnej w środę 11 czerwca 2025 o godzinie 03:27. Prawdopodobnie zmęczenie/znużenie operatora przyczyniło się do błędnej weryfikacji.



Rysunek 3. Dodatkowy komponent. Źródło: fotografia własna autorki.

Co może wpływać na błędne zakwalifikowanie danych przez operatora? Czynników, które mogą mieć wpływ na poprawność przydzielenia defektu do odpowiedniej kategorii, jest wiele. Można je podzielić na dwie grupy: takie, które wynikają z uwarunkowań samego testu i technologii, oraz takie, które są zależne od operatora – jego doświadczenia i samopoczucia. W tabeli numer 6 przedstawiono czynniki, które mogą przyczyniać się do podejmowania niewłaściwych decyzji przez operatora systemu AOI.

Tabela 6.
Potencjalne czynniki mogące wpływać na decyzję operatora AOI.

Czynnik	Znaczenie w kontekście ryzyka błędu
Uwarunkowania technologiczne procesu inspekcji	
Niewłaściwe parametry systemu inspekcji	Zbyt wysoka lub zbyt niska czułość systemu może powodować zarówno fałszywe alarmy, jak i pominięcie prawdziwych defektów.
Wadliwe lub nieaktualne wzorce referencyjne	Nieprecyzyjne albo nieaktualne szablony mogą prowadzić do niepewnej klasyfikacji defektów.
Jakość wyświetlanego obrazu	Złe warunki obrazowania ograniczają możliwość jednoznacznej oceny defektu.
Skomplikowanie produktu	Duża liczba części i wariantów podnosi ryzyko popełnienia błędu.
Zmienność procesu produkcyjnego	Typowe odchylenia w produkcji mogą prowadzić do błędnej kwalifikacji jako defekt.
Czynniki zależne od operatora	
Doświadczenie operatora	Brak doświadczenia zwiększa szansę na niepoprawną ocenę wskazań.
Przeszkolenie/ znajomość standardów	Niewystarczające szkolenie pracowników może prowadzić do błędnej klasyfikacji defektów.
Stres	Utrudnia prawidłową ocenę sytuacji i podejmowanie decyzji.
Zmęczenie	Pogarsza skupienie i zdolność oceny obrazu.
Presja czasu i otoczenia	Presja szybkiego podejmowania decyzji podnosi prawdopodobieństwo popełnienia błędu.
Stan zdrowia/samopoczucie	Mogą redukować skupienie oraz precyzję analiz.
Monotonia	Powtarzalne czynności wykonywane przez dłuższy czas sprzyjają spadkowi uwagi.

Źródło: opracowanie własne.

Na błędną kwalifikację defektów przez operatora AOI mają wpływ zarówno uwarunkowania technologiczne procesu inspekcji, jak i czynniki ludzkie związane z doświadczeniem oraz kondycją psychofizyczną osoby obsługującej ten system. Kluczowe znaczenia mają zatem: jakość konfiguracji systemu oraz danych referencyjnych, a także takie elementy jak zmęczenie, stres czy monotonia pracy, które mogą istotnie obniżać dokładność podejmowanych decyzji.

Dyskusja

Analiza wyników testów AOI produktu X w 2025 roku pozwala wskazać kluczowe obserwacje dotyczące interakcji człowieka z maszyną oraz skuteczności kontroli automatycznej:

a) Problem fałszywie negatywnych sygnałów (False Failures)

Najbardziej zauważalnym elementem zestawienia przedstawionego w tabeli 4 jest relacja między prawdziwymi defektami (FAIL = 59) a sygnałami fałszywie negatywnymi (FALSE FAIL = 389). Średnio na każdy rzeczywisty defekt przypada ponad 6,5 fałszywych wskazań, które wymagają weryfikacji przez operatora. Wysoki wskaźnik False Fail przyczynia się do powstawania tzw. „szumu informacyjnego". Operator, przyzwyczajony do tego, że większość sygnałów systemu jest błędna, może wytworzyć rutynę szybkiego zatwierdzania (kliknięcie „PASS") bez dokładnej analizy.

b) Studium przypadku: Błąd krytyczny „Dodatkowy komponent"

Przypadek z czerwca 2025 r., w którym dodatkowy komponent został błędnie zakwalifikowany jako PASS, stanowi istotny punkt w analizie wpływu operatora na proces kontroli. Fakt, że błąd wystąpił o godzinie 03:27 podczas zmiany nocnej, potwierdza doniesienia literatury wskazujące na obniżenie koncentracji w okresach minimalnej aktywności psychofizycznej (Nowak, 2018). Operator z 1,5-rocznym stażem, mimo że uznawany za doświadczonego, popełnił błąd nie z powodu braku wiedzy (co wskazuje tabela 6), lecz prawdopodobnie na skutek monotonii i zmęczenia. System AOI działał prawidłowo, jednak kluczowym ograniczeniem pozostaje czynnik ludzki.

c) Wpływ technologii na decyzje operatora

Tabela 6 skutecznie wskazuje kluczowe czynniki ryzyka. Należy zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- Czułość systemu: Zbyt restrykcyjne ustawienia AOI mogą generować nadmiar fałszywych alarmów (False Fail), co prowadzi do frustracji operatorów i przyspieszenia podejmowania decyzji.
- Jakość obrazu: Jeśli obraz wyświetlany na monitorze nie pozwala na pewną identyfikację (np. ze względu na refleksy świetlne na lutowiu), operator może podejmować decyzje „intuicyjnie", co w systemach opartych na podejściu zero-jedynkowym jest niedopuszczalne.

Podsumowanie

Analiza interakcji człowiek-maszyna w procesie inspekcji AOI dla produktu X wykazała, że dominującym problemem są fałszywe alarmy generowane przez system – 389 przypadków False Fail w porównaniu do 59 prawdziwych defektów. Powtarzalna weryfikacja tych wskazań obniża czujność operatora dokonującego kwalifikacji, a wysoka czułość systemu, mimo zwiększenia bezpieczeństwa jakościowego, pozornie może zwiększać ryzyko błędu ludzkiego poprzez przyzwyczajenie do fałszywych sygnałów. Analiza błędu z czerwca 2025 r. dowiodła, że nawet doświadczeni operatorzy mogą zawieść w starciu z ograniczeniami biologiczno-psychologicznymi, takimi jak zmęczenie nocne czy monotonia pracy, co wskazuje, że źródłem błędu była raczej ludzka rutyna niż brak wiedzy. W związku z tym rekomenduje się optymalizację programu inspekcji w celu redukcji „szumu" fałszywych alarmów, wprowadzenie systemów wspomagających oparte na AI lub Deep Learning do wstępnego filtrowania oczywistych błędów oraz zarządzanie czasem pracy operatorów, aby unikać długich bloków inspekcyjnych w godzinach nocnych, kiedy wydolność psychofizyczna jest najniższa.

Wyniki przedstawionych badań mogą znaleźć zastosowanie zarówno w środowisku przemysłowym, jak i naukowo-badawczym. Przede wszystkim mogą być przydatne dla producentów elektroniki oraz przedsiębiorstw wykorzystujących systemy AOI w kontroli jakości płyt drukowanych, ponieważ pozwalają lepiej zrozumieć wpływ decyzji operatora na końcową skuteczność inspekcji. Uzyskane wnioski mogą zostać wykorzystane do optymalizacji procesu kontroli jakości, a szczególnie w zakresie ograniczenia liczby fałszywych błędów/alarmów, a także poprawy efektywności pracy osób współpracujących z automatycznymi systemami kontroli.

Bibliografia

1. Sampaio A.M., Lima A., Silva C., Carneiro V.H., Fernandes F., Fernandes A., Pontes A.J., (2023, January). *Design and development of An Automatic Optical Inspection (AOI) system support based on digital manufacturing*. Science Direct, Procedia CIRP 119. DOI:10.1016/j.procir.2023.03.080
2. Wang Y., Yin T., Chen X., Zhu Y., Wang J., Ma Y., Liu L. Wang J., (2025, 08.29). *SCP-DETER: A efficient small-object-enhanced pyramid approach for PCB defect detection*. PLoS One 20 (8): e0330039. DOI: doi.org/10.1371/journal/pone.0330039.
3. Goti A.B., (2025, January). *AI-based Automated Optical Inspection (AOI) Standardization*. Internal Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations, Volume 01, issues 01. DOI:10.13140/RG.2.2.14907.32802
4. Nowak M., Bonek M. (2017). *Porównanie radiologicznych i ultradźwiękowych metod badań nieniszczących w spawalnictwie*. Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zeszyt nr 2, Gliwice.
5. Wocial A. (2019). *Badania prądami wirowymi połączeń spawanych- wpływ doboru warunków i parametrów badania na czułość i wiarygodność metody- przykłady zastosowań*. Kwartalnik Naukowo- Techniczny: Badania nieniszczące i diagnostyka nr 4, Szczecin.
6. Ordon M., Bonek M. (2017). *Analiza porównawcza powierzchniowych metod badań nieniszczących- penetracyjnych oraz magnetyczno-proszkowych*. Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zeszyt nr 2, Gliwice.
7. Stachniewicz R. (2022). *Inspekcje termograficzne jako część procesu termomodernizacji*. Materiały Budowalne, 2/2022 nr 604, DOI: 10.15199/33.2022.12.29
8. Michalska M. (2021). *Overview of the use of X-RAY equipment in electronics quality tests.* IAPGOŚ 2/2021, https://doi.org/10.35784/iapgos.2655, Lublin.
9. JM-EMS (2024). *In-Circuit Test – dlaczego zazwyczaj może być bardziej korzystnym wyborem niż test Flying Probe*. Retrived from 17.02.2026 z https://jm-ems.pl/article/ktory-test-jest-najlepszy-dla-twojego-zespolu-pcba-ict-czy-flying-probe/
10. Ebayyeh A., Muosavi A. (2020). *A Review and Analysis of Automatic Optical Inspection and Quality Monitoring Methods in Electronic Industry.* Journal Institute of Electrical and Electronics Engineers, Volume 8, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029127.
11. I.C.T. Company (2025). *2D vs 3D AOI Explained: Which Inspection Method Suits Your Needs*. Retrived from 18.02.2026 z https://www.smtfactory.com/2d-vs-3d-aoi-explained-which-inspection-method-suits-your.
12. POE-PCB Blog (2025). *What is the difference between offline AOI and online AOI?* Retrived from 18.02.2026 z https://www.poe-pcba.com/blogs-detail/pcb-knowledge-blog/what-is-the-difference-between-offline-aoi-and-online-aoi.
13. JT, (2025). *Solder Paste Inspection*. Retrived from 18.02.2026 z https://www.jt-int.com/product/solder-paste-inspection-3/
14. AllElectroHub (2025*). From Prototype to Production: Integrating AOI in Your SMT Line for Maximum Efficiency*. Retrived from 18.02.2026 z https://www.allpcb.com/blog/pcb-manufacturing/from-prototype-to-production-integrating-aoi-in-your-smt-line-for-maximum-efficiency.html.

15. Nowak K. (2018). *Mózg po godzinach: wpływ pracy zmianowej na funkcjonowanie poznawcze pracowników*, Bezpieczeństwo pracy, DOI: 10.5604/01.3001.0012.2225.

WYKORZYSTANIE ALTERNATYWNYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH W POJAZACH CIĘŻAROWYCH

Arkadiusz DREWNICKI[1], Dawid JANIEC[1], Jan KAFEL[1] , Maja KONIECZKO[1], Bartosz PONISZOWSKI[1] , Maciej SOCHACKI[1], Oskar WOJSYK[1]*, Daniel ZYGMUNT [1], Bożena SZCZUCKA-LASOTA[2]*, Tomasz WĘGRZYN[2]

[1] Student, Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej

[2] Bożena SZCZUCKA-LASOTA, Tomasz WĘGRZYN, Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, ORCID: 0000-0003-3312-1864

* Korespondencja: ow303397@student.polsl,pl; bozena.szczucka-lasota@polsl.pl

Streszczenie: W artykule scharakteryzowano konwencjonalne układy napędowe, podkreślając znaczenie momentu obrotowego, efektywności paliwowej oraz wydajnego chłodzenia w pojazdach ciężarowych. Następnie przedstawiono alternatywne źródła napędu, takie jak energia elektryczna oraz paliwa gazowe (CNG i LNG). Napędy elektryczne cechują się brakiem emisji spalin i niższym hałasem, jednak mają ograniczony zasięg, długi czas ładowania oraz dużą masę własną. Z kolei CNG i LNG oferują niższą emisję i porównywalne osiągi do diesla, lecz są droższe, wymagają kosztownej infrastruktury i specjalistycznych instalacji. Omówiono także wady tych rozwiązań, w tym słabo rozwiniętą infrastrukturę tankowania oraz problemy logistyczne. Alternatywą dla napędu w pełni spalinowego są także układy hybrydowe, łączące silnik spalinowy i elektryczny. Pozwalają one ograniczyć zużycie paliwa i emisję, zapewniając jednocześnie zalety silnika wysokoprężnego. Wnioski wskazują, że choć technologie alternatywne dynamicznie się rozwijają, mają potencjał i sprawdzają się podczas użytkowania na krótkich dystansach, obecnie silniki wysokoprężne, ze względu na rozwiniętą infrastrukturę oraz znaczny zasięg na jednym tankowaniu, pozostają najbardziej praktycznym rozwiązaniem w transporcie dalekobieżnym.

Słowa kluczowe: Transport, alternatywne układy napędowe, elektromobilność, infrastruktura

THE USE OF ALTERNATIVE POWERTRAINS IN HEAVY-DUTY VEHICLES

Abstract: This article characterizes conventional powertrains, emphasizing the importance of torque, fuel efficiency, and effective cooling in heavy-duty vehicles. Subsequently, alternative power sources are presented, such as electricity and gaseous fuels (CNG and LNG). Electric powertrains feature zero tailpipe emissions and reduced noise; however, they are limited by range, long charging times, and high curb weight. Conversely, CNG and LNG offer lower emissions and performance comparable to diesel, but they are more expensive and require costly infrastructure alongside specialized installations. The drawbacks of these solutions, including underdeveloped refueling infrastructure and logistical challenges, are also discussed. Hybrid systems, which combine an internal combustion engine with an electric motor, serve as another alternative to fully combustion-based drives. They enable reductions in fuel consumption and emissions while maintaining the benefits of a diesel engine. The conclusions indicate that while alternative technologies are evolving rapidly, hold significant potential, and are effective for short-distance applications, diesel engines currently remain the most practical solution for long-haul transport due to established infrastructure and an extensive range on a single refueling.

Keywords: Transport, alternative powertrains, electromobility, infrastructure

1. Wstęp

Transport drogowy towarów odgrywa znaczącą rolę w prawidłowym funkcjonowaniu gospodarki. Wykorzystanie samochodów oraz zespołów pojazdów jako środka transportu przeznaczonego do przewozu towarów nie jest przypadkowe. Analizując wszystkie dostępne środki transportu, opcja przewozu pojazdami drogowymi wydaje się najbardziej racjonalna ponieważ jest to sposób stosunkowo tani, szybki, oraz organiczna konieczność organizowania dodatkowych czynności przeładowczych.

Dodatkowym atutem jest wysoki rozwój sieci drogowej, który zapewnia możliwość bezpośredniego skomunikowania nawet najbardziej odległych punktów na mapie Polski czy Europy. Dlatego też na drogach naszego kraju można co dzień zauważyć setki samochodów ciężarowych, transportujących najróżniejsze towary. Polska jest także jednym z największych przewoźników Europy oraz istotnym punktem tranzytowym. Związane z rozwojem gospodarki

rosnące zapotrzebowanie za usługi transportowe wymaga od przewoźników poszerzania flot oraz zakupu większej ilości pojazdów.

Istotny wzrost liczby pojazdów nieodzownie łączy się niestety z wzrostem emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Emisja powodowana przez samochody ciężarowe jest znaczna, tylko w Polsce jest zarejestrowanych prawie 1,2 miliona, jest to największa liczba w całej Europie. Na całym starym kontynencie natomiast zarejestrowanych jest około 6,4 miliona samochodów o DMC powyżej 3,5 tony. W kwestii emisji szkodliwych związków do atmosfery ważnym jest także fakt, iż w 2024 roku tylko 15 tysięcy samochodów był zasilanych paliwami alternatywnymi. Znaczna większość była zasilana energią elektryczną, a 170 – wodorem.

Emisja związana z wykorzystaniem samochodów ciężarowych jest o tyle szkodliwa, że prawie wszystkie samochody ciężarowe są zasilane silnikami wysokoprężnymi. Silniki te emitują do atmosfery związki takie jak tlenki azotu, tlenek węgla, dwutlenek węgla, węglowodory oraz cząstki stałe. Dla sprostania rygorystycznym wymogom zawartym w Europejskich regulacjach dotyczących emisji spalin EURO, producenci samochodów zobowiązani są do stosowania w pojazdach ogół osprzętu, który ma za zadanie zredukować emisję szkodliwych związków, takich jak m.in. selektywna redukcja katalityczna, filtr cząstek stałych DPF czy recyrkulacja spalin.

Pomimo rygorystycznych norm emisji spalin, sektor transportu drogowego ciągle odpowiada za znaczną część generowanych zanieczyszczeń. W 2023 r. sektor transportu wyemitował 786 mln t. CO2, co stanowiło 31,5 proc. wszystkich unijnych emisji CO2. Ze względu na wysoki współczynnik emisji związany z korzystaniem z spalinowych samochodów, Komisja Unii Europejskiej zdefiniowała docelowe poziomy redukcji emisji dla nowych samochodów ciężarowych i autokarów. Obowiązujący od 2024 r. unijny cel dla pojazdów ciężkich zakłada obniżenia emisji o 45 proc. do 2030 r., o 65 proc. do 2035 r. oraz o 90 proc. do 2040 r., w porównaniu z poziomem referencyjnym z 2019 r.

W związku ze wspomnianymi regulacjami producenci samochodów ciężarowych starają się opracować technologie, pozwalające na zasilenie pojazdów ciężarowych paliwami alternatywnymi, które ograniczą lub całkowicie wyeliminują emisję szkodliwych związków do atmosfery oraz Warto więc przyjrzeć się jakie rozwiązania dostępne są na rynku oraz czy mają szanse konkurować ze swoimi spalinowymi odpowiednikami. (TruckiTransport, b.d., Transport Manager, b.d., Grupa DBK, b.d., WNP, b.d.).

2. Cechy konwencjonalnego układu napędowego.

Aby skonstruować samochód ciężarowy wyposażony w napęd alternatywny tak, aby faktycznie mógłby on stanowić alternatywę dla napędu spalinowego warto najpierw odpowiedzieć na pytanie jakie warunki musi on spełnić oraz jaką powinien cechować się charakterystyką. Samochody ciężarowe w odróżnieniu od osobowych pracują zupełnie w innych warunkach oraz inne wymogi są im stawiane. Najważniejszym parametrem układu napędowego samochodu ciężarowego, opartego na silniku wysokoprężnym jest moment obrotowy, ponieważ to on odpowiada za ruszanie samochodu z miejsca. W silnikach spalinowych moment obrotowy wytwarzany jest z sił generowanych poprzez spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej, oddziałujących na cylindry jednostki napędowych. Odpowiednia ilość momentu obrotowego zapewnia efektywne poruszanie się zestawem o masie 40 ton przy różnorodnym ukształtowaniu terenu.

Praca pod wzmożonym obciążeniem wymaga stosowania także odpowiednio wydajnego układu chłodzenia. Bardzo ważnymi elementami są wydajna chłodnica cieczy oraz intercooler. Intercooler i chłodnica cieczy współpracują, aby zapewnić optymalną pracę silnika. Podczas gdy intercooler obniża temperaturę powietrza doładowującego, chłodnica cieczy kontroluje temperaturę samego silnika. Oba te elementy są bardzo ważne dla prawidłowego funkcjonowania jednostki napędowej, zwłaszcza w przypadku pojazdów ciężarowych, które muszą sprostać wyzwaniom związanym z długotrwałą jazdą pod dużym obciążeniem.

Bardzo ważną cechą jest też wydajność paliwowa układu, ponieważ więcej postojów przeznaczonych na tankowanie to dłuższy czas trwania procesu przewozu. Producenci starają się zminimalizować spalanie oraz tak zoptymalizować układ napędowy, aby móc na jednym tankowaniu przejechać jak największy dystans. Nowoczesny samochód ciężarowy zużywa średnio 30 l/100km w zależności od obciążenia czy ukształtowania terenu. (Land Rover, b.d., Arcoore, b.d., Webfleet, b.d.)

3. Rodzaje alternatywnych układów napędowych dostępnych na rynku

Producenci od dłuższego czasu pracują nad znalezieniem najbardziej optymalnej alternatywy dla silnika wysokoprężnego, stosowanego dotychczas w samochodach ciężarowych. Motywują ich do tego także wcześniej wspomniane dyrektywy Unii Europejskiej. Warto zastanowić się więc jakie rozwiązania dostępne są obecnie na rynku i jak w praktyce wygląda korzystanie z nich w porównaniu do konwencjonalnego, spalinowego pojazdu.

Wraz ze wzrostem popularności osobowych samochodów elektrycznych, również producenci pojazdów ciężarowych zaczęli wdrażać zelektryfikowane modele do swoich ofert. Elektryczne układy napędowe podczas swojej pracy nie emitują żadnych szkodliwych związków chemicznych do atmosfery, stąd też spełniają wszystkie normy ich dotyczące. Elektryczne układy napędowe samochodów ciężarowych składają się z kilku elementów:

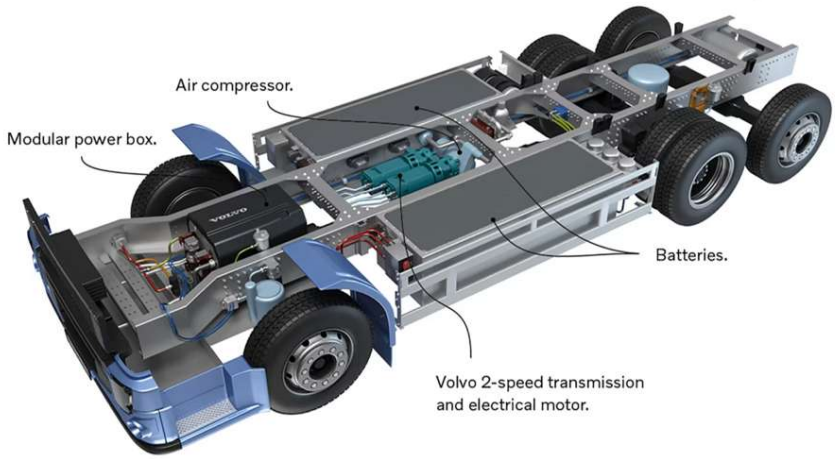
- Akumulatora trakcyjnego – wysokonapięciowy akumulator będący w stanie przechować odpowiednio dużą ilość ładunku elektrycznego pod wysokim napięciem potrzebnym do napędzania pojazdu,
- Silnika elektrycznego – silnik elektryczny prądu przemiennego o odpowiedniej mocy pozwalającej na poruszanie się pojazdem ciężarowym (przeważnie o mocy maksymalnej w okolicach od 200 do 500 kW)
- Konwerter DC/AC – pozwala na zmianę prądu stałego z akumulatora trakcyjnego na prąd przemienny potrzebny do napędzania silnika elektrycznego oraz w drugą stronę, tak aby odzyskiwać energię z hamowania rekuperacyjnego,
- Konwerter DC/DC – zmniejsza napięcie akumulatora trakcyjnego na niższe potrzebne do zasilania systemów pokładowych,
- Układ chłodzenia – żeby zapobiec przegrzaniu się elementów elektrycznych potrzebny jest układ chłodzenia, który doprowadza ciecz chłodzącą do silnika, akumulatora trakcyjnego oraz konwerterów, a następnie pozbywa się tego ciepła przy użyciu chłodnicy. Układ ten musi być napełniony specjalnym płynem chłodzącym dla pojazdów elektrycznych by zapobiec zwarciom w przypadku jego wycieku,

- Złącze ładowania – ustandaryzowane złącze pozwalające na ładowania akumulatora trakcyjnego ze źródła zewnętrznego.

Układy elektryczne zazwyczaj stosowane są w samochodach ciężarowych poruszających się na krótkich trasach np. pracujących jako śmieciarki lub w dostawach w aglomeracjach miejskich.



Rys 3.1 Elektryczny samochód Volvo FE Electric .



Rys 3.2 Schemat układu napędowego zasilanego energią elektryczną.

Korzystanie z elektrycznych samochodów w centrach miast oprócz czynników emisyjnych niesie ze sobą jeszcze jedną dodatkową korzyść – redukcję hałasu. Pracownicy firmy Volvo zbadali, że poziom hałasu elektrycznego samochodu ciężarowego jest o 10 dB niższy niż w przypadku samochodu zasilanego silnikiem wysokoprężnym. Również firma MAN zmierzyła

hałas swoich elektrycznych pojazdów a dzięki badaniom różnica przy prędkości 20 km/h wyniosła 11 dB. Przy tej prędkości hałas generowany przez pojazd elektryczny był większy o 1 dB od spalinowego samochodu osobowego. W przypadku zasilania energią elektryczną zmniejsza się także natężenie wibracji generowanie przez układ napędowy, co pozytywnie wpływa na odczucia kierowcy.

Oprócz energii elektrycznej, jako alternatywne źródło zasilania stosuje się także CNG lub LNG. CNG (ang. Compressed Natural Gas), czyli sprężony gaz ziemny oraz jego skroplony wariant LNG (ang. Liquefied Natural Gas). W obydwu paliwach mamy do czynienia z klasyczną jednostką wysokoprężną, przystosowaną do pracy na paliwie alternatywnym, a jego osiągi są niemal identyczne jak te, uzyskane podczas spalania oleju napędowego. Zarówno silnik na CNG, jak i diesel oferują 280 KM przy 1900 obr./min i mają niemalże ten sam maksymalny moment obrotowy – gazowiec oddaje dyspozycji 1350 Nm w zakresie od 1100 do 1400 obr./min, zaś u jego konwencjonalnego brata mamy 1400 Nm w zakresie od 1000 do 1350 obr./min. Samochody zasilane CNG lub LNG w porównaniu do konwencjonalnych wersji nie posiadają jednak układu dotrysku AdBlue, co odpowiednio zmniejsza masę całego pojazdu. CNG jest jednym z najbezpieczniejszych paliw, ponieważ temperatura zapłonu ziemnego jest dużo wyższa niż benzyny czy diesla. CNG jest lżejszy od powietrza, a w razie rozszczelnienia instalacji bardzo szybko się ulatnia. Poza tym, sprężony gaz ziemny nie generuje tyle hałasu i zmniejsza go w porównaniu z konwencjonalnymi paliwami od 3 do nawet 7 decybeli. Samochód zasilany CNG oraz LNG jest ponadto cichszy i co oczywiste, emituje znacznie mniej szkodliwych substancji do atmosfery

Do zasilania pojazdu z silnikiem spalinowym przy wykorzystaniu CNG czy LNG potrzebujemy odpowiedniej instalacji. Jednym z najważniejszych elementów to sam zbiornik na paliwo, najczęściej cylindryczny typu 1 oraz 2, czyli stalowe oraz stalowe wzmacniane kompozytem w części cylindrycznej, dla zmniejszenia masy zbiornika. W przypadku LNG zbiornik ten także musi być odpowiednio odizolowany aby zapobiec podgrzewaniu się paliwa. Ze zbiornika paliwo te przemieszcza się do reduktora aby zmniejszyć ciśnienie gazu lub parownika aby zamienić jego formę z ciekłej na gazową.

Następnie w formie gazowej paliwo to jest przepuszczane przez filtr gazu z separatorem i przy wykorzystaniu elektrozaworów dawkowane do silnika spalinowego. Całą pracą tego układu zajmuje się sterownik, który na podstawie dodatkowych czujników w instalacji oraz zachowania kierowcy i warunków drogowych odpowiednio dobiera ilość paliwa do silnika.

Pojazdy ciężarowe zasilane CNG w Polsce jakie możemy spotkać to głównie śmieciarki ze względu na ich trasy wykonywane w centrach miast, gdzie niższa emisja szkodliwych substancji jest dużą zaletą. Poza tym na przykład producent pojazdów Iveco oferuje całą swoją gamę modelową ciągników siodłowych w wersjach z silnikiem spalinowym zasilanym CNG

lub LNG. (Volvo Trucks, b.d., NaOsi, b.d., Volvo Trucks, 2018., TruckiTransport, b.d., 40ton, b.d., TNT Express Polska, b.d., OTOMOTO, 2023., 40ton, 2020).



Rys 3.3 Układ zasilania CNG samochodu ciężarowego.

4. Problemy paliw alternatywnych dostępnych na runku.

Omówione zostały już zalety oraz korzyści stosowania paliw alternatywnych w pojazdach ciężarowych, lecz aby w pełni ocenić, czy dane paliwo ma szanse zostać paliwem przyszłości dla samochodów ciężarowych warto przeanalizować także wszystkie wady oraz braki. Czasami czynniki te decydują o porzuceniu danej źródła zasilania na korzyść wypróbowanych oraz wdrożonych rozwiązań

Na sam początek warto rozważyć wady zastosowania zasilania w samochodach ciężarowych napędu elektrycznego. Napęd elektryczny, choć nie wolny od wad, jest z powodzeniem stosowany w samochodach osobowych. Chociaż ma on też swoich zagorzałych przeciwników, istnieją okoliczności, takie jak użytkowanie pojazdu w cyklu miejskim, gdzie stosowanie energii elektrycznej jako źródła zasilania ma racjonalne uzasadnienie. Zupełnie inna sytuacja jest natomiast w samochodach ciężarowych, ponieważ w ich przypadku zależy nam na zupełnie innych czynnikach aniżeli tylko komfortowe przemieszczenie się z punktu A do B. Pierwszym argumentem przeciw elektrycznym samochodom w transporcie masowym jest oczywiście zasięg jednym ładowaniu, ponieważ o ile podczas użytkowania w mieście nie odgrywa on aż tak dużej roli, tak w transporcie międzynarodowym może okazać się problematyczny. Dla przykładu elektryczne Volvo FH Electric nowej generacji ma deklarowany zasięg na poziomie do 600 km na jednym ładowaniu. Dla porównania Volvo FH Aero zasilane olejem napędowym legitymuje się spalaniem 21,2l/100km a maksymalna

pojemność zbiorników na olej napędowy to 1510, daje to maksymalny zasięg na poziomie aż 7000km na jednym ładowaniu. Są to wartości czysto teoretyczne nie biorące pod uwagę pełnego obciążenia, zróżnicowania terenu oraz natężenia ruchu, lecz realny zasięg na poziomie 4000-4500 km na jednym tankowaniu znacznie upraszcza trasę i niweluje konieczność częstych postojów.

W przypadku napędu elektrycznego obawy niosą także czas ładowania pojazdu oraz dostępność infrastruktury związanej z ładowaniem pojazdu. Samochody ciężarowe ze względu na dużą pojemność akumulatorów charakteryzują się dłuższym czasem ładowania, jest to o tyle problematyczne, ponieważ czas pracy kierowcy jest ograniczony i wydłuża to czas trwania samego procesu przewozowego. Obecnie trwają intensywne prace, aby znacznie skrócić ten proces. Firma Designwerk wprowadziła system Megawatt Charging System (MCS), który umożliwia uzupełnianie energii w czasie zbliżonym do czasu trwania obowiązkowych przerw kierowców, co oznacza, że elektryczne zestawy 40-tonowe mogą wreszcie stać się realną alternatywą dla silników wysokoprężnych w przewozach dalekodystansowych. Podczas prób prototypowa ciężarówka z akumulatorem o pojemności 1000 kWh została naładowana od 10 do 80% w zaledwie 42 minuty, przy średniej mocy 906 kW i szczytowej wartości 1140 kW.

Istotnym problemem podczas korzystania z elektrycznego odpowiednika samochodu ciężarowego jest także jego masa własna. Jest to o tyle ważne, że waga samochodu ciężarowego jest ściśle określona w przepisach prawa, dlatego im cięższy jest sam samochód, tym mniej ładunku może on zabrać, aby nie przekroczyć dopuszczalnych norm. Przykładem może być ciągnik siodłowy marki Volvo model FH z trzema osiami, z czego dwie tylne są osiami napędzanymi. Wersja tego ciągnika siodłowego z konwencjonalnym, układem napędowym posiada masę własną 9240 kg, natomiast wersja z elektrycznym układem napędowym ma masę własną 11990 kg. Na ten problem rozwiązanie szykuje Unia Europejska, która planuje wdrożyć rozwiązanie mające podwyższyć dopuszczalną masę całkowitą samochodów ciężarowych z dotychczasowych 40 do 44 ton. Zmiana ta zrekompensuje wzrost masy poprzez wykorzystanie ciężkiego napędu elektrycznego i pozwoli zwiększyć konkurencyjność pojazdów elektrycznych w transporcie masowym.

Pomimo tego, że wielu ludzi wyznacza CNG i LNG jako dobrą alternatywę dla oleju napędowego, one też mają swoje wady, które skutecznie hamują wdrożenie tych paliw na szeroką skalę. Jednym z znaczących minusów tych paliw jest niewątpliwie skomplikowana i kosztowna instalacja. Paliwa te ze względu na swoją charakterystykę wymagają magazynowania w odpowiednio zbudowanych zbiornikach, a w przypadku LNG zbiornik ten dodatkowo musi być doskonale zaizolowany, aby utrzymać paliwo w stanie ciekłym. Na dodatek LNG cechuje się utratą energii podczas dłuższego postoju. Po długim postoju zalecane jest wymienienie paliwa w zbiorniku. Kolejnym problemem może okazać się emisja tlenków

azotu. O ile samochody zasilane LNG redukują emisję gazów cieplarnianych, o tyle emisja tlenków azotu może okazać się wyższa niż w przypadku samochodów zasilanych olejem napędowym. Na dodatek emisja z procesów produkcji oraz transportu skroplonego gazu ziemnego jest również znacznie wyższa niż w przypadku oleju napędowego. Bardzo ważnym problemem z perspektywy przedsiębiorców z branży transportowej jest również słabo rozwinięta infrastruktura uzupełnienia CNG oraz LNG. W Polsce funkcjonują tylko 62 stacje CNG oraz LNG. Tak słabo rozwinięta infrastruktura uzupełnienia paliw utrudnia prowadzenie oraz planowanie procesów transportowych. (Hogs, 2025., Volvo, b.d., Elektromobilni, b.d., Volvo Trucks, b.d., Ogólnopolski Związek Pracodawców Transportu Drogowego, b.d. Urząd Dozoru Technicznego, 2026.)

5. Układy hybrydowe stosowane w samochodach ciężarowych.

W związku z licznymi problemami towarzyszącymi istniejącym na rynku paliwom alternatywnym, producenci samochodowi pracują także nad liczną grupą prototypów, które mają wdrożyć do samochodów ciężarowych rozwiązania na kształt układów hybrydowych. Konwencjonalne układy napędowe zasilane olejem napędowym doposażane są w rozwiązania usprawniające użytkowanie oraz redukujące emitowane zanieczyszczenia i hałas. Przykładem zastosowania układu hybrydowego, który łączy silnik spalinowy oraz napę∂ elektryczny jest Scania G320 Hybrid. Jest to ciągnik siodłowy, który dysponuje hybrydowym napędem z możliwością ładowania baterii z zewnętrznego źródła prądu (tak zwany PHEV). Jego napęd opiera się na 9-litrowym, 320-konnym silniku wysokoprężnym, a do tego dołożono silnik elektryczny, o stałej mocy 158 KM i chwilowej mocy maksymalnej 192 KM. Poza tym konieczne było zastosowanie zarówno zbiornika na olej napędowy, liczącego 220 litrów, jak i baterii trakcyjnych, o pojemności 90 kWh. Producent deklaruje, że układ elektryczny pozwala na 50 km zasięgu, co jest dobrym rozwiązaniem dla firm, które operują w centrach miast.

Innym rozwiązaniem marki Scania jest model R360 Hybrid. Ogólna zasada jest ta sama, ponieważ samochód łączy 360-konny silnik wysokoprężny z 192-konnym układem elektrycznym. Zasięg na samym prądzie to tylko 15 km, lecz układ elektryczny ma inne zadanie. Zapewnia on ruszanie samochodu z miejsca lub wspomaganie silnika spalinowego podczas podjazdu pod wzniesienie. Energia elektryczna zasili także układ hydrauliczny, który odpowiedzialny jest np. za rozładunek kruszyw bez konieczności uruchamiania silnika spalinowego. Pojazd ma także możliwość tzw. rekuperacyjnego hamowania czyli odzysku energii przy zjeżdżaniu ze wzniesienia. Modyfikacje te powinny przynieść oczekiwane oszczędności paliwa na poziomie 30-40%. (40ton, 2022., 40ton, 2020)

6. Wnioski

Przedstawione powyżej rozwiązania technologiczne związane z alternatywnymi źródłami napędu samochodów ciężarowych mogą informować o tym, że politycy jak i producenci dążą do zastąpienia oleju napędowego innym rodzajem źródła zasilania. Paliwa alternatywne takie jak energia elektryczna, LNG czy CNG to już nie technologia odległej przyszłości a realne rozwiązania, implementowane w użytkowanych na co dzień ciężarówkach. Ich stopień zaawansowania oraz daleko idący rozwój technologiczny sprawiają, że w przyszłości mogą one stać się realną konkurencją dla oleju napędowego, szczególnie biorąc pod uwagę użytkowanie w zatłoczonych aglomeracjach miejskich. Na ten moment jednak, biorąc pod uwagę zarówno realny zasięg, efektywność jak i rozwój infrastruktury, w drogowym transporcie masowym samochody zasilane olejem napędowym wydają się najsensowniejszym wyborem.

Bibliografia

1. 40ton.net. (b.d.). *Scania P280 CNG*. Dostęp z dnia z dnia 27.04.2026 z: https://40ton.net/scania-p280-cng-cp16-test-40ton-net-porzadna-ciezarowka-dystrybucyjna-z-ciekawostka-pod-kabina/
2. 40ton.net. (2020a). *Instalacja CNG dla ciężarówek zgodne z wymaganiami BAG*. Dostęp z dnia 20.04.2026 z: https://40ton.net/instalacje-cng-dla-ciezarowek-zgodne-z-wymaganiami-bag/
3. 40ton.net. (2020b). *Scania R360 Hybrid – test i spalanie*. Dostęp z dnia 10.05.2026 z: https://40ton.net/dwa-ciagniki-scania-r360-hybrid-o-30-40-mniejsze-spalanie-na-trasach-do-niemiec/
4. 40ton.net. (2022). *Hybrydowy ciągnik siodłowy jako lek na strefy ekologiczne – pierwszy w użytku*. Dostęp z dnia 10.05.2026 z: https://40ton.net/hybrydowy-ciagnik-siodlowy-jako-lek-na-strefy-ekologiczne-pierwszy-taki-w-uzytku/
5. Arcoore. (b.d.). *Intercoolery i chłodnice cieczy w pojazdach ciężarowych – jak działają?*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://arcoore.com/blog/intercoolery-i-chlodnice-cieczy-w-pojazdach-ciezarowych-jak-dzialaja/
6. Elektromobilni. (b.d.). *Rekordowe ładnowanie elektrycznej ciężarówki. Przełom dla eHDV?*. Dostęp z dnia 10.05.2026 z: https://elektromobilni.pl/rekordowe-ladowanie-elektrycznej-ciezarowki-przelom-dla-ehdv/
7. Grupa DBK. (b.d.). *Emisja spalin w transporcie ciężkim*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://gielda.grupadbk.com/emisja-spalin-w-transporcie-ciezkim/
8. Hogs. (2025). *Pojazdy elektryczne w branży transportowej – zalety i wady*. Dostęp z dnia 10.05.2026 z: https://hogs.live/pl/blog/pojazdy-elektryczne/
9. Land Rover. (b.d.). *Torque vs Horsepower*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://www.landrover.pl/experiences/news/torque-horsepower.html
10. NaOsi.pl. (b.d.). *Pierwsza elektryczna ciężarówka Volvo FE Electric wkrótce na polskich drogach*. Dostęp z dnia 25.04.2026 z: https://naosi.pl/pierwsza-elektryczna-ciezarowka-volvo-fe-electric-wkrotce-wyjedzie-na-polskie-drogi/
11. Ogólnopolski Związek Pracodawców Transportu Drogowego. (b.d.). *Różnice pomiędzy LNG i CNG – co lepsze dla transportu dalekobieżnego?*. Dostęp z dnia 10.06.2026 z: https://www.ozptd.pl/ekspert-ma-glos/roznice-pomiedzy-lng-i-cng-co-lepsze-dla-transportu-dalekobieznego

12. OTOMOTO. (2023). *CNG-czym jest i ile kosztuje? Czy jest lepsze niż LPG*. Dostęp z dnia 10.05.2026 z: https://www.otomoto.pl/news/cng-czym-jest-ile-kosztuje-czy-jest-lepsze-niz-lpg
13. TNT Express Polska. (b.d.). *Jak wygląda sytuacja ciężarówek napędzanych CNG i LPG?*. Dostęp z dnia 20.04.2026 z: https://www.tnt.com.pl/jak-wyglada-sytuacja-ciezarowek-napedzanych-cng-i-lpg/
14. Transport Manager. (b.d.). *Co piąta ciężarówka w Europie jest zarejestrowana w Polsce*. Dostęp z dnia 25.04.2026 z: https://transport-manager.pl/artykuly/co-piata-ciezarowka-w-europie-jest-zarejestrowana-w-polsce
15. TruckiTransport.pl. (b.d.-a). *No kto ma najwięcej ciężarówek w Europie?*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://www.truckitransport.pl/808-no-kto-ma-najwiecej-ciezarowek-w-europie
16. TruckiTransport.pl. (b.d.-b). *MAN eTruck – cichszy o 6 czy o 11 decybeli?*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://www.truckitransport.pl/2479-man-etruck-cichszy-o-6-czy-o-11-decybeli
17. Urząd Dozoru Technicznego. (2026). *Ewidencja infrastruktury paliw alternatywnych-statystyka*. Dostęp z dnia 10.06.2026 z: https://eipa.udt.gov.pl/stats
18. Volvo. (b.d.). *Dane techniczne Volvo FH16 Areo*. Dostęp z dnia 10.05.2026 z: https://www.volvotrucks.pl/pl-pl/trucks/models/volvo-fh16-aero/specifications.html#accordion-1d141e6f59-item-efd20c72a8
19. Volvo Trucks. (b.d.-a). *Volvo FH Electric*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://www.volvotrucks.pl/pl-pl/trucks/electric/volvo-fh-electric.html
20. Volvo Trucks. (b.d.-b). *Volvo FH – dokumentacja techniczna*. Dostęp z dnia 10.05.2026 z: https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/ModelRange/fh64t6a_aus_engau.pdf
21. Volvo Trucks. (2018). *Electric Transition*. Dostęp z dnia 20.04.2026 z: https://www.volvotrucks.pl/pl-pl/news/magazine-online/2018/dec/electric-transition.html
22. Webfleet.com. (b.d.). *Ile oleju napędowego zużywa ciężarówka na km?*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://www.webfleet.com/pl_pl/webfleet/blog/czy-wiesz-ile-oleju-napedowego-zuzywa-ciezarowka-na-km/
23. WNP.pl. (b.d.). *Za 15 lat co trzecia ciężarówka w UE będzie zeroemisyjna*. Dostęp z dnia 27.04.2026 z: https://www.wnp.pl/rynki/za-15-lat-co-trzecia-ciezarowka-w-ue-bedzie-zeroemisyjna,963583.html

NORMY EMISJI SPALIN – EURO 7

Marcin MAZURKIEWICZ[1], Joanna STEFANEK[1*], Alberto ABREGU PEŁKA[1] ,Dawid ZDEBIK[1], Hubert STAROŚCIAK[1], Mateusz KOCLĘGA[1], Michał DĄBROWSKI[1], Aleksander JACKIEWICZ[1], Maja KONIECZKO[1] , Bożena SZCZUCKA-LASOTA [2], Tomasz WĘGRZYN [2*]

[1] Politechnika Śląska, Katowice 40-019, Krasińskiego 8;

* Korespondencja: js319264@student.polsl.pl tomasz.wegrzyn@polsl.pl;

Streszczenie: Artykuł przedstawia analizę normy emisji spalin Euro 7 jako najnowszego etapu polityki środowiskowej Unii Europejskiej w zakresie ograniczania negatywnego wpływu transportu drogowego na środowisko i zdrowie publiczne. Omówiono ewolucję norm emisji od EURO 1 do EURO 6 oraz główne założenia nowej regulacji obejmujące nie tylko emisję z układu wydechowego lecz również emisję pochodzącą ze ścierania hamulców i opon. Przedstawiono najważniejsze zmiany wprowadzane przez normę EURO7. Dokonano również porównania norm EURO6 i EURO7, wskazując na nowe limity emisji i dodatkowe obowiązki nakładane na producentów pojazdów. Omówiono konsekwencję gospodarcze wdrożenia nowych regulacji.

Słowa kluczowe:. EURO7, emisja spalin, transport drogowy, ochrona środowiska, normy emisji, motoryzacja

EUROPEAN EMISSION STANDARD – EURO7

Abstract: The article presents an analysis of the Euro 7 exhaust emission standard as the latest stage in the European Union's environmental policy aimed at reducing the negative impact of road transport on the environment and public health. The evolution of emission standards from EURO 1 to EURO 6 is discussed, along with the main assumptions of the new regulation, which covers not only tailpipe emissions but also emissions originating from brake and tire wear. The most important changes introduced by the EURO 7 standard are presented. A comparison of the EURO 6 and EURO 7 standards is also provided, highlighting the new emission limits and additional obligations imposed on vehicle manufacturers. The economic consequences of implementing the new regulations are discussed.

NORMY EMISJI SPALIN – EURO 7

Keywords: EURO 7, exhaust emissions, road transport, environmental protection, emission standards, automotive industry.

Wstęp

Normy emisji spalin EURO stanowią kluczowy element każdego wyprodukowanego obecnie pojazdu. Jest to polityka Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i zdrowia publicznego. Ich głównym celem jest ograniczenie emisji szkodliwych substancji generowanych przez pojazdy silnikowe, takich jak tlenki azotu (NOx), cząstki stałe (PM), węglowodory (HC) czy tlenek węgla (CO). Wprowadzenie każdej kolejnej normy wiąże się z zaostrzeniem dopuszczalnych poziomów emisji, co zmusza producentów do stosowania coraz bardziej zaawansowanych technologii zmniejszania emisji i oczyszczania spalin, oraz rozwoju napędów alternatywnych.

Sama historia norm EURO sięga początku lat 90., kiedy to w 1992 roku wprowadzono normę Euro 1. Była to odpowiedź na rosnące zanieczyszczenie powietrza w miastach, oraz zwiększającą się liczbę samochodów na drogach. Kolejne etapy, aż do normy Euro 6, sukcesywnie zaostrzały limity emisji, co miało na celu stopniowe oczyszczanie europejskiego powietrza i dostosowanie rynku motoryzacyjnego do zmieniających się potrzeb środowiskowych. Każda z norm była poprzedzona analizami technologicznymi i konsultacjami społecznymi, a ich wdrażanie następowało stopniowo, z odpowiednim okresem przejściowym dla producentów.

Norma Euro 7, która została zaproponowana jako kolejny krok w tej ewolucji, wyróżnia się jednak nowym podejściem. O ile wcześniejsze normy skupiały się głównie na emisji z samego końca układu wydechowego, Euro 7 uwzględnia także emisje z układu hamulcowego i samych opon, a także wprowadza nowe, bardziej realistyczne procedury testowe. Euro 7 stawia nacisk na całkowity wpływ pojazdu na środowisko przez cały jego cykl życia, oraz promuje jednolite limity emisji dla różnych typów napędów. W porównaniu z Euro 6, Euro 7 nie tyle znacząco obniża same limity, co kładzie większy nacisk na trwałość układów oczyszczania spalin, rzeczywiste warunki eksploatacji i kontrolę emisji przez cały okres użytkowania pojazdu. Tym samym jest to teoretyczny krok w stronę bardziej kompleksowego podejścia do problemu zanieczyszczenia powietrza (European Commission, 2022; European Commission, 2026).

M. MAZURKIEWICZ, J. STEFANEK, A. ABREGU PEŁKA, D. ZDEBIK,
H. STAROŚCIAK, M. KOCLĘGA, M. DĄBROWSKI, A. JACKIEWICZ,
M. KONIECZKO, B. SZCZUCKA-LASOTA, T. WĘGRZYN

Charakterystyka normy Euro 7

Norma Euro 7 jest najnowszym etapem unijnego systemu regulacji emisji zanieczyszczeń pochodzących z transportu drogowego, który ma na celu dalsze ograniczenie negatywnego wpływu pojazdów na środowisko, oraz ludzkie zdrowie. Jego podstawowym założeniem jest zaostrzeniu kontroli emisji nie tylko z samego końcowego układu wydechowego, ale również z innych źródeł, takich jak zużycie układu hamulcowego i ścieranie samych opon (S&P Global, 2026).

W przeciwieństwie do wcześniejszych norm, Euro 7 nie rozróżnia już limitów emisji dla silników benzynowych i wysokoprężnych, pominięty jest też podział na samochody osobowe i dostawcze. Wprowadza za to jednolite limity emisji dla wszystkich typów napędów -zarówno spalinowych, jak i hybrydowych, oraz elektrycznych (w zakresie cząstek niezwiązanych ze spalaniem).

Ponadto Euro 7 upraszcza i ujednolica przepisy dotyczące emisji dla samochodów osobowych, dostawczych i ciężarowych w ramach jednego zestawu regulacji, co ma uprościć procedury prawne, oraz ograniczyć koszty wdrażania. Celem jest stworzenie sprawiedliwego i neutralnego technologicznie systemu, który będzie obejmował wszystkie pojazdy niezależnie od zastosowanej technologii. Jedną z kluczowych nowości względem normy Euro 6 jest znaczne rozszerzenie procedur testowych – pojazdy będą badane nie tylko w laboratoryjnych warunkach, lecz także w szerszym zakresie scenariuszy rzeczywistego użytkowania, takich jak jazda przy niskich temperaturach czy z pełnym obciążeniem. Ponadto, norma Euro 7 wymaga, aby systemy kontroli emisji działały skutecznie przez znacznie dłuższy okres - minimalnie przez 200 tysięcy kilometrów i 10 lat, co stanowi wzrost o 100% w stosunku do poprzednich wymagań. Nowym elementem jest także obowiązek montowania czujników emisji umożliwiających monitorowanie stanu technicznego pojazdu przez cały okres jego eksploatacji. Norma Euro 7 dla samochodów osobowych i dostawczych ma według aktualnych założeń wejść w życie od 1 lipca 2025 roku, natomiast dla pojazdów ciężarowych od 1 lipca 2027 roku (European Commission, 2022, Kurtyka i in., 2024).

Porównanie normy EURO6 i EURO7

Szczegółowe wartości graniczne emisji spalin dla samochodów osobowych i dostawczych z silnikami spalinowymi kategoria M1 i N1 zostały podsumowane w Tabeli 1. Z kolei normy przeznaczone dla pojazdów ciężarowych i autobusów zebrano w Tabeli 2.

Tab. 1. Limity emisji spalin kategoria M1 i N1 [1]

Rodzaj emisji	M1, N1 pojazdy	Tylko N1 <35 kW/t	Budżet emisji (M1, N1) <10 km [na podróż]	Budżet emisji (N1 <35 kW/t) <10 km [na podróż]
NOx [mg/km / mg/trip]	60	75	600	750
PM [mg/km / mg/trip]	4.5	4.5	45	45
PN10 [/km / /trip]	6×10^{11}	6×10^{11}	6×10^{12}	6×10^{12}
CO [mg/km / mg/trip]	500	630	5000	6300
THC [mg/km / mg/trip]	100	130	1000	1300
NMHC [mg/km / mg/trip]	68	90	680	900
NH_3 [mg/km / mg/trip]	20	20	200	200

Źródło: Opracowanie na podstawie COM(2022) 586 final (European Commission, 2022).

Tab. 2. Limity emisji spalin kategoria M2, M3, N2, N3 [1]

Rodzaj emisji	Cold Emissions [mg/kWh]	Hot Emissions [mg/kWh]	Emisja <3×WHTC [mg/kWh]	Na biegu jałowym [mg/h]
NOx	350	90	150	5000
PM	12	8	10	—
PN10 [/kWh]	5×10^{11}	2×10^{11}	3×10^{11}	—
CO	3500	200	2700	—
NMOG	200	50	75	—
NH_3	65	65	70	—
CH_4	500	350	500	—
N_2O	160	100	140	—
HCHO	30	30	—	—

Źródło: Opracowanie na podstawie COM(2022) 586 final (European Commission, 2022).

Nowa norma Euro 7 wprowadza szereg istotnych wymagań, które znacząco rozszerzają procedury kontroli pojazdów. Testy w rzeczywistych warunkach jazdy (RDE) stają się obowiązkowe dla wszystkich scenariuszy drogowych, obejmując przy tym temperatury otoczenia od -10°C do 45°C oraz wysokości do 1800 m n.p.m.. Należy przy tym zaznaczyć, że

emisje mierzone w tych ekstremalnych warunkach są dzielone przez specjalny współczynnik, który wynosi 1.6 dla pojazdów kategorii M1 i N1 oraz 2 dla kategorii M2, M3, N2 i N3.

Istotną zmianą jest również znaczne wydłużenie wymaganej trwałości układów oczyszczania spalin. Dla aut osobowych i dostawczych główny okres trwałości określono na 160 000 km lub 8 lat, a przewidziany okres dodatkowy sięga do 200 000 km lub 10 lat. W przypadku pojazdów ciężarowych o masie przekraczającej 16 ton główny wymóg wynosi 700 000 km lub 15 lat eksploatacji, z uwzględnieniem dodatkowego okresu użyteczności wydłużonego aż do 875 000 km.

Przepisy Euro 7 odnoszą się bezpośrednio do zanieczyszczeń pozaspalinowych, obejmując emisje z hamulców i opon. Limit cząstek stałych PM_{10} generowanych przez układ hamulcowy dla wszystkich typów pojazdów ustalono początkowo na 7 mg/km od 2025 roku, z zaplanowanym zaostrzeniem tej normy do 3 mg/km od 2035 roku. Norma uwzględnia także wskaźniki ścieralności opon, badane jako utrata masy na 1000 km. Dokładne metody tych testów są obecnie opracowywane w ramach regulacji ONZ, a docelowe wartości graniczne dla aut osobowych, dostawczych i ciężarowych będą ściśle uzależnione od ich kategorii i zastosowania.

Każdy z pojazdów musi być wyposażony w nowoczesne systemy monitorowania emisji online (OBM), których zadaniem jest bieżące rejestrowanie przekroczeń i przekazywanie tych danych drogą bezprzewodową lub bezpośrednio przez port OBD. Regulacje nie omijają rynku pojazdów elektrycznych, dla których wdrożono wymóg minimalnej trwałości baterii. W kategorii M_1 akumulatory muszą zachować co najmniej 80% swojej pierwotnej pojemności po upływie 5 lat lub przejechaniu 100 000 km oraz 70% po 8 latach lub 160 000 km.

Dodatkowo zdefiniowano bardzo precyzyjne limity emisji oparów, które dotyczą benzynowych pojazdów kategorii M_1 i N_1. Zjawisko odparowywania określane jako "hot soak", występujące bezpośrednio po wyłączeniu rozgrzanego do normalnej temperatury silnika i mierzone wraz z dwudniowym postojem, ograniczone jest limitem 0.50 g dla pojazdów o masie do 2650 kg oraz 0.70 g dla aut o masie równej i większej niż 2650 kg. Z kolei emisja ulatniająca się podczas samego procesu tankowania nie może przekroczyć 0.05 g na każdy litr zatankowanego paliwa, niezależnie od wagi pojazdu.

Najnowsze regulacje zawarte w normie Euro 7 będą miały istotny i wielowymiarowy wpływ na producentów samochodów w Unii Europejskiej. Przede wszystkim wymuszają one technologiczną adaptację w kierunku bardziej zaawansowanych i trwałych systemów kontroli emisji, rozszerzając zakres odpowiedzialności producentów na znacznie dłuższy okres z życia pojazdów. Euro 7 wprowadza jednolite limity emisji niezależnie od rodzaju napędu, co kończy z dotychczasowym rozróżnieniem między silnikami benzynowymi a wysokoprężnymi, zwiększając presję na optymalizację rozwiązań dla wszystkich typów napędów, włączając w to napędy hybrydowe i w pełni elektryczne. Ponadto, producenci będą musieli uwzględniać w

projektowaniu pojazdów również emisje pozaspalinowe, czyli związane z układem hamulcowym, zużycie opon, oraz parowaniem paliwa, co do tej pory nie było objęte obowiązkowymi normami liczbowymi.

Nowe przepisy znacząco wydłużają wymagany czas sprawności systemów ograniczania emisji – z 100 000 km i 5 lat (Euro 6) do 200 000 km i 10 lat (Euro 7) – w przypadku aut osobowych, co oznacza konieczność stosowania trwalszych, bardziej odpornych technologii i materiałów. Równocześnie Euro 7 wprowadza obowiązek zastosowania systemów ciągłego monitorowania emisji (OBM), które będą przekazywać dane o rzeczywistych emisjach przez cały okres eksploatacji pojazdu. To oznacza konieczność integracji nowych rozwiązań cyfrowych, co zwiększa koszty badań i rozwoju, a także wymaga nowej wiedzy z zakresu cyberbezpieczeństwa, kalibracji czujników i zarządzania danymi.

Dodatkowym wyzwaniem są nowe procedury testowe, które obejmują szerszy zakres warunków eksploatacyjnych, takich jak jazda przy niskich temperaturach, krótkie trasy czy większe obciążenia. Producenci muszą więc projektować pojazdy tak, aby spełniały normy nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale również w realistycznych, często trudnych scenariuszach użytkowania.

Wszystkie te zmiany będą wiązały się z koniecznością poniesienia kosztów produkcji, testowania i homologacji pojazdów. Choć Komisja Europejska podkreśla, że wybrane rozwiązania mają być „proporcjonalne” w kosztach co do zyskanych efektów, wielu producentów już wyraziło obawy, że skumulowany wpływ regulacji środowiskowych (Euro 7, normy CO_2, elektromobilność) może nadmiernie obciążyć europejski sektor motoryzacyjny, zwłaszcza mniejszych producentów i firm specjalizujących się w napędach spalinowych, ponieważ w ten sektor nowa norma uderza najbardziej. Nowe przepisy wręcz zachęcają producentów do szybszego przejścia na elektromobilność, ponieważ pojazdy bezemisyjne nie podlegają większości wymagań związanych z emisją spalin. (European Commission, 2022; S&P Global, 2026).

Wpływ składników spalin na środowisko

Spaliny samochodowe zawierają szkodliwe substancje, takie jak: Dwutlenek węgla (CO_2) – przyczynia się do efektu cieplarnianego. Tlenek węgla (CO) – toksyczny, blokuje transport tlenu we krwi. Tlenki azotu (NO_x) – drażnią drogi oddechowe, powodują smog i kwaśne deszcze. Węglowodory (HC) – rakotwórcze, uczestniczą w tworzeniu ozonu przygruntowego.

Pyły zawieszone (PM) – szkodliwe dla płuc, powodują choroby układu oddechowego. Dwutlenek siarki (SO_2) – przyczynia się do kwaśnych deszczów.

Ich długotrwała inhalacja może prowadzić do chorób układu oddechowego, sercowo-naczyniowego, a nawet nowotworów. Nie ma wątpliwości – spaliny są szkodliwe, ale ich negatywny wpływ ujawnia się głównie przy długotrwałym i intensywnym narażeniu, typowym dla dużych aglomeracji.

W tym kontekście narzucenie rygorystycznej normy EURO 7 dla całej Unii Europejskiej wydaje się nieproporcjonalne. O ile można zrozumieć potrzebę zaostrzania przepisów w dużych miastach, gdzie emisja spalin i natężenie ruchu są rzeczywistym problemem, o tyle nakładanie tych samych wymogów na mniejsze, słabiej zaludnione i mniej zamożne regiony jest nieuzasadnione i krzywdzące. W praktyce doprowadzi to do wzrostu kosztów produkcji i eksploatacji pojazdów, co uderzy w lokalne społeczności, które nie mają alternatywy w postaci rozwiniętej komunikacji zbiorowej.

Zamiast walczyć z prywatnymi samochodami poprzez coraz surowsze normy, lepszym i bardziej skutecznym rozwiązaniem byłoby wspieranie i rozwój systemów Park and Ride (P+R). Polega to na tworzeniu parkingów na obrzeżach miast, gdzie kierowcy mogą zostawić swoje pojazdy i przesiąść się do komunikacji miejskiej. Takie rozwiązanie pozwala zmniejszyć liczbę aut w centrum, ograniczyć emisję zanieczyszczeń i jednocześnie nie zmusza nikogo do rezygnacji z samochodu.

Niestety, mimo swojej efektywności, idea Park and Ride w Polsce coraz częściej jest sabotowana – poprzez zmiany regulaminów, ograniczenia dostępu oraz wprowadzenie zniechęcających cenników za postój. Zamiast nagradzać kierowców za to, że wybierają transport zbiorowy, stosuje się represje wobec użytkowników aut, próbując ich zniechęcić do jazdy, a nie zachęcić do alternatywy. Taka polityka budzi sprzeciw i rodzi napięcia społeczne.

Racjonalna walka o czyste powietrze powinna opierać się na rozsądnych, lokalnie dostosowanych działaniach, a nie na jednolitych przepisach dla całego kontynentu. (EEA, 2024; Wikipedia, 2026)

Statystyki emisyjne globalnie i w Europie

Zrozumienie wpływu restrykcji takich jak Euro 7 wymaga osadzenia ich w szerszym kontekście globalnych i europejskich statystyk. Sektor transportu jest jednym z głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych oraz zanieczyszczeń powietrza, co czyni go kluczowym obszarem interwencji legislacyjnych. Jak wynika z danych Europejskiej Agencji Środowiska oraz Międzynarodowej Agencji Energetycznej, transport odpowiada za znaczący odsetek

globalnej emisji CO_2, przy czym dominującą rolę odgrywa w tym podsektor transportu drogowego. W tej sekcji zestawiono szczegółowe udziały i wielkości emisji. (EEA, 2024; IEA, 2024).

Emisja dwutlenku węgla

Podział globalnych emisji dwutlenku węgla na najważniejsze sektory gospodarki przedstawia Tabela 3. Z kolei dekompozycję emisji z samego sektora transportu (wynoszącego 21% emisji całkowitej) zaprezentowano w Tabeli 4. Szczegółowe dane dotyczące wyłącznie transportu drogowego i generowanych przez niego zanieczyszczeń zebrano w Tabeli 5.

Tab.3. Globalne emisje CO_2 według sektorów

Sektor	Udział w globalnych emisjach CO_2	Emisje (mld ton CO_2)
Energetyka (produkcja energii)	38%	14,0
Transport (łącznie)	21%	8,2
Przemysł	20%	7,6
Budynki	10%	3,8
Rolnictwo i inne	11%	4,1
Łącznie	100%	37,4

Źródło: Opracowanie własne na podstawie IEA, 2024.

Tab. 4. Emisje CO_2 w sektorze transportu

Podsektor transportu	Udział w emisjach transportu	Udział w globalnych emisjach CO_2
Transport drogowy	74,5%	15,6%
Lotnictwo	9%	1,9%
Transport morski	11%	2,3%
Kolej i inne	5,5%	1,2%
Łącznie	100%	21%

Źródło: Opracowanie własne na podstawie IEA, 2024.

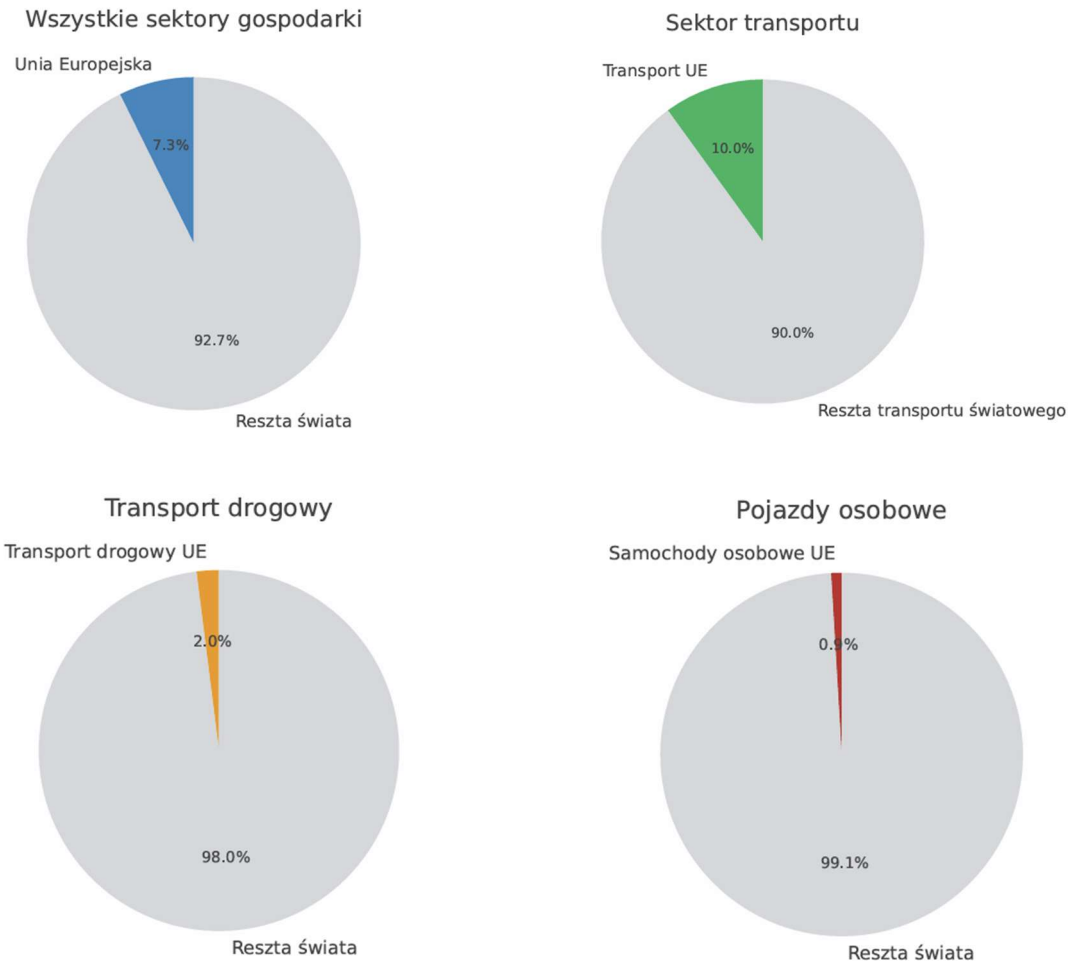
Tab. 5. Transport drogowy, podział emisji CO_2

Rodzaj transportu drogowego	Udział w emisjach transportu drogowego	Udział w globalnych emisjach CO_2
Pojazdy osobowe	46%	7,2%
Transport towarowy (ciężarówki)	31%	4,8%
Inne (autobusy, motocykle)	23%	3,6%

Rodzaj transportu drogowego	Udział w emisjach transportu drogowego	Udział w globalnych emisjach CO_2
Łącznie	100%	15,6%

Źródło: Opracowanie własne na podstawie IEA, 2024.

Należy jednak wziąć pod uwagę jaki udział europejski sektor transportu bierze w całości generowanych zanieczyszczeń. Na przykładzie emisji dwutlenku węgla rysunek 1 przedstawia ten podział. Można zaobserwować, że transport europejski stanowi jedynie niewielki procent globalnej emisji.



Rys. 1. Zestawienie grafów przedstawiających procentowy udział Unii Europejskiej na tle globalnym, Źródło: Opracowanie własne na podstawie IEA, 2024.

Inne substancje szkodliwe

Omówiona została emisja dwutlenku węgla jako najbardziej rozpoznawalnego i mierzalnego gazu cieplarnianego, stanowiącego istotny wskaźnik wpływu działalności człowieka na klimat. Jednak uwagę należy również skierować na fakt, że CO_2 to jedynie część

znacznie szerszego spektrum szkodliwych substancji emitowanych przez różne sektory gospodarki. Obok niego do atmosfery uwalniane są liczne inne związki chemiczne, takie jak tlenki azotu (NO_x), cząstki stałe (PM), tlenek węgla (CO), lotne związki organiczne (VOC), metan (CH_4), amoniak (NH_3), formaldehyd (HCHO) i wiele innych, a w przypadku innych sektorów gospodarki liczba i skład substancji szkodliwych jeszcze bardziej się rozszerza. Każda z tych substancji oddziałuje na środowisko i zdrowie ludzkie w inny sposób, co znacznie komplikuje ocenę ich wpływu w skali globalnej.

Ogromnym problemem pozostaje trudność w dokładnym określeniu ilości tych substancji oraz ich proporcji w emisjach pochodzących z różnych źródeł. O ile emisje CO_2 można dość precyzyjnie wyliczyć na podstawie spalania paliw kopalnych, o tyle pomiar emisji pozostałych związków zależy od wielu zmiennych: rodzaju paliwa, technologii spalania, systemów filtrujących, warunków eksploatacyjnych czy jakości danych raportowanych przez kraje i sektory przemysłu. Dodatkowo, wiele z tych związków oddziałuje nie tylko bezpośrednio, ale również pośrednio – uczestnicząc w reakcjach chemicznych w atmosferze, np. w tworzeniu smogu czy wtórnych cząstek aerozolowych.

Z perspektywy transportu – a w szczególności emisji z rur wydechowych pojazdów – sytuacja jest jeszcze bardziej złożona. Choć istnieją normy emisji i procedury testowe, to nawet one nie oddają w pełni rzeczywistego wpływu emisji z pojazdów na środowisko. Emisje mogą różnić się nie tylko między pojazdami, ale też zależnie od stylu jazdy, temperatury otoczenia, stanu technicznego pojazdu, wieku pojazdu czy samej jakości paliwa. Co więcej, nie istnieją globalnie zharmonizowane dane, które pozwalałyby precyzyjnie określić, jaki procent ogólnoświatowej emisji szkodliwych substancji pochodzi wyłącznie z układów wydechowych pojazdów spalinowych.

W związku z tym należy przyjąć, że wyznaczenie jednoznacznego i obiektywnego stopnia szkodliwości emisji z transportu drogowego – a szczególnie z samochodów osobowych – na tle całej światowej emisji substancji toksycznych jest w praktyce niemożliwe. Brak porównywalnych danych, różnice w metodykach pomiaru oraz zmienna toksyczność różnych substancji uniemożliwiają stworzenie rzetelnego i kompleksowego obrazu wpływu wyłącznie jednego sektora. (EEA, 2024; Wikipedia, 2026)

Podsumowanie

Norma Euro 7 stanowi kolejny krok w europejskiej polityce redukcji zanieczyszczeń, wprowadzając pionierskie regulacje obejmujące emisje pozaspalinowe (pochodzące ze

ścierania hamulców i opon, a także zjawiska odparowywania) oraz wydłużając wymogi trwałości układów oczyszczania spalin do 10 lat lub 200 tysięcy kilometrów. Zasadność wprowadzania tak rygorystycznych i jednolitych regulacji w ujęciu ogólnoeuropejskim budzi jednak uzasadnione wątpliwości w świetle danych statystycznych. Według raportów IEA, cały transport drogowy w Unii Europejskiej odpowiada za zaledwie około 2% globalnych emisji CO_2, z czego europejskie samochody osobowe generują poniżej 1%. Biorąc pod uwagę fakt, że sektory takie jak energetyka (38%), przemysł (20%) czy rolnictwo (11%) mają nieporównywalnie większy wpływ na środowisko, obciążanie transportu drogowego i kierowców najwyższymi kosztami transformacji bywa postrzegane jako działanie nieproporcjonalne w stosunku do jego rzeczywistego wpływu na klimat.

Choć założenia nowej dyrektywy promują technologicznie neutralne podejście i wymuszają na producentach poprawę trwałości systemów ekologicznych oraz badanie pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji, jej wdrożenie rodzi dylematy natury społeczno-ekonomicznej. Narzucanie identycznych wymagań wszystkim regionom, bez uwzględnienia stopnia ich zurbanizowania czy zamożności, grozi wykluczeniem komunikacyjnym uboższych społeczności. Konieczność implementacji zaawansowanych systemów kontroli (w tym cyfrowego monitorowania OBM) znacząco podnosi koszty produkcji, co bezpośrednio przełoży się na wzrost cen pojazdów i spadek ich dostępności na rynku. Dodatkowo, stymulowana przez przepisy przyspieszona elektryfikacja wiąże się z nowymi wyzwaniami ekologicznymi, takimi jak zwiększone zapotrzebowanie na surowce krytyczne, emisje ze wzmożonej produkcji energii i samych baterii oraz trudności z ich późniejszą utylizacją.

W obliczu narastającego dylematu między bezwzględną ekologią a możliwościami ekonomicznymi społeczeństwa, optymalnym kierunkiem na przyszłość wydaje się nie tyle stałe zaostrzanie limitów emisji, co skuteczniejsze egzekwowanie już obowiązujących przepisów. Ułatwienie dostępu do diagnostyki i części zamiennych dla kluczowych systemów oczyszczania spalin takich jak filtry DPF czy zawory EGR zachęciłoby użytkowników do naprawy pojazdów zamiast ich przedwczesnej utylizacji. Takie podejście sprzyjałoby wydłużeniu cyklu życia samochodów, redukując tym samym ślad węglowy i ilość odpadów związanych z produkcją nowych egzemplarzy.

Jednocześnie w największych aglomeracjach, gdzie natężenie ruchu realnie przekłada się na jakość powietrza, bardziej efektywne i akceptowalne społecznie od nakładania kolejnych restrykcji byłoby wspieranie zrównoważonych alternatyw. Rozwój zintegrowanej, taniej komunikacji miejskiej w połączeniu z odpowiednio zaprojektowanymi i przystępnymi cenowo systemami Park and Ride mógłby przynieść wymierne korzyści ekologiczne bez generowania niepotrzebnych kosztów i napięć społecznych.

Bibliografia

1. European Commission. (2022). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles and engines and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7 Standards). Dostęp na: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A586%3AFIN
2. European Commission. (2026). Mobility and Transport. Dostęp na: https://transport.ec.europa.eu/index_en?prefLang=pl
3. European Environment Agency. (2024). Greenhouse gas emissions from transport in Europe. Dostęp na: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport
4. International Energy Agency. (2024). CO_2 Emissions in 2023. Dostęp na: https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023
5. Kurtyka, K., Pielecha, J., and Skobiej, K. (2024). Vehicle related non exhaust particle emissions – Euro 7 requirements. Combustion Engines, 196(1), 3-10.
6. S&P Global. (2026). Euro 7 emission standards set to redefine the auto brakes market. Dostęp na: https://www.spglobal.com/automotive-insights/en/blogs/2026/03/euro-7-emission-standards-auto-brakes-market
7. Wikipedia. (2026, May 31). Spaliny. Dostęp na: https://pl.wikipedia.org/wiki/Spaliny

ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ EKOLOGICZNY W TRANSPORCIE

Szymon SKOLIK[1], Łukasz GIBAS[2], Oskar MICHALSKI[3], Marcin MRUKWA[4], Jakub TRZEBUNIAK[5], Bożena SZCZUCKA-LASOTA[6], Marek OŻAROWSKI[7]

[1-5] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID - brak

[6] Politechnika Śląska, Katowice, e-mail: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl; identyfikator ORCID - 000000033312-1864

* Korespondencja: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł analizuje znaczenie zrównoważonego rozwoju oraz działań proekologicznych w sektorze transportu. Skupia się na kluczowych aspektach, takich jak ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, rozwój transportu niskoemisyjnego, wykorzystanie alternatywnych źródeł energii oraz poprawa efektywności energetycznej. W pierwszej części artykułu przedstawiono wpływ transportu na środowisko naturalne, ze szczególnym uwzględnieniem emisji CO_2 i zanieczyszczeń powietrza. W kolejnej części omówiono nowoczesne rozwiązania technologiczne, takie jak pojazdy elektryczne, transport intermodalny oraz inteligentne systemy transportowe. Ostatnia część artykułu poświęcona jest strategiom wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju w transporcie oraz ich wpływowi na gospodarkę i społeczeństwo.

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój, transport, ekologia, emisja CO_2, transport niskoemisyjny

SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ECOLOGY IN TRANSPORT

Abstract: The article analyzes the importance of sustainable development and ecological actions in the transport sector. It focuses on key aspects such as reducing greenhouse gas emissions, developing low-emission transport, using alternative energy sources, and improving energy efficiency. The first part of the article presents the impact of transport on the natural environment, with particular emphasis on CO_2 emissions and air pollution. The next section discusses modern technological solutions such as electric vehicles, intermodal transport, and intelligent transport systems. The final part of the article focuses on strategies for implementing sustainable development principles in transport and their impact on the economy and society.

Keywords: sustainable development, transport, ecology, CO_2 emissions, low-emission transport

1. Wprowadzenie

W dobie narastającego kryzysu klimatycznego oraz postępującej degradacji środowiska naturalnego, sektor transportu staje przed koniecznością przeprowadzenia radykalnej transformacji. Jako jeden z głównych emitentów gazów cieplarnianych oraz zanieczyszczeń powietrza, transport stanowi kluczowy obszar w dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej (European Environment Agency [EEA], 2023). Dlatego bardzo ważne jest wdrożenie zasad zrównoważonego rozwoju, które pozwolą pogodzić rosnącą potrzebę mobilności z ochroną ekosystemów (Banister, D., 2008). Niniejszy artykuł skupia się na dogłębnej analizie relacji między sektorem transportowym a środowiskiem, przydzielając szczególną uwagę zarówno negatywnym skutkom obecnych systemów przemieszczania się, jak i nowoczesnym metodom ich niwelowania.

W pierwszej części artykułu dokonamy szczegółowej analizy wpływu transportu na środowisko. W tym kontekście zostaną zidentyfikowane główne zagrożenia wynikające z eksploatacji tradycyjnych środków transportu, takie jak emisja dwutlenku węgla, tlenków azotu oraz pyłów zawieszonych (PM2.5 i PM10). Omówiono również wpływ hałasu komunikacyjnego oraz degradację krajobrazu i ekosystemów spowodowaną rozbudową infrastruktury drogowej (Rodrigue, J. P., 2020). Przedstawione dane pozwolą na zrozumienie skali wyzwań, przed którymi stoi współczesna inżynieria transportowa.

W następnej części skoncentrowano się na rozwiązaniach proekologicznych w transporcie, które stanowią odpowiedź na zidentyfikowane wcześniej zagrożenia. Przedstawiono fundamentalne informacje dotyczące dekarbonizacji floty, w tym rozwoju elektromobilności oraz technologii wodorowych. Przeanalizowano również rolę transportu intermodalnego, mikro mobilności oraz nowoczesnych systemów zarządzania ruchem (ITS), które pozwalają na optymalizację procesów przewozowych przy jednoczesnym minimalizowaniu śladu węglowego (Hao, H., et al., 2022).

Poprzez szczegółową analizę wpływu transportu na otoczenie oraz prezentację nowoczesnych technologii naprawczych, artykuł ten ma na celu dostarczenie praktycznych wskazówek oraz strategii, które mogą przyczynić się do efektywnej realizacji celów zielonej transformacji. Finalnie praca ma na celu wskazanie drogi do stworzenia systemu transportowego, który zwiększy konkurencyjność gospodarki, pozostając jednocześnie w pełnej harmonii z wymogami ochrony środowiska.

2. Wpływ transportu na środowisko naturalne

Sektor transportu, stanowiący fundament współczesnej wymiany towarowej i mobilności społecznej, generuje jednocześnie szereg negatywnych efektów zewnętrznych, które stanowią istotne obciążenie dla ekosystemów. Pełna analiza tego zjawiska wymaga przyjęcia perspektywy opartej na całym cyklu życia (LCA – *Life Cycle Assessment*), ponieważ negatywne oddziaływanie nie ogranicza się wyłącznie do fazy eksploatacji pojazdów, lecz obejmuje budowę infrastruktury, produkcję środków transportu oraz działania poeksploatacyjne i rekultywacyjne *[1]*.

W fazie eksploatacyjnej najpoważniejszym wyzwaniem pozostaje emisja gazów cieplarnianych oraz substancji toksycznych do atmosfery. Transport w Unii Europejskiej odpowiada za około 25% całkowitej emisji dwutlenku węgla (CO_2), co czyni go jednym z głównych czynników stymulujących globalne zmiany klimatyczne *[2]*. Obok gazów cieplarnianych, proces spalania paliw w silnikach wysokoprężnych generuje tlenki azotu oraz pyły zawieszone (PM2.5 i PM10), które są bezpośrednio odpowiedzialne za powstawanie smogu w obszarach zurbanizowanych. Narażenie na te substancje prowadzi do licznych schorzeń układu oddechowego i krążenia u mieszkańców aglomeracji, a intensywność tych emisji jest ściśle powiązana z wiekiem floty oraz płynnością ruchu.

Na etapie budowy i rozbudowy infrastruktury transportowej dochodzi do trwałych i często nieodwracalnych zmian w środowisku. Realizacja inwestycji takich jak drogi ekspresowe, linie kolejowe czy terminale logistyczne wiąże się z uszczelnieniem gleby, co drastycznie ogranicza

jej zdolność do absorpcji wód opadowych i zaburza lokalną gospodarkę wodną. Ponadto nowo powstające szlaki komunikacyjne tworzą bariery ekologiczne, prowadząc do fragmentacji siedlisk. Zjawisko to przecina naturalne szlaki migracyjne, izoluje populacje zwierząt i w konsekwencji przyczynia się do systematycznego spadku różnorodności biologicznej w skali regionalnej *[3]*.

Dodatkowym aspektem eksploatacyjnym jest zanieczyszczenie wód i gleb poprzez spływy powierzchniowe z pasów drogowych. Wody te transportują metale ciężkie, drobiny gumy pochodzące ze ścierających się opon oraz sole stosowane do odladzania nawierzchni. W transporcie morskim kluczowym problemem ekologicznym pozostają zrzuty wód balastowych oraz potencjalne wycieki paliw, które niszczą ekosystemy wodne na ogromnych obszarach.

Uciążliwość transportu przejawia się również poprzez hałas komunikacyjny i wibracje. Długotrwałe narażenie na wysokie natężenie dźwięku generowane przez ruch uliczny, kolejowy i lotniczy powoduje u ludzi stres chroniczny oraz problemy z koncentracją, a u dzikich zwierząt wymusza zmiany tras migracyjnych.

Ostatnim etapem oddziaływania są działania poeksploatacyjne, obejmujące utylizację środków transportu oraz rekultywację terenów. Z punktu widzenia nowoczesnej logistyki niezbędne jest uwzględnienie kosztów zewnętrznych, czyli wydatków ponoszonych przez społeczeństwo na leczenie chorób cywilizacyjnych, usuwanie skutków wypadków oraz straty wynikające z kongestii. Zrozumienie skali tych obciążeń na każdym etapie cyklu życia systemu transportowego jest niezbędne do właściwego wdrażania strategii zrównoważonego rozwoju, które mają na celu minimalizację negatywnego wpływu sektora na otoczenie przy jednoczesnym zachowaniu jego wydajności gospodarczej *[4]*.

3. Rozwiązania proekologiczne w transporcie

W ostatnich latach coraz większą uwagę zwraca się na wpływ transportu na środowisko naturalne. Wynika to przede wszystkim z rosnącej liczby pojazdów, zwiększonego zapotrzebowania na przewozy oraz konieczności ograniczania emisji zanieczyszczeń. W związku z tym podejmowane są różne działania mające na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania transportu, przy jednoczesnym zachowaniu jego efektywności. Rozwiązania te obejmują zarówno zmiany technologiczne, jak i organizacyjne [5-8]

Jednym z najczęściej omawianych kierunków rozwoju jest wprowadzanie pojazdów o napędach alternatywnych. W szczególności dotyczy to samochodów elektrycznych, które nie emitują spalin podczas użytkowania. Z tego względu znajdują one zastosowanie głównie w miastach, gdzie problem zanieczyszczenia powietrza jest najbardziej odczuwalny. Warto

jednak zauważyć, że ich wpływ na środowisko zależy również od sposobu wytwarzania energii elektrycznej, dlatego rozwój elektro mobilności powinien iść w parze z rozwojem odnawialnych źródeł energii.

Oprócz napędów elektrycznych coraz częściej rozważa się także wykorzystanie wodoru jako paliwa przyszłości. Rozwiązanie to jest szczególnie interesujące w przypadku transportu ciężkiego, gdzie zastosowanie baterii może być mniej efektywne. Wodór pozwala na szybkie tankowanie oraz osiąganie większych zasięgów, jednak jego wykorzystanie wciąż wiąże się z wysokimi kosztami oraz koniecznością rozbudowy odpowiedniej infrastruktury.

Istotnym elementem działań proekologicznych jest również rozwój transportu zbiorowego. W wielu miastach obserwuje się tendencję do ograniczania ruchu samochodów osobowych na rzecz komunikacji publicznej. Rozwiązanie to pozwala zmniejszyć natężenie ruchu, a tym samym ograniczyć emisję spalin oraz hałas. Kluczowe znaczenie ma tutaj jakość i dostępność transportu publicznego, ponieważ tylko wtedy może on stanowić realną alternatywę dla transportu indywidualnego.

W kontekście przewozu towarów coraz większą rolę odgrywa transport intermodalny. Polega on na łączeniu różnych gałęzi transportu, na przykład kolejowego i drogowego, w ramach jednego procesu przewozowego. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie bardziej ekologicznych środków transportu na dłuższych trasach, a transport drogowy ogranicza się jedynie do krótkich odcinków. Takie rozwiązanie pozwala zmniejszyć zużycie paliwa oraz ograniczyć emisję zanieczyszczeń.

Warto również zwrócić uwagę na rozwój tzw. mikromobilności, która obejmuje rowery, hulajnogi elektryczne oraz ruch pieszy. Środki te znajdują zastosowanie głównie na krótkich dystansach i mogą skutecznie zastępować samochód w codziennych podróżach. W wielu miastach inwestuje się w infrastrukturę rowerową oraz strefy ograniczonego ruchu, co sprzyja rozwojowi tego typu rozwiązań.

Coraz większe znaczenie mają także systemy wspomagające zarządzanie transportem. Wykorzystanie technologii informatycznych pozwala na lepsze planowanie tras, monitorowanie ruchu oraz ograniczanie zatorów drogowych. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie czasu przejazdu oraz zużycia paliwa, co bezpośrednio przekłada się na ograniczenie emisji.

Podsumowując, rozwiązania proekologiczne w transporcie obejmują wiele różnych obszarów i nie ograniczają się jedynie do nowych technologii. Równie ważne są zmiany organizacyjne oraz sposób korzystania z dostępnych środków transportu. Dopiero połączenie tych elementów pozwala osiągnąć realne efekty w postaci ograniczenia negatywnego wpływu transportu na środowisko.

4. Podsumowanie i wnioski

Transport odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu współczesnej gospodarki, jednak jego rozwój wiąże się z istotnym negatywnym wpływem na środowisko naturalne. Jak przedstawiono w pracy, sektor ten odpowiada za znaczną część emisji gazów cieplarnianych, zanieczyszczeń powietrza oraz hałasu a także przyczynia się do degradacji gleb, wód i ekosystemów.

Wyniki analizy wskazują, że konieczne jest wdrażanie rozwiązań zmierzających do ograniczenia tych negatywnych skutków. Szczególnie istotne znaczenie mają działania takie jak rozwój elektromobilności, wykorzystanie wodoru jako alternatywnego źródła energii, a także zwiększenie roli transportu zbiorowego i intermodalnego *[6-8]*. Wprowadzenie nowoczesnych systemów zarządzania transportem oraz optymalizacja łańcuchów dostaw pozwalają dodatkowo zwiększyć efektywność przewozów przy jednoczesnym ograniczeniu emisji.

Wnioskiem płynącym z pracy jest to, że osiągnięcie zrównoważonego transportu wymaga kompleksowego podejścia, obejmującego zarówno rozwój technologii, jak i zmiany organizacyjne oraz społeczne. Kluczowe znaczenie ma współpraca na poziomie lokalnym, krajowym i międzynarodowym, a także odpowiednia polityka transportowa wspierająca ekologiczne rozwiązania.

Podsumowując, tylko połączenie innowacyjnych technologii, efektywnego zarządzania oraz świadomego korzystania ze środków transportu pozwoli na ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko i realizację założeń zrównoważonego rozwoju.

Bibliografia

1. Banister D., *The Sustainable Mobility Paradigm*, Transport Policy, 2008.
2. Rodrigue J.P., *The Geography of Transport Systems*, Routledge, 2020.
3. Rodrigue J.P., *The Geography of Transport Systems*, Routledge, 2020.
4. European Environment Agency (EEA), *Transport and Environment Report*, 2023.
5. Hao H., et al., *Decarbonization of Transport Sector*, Energy Reports, 2022.
6. Szyc, R., Chamier-Gliszczynski, N., Musiał, W., Szczepański, E., & Franke-Wąsowski, P. (2026). Electrification of Road Transport Infrastructure in the Context of Sustainable Transport Development and the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure on the TEN-T Network in Poland. *Energies*, *19*(1). https://doi.org/10.3390/en19010015
7. Wong, P. Y. L., Lai, J. H. K., & Lo, K. C. C. (2025). Sustainable Transport and Development Partnership: Enhancing Urban Growth in Hobart, Australia Through TOD, PPP and Green Building Practices. *Sustainability (Switzerland)*, *17*(3). https://doi.org/10.3390/su17030881
8. Sztangret, I. (2020). Systemic sustainable development in the transport service sector. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(22). https://doi.org/10.3390/su12229525

NIEEFEKTYWNE ZARZĄDZANIE CZASEM PRZEZ STUDENTÓW JAKO WYZWANIE WSPÓŁCZESNEJ EDUKACJI AKADEMICKIEJ

Dominika KACZMARZYK[1]

[1] Politechnika Częstochowska, Wydział Zarządzania, Studenckie Koło Naukowe Ludzie Biznesu, Częstochowa; s141447dk@student.pcz.pl;

Streszczenie: Nieefektywne zarządzanie czasem przez studentów stanowi jedno z istotnych wyzwań współczesnej edukacji akademickiej, wpływając zarówno na przebieg procesu kształcenia, jak i na funkcjonowanie psychospołeczne osób studiujących. W warunkach rosnących wymagań dydaktycznych, intensywnej cyfryzacji życia akademickiego oraz zwiększonej autonomii studentów, umiejętność efektywnego planowania i organizowania czasu staje się kluczową kompetencją warunkującą sukces edukacyjny. Badania wskazują, że trudności w tym zakresie mają charakter wielowymiarowy i są determinowane zarówno czynnikami indywidualnymi, takimi jak brak systematycznego planowania czy nadmierne korzystanie z urządzeń cyfrowych w czasie wolnym, jak i czynnikami organizacyjnymi związanymi z funkcjonowaniem uczelni wyższych. Skutkiem nieefektywnego zarządzania czasem są m.in. prokrastynacja, obniżona efektywność realizacji obowiązków akademickich, niska samoocena, wzrost poziomu stresu oraz pogorszenie wyników w nauce. Celem niniejszego artykułu jest analiza uwarunkowań nieefektywnego zarządzania czasem wśród studentów oraz ocena znaczenia stosowania podstawowych technik zarządzania czasem dla poprawy realizacji obowiązków dydaktycznych. Podjęta problematyka wpisuje się w aktualne dyskusje nad potrzebą systemowego wspierania studentów w rozwijaniu kompetencji organizacyjnych jako istotnego elementu jakości współczesnej edukacji akademickiej.

Słowa kluczowe: nieefektywne zarządzanie czasem, student, planowanie, technologie cyfrowe, prokrastynacja, edukacja, techniki zarządzania czasem

INEFFECTIVE TIME MANAGEMENT AMONG STUDENTS AS A CHALLENGE OF CONTEMPORARY HIGHER EDUCATION

Abstract: Ineffective time management among students constitutes one of the significant challenges of contemporary higher education, affecting both the course of the educational process and the psychosocial functioning of individuals pursuing academic studies. In the context of increasing academic demands, the intensive digitalization of academic life, and the growing autonomy of students, the ability to effectively plan and organize time has become a

key competence determining educational success. Research indicates that difficulties in this area are multidimensional in nature and are determined by both individual factors, such as a lack of systematic time planning and excessive use of digital devices during leisure time, as well as organizational factors related to the functioning of higher education institutions. The consequences of ineffective time management include, among others, procrastination, reduced effectiveness in fulfilling academic obligations, increased levels of stress, and deterioration of academic performance. The aim of this article is to analyze the determinants of ineffective time management among students and to assess the significance of applying basic time management techniques in improving academic functioning. This issue aligns with current discussions on the need for systemic support for students in developing organizational competencies as an essential element of the quality of contemporary higher education.

Keywords: ineffective time management, higher education students, time planning, digital technologies, academic procrastination, education, time management techniques

1. Wprowadzenie

Zarządzanie czasem stanowi coraz ważniejszy obszar badań w naukach o zarządzaniu, psychologii oraz edukacji, gdyż kompetencje w tym zakresie są bezpośrednio powiązane z efektywnością działania jednostki oraz osiąganiem założonych celów – zarówno w życiu zawodowym, jak i akademickim (Panadero, 2017; Broadbent i Poon, 2015). W literaturze przedmiotu zarządzanie czasem definiuje się najczęściej jako świadome planowanie i organizowanie własnej aktywności w taki sposób, aby osiągać zamierzone rezultaty przy optymalnym wykorzystaniu dostępnych zasobów, w tym czasu (Pluta, 2013). Czas pozostaje zasobem szczególnym, nie tylko z punktu widzenia organizacji pracy czy codziennych obowiązków, lecz także w wymiarze ekonomicznym. Popularne powiedzenie „czas to pieniądz" podkreśla, że jego właściwe wykorzystanie może mieć wymierne konsekwencje dla efektywności działań i osiąganych wyników (Rimmer, 2019). Skuteczne zarządzanie czasem sprzyja wzrostowi produktywności, ułatwia planowanie, wspiera realizację zadań na wysokim poziomie, umożliwia właściwe ustalanie priorytetów oraz sprzyja osiąganiu wyznaczonych celów (Selase i in., 2015). Zarządzanie czasem jest szczególnie istotną kompetencją w życiu akademickim. Studenci muszą bowiem realizować obowiązki dydaktyczne, jednocześnie godząc je z innymi aktywnościami, takimi jak praca zawodowa, życie prywatne czy rozwój osobisty (Fu i in., 2025; Patzak i in., 2025). Jak zauważa Głowienka (2021), czas jest zasobem ograniczonym i nieodnawialnym – „nikt nie może zawrócić ani odzyskać tego, co już minęło", co sprawia, że umiejętność jego organizacji staje się warunkiem zarówno efektywnej realizacji zadań, jak i zachowania równowagi życiowej. Dla młodych dorosłych studiowanie wiąże się z koniecznością rozwinięcia umiejętności zarządzania sobą w czasie. Brak efektywnych strategii w tym zakresie prowadzi do frustracji oraz przeciążenia obowiązkami (Efron, 2023). Można

zatem stwierdzić, że zarządzanie czasem stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na jakość życia jednostki. Najnowsze badania wskazują, że nieefektywne zarządzanie czasem wśród studentów ma charakter wielowymiarowy i wynika z nakładających się czynników poznawczych, behawioralnych, technologicznych oraz środowiskowych (Häfner i Stock, 2021; Van der Meer i Scott, 2022; Meier i in., 2021). Badania empiryczne pokazują również, że brak umiejętności systematycznego planowania oraz wyznaczania priorytetów sprzyja odkładaniu zadań na później, czyli prokrastynacji, która może prowadzić do wzrostu poziomu stresu oraz obniżenia wyników akademickich (Steel, 2007; Tice i Baumeister, 1997). W konsekwencji nawet przy formalnie wystarczającej ilości czasu studenci nie są w stanie efektywnie realizować obowiązków akademickich, co pogłębia problem nieefektywnego zarządzania czasem. W tym kontekście celem niniejszego opracowania jest analiza uwarunkowań nieefektywnego zarządzania czasem wśród studentów oraz ocena znaczenia stosowania podstawowych technik zarządzania czasem dla poprawy efektywności ich funkcjonowania akademickiego.

Podjęta problematyka jest istotna z kilku powodów. Po pierwsze, studenci stanowią przyszły kapitał ludzki rynku pracy, a rozwój kompetencji organizacyjnych – w tym zarządzania czasem – ma kluczowe znaczenie dla ich dalszego funkcjonowania zawodowego. Po drugie, okres studiów jest etapem intensywnego kształtowania nawyków i strategii samoregulacji, które mogą utrwalać się w dorosłym życiu. Ponadto rosnący wpływ technologii cyfrowych na codzienne funkcjonowanie młodych dorosłych sprawia, że analiza ich oddziaływania na zarządzanie czasem nabiera szczególnego znaczenia poznawczego i praktycznego.

Uzyskane wyniki badań mogą stanowić podstawę do projektowania działań wspierających rozwój kompetencji organizacyjnych studentów oraz formułowania wniosków o charakterze aplikacyjnym, odnoszących się do doskonalenia warunków i jakości procesu kształcenia akademickiego.

2. Przegląd literatury

W literaturze przedmiotu zarządzanie czasem w kontekście edukacji akademickiej ujmowane jest jako wielowymiarowa kompetencja, obejmująca umiejętność planowania, organizowania oraz kontrolowania własnej aktywności w celu realizacji założonych zadań w warunkach ograniczeń czasowych i narastających obowiązków. Według Romero-Péreza i Sánchez-Lissen (2025) badania nad zarządzaniem czasem studentów koncentrują się przede wszystkim na aspektach psychologicznych oraz indywidualnych strategiach organizacyjnych,

podczas gdy stosunkowo niewiele uwagi poświęca się czynnikom społeczno-kulturowym i pedagogicznym, które również mogą kształtować kompetencje czasowe młodych dorosłych. Takie holistyczne ujęcie jest kluczowe dla zrozumienia funkcjonowania studentów w złożonym środowisku edukacyjnym, w którym przenikają się dynamika społeczna, normy instytucjonalne oraz praktyki cyfrowe. Kompetencje zarządzania czasem pozostają w dynamicznej relacji z poczuciem własnej skuteczności akademickiej, a ich wzajemne oddziaływanie przekłada się na poziom zaangażowania oraz wytrwałości w realizacji zadań (Bargmann i Kauffeld, 2023). Stopień, w jakim student postrzega kontrolę nad własnym czasem i życiem, stanowi istotny czynnik warunkujący poczucie równowagi i stabilności emocjonalnej. Utrata tej kontroli wiąże się natomiast ze wzrostem poziomu stresu, nasileniem napięcia psychicznego oraz zwiększonym ryzykiem obniżenia nastroju. Rozwijanie samokontroli oraz kompetencji organizacyjnych sprzyja skuteczniejszemu radzeniu sobie w sytuacjach trudnych, co przekłada się na wyższy poziom dobrostanu, większą energię życiową oraz gotowość do podejmowania kolejnych działań (Tracy, 2013). Jednocześnie nabywanie umiejętności umożliwiających sprawne i efektywne wykonywanie obowiązków stanowi kluczowy warunek osiągania zamierzonych celów (Olejniczak, 2013). Planowanie czasu stanowi jeden z centralnych komponentów efektywnego uczenia się samoregulowanego (Panadero, 2017; Broadbent i Poon, 2015). Strategie planistyczne, takie jak wyznaczanie celów, harmonogramowanie zadań oraz monitorowanie postępów, są ściśle powiązane z efektywnością realizacji obowiązków akademickich oraz redukcją prokrastynacji (Broadbent i Poon, 2015; Ribeiro i in., 2019). Meta-analiza badań dotyczących strategii zarządzania czasem w szkolnictwie wyższym wykazała, że kompetencje te dodatnio korelują z osiągnięciami akademickimi, satysfakcją studentów oraz poczuciem własnej skuteczności, a ich rozwój może prowadzić do poprawy wyników edukacyjnych oraz wzrostu motywacji (Da Liu i in., 2024). W literaturze prokrastynacja akademicka uznawana jest za jedno z najczęstszych następstw deficytów w zakresie samoregulacji i zarządzania czasem. Steel (2007) wskazuje, że odkładanie zadań ma charakter nie tylko behawioralny, lecz również poznawczo-emocjonalny, a jego nasilenie wiąże się z trudnościami w kontroli impulsów oraz planowaniu długoterminowym. Z kolei badania Tice'a i Baumeistera (1997) dowodzą, że studenci prokrastynujący doświadczają wyższego poziomu stresu oraz osiągają gorsze wyniki akademickie, mimo że subiektywnie postrzegają odkładanie zadań jako strategię redukcji napięcia. Badania prowadzone w okresie pandemii COVID-19 potwierdziły, że w warunkach nauczania zdalnego brak struktury instytucjonalnej sprzyjał nasileniu prokrastynacji, szczególnie wśród studentów o niższych kompetencjach planistycznych (Sefriani, 2022; Xie i in., 2020). Współczesne analizy coraz częściej uwzględniają wpływ technologii cyfrowych na sposób gospodarowania czasem przez studentów, wskazując na ambiwalentny charakter ich oddziaływania. Badania pokazują, że nadmierne korzystanie z urządzeń mobilnych oraz mediów społecznościowych sprzyja

rozproszeniu uwagi, fragmentaryzacji pracy poznawczej oraz obniżeniu efektywności uczenia się (Lepp, Barkley i Karpinski, 2014). Jednocześnie media społecznościowe i aplikacje mobilne mogą pełnić funkcję regulacji emocji, umożliwiając chwilową ucieczkę od stresu związanego z nauką, co jednak w dłuższej perspektywie prowadzi do pogorszenia wyników akademickich oraz wzrostu napięcia psychicznego. Bian i in. (2022) wskazują, że ograniczenie cyfrowych dystrakcji sprzyja osiąganiu stanu przepływu, zwiększającego efektywność uczenia się w środowisku wirtualnym. Technologie mobilne mogą zatem stanowić zarówno czynnik ryzyka, jak i narzędzie wspierające organizację czasu – w zależności od poziomu kompetencji samoregulacyjnych użytkownika (Kukulska-Hulme, 2021). Nieefektywne zarządzanie czasem wśród studentów wiąże się również z uwarunkowaniami indywidualnymi, takimi jak poziom samodyscypliny, zdolność do samoregulacji oraz umiejętność wyznaczania realistycznych celów. Badania prowadzone w Polsce wskazują, że studenci często przeceniają własne kompetencje organizacyjne, co prowadzi do ograniczonej refleksji nad sposobem wykorzystania czasu oraz opóźnia wdrażanie bardziej efektywnych strategii działania (Bonarska-Treit, Gawron i Marcisz, 2021). Niedostateczna świadomość własnych ograniczeń oraz brak nawyku systematycznego planowania sprzyjają chaotycznej realizacji zadań i zwiększają podatność na dystraktory, w tym bodźce cyfrowe. Znacząca część literatury koncentruje się również na wpływie technologii cyfrowych i mediów społecznościowych na procesy uczenia się i zarządzania czasem. Rao (2025) wskazuje, że nadmierne korzystanie z mediów społecznościowych wiąże się ze zwiększoną skłonnością do prokrastynacji, obniżeniem koncentracji oraz redukcją czasu przeznaczanego na naukę. Studenci spędzają średnio od trzech do czterech godzin dziennie na platformach takich jak TikTok, Instagram czy YouTube, często kosztem obowiązków akademickich. Badania wskazują także na istotną zależność między poziomem kompetencji zarządzania czasem a skłonnością do odkładania zadań – osoby o niższych kompetencjach planistycznych częściej traktują prokrastynację jako strategię radzenia sobie ze stresem (Sefriani, 2022). Wyniki badań konsekwentnie pokazują, że wysoki poziom kompetencji zarządzania czasem koreluje z lepszymi wynikami akademickimi oraz większą satysfakcją ze studiów (Macan, 1994; Häfner i in., 2014; Van Sluijs i Matzat, 2023), natomiast ich deficyty zwiększają ryzyko prokrastynacji, przeciążenia poznawczego oraz obniżonego dobrostanu psychicznego (Aeon i in., 2021; Sirois, 2014). W skrajnych przypadkach trudności w organizacji czasu mogą prowadzić do rezygnacji ze studiów (Kutija i Skrbinjek, 2024) lub wydłużenia ścieżki kształcenia (Xavier i Meneses, 2022; Tinto, 2017). Istotnym nurtem badań nad nieefektywnym zarządzaniem czasem są analizy koncentrujące się na uwarunkowaniach psychologicznych, zwłaszcza mechanizmach samoregulacji i motywacji. Badania wskazują, że zdolność do planowania i konsekwentnej realizacji zadań jest silnie powiązana z poziomem samokontroli oraz umiejętnością odraczania gratyfikacji (Duckworth i Seligman, 2005). Studenci o niższym poziomie samoregulacji częściej podejmują decyzje

krótkoterminowo korzystne, lecz długofalowo nieadaptacyjne. Wolters (2003) podkreśla, że brak jasno określonych celów edukacyjnych oraz niska motywacja wewnętrzna sprzyjają dezorganizacji czasu i nasileniu zachowań prokrastynacyjnych. Z kolei Zimmerman (2002) wskazuje, że planowanie, monitorowanie postępów oraz refleksja nad własnym działaniem stanowią podstawowe komponenty uczenia się samoregulowanego, a ich brak prowadzi do obniżenia efektywności poznawczej. W tym ujęciu problemy z zarządzaniem czasem nie stanowią jedynie kwestii technicznej, lecz są przejawem głębszych trudności w zakresie samokierowania procesem uczenia się, co znajduje potwierdzenie w badaniach nad uczeniem się samoregulowanym w szkolnictwie wyższym.

3. Metodyka badań

Badanie dotyczące nieefektywnego zarządzania czasem wśród studentów zostało przeprowadzone na przełomie lat 2025–2026 z wykorzystaniem metody sondażu diagnostycznego. Jako technikę badawczą zastosowano ankietę, natomiast narzędziem badawczym był autorski, ustrukturyzowany kwestionariusz ankiety opracowany w formie elektronicznej. Narzędzie zostało skonstruowane w oparciu o analizę literatury przedmiotu i poddane procedurze walidacji merytorycznej poprzez ocenę sędziów kompetentnych oraz badanie pilotażowe, co pozwoliło na doprecyzowanie sformułowań i zapewnienie rzetelności kwestionariusza. Zastosowano procedurę doboru celowego, co wynikało z konieczności pozyskania grupy respondentów o sprecyzowanym statusie akademickim. Wybór tej metody umożliwił dotarcie do szerokiej grupy respondentów oraz zapewnił anonimowość uczestników, co sprzyjało uzyskaniu bardziej szczerych i rzetelnych odpowiedzi. W artykule przyjęto założenie, że nieefektywne zarządzanie czasem stanowi zjawisko wielowymiarowe, wynikające z jednoczesnego oddziaływania czynników indywidualnych, behawioralnych, organizacyjnych oraz środowiskowych, które w sposób złożony determinują efektywność funkcjonowania studentów w środowisku akademickim.

Badanie miało na celu udzielenie odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

- Jakie czynniki determinują nieefektywne zarządzanie czasem wśród studentów?
- W jakim stopniu niedostateczne i niesystematyczne planowanie wpływa na trudności w realizacji zadań i obowiązków akademickich?
- W jaki sposób intensywne i niekontrolowane korzystanie z technologii cyfrowych oddziałuje na efektywność zarządzania czasem przez studentów?
- Czy stosowanie podstawowych strategii i technik zarządzania czasem przyczynia się do poprawy funkcjonowania akademickiego oraz wzrostu efektywności studentów?

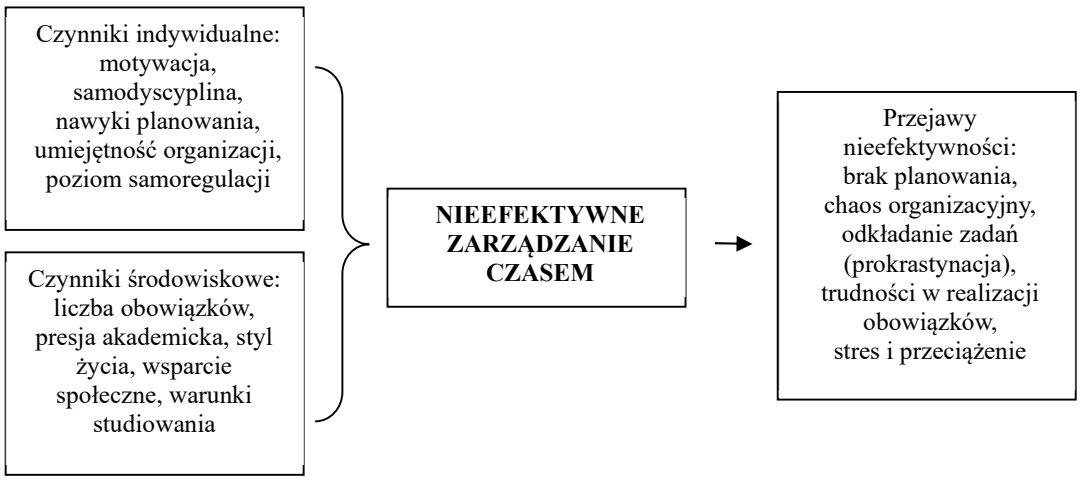
Do sformułowanych problemów badawczych przyjęto następujące hipotezy badawcze:
H1. Istnieje złożona zależność między czynnikami indywidualnymi i środowiskowymi a poziomem nieefektywnego zarządzania czasem wśród studentów.
H2. Brak systematycznego planowania czasu współwystępuje z trudnościami w realizacji obowiązków akademickich.
H3. Technologie cyfrowe są postrzegane przez studentów jako główny czynnik dystrakcji.
H4. Istnieje pozytywny związek między stosowaniem technik zarządzania czasem a subiektywną oceną efektywności funkcjonowania akademickiego.

Badaniem objęto studentów dwóch uczelni zlokalizowanych w Częstochowie. Łącznie w badaniu udział wzięło 112 osób. Wśród respondentów dominowały kobiety (65,2%), natomiast mężczyźni stanowili 34,8% badanej próby. Struktura wiekowa uczestników wskazuje na wyraźną przewagę osób w wieku 18–26 lat, które stanowiły 89,4% respondentów. Najmniej liczne były grupy osób poniżej 18. roku życia (1,5%) oraz powyżej 26 lat (9,1%). Pod względem kierunku studiów największy odsetek stanowili studenci nauk humanistyczno-społecznych (50%). Kolejne grupy tworzyli studenci nauk ścisłych i technicznych (37,7%), nauk przyrodniczo-medycznych (9,1%) oraz kierunków artystycznych (3%). Zróżnicowanie próby widoczne było również w zakresie poziomu kształcenia. Najliczniejszą grupę stanowili studenci studiów licencjackich (42,4%), następnie studenci studiów magisterskich (39,4%), natomiast studenci studiów inżynierskich stanowili 18,2% badanych (n = 12). Jednocześnie należy wskazać na ograniczenia niniejszego badania, które obarczone jest ryzykiem błędu pomiaru wynikającego z zastosowania techniki self-report, gdzie subiektywne deklaracje respondentów mogą podlegać efektowi społecznych oczekiwań. Dodatkowo celowy dobór próby oraz jej liczebność ograniczają możliwość pełnej generalizacji wniosków na całą populację studentów. Należy także zaznaczyć, że przekrojowy charakter badania uniemożliwia ustalenie bezpośrednich związków przyczynowo-skutkowych, ograniczając analizę do wskazania współzależności między zmiennymi.

4. Wyniki badań

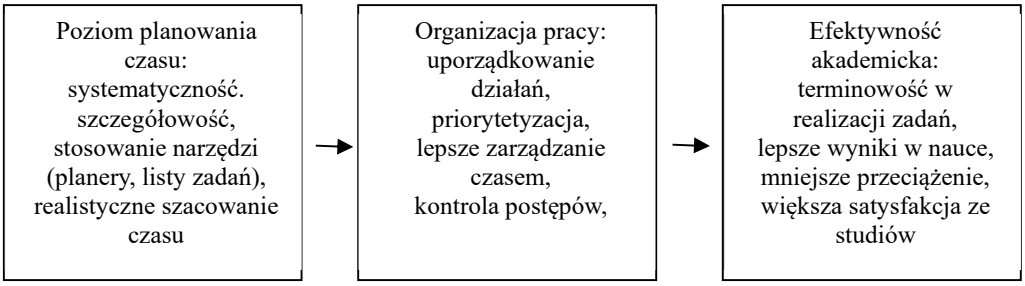
Przeprowadzone badanie umożliwiło wieloaspektową analizę poziomu zarządzania czasem wśród studentów oraz identyfikację czynników wpływających na efektywność ich funkcjonowania akademickiego. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźne zróżnicowanie kompetencji organizacyjnych badanych oraz potwierdzają, że problem nieefektywnego zarządzania czasem ma charakter złożony i wielowymiarowy (Häfner i Stock, 2021; Aeon i Aguinis, 2017). Analiza odpowiedzi wskazuje, że 31,8% studentów deklaruje częste planowanie swoich obowiązków, jednak aż 34,9% badanych wskazuje niski poziom

systematyczności. Wyniki te świadczą o braku ugruntowanych nawyków planistycznych oraz dużej zmienności indywidualnej, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami nad samoregulacją (Panadero, 2017). Model nieefektywnego zarządzania czasem przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Determinanty nieefektywnego zarządzania czasem (H1), opracowanie własne.

W przypadku stosowania list zadań 31,8% respondentów wskazało najwyższy poziom ich wykorzystania, jednak odpowiedzi są rozproszone, co potwierdza brak systematycznego stosowania tej techniki (Macan, 1994). Najczęściej stosowaną strategią organizowania dnia są ogólne założenia (45,5%), natomiast 18,2% studentów nie planuje dnia w ogóle, co stanowi istotny czynnik ryzyka nieefektywności (Van der Meer i Scott, 2022) (zob. rysunek 2).

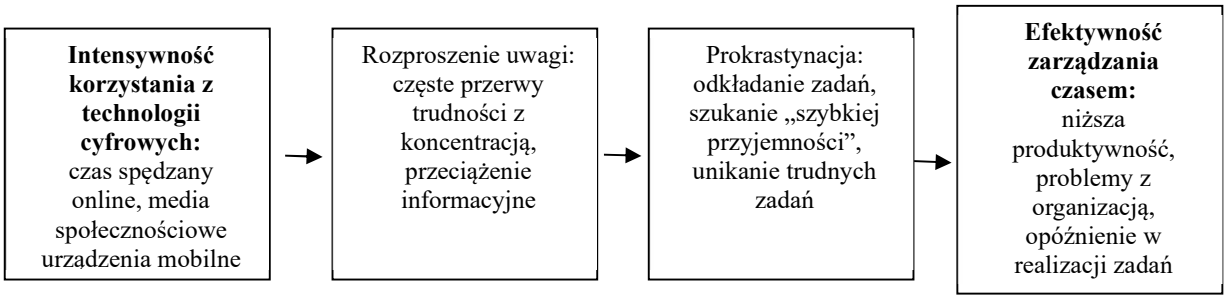


Rysunek 2. Planowanie czasu a efektywność (H2), opracowanie własne.

Najczęściej pomijane elementy planowania to: szacowanie czasu trwania zadań – 57,6%, oraz planowanie przerw – 53%. Wyniki te wskazują na trudności w realistycznym planowaniu, co można powiązać z tzw. błędem planowania (Kahneman i Tversky, 1979). Brak tych kompetencji prowadzi do przeciążenia poznawczego i spadku efektywności (Sweller, 1988). Najczęściej wskazywane bariery to:

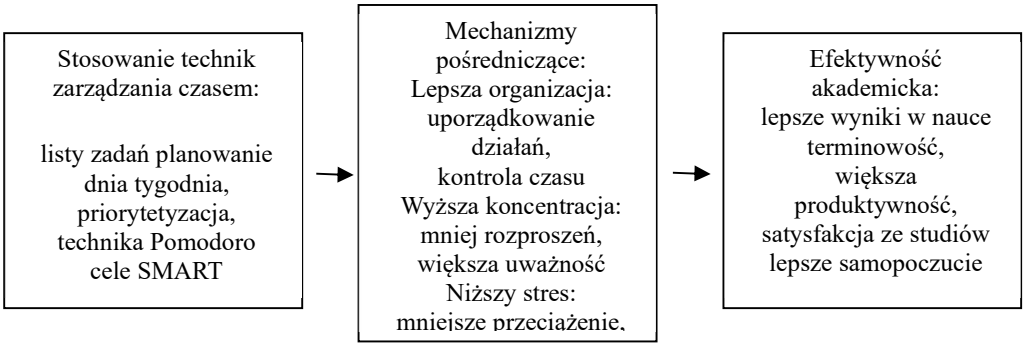
- zbyt duża liczba obowiązków – 50%,
- brak motywacji – 42,4%,
- brak nawyku planowania – 33,3%,
- chaotyczny styl życia – 30,3%.

Wyniki te potwierdzają, że trudności mają zarówno charakter zewnętrzny, jak i wewnętrzny (Zimmerman, 2002). Ponad połowa studentów wskazuje, że brak planowania utrudnia realizację zadań, a aż 62,1% badanych uznaje, że chaotyczny sposób działania negatywnie wpływa na ich skuteczność. Wskazuje to na wysoką świadomość problemu, która nie zawsze przekłada się na zmianę zachowania (Ajzen, 1991). Aż 71,2% studentów deklaruje, że urządzenia cyfrowe często odciągają ich od nauki, a 69,6% uważa, że spędza zbyt dużo czasu przed ekranem. Najczęstsze źródła dystrakcji to: media społecznościowe – 78,8%, serwisy streamingowe – 57,6%, bezcelowe przeglądanie treści – 50%. Najczęściej sięganie po urządzenia cyfrowe przez studentów wynikają z potrzeby „krótkiej przerwy" (36,4%), co może wskazywać na mechanizm prokrastynacji (Steel, 2007), a konsekwencje z tego tytułu obejmują: trudności z koncentracją – 59,1%, odkładanie zadań – 56,1%, spadek produktywności – 50%. Model ujmujący technologię cyfrowa jako czynnik zakłócający zarządzanie czasem przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Technologia cyfrowa jako czynnik zakłócający zarządzanie czasem (H3), opracowanie własne.

Najczęściej stosowaną przez badanych studentów techniką zarządzania czasem są listy zadań - 43,9%, następnie dzielenie zadań - 19,7%, priorytetyzacja - 16,7%, Pomodoro - 9,1%, cele SMART - 9,1%. Jednocześnie aż 34,8% studentów nie stosuje żadnych technik, co wskazuje na istotny deficyt kompetencji (Häfner i in., 2014). Respondenci wskazali, że kluczowymi czynnikami zwiększającymi efektywność procesu uczenia się są przede wszystkim jasno określone cele (51,5%) oraz eliminacja czynników rozpraszających (50%). Istotne znaczenie przypisywane jest również planowaniu dnia w postaci harmonogramu (28,8%), choć jego rola została oceniona jako mniej istotna w porównaniu z wcześniej wskazanymi elementami. Wyniki te są zgodne z teorią wyznaczania celów (Locke i Latham, 2002 (zob. rysunek 4).



Rysunek 4. Wpływ technik zarządzania czasem (H4), opracowanie własne.

W badaniu respondenci wskazywali, że stosowanie technik zarządzania czasem przynosi wymierne korzyści w ich funkcjonowaniu akademickim. Do najważniejszych z nich zaliczono redukcję poziomu stresu (54,5%) oraz poprawę organizacji pracy (51,5%). Istotne znaczenie przypisywano również zwiększeniu koncentracji (39,4%) oraz wzrostowi motywacji do podejmowania działań (31,8%). Najczęściej wskazywane korzyści to: mniejszy stres -54,5%, lepsza organizacja - 51,5%, lepsza koncentracja - 39,4%, większa motywacja – 31,8%.

Uzyskane wyniki wskazują, że nieefektywne zarządzanie czasem wynika z nakładania się kilku czynników: braku systematycznego planowania (ponad 34% niska regularność), deficytów w planowaniu (ponad 50% pomija kluczowe elementy), wpływu technologii cyfrowych (ponad 70% doświadcza dystrakcji), niskiego poziomu stosowania technik (34,8% nie stosuje żadnych). Jednocześnie studenci dostrzegają korzyści płynące z zarządzania czasem, co wskazuje na istnienie luki między wiedzą a działaniem.

5. Podsumowanie

Uzyskane wyniki wskazują na umiarkowany poziom kompetencji studentów w zakresie zarządzania czasem, przy jednoczesnym znacznym zróżnicowaniu indywidualnym. Istotnym problemem pozostaje brak systematyczności w planowaniu oraz niewystarczające wykorzystanie narzędzi organizacyjnych. Studenci często pomijają kluczowe elementy planowania, takie jak realistyczne szacowanie czasu czy uwzględnianie przerw, co prowadzi do obniżenia efektywności działania. Badania potwierdzają również, że trudności w zarządzaniu czasem wynikają zarówno z czynników wewnętrznych (np. brak motywacji, słabe nawyki), jak i zewnętrznych (nadmiar obowiązków, styl życia). Istotną rolę odgrywają także technologie cyfrowe, które mimo potencjału wspierającego często przyczyniają się do rozproszenia uwagi i prokrastynacji. Jednocześnie studenci dostrzegają korzyści wynikające ze stosowania technik zarządzania czasem, takich jak poprawa organizacji pracy, redukcja stresu czy wzrost koncentracji. Mimo tej świadomości ich praktyczne wykorzystanie pozostaje ograniczone, co wskazuje na występowanie luki między wiedzą a działaniem.

W świetle uzyskanych wyników można stwierdzić, że nieefektywne zarządzanie czasem nie jest jedynie problemem organizacyjnym, lecz wynika z szerszych trudności w zakresie samoregulacji. W związku z tym zasadne jest podejmowanie działań wspierających rozwój kompetencji planistycznych oraz świadomego korzystania z technologii cyfrowych, co może przyczynić się do poprawy funkcjonowania akademickiego i jakości życia studentów. Biorąc pod uwagę konieczność wzmocnienia tych kompetencji w ramach szkolnictwa wyższego, rekomenduje się odejście od teoretycznych wykładów na rzecz praktycznych warsztatów z zakresu higieny cyfrowej i odporności psychicznej, które integrują techniki organizacyjne z treningiem kontroli impulsów. W praktyce dydaktycznej warto również wdrażać metodę rusztowania dydaktycznego (scaffolding), wymuszającą na studentach etapowe planowanie projektów, co skuteczniej przeciwdziała prokrastynacji niż tradycyjne rozliczanie z terminu końcowego. Takie podejście, połączone z budowaniem świadomości dotyczącej zarządzania środowiskiem pracy, pozwoli studentom efektywniej przekładać deklaratywną wiedzę na konkretne, utrwalone nawyki, przekładając się na wyższą efektywność akademicką.

Bibliografia

1. Pluta,A. Zarządzanie czasem jako kompetencja współczesnego pracownika. Zarządzanie Zasobami Ludzkimi, 5, 9–21.
2. Aeon, B., & Aguinis, H. (2017). It's about time: New perspectives and insights on time management. *Academy of Management Perspectives, 31*(4), 309–330. https://doi.org/10.5465/amp.2016.0166
3. Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 50*(2), 179–211. https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T
4. Bargmann, C., & Kauffeld, S. (2023). The interplay of time management and academic self-efficacy and their influence on preservice teachers' engagement. Higher Education, 86(6), 1507–1525. https://doi.org/10.1007/s10734-022-00983-3
5. Baumeister, R. F., & Tierney, J. (2011). *Willpower: Rediscovering the greatest human strength*. Penguin Books.
6. Bian, Y., Zhou, C., Liu, J., Geng, W., & Shi, Y. (2022). Effects of reducing distraction on flow and performance in virtual experiential learning. Virtual Reality, 26(4), 1277–1290. https://doi.org/10.1007/s10055-021-00589-1
7. Bonarska-Treit, A., Gawron, I., & Marcisz, J. (2021). Zarządzanie czasem przez studentów Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Nowym Sączu w dobie pandemii COVID-19. Studia Ekonomiczne. Gospodarka · Społeczeństwo · Środowisko, 1(7), 137–152. https://open.icm.edu.pl/items/2c717f7d-f386-49a3-ac65-ffb91b52d5cb
8. Broadbent, J., Poon, W. L. (2015). Self-regulated learning strategies and academic achievement in online higher education learning environments: A systematic review. The Internet and Higher Education, 27, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2015.04.007
9. Duckworth, A. L., & Seligman, M. E. P. (2005). Self-discipline outdoes IQ in predicting academic performance of adolescents. Psychological Science, 16(12), 939–944. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01641.x
10. Efron, N. (2023). Ten tips for efficient academic time management. Clinical and Experimental Optometry, 106(7), 691–693. https://doi.org/10.1080/08164622.2022.2139592
11. Fu, Y., Wang, Q., Wang, X., Zhong, H., Chen, J., Fei, H., Yao, Y., Xiao, Y., Li, W., & Li, N. (2025). Unlocking academic success: the impact of time management on college students' study engagement. BMC psychology, 13(1), 323. https://doi.org/10.1186/s40359-025-02619-x

12. Głowienka, W. Efektywne zarządzanie czasem w połączeniu pracy zawodowej i studiów na uczelni wyższej. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Humanitas, 33, 45–60. https://ziwgib.ahe.lodz.pl/pl/system/files/GLOWIENKA_%20ZIwGiB_33.pdf
13. Häfner, A., & Stock, A. (2021). Time management and academic performance: A meta-analysis. Educational Psychology Review, 33, 1319–1351. https://doi.org/10.1007/s10648-020-09526-z
14. Häfner, A., Oberst, V., & Stock, A. (2014). Avoiding procrastination through time management: An experimental intervention study. *Educational Studies, 40*(3), 352–360. https://doi.org/10.1080/03055698.2014.899487
15. Häfner, A., Stock, A., & Oberst, V. (2014). Decreasing students' stress through time management training: An interventio n study. *European Journal of Psychology of Education, 29*(1), 81–94. https://doi.org/10.1007/s10212-013-0187-2
16. Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Intuitive prediction: Biases and corrective procedures. W S. Makridakis & S. C. Wheelwright (Red.), *Studies in the management sciences: Forecasting* (s. 313–327). North-Holland.
17. Kukulska-Hulme, A. (2021). Mobile-assisted language learning research reflections. Journal of China Computer-Assisted Language Learning, 1(1), 28–46. https://doi.org/10.1515/jccall-2021-0003
18. Kutija, L., & Skrbinjek, V (2024). Understanding student dropout decisions: Academic and organizational factors . In MakeLearn & TIIM Conference Proceedings (pp. 605–613). ToKnowPress.
19. Lepp, A., Barkley, J. E., & Karpinski, A. C. (2014). The relationship between cell phone use and academic performance in a sample of U.S. college students. *SAGE Open, 4*(1), 1–9. https://doi.org/10.1177/2158244014520431
20. Locke, E. A., & Latham, G. P. (2002). Building a practically useful theory of goal setting and task motivation. *American Psychologist, 57*(9), 705–717. https://doi.org/10.1037/0003-066X.57.9.705
21. Macan, T. H. (1994). Time management: Test of a process model. *Journal of Applied Psychology, 79*(3), 381–391. https://doi.org/10.1037/0021-9010.79.3.381
22. Meier, A., Reinecke, L., & Meltzer, C. (2016). "Facebocrastination"? Predictors of using Facebook for procrastination. *Computers in Human Behavior, 64*, 65–76. https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.06.011
23. Meier, A., Reinecke, L., & Meltzer, C. (2021). Digital distractions in student learning: A systematic review. Computers & Education, 174, 104297. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104297
24. Olejniczak A. (2013), Effective time management selected issues, Markeing Instytucji Naukowych i Badawczych, 1(7), s. 77-96.
25. Panadero, E. (2017). A review of self-regulated learning: six models and four directions for research. Front. Psychol. 8:422. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00422

26. Patzak, A., Zhang, X., and Marzouk, Z. (2025). From research to practice: facilitating time management instruction in higher education. College Teach. 1–8. doi: 10.1080/87567555.2025.2495681
27. Rao(2025). Social media usage and its impact on students' academic procrastination an d time management. Innovative Pathways in Education Research, 4(1), 45–60. https://innovapath.us/index.php/IN/article/view/109
28. Ribeiro, L., Rosário, P., Núñez, J. C., Gaeta, M., & Fuentes, S. (2019). Engagement as mediator of academic achievement. *Frontiers in Psychology, 10*, 2669.
29. Rimmer, A. How do I Improve my Time Management Skills? BMJ 2019, 366, l5322.
30. Romero-Pérez, C., & Sánchez-Lissen, E. (2025). Time management and academic performance in higher education: A socio-pedagogical perspective. International and Multidisciplinary Journal of Social Sciences, 14(1), 1–24. https://hipatiapress.com/hpjournals/index.php/rimcis/article/view/10322
31. Sefriani, R., Nastasia, K., Sepriana, R., & Candra, Y. (2022). Time management and procrastination during the COVID-19 pandemic in higher education. Journal of Education and Learning (EduLearn)
32. Selase, A.E.; Cheng, X. The Study of Time Management in Civil Service Institutions in Ghana: A Case of Accra Metropolitan Assembly. Eur. J. Bus. Manag. 2015, 7, 173–190.
33. Sirois, F. M. (2014). Procrastination and stress. *European Journal of Personality, 28*(5), 511–520. https://doi.org/10.1002/per.1947
34. Steel, P. (2007). The nature of procrastination. *Psychological Bulletin, 133*(1), 65–94. https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.1.65
35. Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving. *Cognitive Science, 12*(2), 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
36. Tice, D. M., & Baumeister, R. F. (1997). Longitudinal study of procrastination, performance, stress, and health. Psychological Science, 8(6), 454–458. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1997.tb00460.x
37. Tracy B. (2013), Time management, AMACOM, New York.
38. Van der Meer, T., & Scott, S. (2022). Student time management, procrastination, and academic outcomes in higher education. Studies in Higher Education, 48(2), 245–260. https://doi.org/10.1080/03075079.2022.2027586
39. Wolters, C. A. (2003). Understanding procrastination from a self-regulated learning perspective. *Journal of Educational Psychology, 95*(1), 179–187. https://doi.org/10.1037/0022-0663.95.1.179
40. Zimmerman, B. J. (2002). Becoming a self-regulated learner. *Theory Into Practice, 41*(2), 64–70. https://doi.org/10.1207/s15430421tip4102_2

POTENCJAŁ AI W NIWELOWANIU BARIER WIARYGODNOŚCI SYMULACJI BIZNESOWYCH - PERSPEKTYWA CYFROWEGO POKOLENIA

Konrad Kobierski

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Wydział Prawa i Nauk Społecznych;

kkobierski01@gmail.com; ORCID: 0009-0007-5646-0996

Streszczenie: Celem artykułu była analiza opinii osób o specyficznych kompetencjach cyfrowych (*gaming literacy*) na temat potencjału Generatywnej Sztucznej Inteligencji (GenAI) w budowaniu zaufania do algorytmów korporacyjnych symulacji szkoleniowych. Odpowiedzi uzyskane od 112 osób w wieku 18-35 lat, wskazują na wiarę młodych respondentów w zdolność AI do niwelowania luk wiarygodności poprzez dynamiczne generowanie zadań (82,1% aprobaty) oraz kreowanie nieprzewidywalnych scenariuszy. Kluczowym wnioskiem jest zidentyfikowany dualizm percepcji: respondenci dostrzegają w AI szansę na uwiarygodnienie np. postaci NPC, lecz zachowują dystans wobec algorytmów pełniących funkcję autonomicznych sędziów kompetencji (40,2% zaufania). Badanie prowadzi do konkluzji, że w percepcji badanych przyszłość symulacji opiera się na modelu *Human-in-the-loop*, gdzie AI zapewnia realizm wewnątrz symulacji, a człowiek gwarantuje etyczne i merytoryczne ramy szkolenia. To zasadniczy wniosek dla projektantów szkoleń opartych o symulacje.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, LLM, symulacje biznesowe, wiarygodność i bariery symulacji, pokolenie cyfrowe.

AI POTENTIAL IN NEUTRALIZING CREDIBILITY BARRIERS OF BUSINESS SIMULATIONS: THE PERSPECTIVE OF DIGITAL GENERATION

Abstract: This article analyzes the potential of Generative Artificial Intelligence (GenAI) to build trust in simulation environments, as perceived by employees with advanced digital skills. The results of a study conducted on a group of 112 people indicate that respondents believe in AI's ability to bridge credibility gaps through the dynamic generation of tasks (82.1% approval) and the creation of unpredictable scenario. The key finding is the identified duality in perception: respondents see AI as an opportunity to enhance the realism of, for example, NPC characters, but maintain a distance from algorithms acting as autonomous judges of competence (40.2% trust). The study concludes that, in the respondents' perception, the future of simulation

is based on a human-in-the-loop model, where AI ensures realism within the simulation, and humans guarantee the ethical and substantive framework of the training.

Keywords: artificial intelligence, LLM, business simulations, the reliability and limitations of simulations, digital natives.

Wprowadzenie

Współczesne środowisko korporacyjne charakteryzuje się niespotykaną dotąd dynamiką, zmiennością oraz rosnącą złożonością procesów rynkowych. W obliczu tych wyzwań, tradycyjne, pasywne metody dydaktyczne, opierające się na jednostronnym przekazie wiedzy (takie jak wykłady, prezentacje multimedialne czy standardowe szkolenia e-learningowe), okazują się dalece niewystarczające. W odpowiedzi na potrzebę głębszego, bardziej angażującego i transformatywnego kształcenia kadr, tzw. poważne gry (ang. *Serious Games*) oraz symulacje biznesowe stają się fundamentem nowoczesnych strategii rozwoju kapitału ludzkiego (Facchino et al., 2025; Escudeiro et al., 2025).

O ile jednak symulacje te - opierające się na nauce przez doświadczenie - doskonale sprawdzają się w bezpiecznym trenowaniu procedur decyzyjnych i przyswajaniu twardej wiedzy operacyjnej, o tyle ich głównym problemem są istotne braki w obszarze realizmu społeczno-behawioralnego. Ze względu na trudności w wiarygodnym odwzorowaniu złożoności ludzkich emocji i nieprzewidywalności naturalnych interakcji, systemy te posiadają strukturalne ograniczenie. Ten deficyt realizmu społecznego znacząco redukuje użyteczność symulacji w kontekście treningu kompetencji miękkich i relacyjnych, takich jak empatia, zaawansowane negocjacje czy zdolności przywódcze (Velez, and Alonso, 2025; Liberona et al., 2022).

Przełom w tym obszarze przynoszą algorytmy generatywne (GenAI) oraz wielkie modele językowe (LLM). Podczas gdy tradycyjne symulacje statyczne przestają zaspokajać potrzeby pracowników o wysokim potencjale cyfrowym, co wymusza implementację narzędzi zdolnych do naturalnej, nieliniowej interakcji, modele sztucznej inteligencji redefiniują współczesne podejście do projektowania systemów szkoleniowych. Jednak jak w przypadku wielu nowych technologii, mimo ogromnego potencjału tych narzędzi, implementacja sztucznej inteligencji w procesach dydaktycznych spotyka się z uzasadnionym sceptycyzmem użytkowników, który wynika z konkretnych ograniczeń technologicznych i poznawczych (Berrezueta-Guzman, and Wagner, 2026).

Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia pokolenia cyfrowego. Zbiorowość ta, utożsamiana z Generacją Z oraz późnymi Milenialsami (obejmująca osoby urodzone po 1980 roku), stanowi grupę, której ramy poznawcze uformowały się w cieniu gwałtownej ekspansji technologii mobilnych, mediów interaktywnych oraz sieci szerokopasmowych. Specyfika

procesów socjalizacji w tak nasyconym technologicznie środowisku zaowocowała wykształceniem unikalnego kapitału kognitywnego, definiowanego w literaturze przedmiotu jako biegłość gamingowa (*gaming literacy*). Kompetencja ta objawia się zdolnością do wielowymiarowego dekodowania i krytycznej dekonstrukcji architektury systemów cyfrowych, pozwalając użytkownikowi na precyzyjną analizę zależności technicznych oraz struktur narracyjnych wewnątrz środowisk wirtualnych (Glas et al. 2023; Grāvelsiņa, and Daniela, 2025).

Stąd też problem badawczy zgłębiany w ramach tego badania, został wyrażony przez pytanie: czy w ocenie gamingowo biegłych młodych osób sztuczna inteligencja ma potencjał do niwelowania barier wiarygodności korporacyjnych symulacji szkoleniowych? Natomiast celem badawczym była identyfikacja postaw cyfrowo zaawansowanych młodych ludzi względem możliwości technologii sztucznej inteligencji w przełamywaniu barier symulacji.

Aby poznać odpowiedź na postawione powyżej pytanie badawcze i zrealizować założony cel badawczy przeprowadzone zostały następujące czynności:

- Narracyjny przegląd literatury ukierunkowany na zdefiniowanie gier poważnych i symulacji biznesowych, analizę pojęcia biegłości gamingowej (*gaming literacy*) w kontekście pokolenia cyfrowego, klasyfikację wymiarów realizmu oraz kryteriów walidacji systemów w celu stworzenia tła teoretycznego dla potencjału sztucznej inteligencji w ich wspomaganiu oraz obecne możliwości technologii GenAI i LLM w niwelowaniu właśnie tych zidentyfikowanych barier.
- Ankietyzacja przeprowadzona online z wykorzystaniem kwestionariusza ankiety skonstruowanego na podstawie zidentyfikowanych wcześniej kwestii teoretycznych.

Przegląd literatury

W obszarze teorii organizacji i zarządzania przyjmuje się, że symulacje biznesowe to systemy cyfrowe, których zadaniem jest ścisła rekonstrukcja mechanizmów rynkowych przy użyciu algorytmów obliczeniowych. Fundamentem symulacji jest ich zdolność do matematycznego modelowania zjawisk gospodarczych. Stopień tego odwzorowania, określany mianem precyzji algorytmicznej, stanowi o przynależności danego oprogramowania do sektora gier o charakterze użytkowym. Poprzez integrację celów z rozbudowanym układem zależności między podejmowanymi działaniami, narzędzia te oferują wiarygodne środowisko ćwiczebne, co stanowi warunek konieczny dla efektywnego transferu doświadczeń do praktyki biznesowej. (Baldissin et al., 2013; Fraccascia et al., 2021). W niniejszej pracy termin „symulacja” (stosowany zamiennie z określeniami: szkoleniowa, biznesowa oraz komputerowa) odnosi się każdorazowo do tak zdefiniowanego modelu matematycznego, którego celem jest wierne replikowanie realiów rynkowych.

Zrozumienie przesłanek, dla których pokolenie cyfrowe mogłoby upatrywać w sztucznej inteligencji szansy na zniwelowanie barier wierności, wymaga wstępnej charakterystyki ich struktur kognitywnych oraz specyfiki przetwarzania bodźców. Choć w literaturze przedmiotu paradygmat „cyfrowych tubylców" (*digital natives*) akcentuje adaptację do stymulacji wielozmysłowej i potrzebę błyskawicznej responsywności, współczesny dyskurs naukowy coraz wyraźniej sugeruje odejście od traktowania tej zbiorowości w sposób homogeniczny. Sam fakt wczesnej inicjacji technologicznej nie musi bowiem implikować tożsamego poziomu kompetencji u wszystkich przedstawicieli tej grupy (Vlachopoulos, and Makri, 2017; Marklund, and Taylor; 2016).

W tym ujęciu kluczowym czynnikiem wyjaśniającym, dlaczego badani mogą postrzegać AI jako rozwiązanie problemów z wiarygodnością symulacji, staje się „biegłość gamingowa" (*gaming literacy*). Jako wielowymiarowy konstrukt, integruje ona zrozumienie systemów (*systems*), mechanikę zabawy (*play*) oraz świadomość architektury projektowania gier (*design*). To właśnie te mechanizmy percepcji pozwalają użytkownikom na wychodzenie poza rolę biernego uczestnika i krytyczne dekodowanie struktur wirtualnych (Glas et al. 2023; Grāvelsiņa, and Daniela, 2025).

Można zatem przypuszczać, że zaufanie do potencjału AI (w tym modeli LLM czy agentów generatywnych) wynika z predyspozycji doświadczonych graczy do poddawania systemów cyfrowych „inżynierii wstecznej". Skoro ich indywidualny system przetwarzania informacji jest nastawiony na nieustanne testowanie granic oprogramowania i poszukiwanie wzorców, to w technologii AI mogą oni dostrzegać unikalną możliwość przełamania z góry narzuconych „sztywnych skryptów". Tym samym biegłość gamingowa wydaje się stanowić fundament dla przekonania, że zaawansowane algorytmy są w stanie zapewnić nieliniowość i realizm społeczny, których deficyt jest obecnie wskazywany jako istotna przeszkoda w budowaniu autentyczności doświadczenia szkoleniowego (Glas et al. 2023).

Warto również omówić na jakich zasadach odbywa się walidacja narzędzi symulacyjnych. Jest to złożony i wielowarstwowy proces, wyodrębniający szeroki zestaw czynników, które wspólnie budują rzetelność środowiska cyfrowego (Feinstein, and Cannon, 2001). Są to między innymi:

1. Poprawność obliczeniowa (*Algorithmic validity*) - weryfikuje, czy silnik matematyczny modelu generuje precyzyjne i zgodne z założeniami dane wynikowe.
2. Logika przyczynowa (*Internal validity*) - koncentruje się na badaniu, czy zaprojektowane wewnątrz systemu korelacje (np. dynamika podaży i popytu) wiernie odwzorowują rzeczywiste związki skutkowe.
3. Subiektywne poczucie realizmu (*Plausibility*) - określa, na ile przedstawiony scenariusz wydaje się autentyczny z indywidualnej perspektywy szkolonego.
4. Zgodność funkcjonalna (*Operational validity*) - ocenia, czy wzorce zachowań generowane przez system (np. reakcje wirtualnej konkurencji) są reprezentatywne dla procesów zachodzących w świecie rzeczywistym.

5. Stopień zawierzenia (*Believability*) - mierzy poziom zaufania, jakim użytkownik końcowy obdarza rezultaty i analizy dostarczane przez symulator.

Należy nakreślić, że w procesie walidacji symulacji szkoleniowych akcent zostaje przesunięty z powierzchownego podobieństwa wizualnego (fotorealizmu) na głęboką zgodność systemową. Użytkownik, szczególnie ten o wysokiej biegłości gamingowej, ocenia narzędzie nie przez pryzmat jakości grafiki, lecz przez pryzmat logiki przyczynowej silnika matematycznego. Oznacza to, że wartość edukacyjna symulacji zależy od tego, jak wiernie system replikuje mechanizmy rynkowe i społeczne, pozwalając na transfer doświadczeń do rzeczywistego ekosystemu organizacji (Stenros, 2015).

Dlatego autor przyjmuje binarną kategoryzację realizmu, dzieląc go na wymiar merytoryczny oraz społeczno-behawioralny. Taka systematyka pozwala na precyzyjną integrację kluczowych parametrów wierności (*fidelity*) środowiska cyfrowego. Celowo pominięto przy tym aspekt wierności fizycznej, utożsamianej z estetyką oprawy graficznej, ponieważ w świetle literatury przedmiotu nie jest ona zazwyczaj uznawana za krytyczny czynnik determinujący efektywność procesów dydaktycznych. Wydaje się to szczególnie uzasadnione w przypadku odbiorców o wysokiej biegłości gamingowej. Można przypuszczać, że dla tej grupy wiarygodność narzędzia budowana jest nie poprzez fotorealizm, lecz poprzez rygorystyczne i spójne odwzorowanie logicznych powiązań oraz funkcjonalnej dynamiki symulowanego świata. W tym ujęciu to właśnie realizm relacyjny, a nie wizualny, umożliwia autentyczne zaangażowanie w rozwiązywanie problemów merytorycznych.

Realizm merytoryczny koncentruje się na wiarygodności algorytmicznej, określającej czy zaimplementowany model generuje poprawne i przewidywalne wartości matematyczne zgodne z obiektywną wiedzą ekonomiczną (Kurbjuhn, 2012). Kluczowe dla tego wymiaru jest zachowanie trafności wewnętrznej, w której relacje między zmiennymi wewnątrz modelu precyzyjnie odzwierciedlają prawdziwą przyczynowość zjawisk zachodzących w świecie rzeczywistym (Linder, 2020).

Z kolei realizm społeczno-behawioralny kieruje uwagę ku płaszczyznom jakościowym, które ze względu na swoją złożoność są znacznie trudniejsze do kwantyfikacji. Wymiar ten ogniskuje się na dynamice relacji interpersonalnych, komponentach emocjonalnych oraz szeroko pojętym czynniku ludzkim, które kształtują doświadczenie uczestnika w trakcie interakcji z systemem. Płaszczyzna ta jest ściśle powiązana z konstruktem trafności operacyjnej, służącej do weryfikacji stopnia, w jakim postawy i reakcje stymulowane przez środowisko wirtualne znajdują swoje odzwierciedlenie w rzeczywistych wzorcach zachowań (Tan et al., 2025).

W obliczu ograniczeń tradycyjnych silników symulacyjnych, które nie potrafiły sprostać wymogom realizmu społeczno-behawioralnego bez bezpośredniego udziału żywego trenera, przełomem okazała się najnowsza implementacja Generatywnej Sztucznej Inteligencji (GenAI) oraz Dużych Modeli Językowych (LLM). Dzięki tym innowacjom wirtualne środowiska szkoleniowe przestają być jedynie statycznymi bazami wskaźników, zyskując zdolność do

naturalnej interakcji. Przekłada się to na drastyczny wzrost immersji oraz postrzeganego realizmu, prowadząc do wyższego zaangażowania i lepszych wyników uczenia się (Deogaonkar, 2025).

Praktycznym wymiarem opisanej transformacji technologicznej jest bezprecedensowa ewolucja Postaci Niezależnych (ang. *Non-Player Characters* - NPC). W środowiskach szkoleniowych z początku XXI wieku NPC były w istocie tylko „automatami podającymi tekst" - cyfrowymi manekinami służącymi wyłącznie do dostarczania instrukcji. Cechowała je „płytkość projektowania interakcji" (*shallow interaction design*), brak pamięci o przeszłych zdarzeniach oraz całkowita niezdolność do modelowania stanów afektywnych (Naram, and Garikapati, 2025). Obecnie, dzięki integracji z wielkimi modelami językowymi, wirtualne postacie ewoluują w „agentów generatywnych" (*generative agents*) obdarzonych iluzją świadomości i złożonymi systemami pamięci. Agenci ci nie tylko odpowiadają na pytania, ale potrafią negocjować, okazywać emocje, a nawet wyciągać wnioski z zachowania szkolonego pracownika (Chernbumroong et al., 2026; Park et al., 2023). Kluczowym osiągnięciem jest wyposażenie NPC w pamięć kontekstową i epizodyczną. Pozwala to na całkowite odejście od zamkniętych, oskryptowanych drzew decyzyjnych, które dotychczas uniemożliwiały głęboki trening umiejętności miękkich. W erze przed nadejściem modeli LLM każda ścieżka negocjacyjna musiała zostać ręcznie zakodowana, co było kosztowne i wysoce ograniczone (Naram, and Garikapati, 2025; Chelli, and Batista, 2025). Powodowało to zjawisko „wyczerpania opcji dialogowych" (*dialogue exhaustion*), niszczące immersję i zmuszające pracownika do „grania w grę" (optymalizacji ścieżek wyboru) zamiast rzeczywistego treningu kompetencji (Chernbumroong et al., 2026; Ratican, and Hutson, 2024).

Wielkie modele językowe całkowicie demontują tę architekturę. Zamiast polegać na zamkniętych drzewach, nowoczesne symulacje wykorzystują zaawansowane systemy przetwarzania języka naturalnego (NLP) do analizy wprowadzanych przez użytkownika komend (zarówno tekstowych, jak i głosowych). Dekorelacja logiki dialogowej od silnika gry pozwala na to, aby system reagował na każdą, nawet najbardziej niespodziewaną wypowiedź szkolonego pracownika. Deweloperzy nie piszą już gotowych kwestii; zamiast tego stosują inżynierię podpowiedzi opartą na rolach (*role-based prompt engineering*), definiując jedynie szeroki kontekst, wiedzę domenową, cele psychologiczne oraz granice zachowań dla algorytmu (Swacha, and Gracel, 2025; Chernbumroong et al., 2026; Berrezueta-Guzman, and Wagner, 2026).

Zdolność modeli LLM do utrzymywania ciągłości konwersacyjnej i rozumienia intencji użytkownika oznacza, że każda iteracja szkolenia jest unikalna. Rozwiązania hybrydowe, łączące LLM z technikami takimi jak uczenie przez wzmacnianie (ang. *Reinforcement Learning*) oraz generowanie wzbogacone wyszukiwaniem (ang. *Retrieval-Augmented Generation* -RAG), zapewniają, że symulacja opiera się na rzetelnych, firmowych danych, eliminując zjawisko halucynacji AI, a jednocześnie oferując nieskończoną elastyczność interakcji (Zeng, 2023; Maleki, and Zhao, 2024). Współczesna nauka postuluje podejście

holistyczne, zauważając, że wiarygodność postaci wynika z interakcji między jej funkcją a narracją. Aby NPC spełniały swoje zadania, nie mogą jedynie „wyglądać" jak część świata gry, lecz muszą wykazywać się wysokim stopniem autentyczności zachowań (Warpefelt, & Verhagen, 2017). Implementacja AI pozwala na przełamanie dotychczasowych barier poprzez:

1. Symulację pełnej dynamiki interpersonalnej - prowadzenie otwartych negocjacji z cyfrowym awatarem reagującym w sposób nieprzewidywalny i przekonujący.
2. Zaspokojenie oczekiwań kontekstowych - dostosowanie zachowania AI do specyficznego środowiska symulacji, co jest niezbędne dla utrzymania wiarygodności doświadczenia.
3. Budowanie wiarygodnych relacji - transformację NPC z „dostawcy usług" w autentycznego partnera rynkowego, co bezpośrednio niweluje barierę deficytu interakcji ludzkiej.
4. Wprowadzenie dynamicznie generowanych zadań i realistycznego „chaosu biznesu" - to sprawia, że każda sesja szkoleniowa jest unikalna, co zgodnie z teorią powinno uatrakcyjniać system w oczach cyfrowego pokolenia.

W rezultacie, systemowa integracja sztucznej inteligencji umożliwia między innymi ewolucję postaci niezależnych (NPC) w stronę autentycznych partnerów decyzyjnych i nieprzewidywalnych wyzwań, co stanowi fundament budowania wysokiej wierności psychologicznej symulacji i zaspokojenia specyficznych potrzeb kognitywnych pokolenia cyfrowego.

Metodyka badań własnych

W celu zgromadzenia materiału empirycznego do rozwiązania wyznaczonego w pracy problemu badawczego posłużono się metodą badania ankietowego, która polega na udzielaniu przez wyraźnie określone osoby (respondentów) odpowiedzi na pytania tworzące świadomy, logiczny, konsekwentny i spójny zestaw twierdzeń służących do rozwiązania problemu naukowego (Matejun, 2016). Technikę badawczą stanowił wspomagany komputerowo wywiad CAWI. Wybór tego rozwiązania był podyktowany przede wszystkim łatwym dostępem do oprogramowania oraz możliwością sprawnego przeprowadzenia procesu gromadzenia danych. Zastosowanie sieci jako kanału komunikacji zapewniło wysoką efektywność ekonomiczną badania, co pozwoliło na szybkie dotarcie do właściwych osób bez konieczności angażowania dodatkowych zasobów. Taka forma dystrybucji kwestionariusza umożliwiła respondentom udzielenie odpowiedzi w dowolnie wybranym czasie, co przełożyło się na wysoką dynamikę procesu badawczego (Staniszewska, 2013). Narzędziem badawczym był ustrukturyzowany kwestionariusz, który udostępniono w formie cyfrowej w I kwartale 2026 roku. Mimo zalet

takich jak wysoka efektywność i niski koszt, trzeba na uwadze ograniczenia metody, m.in. brak możliwości bezpośredniej weryfikacji tożsamości uczestników (Juszczyk, 2023).

Niniejsze badanie stanowi integralny element szerszego projektu naukowego, nakierowanego na wieloaspektową diagnozę postaw pokolenia cyfrowego względem symulacji biznesowych. Ta konkretna publikacja skupia się na tylko jednym z nich, to jest ocenie potencjału AI w niwelowaniu barier wiarygodności symulacji biznesowych.

Dobór próby miał charakter celowy i koncentrował się na osobach w przedziale wiekowym 18 - 35 lat. Wybór ten był kluczowy dla realizacji celu badania, ponieważ to są przedstawiciele pokolenia cyfrowego, którzy posiadają kompetencje niezbędne do rzetelnej oceny potencjału sztucznej inteligencji jako narzędzia redukującego bariery wiarygodności symulacji szkoleniowych. Badanie obejmowało tylko osoby reprezentujące polską zbiorowość graczy.

Gromadzenie danych trwało od stycznia do marca 2026 roku i pozwoliło na zebranie 112 kwalifikujących się odpowiedzi. Z ostatecznej analizy wykluczono osoby powyżej 35. roku życia (stanowiące mniej niż 5% respondentów) oraz osoby, które mimo braku styczności z grami (4,4%) wypełniły ankietę. Dzięki temu zachowano homogeniczność grupy w kontekście biegłości gamingowej i badanych barier. W strukturze wykształcenia przeważały osoby posiadające dyplom uczelni wyższej (50% licencjat/inżynier; 5,4% magister), a także osoby z wykształceniem średnim (40,2%). Szczegółowe dane dotyczące rozkładu cech demograficznych respondentów umieszczone zostały w tabeli 1.

Tabela 1.
Cechy demograficzne respondentów

Cecha demograficzna	Kategoria	Liczebność	Udział (%)
Płeć	Kobieta	45	40,2%
	Mężczyzna	67	59,8%
Wiek	18 - 21	32	28,6%
	22 - 25	38	33,9%
	26 - 29	24	21,4%
	30 - 35	18	16,1%
Wykształcenie	Wyższe (licencjat, inżynier)	56	50%
	Średnie	45	40,2%
	Wyższe (magisterskie i wyżej)	6	5,4%
	Zasadnicze zawodowe	5	4,5%

Ze względu na zastosowane zaokrąglenia do jednego miejsca po przecinku, suma wartości procentowych może nieznacznie odbiegać od 100%.

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Analiza kompetencji cyfrowych uczestników pod kątem symulacji szkoleniowych oparta została na weryfikacji ich zaangażowania w zaawansowaną rozrywkę interaktywną, ze szczególnym uwzględnieniem regularności sesji oraz preferowanych typów mechanik.

Zgromadzone dane dowodzą wyjątkowo wysokiej biegłości technologicznej: dominującą grupę stanowią osoby operujące w środowiskach cyfrowych codziennie (30,4%) lub z dużą częstotliwością (25,9%).

Fundamentem charakterystyki badanej populacji jest wysoka biegłość gamingowa (*gaming literacy*), definiowana jako kognitywna sprawność w operowaniu logiką systemów cyfrowych. Kompetencja ta wykracza poza czystą sprawność techniczną, obejmując zdolność do krytycznej analizy mechanik, narracji oraz procesów pośredniczonych cyfrowo. Istotnym tłem interpretacyjnym jest tu rozkład preferencji gatunkowych (tabela 2), w którym dominują formaty wymagające zaawansowanych procesów analitycznych: gry fabularne (65,2%) oraz logiczne (48,2%). Długotrwałe doświadczenie w nawigowaniu po tak wielowymiarowych środowiskach - o poziomie zawiłości często dystansującym standardowe rozwiązania korporacyjne – sytuuje respondentów w roli kompetentnych audytorów parametrów wierności (*fidelity*) oraz prawdopodobieństwa (*plausibility*) systemów.

Rodzaj preferowanych gatunków bezpośrednio determinuje specyficzny rygoryzm oceny. Odbiorcy produkcji o charakterze fabularnym czy też RPG, są ukształtowani przez kontakt z zaawansowaną narracją, wykazują zatem wysokie wymagania względem realizmu społecznego oraz autentyczności postaci niezależnych (NPC). Z kolei, gracze tytułów logicznych priorytetyzują bezwzględną zgodność algorytmiczną, gdzie każda sprzeczność w mechanice (tzw. błąd logiczny) generuje spadek zaangażowania. W tym ujęciu badani stają się świadomymi weryfikatorami innowacji, zdolnymi do rozstrzygnięcia, czy implementacja sztucznej inteligencji (np. w postaci dynamicznych NPC) realnie podnosi użyteczność symulacji, czy stanowi jedynie powierzchowną innowację estetyczną.

Tabela 2.
Preferencje gatunków gier komercyjnych wśród badanych

Gatunek gry	**Procent wskazań**	**Typ preferencji**	**Obszary mogące podlegać bardziej rygorystycznej ocenie**
RPG / Fabularne (np. *Wiedźmin*, *Cyberpunk 2077, The Elder Scrolls. Red Dead Redemption*)	65,2%	Narracyjno-decyzyjny	Realizm interakcji społecznych, wiarygodność psychologiczna postaci (NPC), spójność narracyjna scenariusza
Gatunek gry	**Procent wskazań**	**Typ preferencji**	**Obszary mogące podlegać bardziej rygorystycznej ocenie**
Gry logiczne (np. Sudoku, Tetris)	48,2%	Analityczno-logiczny	Spójność logiczna algorytmów, precyzja reguł systemowych, brak błędów w strukturze matematycznej

Gry akcji / e-sportowe (np. *Counter Strike*, *Battlefield, Valorant*)	42,9%	Zespołowo-dynamiczny	Efektywność koordynacji zespołowej, przejrzystość podziału ról, jakość systemów komunikacji i synchronizacji działań grupowych.
Strategiczne (polegające głównie na realizacji określonych celów)	37,5%	Celowościowy	Złożoność wieloczynnikowa modelu, realizm procesów decyzyjnych w długiej perspektywie czasowej
Ekonomiczne (polegające głównie na zapewnieniu płynności finansowej i logistycznej w czasie nieskończonym)	25%	Optymalizacyjny	Wierność wskaźników rynkowych, rzetelność odzwierciedlenia mechanizmów finansowych i logistycznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania i (Dörner et al., 2016).

Podsumowując, regularne doświadczenia z grami strategicznymi i logicznymi pozycjonują badanych jako odbiorców przygotowanych do interakcji z zaawansowanymi środowiskami cyfrowymi. Wysoki poziom biegłości gamingowej (*gaming literacy*) sprawia, że ich oczekiwania względem trafności symulacji są ukształtowane przez wieloletnią praktykę, a nie jedynie teoretyczne założenia. Tak ukształtowana biegłość technologiczna pozwala respondentom na krytyczne dekodowanie procesów zachodzących wewnątrz modeli, co może czynić z nich rzetelnych audytorów potencjału AI w budowaniu autentyczności i wiarygodności systemów szkoleniowych.

Wyniki badań

Dekonstrukcja sceptycyzmu poznawczego respondentów służyła nie tylko diagnozie barier, ale przede wszystkim precyzyjnemu mapowaniu obszarów wymagających implementacji zaawansowanych algorytmów sztucznej inteligencji. Kwestionariusz obejmował zestaw twierdzeń definiujących dysfunkcje tradycyjnych symulacji, które respondenci oceniali przy wykorzystaniu pięciostopniowej skali Likerta (gdzie 1 oznacza całkowity brak zgody, a 5 - pełną aprobatę).

Zastosowanie tej skali pozwoliło na kwantyfikację deficytów realizmu, których dotychczasowe, statyczne systemy nie potrafiły zniwelować. Kluczowym parametrem interpretacyjnym był wskaźnik TOP2 (suma odpowiedzi „raczej się zgadzam" oraz „zdecydowanie się zgadzam"), który posłużył jako filtr do wyizolowania ugruntowanych przekonań o niewystarczalności konwencjonalnych rozwiązań. Pozwoliło to na oddzielenie incydentalnych opinii od systemowych barier, co ma krytyczne znaczenie dla rzetelnej oceny zasadności wdrożenia technologii LLM w procesie dydaktycznym.

W strukturze kwestionariusza, który był częścią szerzej zakrojonego projektu badawczego nad symulacjami szkoleniowymi, wyodrębniono sześć kategorii badawczych (tabela 3). Zaprezentowane wyniki pełnią funkcję tła kontekstowego i nie stanowią głównego przedmiotu analizy, lecz służą jako niezbędny punkt odniesienia do weryfikacji potencjału sztucznej inteligencji w niwelowaniu zdiagnozowanych deficytów wiarygodności.

Tabela 3.
Zestawienie i opis badanych barier wiarygodności symulacji szkoleniowych

Numer pytania	Badana bariera	Opis	TOP2 %	Opcja 3	Opcja 4	Opcja 5
B1	Realizm matematyczno-ekonomiczny	Ocena zdolności systemu do oddania realiów złożonego świata biznesu	78,5%	14,3%	44,6%	33,9%
B2	Realizm społeczno-behawioralny	Sceptycyzm wobec odwzorowania czynników ludzkich i emocjonalnych	67%	18,8%	39,3%	27,7%
B3	Luka atrakcyjności	Obawa przed nudą w zestawieniu z komercyjnymi grami wideo	70,5%	15,2%	60,7%	9,8%
B4	Transfer wiedzy	Wątpliwość czy doświadczenie z symulacji przełoży się na realną sytuację w pracy	67,9%	20,5%	42,9%	25%
Numer pytania	**Badana bariera**	**Opis**	**TOP2 %**	**Opcja 3**	**Opcja 4**	**Opcja 5**
B5	Specjalizacja merytoryczna narzędzia	Przekonanie o niskiej przydatności symulacji dla zaawansowanych specjalistów (postrzeganie gier jako narzędzi wstępnych)	54,5%	25%	35,7%	18,8%

B6	Deficyt interakcji ludzkiej	Ocena wpływu braku kontaktu z drugim człowiekiem na rozwój umiejętności miękkich	22,3%	44,6%	15,2%	7,1%

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

W oparciu o te deficyty badano percepcję narzędzi GenAI i LLM jako elementów naprawczych. Wyniki które otrzymano w ramach prowadzonego badania prezentuje tabela 4.

Tabela 4.
Percepcja potencjału AI w niwelowaniu barier wiarygodności

Badane kryterium AI	**Interpretacja względem przełamywanych barier**	**TOP2 %**	**Opcja 3**	**Opcja 4**	**Opcja 5**
Możliwość dynamicznego generowania zadań w zależności od sytuacji w grze	Większe zróżnicowanie celów i zadań, dopasowanie ich do przebiegu rozgrywki zamiast z góry narzuconych sztywnych scenariuszy (B1, B3 i B4)	82,1%	15,2%	45,5%	36,6%
Wiara w generowanie nieprzewidywalnych sytuacji biznesowych	Unikalne wyzwania w zależności od stopnia zaawansowania rozgrywki (B1, B3, B4)	74,2%	18,8%	59,8%	14,4%
AI jako wsparcie procesu (feedback w czasie rzeczywistym)	Trafniejsze rekomendacje co do obszarów kompetencji użytkowników do poprawy (B3, B5)	55,4%	27,7%	42,9%	12,5%
Badane kryterium AI	**Interpretacja względem przełamywanych barier**	**TOP2 %**	**Opcja 3**	**Opcja 4**	**Opcja 5**
Możliwość zastąpienia czynnika ludzkiego przez odpowiednio zaawansowane AI	Postacie niezależne o nieliniowych ścieżkach postępowania, wzmacniające realizm społeczno-behawioralny (B2, B3, B6)	41,1%	14,3%	29,5%	11,6%

Rzetelna i obiektywna (sprawiedliwa) ocena kompetencji użytkownika	AI jako sędzia efektywności użytkownika; metoda ewaluacji po zakończonym szkoleniu (B3, B5)	40,2%	39,3%	25,9%	14,3%

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego badania.

Analiza porównawcza zidentyfikowanych barier oraz potencjału sztucznej inteligencji pozwala na sformułowanie wniosku, że narzędzia GenAI i LLM są postrzegane przez młodych, biegłych cyfrowo pracowników - jako skuteczne czynniki uwiarygadniające cyfrowe środowiska nauki. Najwyższy wskaźnik aprobaty w badaniu uzyskała możliwość dynamicznego generowania zadań w zależności od sytuacji w grze (82,1% TOP2), co stanowi bezpośrednią odpowiedź na deficyty realizmu matematycznego (B1) oraz lukę atrakcyjności (B3). Dla użytkowników o wysokim poziomie *gaming literacy*, technologia ta pozwala na ewolucję od statycznych, przewidywalnych scenariuszy w stronę dynamicznej inteligencji, co potwierdza wysoka wiara w zdolność AI do kreowania nieprzewidywalnych sytuacji biznesowych (74,2% TOP2). Takie podejście znacząco podnosi postrzeganą wierność (*fidelity*) szkolenia, przekształcając „bezpieczne laboratorium" w autentyczny „chaos biznesowy", co legitymizuje transfer wiedzy do realiów zawodowych (B4).

W obszarze wsparcia procesu dydaktycznego odnotowano umiarkowany optymizm - 55,4% respondentów akceptuje AI w roli asystenta udzielającego feedbacku w czasie rzeczywistym. Wynik ten sugeruje, że choć młodzi pracownicy doceniają szybkość reakcji algorytmów, wciąż zachowują pewien dystans wobec merytorycznej nieomylności systemów w zakresie specjalizacji narzędzia (B5). Równolegle implementacja zaawansowanych modeli językowych w obsłudze postaci niezależnych (NPC) jest postrzegana jako szansa na przełamanie deficytu realizmu społeczno-behawioralnego (B2, B6), choć wskaźnik akceptacji dla pełnego zastąpienia czynnika ludzkiego przez AI wynosi 41,1% TOP2.

Ważnym aspektem interpretacyjnym tak ukształtowanego wyniku jest potencjalna wieloznaczność zastosowanego w kwestionariuszu sformułowania. Użycie czasownika „zastąpić" mogło zostać zinterpretowane przez część respondentów w sposób kategoryczny i zero-jedynkowy, sugerując całkowitą eliminację instruktora z procesu dydaktycznego. Z perspektywy psychologii technologii, tak silne nasycenie emocjonalne pytania mogło uruchomić u badanych mechanizm obronny, przejawiający się w wysokim odsetku odpowiedzi negatywnych (44,6%). Dla tej grupy respondentów wizja „AI jako zastępstwa człowieka" mogła zostać odczytana jako zagrożenie dla relacyjnego wymiaru nauki, co skutkowało odruchową odmową akceptacji bez głębszej analizy technologicznego potencjału narzędzia.

Z drugiej strony, respondenci oceniający to twierdzenie pozytywnie, prawdopodobnie skoncentrowali swoją uwagę na frazie „odpowiednio zaawansowana", interpretując ją nie jako postulat usunięcia ludzi, lecz jako wizję maksymalnej emulacji ludzkich zachowań przez NPC w symulacji. W tym ujęciu „zastąpienie" rozumiane jest jako technologiczne udoskonalenie

postaci cyfrowych do poziomu, w którym ich nieliniowość i autentyczność rozmowy zdejmują z symulacji etykietę „sztywnego skryptu”. Ten rozdźwięk interpretacyjny sugeruje, że dla badanej grupy kluczowa jest nie tyle eliminacja człowieka, co likwidacja „sztuczności” interakcji cyfrowej.

Szczególnie istotny dla zrozumienia badanych postaw jest zidentyfikowany dualizm w postrzeganiu sprawstwa algorytmów. O ile respondenci chętnie przyjmują AI jako narzędzie kreujące dynamikę świata gry, o tyle wykazują najniższy poziom zaufania wobec AI pełniącej funkcję autonomicznego sędziego ich osiągnięć (40,2% TOP2). Dominującą postawą w tym wymiarze jest niepewność, wyrażona przez wysoki odsetek odpowiedzi neutralnych (39,3% dla Opcji 3). Sceptycyzm ten może wynikać z obaw o obiektywizm werdyktów oraz potencjalne błędy wynikające z wad oprogramowania.

Podsumowując wyniki wskazują, że dla osób gamingowo biegłych, AI może wnieść wartość dodaną głównie poprzez dynamizację zadań i scenariuszy, jednak w sferze końcowej ewaluacji użytkownicy o wysokim potencjale cyfrowym wciąż wymagają transparentności algorytmów lub nadzoru człowieka nad procesem certyfikacji kompetencji. Wyniki te wskazują, że przyszłość symulacji szkoleniowych nie leży w pełnej automatyzacji, lecz w modelu Human-in-the-loop, gdzie AI zapewnia realizm społeczno-behawioralny postaciom niezależnym, podczas gdy człowiek pozostaje gwarantem etycznej i merytorycznej ramy szkolenia.

Podsumowanie

Przeprowadzone badanie pozwoliło zrealizować zamierzony cel badaczy i odpowiedzieć na postawione pytanie badawcze. Z analizy wynika, że dla osób o wysokich kompetencjach cyfrowych i wysokiej biegłości gamingowej sztuczna inteligencja ma wysoki, choć dalej nieco ograniczony potencjał do budowania wiarygodności przez cyfrowe środowiska nauki. Syntetyczne ujęcie wyników badania pozwala na sformułowanie następujących fundamentalnych wniosków, które definiują przyszłość symulacyjnych systemów szkoleniowych w nowoczesnych organizacjach.

Po pierwsze, mimo wysokiego zaufania (78,5%) do możliwości symulacji w tworzeniu wiarygodnego doświadczenia zawodowego, istnieją obawy, że będą zbyt proste z powodu przewidywalności (powtarzalność zadań). Jednak 82,1% badanych wierzy, że implementacja GenAI pozwali na ewolucję w stronę dynamicznego generowania zadań, co jest preferowane. Inaczej ujmując, respondenci uważają, że AI może zamienić „sztywny arkusz danych” w „żywe środowisko biznesowe”, co prawdopodobnie zaspokajając ich potrzeby jako użytkowników o wysokim potencjale cyfrowym. Przekonanie to idzie w parze z wiarą (74,2%) w możliwość AI

do kreowania nieprzewidywalnych sytuacji biznesowych (wspominany „chaos realnego biznesu").

W sferze społeczno-behawioralnej, choć implementacja modeli LLM w obsłudze postaci NPC jest postrzegana jako szansa na przełamanie deficytu realizmu społecznego, niski wskaźnik akceptacji dla pełnego zastąpienia człowieka (41,1%) sugeruje istnienie obaw przed utratą relacyjnego wymiaru nauki. Zjawisko to można interpretować jako chęć zachowania „ludzkiego pierwiastka" w sferze emocjonalnej, przy jednoczesnym oczekiwaniu na udoskonalenie cyfrowych interakcji.

Końcowo, umiarkowany optymizm wobec AI w roli asystenta udzielającego feedbacku (55,4%) wydaje się wskazywać na to, że badani dostrzegają potencjał w szybkości reakcji algorytmów, lecz jednocześnie mogą zachowywać dystans wobec ich merytorycznej nieomylności. Toteż wyniki wykazują najniższy poziom zaufania (40,2%) wobec technologii pełniącej funkcję autonomicznego sędziego. Sugeruje to, że w sferze oceny kompetencji badani nadal priorytetyzują nadzór człowieka lub wymagają większej transparentności procesowej.

Zbiór zgromadzonych opinii prowadzi do konkluzji, iż w percepcji badanej grupy przyszłość systemów symulacyjnych opiera się na modelu Human-in-the-loop (HITL). W ujęciu tym sztuczna inteligencja postrzegana jest jako technologia zdolna zapewnić realizm sytuacyjny, podczas gdy człowiek pozostaje w oczach respondentów niezbędnym gwarantem merytorycznych i etycznych ram szkolenia. Taka postawa badanych znajduje silne uzasadnienie w literaturze, która wskazuje, że ze względu na ograniczoną zdolność algorytmów do samodzielnej interpretacji skomplikowanych i nieliniowych scenariuszy, pełne zastąpienie ludzkiej inteligencji pozostaje obecnie nieosiągalne. Model HITL pozwala zatem na synergiczne połączenie obliczeniowej wydajności AI z ludzką zdolnością do adaptacji i etycznego osądu, co jak wskazuje przeprowadzone badania, dla gamingowo biegłych pracowników jest warunkiem uznania szkolenia za rzetelny instrument rozwoju zawodowego (Wu et al., 2023; Slade et al., 2024).

Tak więc, aby symulacje szkoleniowe mogły w pełni wykorzystać zdiagnozowany potencjał GenAI i LLM, należy przede wszystkim zrezygnować z wizji pełnej automatyzacji na rzecz systemów, w których AI zapewnia realizm interakcji społecznych (NPC), a człowiek-trener pozostaje gwarantem obiektywizmu ostatecznej oceny. Ponadto, wymagane jest odejście od zamkniętych drzew decyzyjnych na rzecz silników LLM, które pozwalają na trening umiejętności miękkich w warunkach pełnej swobody wypowiedzi i adaptacji kontekstowej. Jednocześnie, aby przełamać opór przed oceną dokonywaną przez algorytm, systemy muszą oferować logiczne i transparentne uzasadnienia werdyktów, co jest kluczowe dla ich akceptacji przez świadomych użytkowników cyfrowych.

Bibliografia

1. Apperley, T., and Walsh, C. (2012). What digital games and literacy have in common: a heuristic for understanding pupils' gaming literacy. *Literacy*, *46*, 115-122.
2. Baldissin, N., De Toni, A. F., and Nonino, F. (2013). What is a Business Game? Historical background and evolution of business games in serious games context. In N. Baldissin, and A. F. De Toni (Eds.), *Business game-based learning in management education* (pp. 3-23). London: The Business Game LTD.
3. Berrezueta-Guzman, S., and Wagner, S. (2026). Next-Gen Orientation: Supporting International Students with Generative AI NPCs in VR. *Frontiers in Computer Science*, *8*, 1799323. doi: 10.3389/fcomp.2026.1799323.
4. Chelli, V. C., and Batista, A. L. F. (2025). Sophia Project: Enhancing Player Immersion with Intelligent Autonomous NPCs in 2D RPGs. In *Proceedings of AI4HGI '25, the First Workshop on Artificial Intelligence for Human-Game Interaction at the 28th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI '25)*. Bologna: ECAI.
5. Chernbumroong, S., Intawong, K., Asawimalkit, U., Puritat, K., and Julrode, P. (2026). Design and Evaluation of a Generative AI-Enhanced Serious Game for Digital Literacy: An AI-Driven NPC Approach. *Informatics*, *13*(1), 16. doi: 10.3390/informatics13010016.
6. Dörner, R., Göbel, S., Effelsberg, W., and Wiemeyer, J. (2016). *Serious Games: Foundations, Concepts and Practice* Cham: Springer International Publishing.
7. Escudeiro, P., Campos Gouveia, M., and Escudeiro, F. (2025). Play with Purpose: Serious Games for Inclusion and Sustainability. In *From Pixels to Play - The Art and Science of Video Games*. London: IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.1011327.
8. Facchino, A. P., Marchetti, D., Colasanti, M., Fontanesi, L., and Verrocchio, M. C. (2025). The use of serious games for psychological education and training: a systematic review. *Frontiers in Education*, *10*, 1511729. doi: 10.3389/feduc.2025.1511729.
9. Fraccascia, L., Sabato, A., and Yazan, D. M. (2021). An industrial symbiosis simulation game: Evidence from the circular sustainable business development class. *Journal of Industrial Ecology*, *25*, 1688-1706.
10. Glas, R., van Vught, J., Fluitsma, T., De La Hera, T., and Gómez-García, S. (2023). Literacy at play: an analysis of media literacy games used to foster media literacy competencies. *Frontiers in Communication*, *8*, 1155840. doi: 10.3389/fcomm.2023.1155840.
11. Grāvelsiņa, E., and Daniela, L. (2025). From Facebook to Classroom: A Systematic Analysis of Educational Games Designed by Educators. *International Journal of*

Learning, Teaching and Educational Research, *24*(3), 517-544. doi: 10.26803/ijlter.24.3.25.

12. Liberona, D., Kumaresan, A., Valenzuela, L., and Tarazona, G. (2022). Serious Games Development and Impact for Business Education. In *Computer Game Development*. London: IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.103085.
13. Linder, H. (2020). Emergo Train System: Evaluation of a paediatric trauma victim bank (Bachelor thesis). Linköping University, Linköping.
14. Marklund, B. B., and Taylor, A. S. A. (2016). Educational Games in Practice: The challenges involved in conducting a game-based curriculum. *Electronic Journal of e-Learning*, *14*, 122-135.
15. Matejun, M. (2016). Metodyka badań ankietowych w naukach o zarządzaniu - ujęcie modelowe. In M. Lisiński, and B. Ziębicki (Eds.), *Współczesne problemy rozwoju metodologii zarządzania* (pp. 341-354). Kraków: Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
16. Naram, J. V., and Garikapati, A. (2025). Memory-Driven NPC Behavior: Context-Aware and Emotion-Based Game Conversations. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology.
17. Park, J. S., O'Brien, J., Cai, C. J., Morris, M. R., Liang, P., and Bernstein, M. S. (2023). Generative agents: Interactive simulacra of human behavior. In *Proceedings of the 36th annual acm symposium on user interface software and technology* (pp. 1-22). New York: ACM.
18. Ratican, J., and Hutson, J. (2024). Video game development 3.0: AI-driven collaborative co-creation. *Metaverse*, *5*(2). doi: 10.54517/m2904.
19. Shirazian, S., Vatanpour, M., and Guity, P. (2025). Generation Z: Learners' Profiles and Teaching Challenges. *Frontiers in Dentistry*, *22*, 1-15. doi: 10.18502/fid.v22i40.19906.
20. Slade, P., Atkeson, C., Donelan, J. M., Houdijk, H., Ingraham, K. A., Kim, M., Kong, K., Poggensee, K. L., Riener, R., Steinert, M., Zhang, J., and Collins, S. H. (2024). On human-in-the-loop optimization of human-robot interaction. *Nature*, *633*(8031), 779-788. doi: 10.1038/s41586-024-070.
21. Staniszewska, M. (2013). Internet jako narzędzie prowadzenia badań społecznych. *Acta Innovations*, *9*, 1-57.
22. Stenros, J. (2015). *Playfulness, Play, and Games: A Constructionist Ludology Approach* (Acta Universitatis Tamperensis; No. 2049). Tampere: Tampere University Press.
23. Strickland, P. (2023). Business-Simulation Pedagogy, Assessments, and Barriers to Entry in an Australian Educational Environment. *International Journal of Smart Business and Technology*, *11*, 1-14.
24. Swacha, J., and Gracel, M. (2025). Supporting Serious Game Development with Generative Artificial Intelligence: Mapping Solutions to Lifecycle Stages. *Applied Sciences*, *15*(21), 11606. doi: 10.3390/app152111606.

25. Tan, A., Dorneich, M. C., and Cotos, E. (2025). Developing and evaluating the fidelity of virtual reality-artificial intelligence (VR-AI) environment for situated learning. *Frontiers in Virtual Reality*, *6*, 1587768. doi: 10.3389/frvir.2025.1587768.
26. Velez, A., and Alonso, R. K. (2025). Business Simulation Games for the Development of Decision Making: Systematic Review. *Education Sciences*, *15*(2), 168. doi: 10.3390/educsci15020168.
27. Vlachopoulos, D., and Makri, A. (2017). The effect of games and simulations on higher education: a systematic literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, *14*(1), 22. doi: 10.1186/s41239-017-0062-1.
28. Warpefelt, H., and Verhagen, H. (2017). A model of non-player character believability. *Journal of Gaming & Virtual Worlds*, *9*(1). doi: 10.1386/jgvw.9.1.39_1.
29. Wu, J., Huang, Z., Hu, Z., and Lv, C. (2023). Toward human-in-the-loop AI: Enhancing deep reinforcement learning via real-time human guidance for autonomous driving. *Engineering*, *21*, 75-91. doi: 10.1016/j.eng.2022.05.017.

EKO INNOWACJE – NOWOCZESNE PODEJŚCIE DO WPŁYWU LOTNICTWA NA ŚRODOWISKO

Julia MRUKWA[1], Kuba DUTKIEWICZ[2], Maciej PILARZ[3], Marcel SKURCZYŃSKI[4], Tomasz ROGOWSKI[5], Zofia MARCZAK[6], Zuzanna MUSIOŁ[7], Patrycja LASOTA[8], Tomasz WĘGRZYN[9]

Politechnika Śląska, Wydział Srodowiska i Energetyki; student(ka);

Politechnika Śląska, Wydział Srodowiska i Energetyki, e-mail:eb318792@student.polsl.pl

identyfikator ORCID -

Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; mk318720@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej; student, ORCID – 0009-0005-8536-5539;

pl315065@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail: tomasz.węgrzyn@polsl.pl;
identyfikator ORCID - 0000-0003-2296-1032
* Korespondencja: tomasz.wegrzyn@polsl.pl; Tel.: +48 504 816 362

ECO INNOVATIONS – A MODERN APPROACH TO AVIATIONS ENVIRONMENTAL IMPACT

Abstract: The article presents modern approaches to making aviation more eco-friendly by reducing emissions but at the same time keeping the aircraft safe form of transportation. It's main focus is on using lower amount of fuel, exchanging heavy materials to lighter ones and improving overall efficiency of the aircraft.

Keywords: aviation, fuel, materials, composites, efficiency

ECO INNOVATIONS IN MATERIALS

1. Carbon Fiber Reinforced Polymer

1.1. What is Carbon Fiber Reinforced Polymer?

CFRP is a material made from carbon fibers mixed with plastic resin. The carbon fibers are very strong, but at the same time they are much lighter than metal. This is the reason why aircraft companies became interested in CFRP. Instead of relying mostly on aluminium like older airplanes did, newer aircrafts use composites in wings, fuselage and tail sections. Carbon Fiber is better than aluminum in many ways. It is:

- lightweight,
- very strong,
- resistant to corrosion,
- long-lasting.

Aircraft companies started using CFRP in parts like wings, the fuselage, and the tail. Both Boeing and Airbus started using CFRP a lot in their aircrafts. Airbus says that more than half of the Airbus A350 is made from composite materials. Boeing also uses a lot of CFRP in the Boeing 787 Dreamliner (Airbus)(Giurgiutiu, 2022).

1.2. Cost Changes

One of the reasons companies started using CFRP was to lower aircraft weight. Lighter airplanes use less fuel, which helps airlines save money. Fuel is very expensive, especially for airlines operating hundreds of international flights every day. Even small reduction in fuel usage can save companies big amounts of money. Studies show that composite aircraft can use around 20–25% less fuel than older and heavier aluminum planes. Because of this:

- airlines spend less money on fuel,
- planes need less maintenance,
- corrosion problems happen less often,
- aircraft can last longer.

Thing that made CFRP stand out was the fact that it does not corrode easily. Aluminum aircraft need regular inspections because moisture and pressure changes slowly damage the metal over time. Composite materials can handle those conditions better, which means aircraft parts last longer and airlines spend less money on maintenance.

One of the examples is Boeing. They designed the 787 Dreamliner with lightweight composite wings and body parts to optimize fuel efficiency. However, CFRP also has disadvantages. Making carbon-fiber parts is expensive, because manufacturing process is complicated and it requires for companies advanced machines and trained workers. Repairs also cost more because special equipment is needed. Even though production costs are high, airlines save money in long term, because fuel and maintenance costs are becoming lower (Johnson, 2026)(Wikipedia, 2024).

1.3. Environmental Impact

CFRP has also helped the environment. Since composite aircraft are lighter, planes burn less fuel and produce lower amount of carbon dioxide (CO_2). Modern aircraft like the Boeing 787 and Airbus A350 can fly long distances while using less fuel per passenger. This helps reduce gas emissions. Another advantage is that CFRP is highly resistant to corrosion, so aircraft parts last longer and do not need to be replaced or repaired as often. Still, there are some environmental problems with CFRP. Carbon-fiber materials are difficult to recycle, and producing them uses a lot of energy. Scientists are currently trying to create recyclable composite materials for future aircraft(Airbus)(Giurgiutiu, 2022)(Xu, 2024).

1.4. Impact on Aviation

CFRP changed aviation in many ways. Planes became:

- lighter,
- stronger,
- more fuel efficient,
- more aerodynamic.

The use of CFRP changed more than just fuel efficiency. Modern aircraft are also quieter and more comfortable for passengers. Planes like the Boeing 787 Dreamliner and Airbus A350 have better cabin pressure and humidity systems, which helps passengers feel less tired during long flights. Composite materials also gave engineers more freedom when designing aircraft wings because lighter materials allow more flexible and aerodynamic shapes. That improves aircraft stability and overall flight performance. Another important change is maintenance. Since CFRP does not corrode like aluminum, airlines spend less time dealing with corrosion-related repairs. This allows aircraft to stay in service longer and reduces maintenance downtime (Giurgiutiu, 2022)(Wikipedia).

1.5. Future outlook

Today, Airbus and Boeing are still improving composite technology. They are researching:

- recyclable materials,
- faster production methods,
- lighter aircraft structures,
- robotic manufacturing systems.

The goal is to make airplanes even more efficient and environmentally friendly in the future. Many experts believe composite materials will become even more important as aviation continues trying to lower emissions and fuel use (Boeing, 2024)(Xu, 2024).

1.6. Conclusion

In conclusion, CFRP has completely changed modern aviation. It helped make aircraft lighter, stronger, and more fuel efficient. Companies like Boeing and Airbus use composite materials to reduce fuel use, lower emissions, and improve aircraft performance. Even though CFRP is expensive and not so easy to recycle, it is still one of the most important innovations in aviation today. In the future, composite materials will most likely play an even bigger role in making air travel more efficient and environmentally friendly.

2. RECYCLED CARBON FIBER

2.1. Recycled carbon fiber in aviation

As air travel continues to grow globally, there is increased pressure on the aviation industry to lower its environmental impact. While reducing carbon emissions through fuel efficiency and alternative energy sources has received a lot of attention, the sustainability of aircraft materials is still an important but frequently disregarded factor. Composites, such as carbon fiber reinforced polymers (CFRPs) (Bentley, 2024) are essential to modern airplanes because of their strength-to-weight ratio and capacity to reduce overall aircraft weight. This weight loss directly lowers fuel use, which in turn lowers greenhouse gas emissions (T&E, 2024).

Still, conventional carbon fiber poses a serious environmental concern despite these benefits. Virgin carbon fiber requires a lot of energy to produce, and once it is integrated into composite materials, the thermosetting resins that hold the fibers together make recycling it challenging. Because of this, a lot of composite waste is produced during the manufacturing process, as well as at the end of an aircraft's life cycle, and most of it is now burned or discarded in landfills (IMPACT MATERIALS, 2024).

Recycled carbon fiber (rCF) has become a promising invention in the field of sustainable aviation materials in response to these difficulties. By recovering fibers from production waste or end-of-life composites, rCF has the potential to lower material prices and environmental impact while assisting aerospace engineering's shift to a more circular economy (Wasson,

2024). However, these are still issues with material performance, consistency, and certification that prevent it from being widely used in aircraft. The use of recycled carbon fiber in aviation will be examined in this section, along with its advantages, uses, and obstacles that need to be overcome for it to be a practical, large-scale solution.

2.2. What is recycled carbon fiber?

Usually, carbon fiber is utilized in composite materials, most frequently carbon fiber reinforced polymers (CFRPs), which are made up of lightweight, robust carbon fibers embedded in a matrix of polymer resin. Because of their endurance and excellent strength-to-weight ratio, these composites are highly prized in the aviation industry (Penta Pattern & Model, 2026). However, they are challenging to recycle due to their structure. The thermosetting resins used in the majority of aircraft composites cannot be melted and molded once they have hardened, unlike thermoplastics, conventional recycling techniques are useless.

Carbon fibers that have been recovered from industrial waste or end-of-life composite components and prepared for reuse are referred to as recycled carbon fiber (rCF). Separating the fibers from the surrounding resin without significantly impairing their structural qualities is the main recycling challenge. To do this, a number of techniques have been developed. Composite materials can be recycled mechanically by shredding them into smaller pieces so they can be used again as filler material, but the mechanical performance is greatly reduced. Thermal procedures like pyrolysis, which break down resin at high temperatures in an oxygen-free atmosphere while leaving relatively intact fibers behind, are examples of more advanced methods. Solvents are used in chemical recycling techniques like solvolysis to break down the resin and recover cleaner, less damaged fibers.

Even with these developments, recycled carbon fiber usually varies from virgin carbon fiber in a number of ways. Because of processing, the fibers are frequently shorter and may have changed surface characteristics, which might weaken their binding with fresh resins. As a result, when compared to newly made fibers, rCF often shows somewhat lower and more inconsistent mechanical performance. However, it still has many of the favorable qualities of carbon fiber, such as low weight and strong rigidity, which make it appropriate for a variety of secondary uses in the aviation and other industries (Borjan, Knez and Knez, 2021).

2.3. Why does it matter for aviation?

Recycled carbon fiber (rCF) is important for aviation because it can help solve the economic and environmental problems that come with producing new aircraft. The amount of carbon fiber waste has increased considerably as the industry depends more and more on composite materials. Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) manufacturing methods can produce up to 30–40% scrap material, and in the upcoming decades, it is anticipated that the retirement of airplanes with a high composite content would further increase waste streams. A large portion of this material ends up in landfills or is burned, contributing to environmental degradation, in the absence of efficient recycling methods.

Recycled carbon fiber has definite advantages over virgin material from an environmental standpoint. New carbon fiber production is a very energy-intensive process that uses a lot of raw materials and heat. On the other hand, recycling procedures, such as thermal and chemical ones, use a lot less energy and emit less carbon dioxide. By recycling pre-existing fibers, rCF

lowers the need for new raw materials and promotes the growth of a circular economy in the aviation industry, where resources are used for as long as possible rather than being thrown away after a single lifecycle (Eureka, 2022).

Using recycled carbon fiber can assist in lowering material prices, which are a great factor in the production of airplanes. Because of its intricate production process, virgin carbon fiber is costly, but rCF can be made for less money, particularly when it comes from manufacturing waste that would otherwise be thrown away. Manufacturers now have the chance to maximize resource efficiency and lower total manufacturing costs (Gardiner, 2014).

The size and material intensity of modern aircraft increase the importance of rCF in the aviation industry in particular. In order to increase fuel efficiency, next-generation aircraft heavily rely on composite materials. Consequently, the quantity of waste produced during manufacture and the difficulty of disposing of it at the end of its useful life are both rising. In line with more general industry objectives like lowering lifecycle emissions and reaching net-zero targets, recycled carbon fiber offers a solution to manage this expanding material footprint more responsibly.

2.4. Applications in aviation

Although its use is now restricted to non-critical components, recycled carbon fiber (rCF) is already finding useful applications in aviation. rCF is mostly utilized in applications where high strength and dependability are not necessary because of its somewhat inferior and more variable mechanical qualities when compared to fresh carbon fiber.

The cabin of airplanes is one of the most frequent uses. Cabin panels, seat constructions, tray tables, and brackets can all be made from recycled carbon fiber. These components bypass the stringent certification requirements connected with principal load-bearing structures while yet benefiting from the material's low weight and sufficient strength. Utilizing rCF in interior components also aids in lowering the total weight of the aircraft, which may enhance fuel economy (Mamat et al., 2025).

rCF is being investigated more and more for secondary structural elements in addition to interiors. These include components like fairings, access panels, and specific support structures that don't support heavy loads but yet need to be durable. Recycled carbon fiber is a desirable substitute for both metals and virgin composites in these situations because it finds a balance between sustainability and performance.

However, there is still little application of rCF in fundamental structures like wings or fuselage parts. It is more challenging to ensure extremely uniform and predictable material qualities with recycled fibers in order to meet aviation safety regulations. Because of this, its usage in crucial applications is now limited by certification and regulatory issues (Sántha, Tamás-Bényei and Toldy, 2025).

Despite these limitations, industry activities and continuing research indicate that the use of recycled carbon fiber in aircraft is probably going to grow. rCF may be utilized in a greater

variety of components, further promoting sustainable aircraft design, as recycling technologies advance and material quality becomes more reliable.

2.5. Challenges and limitations

Despite its potential, recycled carbon fiber (rCF) is still not widely used in aviation due to a number of obstacles. Variability in material qualities is one of the main problems. The length, condition, and strength of recycled fibers might vary based on the recycling procedure employed, in contrast to new carbon fiber, which is produced under extremely controlled conditions. Predicting performance becomes more challenging due to this inconsistency, which is crucial in a sector where safety margins are very strict (Worrall, 2019).

The decrease in mechanical performance is another significant disadvantage. Fibers are frequently shortened or slightly damaged during recycling, particularly in thermal and mechanical operations, which results in lower tensile strength and stiffness than fresh fibers. This limits the usage of rCF in primary load-bearing structures like wings or fuselage sections, even though it might be appropriate for non-critical components (Salas et al., 2023).

Another major challenge is certification. Before new materials may be employed, especially in structural applications, aviation authorities demand thorough testing and certification. This process is complicated by the variability of recovered carbon fiber, which increases the time and expense of certification. Because of this, despite rCF's advantages for the environment, manufacturers would be reluctant to implement it widely (Engineering for Change, 2023).

Furthermore, it is still difficult to scale up recycling methods. The widespread application of advanced techniques like pyrolysis and chemical recycling is limited by their high cost and need for specialized infrastructure. It is logistically challenging to collect and handle composite waste effectively, particularly when dealing with end-of-life aircraft (N.A., 2025a).

All things considered, recycled carbon fiber has many benefits, but before it can be completely incorporated into mainstream aviation manufacture, these technological, legal, and financial issues must be resolved.

2.6. Future outlook

Future developments in materials science and recycling technology will have a significant impact on the use of recycled carbon fiber (rCF) in aviation. A lot of research is being done to improve the consistency and quality of recycled fibers as demand for sustainable alternatives rises. Fibers with qualities substantially closer to those of fresh carbon fiber may be recovered through new and more regulated recycling techniques, especially in chemical processing, which could increase their variety of uses.

However, innovation is not just about recycling. Future aviation materials may be easier to reuse from the start thanks to the development of more recyclable composite systems, such as thermoplastic-based composites (Ensinger, 2025b). Aircraft design could be greatly modified by this move, allowing for a more circular lifecycle in which materials are continuously recovered and reused in manufacturing.

The aviation sector is also becoming more interested in incorporating recycled materials into more comprehensive sustainability plans. rCF is expected to contribute to lowering

lifecycle emissions and material waste as manufacturers commit to long-term environmental goals and regulatory pressure grows. Improvements in certification procedures and material standardization may eventually lead to more demanding applications, even though their employment in fundamental structures may still be a longer-term objective (Raihan, 2025).

In general, it is anticipated that recycled carbon fiber will play a bigger role in sustainable aircraft. Even if it isn't a perfect substitute for virgin materials, further advancements in technology and industry acceptance could enable it to drastically lessen the environmental impact of aircraft in the future.

2.7. Conclusion

Because recycled carbon fiber reduces material waste and the environmental impact of composite production, it is a hopeful step toward more sustainable flying. It offers definite advantages for non-essential components and promotes the growth of a circular economy within the sector, even though it cannot yet completely replace virgin carbon fiber, especially in crucial structural applications. Its capacity to achieve stringent aviation certification requirements, more consistency in material quality, and ongoing technical advancements will determine its future role.

3. BIO-BASED RESIN

3.1. The need for changes

In the current world composites are being used everywhere through their wide abilities. They are very strong, corrosion resistant, mostly lightweight and can be shaped into nearly any form. These properties make them more than useful in many fields, from products of everyday use to the aeronautics and aerospace industry. Although them being so useful, there is a major problem, they are mostly made out of the petroleum products. That leads to not only not being able to recycle them after their lifespan ends but also some may be dangerous for direct use for humans causing different health problems like allergic reactions, dermatitis or respiratory problems (ESA. 2024).

3.2. What has been changed

The solution appeared in the form of switching from using petroleum as a base material to the bio-based ingredients. Bio-based resins are derived from different kinds of renewable biological sources, for example plans, algae or other organic materials. The difference in sourcing not only decreases the greenhouse gas emissions but also reduces dependency on fossil fuels. Beyond reducing emissions, the transition to bio-based resins introduces circularity into the aerospace lifecycle. By utilizing vitrimer chemistry, these resins allow previously unrecyclable composite parts to be repaired or disposed at the end of their service life, solving the industry’s growing waste challenge while providing a more stable, locally sourced supply chain (Research and

Innovation EU. 2018).

3.3. Impact

Bio-based resins contribute to environmental sustainability primarily through the reduction of greenhouse gas emission and the preservation of non-renewable resources. It all shows in lower use of energy and water in comparison to the production process of the fossil fuel extraction and processing. Important part for the resins that are in a direct use for humans is that it shows reduced toxicity which leads to smaller chances of allergic reactions or dermatitis appearing. On the other hand, bio-based materials are also beneficial to the biodiversity and ecosystems through preserving forests and natural habitats (UBQ Editorial Team, 2025).

By integrating the bio-resins, the aviation sector can lower the total lifecycle impact of aircraft structures while maintaining the high-performance characteristics needed for flight. This shift offers a path to decoupling aircraft production from petrochemical sources. By utilizing building blocks derived from plant oils, starches, lignin and cardanol, manufacturers can produce environmentally friendly, low-cost curable epoxies for both primary and secondary structures. These natural raw materials can easily be epoxidized to meet the rigorous standards required for aerospace sandwiches and composites, offering a direct replacement for traditional glass-fiber and epoxy systems (Toto, E., Tortorici, D., Garofolo, R., Laurenzi, S., & Santonicola, M. G., 2026).

3.4. Limitations

One of the biggest problems faced by the bio-based resins are costs of productions that reach up to 50% more than the petroleum-based products. It is expected for the prices to slowly decrease with the improvement of technologies and source materials is becoming cheaper to produce but currently the manufacturers are not able to last with the current costs of production. Aviation is a risk-averse industry. Even if a bio-resin performs perfectly in a lab, it requires years of expensive building block testing and flight-cycle simulations to receive certification from bodies like the FAA or EASA. This long lead time makes it difficult for smaller, innovative bio-resin manufacturers to survive before their product is actually cleared for use. Another problem might appear as bio-based materials often have a higher affinity for water. In the extreme environments of aviation, moving from humid runways to freezing high altitudes, this can lead to hydrothermal degradation, where the resin swells or loses its bond with the fhydrothermal degradation, where the resin swells or loses its bond with the fibers, compromising structural integrity (Bachmann J., Hidalgo, C., & Bricout, S., 2017).

3.5. Future outlook

Composites based on 100% bio resins can definitely boost sustainability and the team has explored reuse possibilities and recycling solutions to achieve the so-called '3 Rs' – reuse, recycle and repair. Asia-Pacific dominates the bio-based resin market owing to increasing demand from end use industries such as packaging, construction and others. (The European Space Agency, 24.06.2024)

Key Takeaways (Bio-based Resins Market – Forecast (2026 - 2032) (2020))

- The growing demand for bio-based resin for stable timber construction, is likely to aid in the market growth of bio-based resin.
- The emergence of bio-based resin as an alternative for petroleum-derived polymers is expected to drive the market for bio-based resin in the upcoming years.
- Higher cost of biobased resin will create hurdles for the bio-based resin in the near future.

3.6. Conclusion

The transition to bio-based resins is still in the making for aviation and aerospace industry in order to fully switch from made out of petroleum products to bio components. While these materials offer significant environmental benefits, including a drastically reduced carbon footprint and lower human toxicity, they also have more technical capabilities like ability to being repaired or recycled through advanced vitrimer chemistry. However, significant economic and technical hurdles remain, specifically regarding high production costs, moisture sensitivity in extreme flight conditions, and the rigorous, multi-year certification processes required for safety. Despite these challenges, the emergence of 100% bio-based systems as well as the drive towards the "3 Rs" (Reuse, Recycle, Repair) lead to more circular and resilient manufacturing future. Ultimately, as technology scales and supply chains stabilize, bio-based resins are getting ready to transform from being an alternative into the foundation of sustainable high-performance aerospace structures.

4. Engine Innovations

4.1. Introduction

In 2019 alone, CO2 emissions stemming from civil aviation equated to over 900 million metric tons. This amount is equal to 10% of all transportation emissions. Additionally, humanities, rapid population expansion indicates a significant surge in air traffic in the coming decades. It is expected to increase about four to six-fold (Klimek et al., 2026).

This section of the article will cover the most relevant ecologically viable aircraft propulsion technologies. The aviation industry is currently focused on four main paths to achieving that.

4.2. Sustainable Aviation Fuel (SAF)

SAF appears to be the most realistically applicable option of reducing emissions at a large scale by far, compared to other methods, such as hydrogen fuelled aircraft or hybrid-electric propulsion.

It is a fuel synthesized from waste and residue from a renewable source, which can potentially lead to a carbon emission reduction of up to 80%, in contrast with conventional fossil fuels like kerosene depending on the feedstock (Airbus, 2024).

Currently the most common method is blending the two, which slightly reduces greenhouse gas production. The most popular feedstocks include but are not limited to algae, municipal waste, waste cooking oils, agricultural residues and hydrogen paired with captured carbon dioxide (Airbus, 2024).

Although fully switching over to SAF in worldwide aviation is not possible as of today, it is realistic in the near future. Utilizing a blend of up to 50% SAF and kerosene, is fully applicable in existing engines, not requiring any changes in structure, which means it can theoretically be utilized today (Airbus, 2024).

The biggest challenge SAF is currently facing is limited testing capabilities. The inability to perform large-scale tests of the mentioned fuel blends, due to high-cost requirements, causes a high risk of the fuel unexpectedly performing differently in high-volume applications.

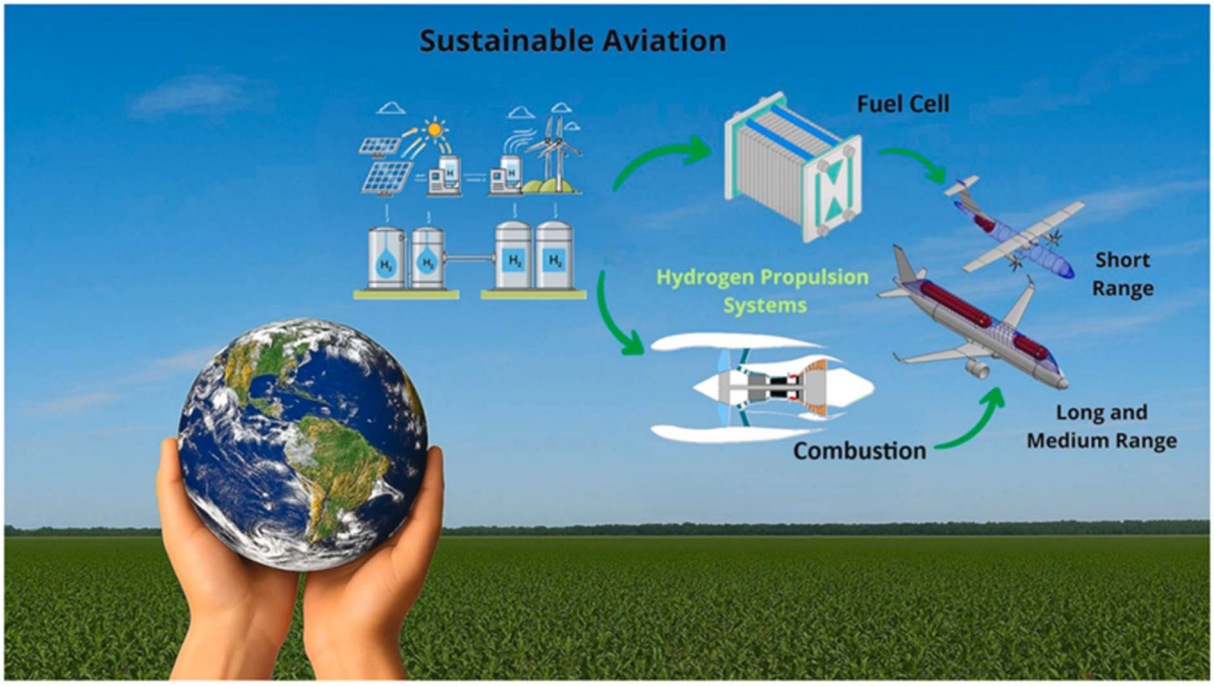
The large range of different potential sources of fuel in SAF means a very large number of possible chemical compositions, testing which would be very time consuming and expensive. Jet fuels must perform at high altitudes, while withstanding rapid and extreme temperature shifts and high pressure. The most crucial physiochemical variables looked at in jet fuel are density, freezing point, flash point, viscosity, thermal characteristics and combustion behaviour. Several property predicting models were developed in recent years in order to evade the time-consuming and costly traditional testing methods. That includes liquid-phase Fourier Transform Infrared (FTIR), which shows the most promising results. FTIR spectroscopy measures how infrared light is absorbed by different liquids in order to check their molecular composition. The data is then fed to an AI machine learning model, which analyses the IR absorption data and accurately predicts the critical fuel properties. This provides an opportunity for unprecedented acceleration of research progress for SAF (Comesana et al., 2024).

Another SAF synthesising method is power-to-liquid fuels or e-SAF. It involves capturing carbon dioxide directly from the atmosphere or industrial emissions and converting it into methane using green hydrogen (Haugen, et al., 2026).

4.3. Hydrogen propulsion systems

Hydrogen propulsion has emerged in recent years as a very promising way to drastically limit carbon emissions. Theoretically hydrogen releases zero carbon dioxide in its typical combustion process, which means carbon emission could potentially be limited to zero over the years. In general hydrogen propulsion systems can be divided into two separate categories, being hydrogen combustion engines and hydrogen fuel-cell systems (Bruno et al., 2025).

In hydrogen combustion systems, hydrogen is burnt directly instead of traditional jet fuels, which completely halts carbon dioxide production (Fig. 1), at the cost of releasing nitrogen oxides, which can bring significant harm to the environment (Bruno et al., 2025).



[Figure 1. Graphical Abstract of hydrogen propulsion (Bruno et al., 2025).

Hydrogen fuel cell systems are another option. The key idea is converting hydrogen into electricity through electrochemical reactions inside, with an efficiency of up to 60%. The electricity is then used to power propellers through electric motors. The main advantages of fuel cells over direct hydrogen combustion are higher energy efficiency and significantly lower noise pollution; however, it remains largely inapplicable in large aircraft in the current state of development, due to low power density (Bruno et al., 2025).

Hydrogen contains three times the amount of energy per kg compared to standard jet fuel, however the biggest challenge it faces is very low volumetric density. To tackle this issue, different approaches can be used. To limit the volume of the fuel, it either must be compressed at very high pressures or transformed into liquid form through cooling, to a temperature of approximately −253° C (Bruno et al., 2025).

Consistenly storing hydrogen fuel in temperatures this low on an aircraft is very demanding and would require a significant overhaul of current aircraft structures, in order to facilitate the criteria required to keep it cool. Moreover, major airport infrastructure changes would need to take place, to allow proper storage. New accommodations such as liquefaction facilities, storage systems, transportation networks, and specialized equipment must be built to allow for such a change.

With what it has to offer, utilizing hydrogen fuel, may point to drastic changes in the aviation industry, including, but not limited to completely new aircraft models, accommodated to hydrogen fuel conservation and transportation, e.g. blended-wing-body.



Figure 2. (U.S. Air Force graphic, 2023)

4.4. Hybrid-electric aircraft

Hybrid-electric propulsion technology is now a key step towards reducing carbon emissions in commercial aviation. This idea mixes traditional gas turbines and electric motors and advanced energy storage systems which include high-performance batteries. Such a solution lets us greatly improve fuel use during energy-intensive flight phases like takeoff and initial climb. This leads to a clear drop in greenhouse gas emissions and a cut in noise levels around airports. But bigger passenger aircraft face major technological limits due to the weight and energy density of today's batteries. Thus, it is expected that the first commercial use of hybrid systems will mainly focus on regional and short-haul flights. A diagram of a sample architecture of this propulsion system is shown in the figure included in the text (Figure 3) [47].

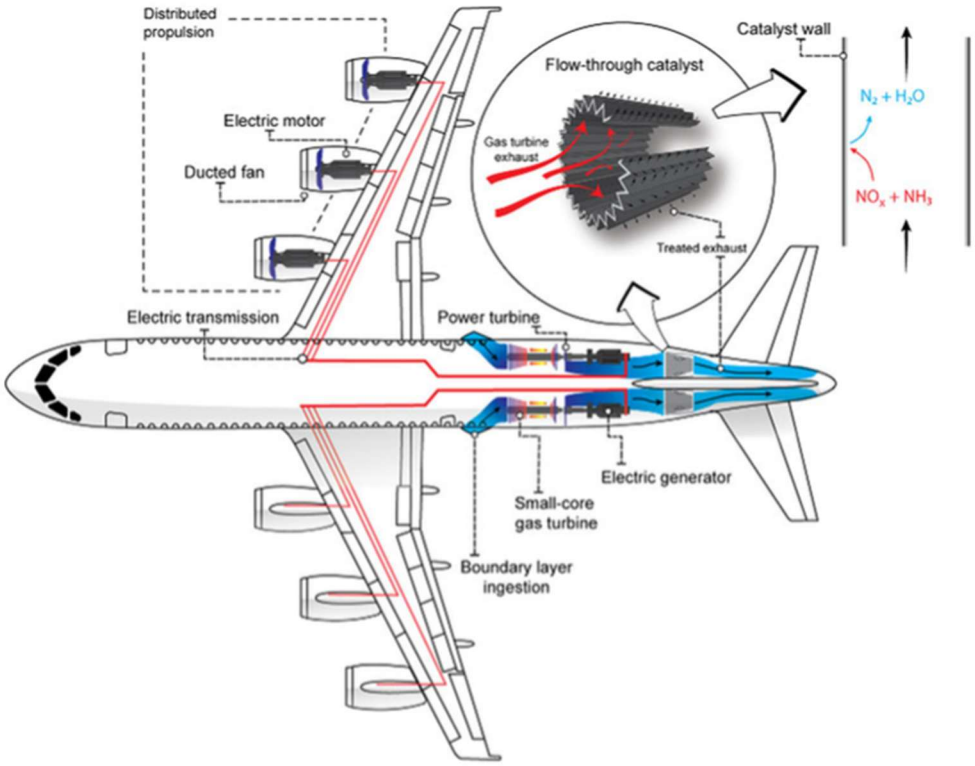


Figure 3. Schematic of a hybrid-electric propulsion architecture in a regional aircraft (Chu, 2021)

4.5. Ultra-efficient next-generation engines (Open Fan / geared architectures)

Along with creating completely new propulsion systems, aerospace engineers keep focusing on greatly boosting the efficiency of regular jet engines. One exciting path in this field is the Open Fan design. This idea is now being developed in programs like CFM RISE. It removes the traditional fan casing or nacelle. This change lets the blade diameter increase significantly. As a result, there's a big improvement in the engine's bypass ratio. Industry estimates say Open Fan technology can cut fuel use and CO2 emissions by up to 20 percent compared to the best units in use now.

Another key solution for next-generation engines is geared turbofan designs. A special reduction gearbox connects the fan and the low-pressure turbine. This setup lets each of these main parts work at their best, independent speeds. The concept below (Figure 4) shows this

clearly [9].

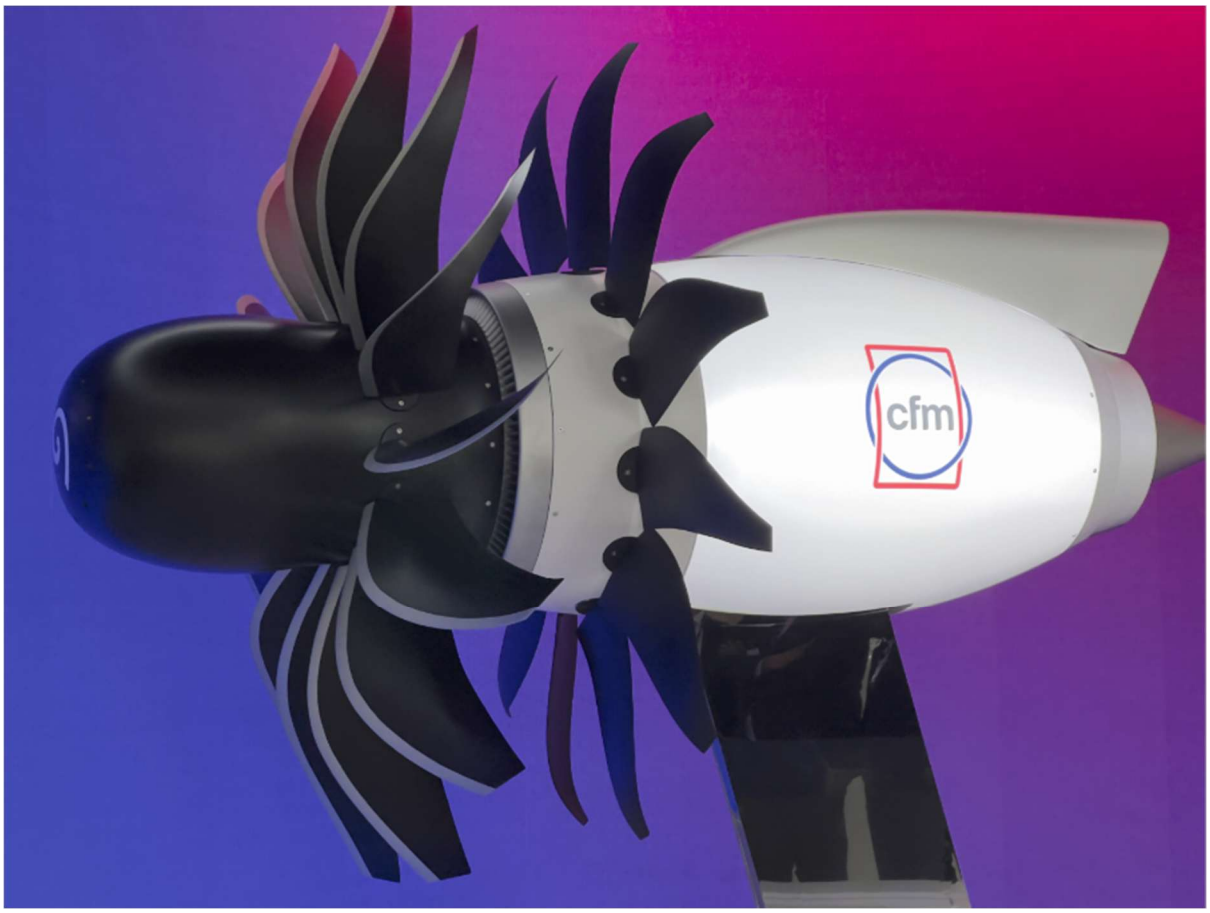


Figure 3. Schematic of a hybrid-electric propulsion architecture in a regional aircraft (Chu, 2021)

4.6. Conclusion

Though mostly unavailable as of today, due to the scarcity of the required materials, significant time and cost limitations and the need to redefine aviation, modern engine solutions point to a practically emission-free and significantly more energy efficient future. If applied, the concepts presented above will be the main catalysts for limiting the negative effect on environment the aviation industry continues to have.

5. Redefining Flight: An Engineering Analysis of 2026 Eco-Innovations Through the Breguet Range Equation

5.1. Introduction

Welcome to the most exciting era in aerospace engineering since the dawn of the jet age. The industry is currently under immense global pressure to decarbonize, and the solutions require a deep understanding of core principles. To truly grasp the impact of the eco-innovations emerging in 2026, we must look beyond the marketing terminology of "green aviation" and analyze them through the lens of fundamental physics.
The most effective framework for this analysis is the Breguet Range Equation for jet-propelled aircraft. This single equation dictates the physical limits of flight and serves as the ultimate scorecard for any new aerospace technology:

$$R = \frac{V}{x} \times \frac{L}{D} \times \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right)$$

Where:

- ***R*** represents the total range of the aircraft,
- ***V*** is the true airspeed,
- ***c*** is the Thrust Specific Fuel Consumption (TSFC), representing engine efficiency,
- ***L/D*** is the list to drag ratio, representing aerodynamic efficiency,
- W_i is the initial weight of the aircraft (gross weight),
- W_f is the final weight of the aircraft (zero fuel weight).

To maintain or improve range ***R*** while eliminating carbon emissions, engineers must systematically optimize each variable in this equation. The innovations of 2026 are not isolated experiments; they are targeted attacks on specific inefficiencies within the Breguet framework.

5.2. Targeting Specific Fuel Consumption (*c*): Revolutionary Propulsion

Reducing the Specific Fuel Consumption ***c*** means extracting more useful thrust from less energy. In 2026, two radically different propulsion philosophies are leading this charge: one focusing on extreme propulsive efficiency, and the other on a complete chemical transition.

5.2.1. The CFM RISE Program & Open Fan Architecture

For decades, the pursuit of lower ***c*** has driven the increase of turbofan bypass ratios. However, we have reached a physical limit: cowlings (nacelles) large enough to house these massive fans create unacceptable weight and drag penalties. The solution is the Open Fan architecture, the centrepiece of the CFM RISE program.

In March 2026, the European Union's "TAKE OFF" project officially kicked off with €100 million in funding to prepare this architecture for flight demonstration by 2029. By completely removing the nacelle, the Open Fan design allows for a massive fan diameter without the associated weight and drag penalties of a cowling. This geometry drastically increases the bypass ratio, directly translating to a projected 20% reduction in fuel consumption and CO2 emissions compared to today's most efficient engines.
The engineering challenge here is immense. Without a cowling to contain noise or manage airflow, engineers rely on supercomputing and advanced aerodynamics to manage supersonic fan blade tip speeds and ensure the noise signature meets strict future regulations, all while maintaining cruise speeds of Mach 0.8.

5.2.2. Airbus ZEROe and Hydrogen Fuel Cells

While RISE optimizes the mechanical delivery of thrust, the Airbus ZEROe program changes the energy source entirely. By 2025, Airbus confirmed a massive pivot: they selected hydrogen fuel cell technology over direct hydrogen combustion for their first zero-emission commercial aircraft.

Instead of burning hydrogen in a turbine, the aircraft uses fuel cells to convert cryogenic liquid hydrogen (stored at -253°C) into electricity through a chemical reaction, which then drives electric propellers. The Aerostack joint venture successfully powered on a 1.2 megawatt fuel cell demonstrator, proving that aerospace-grade power densities are achievable.

5.2.3. The Engineering Trade-off

This introduces complex trade-offs for the Breguet equation. Hydrogen has a phenomenal specific energy (energy per unit mass), which heavily benefits the weight fraction W_i / W_f. However, its low volumetric energy density requires cryogenic tanks that are roughly four times larger than standard Jet-A1 tanks. This increased wetted area negatively impacts the ***L/D*** ratio due to increased drag, making tank integration the primary engineering hurdle.

5.3. Targeting Aerodynamic Efficiency (*L/D*): Novel Airframes

The traditional "tube-and-wing" configuration has been refined to its absolute limits. To achieve the massive leaps in the Lift-to-Drag ratio ***L/D*** required to offset the drag penalties of new fuel systems or heavy batteries, we must radically alter the airframe.

5.3.1. NASA's N3-X Hybrid Wing Body (HWB)

The NASA N3-X concept represents the pinnacle of aerodynamic redesign. By blending the fuselage and the wing into a continuous, lifting airfoil shape, the HWB generates lift across its entire span while eliminating the interference drag typically found at the wing root of a conventional aircraft.

Beyond pure aerodynamics, the N3-X leverages Turboelectric Distributed Propulsion (TeDP). It utilizes superconducting electric motors to drive a distributed array of fans across the upper trailing edge of the aircraft. This specific placement is not just for noise reduction; it intentionally ingests the boundary layer (the slower-moving air near the surface of the airframe). Boundary Layer Ingestion (BLI) effectively reduces wake drag and can improve the lift-to-drag ratio by a factor of 1.7 to 2.6, resulting in immense power savings. The internal volume of the HWB is also perfectly suited to housing the large cryogenic tanks required for the liquid hydrogen generators located at the wingtips.

5.4. Targeting the Weight Fraction (W_i / W_f)

5.4.1. Advanced Materials and Circularity

Any reduction in the empty weight of an aircraft improves the weight fraction W_i / W_f, meaning less lift (and therefore less thrust and fuel) is required to carry the same payload. In 2026, the focus has shifted from simply making materials lighter to making their entire lifecycle sustainable.

5.4.2. Thermoplastics in the MFFD

The European Clean Sky 2 project recently concluded its work on the Multifunctional Fuselage Demonstrator (MFFD), an eight-meter-long fuselage barrel made entirely of Carbon Fibre-Reinforced Thermoplastic Polymer (CFRTP) composites.

Unlike traditional thermoset composites (which cure permanently and are notoriously difficult to recycle), thermoplastics can be repeatedly melted and reshaped at high temperatures. This allows for automated ultrasonic and laser spot-welding of large fuselage modules, eliminating the need for thousands of heavy metallic rivets and fasteners. The MFFD project proved that this approach yields a structural weight saving of over 10%. Crucially, when the aircraft reaches the end of its life, these thermoplastic panels can be shredded, melted, and repurposed, introducing a vital circular economy to aerospace manufacturing.

5.4.3. Biomass Carbon Fibers and Bio-Resins

The raw materials for composites are also evolving. At major industry events like JEC World 2026, aerospace suppliers like Hexcel have unveiled commercial-grade prepregs that incorporate up to 15% bio-based carbon content. By replacing petroleum-based precursors with resins derived from biomass and utilizing recycled carbon fiber (rCF), engineers can achieve the extreme tensile strength and stiffness required for flight while drastically cutting the carbon footprint of the manufacturing process itself.

5.5. The Fuel Transition: Sustainable Aviation Fuels (SAF)

While revolutionary hardware takes decades to certify and deploy, the existing global fleet must be decarbonized today. This is the domain of chemical engineering and regulatory frameworks.

5.5.1. The 2026 SAF Mandates

By 2026, Sustainable Aviation Fuel has transitioned from a niche experiment to a strictly enforced legal requirement. For instance, the UK's SAF Mandate, which became legally

effective in 2025, requires obligated suppliers to hit specific SAF blending targets throughout the 2026 obligation period.

These regulations focus heavily on "drop-in" fuels-synthesized kerosene that chemically mimics fossil-based Jet-A1. Drop-in SAF requires absolutely zero modifications to existing engine combustion chambers or fuel delivery systems. The mandates carefully distinguish between pathways, placing caps on crop-derived biofuels (HEFA) and heavily incentivizing advanced Power-to-Liquid (PtL) synthetic fuels. These PtL fuels are created by combining captured CO2 with green hydrogen via the Fischer-Tropsch process, creating a closed-loop carbon cycle.

5.6. Targeting Operational Efficiency: AI and 4D Flight Optimization

Finally, solving the Breguet equation isn't exclusively about bending metal or mixing chemicals; it is increasingly about optimizing how the machine is flown in the real world.

5.6.1. Machine Learning in Flight Profiles

In 2026, data science is generating massive efficiency gains. Take, for example, the implementation of SITA OptiFlight by Italy's national airline, ITA Airways. Rolled out fleet-wide, this AI-driven system calculates the absolute most efficient climb profile for every single flight.

Instead of relying on standard pilot handbook climb rates, the machine learning models analyze 4D weather data, precise real-time aircraft weight, and tail-specific multidimensional modeling. It adjusts speed, acceleration, and climb Mach dynamically. By flying the mathematically perfect path, ITA Airways is on track to save over 7,100 tons of fuel and reduce CO2 emissions by more than 22,100 tons between 2025 and 2026 alone.

5.7. Conclusion

As a future aerospace engineer, you will not be designing in a vacuum. You will be balancing the aerodynamic benefits of Boundary Layer Ingestion against the thermodynamic realities of hydrogen fuel cells, all while working within strict material lifecycle constraints. The innovations of 2026—from Open Fan architectures to AI flight optimization—prove that sustainability in aviation is not achieved through a single magic bullet. Instead, it is the result of rigorous, multidisciplinary engineering applied systematically to every single variable of the Breguet Range Equation.

Bibliography:

1. Airbus. (2023). *ZEROe: Towards the world's first zero-emission commercial aircraft*. Airbus S.A.S. Retrieved from Airbus ZEROe
2. Airbus. (n.d.). *Safe operations with composite aircraft*. Retrieved from Airbus Safety First – Composite Aircraft
3. Airbus. (n.d.). *What is sustainable aviation fuel?* Retrieved from Airbus Sustainable Aviation Fuel
4. Bachmann J., Hidalgo, C., & Bricout, S. (2017). *Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review*.
5. Bentley, S. (2024). *Introduction to Composite Materials and their application and use in Aircraft and Unmanned Aerial Systems (UAS)*. SASSofia. Retrieved from SASSofia – Composite Materials in Aircraft and UAS
6. Bierer, M., & Kallo, J. (2026). *Optimising fuel cell systems for aviation*. In *Fuel Cell Systems: Design, Control, and Applications*. IntechOpen. IntechOpen DOI
7. Boeing. (2024). *Innovation Quarterly Q3 2024*. Retrieved from Boeing Innovation Quarterly 2024
8. Borjan, D., Knez, Ž., & Knez, M. (2021). *Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Composites—Difficulties and Future Perspectives*. *Materials*, 14(15), 4191. MDPI Materials DOI
9. CFM International. (2021). *The CFM RISE Program: Revolutionary Innovation for Sustainable Engines*. Retrieved from CFM RISE Program
10. Chapman, Jeffryes W., et al. "Towards Multimodal Robot Design for Wind Turbine Inspections | AIAA SciTech Forum." *AIAA SciTech Forum*, 2025, arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2025-0843, https://doi.org/10.2514/MSCITECH25;csubtype:string:Conference. Accessed 5 Jan. 2025.
11. Comesana, Ana E, et al. "A Structured Framework for Predicting Sustainable Aviation Fuel Properties Using Liquid-Phase FTIR and Machine Learning." ArXiv.org, 2024, arxiv.org/abs/2408.01530.
12. Deden, J., et al. (2024). *Closing the quality gap of thermoplastic AFP: Insights from the production of the Multifunctional Fuselage Demonstrators upper shell*. German Aerospace Center (DLR). Retrieved from DLR eLib Publication
13. Engineering For Change. (2023). *Global Recycling Standard Certification for Recycled Carbon Fiber and Composite Recycling Database*. Retrieved from Engineering For Change – Recycled Carbon Fiber Database
14. Ensinger. (2025). *Thermoplastic Composites*. Retrieved from Ensinger Thermoplastic Composites

15. ESA. (2024). *Boosting sustainability with biobased resins composites for space applications*. Retrieved from ESA – Biobased Resin Composites
16. Eureka (2022). *Carbon Fiber Recycling for Sustainable Aviation Materials*. [online] PatSnap Eureka. Retrieved from: https://eureka.patsnap.com/report-carbon-fiber-recycling-for-sustainable-aviation-materials
17. Felder, J. L., Kim, H. D., & Brown, G. V. (2011). *Turboelectric distributed propulsion in a hybrid-wing-body aircraft*. NASA/TM—2011-217203. Retrieved from NASA Hybrid Wing Body Aircraft PDF
18. Gardiner, G. (2014). *Recycled carbon fiber: Comparing cost and properties*. *CompositesWorld*. Retrieved from CompositesWorld – Recycled Carbon Fiber
19. Haugen, N. E. L., Brandenburg, A., Karchniwy, E., Meyer, O. H. H., Ervik, Å., Fyhn, H., Samaei, L., & Bringedal, B. (2026). *High-resolution numerical simulations of turbulent non-catalytic reverse water gas shift*. *arXiv preprint arXiv:2602.08365 [physics.flu-dyn]*. Retrieved from arXiv – High-resolution numerical simulations of turbulent non-catalytic reverse water gas shift
20. IMPACT MATERIALS. (2024). *Manufacturing and advantages and disadvantages of carbon fiber composites*. Retrieved from Impact Materials – Carbon Fiber Composites
21. IndustryARC (2020) Bio-based Resins Market - Forecast(2026 - 2032). Retrived from Bio-based Resins Market
22. ITA Airways. (2024). *Sustainability Report 2023: Fuel efficiency and CO2 reduction via AI optimization*.
23. Klimek, A., Plate, C., Sager, S., Sundmacher, K., & Ganzer, C. (2025). *Superstructure Optimization with Embedded Neural Networks for Sustainable Aviation Fuel Production*. *arXiv preprint arXiv:2509.09796 [cs.CE]*. Retrieved from arXiv – Superstructure Optimization with Embedded Neural Networks for Sustainable Aviation Fuel Production
24. Leitão, A. B. V., Bringhenti, C., Tomita, J. T., Silva, F. J. dos S., Xisto, C., & Grönstedt, T. (2025). *A review of hydrogen aircraft propulsion systems: recent advances and environmental perspectives*. *International Journal of Hydrogen Energy*. Retrieved from ScienceDirect – Hydrogen Aircraft Propulsion Review
25. Mamat, R., Rashid, M. I. M., Syahir, A. Z., Yusop, A. F., & Tamimi, A. (2025). *Carbon fibre for applications in aerospace: A review*. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 12, 100227. ScienceDirect DOI
26. Mittal, P., & Kumar, R. (2026). *Hydrogen propulsion technologies for aviation: A review of fuel cell and direct combustion systems towards decarbonising medium-haul aircraft*. *MDPI Aerospace*, 6(4). MDPI Aerospace DOI
27. N.A. (2025a). *Structural Uses of Recycled Carbon Fibre | Advanced Composites Engineering*. [online] Advanced Composites Engineering. Retrieved from: https://advcomp.co.uk/recycled-carbon-fibre-structural-performance/
28. Penta Pattern & Model. (2026). *What is Recycled Carbon Fibre?* Retrieved from Penta Patterns – Recycled Carbon Fibre
29. Raihan, A. (2025). *Sustainable Aviation: A Critical Review of Policies, Technologies, and Future Pathways*. *Journal of the Air Transport Research Society*, 5, 100080. ScienceDirect DOI

30. Research and Innovation EU. (2018). *Bio-based materials for aircraft*. Retrieved from EU Research – Bio-based Materials for Aircraft
31. Salas, A., Berrio, M. E., Martel, S., Díaz-Gómez, A., Palacio, D. A., Tuninetti, V., Medina, C., & Meléndrez, M. F. (2023). *Towards recycling of waste carbon fiber: Strength, morphology and structural features of recovered carbon fibers*. *Waste Management*, 165, 59–69. ScienceDirect DOI
32. Sántha, P., Tamás-Bényei, P., & Toldy, A. (2025). *Express Polymer Letters*. Retrieved from Express Polymer Letters Article
33. ScienceDirect. (2024). *Carbon-fiber reinforced composite research article*. Retrieved from ScienceDirect Composite Article
34. ScienceDirect. (2022). Giurgiutiu Victor, *Boeing 787 Dreamliner*. Retrieved from ScienceDirect – Boeing 787 Dreamliner
35. Simple Flying. (2026). Johnson Jacob, *How the Boeing 787 Dreamliner stays fuel efficient*. Retrieved from Simple Flying – Boeing 787 Fuel Efficiency
36. Sustainable Aviation. (2024). *Net Zero Carbon Road-Map – Technical Report*. Retrieved from Sustainable Aviation UK Roadmap
37. T&E. (2024). *Airplane pollution*. Retrieved from Transport & Environment – Airplane Pollution
38. Toto, E., Tortorici, D., Garofolo, R., Laurenzi, S., & Santonicola, M. G. (2026). *Advancing Sustainable Composites: Processing and Properties of Bio-Based Epoxy Resin Reinforced With Flax Fibers*.
39. TU Delft Research Portal. (2025). *Robotic sequential ultrasonic welding of thermoplastic composites: From coupons to a full-scale fuselage demonstrator*. Delft University of Technology. Retrieved from TU Delft – Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites
40. UBQ Editorial Team. (2025). *Bio-Based Materials: The Future of Sustainable Innovation*. Retrieved from UBQ Materials – Bio-Based Materials
41. Wasson, S. (2024). *Recycling Carbon Fiber: Importance & Process*. *In The Loupe*. Retrieved from Harvey Performance – Recycling Carbon Fiber
42. Wikipedia. (n.d.). *Airbus A350*. Retrieved from Wikipedia – Airbus A350
43. Wikipedia. (2024). *Carbon-fiber reinforced polymer*. Retrieved from Wikipedia – Carbon-fiber Reinforced Polymer
44. Worrall, M. (2019). *Carbon Fibre, the Environment and the Future of Recycling*. Retrieved from AMS Composite Cylinders – Carbon Fibre Recycling
45. Xu, Xiangyu, (2024). *Material Performance, Manufacturing Methods, and Engineering Applications in Aviation of Carbon Fiber Reinforced Polymers: A Comprehensive Review.* pp. 112899–112899, https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112899
46. Yousefi-Asli, S., et al. (2021). *Economic viability assessment of NASA's Blended Wing Body N3-X aircraft*. Cranfield University. Retrieved from Cranfield University – Blended Wing Body N3-X
47. Zhang, J., et al. (2022). Sustainable Aviation Electrification: A Comprehensive Review of Electric Propulsion System Architectures, Energy Management, and Control. Retrieved from https://doi.org/10.3390/su14105880

48. Zhang, Y., et al. (2026). *Carbon fiber-reinforced polymer matrix composites: Processing, properties, and applications*. *MDPI Materials*, 14(3), 29. MDPI Materials DOI

SPEDYCJA JAKO ELEMENT ORGANIZACJI MIĘDZYNARODOWEGO TRANSPORTU TOWARÓW

Wiktoria STOCHEL[1], Daniel PĄPKA[2], Jakub OCIEPA[3], Martyna BUCZMA[4], Martyna ŚLIWA[5], Mateusz ZIOMEK[6], Maxymilian MIDOR[7], Miłosz MALCHER[8], Nikodem ARABAS[9], Tomek SYREK[10], Magdalena TRACZ-KACZMARZYK[11], Dawid WIDERA[12], Mateusz RACHWAŁ[13], Patrycja LASOTA[14], Tomasz WĘGRZYN[15*]

[1] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; ws315477@student.polsl.pl

[2] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; dp315475@student.polsl.pl

[3] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; jo315482@student.polsl.pl

[4] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; mb315476@student.polsl.pl

[5] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; ms315499@student.polsl.pl

[6] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; mz315464@student.polsl.pl

[7] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; mm315498@student.polsl.pl

[8] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; mm315468@student.polsl.pl

[9] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; na315215@student.polsl.pl

[10] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; ts315284@student.polsl.pl

[11] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; mt278120@student.polsl.pl

[12] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; dw315222@student.polsl.pl

[13] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej; student, identyfikator ORCID – brak; mr315262@student.polsl.pl

[14] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej; student, ORCID – 0009-0005-8536-5539; pl315065@student.polsl.pl

[15] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail: tomasz.węgrzyn@polsl.pl; identyfikator ORCID - 0000-0003-2296-1032
* Korespondencja: tomasz.wegrzyn@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia znaczenie spedycji w międzynarodowym łańcuchu dostaw oraz role spedytora w organizacji przewozu towarów. Omówiono podstawowe zagadnienia transportowe. Przedstawiono także znaczenie nowoczesnych technologii i główne problemy występujące w spedycji między narodowej

Słowa kluczowe: spedycja, logistyka, transport międzynarodowy, spedytor

FORWARDING AS AN ELEMENT OF ORGANIZING INTERNATIONAL GOODS TRANSPORT

Abstract: This article examines the importance of freight forwarding in the international supply chain and the role of the freight forwarder in organizing freight transport. It discusses basic transportation issues. It also highlights the importance of modern technologies and the main challenges faced by international freight forwarding.

Keywords: forwarding, logistics, international transport, forwarder

1. Wprowadzenie

Spedycja stanowi kluczowy element współczesnego miedzy narodowego handlu, zapewniając skuteczny przepływ towarów między producentami a odbiorcami na całym świecie. Poprawnie zorganizowane procesy spedycyjne umożliwiają terminowy i bezpieczny transport jednocześnie minimalizując ryzyko strat ekonomicznych oraz opóźnień w dostawach. W dobie globalizacji, rosnącej wymiany handlowej i skracania czasu realizacji zamówień, sprawnie funkcjonująca spedycja staje się jednym z najważniejszych czynników konkurencyjności przedsiębiorstw. W niniejszej pracy omówione główne zadania spedytora, znaczenie różnych środków transportu, role nowoczesnych technologii w logistyce oraz wyzwania i problemy występujące w miedzynarodowej spedycji. Analizie poddano również funkcjonowanie centrów logistycznych i magazynów, które wspierają przepływ towarów w ramach globalnego łańcucha dostaw. Celem artykułu jest przedstawienie, w jaki sposób efektywnie funkcjonujący system spedycyjny wpływa na sprawność całego łańcucha dostaw oraz wspiera rozwój gospodarczy na poziomie krajowym i miedzynarodowym.

2. Spedycja

2.1. Definicja Spedycji

Spedycja jest organizowaniem przewozu ładunków i wykonywanie wszystkich lub niektórych związanych z tym czynnościami. Inna z definicji spedycji określa ją "jako zorganizowanie przemieszczenia ładunków przy zastosowaniu odpowiednio dobranych środków transportowych i sposobu przewozu, w wyniku czego następuje przesłanie ładunku od nadawcy do odbiorcy"[1,3]. Spedycja może być wykonywana przez różne podmioty i obejmuje

transport drogowy, morski, lotniczy oraz kolejowy. Do głównych zadań spedycji należy zarządzanie procesami transportowymi, zarządzanie zapasami, optymalizacja kosztów logistycznych oraz świadczenie usług konsultingowych [1].

2.2. Kim jest i czym zajmuje się spedytor

Spedytor jest specjalistą potrafiącym organizować obsługę transportu, a także rozwiązywać problemy wynikające w trakcie procesu transportowego, jest odpowiedzialny za koordynację i organizację procesu transportowego. Spedytor również występuje jako doradca procesów transportowych obsługując różne gałęzie transportu, przy założeniu, że znajdzie optymalne rozwiązanie dla swojego klienta [2-3].

Do głównych zadań spedytora należy [2]:

a) dobór odpowiednich środków transportu,

b) określenie tras oraz opracowanie w czasie planu transportu,

c) dopilnowanie załadunku i rozładunku towarów,

d) koordynacja realizacji umów transportowych,

e) przygotowanie dokumentacji transportowej,

f) negocjowanie stawek u przewoźników,

g) ubezpieczanie transportowanych ładunków,

h) kontaktowanie się z klientem (zleceniodawcą) i przewoźnikiem.

2.3. Różnicę pomiędzy transportem a spedycja

Podstawowa różnica sprowadza się do charakteru wykonywanych czynności: transport oznacza fizyczne przemieszczanie dóbr, natomiast spedycja to kompleksowa organizacja tego procesu. Różnicę tę precyzyjnie rozgranicza Kodeks cywilny. Umowa przewozu (Tytuł XXV KC) zobowiązuje przewoźnika do fizycznego przemieszczenia ładunku z punktu A do punktu B przy użyciu własnego taboru. Z kolei umowa spedycji (Tytuł XXVI KC) definiuje spedytora jako głównego organizatora tego procesu[4]. Jak wskazują Ogólne Polskie Warunki Spedycyjne (OPWS 2022), obowiązki spedytora mają charakter organizacyjno-doradczy;[5]

2.4. Spedycja w międzynarodowym łańcuchu dostaw

We współczesnej, zglobalizowanej gospodarce spedytor pełni funkcję „architekta logistycznego", który spaja wszystkie ogniwa międzynarodowego łańcucha dostaw – od nadawcy, przez różnego rodzaju przewoźników i instytucje celne, aż po ostatecznego odbiorcę. Przewóz transgraniczny wymusza pokonywanie licznych barier administracyjnych i prawnych [3].

Rolą spedycji na arenie międzynarodowej jest optymalizacja czasu i kosztów dostawy. Spedytor osiąga to poprzez konsolidację ładunków oraz umiejętny dobór gałęzi transportu (często multimodalnego). Jego wartość dodana opiera się na wiedzy eksperckiej – obsłudze celnej, biegłej znajomości międzynarodowych reguł handlowych oraz zarządzaniu ryzykiem [3].

3. Międzynarodowy łańcuch dostaw (Supply Chain)

3.1. Definicja Łańcucha Dostaw

Łańcuch dostaw to sieć współpracujących ze sobą firm, ludzi i technologii. Ich wspólnym zadaniem jest stworzenie produktu i dostarczenie go ostatecznemu odbiorcy. W literaturze przedmiotu często odróżnia się to pojęcie od logistyki. Logistyka odpowiada za fizyczny ruch towarów i ich magazynowanie. Łańcuch dostaw ma szersze znaczenie. Obejmuje on cały cykl od wydobycia surowców aż po dostarczenie gotowego wyrobu do rąk klienta [6].

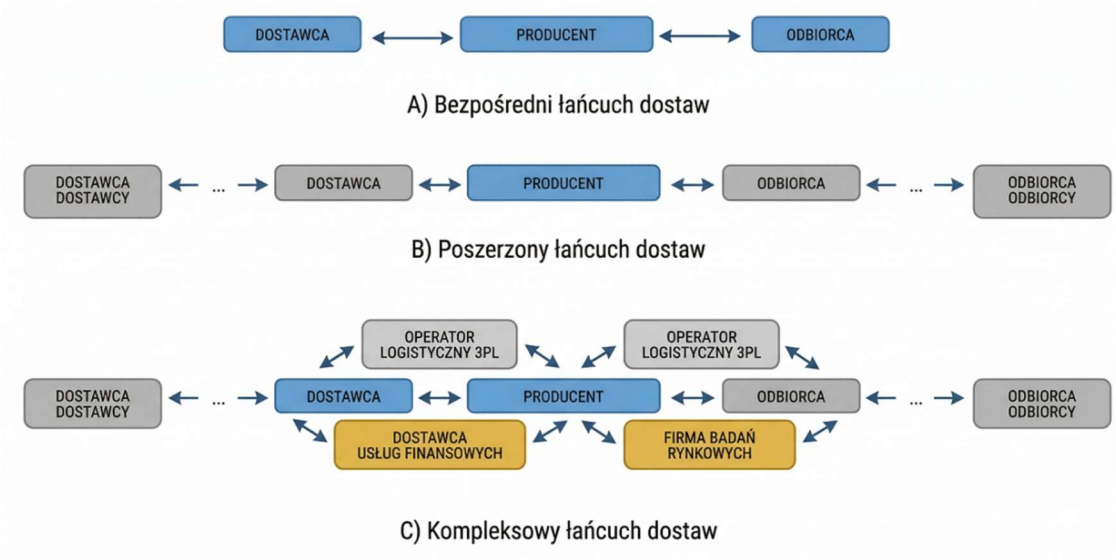
3.2. Znaczenie łańcucha dostaw w nowoczesnej gospodarce

Dziś coraz częściej mówi się, że na globalnym rynku nie konkurują ze sobą pojedyncze firmy, ale całe łańcuchy dostaw. To właśnie sprawny system dostaw może pomóc firmie zdobyć lepszą pozycję w branży i osiągnąć wyższe wyniki finansowe. Dobrze zorganizowany łańcuch dostaw przynosi wymierne korzyści. Po pierwsze, pozwala na obniżenie kosztów operacyjnych. Firmy wydają mniej na magazynowanie zapasów i unikają kosztownych przestojów na liniach produkcyjnych. Oszczędności można zainwestować w rozwój

technologii. Skuteczne zarządzanie przepływami to także gwarancja stałej dostępności produktów. Brak towaru na półkach frustruje konsumentów i prowadzi do natychmiastowej utraty zysków. Klient, który nie znajdzie poszukiwanego produktu, często sięga po ofertę konkurencji. Elastyczna sieć współpracowników zapewnia również większe bezpieczeństwo. Światowa gospodarka jest narażona na nagłe zmiany i przerwy w dostępie do surowców. Budowanie relacji z różnymi dostawcami pozwala szybko przenieść produkcję w inne miejsce, gdy zajdzie taka potrzeba. Taki mechanizm chroni firmę przed stratami i pozwala dotrzymać obiecanych terminów realizacji zamówień.[8]

3.3. Elementy składowe

Przedstawienie klasyfikacji łańcuchów dostaw stanowi dobry punkt wyjścia do szerszych rozważań na ich temat. Biorąc pod uwagę funkcje pełnione przez uczestników oraz ich liczbę, można wyróżnić trzy podstawowe typy łańcuchów dostaw (rys.1).



Rysunek 1. Typy łańcuchów dostaw ze względu na funkcję uczestników. Źródło: Opracowanie własne na podstawie publikacji: „FRANKOWSKA Marzena Łańcuchy dostaw – istota, klasyfikacja i percepcja" [7]

a) Bezpośredni łańcuch dostaw (Core Relationship) to podstawowa koncepcja w logistyce, obejmująca jedynie minimalną, bezpośrednią współpracę trzech głównych podmiotów. Mamy tu dostawcę, który jest źródłem fizycznego przepływu materiałów. Następnie producent, pełniący funkcję centralnego ogniwa, to właśnie on przetwarza surowce na gotowy produkt. Odbiorca natomiast stanowi końcowy punkt dystrybucji, otrzymując dostawy bezpośrednio od producenta. To, co tu mamy, to klasyczne podejście, gdzie relacje układają się liniowo i w dwie strony: materiały płyną w dół łańcucha, a

informacje i środki finansowe — w górę. Całość koncentruje się na efektywności samej transakcji, bez nadmiernego komplikowania.

b) Poszerzony łańcuch dostaw. Model ten wprowadza koncepcję n-tego szczebla dostawców oraz odbiorców, podkreślając, iż żaden podmiot funkcjonujący w łańcuchu dostaw nie działa w izolacji. Ujęcie to umożliwia kompleksowe zobrazowanie pełnego cyklu życia produktu. W ramach tego podejścia wyróżnia się następujące elementy:

   Dostawca dostawcy – poziom ten wskazuje źródła zaopatrzenia bezpośredniego dostawcy w surowce lub półprodukty. Analiza tego ogniwa ma istotne znaczenie z punktu widzenia zarządzania ryzykiem, w szczególności w kontekście zapewnienia ciągłości dostaw oraz dostępności zasobów.

   Odbiorca odbiorcy – poziom ten obrazuje dalszy przepływ produktu końcowego, aż do jego dotarcia do ostatecznego nabywcy, będącego docelowym konsumentem.

   Model (b) odgrywa kluczową rolę we współczesnych strategiach logistycznych, gdyż umożliwia identyfikację pochodzenia produktu oraz bardziej precyzyjne prognozowanie popytu. Prognozy te opierają się nie tylko na zamówieniach składanych przez bezpośrednich odbiorców, lecz również na analizie zachowań konsumentów znajdujących się na końcowym etapie łańcucha dostaw.

c) To najbardziej zaawansowane i realistyczne ujęcie współczesnego biznesu, które wykracza poza sferę samej logistyki. Kompleksowość tego modelu polega na integracji nie tylko przepływów fizycznych, ale także wielowymiarowych interakcji usługowych, finansowych i informacyjnych. Zamiast prostego łańcucha, jest to sieć, w której kluczowe role pełnią wyspecjalizowane podmioty trzecie, którymi są:

   Operator Logistyczny (3PL) – Świadczy kompleksowe usługi logistyczne (magazynowanie, transport, clenie, kolekcjonowanie) pomiędzy dwoma i więcej przedsiębiorstwami. Może integrować fizyczne przepływy od n-tych dostawców aż po n-tych odbiorców.

   Dostawca Usług Finansowych – Dostarcza kapitał, zarządza ryzykiem finansowym i oferuje doradztwo. Może finansować uwzględniając ryzyko transakcji w górę lub w dół łańcucha, nie tylko w sferze kredytu kupieckiego.

   Firma Badań Rynkowych – Dostarcza informacji na temat ostatecznych nabywców (potrzeb, zachowań, trendów), a nie tylko bezpośredniego odbiorcy. Pozwala to na proaktywne dostosowanie produkcji.

Kluczowa konkluzja powyższego zobrazowania łańcucha dostaw świetnie zauważa J. Witkowski w wielu publikacjach na temat łańcuchów dostaw, o ile logistyczne interpretacje często skupiają się na *physical flow*, to ujęcie kompleksowe pokazuje, że współpraca wykracza

daleko poza logistykę. Wymaga ona systemowego zarządzania przepływem nie tylko towarów, ale i informacji (o rynku) oraz kapitału (do finansowania innowacji i ryzyka) [1, 2].

4. Rola spedycji w międzynarodowym łańcuchu dostaw

4.1. Dokumentacja w spedycji międzynarodowej

Spedycja międzynarodowa stanowi jeden z istotnych elementów współczesnych łańcuchów dostaw. Obejmuje ona nie tylko przemieszczanie towarów pomiędzy państwami, ale również organizację, planowanie oraz nadzór nad procesami logistycznymi [9, 13]. Istotą działalności spedycyjnej jest koordynacja przepływu ładunków z uwzględnieniem różnic prawnych, celnych oraz organizacyjnych pomiędzy krajami. Znaczenia nabiera dokumentacja towarzysząca każdemu kolejnemu etapowi transportu. Dokumenty pełnią funkcję przede wszystkim informacyjną, dowodową oraz prawną, stanowiąc podstawę realizacji przewozu, odprawy celnej oraz rozliczeń finansowych [10]. Poprawność i kompletność warunkują sprawny przebieg całego procesu transportowego.

4.2. Listy przewozowe jako podstawowy element dokumentacji transportowej

Kluczowym elementem dokumentacji w spedycji międzynarodowej są listy przewozowe, potwierdzające zawarcie umowy przewozu oraz określające jego warunki[9]. Stanowią dowód przyjęcia towaru oraz dokument regulujący relacje pomiędzy nadawcą, odbiorcą i przewoźnikiem.

W transporcie drogowym najważniejszym dokumentem jest list przewozowy CMR, funkcjonujący na podstawie Konwencji o umowie międzynarodowego przewozu drogowego towarów [11]. Dokument CMR określa m.in. dane stron umowy, charakterystykę ładunku oraz miejsce jego nadania i adres dostawy – miejsce odbioru, przeznaczenia. Dokument CMR odgrywa również istotną rolę w zakresie odpowiedzialności przewoźnika, ponieważ stanowi podstawę w przypadku uszkodzenia lub utraty towaru.

W transporcie morskim stosowany jest konosament (Bill of Lading), który posiada szczególne znaczenie w obrocie międzynarodowym. Dokument ten pełni funkcję dowodu zawarcia umowy przewozu, pokwitowania odbioru towaru oraz dokumentu o charakterze wartościowym. Jego zbywalność sprawia, że może być przedmiotem obrotu handlowego [9, 13].

Dokumentem stosowanym w transporcie lotniczym jest list przewozowy AWB. List ten stanowi potwierdzenie zawarcia umowy przewozu, jednak w przeciwieństwie do konosamentu nie ma charakteru papieru wartościowego. Odgrywa istotną rolę informacyjną i organizacyjną, umożliwiając identyfikację przesyłki oraz kontrolę jej przebiegu [13].

4.3. Dokumenty handlowe w międzynarodowym obrocie towarowym

Obok dokumentów transportowych kluczowe znaczenie mają dokumenty handlowe, które regulują relacje pomiędzy stronami transakcji. Podstawowym dokumentem jest faktura handlowa, stanowiąca podstawę rozliczeń oraz źródło informacji o wartości i charakterze towaru [10].

Faktura zawiera dane identyfikujące strony transakcji, opis towaru, jego ilość i wartość, a także warunki dostawy zgodne z regułami Incoterms [12]. Dokument ten jest niezbędny zarówno

dla kontrahentów, jak i dla organów celnych, które na jego podstawie określają należności celno-podatkowe.

Uzupełnieniem faktury są inne dokumenty handlowe, takie jak specyfikacja towarowa (packing list), certyfikaty pochodzenia czy dokumenty jakościowe. Dokumenty te umożliwiają dokładną identyfikację towaru oraz potwierdzają jego zgodność z wymaganiami rynku i przepisami prawa [13]. W wielu przypadkach ich brak może uniemożliwić realizację dostawy lub doprowadzić do jej opóźnienia.

4.4. Dokumenty celne i ich rola w przepływie towarów

Istotnym elementem dokumentacji w spedycji są dokumenty celne. Umożliwiają one legalne przekraczanie granic przez towary. Dokumentacja celna stanowi podstawę kontroli towarów oraz naliczania należności celnych i podatkowych [9-10].

Do najistotniejszych dokumentów należą zgłoszenia celne, faktury handlowe oraz dokumenty transportowe a także świadectwa pochodzenia. Nieprawidłowości w dokumentacji mogą prowadzić do zatrzymania towaru, nałożenia kar finansowych oraz opóźnień w realizacji dostaw. Oznacza to nie tylko straty finansowe, ale również ryzyko utraty wiarygodności i zaufania przedsiębiorstwa na rynku międzynarodowym [13].

4.5. Znaczenie poprawnej dokumentacji w łańcuchu dostaw

Poprawność dokumentacji stanowi jeden z najważniejszych czynników determinujących efektywność międzynarodowego łańcucha dostaw. Błędy w dokumentach mogą zakłócić przepływ towarów, prowadząc do opóźnień, dodatkowych kosztów oraz problemów prawnych [9-10].

W tej kwestii szczególną rolę odgrywa osoba na stanowisku spedytora, która odpowiada za przygotowanie, weryfikację oraz obieg dokumentów. Spedytor pełni funkcję koordynatora informacji, zapewniając zgodność dokumentacji z obowiązującymi przepisami oraz wymaganiami kontrahentów. Znaczenie poprawnej dokumentacji rośnie wraz ze zwiększającą się liczbą regulacji prawnych.

Współczesna spedycja wymaga nie tylko znajomości procedur transportowych, ale również wysokich kompetencji w zakresie obsługi dokumentacji [13].

5. Rodzaje transportu w spedycji

Współczesny spedytor wykracza poza tradycyjną organizację transportu. To inżynier procesów logistycznych, którego celem jest optymalizacja łańcucha uwzględniając rosnące koszty, wymogi zrównoważonego rozwoju oraz nieprzewidywalną sytuację polityczną [17]. Fizyczne przemieszczanie się ładunku to tylko jeden z elementów zarządzania ryzykiem. Aby zrozumieć czym jest ten mechanizm, należy przyjrzeć się poszczególnym gałęziom transportu i zrozumieć jaką rolę odgrywają w globalnej gospodarce.

5.1. Transport drogowy: Elastyczność i kryzys modelu just-in-time

Z punktu widzenia gospodarki transport samochodowy pełni fundamentalną rolę w sektorze elastyczności, gdyż jego rolą nie jest przewożenie największych ładunków, ale pełnienie funkcji łącznika - spina wielkie, globalne huby logistyczne takie jak porty morskie, terminale kolejowe oraz lotniska z gospodarką lokalną, czyli centrami dystrybucyjnymi, a ostatecznie z drzwiami klienta. Przez lata ciężarówki stawały się mobilnymi magazynami w ramach strategii just-in-time (dokładnie na czas). Jednak w ostatnim czasie ten model przechodzi poważny kryzys. Jak zauważa M. Gontarczyk i A. Marcinowska, dynamika przemian rynkowych i politycznych weryfikuje to podejście oparte na ekstremalnej redukcji zapasów [14]. W obliczu takich wydarzeń jak Brexit, zamykanie granic podczas pandemii czy prężnych zmian

geopolitycznych, stały się dla wielu firm powodem zamykania działalności. Poprzez wojny celne między USA a Chinami, a także rosnące koszty pracy na rynkach azjatyckich dokonuje się powolny odwrót od globalizacji. Wymusza to na przedsiębiorstwach zmianę dotychczasowej strategii. Według Gontarczyka i Marcinowskiej era dalekiego offshoringu powoli przemija. Firmy stawiają teraz na nearshoring i lokują fabryki bliżej rynków zbytu. Wszystko przez to, że rosnące ryzyko w biznesie sprawia, iż operacje w odległych krajach przestają się opłacać. Współczesny transport musi być elastyczny, by przetrwać niestabilność rynkową. Widzimy wyraźny odwrót od radykalnego cięcia kosztów i zapasów - teraz to odporność operacyjna decyduje o przewadze konkurencyjnej [14].

5.2. Transport kolejowy: Odrodzenie kolei

Lata temu kolej towarowa kojarzyła się głównie z powolnym przewozem surowców masowych, takich jak węgiel czy stal. Aktualnie obserwujemy jej odrodzenie oraz wzrost jej znaczenia w skali globalnej. Powodem tej zmiany był rozwój Nowego Jedwabnego Szlaku. Pociągi marszrutowe (block trains) pokonujące trasę z Chin do Europy w zaledwie kilkanaście dni stały się złotym środkiem w spedycji, gdyż są znacznie tańsze od transportu lotniczego oraz szybsze od frachtu morskiego. W obliczu zaostrzających się rygorów klimatycznych, transport szynowy staje się kluczowym filarem niskoemisyjnych łańcuchów dostaw. Według analiz Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA), na które powołuje się serwis kolejchiny.pl, emisja CO_2 w transporcie kolejowym wynosi zaledwie ok. 14 g na tonokilometr. Oznacza to, że pociąg generuje ponad pięciokrotnie mniejszy ślad węglowy niż standardowa ciężarówka i aż trzydziestokrotnie mniejszy niż samolot . W dobie raportowania ESG, transport kolejowy ewoluował do roli strategicznej. Jako baza logistyki intermodalnej, umożliwia firmom skuteczne ograniczanie emisji, co w obecnych realiach rynkowych jest już wymogiem rynkowym, a nie wyborem [15].

5.3. Transport morski: Systemowa podatność na wstrząsy

Transport morski stanowi podstawę, na której opiera się cała struktura współczesnego handlu międzynarodowego. Zgodnie z danymi rynkowymi publikowanymi przez Konferencję Narodów Zjednoczonych ds. Handlu i Rozwoju (UNCTAD), gałąź ta odpowiada za obsługę ponad 80% wolumenu globalnej wymiany towarowej [16-17] . Kluczową rolę transportu morskiego ugruntowało wprowadzenie ustandaryzowanego kontenera, co przełożyło się na drastyczne obniżenie kosztów transakcyjnych. Należy jednak podkreślić, że ta gałąź transportu jest uzależniona od przepustowości strategicznych węzłów oraz stabilności geopolitycznej.

Wystarczy nagłe załamanie relacji politycznych lub wzrost napięć, aby zablokować kluczowe magistrale wodne, co zmusza do wyznaczania znacznie dłuższych tras alternatywnych. Ta chwiejność natychmiast przekłada się na zwiększone stawki, opóźnienia i zerwanie ciągłości dostaw. Dzisiejszym wyzwaniem nie jest zatem optymalizacja kosztów, a budowa odporności na wstrząsy zewnętrzne [17].

5.4. Transport lotniczy: Kryzys na ziemi

Transport lotniczy to najszybsza i uchodząca za najbardziej prestiżową gałąź transportu. Choć odpowiada za najmniejszą część światowego handlu, to przewozi ładunki wymagające szybkiej dostawy, takie jak nowoczesna elektronika czy farmaceutyki o rygorystycznych wymogach temperaturowych [17]. Zarówno linie lotnicze, jak i spedycyjni operatorzy są postrzegani na rynku TSL jako podmioty świadczące usługi klasy premium. W obecnych czasach w tej branży nie jest problemem brak nowoczesnej floty czy rosnące ceny paliwa, lecz według Agnieszki Wilczyńskiej-Strawy, niedobór wykwalifikowanej kadry na wszystkich etapach tworzenia usługi, objawiający się brakiem pilotów, personelu obsługi naziemnej oraz pracowników terminali towarowych. Plany rozbudowy globalnej infrastruktury lotniskowej i tworzenie nowych hubów potęgują ten problem. Utrzymanie terminowości lotniczego frachtu będzie wkrótce wymagało cyfryzacji i automatyzacji procesów na ziemi [18].

6. Transport intermodalny w spedycji

6.1. Definicja transportu intermodalnego

Terminy takie jak transport intermodalny, multimodalny, kombinowany czy łamany bywają używane zamiennie. W rzeczywistości różnią się one od siebie specyficznymi niuansami. Właściwa analiza transportu intermodalnego wymaga więc uprzedniego wyjaśnienia różnic definicyjnych występujących między tymi systemami przewozowymi. Transport intermodalny oznacza proces transportowy w przypadku, którego użyte zostaną co najmniej dwa różne środki transportowe (pojazd ciężarowy, kolej czy statek kontenerowy) oraz specjalne, wystandaryzowane pojemniki do transportu dobra. Aby w pełni zdefiniować transport intermodalny, należy zestawić go z pojęciami pokrewnymi [19][20]:

a) Transport multimodalny (łamany): Oznacza, że do transportu zostają wykorzystane różne środki transportu, jednakże bez użycia specjalnych pojemników transportowych [19].

b) Transport kombinowany: Zgodnie z wytycznymi Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ jest to transport intermodalny, w którym główna część przewozu odbywa się inną gałęzią transportu niż transport samochodowy (najczęściej jest to transport kolejowy lub morski). Odcinki "dowozowe", realizowane za pomocą transportu samochodowego [20], są ograniczane do możliwie jak najmniejszego zakresu. W świetle prawa unijnego Dyrektywa Rady 92/106/EWG z dnia 7 grudnia 1992 r, odległość drogowa w tego typu przewozach nie powinna przekraczać 100 km dla transportu drogowo-kolejowego oraz 150 km dla transportu łączonego drogowego i śródlądową drogą wodną lub drogowo-morskiego.

Przewozy intermodalne zalicza się do złożonych procesów transportowych, co wymaga ścisłej integracji na kilku płaszczyznach:

a) Płaszczyzna techniczno-technologiczna: Polega na dostosowaniu środków z różnych gałęzi transportu oraz urządzeń przeładunkowych i manipulacyjnych do obsługi tej samej jednostki ładunkowej.

b) Płaszczyzna organizacyjna: Wymaga, aby jeden operator sprawował nadzór nad całym procesem transportowym.

c) Płaszczyzna dokumentacyjna: Oznacza funkcjonowanie jednego dokumentu transportowego na całą trasę dostawy.

d) Płaszczyzna cenowa: Opiera się na przedstawieniu klientowi jednej stawki za cały proces dostawy.

Płaszczyzna prawna: Charakteryzuje się tym, że jeden kontrakt dotyczy całego procesu transportowego wraz z jednolitym systemem regulacji i odpowiedzialności [19-20].

6.2. Wady i zalety transportu intermodalnego

Wykorzystanie transportu intermodalnego ma pozytywne efekty w wymiarze [20]:

a) ekonomicznym – zmniejszenie wydatków na usługę, dłuższa żywotność samochodów ciężarowych, mniejsze koszty opłat drogowych, mniejsze zużycie nawierzchni dróg.

b) ekologicznym – mniejsze zanieczyszczenie środowiska naturalnego, mniejsza emisja spalin, ograniczenie hałasu w obszarach miejskich.

c) społecznym – wzrost bezpieczeństwa na drogach.

6.3. Konteneryzacja

Słowo „kontener" wywodzi się od łacińskiego *contire*, co oznacza „trzymanie razem". W logistyce uznaje się go za podstawową jednostkę transportową (ang. Intermodal Transport Unit – ITU), którą można swobodnie przewozić statkami, pociągami czy ciężarówkami. Jego globalny sukces zaczął się w 1968 roku, kiedy organizacja ISO (ang. International Organization for Standardization – ISO) ujednoliciła wymiary kontenerów na całym świecie. Według oficjalnych norm (ISO 668 i 830), kontener musi być wytrzymały i wielorazowy, zaprojektowany tak, by przewozić towary różnymi środkami transportu bez potrzeby ich rozpakowywania. Ponadto musi posiadać uchwyty ułatwiające przeładunek, a jego pojemność musi wynosić minimum 1m3. Konteneryzacja jest procesem, który zrewolucjonizował oblicze współczesnego transportu i handlu międzynarodowego. Polega ona na wprowadzeniu do przewozów zunifikowanych jednostek ładunkowych, co umożliwiło pełną integrację różnych gałęzi transportu pod względem technicznym i organizacyjnym. Współczesna konteneryzacja opiera się na modułach o długościach 20, 30, 40 i 45 stóp. Standardowa szerokość wynosi 8 stóp, a najpowszechniejsza wysokość to 8 stóp i 6 cali [21].

Kluczowe zalety stosowania kontenerów:

a) Dla załadowców: obniżenie kosztów transportu i opakowań, zmniejszenie ryzyka szkód oraz skrócenie czasu dostawy.

b) Dla przewoźników: skrócenie postojów w portach i terminalach oraz lepsze wykorzystanie taboru.

c) Wymagania techniczne: nowoczesne kontenery muszą pozwalać na piętrzenie (zwykle do 9 warstw) i posiadać znormalizowane oznakowanie (kod właściciela, numer seryjny, masa brutto).

Konteneryzacja umożliwiła integrację globalnych łańcuchów dostaw, wpływając nie tylko na gospodarkę, ale również na politykę i stosunki społeczne na świecie [21].

7. Rola centrów logistycznych i magazynów

7.1. Nowoczesna Architektura Handlu: Kluczowa Rola Infrastruktury Logistycznej

W obliczu globalizacji oraz ekspansji handlu elektronicznego, fizyczne zaplecze odpowiedzialne za obrót towarowy przestało być postrzegane jedynie jako miejsce składowania, stając się fundamentem współczesnej gospodarki. Dzisiejsze obiekty logistyczne to inteligentne węzły technologiczne. Jak zauważa I. Fechner (2010), współczesne centrum logistyczne należy rozumieć jako zorganizowaną jednostkę przestrzenną, która dysponuje

odpowiednią infrastrukturą do kompleksowej obsługi ładunków – od ich przyjęcia, przez magazynowanie, aż po dystrybucję do odbiorców końcowych [23].

7.2 Ewolucja magazynowania: Od składu do precyzyjnej synchronizacji

Obecnie proces magazynowania wykracza daleko poza proste deponowanie produktów. Opiera się on na rygorystycznej optymalizacji zasobów, co ma na celu utrzymanie płynności operacyjnej przedsiębiorstw. Wykorzystanie systemów informatycznych typu WMS umożliwia pełny monitoring przepływu towarów w czasie rzeczywistym. Według W. Rydzkowskiego (2011), istotą nowoczesnego magazynowania jest harmonizowanie podaży z aktualnym zapasem w wymiarze czasowym i przestrzennym. Takie podejście pozwala nie tylko reagować na rynkową niepewność, ale również realnie ograniczać wydatki operacyjne firmy[25].

7.3. Cross-Docking jako serce terminali przeładunkowych

Specyficznym elementem sieci logistycznej są terminale przeładunkowe, w których priorytetem jest maksymalne skrócenie czasu przebywania towaru w obiekcie. Kluczową rolę odgrywa tu technika cross-docking. G. Richards (2017) definiuje ten model jako system, w którym dostawy trafiające do terminalu są niemal natychmiast rozdzielane i kierowane do dalszego transportu, co eliminuje etap długotrwałego magazynowania. Dzięki konsolidacji mniejszych partii towaru, terminale te pozwalają na optymalizację transportu liniowego i przyspieszenie realizacji zamówień [24].

7.4. Dystrybucja: Łącznik między produkcją a rynkiem

Rola centrów logistycznych w procesie dystrybucji polega na zintegrowaniu działań mających na celu dostarczenie towaru zgodnie z zasadą „właściwy produkt w odpowiednim miejscu i czasie”. Obiekty te przejmują również zadania dodatkowe, takie jak etykietowanie czy przygotowanie zestawów (konfekcjonowanie). M. Ciesielski (2011) podkreśla, że efektywny system dystrybucji jest niezbędny do zapewnienia wysokich standardów obsługi klienta przy jednoczesnym zachowaniu efektywności kosztowej. W logistyce miejskiej to właśnie sprawna dystrybucja i bliskość punktu odbioru decydują o ostatecznym zadowoleniu konsumenta [22].

7.5. Wpływ logistyki na rozwój gospodarczy

Infrastruktura magazynowa stanowi silny bodziec dla rozwoju lokalnego, przyciągając kapitał i tworząc nowe rynki pracy. Z perspektywy makroekonomicznej, nowoczesna sieć terminali i magazynów przyczynia się do redukcji udziału kosztów logistycznych w PKB[25][22].

8. Technologie w transporcie

We współczesnym świecie spedycja i transport w międzynarodowych łańcuchach dostaw nie mogą sprawnie funkcjonować bez wsparcia nowoczesnych technologii informacyjnych. Związane z tym rozwiązania telematyczne, łączące instrumenty informatyczne i telekomunikacyjne, są obecnie fundamentem optymalizacji przepływu ładunków. Zastosowanie narzędzi takich jak systemy satelitarne (m.in. GPS) umożliwia precyzyjny monitoring flot i kontrolę nad położeniem przesyłek. Z kolei zaawansowane autorskie oprogramowania do zarządzania transportem (systemy TMS) oraz koncepcja Internetu Rzeczy (IoT) wspierają automatyczną wymianę danych bez konieczności ingerencji człowieka. Wdrażanie tych cyfrowych innowacji i ciągłe podnoszenie jakości obsługi stało się rynkową koniecznością w obliczu szybkiego rozwoju globalnej gospodarki oraz rosnącej konkurencji [26].

8.1. Systemy zarządzania transportem (TMS)

Zaawansowane rozwiązania informatyczne, które tradycyjnie służyły do operacyjnego ewidencjonowania, planowania zleceń oraz analizowania kosztów i utrzymania pojazdów. Współczesne wersje tych systemów posiadają znacznie szerszą funkcjonalność, obejmując zarządzanie logistyką multimodalną oraz oferując możliwości integracji z systemami klasy CRM, ERP czy WMS. Ważnym aspektem ich działania jest ścisłe powiązanie z systemami monitoringu satelitarnego (GPS/GLONASS) i ruchem drogowym, co umożliwia bieżące śledzenie parametrów pojazdu oraz dynamiczne wyznaczanie tras. Kolejna generacja systemów TMS koncentruje się na zwiększaniu niezawodności łańcuchów dostaw, wykorzystując metody eksploracji procesów (Process Mining) do analizowania działań dyspozytorów i minimalizowania błędów ludzkich. Takie innowacyjne podejście pozwala na stworzenie cyfrowego bliźniaka (Digital Twin) firmy transportowej, dzięki czemu można szybciej reagować na odchylenia od standardowych procedur w systemie i lepiej radzić sobie z nieprzewidzianymi zakłóceniami [27].

8.2. Cyfryzacja dokumentów

Tradycyjny obieg dokumentów w łańcuchu dostaw jest procesem czasochłonnym i podatnym na uszkodzenia lub zgubienie, co skłania podmioty do wdrażania rozwiązań elektronicznych. Cyfryzacja ułatwia weryfikację poprawności przemieszczanych materiałów i pozwala na lepszą kontrolę całego procesu przepływu. Przejście na dokumenty cyfrowe pozwala ponadto na ograniczenie kosztów, ich natychmiastowe przekazywanie oraz umożliwia łatwiejszy dostęp do ich treści dla organów kontrolnych.

Warto jednak zaznaczyć, że mimo braku barier technologicznych i organizacyjnych, pełna cyfryzacja dokumentacji w łańcuchach dostaw wciąż napotyka na istotne przeszkody o charakterze legislacyjnym [28].

8.3. Automatyzacja procesów logistycznych

Wdrażanie technologii sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego otwiera nowe perspektywy dla automatyzacji operacji magazynowych oraz zarządzania zapasami w e-commerce. Automatyzacja tych procesów logistycznych odgrywa kluczową rolę, ponieważ bezpośrednio przyczynia się do realizacji szybszych i znacznie bardziej precyzyjnych dostaw towarów. W praktyce rynkowej obejmuje to zaawansowane rozwiązania, takie jak zasilane przez AI roboty do transportu wewnątrzmagazynowego czy zautomatyzowane systemy zarządzające ruchem i optymalizujące kompletację zamówień [29].

9. Znaczenie spedycji dla gospodarki i przyszłość branży

Spedycja i logistyka budują fundament dzisiejszej gospodarki. Bez sprawnie działających łańcuchów dostaw produkcja w różnych krajach oraz przewożenie towarów na świeci byłyby niemożliwe. Poniżej zebrałem informacje o tym, jak ten sektor funkcjonuje obecnie i w jakim kierunku zmierza, opierając się na przesłanych przez Ciebie materiałach.

9.1. Wpływ na handel międzynarodowy

Światowa gospodarka funkcjonuje dzięki temu, że części produkowane w różnych państwach trafiają płynnie do miejsc ostatecznego montażu. Pandemia oraz wojny handlowe mocno jednak wstrząsnęły tym systemem, zmuszając firmy do poszukiwania stabilności zamiast wyłącznie najniższych kosztów. Dobrym przykładem jest korporacja Samsung, która przeniosła część swojej produkcji do Indii oraz Wietnamu, aby zminimalizować ryzyko zerwania łańcuchów dostaw. Z kolei w państwach rozwijających się inwestycje logistyczne potrafią drastycznie zmienić gospodarkę – na przykład w Kambodży analitycy wyliczyli, że usprawnienie infrastruktury portowej, rzecznej (rzeka Mekong) oraz wdrożenie nowych polityk celnych znacząco zwiększy międzynarodowe przepływy kontenerów do 2025 roku [30].

9.2. Rozwój branży logistycznej

Sektor ten przechodzi potężną cyfryzację. Przewoźnicy odchodzą od tradycyjnej dokumentacji na rzecz rozwiązań chmurowych, które obniżają koszty wejścia dla mniejszych przedsiębiorstw. Wdrażana jest także nowoczesna łączność – włoski port Livorno zastosował już do swoich operacji sieć 5G, co pozwoliło mu na zmniejszenie czasu tranzytu towarów i ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko. Równolegle rozwijają się zintegrowane platformy cyfrowe, takie jak TradeLens (stworzona przez IBM i Maersk). Wykorzystuje ona technologię blockchain, aby porty, urzędy celne i spedytorzy na całym świecie mogli bezpiecznie wymieniać dane i unikać powielania formalności [31].

9.3. Ekologiczny transport

Transport towarów musi sprostać wyzwaniom związanym ze zmianami klimatycznymi i presją na dekarbonizację. Utrzymanie i modernizacja tej infrastruktury pochłania ogromne środki – w 2020 roku najwyższe wydatki na transport w stosunku do PKB w Europie odnotowano w Czechach (2,2%), Polsce (2,05%) oraz w Wielkiej Brytanii (1,81%). Przewozy różnią się jednak strukturą: w Polsce w 2020 roku aż 83,4% pracy przewozowej wykonały ciężarówki. Aby odciążyć drogi i redukować emisje spalin, firmy szukają alternatyw. W Chinach na przykład przedsiębiorstwo logistyczne SF Express nawiązało bliską współpracę z kolejami państwowymi, aby przenieść dużą część paczek z samolotów towarowych do pociągów o wysokiej prędkości (HST). Innym globalnym rozwiązanie jest tworzenie „zielonych korytarzy żeglugowych", m.in. na trasach łączących Singapur z Rotterdamem oraz z Los Angeles[32].

9.4. Przyszłość spedycji

Przyszłość spedycji zależy od wdrożenia sztucznej inteligencji. Według prognoz, algorytmy i automatyzacja mogą zwiększyć światowe PKB aż o 14 procent do 2030 roku (czyli o 15,7 biliona dolarów). W samym sektorze transportu i logistyki sztuczna inteligencja ma potencjał wygenerowania od 400 do 500 miliardów dolarów nowej wartości rocznie. Naukowcy zidentyfikowali już 77 konkretnych sposobów wykorzystania tych systemów – potrafią one m.in. dynamicznie wyceniać transport, prognozować zapotrzebowanie na miejsce w magazynach oraz przewidywać awarie floty ciężarowej. Pomimo tak gigantycznego potencjału technologia ta wciąż napotyka opór we wdrażaniu. Badanie przeprowadzone wśród ponad 400 niemieckich firm logistycznych pokazało, że zaledwie 22 procent z nich aktywnie używa sztucznej inteligencji w swoich działaniach [33]

10. Zadania spedytora w organizacji transportu

Spedytor odgrywa kluczową rolę w procesie organizacji transportu towarów. Jest odpowiedzialny za planowanie, koordynację oraz kontrolę przebiegu przewozu, tak aby odbywał się on sprawnie, terminowo i ekonomicznie. Jego praca wymaga szerokiej wiedzy z zakresu logistyki, transportu oraz umiejętności interpersonalnych [35, 36].

10.1. Planowanie transportu

Jednym z najważniejszych zadań spedytora jest planowanie transportu. Obejmuje ono analizę potrzeb klienta, określenie rodzaju i ilości ładunku, a także ustalenie terminu dostawy. Spedytor musi uwzględnić różne czynniki, takie jak trasa przewozu, warunki infrastrukturalne,

przepisy prawne oraz ewentualne zagrożenia [35-37]. Dobrze zaplanowany proces logistyczny minimalizuje ryzyko opóźnień i dodatkowych kosztów [36].

10.2. Wybór środka transportu

Istotnym elementem pracy spedytora jest dobór odpowiedniego środka transportu. W zależności od charakterystyki ładunku i wymagań klienta może to być transport drogowy, kolejowy, morski lub lotniczy[34]. Spedytor analizuje czas dostawy, koszty oraz bezpieczeństwo przewozu, aby wybrać najbardziej efektywne rozwiązanie [38].

10.3. Negocjowanie cen

Spedytor prowadzi także negocjacje z przewoźnikami oraz innymi uczestnikami łańcucha dostaw. Jego celem jest uzyskanie jak najkorzystniejszych warunków cenowych przy zachowaniu wysokiej jakości usług [35]. Umiejętności negocjacyjne mają bezpośredni wpływ na konkurencyjność oferty oraz zadowolenie klienta [36].

10.4. Koordynacja dostaw

Spedytor monitoruje przebieg transportu, reaguje na ewentualne problemy oraz utrzymuje kontakt z klientem i przewoźnikiem. Dzięki temu możliwe jest szybkie rozwiązywanie trudności i zapewnienie terminowej realizacji zlecenia [36].

11. Problemy i wyzwania w międzynarodowej spedycji

Międzynarodowa spedycja odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu globalnej gospodarki, umożliwiając przepływ towarów pomiędzy krajami i kontynentami. Dynamiczny rozwój handlu międzynarodowego oraz globalizacja produkcji sprawiają, że rośnie znaczenie usług logistycznych i spedycyjnych. Jednocześnie branża ta musi mierzyć się z wieloma problemami, które wpływają na efektywność transportu oraz stabilność łańcuchów dostaw. Do najważniejszych wyzwań w międzynarodowej spedycji należą m.in. opóźnienia transportu, bariery celne, rosnące koszty transportu oraz różnego rodzaju kryzysy logistyczne [39]

11.1. Opóźnienia transportu

Opóźnienia transportu są jednym z najczęstszych problemów w spedycji międzynarodowej i wynikają głównie z przeciążenia infrastruktury transportowej, warunków atmosferycznych oraz problemów organizacyjnych w portach i terminalach [39][40]. Dodatkowo wpływ na opóźnienia mają procedury administracyjne i celne, które wydłużają czas realizacji przewozu, szczególnie w transporcie międzykontynentalnym [40]. Według literatury logistycznej nawet niewielkie zakłócenia w jednym ogniwie łańcucha dostaw mogą powodować opóźnienia w całym systemie transportowym, co prowadzi do strat finansowych i problemów z terminowością dostaw [39][41]

11.2. Bariery celne

Bariery celne wynikają z różnic w przepisach oraz konieczności spełnienia licznych formalności przy imporcie i eksporcie towarów [39][40]. Procedury odprawy celnej są często czasochłonne i mogą powodować opóźnienia w realizacji transportu [40]. Złożoność regulacji zwiększa ryzyko błędów oraz dodatkowych kosztów dla przedsiębiorstw [41].

11.3. Koszty transportu

Koszty transportu obejmują m.in. paliwo, opłaty drogowe i portowe oraz koszty obsługi logistycznej. Ich wzrost, szczególnie związany z cenami paliw, wpływa bezpośrednio na ceny towarów i konkurencyjność firm. Transport stanowi istotną część całkowitych kosztów działalności przedsiębiorstw [39][40][41].

11.4. Kryzysy logistyczne

Kryzysy logistyczne, takie jak pandemie czy konflikty zbrojne, powodują zakłócenia w łańcuchach dostaw i transporcie. Globalne powiązania gospodarcze sprawiają, że problemy w jednym regionie wpływają na cały system logistyczny. W odpowiedzi firmy wdrażają strategie zwiększające odporność, np. dywersyfikację dostawców [39][40].

Podsumowanie

Transport międzynarodowy odgrywa kluczową role w poprawnym funkcjonowaniu społeczeństwa. Cały proces od zaplanowania transportu przez znalezienie odpowiedniego środka transportu do dopilnowanie by wszystko dotarło na czas i bez żadnych uszkodzeń cała tą prace wykonuje spedytor który nie tylko organizuje transport, ale też doradza i szuka najlepszych rozwiązań pod względem kosztów, czasu i bezpieczeństwa.

W pracy wskazujemy różnicy miedzy samym transportem a rozległym tematem spedycji które obejmuje nie tylko przewiezienie towaru od punktu a do punktu b, a rozległym zarzadzaniem wielu stref łącząc producentów, przewoźników, urzędy celne i odbiorców końcowych by wszystko przebiegło bez problemów biorąc na siebie odpowiedzialność za wszelkie nie ścisłości.

Celem pracy jest przedstawienie na czym opiera się praca spedytora i czym dokładnie jest spedycja oraz jak kluczową role odgrywa w gospodarce światowej.

Bibliografia

1. Spedycja. (n.d.). pobrano z https://mfiles.pl/pl/index.php/Spedycja
2. Co należy do obowiązków spedytora. (n.d.). pobrano z https://www.stan-trans.com.pl/co-nalezy-do-obowiazkow-spedytora/
3. Długołęcka, K., i Simiński, P. (2015). Spedytor jako istotne ogniwo w łańcuchu dostaw. *Management and Administration Journal*, 32, 37–47.
4. Ustawa z dnia 23 kwietnia 1964 r. – Kodeks cywilny. (1964).
5. Polska Izba Spedycji i Logistyki. (2022). Ogólne Polskie Warunki Spedycyjne (OPWS 2022).
6. Adamowicz, M., i Lemanowicz, M. (n.d.). Koncepcja zarządzania łańcuchami dostaw versus tradycyjne pojmowanie relacji dostawca–odbiorca. Wyd. agro. 2018
7. Frankowska, M. Łańcuchy dostaw – istota, klasyfikacja i percepcja. *Logistyka*, 2014
8. Kos, B. . Znaczenie łańcuchów dostaw we współczesnej gospodarce. Problemy Zarządzania, Finansów i Marketingu 29, 73-88, 2013.
9. Neider, J. (2019). *Transport międzynarodowy*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
10. Rydzkowski, W., i Wojewódzka-Król, K. (2020). *Transport*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
11. Konwencja CMR. (1956).
12. International Chamber of Commerce. (2020). *Incoterms® 2020 Rules*.
13. Włodarczyk, B. (2018). *Spedycja i transport międzynarodowy*. Warszawa: Difin.
14. Gontarczyk, M., i Marcinowska, A. (2020). Wzrost ryzyka jako determinacja celowości wprowadzenia innowacji w logistyce. *Systemy Logistyczne Wojsk*, 52, 40.
15. Transport kolejowy Polska–Chiny: najbardziej ekologiczna opcja dla Twojego łańcucha dostaw. https://kolejchiny.pl/blog/ekologiczny-import-z-chin-kolej
16. UNCTAD. (n.d.). Shipping data: UNCTAD releases new seaborne trade statistics. Poprano z https://unctad.org/news/shipping-data-unctad-releases-new-seaborne-trade-statistics
17. Maśloch, P., Wołejszo, J., Maśloch, R., i Itrich-Drabarek, J. (2024). Współczesne wyzwania logistyki w obliczu globalnych zagrożeń. *Nowoczesne Systemy Zarządzania*.
18. Węgrzyn, T., i Burdzik, R. (2010, Month). Znaczenie lokalizacji centrów logistycznych na Śląsku. Paper presented at VII Konferencja Logitrans, Szczyrk.
19. Rogaczewski, R. (2018). Transport intermodalny w gospodarce krajowej. *Acta Universitatis Nicolai Copernici. Zarządzanie*, 45, 89–100.
20. Przybylska, E., i Żebrucki, Z. (2017). Identyfikacja czynników rozwoju transportu intermodalnego w Polsce. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*.

21. Bartosiewicz, A. Rozwój konteneryzacji na świecie od końca XIX w. do czasów współczesnych. *Studia z Historii Społeczno-Gospodarczej XIX i XX Wieku*. DOI: 10.18276/978-83-7972-722-3
22. Ciesielski, M. (Ed.). (2011). *Zarządzanie łańcuchami dostaw*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
23. Fechner, I. (2010). *Centra logistyczne i ich rola w sieciach logistycznych*. Poznań: Biblioteka Logistyka.
24. Richards, G. (2017). *Warehouse Management: A Complete Guide to Improving Efficiency and Minimizing Costs in the Modern Warehouse*. London: Kogan Page.
25. Rydzkowski, W. (Ed.). (2011). *Logistyka*. Poznań: Biblioteka Logistyka.
26. Janiak, R., i in. (2017). Nowoczesne systemy wspomagania procesów transportu i spedycji w międzynarodowych łańcuchach dostaw.
27. Dorofeev, A., i in. (2024). Improving Transportation Management Systems (TMSs) Based on the Concept of Digital Twins of an Organization. *Applied Sciences*.
28. Szczepański, E., Lewczuk, K., i Żak, J. (2022). Documents flow digitization in the supply chains. *WUT Journal of Transportation Engineering*.
29. Kozłowska, J. (2024). Optymalizacja procesów logistycznych w e-commerce za pomocą sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. *Management and Quality*, 6, 3.
30. Lee, P., Chhetri, P., Liu, W., i Lin, C. (2016) Integrated transport and logistics for sustainable global trade.
31. Wang, Y., i Sarkis, J. (n.d.). Emerging digitalisation technologies in freight transport and logistics: current trends and future directions, Transportation, Elsevier, Vol 148, 2014.
32. Jacyna-Gołda, I., i in. (n.d.). Modeling sustainable development of transport logistics under climate change, ecosystem dynamics, and digitalization. *Applied Sciences*, 2025
33. du Plessis, M., Gerber, R., Goedhals-Gerber, L., i van Eeden, J. (2025). Shaping the future of freight logistics: Use cases of artificial intelligence, *Sustainability, MDPI,* vol. 17(4),
34. Rydzkowski, W. (2009). *Transport. Problemy transportu w rozszerzonej Unii Europejskiej*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, TYransport
35. Neider, J. (2012). *Spedycja*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
36. Gołembska, E. (2013). *Logistyka. Teoria i praktyka*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
37. Kisperska-Moroń, D., i Krzyżaniak, S. (n.d.). *Podstawy logistyki*. Poznań: Instytut Logistyki i Magazynowania. 2010
38. Blaik, P. (2011). *Logistyka w przedsiębiorstwie*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
39. Brdulak, H. (n.d.). *Transport, spedycja, logistyka. Teoria i praktyka*. Warszawa (2011): Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.

40. Neider, J., i Marciniak-Neider, D. (2014) *Transport międzynarodowy*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne,
41. Rydzkowski, W., i Wojewódzka-Król, K. (2014.). *Transport*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

SYSTEMY ITS W ZARZĄDZANIU RUCHEM MIEJSKIM

Jakub JANIK[1], Michał STEC[2], Maja MIKULSKA [3], Piotr SKIBIŃSKI [4], Krzysztof BAJDA, Eryk FRANKIEWICZ [5], Jan SŁOMKA [6], Kacper BANASIAK [7], Kacper Rudzki [8], Mikołaj ZALEWSKI [9], Mikołaj STAROŃ [10] Patrycja LASOTA[11], Tomasz WĘGRZYN[*12] .

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; jj322990@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; mm319526@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; ms322993@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; ps319515@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; js319506@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak;

ef323721@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak;

mz315167@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; kr322995@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; Kb317218@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno Technologiczny; student, identyfikator ORCID – brak; Ms319528@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej; student, identyfikator ORCID - 0009-0005-8536-5539. pl315065@student.polsl.pl

Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, identyfikator ORCID - 0000-0003-2296-1032

tomasz.wegrzyn@polsl.pl

* Korespondencja: tomasz.wegrzyn@polsl.pl

Streszczenie: Inteligentne Systemy Transportowe (ITS) to zaawansowane rozwiązania technologiczne, które łączą informatykę i telekomunikację z inżynierią transportu w celu poprawy bezpieczeństwa, efektywności i ekologii ruchu drogowego. Zamiast po prostu budować szersze drogi, ITS stawia na "sprytne" zarządzanie tym, co już mamy.

Słowa kluczowe: efektywność transportowa, transport, telematyka, łączność, bezpieczeństwo

ITS SYSTEMS IN URBAN TRAFFIC MANAGEMENT

Abstract: These are advanced technological solutions that combine computer science and telecommunications with transport engineering to improve the safety, efficiency, and ecology of road traffic. Instead of simply building wider roads, ITS focuses on 'smart' management of what we already have.

Keywords: transport efficiency, transport, telematics, connectivity, safety

1. Wstęp

Systemy Inteligentnego Transportu (ITS - Intelligent Transport Systems) odgrywają coraz większą rolę w zarządzaniu ruchem miejskim, szczególnie przy dynamicznie rosnącej liczbie samochodów na drogach oraz szybko postępującym rozwoju urbanizacji. Współczesne miasta stoją przed wyzwaniami związanymi z zanieczyszczeniami powietrza oraz koniecznością poprawy bezpieczeństwa uczestników ruchu. Tradycyjne metody zarządzania infrastrukturą drogową często okazują się niewystarczające, co motywuje do wdrażania nowoczesnych i zintegrowanych rozwiązań technologicznych.

Systemy ITS wykorzystują zaawansowane technologie komunikacyjne, informacyjne oraz systemy analizujące dane w celu optymalizowania przepływu ruchu i zwiększenia efektywności transportu. Dzięki zastosowaniu takich narzędzi jak inteligentna sygnalizacja świetlna, systemy monitoringu czy dynamiczne zarządzanie ruchem, możliwe jest nie tylko skrócenie czasu podróży, ale także ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko.

Celem artykułu jest przedstawienie roli oraz znaczenia systemów ITS w zarządzaniu ruchem miejskim, a także omówienie ich podstawowych funkcji, zalet oraz wyzwań związanych z ich wdrażaniem i eksploatacją.

2. Cele systemu ITS

2. 1. Usprawnienie wydajności infrastruktury

Głównym celem systemu jest maksymalne wykorzystanie tego, co już istnieje. Zamiast budować nowe drogi, ITS wykorzystuje przepustowość istniejących pasów.

Skrócenie czasu podróży: Dzięki funkcjom przewidującym zatory, systemy mogą sterować ruchem na drogach, by omijały one najbardziej oblężone zatorami miejsca.

Obniżanie strat ekonomicznych: Czas spędzony w korkach to realne straty dla gospodarki (np.; koszty paliwa, opóźnienia w dostawach, mniejsza produktywność pracowników).

2. 2. Podniesienie poziomu bezpieczeństwa (Vision Zero)

ITS ma za zadanie minimalizację liczby wypadków poprzez eliminację błędów ludzkich i dokładniejsza kontrolę nad ruchem.

Wykrywanie zagrożeń (Automatic Incident Detection): Kamery AI potrafią w bardzo krótkim czasie wychwycić auto jadące pod prąd, lub niesprawny pojazd blokujący drogę, natychmiast zawiadamiając służby i ostrzegając innych kierowców.

Zarządzanie ruchem: Monitory informacyjne (VMS) w szybki sposób informują kierowców o utrudnieniach w ruchu (kolizje, remonty), złym stanie nawierzchni z powodu kiepskiej pogody oraz o możliwych objazdach**.**

2. 3. Dążenie do zrównoważonego transportu

Współczesne systemy ITS nie są ukierunkowane pod transport samochodowy ich celem jest zachęcenie ludzi do zmiany nawyków transportowych.

Promocja transportu zbiorowego: „Zielona fala'' dla tramwajów i autobusów, dzięki czemu transport publiczny staje się szybszy i bardziej przewidywalny niż transport samochodowy. **Wsparcie mikro mobilności:** Szeroka dostępność rowerów oraz hulajnóg

miejskich w jednej aplikacji ułatwia przeprowadzenie podróży multimodalnych (łączenie różnych środków transportu).

2. 4. Ochrona środowiska i zdrowie mieszkańców

Redukcja negatywnego wpływu motoryzacji na otoczenie to obecnie jeden z priorytetowych działań ITS w Europie.

Redukcja emisji spalin i hałasu: Płynny ruch oznacza rzadsze hamowanie i ruszanie, co bezpośrednio przekłada się na mniejsze zużycie paliwa i niższą emisję szkodliwych spalin. Mniejszy ruch sprawia również że jest ciszej.

Monitoring czystości powietrza: Systemy ITS często łączy się ze stacjami meteo, co pozwala na wprowadzanie ograniczeń wjazdu do centrum (np. Stref Czystego Transportu) w dni o najwyższym stężeniu zanieczyszczeń.

2. 5. Dostarczanie precyzyjnych informacji w czasie rzeczywistym

Celem ITS jest minimalizacja niepewności u podróżnych.

Informacja predykcyjna: Pasażer na przystanku widzi na tablicy nie rozkład jazdy, ale faktyczny czas przyjazdu pojazdu który uwzględnia korki, a kierowca jest informowany o utrudnieniu, zanim w nie wjedzie.

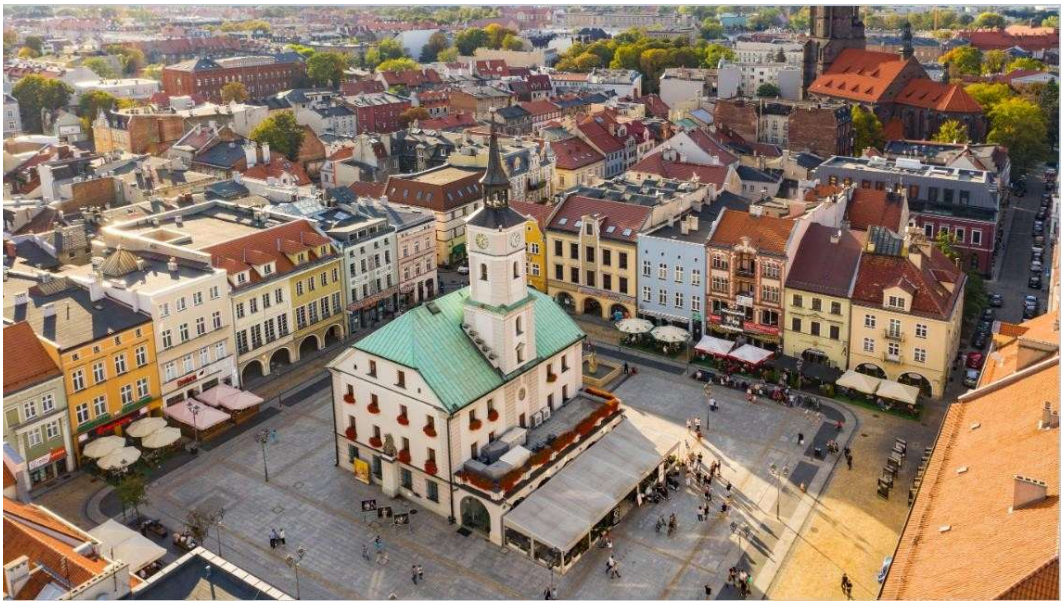
Zarządzanie parkowaniem: Systemy kierowania do wolnych miejsc parkingowych zmniejszają poszukiwania miejsc które w centrach dużych miast może stanowić duży procent całego natężenia ruchu.[37]

3.Gliwice jako inteligentne miasto – lokalizacja, demografia i nowoczesne rozwiązania transportowe

3. 1. Lokalizacja Gliwic

Gliwice są miastem położonym w południowej części Polski, w województwie Śląskim. Leży ono na skrzyżowaniu autostrad A1 i A4, więc uznawane jest za kluczowy punkt regionu [9]. **3. 2. Liczba mieszkańców**

Bazując na danych z 2024 roku, liczba mieszkańców gliwic wynosi 154 650 osób [10], chociaż liczba ta w ostatnich latach uległa pomniejszeniu. Miasto cechuje się zwartą zabudową a przemysł i usługi pełnia w nim bardzo dużą rolę.



Fotografia 3.1 Rynek w Gliwicach z lotu ptaka.

3. 3. Problemy transportowe

Największymi probleamami z jakimi borykają się Gliwice są korki na ulicach Pszczyńskiej, Toszeckiej i Dworcowej [11]. W 2009 roku miasto wycofało z użycia tramwaje [12], decyzja ta ograniczyła opcję transportu, przez co dzisiaj mieszkańcy skarżą się na długie czasy przejazdu i niski komfort podróży .

3. 4. Inteligentne sygnalizację świetlne

W gliwicach możemy zaobserwować system inteligentnych świateł, które na bieżąco dostosowują sygnalizacje do aktualnego natężenia ruchu drogowego. System inteligentnej sygnalizacji świetlnej dobrze radzi sobie z redukowaniem czasu oczekiwania na skrzyżowaniach [13].



Rysunek 3.4. Inteligentne sygnalizację świetlne.

3. 5. Inteligentne parkingi

Systemy ITS pomagają mieszkańcom Gliwic nawet w galeriach handlowych, na przykład w galerii Forum Gliwice. Specjalne diody zamontowane nad miejscami parkingowymi które widać już z daleka, przekazują kierowcom informację czy aktualnie miejsce jest wolne czy zajęte, co znacząco ułatwia szukanie miejsca parkingowego [14].

3. 6. Tablice zmiennej treści (VMS)

Na niektórych ulicach zamontowane zostały tablice, które na bieżaco pokazują liczbę wolnych miejsc parkingowych na danej ulicy. Kierowcy dzięki temu wiedzą gdzie warto szukać wolnych miejsc, co redukuję czas który poświęcili by na zbędne krążenie.

3. 7. Zastosowanie tablic (VMS) w zarządzaniu ruchem

Tablice VMS wspierają równiez zarządzanie ruchem, mogą one wyświetlać informacje o objazdach, zatorach lub ograniczeniach predkości. Pozwala to mieszkańcom na efektywniejsze planowanie tras dojazdowych i unikanie zakorkowanych odcinków ulic [15].

3. 8. Wdrażanie systemów ITS w przyszłości

Gliwice są miastem dążącym do wprowadzania ITS w ramach pomysłu Smart City [16]. W planach na przyszłość miasta jest rozwój systemów adaptujących się do ruchu drogowego w realnym czasie, zwiększenie liczby czujników i poprawa ogólnego bezpieczeństwa drogowego.

4. System transportowy

4. 1. Systemy ITS w komunikacji miejskiej

Inteligentne systemy transportowe w komunikacji miejskiej mają za zadanie usprawnienie jej ruchu poprzez priorytetyzowanie autobusów, tramwajów i taksówek na skrzyżowaniach co za tym idzie, usprawnia to przejazdy, zmiejszenie tłoków i mniejszą emisje zanieczyszczeń w komunikacji miejskiej i poprawienie komfortu podróży pasażera. Kolejnym ważnym zadaniem ITS jest informowanie pasażerów o możliwych zmianach trasy, opoznieniach lub różnorodnych przesiadkach. Ma to za zadanie powiadomienie podróżujących o jakichkolwiek zmianach co usprawni im komfort w podróży. Aktualnie w Gliwicach w systemy priorytetyzujące przejazd zostały wyposażone w 160 autobusów i 90 pojazdów ratowniczych [26].

4. 2. Infrastrukura drogowa

Najlepszym przykładem zastosowania ITS w infrastrukturze drogowej są inteligente sygnalizacje świetlne. Sygnalizacje takie będą brały pod uwage natężenie ruchu, autobusy (mowa o rozwiązaniu z punktu wczesniejszego) aby jak najbardziej usprawnić przejazd pojazdom. Systemy te będą również działały na zasadzie tablic VMS które będą informowały o korkach, objazdach i ogólnym warunkach na drodze. Inteligentne światła dla pieszych również zostaną wprowadzone na drogach mają one wykrywać osoby starsze, niepełnosprawnościami, osoby młodsze, rowerzystów czy użytkowników hulajnóg. Dzieki temu sygnalizacja świetlna dopasuje sie do realnych potrzeb i do sytuacji na drodze. W ramach ITS w gliwicach powstało również Centrum Sterowania umożliwiające ważenie pojazdów w ruchu czy system łączności CB które amatorsko umożliwia radiokomunikacje miedzy pojazdami na krótkich dystansach [25].

4. 3. Ograniczenie natężenia ruchu za pomocą ITS

Systemy które maja pomóc w zmiejszeniu natężenia ruchu tak jak była mowa i punktach wcześniejszych to miedzy innymi.

Inteligenta sygnalizacja świetlna które obejmą ponad 70 skrzyzowań w gliwicach bedą miały na celu wykrywanie natężenie ruchu jak i uwzględnianie pieszych i inteligentnie zarządzanie przepływem pojazdów.[27]

Tablice VMS które będą informawać o zmianach na drogach, wypadkach, korkach i objazdach zmiejszy to natężenie ruchu, nie potrzebne postoje co za tym idzie zmiejszy czas przejazdu i umili droge kierowcą .

5. Systemy ITS

5. 1. Co oznacza pojęcie „systemy ITS”?

Inteligentne Systemy Transportowe (ITS) to rozwiązania, które łączą nowoczesne technologie informatyczne i komunikacyjne z infrastrukturą transportową, aby usprawnić przemieszczanie się ludzi i towarów. Ich głównym zadaniem jest lepsze zarządzanie ruchem, zwiększenie bezpieczeństwa oraz zmniejszenie negatywnego wpływu transportu na środowisko.

Systemy ITS opierają się na zbieraniu i analizie danych w czasie rzeczywistym, np. z czujników czy kamer, a następnie wykorzystywaniu tych informacji do podejmowania szybkich i trafnych decyzji. Dzięki temu możliwe jest np. sprawniejsze kierowanie ruchem, informowanie kierowców o utrudnieniach czy poprawa funkcjonowania transportu publicznego.

Rozwiązania tego typu są coraz częściej stosowane w miastach i na drogach, wspierając codzienne podróże oraz przygotowując grunt pod rozwój bardziej zaawansowanych technologii, takich jak pojazdy autonomiczne czy inteligentne miasta.

5. 2. Rodzaje systemów ITS

- Inteligentne systemy transportowe można p.odzielić według obszaru, w jakim są wykorzystywane. Do najważniejszych należą:

- Systemy zarządzania ruchem drogowym monitorują natężenie ruchu, sterują sygnalizacją świetlną i kierują pojazdy na alternatywne trasy, aby zmniejszyć korki. Przykład: adaptacyjne sterowanie światłami na skrzyżowaniach w dużych miastach.
- Systemy informacji dla kierowców i pasażerów dostarczają bieżących danych o warunkach drogowych, utrudnieniach czy rozkładach jazdy.

Przykład: komunikaty o korkach i wypadkach wyświetlane na tablicach przy drogach.

- Systemy bezpieczeństwa ostrzegają przed niebezpiecznymi sytuacjami, np. gwałtownym hamowaniem pojazdu z przodu albo zbliżającym się zagrożeniem na drodze. Przykład: system automatycznego wezwania pomocy eCall montowany w samochodach.
- Systemy zarządzania transportem publicznym monitorują pozycję autobusów, tramwajów czy pociągów i optymalizują ich kursowanie.

Przykład: elektroniczne tablice informujące o przyjeździe autobusów w czasie rzeczywistym.

- Systemy poboru opłat i kontroli dostępu usprawniają przepływ pojazdów, eliminując konieczność zatrzymywania się przy bramkach.

Przykład: elektroniczne systemy opłat drogowych, np. e-TOLL.

5. 3. Zastosowanie systemów ITS - przykłady w praktyce

Przykłady zastosowań ITS w praktyce:

- W miastach: Inteligentne zarządzanie sygnalizacją świetlną, które skraca czas podróży i ogranicza emisję spalin.
- Na autostradach: Systemy wykrywania wypadków i zarządzania ruchem w sytuacjach awaryjnych.
- W transporcie publicznym: Monitorowanie tras i udostępnianie informacji o opóźnieniach w aplikacjach mobilnych.
- W logistyce: Optymalizacja tras przewozów towarowych i monitorowanie flot transportowych w czasie rzeczywistym.
- Dla służb ratunkowych: Automatyczne przekazywanie informacji o zdarzeniu, lokalizacji i liczbie uczestników wypadku.

5. 4. Znaczenie ITS dla współczesnego transportu

Wdrażanie inteligentnych systemów transportowych ma coraz większe znaczenie dla sprawnego funkcjonowania współczesnego transportu. Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych technologii możliwe jest lepsze zarządzanie ruchem oraz szybsze reagowanie na zmieniające się warunki na drogach.

Jednym z głównych efektów ich stosowania jest poprawa płynności ruchu, co pozwala ograniczyć korki i skrócić czas podróży. Systemy te przyczyniają się także do zwiększenia bezpieczeństwa poprzez wcześniejsze wykrywanie zagrożeń i wspieranie działań służb ratunkowych.

Dodatkowo wpływają one na komfort życia mieszkańców, zmniejszając stres związany z codziennym przemieszczaniem się oraz sprzyjając ograniczeniu negatywnego wpływu transportu na środowisko.

6. Problemy transportowe

Gliwice są jednym z najważniejszych węzłów komunikacyjnych w Polsce ze względu na przecięcie się autostrad A1 i A4. Ponadto, Gliwice są położone przy Drogowej Trasie Średnicowej. Duże natężenie ruchu tranzytowego oraz gęsta zabudowa miejska sprawiają, że miasto mierzy się z problemami w płynności przemieszczania się i jakością życia.

6. 1. Główne wyzwania transportowe miasta

Problemy transportowe Gliwic można podzielić na kluczowe obszary:

1. Zakorkowane ulice - zbyt duże natężenie ruchu drogowego prowadzi do paraliżu głównych dróg szczególnie w godzinach szczytu przykładem tego są częste zatory na odcinkach DK11 oraz przy zjazdach na autostrady
2. Wysoka emisja spalin - koncentracja ruchu samochodowego w centrum oraz na drogach dojazdowych powoduje przekroczenie norm jakości powietrza.
3. Hałas - duże ilości samochodów na drogach generuje nieprzyjemny hałas.
4. Problemy organizacyjne i logistyczne - trudności w gospodarowaniu przestrzenią publiczną oraz synchronizacji różnych środków transportu wewnątrz aglomeracji skutkuje brakiem miejsc parkingowych w strefie płatnego parkowania w okolicach starówki oraz Politechniki Śląskiej.

6. 2. Negatywny wpływ transportu na funkcjonowanie miasta

Utrudnienia w ruchu drogowym w Gliwicach niosą za sobą szereg negatywnych konsekwencji:

1. Ekonomiczne: duża ilość paliwa marnowana podczas postoju w korkach
2. Społeczne: wydłużony czas dojazdów powoduje stres kierowców za tym idzie obniżenie bezpieczeństwa innych uczestników ruchu drogowego
3. Środowiskowe: duża emisja spalin niosąca za sobą negatywny wpływ na środowisko miasta oraz zdrowie mieszkańców wdychających spaliny

6. 3. ITS jako rozwiązanie problemów Gliwic

Aby rozwiązać powyższe problemy Gliwice wprowadzają do miasta system ITS, który ma na celu upowszechnienie korzystania z transportu publicznego, przez skracanie czasu dojazdu autobusów dzięki inteligentnemu sterowaniu sygnalizacją świetlną, budowanie tablic o zmiennej treści informującej kierowców o drogach z mniejszym ruchem oraz sygnalizacje parkingowe informujące o wolnych miejscach parkingowych.

7. Rozwiązania ITS

Wdrożenie systemów ITS pozwala na przejście od statycznego do dynamicznego zarządzania infrastrukturą, co jest niezbędne w obliczu rosnącej urbanizacji. Współczesne systemy oraz rozwiązania opierają się na fuzji danych z wielu źródeł, tym samym umożliwiając optymalizację przepustowości na skrzyżowaniach bez konieczności kosztownej rozbudowy fizycznej infrastruktury miejskiej [28, 30].

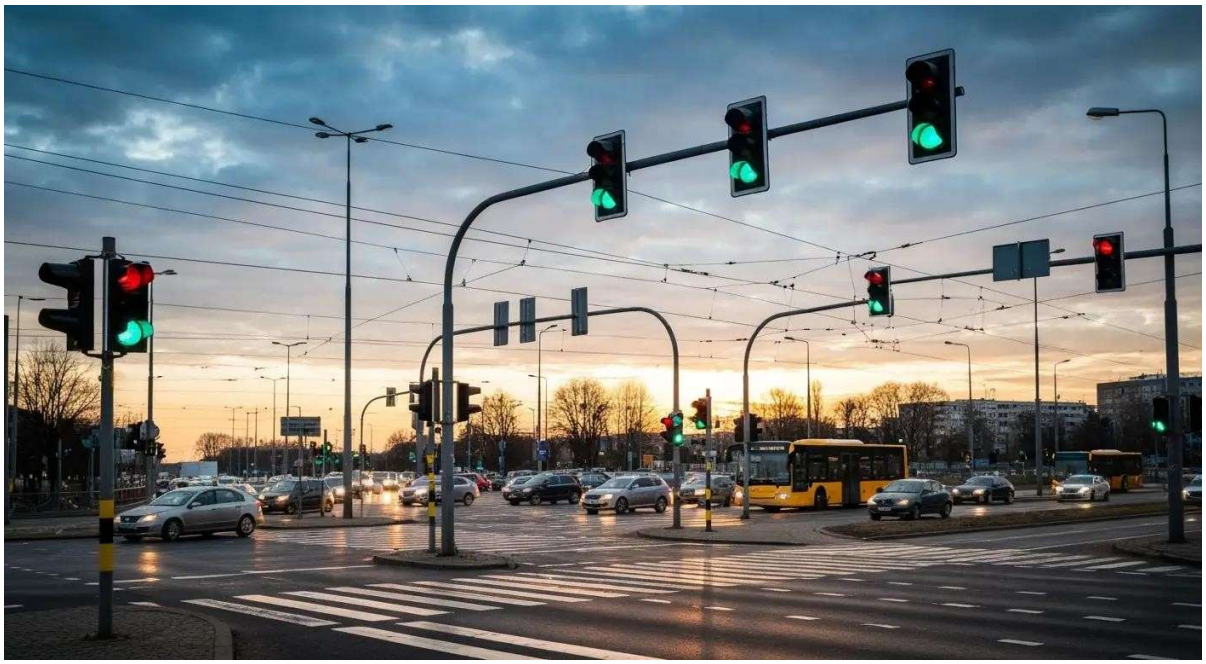
7. 1. INTELIGENTNA SYGNALIZACJA ŚWIETLNA

Fundamentem nowoczesnego skrzyżowania jest odejście od tradycyjnych stałoczasowych systemów sygnalizacji świetlnej na rzecz algorytmów adaptacyjnych. Systemy te nie tylko

zliczają pojazdy, ale analizują strukturę ruchu w czasie rzeczywistym, przewidując tym samym tworzenie się zatorów oraz korków zanim te zdążą się uformować [32].

Mechanizm ich działania opiera się na wykorzystaniu pętli indukcyjnych, wideodetekcji oraz czujników podczerwieni do precyzyjnego monitorowania długości kolejek i dostawania fazy zielonej. Ponadto na podstawie modułów GPS oraz GALILEO systemy automatycznie rozpoznają pojazdy transportu zbiorowego (autobusy, tramwaje) oraz przyznają im priorytet co pozwala skrócić ich czas przejazdu o 15%-25% [29].

Efektem opisanych wyżej rozwiązań jest redukcja liczby zatrzymań pojazdów nawet o 30% oraz spadek emisji szkodliwych substancji takich jak CO2 czy NOx wynikający z braku konieczności ciągłego zatrzymania i ruszania pojazdów stojących w korku [28].



Rysunek 7.1. Sygnalizacja świetlna

7. 2. SYSTEMY ZARZĄDZANIA RUCHEM (UTMS)

Zintegrowanie systemy zarządzania ruchem miejskim (Urban Traffic Management Systems) stanowią „mózg” infrastruktury miejskiej. Łączą one dane z monitoringu wizyjnego, stacji pogodowych oraz czujników ruchu, aby koordynować przepływ pojazdów całych dzielnic lub aglomeracji w sposób scentralizowany, automatycznie reagując na incydenty drogowe [31].

VMS (Variable Message Signs), czyli dynamiczne tablice zmiennej treści, przekazują w czasie rzeczywistym informacje o wypadkach, sugerowanych objazdach czy trudnych warunkach atmosferycznych, co pozwala rozproszyć ruch na mniej obciążone trasy. Automatyczna detekcja zdarzeń (AID) oparta na sztucznej inteligencji skraca również czas

powiadomienia służb ratunkowych o 20–40%, co ma kluczowe znaczenie dla przeżywalności ofiar wypadków drogowych [29], [33].

Poza opisanymi rozwiązaniami inscenizują również systemy naprowadzania na wolne miejsca postojowe redukujące tzw. „ruch krążący" osób poszukujących parkingu, który w centrach dużych miast generuje nawet 30% całkowitego natężenia ruchu [30].

7. 3. OPTYMALIZACJA TRAS

Nowoczesna optymalizacja wykracza poza statyczne nawigacje, opierając się na architekturze V2X (Vehicle-to-Everything). Polega ona na ciągłej wymianie informacji między pojazdami a infrastrukturą oraz wykorzystaniu technologii Big Data do modelowania zachowań kierowców i przewidywania zmian w obciążeniu sieci drogowej w zależności od pory dnia czy wydarzeń masowych [31], [33].

W optymalizacji tras dużą rolę odgrywa dynamiczne wyznaczanie tras oparte na algorytmach wykorzystujących dane typu FCD (Floating Car Data) z tysięcy pojazdów jednocześnie, co pozwala systemom miejskim na sugerowanie alternatywnych korytarzy transportowych zanim główna trasa ulegnie całkowitemu zablokowaniu. Sterowanie dopływem ruchu między innymi na autostrady miejskie i obwodnice poprzez sygnalizację na wjazdach, zapobiega przekroczeniu przepustowości krytycznej i powstawaniu tzw. zatorów typu „stop-and-go". Skuteczna optymalizacja tras pozwala na zwiększenie przepustowości istniejących dróg o 10–20%, co bezpośrednio przekłada się na realne oszczędności czasu i paliwa dla użytkowników dróg [28], [29], [32].



Rysunek 7.3. Optymalizacja tras

8. Analiza danych

8. 1. Wprowadzanie danych

W badaniu wykorzystano dane zebrane z kamer ITS, czujników ruchu oraz systemów monitoringu transportu publicznego. Obejmują one:

-natężenie ruchu na głównych drogach (ul. Pszczyńska, Toszecka, Dworcowa),

-częstotliwość postojów i średnie prędkości,

-stężenie CO_2, PM2,5 i PM10,

-czas podróży autobusem,

-wskaźnik zajętości miejsc parkingowych oraz czas poszukiwania miejsca parkingowego.

Dane te umożliwiają analizę wpływu ITS na przepływ ruchu i rzetelnie odzwierciedlają rzeczywistą sytuację na drogach.

8. 2. Metody analizy

Wykorzystano:

-analizę statystyczną (średnie, odchylenia oraz porównania sytuacji przed wdrożeniem ITS i po nim),

-symulacje przepływu ruchu (ocena efektywności sygnałów adaptacyjnych),

-analizę korelacji (związek między hałasem, emisjami a natężeniem ruchu),

-analizę środowiskową (porównanie dni o różnym obciążeniu ruchem),

-badanie danych parkingowych (wpływ inteligentnego parkowania na ruch w centrum miasta).

8. 3. Wyniki

Analiza danych zebranych z systemu ITS oraz czujników środowiskowych w Gliwicach wykazała istotną poprawę kluczowych wskaźników efektywności transportu oraz jakości życia

mieszkańców. Poniżej przedstawiono szczegółowe zestawienie wyników w podziale na obszary funkcjonalne.

8. 3. 1. Płynność ruchu

-Liczba zatrzymań na skrzyżowaniach spadła o 18–25%.
-Średni czas przejazdu skrócił się o 10–15%.
-Średnia prędkość wzrosła o 8–12%.

8. 3. 2. Hałas i emisje

-Emisja CO_2 spadła o 12–18%.
-Emisje PM2,5 i PM10 zmniejszyły się o 8–12%.
-Poziom hałasu obniżył się o 2–4 dB.

8. 3. 3. Transport publiczny

-Czas podróży autobusem skrócił się o 6–10%.
-Liczba opóźnień spadła o 12–20%.

8. 3. 4. Inteligentne parkowanie

-Czas potrzebny na znalezienie miejsca parkingowego skrócił się o 30–40%.
-Ruch generowany przez poszukiwanie miejsca parkingowego zmniejszył się o 25–35%.

9. Porównanie

9. 1. Gliwice – „Cichy profesjonalista”

Gliwice nie bawią się w gadżety, tylko w konkret. Mamy jeden z najnowocześniejszych systemów w Polsce, który faktycznie spina całe miasto.

Co tu działa: System widzi wszystko – od natężenia ruchu po pogodę. W 2026 roku właśnie kończymy wielką rozbudowę (za ponad 30 mln zł), która daje priorytet autobusom na 70 skrzyżowaniach.

W czym jest lepszy: Gliwice mają genialne Centrum Sterowania Ruchem, które realnie skraca czas przejazdu przez miasto, a nie tylko ładnie wygląda na wykresach.

9.2. Wrocław – „Stary wyjadacz”

Wrocław jako jeden z pierwszych w Polsce postawił na wielki ITS, ale miasto jest tak duże i zakorkowane, że technologia czasem ledwo wyrabia.

Podejście: Tam ITS skupia się głównie na tym, żeby tramwaje nie stały na światłach (tzw. priorytet dla MPK).

Różnica: We Wrocławiu ITS to walka o przetrwanie w ogromnym ruchu. W Gliwicach system jest bardziej „chirurgiczny” – precyzyjnie dba o płynność na mniejszej, ale gęstej siatce ulic.

9. 3. Rzeszów – „Technologiczny prymus”

Rzeszów to takie polskie "mini-Dubai" pod względem technologii. Tam wszystko musi być „smart”.

Podejście: Mają systemy, które nie tylko sterują światłami, ale też np. ważą ciężarówki w locie, żeby nie niszczyły asfaltu.

Różnica: Rzeszów mocno stawia na bezpieczeństwo i eliminowanie wykroczeń (kamery na czerwonym świetle). Gliwice z kolei bardziej idą w stronę Smart Mobility – ułatwiania życia pieszym, rowerzystom i pasażerom autobusów.

10. Wpływ na środowisko

Transport drogowy jest jednym z największych emitentów zanieczyszczeń w środowisku miejskim. Według danych Europejskiej Agencji Środowiska, sektor transportu odpowiada za niemal 25% całkowitej emisji CO_2 w Unii Europejskiej, a w dużych aglomeracjach jest również

głównym źródłem hałasu i zanieczyszczenia powietrza. Inteligentne Systemy Transportowe (ITS) oferują konkretne, mierzalne odpowiedzi na te wyzwania — nie przez ograniczanie mobilności, lecz przez radykalne zwiększenie jej efektywności. Ich wdrożenie przekłada się jednocześnie na trzy wzajemnie powiązane korzyści środowiskowe: redukcję emisji CO_2, obniżenie poziomu hałasu oraz poprawę ogólnej efektywności energetycznej transportu.

10.1. Emisja CO_2

Jak korek generuje emisje?

Intuicja podpowiada, że samochód stojący w korku nie emituje spalin — silnik przecież „nie pracuje na pełnych obrotach". Jest to jednak błędne przekonanie. Silnik spalinowy pracujący na biegu jałowym w zatłoczonym ruchu zużywa paliwo nieustannie, nie generując przy tym żadnego przesunięcia pojazdu. Każdy cykl zatrzymaj-ruszaj (stop-and-go), wymuszone gwałtowne przyspieszanie po czerwonym świetle oraz pełzanie w korku to sytuacje, w których wskaźnik emisji CO_2 na kilometr rośnie kilkukrotnie powyżej wartości nominalnych. Właśnie w tym obszarze systemy ITS odgrywają kluczową rolę.

Adaptacyjna sygnalizacja świetlna i „zielona fala"

Podstawowym mechanizmem redukcji emisji w systemach ITS jest upłynnienie ruchu. Inteligentna sygnalizacja świetlna, sterowana algorytmami analizującymi bieżące natężenie ruchu z setek czujników, dynamicznie dostosowuje cykle świateł, tworząc tzw. zielone fale — tzn. sekwencje zielonych sygnałów umożliwiające przejazd bez zatrzymania przez kolejne skrzyżowania. Pojazd poruszający się jednostajnie ze stałą, optymalną prędkością emituje nawet kilkukrotnie mniej CO_2 niż ten, który kilkanaście razy zatrzymuje się i rusza na odcinku kilku kilometrów.

Dane i wyniki

-Według badań Njorda i współpracowników (2006), systemy ITS odpowiadają za redukcję emisji spalin średnio o 40%, przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii o blisko 60%.

-Literatura przedmiotu (Oskarbski i in., 2006) wskazuje na spodziewany zakres redukcji emisji zanieczyszczeń wynoszący od 30% do 50% i zmniejszenie zużycia energii od 45% do 70%, w zależności od stopnia zaawansowania wdrożenia.

-Analizy Międzynarodowego Forum Transportu (ITF/OECD) wskazują, że na samych skrzyżowaniach odpowiednio zarządzanych przez systemy ITS możliwe jest osiągnięcie do 25% redukcji emisji CO_2.

-Na poziomie konkretnych pojazdów: dzięki skróceniu czasu przejazdu tylko o 1 minutę i 41 sekund na kurs, emisja zanieczyszczeń z jednego autobusu miejskiego spada o co najmniej 42,02 g CO, 1,212 g PM2,5 i 1,279 g PM10 — a w skali całej floty komunikacji miejskiej daje to redukcję śladu węglowego nawet o 0,5 tony CO dziennie.

-W Krakowie, po wprowadzeniu stref niskiej emisji i systemów zarządzania ruchem zintegrowanych z ITS, średnioroczne poziomy PM2,5 zmniejszyły się o 15% w latach 2015–2022.

Inteligentne parkingi a emisja „szukająca miejsca"

Często pomijanym, lecz zaskakująco istotnym źródłem emisji miejskiej jest zjawisko krążenia pojazdów w poszukiwaniu wolnego miejsca parkingowego. Szacuje się, że stanowi ono nawet 30% ruchu w centrum miast w godzinach szczytu. Systemy ITS wyposażone w moduły inteligentnego zarządzania parkingami (z czujnikami zajętości stanowisk i dynamiczną informacją kierowcy) pozwalają zredukować udział tego rodzaju ruchu o nawet 40%, co bezpośrednio i natychmiastowo przekłada się na spadek emisji w strefach o największej gęstości zabudowy.

10.2. Hałas

Hałas jako „niewidoczny smog"

Hałas komunikacyjny jest jednym z najpoważniejszych, a jednocześnie najczęściej niedocenianych problemów środowiskowych w miastach. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), długotrwała ekspozycja na poziom dźwięku przekraczający 55 dB(A) prowadzi do zaburzeń snu, wzrostu ryzyka chorób układu krążenia i przewlekłego stresu. Badania Europejskiego Urzędu Środowiska wskazują, że redukcja hałasu drogowego jest bezpośrednio powiązana ze zmniejszeniem ryzyka chorób sercowo-naczyniowych o 5–10% wśród mieszkańców zabudowy przy głównych arteriach. Systemy ITS oddziałują na hałas miejski wielotorowo.

Eliminacja cyklu stop-and-go

Mechanizm jest analogiczny do tego opisywanego w kontekście emisji CO_2: każde gwałtowne przyspieszenie silnika, każde piszczenie opon na asfalcie i każdy huk hamowania to piki hałasu w środowisku miejskim. Upłynnienie ruchu przez adaptacyjną sygnalizację świetlną systemów ITS eliminuje te anomalie akustyczne. Ciągły, jednostajny przepływ pojazdów generuje hałas o znacznie niższym natężeniu i — co kluczowe — bardziej przewidywalny, któremu łatwiej jest zarządzać w planowaniu urbanistycznym.

Priorytet dla cichszych środków transportu

Systemy ITS nie zarządzają ruchem w sposób neutralny — aktywnie promują środki transportu o niskiej emisji akustycznej. Uprzywilejowanie w sygnalizacji tramwajów i autobusów elektrycznych, rozbudowa i cyfrowe zarządzanie infrastrukturą rowerową oraz wdrożenie stref ograniczonego ruchu (Low Traffic Neighbourhoods) to narzędzia ITS bezpośrednio redukujące poziom hałasu. Nowoczesne tramwaje na zoptymalizowanych trasach generują o 10–15 dB mniej hałasu w porównaniu do równoważnej liczby samochodów

osobowych. Rowerzyści i piesi, obsługiwani przez inteligentną sygnalizację ITS, stanowią natomiast tzw. cichy bufor akustyczny w gęstej zabudowie.

Efekty środowiskowe wdrożeń ITS w obszarze hałasu potwierdzają dane z europejskich miast:

-Według dyrektora generalnego Kapsch Polska, Marka Cywińskiego, wdrożenie rozwiązań ITS może przynieść spadek natężenia hałasu i zanieczyszczenia powietrza w miastach o 20%.

-W Lizbonie, po kompleksowym wdrożeniu systemu ITS zintegrowanego z siecią ścieżek rowerowych, średni poziom hałasu w centrum miasta spadł o 8 dB — co odpowiada subiektywnie odczuwalnemu przez mieszkańców dwukrotnemu zmniejszeniu głośności ruchu ulicznego.

-W Katowicach po rozbudowie inteligentnej infrastruktury transportowej odnotowano spadek skarg mieszkańców na hałas o 20%.

-Projekt europejski SILENCE wykazał, że skoordynowane wdrożenie systemów zarządzania ruchem może obniżyć emisję hałasu drogowego o nawet 10 dB(A).

Hałas a jakość życia — wymiar biochemiczny

Warto podkreślić aspekt, który rzadko pojawia się w dyskusjach inżynierskich. Badania neuronaukowe wskazują, że nawet redukcja hałasu o 3 dB — choć prawie niezauważalna dla ludzkiego ucha — przekłada się na mierzalne obniżenie poziomu kortyzolu (hormonu stresu) we krwi mieszkańców budynków zlokalizowanych przy głównych arteriach komunikacyjnych. Systemy ITS, eliminując najbardziej uciążliwe piki hałasu w cyklu stop-and-go, wnoszą realny wkład w zdrowie publiczne, który trudno skwantyfikować, ale który jest neurologicznie udokumentowany.

10.3. Efektywność

Efektywność jako fundament zrównoważonego transportu;

„Efektywność" w kontekście systemów ITS to pojęcie wielowymiarowe. Nie chodzi wyłącznie o skrócenie czasu przejazdu (choć i to jest mierzalne), lecz o osiągnięcie maksymalnego efektu transportowego przy minimalnym zużyciu zasobów — paliwa, energii elektrycznej, czasu i powierzchni infrastruktury. Właśnie ta zasada sprawia, że systemy ITS są uznawane za kluczowy element strategii zrównoważonego rozwoju miast przez Unię Europejską i OECD.

10.3.1. Efektywność przepustowości infrastruktury

Jednym z bardziej spektakularnych efektów wdrożenia ITS jest wzrost przepustowości istniejącej infrastruktury drogowej bez jej fizycznej rozbudowy. Badania wskazują, że systemy ITS zwiększają przepustowość infrastruktury transportowej średnio o 22,5%. Oznacza to, że tą samą drogą może w tym samym czasie przejechać o jedną piątą więcej pojazdów — bez wylania ani jednego litra betonu, bez wycinki drzew i bez wywłaszczania mieszkańców.

10. 3. 2. Efektywność energetyczna floty i taboru

Systemy ITS mają bezpośredni wpływ na zużycie energii przez pojazdy poruszające się w zarządzanej przez nie sieci. Kluczowe mechanizmy to:

Optymalizacja prędkości przejazdu (GLOSA):

Technologia Green Light Optimized Speed Advisory informuje kierowców lub systemy pojazdów autonomicznych o optymalnej prędkości pozwalającej dotrzeć do kolejnego skrzyżowania na zielonym świetle. Pojazd nie zwalnia gwałtownie, by zatrzymać się na czerwonym, lecz płynnie dostosowuje prędkość — silnik pracuje w optymalnym zakresie obrotów, co minimalizuje zużycie paliwa lub energii elektrycznej.

Priorytet dla transportu publicznego:

Systemy ITS aktywnie skracają czas przejazdu autobusów i tramwajów, zwiększając ich atrakcyjność względem transportu indywidualnego. Badania wykazują, że wdrożenie ITS może zmniejszyć czas przejazdu pojazdów komunikacji publicznej o 40% do nawet 70%. Każdy pasażer, który przesiada się z samochodu do autobusu, wielokrotnie redukuje swój ślad węglowy — jeden autobus z 50 pasażerami zastępuje bowiem 40–45 samochodów osobowych.

Ładowanie adaptacyjne pojazdów elektrycznych:

W inteligentnym mieście systemy ITS mogą integrować się z infrastrukturą ładowania pojazdów elektrycznych, kierując pojazdy do ładowania w godzinach niskiego zapotrzebowania na energię w sieci — co optymalizuje bilans energetyczny całego miasta.

10. 3. 3. Efektywność systemu w liczbach — zestawienie

Syntetyzując dane z przytoczonych badań naukowych i wdrożeń praktycznych, można sformułować następujące wnioski ilościowe (tabela 1):

Tabela 1. Zestawienie efektów środowiskowych wdrożenia systemów ITS

Wskaźnik	Efekt wdrożenia ITS
Redukcja emisji spalin (CO_2, CO, NO_x)	30–50% (średnio 40%)
Zmniejszenie zużycia energii przez transport	45–70% (średnio ~60%)
Wzrost przepustowości infrastruktury	+22,5%
Redukcja hałasu i zanieczyszczeń powietrza	~20%
Redukcja ruchu parkingowego (szukanie miejsca)	–40%
Skrócenie czasu przejazdu komunikacji publicznej	40–70%

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Tomaszewska (2023), Njord i in. (2006), Oskarbski i in. (2006), Kapsch Polska, ITF/OECD.

10. 3. 4. Efektywność systemowa — ITS jako „mnożnik zieloności"

Najważniejszym i najtrudniejszym do skwantyfikowania aspektem efektywności systemów ITS jest ich efekt mnożnikowy (multiplier effect). ITS nie działają w izolacji — tworzą ekosystem, w którym każde wdrożone rozwiązanie wzmacnia efekty pozostałych. Inteligentna sygnalizacja świetlna zmniejsza korki → mniejsze korki obniżają emisje → niższe emisje poprawiają jakość powietrza → lepsza jakość powietrza zachęca do jazdy rowerem → więcej rowerzystów redukuje ruch samochodowy → mniejszy ruch samochodowy pozwala na dalsze upłynnienie przez ITS.

Ten samowzmacniający się cykl pozytywnych sprzężeń zwrotnych sprawia, że zwrot z inwestycji w systemy ITS, mierzony w kategoriach środowiskowych, jest nieproporcjonalnie wysoki w stosunku do nakładów finansowych. Europejski Bank Inwestycyjny szacuje, że każde euro zainwestowane w inteligentne zarządzanie ruchem generuje od 3 do 8 euro korzyści środowiskowo-społecznych, gdy uwzględni się koszty zdrowotne smogu, hałasu i wypadków drogowych.

11. Przyszłość systemów ITS i Smart City

Rozwój Inteligentnych Systemów Transportowych zmierza w stronę pełnej integracji technologii z codziennymi potrzebami mieszkańców. Przyszłość to nie tylko szybszy przejazd, ale przede wszystkim miasto, które "myśli" i reaguje na sytuację w czasie rzeczywistym, dążąc do idei Smart City.



Rysynek 11. 1. Inteligentne miasta: Jak technologia zmienia przestrzeń miejską

11. 1. Sztuczna Inteligencja (AI) w zarządzaniu ruchem

Sztuczna inteligencja przestaje być tylko narzędziem analitycznym, a staje się aktywnym zarządcą (rys. 11.1). Algorytmy uczenia maszynowego potrafią przewidywać korki, zanim one powstaną, analizując dane historyczne i bieżące zdarzenia (np. Koncerty w Spodku czy mecze).

-Adaptacyjna sygnalizacja sieciowa: Klasyczne światła drogowe działają według sztywnych, czasowych harmonogramów. Algorytmy AI wprowadzają sterowanie w pełni adaptacyjne, obejmujące nie pojedyncze skrzyżowania, ale całe strefy miasta. System na bieżąco analizuje potoki ruchu z setek czujników i dynamicznie przelicza cykle świateł. Dzięki temu tworzy tzw. „zielone fale" tam, gdzie w danej sekundzie są najbardziej potrzebne, minimalizując straty czasu na ruszanie i hamowanie.

-Wizja komputerowa (Computer Vision): Zamiast tradycyjnych pętli indukcyjnych w asfalcie, które jedynie zaliczają przejażdżające osie, inteligentne skrzyżowania wykorzystują kamery z algorytmami głębokiego uczenia (Deep Learning). AI potrafi w czasie rzeczywistym klasyfikować obiekty. Rozpoznaje, czy do skrzyżowania zbliża się samochód osobowy, ciężarówka, czy karetka na sygnale. Potrafi również identyfikować pieszych i rowerzystów,

automatycznie wydłużając zielone światło, gdy wykryje dużą grupę osób oczekujących na przejściu.

-Automatyczne Wykrywanie Zdarzeń (AID- Automatic Incident detection): W zarządzaniu ruchem(szczególnie na autostradach i w tunelach) kluczowy jest czas reakcji. Algorytmy AI są trenowane do błyskawicznego wykrywania anomalii. Jeśli kamera zarejestruje spadek ładunku, pojazd jadący pod prąd, gwałtowne hamowanie czy pojawienie się dymu, system w ułamku sekundy samoczynnie alarmuje dyspozytorów, obniża dopuszczalną prędkość na znakach i zamyka niebezpieczny pas ruchu.

-Analityka predykcyjna (Predictive Analystics): To największa przewaga Sztucznej Inteligencji nad starszymi systemami. AI nie czeka, aż powstanie zator - ona go przewiduje. Przetwarzając ogromne zbiory danych (Big Data), system łączy informacje o historycznym natężeniu ruchu z danymi o aktualnej pogodzie, lokalizacji robót drogowych, anawet kalendarzem imprez masowych. Jeśli np. algorytm “wie”, że za 15 minut skończy się duży koncert, a na horyzoncie widać burze, system prewencyjnie zmienia organizację ruchu i wyświetla objazdy na tablicach zmiennej treści (VMS), zanim kierowcy zdążą utknąc w korku.[34]

11. 2. Autonomiczne pojazdy i komunikacja V2X

Wprowadzenie pojazdów autonomicznych to rewolucja w bezpieczeństwie i przepustowości. Kluczowym elementem jest technologia **V2X (Vehicle-to-Everything)**, czyli komunikacja pojazdu z otoczeniem.

11. 2. 1. Warstwy komunikacji w ekosystemie V2X

System V2X to nie jedna technologia, ale zestaw protokołów, które muszą ze sobą współpracować, aby wyeliminować błąd ludzki:

-V2V (Vehicle-to-Vehicle): Samochody wymieniają się danymi o prędkości, pozycji i wektorze ruchu 10 razy na sekundę. Pozwala to na tworzenie **wirtualnych pociągów drogowych (platooning)**, gdzie auta jadą w minimalnych odstępach, redukując opór powietrza i zwiększając przepustowość pasa ruchu o nawet 50% bez jego poszerzenia. **-V2I (Vehicle-to-Infrastructure)**: To bezpośrednie połączenie auta z jednostkami przy drogach (RSU- Road Side Units). Kluczową funkcją jest tu **GLOSA (Green Light Optimized Speed Advisory)** - auto otrzymuje z wyprzedzeniem informację o cyklu świateł i sugeruje kierowcy (lub ustawia tempomat) na prędkość, która gwarantuje przejazd bez zatrzymania.

-V2P (Vehicle-to-Pedestrian): Wykorzystanie sygnałów w urządzeń mobilnych do ostrzegania pojazdów o obecności pieszych w martwym polu lub w miejscach o ograniczonej widoczności, co jest fundamentem bezpieczeństwa w gęstej zabudowie miejskiej. [35]

11. 2. 2. Autonomia “Ostatniej Mili” i logistyka miejska

W kontekście Smart City autonomia rozwiązuje problem najdroższego etapu transportu – tzw. Ostatniej mili.

-Dostawy bezzałogowe: Wykorzystanie robotów transportowych do dostarczania przesyłek w centrach miast pozwala na całkowite wyłączenie ruchu ciężkich furgonetek dostawczych z wąskich uliczek, co drastycznie poprawia bezpieczeństwo pieszych i redukuje hałas.

11. 2. 3. Infrastruktura jako “Przedłużenie Zmysłów” pojazdu

Pojazdy autonomiczne nie muszą być idealne, jeśli infrastruktura im pomaga. W inteligentnym mieście to droga “prowadzi” samochód:

-Krawędziowe przetwarzanie danych (Edge Computing): Zamiast wysyłać wszystkie dane do chmury, obliczenia odbywają się na sterownikach przy skrzyżowaniach. Dzięki temu opóźnienia w reakcji (latency) spadają poniżej 10ms, co jest niezbędne przy wyskoich prędkościach.

-Cyfrowe oznakowanie: Tradycyjne znaki drogowe stają się zbędne, gdy auto pobiera limity prędkości i ostrzeżenia o pogodzie bezpośrednio z cyfrowej mapy miasta, która jest aktualizowana co sekundę przez centralny system ITS.

11. 2. 4. Wyzwania wdrożeniowe: Standaryzacja i Bezpieczeństwo

Aby powyższe rozwiązania działały, inżynierowie muszą rozwiązać dwa kluczowe problemy:

- **Interoperacyjność**: Niezależnie od marki pojazdu, każde auto musi “mówić” tym samym językiem(protokoły DSRC lub C-V2X), aby móc porozumieć się ze sterownikiem świateł w dowolnym mieście.

- **Cyberbezpieczeństwo**: Systemy V2X wymagają zaawansowanego szyfrowania i certyfikatów autentyczności, aby uniemożliwić przejęcie kontroli nad ruchem lub wysyłanie fałszywych sygnałów o wypadkach przez osoby niepowołane.

11. 3. Wizja Smart City, a jakość życia

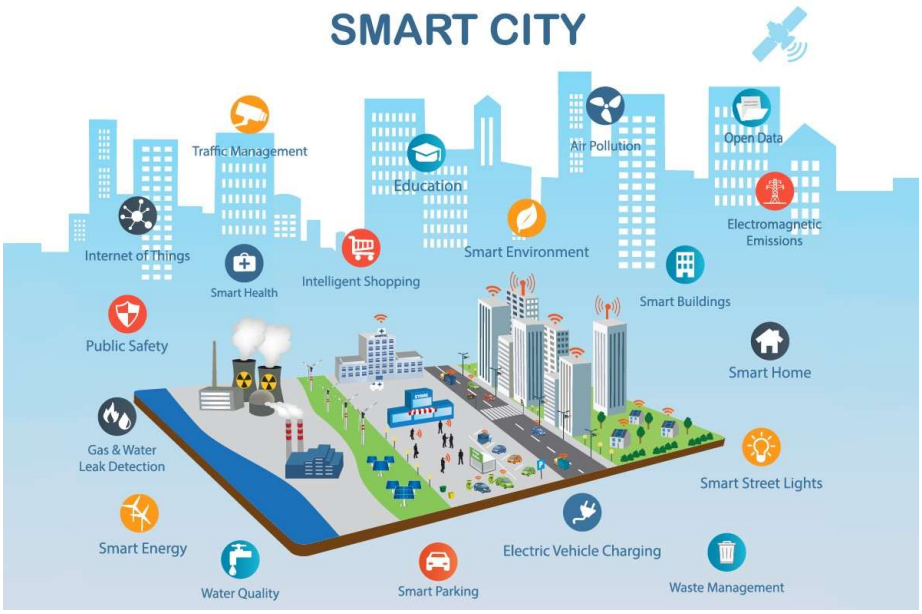
Koncepcja Smart City (inteligentnego miasta) często kojarzona jest wyłącznie z wszechobecną technologią, jednak jej nadrzędnym celem jest optymalizacja warunków bytowych obywateli. W inteligentym zarządzaniu przestrzenią dane systemów ITS i czyjników IoT(Internet of Things) stają się narzędziem do budowania miasta przyjaznego i bezpiecznego. [36]

11. 3. 1. Optymalizacja czasu i redukcja stresu transportowego

Największym obiązeniem dla jakości życia w algomeracjach jest tzw. **Wykluczenie transportowe** oraz strata czasu w zatorach (rys.11.3.1.).

-Płynność przemieszczania: Dzięki integracji danych z sensorów (takich jak badane w niniejszej pracy czujniki przemieszczania), systemy sterowania ruchem potrafią skrócić czas przejazdu o średnio 20%. Dla mieszkańca oznacza to odzyskanie kilkunastu minut dziennie, co w skali roku przekłada sie na kilkanaście dni wolnego czasu.

-Multimedialność: Smart City oferuje jedną platformę (MaaS- Mobility as a Service), która łączy rower miejski, autobus i auto-sharing. System „wie", kiedy Twój pociąg się spóźni i automatycznie rezerwuje dla Ciebie hulajnogę elektryczną na stacji docelowej, abyś zdążył do pracy bez stresu.



Rysunek 11.3.1. Infrastruktura inteligentnych miast

11. 3. 2. Zdrowie i ochrona środowiska (Ekosystem sensoryczny)

Jakość życia to przede wszystkim czyste powietrze i brak hałasu. Inteligentne miasto wykorzystuje dane do walki ze smogiem:

-Dynamiczne zarządzanie emisją: Sensory jakości powietrza zintegrowane z sygnalizacją świetlną mogą automatycznie ograniczać wjazd pojazdów ciężarowych do stref mieszkalnych w dni o wyskoim stężeniu pyłów PM2.5 i PM10.
-Redukcja smogu akustycznego: Systemy ITS, poprzez upłynnienie ruchu (eliminację cyklu stop-and-go), drastycznie zmiejszają hałas generowany przez silniki i hamulce, co bezpośrednio wpływa na obniżenie poziomu kortyzolu (hormon stresu) u mieszkańców budynków przy głównych arteriach.

11. 3. 3. Bezpieczeństwo i „Vision Zero”

Wizja Smart City dąży do standardu **Vision Zero** - całkowitej eliminacji śmiertelnych wypadków drogowych.

-Prewencja wypadkowa: Systemy AI analizujące obraz z kamer potrafią wykryć niebezpieczne zachowania (np. Wtargnięcie pieszego) i natychmiast ostrzec kierowców pojazdów połączonych (V2X).
-Inteligentne oświetlenie: Latarnie miejskie wyposażone w czujniki ruchu rozjaśniają się tylko wtedy, gdy wykryją pieszego lub rowerzystę. Zwiększa to poczucie

bezpieczeństwa po zmroku, jednocześnie ograniczając zanieczyszczenie światłem i zużyciem energii o nawet 60%.

11. 3. 4. Partycypcja i miasto „15-minutowe”

Technologia Smart City pozwala na realizację idei miasta 15-minutowego, gdzie wszystkie kluczowe usługi (sklep, lekarz, park) są dostępne w zasięgu krótkiego spaceru.

Analiza potoków ludzkich: Dzięki anonimowym danym z sieci komórkowych i czujników miejskich, planiści wiedzą dokładnie, gdzie brakuje przystanku autobusowego lub nowej ścieżki rowerowej. Decyzje o przebudowie ulic nie są podejmowane „na wyczucie”, ale na podstawie twardych danych o potrzebach mieszkańców.

12. Wnioski

Podsumowywując, Inteligentne Systemy Transportowe (ITS) są wykorzystywane do zarządzania ruchem, transportem publicznym oraz infrastrukturą drogową. Ich głównym celem jest zwiększenie efektywności, bezpieczeństwa i płynności transportu przy jednoczesnym ograniczaniu negatywnego wpływu na środowisko.

ITS stanowią kluczowy element rozwoju nowoczesnych miast i transportu przyszłości. Pomimo wysokich kosztów wdrożenia, korzyści w postaci poprawy bezpieczeństwa, efektywności i ochrony środowiska sprawiają, że ich rozwój jest uzasadniony.W przyszłości znaczenie ITS będzie rosło, zwłaszcza w kontekście rozwoju pojazdów autonomicznych oraz koncepcji smart city.

Bibliografia:

1. Tomaszewska E.(2023), Korzyści wdrożenia inteligentnego systemu transportowego w mieście, Politechnika Białostocka, Akademia Zarządzania.
2. ITF/OECD.(2013), Potential of Intelligent Transport Systems to reduce greenhouse gas emissions, Winder D., International Transport Forum.
3. Njord J. i in.(2006), ITS Benefits, Costs, and Lessons Learned, US Department of Transportation.
4. Oskarbski J. i in.(2006), Inteligentne Systemy Transportowe — efekty środowiskowe, Politechnika Gdańska.
5. Kapsch Polska / Gazeta Prawna.(2024), ITS zapewnia płynny ruch, mniej hałasu i lepszą jakość powietrza.
6. Sprint ITS.(2023), Wpływ inteligentnych systemów transportowych na środowisko, blog.sprint.pl.
7. Zdrowy Kraków.(2026), Jak nowoczesna infrastruktura miejska wspiera zdrowie — inteligentne sieci transportowe w walce ze smogiem i hałasem, zdrowy.krakow.pl.
8. CORDIS EU, Lowering urban traffic noise emissions — projekt SILENCE, cordis.europa.eu.
9. Strategia Rozwoju Miasta Gliwice od roku 2022 do 2040.
10. Główny Urząd Statystyczny (2024), lub Portal Polska w liczbach.
11. Program Ochrony Środowiska przed Hałasem .(2023**)**, Analiza natężenia ruchu drogowego w kluczowych węzłach komunikacyjnych Gliwic, Gliwice.
12. Kronika Gliwicka .(2009), http://www.gliwiczanie.pl/Kronika/kronika.htm (dostęp 20.04.
13. 2026)
14. Zarząd Dróg Miejskich w Gliwicach (2023) – raport o ITS.
15. Miejski Zarząd Usług Komunalnych (2024).
16. Wydział Inwestycji i Remontów UM Gliwice (2022).
17. Strategia Rozwoju Miasta Gliwice do roku 2040 (2022).
18. Tomaszewska E.(2023), Korzyści wdrożenia inteligentnego systemu transportowego w mieście, Politechnika Białostocka, Akademia Zarządzania.
19. ITF/OECD, Potential of Intelligent Transport Systems to reduce greenhouse gas emissions, Winder D.(2013), International Transport Forum.
20. Njord J. i in., ITS Benefits, Costs, and Lessons Learned, US Department of Transportation. (2006), Transportation Systems Benefits, Elsevier

21. Oskarbski J. i in.(2006), Inteligentne Systemy Transportowe — efekty środowiskowe, Politechnika Gdańska.
22. Sprint ITS, Wpływ inteligentnych systemów transportowych na środowisko, blog.sprint.pl, 2023.
23. Zdrowy Kraków,(2026). Jak nowoczesna infrastruktura miejska wspiera zdrowie — inteligentne sieci transportowe w walce ze smogiem i hałasem, zdrowy.krakow.pl.
24. CORDIS EU, Lowering urban traffic noise emissions — projekt SILENCE, cordis.europa.eu.
25. https://grupazir.pl/realizacje/system-its-w-gliwicach/
26. https://gliwice.eu/aktualnosci/gliwice-buduja/nowy-system-sterowania-ruchem-w-gliwicachw-ciagu-roku-umowa-podpisana
27. https://zdm.gliwice.pl/aktualnosci/czytaj/gliwice-stawiaja-na-inteligentny-ruch
28. Gajane, J., et al.(2023), The Impact of Intelligent Transportation Systems on Urban Mobility, Journal of Traffic and Logistics Engineering.
29. Raport Polskiego Kongresu ITS,(2024). Inteligentne Systemy Transportowe w polskich miastach – efektywność i perspektywy.
30. Turoń, K., (2022) Intelligent Transport Systems – challenges and opportunities in the era of Smart Cities, Scientific Papers of Silesian University of Technology.
31. Dane Komisji Europejskiej (Mobility and Transport),(2023). Intelligent Transport Systems (ITS) Directive and Action Plan
32. Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM), Wytyczne projektowania systemów adaptacyjnego sterowania ruchem w aglomeracjach.
33. U.S. Department of Transportation (ITS JPO),(2024). Benefits of Intelligent Transportation Systems.
34. ERTICO-ITS Europe.(2025). Future of Urban Mobility: A White Paper on V2X technology [Raport techniczny].
35. ETSI. (2026). Inteligent Transport System (ITS) Technologies.
36. European Commission. (2023). Smart Cities: Inteligent solutions for a sustainable future. Smart City Marketplace.
37. Kozłowski, R., Marczak, M. (2014). Budowa inteligentnych systemów transportowych jako szansa dla zrównoważonego rozwoju regionów. "Economics and Management".

NOWOCZESNY TABOR SAMOCHODOWY

Karol GROBNER[1], Kacper KUŚNIERCZYK[2], Grzegorz ŚWIĄDER[3], Marcin KUNICKI[4], Patryk TOMASZCZYK[5], Szymon KOZIOŁ[6], Bożena SZCZUCKA-LASOTA[7], Łukasz WSZOŁEK[8]

[1] Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice 44-100, Konarskiego 18A, kg319517@student.polsl.pl

[2] Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice 44-100, Konarskiego 18A, l; kk319520@student.polsl.pl

[3] Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice 44-100, Konarskiego 18A, gs323627@student.polsl.pl

[4] Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice 44-100, Konarskiego 18A, mk322946@student.polsl.pl

[5] Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice 44-100, Konarskiego 18A, pt319525@student.polsl.p

[6] Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice 44-100, Konarskiego 18A, sk322962@student.polsl.pl;

[7] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, bozena.szczucka-lasota@polsl.pl

8 Miejski Zakład Wodociągów i Kanalizacji, Fabryczna 10, 41-404 Mysłowice, lukasz.wszolek@diagno-test.pl

* Korespondencja: bozena.szczucka-lasota@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł stanowi kompleksowe opracowanie tematyki zarządzania nowoczesną flotą, skupiając się na procesach doboru oraz zasadach efektywnej eksploatacji taboru. Tekst otwiera analiza klasyfikacji pojazdów ciężarowych, która porządkuje wiedzę o ich budowie i przeznaczeniu względem dopuszczalnej masy całkowitej. Kolejna część publikacji zawiera szczegółowe zestawienie jednostek specjalistycznych, obejmujące standardy transportu kontenerowego, systemy nadwozi wymiennych typu BDF oraz charakterystykę zabudów zadaniowych, takich jak chłodnie, cysterny czy wywrotki. W dalszych sekcjach opracowanie skupia się na merytorycznych kryteriach wyboru sprzętu, wskazując na konieczność dopasowania parametrów technicznych podwozia do konkretnych potrzeb operacyjnych i rodzaju przewożonych ładunków. Istotnym elementem tekstu jest analiza ekonomiczna oparta na koncepcji całkowitego kosztu posiadania, która pozwala zrozumieć strukturę wydatków w pełnym cyklu życia pojazdu. Artykuł zamykają zagadnienia dotyczące nowoczesnych strategii serwisowych oraz wykorzystania systemów telematycznych w codziennej optymalizacji pracy floty.

Słowa kluczowe: tabor samochodowy, transport ciężarowy, zabudowy specjalistyczne, koszty eksploatacji pojazdów, optymalizacja floty.

MODERN COMMERCIAL FLEET – SELECTION AND OPERATION

Abstract: This article provides a comprehensive study on modern fleet management, focusing on the selection processes and principles of efficient vehicle operation. The text opens with an analysis of heavy goods vehicle classifications, organizing knowledge regarding their construction and intended use based on gross vehicle weight.The subsequent section offers a detailed overview of specialized units, including container transport standards, BDF swap body systems, and the characteristics of specialized bodies such as refrigerated units, tankers, and tippers. Further sections of the study focus on substantive criteria for equipment selection, highlighting the necessity of matching technical chassis parameters to specific operational needs and cargo types.A key element of the text is the economic analysis based on the Total Cost of Ownership concept, which provides insight into the expenditure structure throughout the vehicle's full life cycle. The article concludes by addressing modern service strategies and the implementation of telematics systems in the daily optimization of fleet performance.

Keywords: fleet, heavy goods transport, specialized bodies, vehicle operating costs, fleet optimization.

Wprowadzenie

Efektywne zarządzanie współczesnym transportem drogowym wymaga dogłębnej wiedzy zarówno z zakresu technologii, jak i ekonomii. Kluczem do sukcesu w branży jest precyzyjne zrozumienie specyfiki taboru ciężarowego – od podstawowej klasyfikacji pojazdów, przez specjalistyczne zabudowy, aż po techniczne kryteria doboru sprzętu do konkretnych zadań przewozowych. W obliczu rosnącej konkurencji rynkowej samo posiadanie floty to jednak za mało. Rentowność zależy dziś od umiejętnej analizy całkowitych kosztów posiadania (TCO), wdrożenia strategii prewencyjnego serwisu oraz efektywnego wykorzystania systemów telematycznych. Tylko takie wielopłaszczyznowe podejście pozwala sprostać rygorystycznym normom ekologicznym i budować przewagę konkurencyjną w nowoczesnym sektorze TSL.

Rozdział 1. Charakterystyka i klasyfikacja współczesnego taboru ciężarowego

Transport drogowy jest jednym z najważniejszych elementów współczesnego systemu logistycznego. Dzięki swojej elastyczności umożliwia dostarczanie towarów praktycznie do każdego miejsca posiadającego infrastrukturę drogową. Rozwój gospodarki oraz handlu międzynarodowego przyczynił się do dynamicznego rozwoju pojazdów ciężarowych, które obecnie różnią się pod względem konstrukcji, przeznaczenia oraz parametrów technicznych.

Współczesny tabor ciężarowy obejmuje zarówno lekkie pojazdy dostawcze wykorzystywane w transporcie lokalnym, jak i ciężkie zestawy drogowe przeznaczone do przewozu dużych ładunków na dalekich trasach (Rys.1). Pojazdy te różnią się między innymi dopuszczalną masą całkowitą (DMC), liczbą osi, rodzajem napędu oraz typem zabudowy.

Klasyfikacja pojazdów ciężarowych ma istotne znaczenie zarówno dla organizacji transportu, jak i dla przepisów dotyczących ruchu drogowego, opłat transportowych czy uprawnień kierowców. W Europie podstawowe regulacje dotyczące pojazdów ciężarowych określają przepisy Unii Europejskiej oraz krajowe akty prawne (Dziennik Ustaw, 2017).



Rys1. Porównanie lekkiego samochodu dostawczego oraz ciężkiego zestawu drogowego.

Źródło: https://panoramafirm.pl/artykuly/sprzedaz-samochodow-ciezarowych-i-dostawczych/samochody-dostawcze-czym-sie-cechuja-55704.html

1.2. Podział pojazdów ciężarowych według dopuszczalnej masy całkowitej

Jednym z podstawowych kryteriów klasyfikacji pojazdów ciężarowych jest dopuszczalna masa całkowita, określana skrótem DMC. Parametr ten oznacza maksymalną masę pojazdu wraz z ładunkiem, kierowcą i paliwem dopuszczoną do poruszania się po drogach publicznych.

1.2.1. Pojazdy lekkie – DMC do 3,5 tony

Do pojazdów lekkich zalicza się przede wszystkim samochody dostawcze o DMC nieprzekraczającej 3,5 tony. Są one szeroko wykorzystywane w transporcie miejskim,

kurierskim oraz handlu detalicznym. Ich główną zaletą jest możliwość prowadzenia przez kierowców posiadających prawo jazdy kategorii B.

Najczęściej spotykane pojazdy lekkie to:

- furgony,
- busy transportowe,
- samochody skrzyniowe,
- pojazdy chłodnicze o małej ładowności.

Pojazdy tej kategorii charakteryzują się stosunkowo niewielkimi wymiarami, niskim zużyciem paliwa oraz możliwością poruszania się w centrach miast. Ich ładowność wynosi zazwyczaj od 1 do 1,5 tony (Anonim, 25.10.2017).

1.2.2. Pojazdy ciężkie – DMC powyżej 3,5 tony

Pojazdy ciężkie przeznaczone są do transportu większych ładunków na średnich i długich dystansach. W tej grupie znajdują się zarówno samochody ciężarowe sztywne, jak i ciągniki siodłowe z naczepami.

Pojazdy ciężkie wyposażane są w silniki wysokoprężne o dużej mocy oraz rozbudowane układy bezpieczeństwa. W zależności od konfiguracji mogą posiadać od dwóch do nawet pięciu osi. Dopuszczalna masa całkowita zestawów drogowych w Europie wynosi najczęściej 40 ton, natomiast w przypadku transportu intermodalnego może zostać zwiększona do 44 ton (Dziennik Ustaw, 2017).

Tabela 1.
Podział pojazdów według DMC

Rodzaj pojazdu	DMC	Zastosowanie
Lekki samochód dostawczy	do 3,5 t	Transport miejski i kurierski
Samochód ciężarowy sztywny	3,5–18 t	Dystrybucja regionalna
Ciągnik siodłowy z naczepą	do 40 t	Transport dalekobieżny
Zestaw intermodalny	do 44 t	Transport kontenerowy

Źródło: Opracowanie własne

1.3. Rodzaje podwozi pojazdów ciężarowych

Podwozie jest podstawowym elementem konstrukcyjnym pojazdu ciężarowego. Odpowiada za przenoszenie obciążeń oraz zapewnienie odpowiednich właściwości jezdnych. W zależności od przeznaczenia stosuje się różne typy podwozi oraz konfiguracje osi.

Najczęściej spotykane konfiguracje to:

- 4×2,
- 6×2,
- 6×4,
- 8×4.

Pierwsza liczba oznacza liczbę wszystkich kół, natomiast druga liczbę kół napędzanych. Konfiguracja 4×2 stosowana jest głównie w transporcie dalekobieżnym ze względu na niższe zużycie paliwa. Układ 6×4 wykorzystywany jest natomiast w budownictwie i transporcie ciężkim, gdzie wymagana jest większa przyczepność i możliwość przewozu cięższych ładunków.

Podwozia mogą być również wyposażone w dodatkowe osie podnoszone lub skrętne, które poprawiają manewrowość pojazdu oraz zmniejszają zużycie opon. W nowoczesnych pojazdach ciężarowych coraz częściej stosuje się zawieszenie pneumatyczne zwiększające komfort jazdy oraz bezpieczeństwo przewożonego ładunku (Volvo Trucks, 2024).

1.3.1. Samochody ciężarowe sztywne

Samochody ciężarowe sztywne posiadają stałą zabudowę połączoną z podwoziem. Wykorzystywane są głównie w transporcie lokalnym i regionalnym. Mogą być wyposażone w zabudowy skrzyniowe, chłodnicze, wywrotki lub kontenery.

Ich zaletą jest dobra manewrowość oraz możliwość wykonywania częstych dostaw w obszarach miejskich. Wadą pozostaje mniejsza ładowność w porównaniu z zestawami ciągnikowymi.

1.3.2. Ciągniki siodłowe

Ciągniki siodłowe są pojazdami przeznaczonymi do współpracy z naczepami. Dzięki zastosowaniu siodła sprzęgającego możliwe jest szybkie podłączanie różnych typów naczep, co znacząco zwiększa uniwersalność transportu.

Nowoczesne ciągniki siodłowe wyposażane są w zaawansowane systemy wspomagania kierowcy, takie jak:

- adaptacyjny tempomat,
- system utrzymania pasa ruchu,
- automatyczne hamowanie awaryjne,
- system monitorowania martwego pola.



Rys2. Konfiguracja podwozia pojazdu 4x2
Źródło: https://autoline.com.pl/blog/wp-content/uploads/2024/06/unnamed-4-2.jpg

1.4. Konfiguracje zestawów drogowych

Zestawy drogowe składają się z pojazdu silnikowego oraz jednej lub kilku przyczep albo naczep. W zależności od przeznaczenia stosowane są różne konfiguracje zestawów transportowych.

Najpopularniejszym rozwiązaniem w Europie jest zestaw składający się z ciągnika siodłowego i naczepy (Rys.3). Takie rozwiązanie zapewnia dużą ładowność oraz możliwość szybkiej wymiany naczepy.

Wyróżnia się następujące konfiguracje:

- samochód ciężarowy z przyczepą,
- ciągnik siodłowy z naczepą,
- zestawy przestrzenne typu tandem,
- zestawy intermodalne do przewozu kontenerów.

Zestawy tandemowe (Rys.4) wykorzystywane są często w transporcie objętościowym, ponieważ umożliwiają przewóz większej liczby palet niż standardowa naczepa. Natomiast zestawy intermodalne przystosowane są do transportu kontenerów zgodnych z normami ISO.

W niektórych krajach stosuje się również zestawy wielkogabarytowe typu EMS (European Modular System), których długość może przekraczać 25 metrów. Rozwiązanie to pozwala zwiększyć efektywność transportu oraz ograniczyć liczbę pojazdów na drogach (European Commission, 2023).



Rys.3 Zestaw drogowy typu ciągnik siodłowy + naczepa.
Źródło: https://koma-trans.pl/flota/



Rys.4 Zestaw tandemowy
Źródło: https://koma-trans.pl/flota/

1.5. Znaczenie współczesnego taboru ciężarowego w logistyce

Współczesny tabor ciężarowy stanowi podstawę funkcjonowania krajowych i międzynarodowych łańcuchów dostaw. Rozwój technologii motoryzacyjnych wpływa na zwiększenie bezpieczeństwa transportu, ograniczenie emisji spalin oraz poprawę efektywności przewozów.

Coraz większe znaczenie mają pojazdy wyposażone w systemy telematyczne umożliwiające monitorowanie lokalizacji, zużycia paliwa oraz czasu pracy kierowców. Rozwijane są również technologie związane z napędami alternatywnymi, w tym pojazdy elektryczne oraz zasilane wodorem.

Nowoczesne rozwiązania techniczne przyczyniają się do zwiększenia konkurencyjności przedsiębiorstw transportowych oraz poprawy jakości usług logistycznych. Jednocześnie rosnące wymagania ekologiczne powodują konieczność stopniowej modernizacji flot transportowych zgodnie z normami emisji spalin Euro 6 i planowanymi regulacjami klimatycznymi Unii Europejskiej.

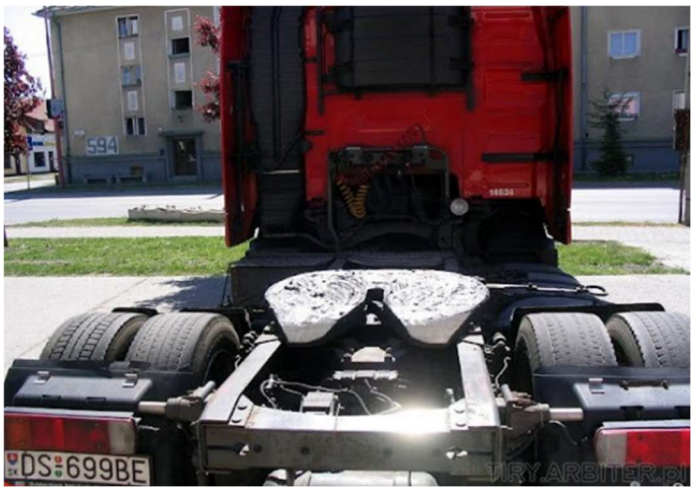
Rozdział 2: Rodzaje pojazdów ciężarowych i specjalistycznych/kontenerowych

Rozwój nowoczesnej logistyki oraz transportu drogowego wymusił na producentach pojazdów ciężarowych stworzenie szerokiej gamy wyspecjalizowanych środków transportu. Dobór odpowiedniego rodzaju pojazdu, naczepy lub zabudowy jest kluczowym elementem optymalizacji łańcucha dostaw, wpływającym zarówno na koszty operacyjne, jak i bezpieczeństwo przewożonego ładunku (Rydzkowski i Wojewódzka-Król, 2021). W tym

rozdziale omówiono podstawowe jednostki transportowe wykorzystywane w transporcie krajowym i międzynarodowym, z uwzględnieniem ich parametrów technicznych oraz przeznaczenia operacyjnego.

2.1 Ciągniki siodłowe jako jednostki napędowe

Ciągnik siodłowy (Rys.5) stanowi podstawową jednostkę napędową w zestawach członowych. Jest to pojazd samochodowy konstrukcyjnie przeznaczony wyłącznie do ciągnięcia naczep. Kluczowym elementem budowy ciągnika jest tzw. siodło (sprzęg siodłowy), czyli mechanizm łączący, który pozwala na przeniesienie części masy całkowitej naczepy na osie pojazdu ciągnącego (Volvo Trucks, 2023). Współczesne ciągniki siodłowe klasyfikuje się głównie ze względu na układ osi. Najpopularniejszy układ 4x2 (dwie osie, napęd na tylną) dominuje w transporcie europejskim ze względu na optymalny stosunek masy własnej do dopuszczalnej masy całkowitej (DMC). W transporcie ciężkim stosuje się układy 6x2 lub 6x4, które zapewniają lepszy rozkład nacisków na drogę. Ważnym aspektem jest również wysokość siodła – wyróżniamy ciągniki standardowe (ok. 1150 mm) oraz typu „Mega” (ok. 950 mm). Te drugie, dzięki obniżonemu podwoziu i zastosowaniu opon o niższym profilu, pozwalają na agregowanie naczep o wysokości wewnętrznej 3 metrów, co zwiększa ich kubaturę do ok. 100 m^3 (Wikipedia, 25.04.2026).



Rys 5. Ciągnik siodłowy.
Źródło: http://tiry.arbiter.pl/zdjecie/16419.Siod%C5%82o.ci%C4%85gnika

2.2 Naczepy transportowe i ich warianty

Naczepa jest pojazdem bezwłasnonapędowym, którego konstrukcja pozwala na spoczywanie przedniej części pojazdu na ciągniku siodłowym. W odróżnieniu od klasycznych przyczep, naczepy zapewniają lepszą stabilność zestawu, co jest kluczowe przy prędkościach autostradowych.

2.2.1 Naczepy uniwersalne (Firanki i Furgony)

Najpowszechniej stosowaną naczepą jest tzw. „firanka" (curtainsider). Jej konstrukcja opiera się na ramie i stelażu przykrytym przesuwną plandeką. Pozwala to na szybki załadunek z trzech stron oraz z góry (przy użyciu suwnicy). Naczepy typu furgon posiadają natomiast sztywne, izolowane ściany, co predysponuje je do przewozu towarów cennych lub wymagających ochrony przed wilgocią i kurzem (Wielton, 2022).

2.2.2 Naczepy podkontenerowe

Są to specjalistyczne podwozia przeznaczone wyłącznie do przewozu kontenerów ISO. Charakteryzują się konstrukcją ramową wyposażoną w zamki ryglujące (twist-lock). Nowoczesne naczepy podkontenerowe posiadają funkcję rozsuwania (tzw. naczepy teleskopowe), co pozwala na transport kontenerów różnych rozmiarów – od 20' przez 40' aż po 45' High Cube – na jednym podwoziu (Krone, 2023).

2.3 Kontenery transportowe – standardy ISO

Konteneryzacja zunifikowała globalny transport, umożliwiając łatwy przeładunek między statkami, pociągami i samochodami. Najpopularniejsze są jednostki 20- i 40-stopowe.

Tabela 2.
Porównanie parametrów technicznych kontenerów standardowych i High Cube

Typ kontenera	Długość zewn.	Wysokość zewn.	Pojemność
20’ Standard	6,06 m	2,59 m	ok. 33 m3
40’ Standard	12,19 m	2,59 m	ok. 67 m3
40’ High Cube	12,19 m	2,89 m	ok. 76 m3

Źródło: Opracowanie własne na podstawie normy ISO 668.

Warto zauważyć, że kontenery 40’ High Cube (HC) stają się standardem w transporcie towarów drobnicowych ze względu na dodatkową wysokość (ok. 30 cm więcej niż standard), co pozwala na lepsze wykorzystanie przestrzeni ładunkowej przy zachowaniu tej samej powierzchni podstawy (Wikipedia, 25.04.2026).

2.4 Systemy nadwozi wymiennych BDF

System BDF (Rys.6 i 7) (niem. *Behälter Dreh-Fuss*) stanowi ogniwo pośrednie między kontenerem a klasyczną zabudową ciężarową. Nadwozia te posiadają cztery składane nogi wsporcze. Kierowca, korzystając z zawieszenia pneumatycznego pojazdu, może „wyjechać” podwoziem spod nadwozia, pozostawiając je w miejscu załadunku (Gabel, 2018). Rozwiązanie to jest podstawą logistyki „shuttle”, gdzie ciągnik nie czeka na załadunek, lecz jedynie podmienia puste nadwozie na pełne. Systemy te wymagają specjalnie przygotowanych podwozi z ramami wyposażonymi w rygle identyczne jak w naczepach podkontenerowych.



Rys 6. Nadwozie z systemem BDF
Źródło: https://gt-trailers.com/produkt/zestawy-bdf/



Rys 7. Ciągnik przystosowany do systemu BDF
Źródło: https://www.redos.pl/systemy-bdf/

2.5 Zabudowy specjalistyczne i ich charakterystyka techniczna

Specyfika niektórych ładunków wymaga zastosowania zabudów posiadających własne systemy podtrzymywania życia towaru lub mechanizmy rozładunkowe.

2.5.1 Chłodnie i izotermy

Zabudowy chłodnicze są projektowane w celu utrzymania stabilnej temperatury. Wykorzystują one panele typu „sandwich" z rdzeniem z pianki poliuretanowej. Kluczowym parametrem jest współczynnik przenikania ciepła K. Nowoczesne naczepy chłodnicze są często wyposażone w systemy „multitemperatury", pozwalające na wydzielenie wewnątrz naczepy kilku stref o różnych temperaturach dzięki przesuwnym ścianom grodziowym (Schmitz Cargobull, 2023).

2.5.2 Cysterny drogowe

Cysterny (Rys.8) służą do przewozu mediów płynnych i sypkich. Ich zbiorniki wykonuje się ze stali kwasoodpornej lub aluminium. Wewnątrz zbiorników montuje się tzw. falochrony (grodzie z otworami), które ograniczają bezwładność cieczy podczas hamowania i pokonywania zakrętów, co ma kluczowe znaczenie dla stabilności pojazdu (Anonim, 25.10.2017).

2.5.3 Wywrotki (samowyładowcze)

Wywrotki charakteryzują się skrzynią ładunkową unoszoną przez siłownik hydrauliczny. Wyróżniamy wywrotki stalowe (do transportu ciężkiego, np. gruzu, skał) oraz aluminiowe (tzw. „zbożówki" lub naczepy objętościowe), które dzięki niskiej masie własnej pozwalają na przewóz większej ilości lekkich materiałów sypkich (Wielton, 2022).



Rys 8. Naczepa typu cysterna
Źródło: https://schwarzmueller.com/pl/pojazdy/pojazdy-cysterny/naczepy-cysterny-do-przewozu-oleju-mineralnego/3-osiowa-aluminiowa-naczepa-cysterna-38000-l/

2.6 Systemy bezpieczeństwa w naczepach

Współczesne naczepy są wyposażone w zaawansowane systemy wspierające stabilność i hamowanie (Rys.9). Elektroniczny system hamulcowy (EBS) integruje funkcje ABS (zapobieganie blokowaniu kół) i ASR (kontrola trakcji), co znacząco skraca drogę hamowania zestawu (Knorr-Bremse, 2023). Kluczowym rozwiązaniem jest system stabilizacji toru jazdy RSS (Roll Stability Support), który w czasie rzeczywistym monitoruje przyspieszenie boczne. W sytuacji zagrożenia wywróceniem na zakręcie, system automatycznie przyhamowuje koła, stabilizując pojazd (ZF Wabco, 2022). Dodatkowo, systemy TPMS monitorują ciśnienie w oponach, co zapobiega awariom i wpływa na ekonomikę jazdy (Wielton, 2022). Na zdjęciu można zauważyć orientacyjne umiejscowienie systemów (Rys.5).



Rys 9. Podglądowe zdjęcie systemów bezpieczeństwa w naczepie stworzone przez AI
Źródło: Wygenerowane przez sztuczną inteligencję.

Rozdział 3: Techniczne i operacyjne kryteria doboru taboru

3.1. Dobór mocy silnika i parametrów układu napędowego

Proces doboru jednostki napędowej jest kluczowym elementem optymalizacji kosztów eksploatacyjnych w przedsiębiorstwie transportowym. Moc silnika musi być bezpośrednio skorelowana z dopuszczalną masą całkowitą (DMC) zespołu pojazdów oraz ukształtowaniem terenu, na którym realizowane są przewozy (Wikipedia, 15.01.2026). W praktyce przyjmuje się, że dla transportu dalekobieżnego o masie 40 ton, optymalny stosunek mocy do masy powinien wynosić od 10 do 12 KM na tonę.

Wybór zbyt słabego silnika skutkuje nadmiernym zużyciem paliwa oraz przyspieszonym zużyciem podzespołów na trasach górskich. Z kolei jednostki o bardzo dużej mocy (powyżej 500 KM) znajdują uzasadnienie głównie w transporcie ponadnormatywnym lub w zestawach typu "mega" poruszających się w trudnym terenie (Prochowski i Żuchowski, 2011, s. 45). Kluczowym parametrem, często ważniejszym od samej mocy, jest moment obrotowy dostępny w szerokim zakresie niskich obrotów, co pozwala na utrzymanie prędkości przelotowej bez konieczności częstej redukcji przełożeń.

Tabela 3.
Sugerowana moc silnika w zależności od masy zestawu

masa zestawu (DMC | t)	*moc silnika (KM)*
40	*400-480*
35	*350-420*
30	*300-360*

DMC-Dopuszczalna Masa Całkowita, t-tony, KM-Konie Mechaniczne

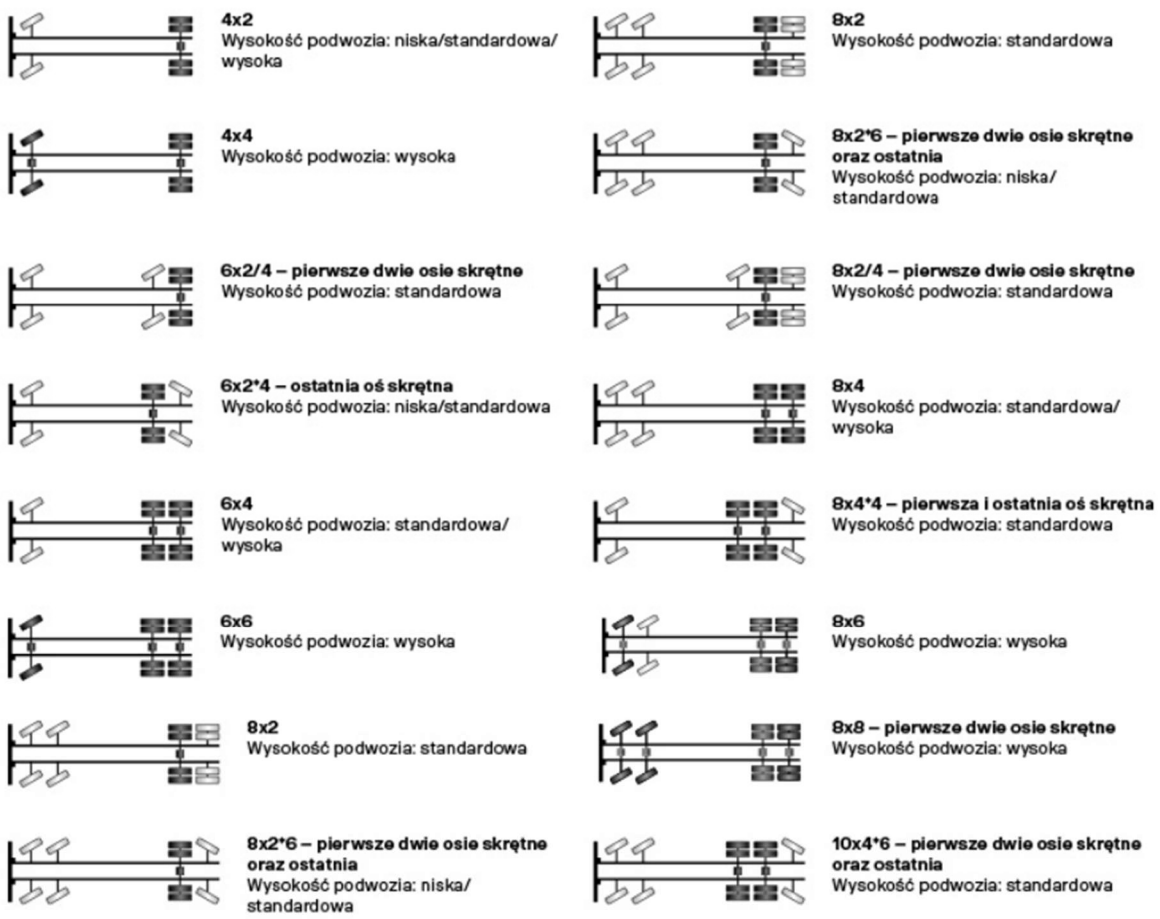
3.2. Konfiguracja układu osi a specyfika ładunku

Układ osi decyduje o możliwościach przewozowych pojazdu w zakresie dopuszczalnych nacisków na drogę oraz o jego zwrotności. W polskim i europejskim transporcie drogowym standardem dla zestawów ciągnik z naczepą jest układ 4x2 (Wikipedia, 20.04.2026). Jednak specyfika ładunku wymusza często stosowanie innych rozwiązań:

- **Układ 6x2:** Stosowany przy ładunkach ciężkich i skupionych, gdzie występuje ryzyko przekroczenia nacisku na oś napędową. Trzecia oś (często podnoszona) pozwala na lepszy rozkład masy i zmniejszenie zużycia opon podczas jazdy na pusto.
- **Układ 6x4 / 6x6:** Wykorzystywany głównie w transporcie specjalistycznym, budowlanym (wywrotki) oraz w leśnictwie, gdzie wymagana jest zwiększona trakcja w trudnym terenie (Rysunek 3.1).

W transporcie międzynarodowym kluczowe jest uwzględnienie przepisów krajów tranzytowych. Przykładowo, w niektórych krajach skandynawskich dopuszczalne są zestawy o znacznie większej liczbie osi i wyższej DMC niż standardowe 40 ton (Główny Inspektorat Transportu Drogowego, 2024).

Rysunek przedstawia układy osi występujące w ciągnikach siodłowych.



Rys10. Konfiguracja osi w ciągnikach siodłowych [https://www.scania.com/pl/pl/home/transport-operations/scania-defence/specyfikacje-i-konfiguracje.html]

3.3. Rodzaj zabudowy a właściwości fizykochemiczne ładunku

Praktyczne dopasowanie zabudowy do ładunku ma na celu nie tylko zabezpieczenie towaru, ale również skrócenie czasu operacji załadunkowych i wyładunkowych. Najpopularniejsze typy zabudów stosowane w praktyce to:

- **Zabudowa kurtynowa (tzw. firanka):** Najbardziej uniwersalna, pozwalająca na załadunek bokiem, tyłem oraz górą (suwany dach). Idealna do towarów spaletyzowanych i dłużyc (Rysunek 3.2).
- **Chłodnie i izotermy:** Niezbędne w transporcie artykułów spożywczych i produktów farmaceutycznych wymagających kontrolowanej temperatury (Wach, 2018).

- **Zabudowy specjalistyczne (silosy, cysterny, wywrotki):** Dedykowane dla towarów masowych, sypkich lub płynnych, gdzie kluczowy jest system rozładunku (np. pneumatyczny lub hydrauliczny).

Zdjęcie przedstawia naczepę typu firanka z częściowo odsłoniętym bokiem, prezentujący system mocowania ładunku.



Rys11. Naczepa typu firanka z załadowanym ładunkiem [https://uslugitransportowe-rudaslaska.pl/naczepa-firanka-kurtynowa-co-to-jest-jakie-ma-zalety-i-kiedy-warto-ja-wybrac/]

3.4. Trasy krajowe vs. międzynarodowe – różnice operacyjne

Dobór taboru różni się znacząco w zależności od zasięgu operacyjnego firmy. W transporcie krajowym (lokalnym i regionalnym) często stawia się na pojazdy o mniejszych kabinach (dziennych) i większej zwrotności, co ułatwia manewrowanie w centrach miast.

W transporcie międzynarodowym priorytetem staje się komfort kierowcy (kabiny typu High-Roof, dwa łóżka) oraz autonomia pojazdu (duże zbiorniki paliwa, nawet do 1500 litrów). Pojazdy te muszą spełniać najwyższe normy emisji spalin (EURO 6), co bezpośrednio przekłada się na wysokość opłat drogowych w systemach takich jak MAUT w Niemczech (Anonim, 25.10.2017). Ważnym aspektem jest również obecność systemów wsparcia kierowcy, takich jak aktywny tempomat czy asystent pasa ruchu, które redukują zmęczenie na długich dystansach.

Tabela 4.
Porównanie parametrów technicznych taboru dla tras krajowych i międzynarodowych.

Cecha	Transport Krajowy	Transport Międzynarodowy
miejsce w kabinie	*mniej miejsca, większa zwrotność*	*więcej miejsca oraz większy komfort*
autonomia pojazdu	*mniejsze zbiorniki paliwa*	*duże zbiorniki paliwa*
normy emisji spalin	*<EURO 6*	*>=EURO 6*
systemy wsparcia kierowcy	*większy nacisk na takie systemy niż w samochodach osobowych*	

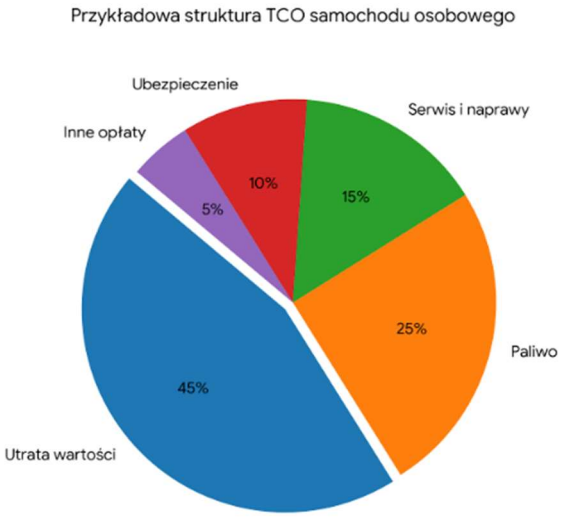
4. Koszty utrzymania i cykl życia pojazdu (TCO)

4.1. Pojęcie całkowitego kosztu posiadania pojazdu

Całkowity koszt posiadania pojazdu, określany skrótem TCO (ang. Total Cost of Ownership), oznacza sumę wszystkich wydatków związanych z zakupem, eksploatacją oraz użytkowaniem pojazdu w całym okresie jego życia. Analiza TCO pozwala określić rzeczywiste koszty użytkowania samochodu, które często są znacznie wyższe niż sama cena zakupu pojazdu.

Do podstawowych elementów TCO zalicza się: koszty zakupu lub finansowania pojazdu, wydatki na paliwo lub energię elektryczną, koszty serwisowe, ubezpieczenie, podatki, opłaty administracyjne oraz utratę wartości pojazdu, zwaną amortyzacją (European Commission, 2022). Szczególne znaczenie ma utrata wartości, ponieważ może ona stanowić nawet 40–50% całkowitych kosztów użytkowania samochodu w pierwszych latach eksploatacji (AAA, 2023).

Analiza TCO (Rys.12) jest obecnie niezwykle istotna w kontekście dynamicznego rozwoju rynku motoryzacyjnego. Współczesny użytkownik pojazdu musi brać pod uwagę nie tylko cenę zakupu, ale również rosnące ceny paliw, koszty energii elektrycznej oraz zmiany w przepisach środowiskowych. Szczególnie widoczne jest to przy porównywaniu pojazdów spalinowych z samochodami elektrycznymi (IEA, 2024).



Rys.12 Przykładowa struktura TCO

Źródło: Opracowanie własne

4.2. Koszty finansowania i utrata wartości pojazdu

Jednym z najważniejszych składników całkowitego kosztu posiadania pojazdu są koszty finansowania zakupu. Współcześnie stosowane są różne formy nabywania samochodów, takie jak zakup gotówkowy, kredyt samochodowy, leasing lub wynajem długoterminowy.

Zakup gotówkowy eliminuje konieczność płacenia odsetek, jednak wymaga posiadania znacznego kapitału własnego. Kredyt samochodowy pozwala rozłożyć koszt zakupu w czasie, lecz zwiększa całkowity koszt pojazdu poprzez naliczane odsetki oraz dodatkowe opłaty bankowe. Z kolei leasing jest popularnym rozwiązaniem wśród przedsiębiorców ze względu na korzyści podatkowe (PKO Leasing, 2023).

Istotnym elementem ekonomiki użytkowania samochodu jest utrata jego wartości rynkowej. Według analiz rynkowych nowy samochód może stracić około 20–30% swojej wartości już w ciągu pierwszego roku użytkowania (AAA, 2023).

Tabela 5.
Porównanie form finansowania zakupu i użytkowania samochodu

Forma finansowania	Zalety	Wady
Zakup gotówkowy	brak odsetek, pełna własność pojazdu od razu	wysoki koszt początkowy, zamrożenie gotówki
Kredyt	możliwość rozłożenia płatności w czasie	dodatkowe koszty odsetek i prowizji bankowych
Leasing	korzyści podatkowe (dla firm), łatwiejsza procedura niż przy kredycie	ograniczenia użytkowania (np. limit kilometrów), auto należy do leasingodawcy
Wynajem długoterminowy	przewidywalne koszty (często serwis i ubezpieczenie w racie)	brak własności pojazdu po zakończeniu umowy

Źródło: Opracowanie własne

4.3. Koszty paliwa, energii oraz eksploatacji

Koszty paliwa stanowią jeden z najważniejszych elementów związanych z codziennym użytkowaniem pojazdu. W przypadku samochodów z silnikami spalinowymi wysokość wydatków zależy przede wszystkim od rodzaju paliwa, średniego spalania oraz intensywności eksploatacji.

Coraz większą rolę odgrywają również pojazdy elektryczne, których koszty eksploatacji są uzależnione od cen energii elektrycznej oraz sposobu ładowania akumulatorów. Samochody elektryczne cechują się zwykle niższymi kosztami eksploatacyjnymi w porównaniu z pojazdami spalinowymi (IEA, 2024).

Do kosztów eksploatacyjnych należy zaliczyć także wydatki związane z wymianą materiałów eksploatacyjnych, takich jak oleje, filtry czy elementy układu hamulcowego.

4.4. Ubezpieczenia i koszty serwisowe

Istotnym składnikiem całkowitego kosztu posiadania pojazdu są koszty ubezpieczenia. W Polsce obowiązkowe jest posiadanie ubezpieczenia odpowiedzialności cywilnej (OC), natomiast wielu właścicieli decyduje się również na dodatkowe ubezpieczenia AC czy assistance.

Koszty serwisowe obejmują zarówno regularne przeglądy techniczne, jak i naprawy wynikające z eksploatacji pojazdu. Współczesne samochody wyposażone są w zaawansowane systemy elektroniczne, których naprawa może być kosztowna.

Regularne wykonywanie przeglądów technicznych wpływa nie tylko na bezpieczeństwo użytkowania pojazdu, ale również na jego wartość rynkową przy odsprzedaży.

4.5. Znaczenie analizy TCO w nowoczesnej motoryzacji

Współczesny rynek motoryzacyjny wymaga coraz bardziej kompleksowego podejścia do oceny kosztów użytkowania pojazdów. Analiza TCO umożliwia podejmowanie bardziej świadomych decyzji zakupowych oraz ograniczanie kosztów eksploatacji.

Znaczenie TCO wzrosło szczególnie w kontekście transformacji energetycznej i rozwoju elektromobilności. Użytkownicy pojazdów coraz częściej analizują nie tylko cenę zakupu, ale również całkowite koszty eksploatacji w długim okresie.

Można zauważyć, że całkowity koszt posiadania pojazdu jest pojęciem znacznie szerszym niż sama cena zakupu samochodu. Obejmuje on szereg elementów ekonomicznych związanych z eksploatacją, finansowaniem i utrzymaniem pojazdu.

Rozdział 5. Strategie eksploatacji i zarządzanie serwisem

5. Strategie eksploatacji i zarządzanie serwisem

Sprawna eksploatacja taboru ciężarowego nie polega wyłącznie na wykonywaniu obowiązkowych badań technicznych. W praktyce obejmuje ona planowe obsługi, codzienną kontrolę stanu pojazdu, szybkie reagowanie na sygnały diagnostyczne, nadzór nad ogumieniem

oraz kształtowanie stylu jazdy kierowców. W transporcie drogowym pojazd ciężarowy jest aktywem pracującym, dlatego każde nieplanowane zatrzymanie obniża dostępność floty, komplikuje harmonogram przewozów i zwiększa koszt jednostkowy usługi. Z perspektywy regulacyjnej pojazdy ciężarowe kategorii N2 i N3 oraz przyczepy O3 i O4 podlegają w Unii Europejskiej zarówno okresowym badaniom zdatności do ruchu, jak i kontrolom drogowym, a przedsiębiorstwa odpowiadają za utrzymywanie pojazdów w stanie bezpiecznym i zdatnym do eksploatacji. Dlatego właściwa strategia eksploatacyjna musi łączyć zgodność z przepisami z podejściem organizacyjnym nastawionym na dostępność, bezpieczeństwo i przewidywalność kosztów (European Parliament and Council, 2014a; European Parliament and Council, 2014b).

5.1. Planowanie przeglądów i obsług technicznych

Podstawą zarządzania serwisem powinien być harmonogram wielowarstwowy: obejmujący wymagania prawne, zalecenia producenta, rzeczywisty przebieg, roczne wykorzystanie, warunki tras oraz charakter pracy pojazdu. Ciągnik siodłowy wykonujący długie, stabilne przewozy międzynarodowe zużywa się inaczej niż pojazd dystrybucyjny pracujący w ruchu miejskim, z częstym zatrzymywaniem i ruszaniem. Z tego względu coraz większe znaczenie ma odejście od całkowicie sztywnych interwałów na rzecz harmonogramów opartych na danych eksploatacyjnych. Scania opisuje elastyczne plany utrzymania jako rozwiązanie, w którym interwały są aktualizowane na podstawie danych o rzeczywistej pracy pojazdu, natomiast Volvo Trucks buduje plan serwisowy po uwzględnieniu specyfikacji samochodu, sposobu użytkowania, przebiegu rocznego i rodzaju operacji. W praktyce oznacza to, że plan przeglądów powinien być dostosowany do profilu misji transportowej, a okna serwisowe należy z wyprzedzeniem wiązać z kalendarzem zleceń i dostępnością warsztatu (Scania, 2021; Volvo Trucks, n.d.-a).

Planowanie obsług powinno także rozróżniać czynności rutynowe od punktów krytycznych. W grupie pierwszej mieszczą się wymiany materiałów eksploatacyjnych, filtrów czy przeglądy układów pomocniczych. W grupie drugiej znajdują się elementy mające bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i ciągłość przewozu, takie jak hamulce, układ pneumatyczny, sprzęgło, ogumienie, oświetlenie czy stan zawieszenia. Takie podejście ogranicza ryzyko sytuacji, w której pojazd formalnie „ma przegląd”, ale w praktyce zbliża się do awarii elementu krytycznego dla realizacji kursu. Jest to szczególnie istotne, ponieważ bardziej szczegółowe kontrole drogowe dotyczą właśnie takich obszarów, jak hamulce, opony, koła czy podwozie, a dane z usług connected service planning obejmują m.in. zużycie komponentów, terminy wymiany oleju, wkład osuszacza, klocki hamulcowe i sprzęgło (European Parliament and Council, 2014b; Volvo Trucks, 2025).

5.2. Naprawy prewencyjne i ograniczanie awaryjności

Naprawy prewencyjne należy rozumieć szerzej niż klasyczną wymianę części „na zapas". W nowoczesnej flocie ich celem jest wykonywanie interwencji wtedy, gdy ryzyko awarii zaczyna rosnąć, ale zanim dojdzie do zatrzymania pojazdu na trasie. Literatura przeglądowa pokazuje, że rozwój utrzymania pojazdów przesuwa się od prognozowania uszkodzeń pojedynczych komponentów ku ocenie stanu technicznego pojazdu jako całości, a badania nad zarządzaniem flotą zwracają uwagę, że najwyższą wartość daje łączenie utrzymania zapobiegawczego i predykcyjnego z harmonogramem zadań przewozowych. Oznacza to, że sama informacja o możliwej awarii nie wystarcza; trzeba jeszcze wiedzieć, kiedy wycofać pojazd z pracy, aby zminimalizować koszt przestoju i nie zaburzyć realizacji przewozów (Chen et al., 2025; Crespo del Castillo and Parlikad, 2024).

Z punktu widzenia praktyki warsztatowej prewencja powinna wykorzystywać dane diagnostyczne generowane przez pojazd i system telematyczny. W dokumentacji usług cyfrowych Volvo wskazano, że do planowania połączonego serwisu mogą być wykorzystywane między innymi informacje o zużyciu komponentów, terminach wymiany oleju silnikowego, stanie wkładu osuszacza powietrza, klocków hamulcowych i sprzęgła. Rozwiązania serwisowe rozwijane przez Daimler Truck opisują ten sam kierunek jako stałe monitorowanie danych pojazdu w czasie rzeczywistym, dzięki któremu potrzeby serwisowe lub naprawcze mogą zostać wykryte wcześniej i skoordynowane z harmonogramem pracy. W przedsiębiorstwie transportowym oznacza to potrzebę ustalenia progów alarmowych, klasyfikacji usterek według krytyczności oraz wyznaczania „najbliższego bezpiecznego okna serwisowego", zamiast odkładania decyzji do chwili wystąpienia awarii (Volvo Trucks, 2025; Daimler Truck, 2018).

Tak zarządzane utrzymanie zmniejsza liczbę nieplanowanych wyłączeń, ale zarazem ogranicza zjawisko nadserwisowania, czyli zbyt wczesnej wymiany sprawnych jeszcze części. W sensie ekonomicznym najlepsza strategia leży więc pomiędzy skrajnym podejściem reaktywnym a nadmiernie konserwatywnym serwisem kalendarzowym. Jeżeli pojazd pracuje w stałych, lekkich warunkach, zbyt częste wizyty w warsztacie obniżają wykorzystanie zasobu; jeżeli natomiast pracuje w warunkach ciężkich, zwlekanie z interwencją może oznaczać wielokrotnie droższy postój awaryjny poza bazą (Crespo del Castillo and Parlikad, 2024; Scania, 2021).

Tabela 6.
Porównanie wybranych strategii obsługi serwisowej taboru ciężarowego

Rodzaj działania	Charakterystyka	Zalety	Ryzyko / ograniczenia
Obsługa reaktywna	Naprawa wykonywana dopiero po wystąpieniu awarii pojazdu lub podzespołu.	Brak konieczności planowania częstych interwencji, niższe koszty bieżącej obsługi w krótkim okresie.	Wysokie ryzyko nieplanowanych przestojów, opóźnień w realizacji przewozów oraz wzrostu kosztów awaryjnych napraw.
Obsługa okresowa	Przeglądy i wymiany realizowane według ustalonych interwałów czasowych lub przebiegowych.	Łatwa organizacja harmonogramu obsług, większa przewidywalność kosztów, ograniczenie liczby poważnych awarii.	Możliwość wykonywania niektórych czynności zbyt wcześnie, a więc ryzyko nadserwisowania.
Obsługa prewencyjna	Wymiana lub kontrola elementów przed przewidywanym wystąpieniem awarii, na podstawie doświadczenia eksploatacyjnego i obserwacji zużycia.	Ograniczenie ryzyka uszkodzeń krytycznych, poprawa bezpieczeństwa i dostępności pojazdów.	Wymaga dobrej organizacji serwisu, systematycznej kontroli stanu technicznego oraz właściwej dokumentacji.
Obsługa predykcyjna	Podejmowanie decyzji serwisowych na podstawie danych diagnostycznych, telematycznych i bieżącej oceny stanu pojazdu.	Najlepsze dopasowanie terminu obsługi do rzeczywistego stanu technicznego, redukcja przestojów i optymalizacja kosztów.	Wymaga dostępu do systemów monitorowania, analizy danych oraz większych kompetencji organizacyjnych.

Note: Opracowanie własne na podstawie literatury wykorzystanej w rozdziale.

Jak wynika z tabeli 1, najbardziej użyteczne w nowoczesnych przedsiębiorstwach transportowych są strategie łączące elementy obsługi okresowej, prewencyjnej i predykcyjnej. Pozwalają one ograniczać awaryjność pojazdów oraz lepiej kontrolować koszty eksploatacji, bez rezygnacji z wymaganej dostępności taboru.

5.3. Zarządzanie ogumieniem

Ogumienie należy traktować jako osobny obszar zarządzania, a nie wyłącznie jako pozycję kosztową w budżecie warsztatu. To od niego zależy przyczepność, droga hamowania, stabilność zestawu, zużycie paliwa i odporność na uszkodzenia eksploatacyjne. Michelin wskazuje, że prawidłowe ciśnienie należy ustalać na podstawie rzeczywistych nacisków osi, po zważeniu w pełni załadowanego pojazdu, a niewłaściwe ciśnienie pogarsza stabilność i właściwości jezdne opony, zwiększa temperaturę pracy i ryzyko uszkodzenia. Według tej samej

dokumentacji niedopompowanie zwiększa opory toczenia i zużycie paliwa, a także obniża trwałość ogumienia. Z punktu widzenia floty oznacza to, że kontrola ciśnienia nie może być wykonywana okazjonalnie: powinna stanowić element codziennej kontroli kierowcy oraz cyklicznego nadzoru technicznego po stronie zarządzającego taborem (Michelin, n.d.-a).

Równie istotna jest analiza wzorców zużycia bieżnika, ponieważ wiele nieprawidłowości opony sygnalizuje problem w innym obszarze pojazdu. Michelin pokazuje, że zużycie jednostronne i feathering często wynikają z nieprawidłowej geometrii, nadmiernego toe lub niewspółosiowości osi, natomiast liczne formy zużycia naczepowego są powiązane z różnicami ciśnienia w kołach bliźniaczych, błędną regulacją łożysk, usterkami zawieszenia albo śladami po poślizgu hamulców. Continental również wskazuje, że szybkie lub nierównomierne zużycie, ściąganie pojazdu na jedną stronę i drgania kierownicy są typowymi objawami problemów z geometrią. Wniosek praktyczny jest prosty: decyzja o przekładaniu, bieżnikowaniu lub wymianie opony powinna być poprzedzona diagnozą osi, zawieszenia, łożysk i układu hamulcowego, bo inaczej nowa opona zacznie zużywać się w ten sam wadliwy sposób (Michelin, n.d.-b; Continental, n.d.).

Coraz większą rolę odgrywa cyfrowy nadzór nad ogumieniem. Rozwiązania flotowe Bridgestone oraz Volvo wykorzystują monitoring ciśnienia, temperatury i alerty o nieprawidłowościach, co ułatwia reagowanie jeszcze przed wystąpieniem awarii na trasie. W praktyce przedsiębiorstwa powinny łączyć trzy poziomy działań: kontrolę codzienną, okresową diagnostykę warsztatową oraz zdalny monitoring parametrów opony. Tylko takie połączenie pozwala traktować ogumienie jako element zarządzania ryzykiem, dostępnością i zużyciem paliwa, a nie jedynie jako koszt zakupu (Bridgestone, n.d.; Volvo Trucks, 2025).

5.4. Wpływ stylu jazdy na zużycie podzespołów

Styl jazdy kierowcy bezpośrednio wpływa na zużycie paliwa, ale pośrednio także na tempo zużywania się podzespołów. W raporcie JRC do technik eco-driving zaliczono m.in. progresywną zmianę biegów, kontrolę prędkości, ograniczanie pracy na biegu jałowym, optymalne dobieranie przełożeń, łagodne hamowanie i przyspieszanie oraz regularne sprawdzanie stanu opon; autor wskazuje przy tym, że skuteczne programy szkoleniowe mogą przynosić ponad 5% oszczędności paliwa. Z perspektywy eksploatacyjnej oznacza to, że ekonomika jazdy nie jest odrębnym zagadnieniem od trwałości pojazdu: spokojniejsza jazda ogranicza liczbę gwałtownych obciążeń przenoszonych przez układ napędowy, hamulce i ogumienie (Leduc, 2009).

Zależność tę potwierdzają również materiały producentów i badania empiryczne. Scania wskazuje, że ostre hamowanie zwiększa zużycie paliwa i częstotliwość zmian biegów, a wykorzystanie retardera lub hamulca silnikowego pozwala jednocześnie oszczędzać paliwo i

ograniczać zużycie elementów hamulcowych. Volvo podkreśla, że dane o gwałtownym hamowaniu i przyspieszaniu mogą być rejestrowane i wykorzystywane do ukierunkowanego szkolenia kierowców. Z kolei badanie Liu i współautorów wykazało, że zdarzenia związane z hamowaniem i przyspieszaniem najmocniej wpływały na tempo zużycia opon w warunkach rzeczywistej eksploatacji. W zarządzaniu flotą oznacza to potrzebę traktowania telematycznych wskaźników stylu jazdy nie jako narzędzia kontroli personalnej, lecz jako miernika przyszłego zużycia technicznego i kosztów warsztatowych (Scania, 2021; Volvo Trucks, n.d.-b; Liu et al., 2022).

Można też wnioskować z materiałów serwisowych producentów, że ryzyko przyspieszonego zużycia szczególnie rośnie w operacjach typu stop-and-start, charakterystycznych dla tras miejskich i dystrybucyjnych, gdzie pojazd częściej hamuje, rusza i wykonuje manewry pod obciążeniem niż w przewozach długodystansowych. Tego rodzaju eksploatacja wymaga więc nie tylko częstszego monitoringu technicznego, ale także innego modelu oceny kierowcy niż w transporcie dalekobieżnym, ponieważ porównywanie bez kontekstu różnych zadań przewozowych prowadziłoby do błędnych wniosków. Jest to wniosek interpretacyjny oparty na porównaniu warunków pracy opisanych przez Scania dla operacji płynnej i wymagającej oraz na danych o zachowaniach kierowcy rejestrowanych przez producentów (Scania, 2021; Volvo Trucks, n.d.-c).

5.5. Dokumentacja serwisowa i kontrola kosztów eksploatacji

Dokumentacja serwisowa jest ogniwem spinającym całą strategię eksploatacyjną. Dyrektywa 2014/47/EU wymaga, aby w pojeździe znajdowało się świadectwo ostatniego badania zdatności do ruchu albo jego odpowiednik oraz raport z ostatniej kontroli drogowej, gdy są dostępne, a przedsiębiorstwa mają określone obowiązki utrzymywania pojazdów w stanie bezpiecznym i zdatnym do ruchu. W praktyce oznacza to, że dokumentacja nie służy jedynie „na wypadek kontroli", lecz stanowi podstawę dowodową do oceny, czy przedsiębiorstwo rzeczywiście zarządza stanem technicznym floty. Ma to także znaczenie operacyjne, ponieważ system oceny ryzyka może stanowić podstawę do częstszego wyboru do kontroli tych przedsiębiorstw, które mają słabszy dorobek w zakresie utrzymania i zdatności technicznej pojazdów (European Parliament and Council, 2014b).

Nowoczesne systemy cyfrowe rozszerzają tradycyjną książkę serwisową o dane operacyjne. Volvo wskazuje, że narzędzie Daily Inspection digitalizuje codzienny obchód pojazdu, umożliwia zgłaszanie usterek ze zdjęciami i notatkami, a menedżer transportu otrzymuje wgląd do wszystkich wykonanych kontroli. Z kolei historia warsztatowa w Volvo Connect pozwala przeglądać wykonane naprawy i obsługi dla każdego pojazdu. Taka baza danych powinna zostać uzupełniona przez informacje o przebiegach międzyawaryjnych, czasie postoju,

reklamacjach, interwencjach drogowych, wymianach opon, zużyciu paliwa i kosztach części. Dopiero wtedy dokumentacja staje się narzędziem zarządczym, które pozwala powiązać stan techniczny z dostępnością floty oraz kosztem jednostkowym przewozu (Volvo Trucks, 2025; Volvo Trucks, n.d.-d).

Podsumowując, skuteczna strategia eksploatacji taboru ciężarowego powinna opierać się na czterech zasadach: serwis planowany według rzeczywistego profilu pracy, naprawy prewencyjne wsparte diagnostyką, aktywne zarządzanie ogumieniem oraz stałe kształtowanie stylu jazdy kierowców. Dopiero połączenie tych elementów z rzetelną dokumentacją i analizą danych pozwala ograniczać awaryjność, utrzymywać zgodność z wymaganiami prawnymi i budować przewidywalny koszt eksploatacji pojazdu w całym okresie jego użytkowania. W praktyce jest to także warunek utrzymania wysokiej dostępności pojazdów, a więc jednego z najważniejszych wskaźników jakości pracy floty transportowej (Crespo del Castillo and Parlikad, 2024; European Parliament and Council, 2014b; Volvo Trucks, n.d.-e).

Rozdział 6: Optymalizacja eksploatacji w dobie transformacji cyfrowej

6.1. Wprowadzenie

Współczesny transport drogowy stoi przed bezprecedensowymi wyzwaniami. Z jednej strony, rosnące ceny paliw oraz koszty eksploatacji i utrzymania pojazdów znacząco obniżają marże przewoźników, dla których paliwo jest jedną z trzech największych pozycji kosztowych (Geotab, 2025). Z drugiej strony, sektor podlega coraz bardziej rygorystycznym regulacjom środowiskowym, czego zwieńczeniem jest wprowadzenie normy emisji spalin Euro 7. W tym trudnym otoczeniu firmy transportowe zmuszone są do poszukiwania nowych sposobów na poprawę swojej konkurencyjności.

Nowoczesne systemy telematyczne wyłoniły się jako kluczowe narzędzie w procesie transformacji cyfrowej flot samochodów ciężarowych. Wykraczają one daleko poza proste śledzenie pozycji GPS, stając się zintegrowanymi platformami zarządzania, które gromadzą, analizują i przekształcają dane z każdego pojazdu w wymierne decyzje i oszczędności. Zgodnie z definicją Wikipedii, telematyka transportowa łączy systemy telekomunikacyjne i informatyczne do monitorowania i kontrolowania pojazdów na odległość (Telematyka transportu, b.d.).

6.2. Podstawowe technologie telematyki: GPS i szyna CAN

Każdy nowoczesny system telematyki składa się z trzech głównych elementów. Po pierwsze, jest to urządzenie pokładowe instalowane w każdym pojeździe. Po drugie, zapewnia ono bezpieczną transmisję danych do chmury. Po trzecie, dane trafiają do centralnej platformy zarządzania. Jednak to właśnie dwa kluczowe źródła danych — GPS i interfejs CAN — stanowią serce każdego systemu.

- System GPS początkowo służący wyłącznie do lokalizacji, ewoluował w zaawansowane narzędzie śledzenia, które w połączeniu z czujnikami pozwala na monitorowanie zachowania kierowcy i wydajności pojazdu (GPS Fleet Tracking Systems, b.d.). Dane z GPS umożliwiają przede wszystkim dynamiczną optymalizację tras z uwzględnieniem parametrów takich jak niższe zużycie paliwa, mniejsza liczba opłat drogowych czy natężenie ruchu.
- Magistrala CAN z protokołem SAE J1939 (standard komunikacji danych dla ciężkich pojazdów użytkowych) jest z kolei źródłem najbardziej szczegółowych danych technicznych bezpośrednio z jednostki sterującej (ECU) silnika i innych podzespołów. Zapewnia ona informacje o chwilowym zużyciu paliwa, prędkości obrotowej silnika, obciążeniu, kątach wtrysku, a także kodach usterek diagnostycznych.

Przykładowo, rozwiązania takie jak Teltonika FMC650 pozwalają na odczyt danych zarówno z ciągnika, jak i podpiętej naczepy przez jedną instalację w kabinie, otwierając nowe możliwości monitorowania całego zestawu (Teltonika, 2025).

6.3. Optymalizacja kosztów operacyjnych

Kluczowym argumentem za wdrożeniem telematyki są wymierne oszczędności finansowe. Zgodnie z analizami branżowymi, można je osiągnąć na kilku głównych obszarach: Przykładowo, redukcja niepotrzebnego postoju silnika na biegu jałowym ma kluczowe znaczenie, ponieważ silnik ciężarówki może spalić od 2 do 4 litrów paliwa na godzinę postoju. Systemy telematyczne pozwalają wykryć takie przypadki i zredukować niepotrzebny postój średnio o 30%.

Tabela 7.
Optymalizacja kosztów operacyjnych.

Obszar optymalizacji	Źródło danych	Potencjalne oszczędności	Kluczowy mechanizm
Zużycie paliwa	**GPS + CAN**	**Redukcja kosztów paliwa o 12-16% (Verizon, 2025)**	**Optymalizacja tras, redukcja postoju na biegu jałowym, korekta stylu jazdy**
Styl jazdy	**CAN (FMS)**	**Redukcja zużycia paliwa o 15-30% na autostradzie i do 40% w ruchu miejskim (MIT)**	**Monitoring agresywnego przyspieszania, hamowania, przekraczania prędkości**
Utrzymanie ruchu	**CAN (DTC)**	**Redukcja kosztów utrzymania o 15% (Verizon, 2025)**	**Przewidywanie awarii, zdalny odczyt kodów usterek, planowanie serwisu**
Bezpieczeństwo	**CAN + kamery**	**Redukcja kosztów wypadków o 19-22% (Verizon, 2025)**	**Identyfikacja ryzykownych zachowań, dostarczanie dowodów wideo**

Źródło: Opracowanie własne

6.4. Przygotowanie floty do wymogów normy Euro 7

Norma emisji spalin Euro 7 stanowi istotne zaostrzenie obecnie obowiązujących przepisów. Chociaż dla samochodów ciężarowych zachowuje ona limity emisji spalin z rury wydechowej na poziomie Euro VI, po raz pierwszy reguluje również emisje niezwiązane z układem wydechowym, takie jak emisja cząstek stałych z hamulców i opon (Council of the European Union, 2024). Ponadto regulacja nakłada bardziej rygorystyczne limity dla nowych typów pojazdów, w tym dla wcześniej nieuregulowanych zanieczyszczeń, jak podtlenek azotu (N_2O) (Council of the European Union, 2024).

Kluczowe terminy wdrożenia Euro 7 dla pojazdów ciężarowych (kategorie N_2, N_3, O_3, O_4) zostały zatwierdzone przez Radę Unii Europejskiej w kwietniu 2024 r. i przedstawiają się następująco:

- 48 miesięcy od wejścia w życie rozporządzenia dla nowych typów pojazdów (przewidywany termin: ok. maj 2028 r.)
- 60 miesięcy od wejścia w życie rozporządzenia dla wszystkich nowych pojazdów (przewidywany termin: ok. maj 2029 r.)

ZANIECZYSZCZENIE	EURO 6 (MG/KM, WLTP/RDE)	EURO 7 (MG/KM, OD 2027)	ZMIANA (%)
NOx (diesle M1)	80	30	-62,5
PM (benzyna)	4,5 µg/km	2	-55
PN (cząstki)	6×10^11 /km	1×10^11 /km	-83
CO	630	450	-29

Rys.13 Tabela graficzna porównująca Euro 6 z Euro 7

Źródło: https://normy.pl/euro-6-kontra-euro-7-co-oznaczaja-nowe-limity-emisji-spalin-dla-twojego-samochodu/

W kontekście przygotowania floty do coraz bardziej rygorystycznych regulacji, kluczową rolę odgrywają również inteligentne tachografy drugiej generacji (SMT2). Zgodnie z przepisami pakietu mobilności Unii Europejskiej, od 21 sierpnia 2023 r. wszystkie nowo rejestrowane ciężarówki muszą być w nie wyposażone. Do 31 grudnia 2024 r. obowiązkiem wymiany na SMT2 objęte zostały pojazdy używające starych tachografów analogowych i cyfrowych (Gen1) w transporcie międzynarodowym (European Commission, 2025). Tachografy te, oprócz funkcji kontroli czasu pracy kierowców, rejestrują m.in. przekroczenia granic i operacje załadunku/rozładunku, co w połączeniu z telematyką daje pełen obraz aktywności pojazdu.

6.5. Studia przypadków i analiza ROI

Wdrażanie nowoczesnej telematyki nie jest jedynie teoretyczną koncepcją, lecz sprawdzonym narzędziem generującym realny zwrot z inwestycji. Przykładami mogą być następujące implementacje:

6.5.1. California Freight – redukcja kosztów postoju na biegu jałowym:

Flota 630 pojazdów dzięki wdrożeniu telematyki Geotab zredukowała miesięczne koszty postoju silnika z 100 000 USD do 50 000 USD, co rocznie przekłada się na oszczędność 600 000 USD. Zaoszczędzone środki firma zainwestowała w dalszy rozwój swoich systemów informatycznych.

6.5.2. Gebrüder Schröder – redukcja zużycia paliwa na postoju o 50%:

Niemiecki operator floty 85 pojazdów wdrożył kompleksowe rozwiązanie telematyczne Samsara, w tym kamery i alerty dla kierowców. W 2024 roku zużyto 11 000 litrów paliwa zamiast 22 000 litrów, co oznacza redukcję o połowę. Ponadto, dzięki kamerom i precyzyjnym danym, firma skutecznie odparła 50% roszczeń powypadkowych, oszczędzając ponad 40 000 euro w jednym incydencie.

Dodatkowym, często pomijanym aspektem jest możliwość uzyskania niższych składek ubezpieczeniowych. Udostępnienie ubezpieczycielowi danych z telematyki dokumentujących bezpieczną jazdę może przełożyć się na wymierne oszczędności. W przypadku firmy Nussbaum Trucking, wdrożenie telematyki Geotab umożliwiło obniżenie kosztów ubezpieczenia o 300 000 USD.

6.6. Podsumowanie i wnioski na przyszłość

Transformacja cyfrowa flot samochodów ciężarowych, oparta na nowoczesnych systemach telematycznych, jest dzisiaj nie tylko szansą, ale koniecznością dla firm transportowych, które chcą pozostać konkurencyjne. Wykorzystanie danych z GPS i magistrali CAN umożliwia:

- Wymierną redukcję kosztów operacyjnych (paliwo, utrzymanie, ubezpieczenia);
- Zwiększenie bezpieczeństwa poprzez korektę stylu jazdy i dostarczanie dowodów wideo;
- Przygotowanie floty do spełnienia restrykcyjnych wymogów normy Euro 7 i unijnych regulacji transportowych;
- Uzyskanie pozytywnego zwrotu z inwestycji już w ciągu pierwszego roku od wdrożenia.

Przyszłość telematyki będzie podążać w kierunku dalszej integracji ze sztuczną inteligencją i uczeniem maszynowym. Przewiduje się, że systemy staną się bardziej autonomiczne, oferując nie tylko alerty, ale również rekomendacje i automatyczną korektę parametrów w celu maksymalizacji efektywności. Dla polskich przewoźników, działających na bardzo konkurencyjnym rynku europejskim, inwestycja w te rozwiązania jest kluczowym krokiem w kierunku zapewnienia sobie trwałej przewagi rynkowej.

Bibliografia

Książki

1. Gabel, R. (2018). *Logistyka systemów wymiennych BDF*. Berlin: TransPress.
2. Prochowski, L., and Żuchowski, A. (2011). *Samochody ciężarowe i autobusy*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
3. Rydzkowski, W., i Wojewódzka-Król, K. (2021). *Transport*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

Raporty

4. Główny Inspektorat Transportu Drogowego (2024). *Raport dotyczący dopuszczalnych nacisków osi na drogach publicznych* (Raport No. 12/2024). Warszawa: Wydawnictwo GITD.
5. International Energy Agency. (2024). *Global EV Outlook 2024*. Retrieved from https://www.iea.org/
6. Knorr-Bremse. (2023). *Systemy sterowania hamulcami dla pojazdów użytkowych* (Raport techniczny). Monachium: Knorr-Bremse AG.
7. Leduc, G. (2009). *Longer and Heavier Vehicles: An overview of technical aspects*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. doi: 10.2790/12649. Retrieved from https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC52392 (data dostępu: 26.04.2026).
8. Verizon Connect. (2025). *2025 Fleet Technology Trends Report*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.verizonconnect.com/fleet-technology-trends-report/
9. ZF Wabco. (2022). *Intelligent Trailer Program: Safety and Efficiency Solutions* (Raport produktowy). Bern: ZF Friedrichshafen AG.

Źródła i strony internetowe

10. AAA. (2023). *Your Driving Costs 2023*. Retrieved from https://newsroom.aaa.com/
11. Anonim. (2017, Październik 25). *Bezpieczeństwo w transporcie towarów niebezpiecznych*. Retrieved from http://www.transport-safety.eu
12. Bridgestone. (n.d.). *Tirematics*. Retrieved from https://www.bridgestone.co.uk/truck-and-bus/tirematics.html (data dostępu: 26.04.2026).
13. Chen, F., Jia, H., and Zhou, W. (2025). *Vehicle Maintenance Demand Prediction: A Survey*. Applied Sciences, 15(20), 11095. doi: 10.3390/app152011095. Retrieved from https://www.mdpi.com/2076-3417/15/20/11095 (data dostępu: 26.04.2026).

14. Continental. (n.d.). *All About Wheel Alignment*. Retrieved from https://www.continental-tires.com/be/nl/tire-knowledge/wheel-alignment/ (data dostępu: 26.04.2026).
15. Council of the European Union. (2024, April 12). *Euro 7: Council adopts new rules on emission limits for cars, vans and trucks*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/
16. Crespo del Castillo, A., and Parlikad, A.K. (2024). *Dynamic fleet management: Integrating predictive and preventive maintenance with operation workload balance to minimise cost*. Reliability Engineering & System Safety, 249, 110243. doi: 10.1016/j.ress.2024.110243. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832024003168 (data dostępu: 26.04.2026).
17. Daimler Truck. (2018, September 5). *The new Actros – the safest, most efficient and best connected truck ever*. Retrieved from https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/the-new-actros-the-safest-most-efficient-and-best-connected-truck-ever-40975823 (data dostępu: 26.04.2026).
18. Dziennik Ustaw. (2017). *Prawo o ruchu drogowym oraz klasyfikacja pojazdów ciężarowych*. Retrieved from ISAP – Dziennik Ustaw
19. European Commission. (2022). *Reducing CO2 emissions from passenger cars*. Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/
20. European Commission. (2023). *Road freight transport in the European Union*. Retrieved from European Commission – Transport
21. European Commission. (2025, August 19). Stronger and more unified enforcement of EU rules in international road transport as smart tachograph retrofit phase concludes for heavy-duty vehicles. Retrieved May 16, 2026, from https://transport.ec.europa.eu/
22. European Parliament and Council. (2014a). Directive 2014/45/EU of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 on periodic roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/45/oj (data dostępu: 26.04.2026).
23. European Parliament and Council. (2014b). Directive 2014/47/EU of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 on the technical roadside inspection of the roadworthiness of commercial vehicles circulating in the Union. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/47/oj (data dostępu: 26.04.2026).
24. Geotab. (2024). *AT&T Fleet Management and Geotab Help California Freight Cut Idling Costs by $50,000 per Month*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.geotab.com/case-study/california-freight-att/

25. Geotab. (2025). *Fuel efficiency techniques every heavy transport operator should know*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.geotab.com/au/blog/fuel-efficiency-heavy-transport/
26. GPS Fleet Tracking Systems. (b.d.). In *Transmetrics*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.transmetrics.ai/blog/gps-fleet-tracking/
27. ISO. (2020). *ISO 668:2020 Series 1 freight containers*. Retrieved from http://www.iso.org
28. Kabaciński M. (17.10.2024). *Opłaty drogowe w Europie – poradnik dla przewoźnika*. Available online https://www.akademiaczasupracy.pl/oplaty-drogowe-w-europie-kompleksowy-przewodnik-po-systemach-i-stawkach/
29. Krone. (2023). *Specyfikacja techniczna naczep podkontenerowych*. Available online http://www.krone-trailer.com
30. Liu, Y., Chen, H., Wu, S., Gao, J., Li, Y., An, Z., Mao, B., Tu, R., and Li, T. (2022). *Impact of vehicle type, tyre feature and driving behaviour on tyre wear under real-world driving conditions*. Science of The Total Environment, 842, 156950. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156950. Retrieved from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35753475/ (data dostępu: 26.04.2026).
31. Mercedes-Benz Trucks. (2024). *Charakterystyka pojazdów ciężarowych i konfiguracji osi*. Retrieved from Mercedes-Benz Trucks
32. Michelin. (n.d.-a). *The right tire pressure for trucks and buses*. Retrieved from https://business.michelinman.com/tips-suggestions/the-right-pressure (data dostępu: 26.04.2026).
33. Michelin. (n.d.-b). *Irregular Tire Wear 101*. Retrieved from https://business.michelinman.com/tips-suggestions/irregular-tire-wear-101 (data dostępu: 26.04.2026).
34. Nussbaum Trucking Case Study. (2024). *Nussbaum: Using data-driven fleet strategies*. Geotab. Retrieved May 16, 2026, from https://www.geotab.com/case-study/nussbaum/
35. PKO Leasing. (2023). *Leasing samochodów w przedsiębiorstwach*. Retrieved from https://www.pkoleasing.pl/
36. Poland Transport (2018). *Logistyka w transporcie międzynarodowym*. Available online https://www.poland-transport.eu/pl/g/logistyka-spedycja-magazyny-odprawy-celne-41/articles/logistyka-miedzynarodowa-czym-zajmuje-sie-logistyka-miedzynarodowa-167.html
37. Samsara. (2024). *Schröder Cuts Idle Costs 50% and Boosts Safety with Samsara*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.samsara.com/uk/customers/gebruder-schroder
38. Scania. (2021, May 3). *Helpful Tips to Improve Your Vehicles' Fuel Efficiency*. Retrieved from https://www.scania.com/ke/en/home/newsroom/news/2021/helpful-tips-to-improve-your-vehicles-fuel-efficiency-.html (data dostępu: 26.04.2026).

39. Scania. (2021, September 21). *Perfectly timed maintenance for buses and coaches – only when you need it*. Retrieved from https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2021/perfectly-timed-maintenance-only-when-you-need-it.html (data dostępu: 26.04.2026).
40. Scania Polska. (2024). Rozwiązania transportowe dla logistyki i transportu ciężkiego. Retrieved from Scania Polska
41. Schmitz Cargobull. (2023). *Instrukcja obsługi naczep chłodniczych S.KO*. Available online http://www.cargobull.com
42. Sinari. (2025, December 1). *On-board telematics: optimizing fleet management*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.sinari.com/en/blog/onboard-telematics-fleet-management
43. Stacja kontroli pojazdów. - https://autosfera.turek.pl/oferta/stacja-kontroli-pojazdow/
44. Telematyka transportu. (b.d.). In *Wikipedia, wolna encyklopedia*. Retrieved May 16, 2026, from https://pl.wikipedia.org/wiki/Telematyka_transportu
45. Teltonika Telematics. (2025). *Truck and trailer insights directly from the ECU*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.teltonika-gps.com/blog/webinar-takeaways:-providing-truck-&-trailer-insights-directly-from-the-ecu
46. Verizon Connect. (2025). *How fleet management software can help cut fleet costs*. Retrieved May 16, 2026, from https://www.verizonconnect.com/resources/article/fleet-management-software-cut-fleet-costs/
47. Volvo Trucks. (2023). *Podręcznik kierowcy: Ciągniki siodłowe serii FH*. Available online http://www.volvotrucks.pl
48. Volvo Trucks. (2024). *Technologie stosowane w nowoczesnych pojazdach ciężarowych*. Retrieved from Volvo Trucks Polska
49. Volvo Trucks. (2025). *Data notice – Digital Services Information*. Retrieved from https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/global/data-act/volvo-trucks-data-notice-services-2025-english.pdf (data dostępu: 26.04.2026).
50. Volvo Trucks. (n.d.-a). *Truck workshop services*. Retrieved from https://www.volvotrucks.com/en-en/services/vehicle-service/roadside-assistance.html (data dostępu: 26.04.2026).
51. Volvo Trucks. (n.d.-b). *Safety & Security for trucks and drivers*. Retrieved from https://www.volvotrucks.com/en-en/services/fleet-management/safety-and-security.html (data dostępu: 26.04.2026).
52. Volvo Trucks. (n.d.-c). *Driver support*. Retrieved from https://www.volvotrucks.com/en-en/services/fleet-management/driver-support.html (data dostępu: 26.04.2026).
53. Volvo Trucks. (n.d.-d). *Volvo Connect – a digital platform for transport operators*. Retrieved from https://www.volvotrucks.com/en-en/services/volvo-connect.html (data dostępu: 26.04.2026).

54. Volvo Trucks. (n.d.-e). *Fleet management*. Retrieved from https://www.volvotrucks.com/en-en/services/fleet-management/assets-management.html (data dostępu: 26.04.2026).
55. Wielton. (2022). *Katalog produktów: Naczepy i zabudowy specjalistyczne*. Available online http://www.wielton.com.pl
56. Wikipedia. (15.01.2026). *Silnik spalinowy*. Available online https://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik_spalinowy
57. Wikipedia. (20.04.2026). *Układ napędowy*. Available online https://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_przeniesienia_nap%C4%99du
58. Wikipedia. (2025). *Total cost of ownership*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Total_cost_of_ownership
59. Wikipedia. (2026, Kwiecień 25). *Kontener morski*. Retrieved from http://pl.wikipedia.org/wiki/Kontener_morski

SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA NA KOLEI W POLSCE

Karolina ROŻEJ[1] , Sebastian KAMIŃSKI[2] , Bartek WŁODEK[3] , Kamil DUBIEL[4] , Bartosz MASŁOWSKI[5] , Jakub MIKA[6] , Filip BUDNY[7] , Tomasz CIOŁYŚ[8] , Michał PŁONKA[9] , Nicolas BREWCZYK[10] , Patrycja Lasota[11], Tomasz WĘGRZYN[*12] .

[1] Politechnika Śląska, Katowice, studentka, identyfikator ORCD – brak; kr315469@student.polsl.pl

[2] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; sk273209@student.polsl.pl

[3] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; bw262141@student.polsl.pl

[4] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; kd318719@studen.polsl.pl

[5] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; bm316839@polsl.pl

[6] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; jm318719@student.polsl.pl

[7] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; fb315473@student.polsl.pl

[8] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; tc315494@student.polsl.pl

[9] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; mp315461@student.polsl.pl

[10] Politechnika Śląska, Katowice, student, identyfikator ORCD – brak; nb315470@student.polsl.pl

[11] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej; student, ORCID – 0009-0005-8536-5539; pl315065@student.polsl.pl

[12] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail: tomasz.węgrzyn@polsl.pl; identyfikator ORCID - 0000-0003-2296-1032*

Korespondencja: tomasz.wegrzyn@polsl.pl; Tel.: +48 504 816 362

Streszczenie: Artykuł przedstawia wybrane systemy bezpieczeństwa stosowane na kolei w Polsce. Omówiono rozwiązania organizacyjne, techniczne i proceduralne, których celem jest zapewnienie bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego oraz ograniczenie ryzyka wypadków i awarii. Scharakteryzowano m.in. systemy SMS i MMS, ERTMS/ETCS, Radio-Stop, semafory, liczniki osi, czuwak aktywny maszynisty, urządzenia DSAT oraz zabezpieczenia stosowane na przejazdach kolejowo-drogowych. Zwrócono uwagę na znaczenie tych systemów w monitorowaniu ruchu, kontroli stanu taboru oraz wspomaganiu pracy personelu kolejowego.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, kolej, sterowanie, infrastruktura, tabor

RAILWAY SAFETY SYSTEMS IN POLAND

Abstract: This article presents selected safety systems used in the Polish railway system. It discusses organizational, technical solutions designed to ensure the safe operation of rail traffic and to reduce the risk of accidents and failures. It describes, among others, the SMS and MMS systems, ERTMS/ETCS, Radio-Stop, semaphores, axle counters, active driver vigilance systems, DSAT devices, and safety measures used at railroad crossings. Attention is drawn to the importance of these systems in monitoring traffic, inspecting rolling stock, and supporting the work of railway personnel.

Keywords: safety, railway, control system, infrastructure, rolling stock

1. Wprowadzenie

Transport kolejowy odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu państwa, w rozwoju jego gospodarki i daje wiele możliwości przemieszczania się ludzi i towarów. Dbając o komfort, ekonomię przejazdu, należy także pamiętać o szeroko rozumianym bezpieczeństwie jako głównym czynniku wpływającym na prawidłowe i niezawodne funkcjonowanie systemu transportowego. Ze względu na wysokie prędkości, duże masy składów nawet nieznaczne nieprawidłowości mogą prowadzić do poważnych, wręcz katastrofalnych skutków. Poprawne, skuteczne i bezawaryjne działanie systemów zapewnia ciągłą kontrolę nad ruchem szynowym i minimalizuje ryzyko powstawania błędów. Ciągle rosnące zainteresowanie przewozami wymusza nieustanną modernizację infrastruktury kolejowej oraz wykorzystywanie coraz to nowszych rozwiązań technologicznych.

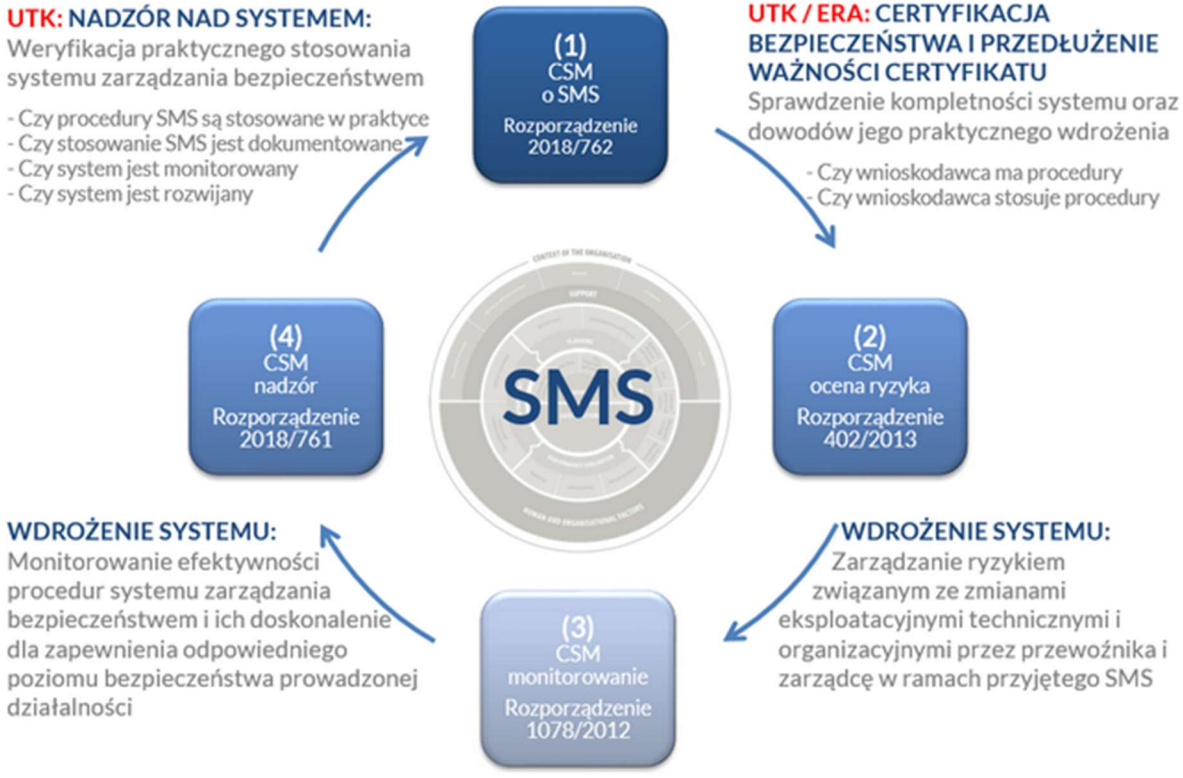
Systemy bezpieczeństwa na kolei w Polsce składają się z wielu procedur, najnowszych technologii i urządzeń. Zalicza się do nich systemy sterowania ruchem kolejowym, sygnalizacja, kontrola zajętości torów, urządzenia na przejazdach kolejowo-drogowych, mechanizmy sprawdzające stan taboru oraz narzędzia wspomagające pracę maszynisty.

2. Omówienie poszczególnych systemów

W prezentowanym artykule omówimy poszczególne systemy bezpieczeństwa z uwzględnieniem ich znaczenia na kolei.

2.1. System zarządzania bezpieczeństwem (Safety Management System)

System zarządzania bezpieczeństwem (Safety Management System, w skrócie SMS) oznacza organizację, środki i procedury przyjęte przez zarządcę infrastruktury lub przedsiębiorstwo kolejowe w celu zapewnienia bezpiecznego zarządzania swoim działaniem. System ten obejmuje całokształt opracowanych procedur, przepisów, instrukcji, które mają na celu stałą identyfikację, unormowane działanie w obszarze bezpieczeństwa oraz przejrzyste ułożenie relacji między zarządcą infrastruktury, przewoźnikami oraz podwykonawcami. Procedury SMS zapewniają kontrolę ryzyka, monitorują efektywność stosowanych rozwiązań i wspierają rozwój przyjętych procedur, instrukcji i przepisów, celem uniknięcia wysokiego poziomu niebezpieczeństwa (rys. 1). W Polsce nadzór nad wprowadzanymi procedurami SMS prowadzi Urząd Transportu Kolejowego [1].



Rysunek 1. Powiązania procesu certyfikacyjnego i procesu nadzoru [1].

Od 31 października 2020 roku procedury SMS są obowiązkowo tworzone przez przewoźników. Od tego dnia przewoźnikom kolejowym rozpoczęto wydawanie tzw. „jednolitego certyfikatu bezpieczeństwa". Dokument ten potwierdza zdolność do spełnienia wymogów dotyczących systemu zarządzania bezpieczeństwem, stwierdza respektowani przepisów i wymogów krajowych. Przewoźnicy, którzy nie mają tego certyfikatu mogą kontynuować działalność w oparciu o posiadane dotychczas systemy do momentu uzyskania jednolitego certyfikatu bezpieczeństwa. Dla przykładu oto kilka procedur, które stosowane są w spółce PKP Intercity:

1) Procedura P107- Identyfikacja zagrożeń i ocena ryzyka technicznego i operacyjnego- metodą FMEA ocenia się poziom akceptowalności ryzyka i na podstawie macierzy ryzyka identyfikuje się klasę tego ryzyka. W przypadku klasy ryzyka większej od 1 podejmuje się odpowiednie środki kontroli ryzyka.

2) Procedura P115 – Przygotowanie planów postępowania podczas realizacji przewozów pociągami, których długość przekracza długość peronów- przebieg i tryb postępowania drużyny konduktorskiej w przypadku postojów na stacji, w której długośeć pociągu przekracza długość peronu. Celem tej procedury jest zapewnienie jak największego bezpieczeństwa podróżnym wsiadającym i wysiadającym w tylnej części pociągu.

3) Procedura P116- Postępowanie w sytuacji zaistnienia zagrożenia lub zdarzenia kolejowego- zdarzeniem kolejowym nazywamy nagłe, niezamierzone zdarzenie lub ciąg takich zdarzeń z udziałem pojazdu kolejowego. Obejmuje wypadki, poważne wypadki oraz incydenty, które powodują negatywne skutki dla zdrowia ludzi, mienia lub środowiska. Powyższa procedura opisuje postępowanie drużyny pociągowej, dyspozytury w przypadku zaistnienia zdarzenia, realizacje zaleceń powypadkowych, rejestracje i analizę zdarzeń kolejowych [2].

2.2. System Zarządzania Utrzymaniem (Maintenance Management System – MMS)

System Zarządzania Utrzymaniem (Maintenance Management System, MMS) to narzędzie służące do nadzorowania procesu utrzymania pojazdów kolejowych. Głównym zadaniem systemu jest zapewnienie, zgodnego z wymaganiami, poziomu bezpieczeństwa eksploatowanego taboru kolejowego oraz zminimalizowanie ryzyka związanego z jego utrzymaniem. Funkcjonowanie systemu opiera się na określonych instrukcjach oraz procedurach.

Podstawową funkcją MMS jest sprawowanie nadzoru nad procesami utrzymaniowymi zgodnie z wytycznymi, dokumentacją techniczną pojazdów oraz aktualnymi przepisami prawa. Jednym z podstawowych dokumentów prawnych jest Techniczna Specyfikacja Interoperacyjności (TSI). Funkcjonowanie systemu to jeden z podstawowych elementów działalności podmiotów zajmujących się utrzymaniem taboru. Podmioty te określane są jako Entity in Charge of Maintenance (ECM).

Podmiot odpowiedzialny za utrzymanie taboru (ECM)

Funkcję ECM może realizować podmiot, który posiada odpowiednie zasoby niezbędne do kompleksowego zarządzania systemu zarządzania utrzymaniem danego pojazdu kolejowego lub grupy

pojazdów. Do każdego pojazdu w Europejskim Rejestrze Pojazdów (EVR) przypisany jest podmiot odpowiedzialny za jego utrzymanie. Przed wprowadzeniem ECM odpowiedzialność była rozdzielona pomiędzy kilka podmiotów, np. przewoźników kolejowych oraz zakłady naprawcze taboru kolejowego. Organy ECM gwarantują, że wskazane pojazdy pozostające pod ich nadzorem spełniają wymagane standardy i mogą być bezpiecznie eksploatowane na sieci kolejowej.

Wymagania dotyczące systemu zarządzania utrzymaniem MMS

Podstawą prawną regulującą wymagania wynikające z MMS jest rozporządzenie Komisji (UE) nr 2019/779. Wskazany dokument określa zarówno wymagania jak i kryteria oceny systemu MMS pod kątem procedury certyfikacyjnej.

Zgodnie z wytycznymi powyższego rozporządzenia, MMS składa się z czterech składowych funkcji:

1. Funkcja zarządzania MMS

Pozwala nadzorować trzy pozostałe funkcje oraz koordynować wyznaczone działania w celu zapewnienia wymaganego stanu pojazdu w systemie kolejowym. Do pozostałych zadań należy proces monitorowania, ciągłego doskonalenia oraz zarządzania kompetencjami personelu i dokumentacją.

2. Funkcja rozwoju utrzymania MMS

Zadaniem funkcji rozwoju MMS jest opracowanie dokumentacji utrzymaniowej pojazdu na podstawie dokumentacji projektowej oraz doświadczeń wynikających z jego eksploatacji oraz jej ciągła aktualizacja. Dodatkowo funkcja ta obejmuje identyfikację, zarządzanie procesami zgodnie z wymaganiami interoperacyjności oraz ciągły nadzór nad urządzeniami, instalacjami i pozostałym wyposażeniem.

3. Funkcja zarządzania utrzymaniem flotą

Funkcja zarządzania utrzymaniem taboru w głównej mierze koncentruje się na planowaniu i nadzorze nad wycofywaniem pojazdów z eksploatacji w celu wykonania niezbędnych zadań utrzymaniowych, a następnie ponowne dopuszczenie go do eksploatacji. Funkcja realizuje również ocenę kompetencji podmiotów zajmujących się utrzymaniem, zlecanie zadań oraz kontrolę jakości wykonanych prac, sporządzenie dokumentacji o przywrócenie pojazdu do eksploatacji.

4. Funkcja przeprowadzania utrzymania taboru

Funkcja przeprowadzania utrzymania taboru dotyczy bezpośrednio realizacji zadań utrzymaniowych zgodnie z wytycznymi technicznymi oraz organizacyjnymi poprzez weryfikację zleceń i dokumentacji, zapewnienie dostępu do aktualnych norm i instrukcji, racjonalne gospodarowanie materiałami oraz częściami, nadzór nad wyposażeniem oraz urządzeniami pomiarowymi.

Podmiot odpowiedzialny za utrzymanie taboru zobligowany jest do samodzielnego realizowania funkcji zarządzania systemem. Pozostałe zadania mogą być realizowane poprzez odpowiednie podmioty zewnętrzne, jednakże to nadal podmiot ECM ponosi wszelką odpowiedzialność za bezpieczne eksploatowanie pojazdów kolejowych.

Certyfikacja MMS

Podstawowym warunkiem uzyskania certyfikatu podmiotu ECM lub certyfikatu w zakresie funkcji utrzymania jest opracowanie oraz wdrożenie systemu MMS zgodnie z wymaganiami rozporządzenia 2019/779. Certyfikacja prowadzona jest przez Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego, który ocenia

skuteczność wdrożenia systemu. Na czas wydania certyfikatu system MMS podlega ciągłemu nadzorowi przez Prezesa UTK [3].

2.3. Europejski System Sterowania Pociągiem (European Train Control System- ERTMS/ETCS)

Europejski System Sterowania Pociągiem (European Train Control System- ERTMS/ETCS) zwany dalej Systemem ERTMS/ETCS jest systemem umożliwiającym kontrolę prowadzenia pociągu przez maszynistę i stanowi część składową Europejskiego Systemu Zarządzania Ruchem Kolejowym. Współpracuję on z systemem ERTMS oraz z siecią radiołączności pociągowej GSM-R.

Składa się z systemu kontroli pociągu (ETCS), łączności radiowej (RMR) i automatycznego prowadzenia pociągu (ATO).

Globalny System Kolejowej Radiokomunikacji Ruchomej (Global System for Mobile Communication Railway- ERTMS/GSM-R) jest przeznaczonym dla kolei, cyfrowym naziemnym systemem łączności radiowej zapewniającym łączność głosową pomiędzy pracownikami zatrudnionymi na stanowiskach związanych z prowadzeniem ruchu kolejowego a pracownikami zatrudnionymi przy obsłudze pociągów oraz umożliwiającym przesyłanie danych związanych z zarządzaniem ruchem kolejowym.

Powyższe systemy stosowane są na sieci kolejowej w celu podniesienia bezpieczeństwa jazdy pociągu poprzez kontrolę pracy maszynisty- nadzorowanie prawidłowego prowadzenia pociągu w stopniu umożliwiającym jazdę pociągów z prędkością powyżej 160 km/h [4].

Na polskiej sieci kolejowej stosuje się system ERTMS/ETCS poziomu 1 i poziomu 2 (rys. 2).

LINIA KOLEJOWA	ERTMS/ ETCS Poziom	ODCINEK WYPOSAŻONY W URZĄDZENIA ERTMS/ETCS
LK nr 4 Grodzisk Mazowiecki- Zawiercie CENTRALNA MAGISTRALA KOLEJOWA	1	Od km. 1,091 do km. 78,867
		Od km. 155,075 do km. 222,699
LK nr 64 Kozłów- Koniecpol	1	Od km. 0,471 do km. 33,091
LK nr 570 Starzyny- Psary		Od km. 0,252 do km. 3,005
LK nr 132 Bytom- Wrocław Główny	2	Od km. 100,395 do km. 174,058
LK nr 287 Opole Zachodnie- Nysa		Od km. 0,353 do km. 0,905
LK nr 288 Nysa- Brzeg		Od km. 45,950 do km. 47,631
LK nr 349 Święta Katarzyna- Wrocław Kuźniki		Od km. -1,467 do km. 0,274
LK nr 276 Wrocław Główny- Międzylesie	2	Od km. 6,055 do km. 75,644
LK nr 302 Malczyce- Grabina Śląska		Od km. -1,010 do km. 1,034
LK nr 759 Wrocław Gądów- Wrocław Nowy Dwór		Od km. 1,059 do km. 1,686
LK nr 278 Węgliniec- Zgorzelec	2	Od km. 0,386 do km. 2,152
LK nr 282 Miłkowice- Żary	2	Od km. -0,508 do km. 62,753
LK nr 296 Wielkie Piekary- Miłkowice		Od km. 0,000 do km. 12,685
LK nr 295 Węgliniec- Bielawa Dolna	2	Od km. 0,593 do km. 13,424
LK nr 973 Lubań Śląski- Węgliniec		Od km. -0,470 do km. 1,394
LK nr 279 Lubań Śląski- Węgliniec		Od km. 20,008 do km. 20,008
LK nr 356 Poznań Wschód- Wągrowiec	1 (LS)	Od km. -0,464 do km. 51,083
LK nr 9 Warszawa Wsch. Osobowa- Gdańsk Główny	2	Odc. Warszawa Praga- Gdańsk Główny (ok. 311 km)
LK nr 202 Gdańsk Główny- Stargard	2	Odc. Gdańsk Główny- Gdynia Chylonia (ok. 27 km)
LK nr 260 Zajączkowo Tczewskie- Pruszcz Gdański	2	Odc. Pszczółki- Pruszcz Gdański (ok. 11 km)
LK nr 456 Warszawa Praga R95- Chotomów	2	Odc. Warszawa Praga- Chotomów (ok. 14 km)

Rysunek 2. Wykaz linii kolejowych wyposażonych w system ERTMS/ETCS poziomu 1 i poziomu 2 (dane na dzień 11 lutego 2021) [5].

System ERTMS/ETCS poziomu 1 spełnia następujące funkcje:

1) określa granice zezwolenia na jazdę pociągu;

2) kontroluje prowadzenie pociągu przez maszynistę w granicach zezwolenia na jazdę;

3) monitoruje maksymalną prędkość pociągu, kierunek jego jazdy, stałe i doraźne ograniczenia prędkości pociągu;

4) dostosowuje system prowadzenia ruchu kolejowego do rozwiązań stosowanych w państwach Unii Europejskiej w ramach interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolejowego.

W trakcie przygotowania do jazdy pociągu maszynista winien wybrać jeden z trybów pracy urządzeń pokładowych systemu ERTMS/ETCS (rys. 3).

L.p.	Oznaczenie trybu	Angielska nazwa trybu	Polska nazwa trybu
1	IS	Isolation	Odłączenie Systemu
2	NP	No Power	Brak Zasilania Systemu
3	SF	System Failure	Uszkodzenie Systemu
4	SL	Sleeping	Uśpienie
5	SB	Stand By	Gotowość
6	SH	Shunting	Jazda Manewrowa
7	PS	Passive Shunting	Jazda Manewrowa Pasywna
8	FS	Full Supervision	Pełny Nadzór
9	LS	Limited Supervision	Ograniczony Nadzór
10	UN	Unfitted	Linia Niewyposażona
11	SR	Staff Responsible	Odpowiedzialność Personelu
12	OS	On Sight	Na Widoczność z ETCS
13	TR	Trip	Zatrzymanie Przez System
14	PT	Post trip	Po Zatrzymaniu Przez System
15	NL	Non Leading	Podrzędny
16	SN	STM National/National System	STM Krajowy/System Krajowy

Rysunek 3.Oznaczenia i nazwy możliwych trybów pracy urządzeń pokładowych systemu ERTMS/ETCS [4].

W przypadku nieprzestrzegania przepisów przez maszynistę nastąpi uruchomienie systemów bezpieczeństwa systemu ERTMS/ETCS skutkującymi zatrzymaniem pociągu. Następuje ono z powodu:

1) przekroczenia dopuszczalnej prędkości dla określonego trybu jazdy;
2) braku potwierdzenia zmiany trybu jazdy przez maszynistę;
3) braku zasilania lub uszkodzenia urządzeń pokładowych;
4) braku potwierdzenia komunikatów tekstowych wymagających potwierdzenia;
5) usterek urządzeń przytorowych (uszkodzenia balisy lub kodera LEU, uszkodzenia kabla, braku balisy itp.).

Przed semaforem wskazującym sygnał „Stój", maszynista winien zatrzymać czoło pociągu w odległości nie mniejszej niż 10 metrów przed tym semaforem celem umożliwienia przekazania do urządzeń pokładowych informacji o „Zezwoleniu na Jazdę" po wyświetleniu sygnału zezwalającego. Maszyniści pociągów wyposażonych w urządzenia pokładowe systemu ERTMS/ETCS poziomu 1 i pracownicy posterunków ruchu wykorzystują obowiązujący system radiołączności pociągowej wraz z systemem Radio-Stop [4].

2.4. System Radio-Stop

System Radio-Stop to radiowa procedura awaryjnego zatrzymania pociągów na liniach kolejowych. Umożliwia dowolnemu pracownikowi (maszyniście lub dyżurnemu ruchu) natychmiastowe wygenerowanie sygnału „ALARM" drogą radiową, co wywołuje nagłe hamowanie wszystkich pojazdów z włączonymi radiotelefonami pracującymi na tym samym kanale.

Radio-Stop działa na analogowych łącznościach kolejowych VHF (około 150 MHz). Na sieci PKP PLK eksploatowanych jest 8 głównych kanałów głosowej łączności pociągowej (w paśmie 132–174 MHz) oraz wyodrębniony kanał testowy. Sygnał „ALARM" to kombinacja trzech krótkich tonów o różnych częstotliwościach, nadawana cyklicznie. Jeśli radiotelefon nie posiada funkcyjnego przycisku, możliwe jest też ręczne nadanie poprzez selektywne wybieranie i pięciokrotne wypowiedzenie słowa „ALARM" do mikrofonu. W odróżnieniu od głosu (rozmowy), tonowy sygnał Radio-Stopu ma wysoki priorytet i blokuje normalną łączność [6].

W Radio-Stopie wykorzystuje się istniejącą infrastrukturę łączności:

1) Radiotelefon pokładowy (np. Koliber GSM-R/VHF od Radioniki) z wbudowaną funkcją. Ma on oznaczony przycisk „ALARM" (czerwony, zabezpieczony klapką).

2) Radiotelefon stacjonarny (dyspozytorski) lub system dyspozytorski (np. DSR/eDSR Koliber)

3) Stacje bazowe łączności (trakcja radiowa, centralki DSR) – umożliwiają rozsyłanie sygnału radiowego na cały odcinek linii. Nie ma dedykowanych urządzeń przytorowych – system wykorzystuje standardową sieć VHF (z nadajnikami „podstawowymi").

4) Układy wykonawcze hamowania – sygnał ALARM uruchamia elektromagnetyczny zawór „hamowania bezpieczeństwa" (analogicznie do SHP), który wypuszcza powietrze z przewodu głównego hamulcowego i automatycznie rozpoczyna hamowanie awaryjne pociągu [7].

Regularnie sprawdza się poprawność systemu na dedykowanym kanale testowym (tzw. „kanał 000") – w czasie testu ALARM uruchamia hamowanie jedynie w pojeździe wykonującym próbę, bez wpływu na inne pociągi.

Przykładowe użycia:

1)wypadki na przejazdach kolejowo-drogowych;

2)ryzyko kolizji na szlaku jednokierunkowym;

3) awaria sygnalizacji;

4) zagrożenie bezpieczeństwa ludzi lub zwierząt.

Współpraca z innymi systemami

Radio-Stop to element współdziałający z pozostałymi zabezpieczeniami ruchu. Na pokładach polskich lokomotyw często działają równolegle SHP/Sifa (hamowanie kabinowe) oraz systemy ERTMS/ETCS. Radio-Stop nie jest bezpośrednio zintegrowany z ETCS – działa niezależnie w warstwie analogowej, ale jego odbiór może sygnalizować kierowanie działania systemu ETCS. Zgodnie z polskimi regulacjami wszystkie eksploatacyjne pojazdy trakcyjne muszą być wyposażone w Radio-Stop, a instrukcje PKP określają zasady jego użycia.

Radio-Stop to prosty, ale skuteczny system awaryjnego zatrzymywania pociągów poprzez specjalny sygnał radiowy. Jego stosowanie znacząco zwiększa bezpieczeństwo ruchu kolejowego, umożliwiając szybką reakcję w nagłych wypadkach. System bazuje na ok. 40-letniej technologii analogowej, co pociąga za sobą ograniczenia związane z brakiem zabezpieczeń i koniecznością korzystania z pasma VHF. Dzięki temu prostemu rozwiązaniu – obecnie wspieranemu przez instrukcje PKP i normy radiowe – służby kolejowe mogą zahamować pociąg na odległych odcinkach sieci, co w wielu sytuacjach ocaliło życie i mienie. W niedalekiej przyszłości funkcja ta ma być przeniesiona do bezpiecznych sieci GSM-R, co pozwoli na utrzymanie Radio-Stopu przy wyższym poziomie zabezpieczeń komunikacji [8].

2.5. Semafory kolejowe

Semafory kolejowe stanowią jeden z kluczowych elementów systemu prowadzenia ruchu pociągów na liniach zarządzanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe. Ich podstawową rolą jest przekazywanie maszynistom jednoznacznych informacji o tym, czy mogą kontynuować jazdę oraz z jaką prędkością.

Znaczenie semaforów wynika przede wszystkim z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Dzięki nim możliwe jest utrzymanie odpowiednich odstępów między pociągami, zapobieganie kolizjom oraz kontrolowanie przejazdu przez stacje, rozjazdy i odcinki szlakowe. Semafory współpracują z urządzeniami sterowania ruchem kolejowym, tworząc spójny system nadzoru nad ruchem.

Oprócz funkcji bezpieczeństwa, semafory wpływają również na sprawność i płynność transportu kolejowego. Poprzez precyzyjne przekazywanie informacji o sytuacji na torach umożliwiają optymalne prowadzenie ruchu, ograniczanie opóźnień oraz efektywne wykorzystanie przepustowości linii kolejowych. W efekcie są niezbędnym elementem nowoczesnej infrastruktury kolejowej, bez którego funkcjonowanie transportu szynowego byłoby niemożliwe [9,10].

Na liniach zarządzanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe stosuje się kilka podstawowych rodzajów semaforów kolejowych. Oto najważniejsze z nich:

1. Ze względu na funkcję:
   - semafory wjazdowe - ustawione przed stacją, zezwalają lub zabraniają wjazdu na stację.
   - semafory wyjazdowe - znajdują się na końcu torów stacyjnych, pozwalają na wyjazd ze stacji.
   - semafory drogowskazowe (kierunkowe) - wskazują kierunek jazdy pociągu przy rozjazdach.
   - semafory odstępowe - dzielą szlak na odstępy i regulują ruch między stacjami.
   - semafory powtarzające - informują wcześniej o wskazaniu właściwego semafora.
   - semafory manewrowe - stosowane przy manewrach, nie dla jazd pociągowych.
2. Ze względu na budowę:
   - semafory kształtowe - starszy typ, z ramionami (obecnie rzadko spotykane).
   - semafory świetlne - współczesne, wykorzystujące światła (LED lub żarowe).

3. Ze względu na sposób sygnalizacji:

- semafory jednokomorowe - pojedyncze światło (np. manewrowe).
- semafory wielokomorowe - kilka świateł, umożliwiających wyświetlanie różnych sygnałów.

4. Dodatkowe odmiany:

- semafory półsamoczynne - sterowane przez dyżurnego ruchu.
- semafory samoczynne - działają automatycznie (np. w blokadzie liniowej) [11].

Na semaforach półsamoczynnych stosowanych na liniach PKP Polskie Linie Kolejowe obowiązuje zasada, że światła odczytuje się od dołu do góry, a ich znaczenie jest podzielone funkcjonalnie.
Niższe światło odnosi się bezpośrednio do sytuacji na danym semaforze – określa:

- czy jazda jest dozwolona,
- z jaką prędkością można kontynuować jazdę za tym semaforem.

Natomiast wyższe światła (umieszczone powyżej**)** pełnią funkcję zapowiedzi i dotyczą sytuacji na kolejnym semaforze. Informują maszynistę:

- czego należy się spodziewać dalej,
- czy będzie konieczne zmniejszenie prędkości lub zatrzymanie.

Taki podział pozwala maszyniście jednocześnie ocenić bieżącą sytuację oraz odpowiednio przygotować się do dalszej jazdy, co ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i płynności ruchu kolejowego.

Przykład – sygnał S10 na semaforze półsamoczynnym:
Z semafora możemy przeczytać następujące dane:

1. Za tym semaforem obowiązuje prędkość max 40 km/h

(stałe dolne światło pomarańczowe)

2. Następny semafor zezwala na jazdę Vmax

(stałe górne światło zielone) (rys. 4).



Rysunek 1.
Sygnał S10 [9].



Rysunek 5.
Sygnał S8 [9].

Przykład – sygnał S8

Z semafora możemy przeczytać następujące dane:

1. Za tym semaforem obowiązuje prędkość max 100km/h

(stałe dolne światło pomarańczowe, pod nim pas zielony)

2. Następny semafor zezwala na jazdę z prędkością

maksymalną 40 lub 60 km/h (migające górne światło pomarańczowe) – konkretną prędkość wskazuje następny semafor (rys. 5).

Sygnał zastępczy (Sz) jest specjalnym sygnałem stosowanym na liniach zarządzanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe, który zezwala na przejazd obok semafora wskazującego sygnał S1 „Stój". Wyświetlany jest w postaci migającego białego światła. Jego podanie oznacza, że maszynista może minąć semafor, jednak musi kontynuować jazdę ze szczególną ostrożnością i z taką prędkością, aby móc zatrzymać pociąg przed ewentualną przeszkodą. Sygnał zastępczy stosuje się najczęściej w sytuacjach awaryjnych, takich jak usterki urządzeń sterowania ruchem kolejowym lub brak możliwości podania właściwego sygnału na semaforze. Sygnał ten może być wyświetlany maksymalnie przez 90 sekund.

Rozkaz pisemny „S" jest natomiast formalnym poleceniem wydawanym maszyniście, który również zezwala na przejazd obok semafora wskazującego sygnał S1 „Stój". Stosuje się go w przypadkach, gdy nie ma możliwości podania sygnału zastępczego lub wymagają tego procedury. Rozkaz ten może być przekazany w formie pisemnej lub za pomocą środków łączności (np. drogą radiową) i określa warunki, na jakich ma odbywać się dalsza jazda. Podobnie jak w przypadku sygnału zastępczego, maszynista zobowiązany jest do zachowania szczególnej ostrożności [9,11].



Sygnał Sz

Rysunek 2.Sygnał zastępczy (Sz) [9].



Rysunek 3.
Sygnał S1 Stój
[9].

2.6. Liczniki osi i Samoczynna Blokada Liniowa

Liczniki osi są podstawowym elementem nowoczesnych systemów sterowania ruchem kolejowym. Służą do sprawdzania czy tor jest zajęty. Działają przez rejestrację przejazdu osi pociągów przez specjalne punkty na początku i końcu danego odcinka toru. System porównuje liczbę osi, które wjeżdżają i wyjeżdżają, i na tej podstawie określa, czy tor jest zajęty: Nwej − Nwyj = 0 – gdy różnica osi wejściowych i wyjściowych jest równa 0 tor uznaje się za niezajęty.

Rozwiązanie to pozwala uniknąć stosowania izolacji elektrycznej toru, co odróżnia liczniki osi od tradycyjnych obwodów torowych. Cały system składa się z czujników koła montowanych przy szynie oraz jednostki oceniającej, która analizuje sygnały i decyduje o stanie toru. W praktyce informacja ta jest przekazywana do urządzeń SRK i wykorzystywana do sterowania sygnalizacją kolejową [12].



Rysunek 8. Licznik osi [13].

Liczniki osi podlegają normom CENELEC, w szczególności EN 50126, EN 50128 oraz EN 50129. Urządzenia te spełniają zwykle wymagania poziomu SIL 4, co oznacza bardzo wysokie bezpieczeństwo [14].

Samoczynna Blokada Liniowa (SBL) jest systemem bezpieczeństwa służącym do automatycznego zatrzymania pociągu w sytuacji naruszenia zasad prowadzenia ruchu, w szczególności minięcia sygnału „Stój". System ten należy do grupy punktowych systemów oddziaływania na pojazd i stanowi jeden z elementów automatycznej ochrony pociągu.

Działanie SBL opiera się na współpracy urządzeń torowych oraz pokładowych. Elementy torowe są powiązane z sygnalizacją kolejową I aktywują się w zależności od wskazań semafora. W przypadku przejazdu pociągu obok aktywnego punktu kontrolnego bez wymaganej reakcji maszynisty następuje automatyczne uruchomienie hamowania nagłego.

System SBL podobnie jak dla liczników regulowany jest przez normy EN 50126, EN 50128 oraz EN 50129. Systemy te muszą także spełniać odpowiedni standard wysokiego bezpieczeństwa, co oznacza, że mają one działać niezawodnie niezależnie od warunków eksploatacyjnych. Szczególną uwagę zwraca się na niezawodność transmisji sygnału pomiędzy urządzeniami torowymi a pokładowymi oraz na poprawność działania układu hamulcowego. Brak transmisji oznacza zależnie od momentu usterki całkowitą blokadę odcinka i znaczne ograniczenie prędkości bądź odcięcie systemu i brak reakcji ze strony innych urządzeń przytorowych [15].

Zależność pomiędzy licznikami osi a systemem SHL ma charakter pośredni i wynika z ich współpracy w ramach nadrzędnego systemu sterowania ruchem kolejowym. Liczniki osi dostarczają informacji o stanie zajętości toru, która stanowi podstawę do sterowania sygnalizacją kolejową. W przypadku wykrycia zajętości odcinka toru urządzenia SRK ustawiają semafor na sygnał „Stój".

System SBL jest bezpośrednio powiązany z tymi wskazaniami sygnalizacyjnymi, ponieważ jego działanie zależy od stanu semafora. Oznacza to, że informacja wygenerowana przez licznik osi wpływa pośrednio na aktywację urządzeń torowych SHL. W sytuacji, gdy tor jest zajęty, a semafor wskazuje „Stój", aktywny element SHL może wymusić zatrzymanie pociągu w przypadku braku reakcji maszynisty [15].

2.7. Czuwak aktywny

Czuwak aktywny maszynisty jest jednym z podstawowych urządzeń bezpieczeństwa użytkowanym w polskim transporcie kolejowym. Jego główną funkcją jest kontrolowanie czujności osoby prowadzącej pojazd trakcyjny, czyli maszynisty oraz zapobieganie sytuacjom, w których pociąg zacząłby poruszać bez odpowiedniego nadzoru. W dzisiejszych czasach wzrastającego natężenia ruchu i coraz większych prędkości, znaczenie tego typu systemów stale rośnie (rys. 9) [16].



Rysunek 9. Czuwak aktywny [16].

Czuwak aktywny działa na zasadzie czasowego potwierdzania obecności i reakcji maszynisty. W ustalonych odstępach czasu tj. urządzenie wymaga wykonania przez niego zadania, najczęściej naciśnięcia przycisku lub pedału. Jeżeli maszynista nie zdąży nacisnąć przycisku w wyznaczonym czasie, system uznaje to za potencjalną utratę zdolności do prowadzenia pojazdu – na przykład w wyniku omdlenia, zmęczenia lub utraty czujności. W takiej sytuacji uruchamiana jest proces bezpieczeństwa, która zazwyczaj wywołuje sygnał dźwiękowy, a następnie automatycznie rozpoczyna hamowanie pociągu.

W Polsce czuwak aktywny jest obowiązkowym wyposażeniem większości pojazdów kolejowych. Stanowi on składnik szerszego systemu bezpieczeństwa, który obejmuje także inne systemy, takie jak SHP (Samoczynne Hamowanie Pociągu) czy bardziej zaawansowane europejskie systemy sterowania ruchem kolejowym, jak ETCS. Współdziałanie tych technologii redukuje ryzyko incydentów spowodowanych błędem ludzkim.

Również należy zwrócić uwagę na rozwój technologii w tym zakresie. Nowoczesne systemy czuwaka aktywnego są coraz bardziej zaawansowane i potrafią analizować nie tylko brak reakcji, ale także sposób prowadzenia pojazdu. W przyszłości możliwe jest zastosowanie rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji, które będą monitorować zachowanie maszynisty w sposób bardziej kompleksowy, na przykład analizując jego reakcje [16, 17].

2.8. Urządzenia detekcji stanów awaryjnych taboru (DSAT)

Urządzenia detekcji stanów awaryjnych taboru, DSAT (w Polsce potocznie: ASDEK) jest to system bezpieczeństwa stosowany w transporcie kolejowym służący do automatycznego wykrywania awarii taboru kolejowego, a co za tym idzie poprawy bezpieczeństwa oraz zapobiegania uszkodzeniom elementów infrastruktury kolejowej i taboru. W Polsce za jego instalację i utrzymanie odpowiedzialna jest spółka PKP Polskie Linie Kolejowe.

Urządzenia DSAT są podzielone na trzy zespoły:

1) Zespół torowy - zbiera informacje na temat stanów awaryjnych taboru kolejowego i przekazuje je do zespołu bazowego, jest umieszczony w torze (rys. 10).



Rysunek 10. ASDEK [18].

2) Zespół bazowy – otrzymuje dane od zespołu torowego i je analizuje, umieszczony najczęściej w skrzynce przy torze (rys. 11).



Rysunek 11. Kontener ASDEK [19].

3) Zespół terminalowy – przetwarza i archiwizuje dane, w jego skład wchodzą: komputer, drukarka, zasilacz awaryjny, systemy alarmowe.

Urządzenia szlakowe DSAT są ustawiane w taki sposób, żeby uniemożliwić wjazd niesprawnego taboru na linię, monitorować stan taboru w razie wystąpienia sygnału ostrzegawczego, a także umożliwić wyłączenie niesprawnego taboru w razie wystąpienia alarmu. Zespół torowy mierzy następujące parametry:

- przeciążenie dynamiczne (PD) – pomiar przeciążeń oddziałujących na tor;
- obciążenie koła (OK) – wykrywanie przekroczenia dopuszczalnego nacisku osi i nacisku liniowego;
- gorące maźnice (GM) – wykrywanie nadmiernej temperatury łożysk osiowych (maźnic);
- gorące hamulce (GH) – wykrywanie nadmiernej temperatury obręczy (klocków hamulcowych) i tarcz hamulcowych;
- płaskie miejsca (PM) – wykrywanie deformacji kół pociągu.

W przypadku wykrycia usterki, system generuje jeden z komunikatów:

- OSTR (Ostrzeżenie): Przekroczenie normy bez zagrożenia. Pociąg jedzie dalej pod obserwacją, maszynista dostaje informacje, a oględziny odbywają się na najbliższej stacji możliwej do zatrzymania.
- STOP (Alarm): Przegrzanie hamulców lub maźnic zagrażające bezpieczeństwu. Wymagane natychmiastowe zatrzymanie pociągu (nawet przez Radio-Stop) i oględziny w miejscu zatrzymania.
- alarm (STOP[L], [P]) – w funkcji gorące maźnice (GM) przekroczona została dopuszczalna wartość różnicy temperatur między prawą a lewą maźnicą (temperatura łożysk). Postępowanie jak w przypadku komunikatu STOP.
- GRAN (Graniczny): Uszkodzenia kół lub przeciążenia. Pociąg musi zjechać na najbliższą stację z ograniczoną prędkością, gdzie dyżurny ruchu wyznacza miejsce wyłączenia uszkodzonego wagonu.

Każdy komunikat zawiera dokładną wartość i lokalizację usterki. Po sprawdzeniu składu pracownik kolei decyduje, czy pociąg może jechać dalej, czy uszkodzony wagon musi zostać wyłączony [20].

2.9. Przejazdy kolejowo-drogowe

Przejazdy kolejowo-drogowe to miejsca, gdzie ruch pociągów krzyżuje się z ruchem samochodów. Są one niezbędną częścią infrastruktury transportowej, ale stanowią również jedną z jej najniebezpieczniejszych części. W Polsce co roku dochodzi do wielu wypadków na przejazdach

kolejowych, dlatego bardzo ważne jest ich odpowiednie oznakowanie oraz przestrzeganie zasad bezpieczeństwa w takich miejscach.

Wyróżniamy 6 rodzajów przejazdów kolejowo-drogowych w Polsce:

- przejazd kategorii A

Jest to przejazd kolejowo-drogowy, na którym ruch drogowy kierowany jest przez uprawnionego pracownika posiadającego odpowiednie kwalifikacje. Do jego zadań należy, na polecenie dyżurnego ruchu, zamykanie i otwieranie przejazdu;

- przejazd kategorii B

Są to przejazdy, na których ruch kierowany jest za pomocą samoczynnego systemu przejazdowego;

- przejazd kategorii C

Na tego typu przejazdach ruch kierowany jest za pomocą samoczynnego systemu przejazdowego;

- przejazd kategorii D

Przejazd ten niewyposażony jest w urządzenia sterowania ruchem kolejowym;

- przejazd kategorii E

Do kategorii E zaliczamy przejścia przez tory kolejowe wyposażone w półsamoczynny lub samoczynny system przejazdowy, kołowrotki, barierki lub labirynty;

- przejazd kategorii F

Przejazd kolejowo-drogowy zlokalizowany na drodze wewnętrznej, wyposażony w stałe rogatki zamknięte, otwierane w razie potrzeby [21].

W Polsce występują następujące systemy:

- system sygnalizacji świetlnej i dźwiękowej

Jest podstawowym systemem zabezpieczającym występującym na wielu liniach kolejowych. Sygnalizacja świetlna w postaci migających czerwonych świateł ostrzega użytkowników drogi o zbliżaniu się pociągu i kategorycznie zakazuje wjazdu na przejazd. Systemy dźwiękowe są dodatkowym elementem uzupełniającym. Mają za zadanie zwiększyć uwagę kierowców poprzez wydawanie głośnych dźwięków.

- rogatki

Rogatki są najważniejszym zabezpieczeniem stanowiącym ochronę przed wjazdem na tory podczas jazdy pociągu. Stanowią doskonałą fizyczną zaporę dla kierujących. Jej przekroczenie niesie ryzyko wypadku i poniesienie tego konsekwencji. Występują rogatki zamykające całą szerokość jezdni lub półrogatki zamykające tylko wjazdy i wyjazdy.

- samoczynny system przejazdowy (ssp)

System ten jest w pełni zautomatyzowany, nie wymaga ingerencji człowieka. Składa się on z:
-rogatek lub półrogatek;
-sygnalizacji świetlnej i dźwiękowej;
- urządzenia oddziaływania (czujniki, obwody torowe).

Na szlaku umiejscowione są w odpowiedniej odległości od przejazdu czujniki, po najechaniu na nie przez pociąg następuje wysłanie impulsu elektrycznego do urządzeń opuszczających rogatki. Po czym następuje automatycznie zamykanie przejazdu. Po minięciu przez pociąg drugiego czujnika, który znajduje się po przeciwnej stronie torów dostarcza informację o zjechaniu z przejazdu i możliwości bezpiecznego otwarcia rogatek (rys. 12).



Rysunek 12. Szafa SSP [22].

Na rysunku widoczny jest czujnik, na który najeżdża pociąg (rys. 13).



Rysunek 13. Czujnik koła do SSP [23].

- urządzenia zdalnej kontroli (uzk)

Samoczynny system przejazdowy (ssp) współpracuje z urządzeniem zdalnej kontroli znajdującym się na posterunku ruchu, który kontroluje i nadzoruje jego działanie. Jest pewnego rodzaju powtarzaczem i ukazuje stan pracy ssp na gruncie. Posiada specjalne lampki wyposażone w kolory czerwony, żółty, zielony. W stanie zasadniczym, czyli podczas poprawnego działania świecą wszystkie lampki. W trakcie załączenia sygnalizacji na przejeździe lampka koloru zielonego miga. Po wystąpieniu chwilowej usterki gaśnie zielona lampka. Jeśli usterka trwa powyżej 6 sekund nie tylko zgaśnie zielona lampa, ale również żółta. Ostatnia czerwona dioda informuje o zasilaniu systemu (rys. 14) [24].



Rysunek 14. Powtarzacz SSP [24].

- Tarcze ostrzegawcze przejazdowe (TOP)

Tego typu urządzeń nie spotka się blisko drogi, ponieważ umiejscowione są na szlaku w odległości drogi hamowania pociągu. Mają za zadanie informować drużynę trakcyjną o stanie sprawności urządzeń ssp na przejeździe kolejowo- drogowym. Zasadniczo nadaje 3 sygnały:

- Tarcza ciemna

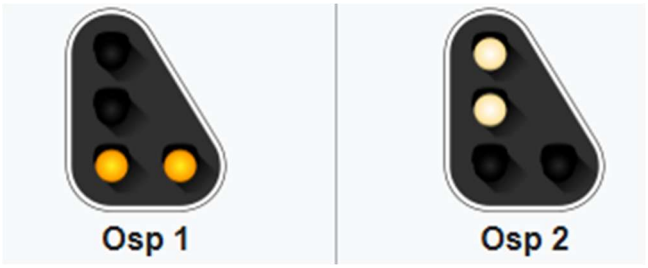
Żaden pociąg nie zbliża się do przejazdu lub TOP niesprawny.

- Sygnał Osp1 „Urządzenia sygnalizacji na przejeździe, do którego się tarcza odnosi, są niesprawne, jazda z prędkością V=20 km/h”

Maszynista spostrzegając taki sygnał musi tak regulować prędkość, aby czoło pociągu przejechało przez przejazd z prędkością nieprzekraczającą 20 km/h.

- Sygnał Osp2 „Urządzenia sygnalizacji na przejeździe, do którego się tarcza odnosi, są sprawne, jazda przez przejazd z największą dozwoloną prędkością”

Maszynista widząc taki sygnał (rys.15.) może jechać z największą dozwoloną prędkością na danej linii kolejowej [11].



Rysunek 15. Sygnały Osp 1 i Osp 2 [25].

3. Podsumowanie

Bezpieczeństwo na kolei to główny priorytet mający za zadanie ochronę ludzi, mienia i infrastruktury. Bezwzględne trzymanie się przepisów i procedur zmniejsza ryzyko wystąpienia wypadków i błędów ludzkich. Opisane w artykule systemy bezpieczeństwa pokazują jak ważną rolę odgrywa każdy ich element oraz czynnik. Nawet najmniejsza nieprawidłowość składowa systemów może prowadzić do zagrożenia. Istotną rolą w prowadzeniu ruchu kolejowego jest odpowiednie współdziałanie, koordynowanie i wspomaganie ich działania. We współczesnym świecie kolej cieszy się niesłabnącym powodzeniem, dlatego ważne jest ciągłe modernizowanie, unowocześnianie oraz podnoszenie standardów bezpieczeństwa. Dążenia te związane są z normami, które Unia Europejska narzuca w trosce o bezpieczeństwo i ujednolicenie systemów. Zatem znajomość i nieustanne podnoszenie kwalifikacji wymagane jest od każdego pracownika kolei.

Bibliografia

1. https://utk.gov.pl/pl/bezpieczenstwo-systemy/zarzadzanie-bezpieczen/system-zarzadzania-bezp/16444,System-zarzadzania-bezpieczenstwem.html (2026.04.10)
2. Księga systemu zarządzania bezpieczeństwem w PKP Intercity S.A (2016) nr wydania 7
3. https://utk.gov.pl/pl/bezpieczenstwo-systemy/zarzadzanie-utrzymaniem/19218,System-zarzadzania-utrzymaniem.html (2026.04.10)
4. Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów z wykorzystaniem systemu ERTMS/ETCS poziomu 1 Ir-1a (obowiązująca od 07.08.2025)
5. https://www.nakolei.pl/jak-i-gdzie-funkcjonuje-etcs/ (2026.04.10)
6. https://www.transportszynowy.pl/Kolej/zabezpshp (2026.04.10)
7. https://radionika.com (2026.04.10)
8. Instrukcja o użytkowaniu urządzeń radiołączności pociągowej Ir-5 (R-12) (obowiązujący od 31.05.2025)
9. https://www.transportszynowy.pl/Kolej/sygnalizacjaswietlne (2026.04.10)
10. https://pl.wikipedia.org/wiki/Semafory_w_Polsce (2026.04.10)
11. Instrukcja sygnalizacji Ie-1 PKP PLK (obowiązująca od 22 marca 2025)
12. https://pl.wikipedia.org/wiki/Licznik_osi (2026.04.10)
13. https://kolejowyportal.pl/pkp-plk-wydaly-zezwolenie-na-stosowanie-czujnika-kola-els-96-firmy-alstom/ (2026.04.10)
14. Mikulski, J., Sobański, M. (1999) Bezpieczeństwo systemów sterowania ruchem kolejowym w świetle wymagań norm CENELEC https://delibra.bg.polsl.pl/Content/50525
15. https://www.transportszynowy.pl/Kolej/sygnalizacjasbl#:~:text=W%20jej%20skład%20wchodzą%20semafory%20samoczynne%20trójkomorowe%20i%20mogą%20być,następny%20semafor%20wskazuje%20sygnał%20S1" (2026.04.10)
16. https://zpe.gov.pl/a/urzadzenia-bezpieczenstwa-ruchu-pojazdow-trakcyjnych/D3EBtHlCv?utm (2026.04.10)
17. https://www.transportszynowy.pl/Kolej/smca (2026.04.10)
18. https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/213-urzadzen-dsat-na-sieci-pkp-plk-kontroluje-stan-kol-taboru-88049.html (2026.04.10)
19. https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/systemy-detekcji-stanow-awaryjnych-taboru-z-rodziny-asdek-na-polskich-torach-101852.html (2026.04.10)
20. https://pl.wikipedia.org/wiki/DSAT (2026.04.10)
21. https://bezpieczny-przejazd.pl/edukacja/kategorie-i-oznakowanie-przejazdow/ (2026.04.10)
22. https://pl.wikipedia.org/wiki/Samoczynny_system_przejazdowy (2026.04.10)
23. https://www.transportszynowy.pl/Kolej/sygnalizacjaprzejazdowe (2026.04.10)

24. https://www.bsk.isdr.pl/srk_przej2.php (2026.04.10)
25. https://www.geocaching.com/geocache/GC7Q70X (2026.04.10)

METODYKA DIAGNOZY INNOWACYJNOŚCI SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA PRZEDSIĘBIORSTWAMI

Grzegorz GLISZCZYŃSKI[1], and Klaudia LALAK[2]

1Politechnika Lubelska, Lublin, g.gliszczynski@pollub.pl, identyfikator ORCID

21Politechnika Lubelska, Lublin, s97975@pollub.edu.pl, identyfikator ORCID

*Korespondencja: s97975@pollub.edu.pl, Tel: 698 042 815

Streszczenie: Artykuł przedstawia autorską metodykę diagnozy innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami. Punktem wyjścia rozważań jest analiza pojęć innowacji, innowacyjności oraz innowacji zarządczych, które współcześnie stanowią istotny czynnik wzrostu konkurencyjności i efektywności organizacji. Autorzy wskazują, że dotychczasowe podejścia do pomiaru innowacyjności koncentrowały się głównie na innowacjach produktowych i technologicznych, podczas gdy innowacje w sferze zarządzania wymagają bardziej kompleksowego podejścia. Celem opracowania jest uporządkowanie wiedzy dotyczącej innowacyjności zarządczej oraz przedstawienie koncepcji metodyki oceny innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami. Zaproponowany model opiera się na analizie sześciu podsystemów zarządzania: strategii i planowania, struktury organizacyjnej, procesów i procedur, podsystemu kadrowego, kontroli oraz narzędzi zarządzania. Ocenie podlegają również kluczowe komponenty innowacyjności, takie jak transfer wiedzy i kreatywność, elastyczność systemu zarządzania, cyfryzacja, proinnowacyjna kultura organizacyjna, stosowanie standardów innowacyjności oraz relacje międzyorganizacyjne. Autorzy zakładają, że wykorzystanie proponowanej metodyki umożliwi określenie poziomu innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstw, identyfikację czynników wpływających na ich rozwój oraz ocenę wpływu innowacyjności na efektywność organizacji. Przedstawiona koncepcja stanowi próbę stworzenia kompleksowego i wielowymiarowego narzędzia badawczego pozwalającego na ocenę innowacyjności zarządczej oraz jej znaczenia dla funkcjonowania współczesnych przedsiębiorstw. Oryginalność opracowania polega na przedstawieniu autorskiej metodyki diagnozy innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami. Zaproponowane podejście umożliwia kompleksową ocenę innowacyjności zarządczej z uwzględnieniem zarówno podsystemów zarządzania, jak i kluczowych determinant innowacyjności organizacyjnej.

Słowa kluczowe: innowacyjność, innowacje zarządcze, system zarządzania, diagnoza innowacyjności, efektywność przedsiębiorstwa.

METHODOLOGY FOR DIAGNOSING THE INNOVATIVENESS OF ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEMS

Abstract: This article presents an original methodology for diagnosing the innovativeness of enterprise management systems. The starting point of the discussion is an analysis of the concepts of innovation, innovativeness, and management innovation, which are currently recognized as important factors contributing to organizational competitiveness and efficiency. The authors indicate that existing approaches to measuring innovativeness have primarily focused on product and technological innovations, whereas innovations in management require a more comprehensive approach. The aim of the study is to systematize knowledge related to management innovativeness and to present a concept for assessing the innovativeness of enterprise management systems. The proposed model is based on the analysis of six management subsystems: strategy and planning, organizational structure, processes and procedures, human resources management, control systems, and management tools. The assessment also includes key components of innovativeness, such as knowledge transfer and creativity, management system flexibility, digitalization, an innovation-oriented organizational culture, the implementation of innovation standards, and interorganizational relationships. The authors assume that the application of the proposed methodology will enable the determination of the innovativeness level of enterprise management systems, the identification of factors influencing their development, and the evaluation of the impact of innovativeness on organizational performance. The presented concept constitutes an attempt to develop a comprehensive and multidimensional research tool for assessing management innovativeness and its significance for the functioning of contemporary enterprises. The originality of the study lies in presenting an original methodology for diagnosing the innovativeness of enterprise management systems. The proposed approach enables a comprehensive assessment of management innovativeness by taking into account both management subsystems and key determinants of organizational innovativeness.

Keywords: innovativeness, management innovation, management system, innovativeness diagnosis, enterprise performance.

Wprowadzenie

Pojęcie **innowacji** (od. łac. innovatio, czyli odnowienie) wprowadził do ekonomii i uznał za motor rozwoju gospodarek w latach 30. XX w. J. A. Schumpeter (1960), wskazując pięć przypadków jej występowania: stworzenie nowego produktu, zastosowanie nowej technologii lub metody produkcji, stworzenie nowego rynku zbytu, pozyskanie nieznanych dotąd surowców, reorganizację określonej gałęzi gospodarki. Pojęcie to definiuje się też jako celowe przedstawianie i zastosowanie w pracy, zespole roboczym lub organizacji, pomysłów, procesów, produktów lub procedur, które są nowe i zaprojektowane po to, aby przynosić korzyści organizacji. Innowacja obejmuje więc kreatywność i zastosowanie jej produktów (Schippers i in., 2012, s. 3).

Innowacyjność, to zdolność do tworzenia i upowszechniania innowacji (produktowych, technologicznych, organizacyjnych), jak i do absorpcji oraz wykorzystania wiedzy powstającej poza przedsiębiorstwem. Jest więc cechą odzwierciedlającą gotowość i zdolność do zmian, kreowania rozwoju, przełamywania rutyny i przyzwyczajeń (Francik, 2003, s. 69). W ujęciu ogólnym termin ten określa nowość i odmienność organizacji. W ujęciu procesowym jest ciągiem działań generujących tworzenie oraz przekształcanie pomysłów w rozwiązania praktyczne. W ujęciu systemowym stanowi zamierzoną, strategiczną interwencję ludzką zmieniającą istniejący stan rzeczy (Myjak, 2024, s. 197-200).

Według definicji GUS (GUS, 2025), bazującej na wytycznych OECD i Eurostatu, innowacyjność to: wszelkie działania rozwojowe, finansowe i komercyjne podejmowane przez przedsiębiorstwo, mające na celu doprowadzenie do powstania innowacji, w tym działalność badawcza i rozwojowa, niezależnie od jej celu. Może więc obejmować: prace projektowe i inżynieryjne, działania marketingowe, szkolenia pracowników, działalność badawczo-rozwojową (B+R), rozwój oprogramowania i baz danych etc.[1]

W warunkach dynamicznie zmieniającego się otoczenia gospodarczego innowacyjność jawi się, jako warunek efektywnego reagowania na wyzwania współczesnego rynku (Matysik, 2024, s. 164), a szczególne znaczenie ma zrozumienie złożonych zależności między innowacyjnością, kreatywnością oraz zarządzaniem wiedzą. Umiejętne integrowanie tych obszarów pozwala organizacjom uzyskać nowy poziom konkurencyjności i zrealizować cele rozwojowe (Hrabovska, 2025, s. 101-102).

Innowacyjność wskazywana jest nie tylko jako źródło sukcesu konkurencyjnego przedsiębiorstw, ale także jako motor rozwoju gospodarczego i cywilizacyjnego krajów. Stąd ważna rola różnorakich programów wspierających te procesy. Przykładem może być rozpisany na lata 2021 - 2027 program Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki (FENG) zorientowany na wspieranie przedsięwzięć powiązanych z budową gospodarki opartej na wiedzy, konkurencyjnego sektora nauki, efektywnych instytucji otoczenia biznesu oraz zielonej i cyfrowej transformacji. Stanowi on istotne wsparcie dla polskiej gospodarki, którą wciąż cechuje niska innowacyjność[2], wynikająca zarówno ze znikomych nakładów na badania i rozwój (około 1% PKB), jak i ograniczonego zakresu aplikacji nowatorskich rozwiązań w zarządzaniu przedsiębiorstwami.

Procesy innowacyjne, mimo potencjalnych korzyści w postaci wzrostu efektywności i przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw, są obarczone znacznym ryzykiem. Wynika ono z trudnych do przewidzenia reakcji konsumentów i konkurencji, zmienności popytu rynkowego oraz wysokich kosztów projektowania i wdrażania innowacyjnych rozwiązań. Innowacyjność powinna być postrzegana więc jako strategiczna aktywność organizacji, wymagająca świadomego zarządzania, odpowiednich zasobów oraz elastyczności w adaptacji do zmieniającego się otoczenia (Kozera, 2023, s. 39). Wdrażanie

[1] https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/4253%2Cpojecie.html?utm_source.com [dostęp: 13.05.2025r.]

[2] W rankingu według wartości syntetycznego wskaźnika innowacyjności *(European Innovation Scoreboard)* w 2024 r. Polska zajmowała 23 lokatę na 27 krajów UE i jej niska pozycja nie uległa poprawie w ostatniej dekadzie.

innowacji zarządczych może być więc skuteczną drogą do rozwoju przedsiębiorstw bez konieczności dużych nakładów inwestycyjnych (Jabłońska, 2024, s. 9-11).

Innowacje zarządcze pojawiły się poprzez identyfikację kolejnych aspektów/obszarów funkcjonowania organizacji, które mogą podlegać innowacyjnym przekształceniom. O ile początkowo innowacyjność utożsamiano z postępem w dziedzinie produktów i technologii, to Oslo Manual z 2018 roku, referencyjny dokument OECD określający taksonomie, sposoby pomiaru i interpretacji danych dotyczących innowacyjności, rozróżnia innowacje produktowe oraz innowacje w procesach biznesowych (Oslo, GUS 2020, s. 79-83). W tej drugiej kategorii wyodrębniono sześć grup procesów biznesowych, w tym administrację i zarządzanie obejmujące funkcje: strategiczne, ładu korporacyjnego, rachunkowości, zarządzania zasobami ludzkimi, zamówień i relacji zewnętrznych.

W literaturze przedmiotu już wcześniej dostrzegano zasadność wyodrębnienia i uszczegółowienia innowacyjności zarządczej, jako odrębnej kategorii pojęciowej (Hamel, 2006; Kraśnicka, 2018). I choć w ujęciu ogólnym definiuje się ją jako „wyraźne odejście od tradycyjnych zasad, procesów i praktyk zarządzania lub zwyczajowych form organizacyjnych ...” (Hamel, 2006 s. 4), to w definicjach różnych badaczy desygnaty tego pojęcia bywają odmienne. Stan taki jest dziedzictwem wieloaspektowości pojęcia innowacyjności w ujęciu ogólnym, jak i braku spójności w definiowaniu innych pojęć z zakresu zarządzania.

Opisana sytuacja wskazuje na potrzebę opracowania spójnego, integratywnego podejścia do problematyki innowacyjności zarządczej, obejmującego wieloaspektowe zdefiniowanie tego pojęcia, zaproponowanie obiektywnych narzędzi pomiaru jej charakterystyk oraz oceny efektów. Stanowi to zarówno inspirację, jaki cel nadrzędny niniejszego opracowania.

Celem niniejszego opracowania jest próba systematyzacji poglądów na temat innowacyjności zarządczej i sposobów jej pomiaru oraz prezentacja koncepcji autorskiej metodyki oceny innowacyjności systemów zarządzania (SZ) przedsiębiorstwami. Założono, że wszelkie modernizacje procesów zarządczych, w tym innowacje w tej sferze, związane są z rekonfiguracją systemów zarządzania organizacjami, stąd te właśnie konstrukty, opisane wielowymiarowo, powinny być przedmiotem rozważań. Zakłada się, że wykorzystanie proponowanej metodyki w badaniach empirycznych przedsiębiorstw umożliwi uzyskanie odpowiedzi na trzy fundamentalne pytania:

1) Jaki jest poziom/stopień innowacyjności SZ (innowacyjności zarządczej) w polskich przedsiębiorstwach?

2) Czy poziom innowacyjności SZ jest warunkowany przez charakterystyki kontekstu organizacyjnego przedsiębiorstw?

3) Czy, i w jakim stopniu, innowacyjność SZ wpływa na wielowymiarowo pojmowaną efektywność przedsiębiorstw?

W kolejnych częściach opracowania przedstawiono: studium problematyki innowacji zarządczych, wybrane kwestie pomiaru innowacyjności oraz autorską koncepcję metodyki oceny innowacyjnosci SZ. Opracowanie kończy podsumowanie oraz bibliografia.

Przegląd literatury

Przytaczane w definicjach różnych badaczy desygnaty pojęcia innowacji zarządczych istotnie się różnią. Przykładowo pisze się o:

- zmianie sposobów organizacji biznesowych praktyk firmy (Kraśnicka, Głód, Wronka, 2014);
- utożsamieniu ich z innowacyjnością organizacyjną i marketingową (Heker, Ganter, 2013), a także administracyjną (Dubouloz, 2012);
- nowych aktywnościach menedżerskich w zakresie ustalania celów, motywowania pracowników, koordynowania działań oraz podejmowania decyzji (Hollen, 2013);
- praktykach, procesach, strukturach i technikach zarządzania (Birkinshaw i in., 2008; Hrabovska, 2025, s. 106-107);
- zmianach w zakresie procedur kształtujących zachowania pracownicze (Vaccaro i in., 2012);
- poziomie kreatywności oraz spójności wartości kultury organizacyjnej w obrębie firmy (Matysik, 2024, s. 164);
- wzrastającej roli innowacji cyfrowych w zarządzaniu (Gupta i Jauhar, 2023).

Powyższa różnorodność wynika w dużej mierze z odmiennych perspektyw postrzegania i kreowania przez badaczy innowacji zarządczych, takich jak: perspektywa instytucjonalna, mody czy racjonalna (Birkinshaw, Hamel, Mol, 2008). Dla lepszego zobrazowania zasygnalizowanej wyżej różnorodności podejść i ich uwarunkowań w tabeli 1 zestawiono pojawiające się w definicjach typowe charakterystyki/aspekty innowacji zarządczych.

Tabela 1.
Aspekty innowacji zarządczych

Aspekty	Przykłady realizacji	Autorzy
Zachowania	Zmiana codziennych praktyk menedżerskich w zakresie ustanawiania celów, motywowania, koordynacji pracy oraz podejmowania decyzji.	Hollen i inni (2013)
Wiedza i ludzie	Składają się one, wraz z kapitałem finansowym i rzeczowym na potencjał innowacyjny organizacji.	Zastempowski (2013)
Procesy	Zmiany w treści procedur, instrukcji oraz wszelkich innych udokumentowanych rutyn organizacyjnych.	Birkinshaw i inni (2008)
Praktyki zarządzania	Adaptacja i implementacja praktyk zarządzania zmieniająca sposób działania zespołów pracowniczych. Tworzenie nowej wiedzy i legitymizacja nowych praktyk uruchamiających innowacyjność procesową.	Birkinshaw, Hamel, Mol (2008); Hamel (2006); Hollen, Van Den Bosh, Volberda (2013)
Relacje	Rozwój relacji międzyorganizacyjnych i wykorzystanie ich dla rozwoju innowacji poprzez współdziałanie bądź pozyskiwanie wiedzy i inspiracji.	Kraśnicka (2018); Armbruster i inni (2008)
Metody i techniki zarządzania	Wdrażanie nowych metod i technik zarządzania – rozwiązań organizatorskich o sformalizowanym i proceduralnym charakterze.	Damanpour, Aravind, (2011); Armbruster i in. (2008); Hrabovska (2025)
Kultura	Proinnowacyjność kultury organizacyjnej. Upowszechnianie wzorców kulturowych wspierających kreatywność, absorpcję wiedzy oraz eksperymentowanie i podejmowanie ryzyka	McCabe, 2002; Matysik (2024)
Strategia	Tworzenie nowych rynków bądź nowej klasy produktów. Reakcja na szanse rynkowe.	Damanpour, Aravind, (2011); Dobni (2008)
Struktura	Elastyczność, współpraca i poczucie wspólnego kierunku.	Salesh, Wang (1993)
Zasoby	Wiedza naukowa i doświadczenie w zarządzaniu, środki produkcji, lepszy dostęp do kapitału, cyfrowe zasoby i narzędzia organizacji	Damanpour, Aravind, (2011); (Gupta i Jauhar, 2023).

Źródło: Opracowanie własne.

Przytoczone różnice w definiowaniu nie przekładają się jednak na odmienne postrzeganie roli innowacji zarządczych. Istnieje zgodność, że ich główne rezultaty to wzrost efektywności działania i konkurencyjności rynkowej przedsiębiorstw oraz wzrost ich zdolności do adaptacji i generowania innowacji technologicznych i produktowych. Natomiast dyskusyjny jest występujący w niektórych publikacjach podział innowacji nietechnologicznych na innowacje organizacyjne, zarządcze oraz administracyjne (Dubouloz, 2012). Uwzględniając fakt, że specyfika zarządzania obejmującego w ogólnym znaczeniu procesy organizowania oraz czynności administracyjne wydaje się zasadne, że rację mają F. Damanpour i D. Aravind (2011, s. 427) uznając, że innowacje nietechnologiczne, to innowacje w szeroko rozumianej sferze zarządzania, czyli właśnie innowacje zarządcze. I ku takiej optyce autorzy niniejszego opracowania się skłaniają.

Literatura problemu, a w szczególności raporty międzynarodowych organizacji zajmujących się oceną innowacyjności gospodarek krajów i podmiotów gospodarczych dostarczają przykładów metod pomiaru i wskaźników innowacyjności stosowanych w skali międzynarodowej. Jako przykłady można wymienić: Global Innovation Index (GII), International Innovation Index, Roland Berger + BDI Innovation Indicator, Diamond Model & Innovation Value Chain, Oslo Manual (OECD & Eurostat), czy ISO 56000 – międzynarodowe normy zarządzania innowacjami.

Powszechny punkt wyjścia dla większości projektów mających na celu pomiar innowacyjności, stanowiło Oslo Manual, narzędzie publikowane przez OECD i Eurostat[3]. Najpopularniejszym

[3] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Innovation_statistics

podejściem w pomiarze i ocenie innowacyjności organizacyjnej jest wykorzystanie miar efektów, do których zalicza się:

- miary własności intelektualnej oparte na liczbie wynalazków zgłoszonych do opatentowania, liczbie uzyskanych patentów, zarejestrowanych wzorów przemysłowych, znaków towarowych bądź zastrzeżeń praw autorskich;
- liczbę innowacji wdrożonych w określonym okresie – jednego, trzech bądź pięciu lat;
- czas generowania innowacji – od powstania koncepcji do wprowadzenia produktu na rynek;
- nakłady na działalność badawczo-rozwojową (B+R) i komercjalizację innowacji;
- wartość sprzedaży nowych lub istotnie ulepszonych produktów i/lub usług, stopę zwrotu nakładów na działalność B+R lub z innych rodzajów aktywów (ROA, ROS), wzrost kapitalizacji rynkowej (Q-Tobina);
- syntetyczne wskaźniki efektywności innowacji, zestawiające nakłady na działalność innowacyjną z osiągniętymi rezultatami (Pichalk, 2012, s. 42-43; Szulczewska-Remi, 2023, s. 164-168; Rosenbusch i in., 2011, s. 448).

Miary te obciążone są jednak pewnymi wadami. Przykładowo: niektóre działania innowacyjne nie spełniają kryteriów stawianym wynalazkom, bądź nie są zgłaszane do opatentowania. Istnieją też znaczące wynalazki, które nigdy nie zostały opatentowane. Miary czasowe mogą być zawodne w przypadku organizacji, które raczej adaptują niż generują innowacje. Ponadto znaczący wpływ czynników kontekstowych na wartości finansowych wskaźników efektywności przedsiębiorstwa sprawia, że często efekty finasowe nie odzwierciedlają związków z innowacyjnością zarządczą i mogą prowadzić do błędnych wniosków.

Kolejnym problemem jest ocena innowacyjności realizowana za pomocą ocen subiektywnych. G. Dess i R. Robinson (1984) wykazali, że dokonywana przez menedżerów wysokiego szczebla subiektywna ocena poziomu efektywności organizacji jako całości *(organizational performance)* jest wysoko skorelowana z obiektywnymi miarami efektywności, takimi jak wzrost na aktywach (ROA) i wzrost sprzedaży, ale wydaje się, że wniosków z tego płynących na kwestie pomiaru innowacyjności zarządczej przenosić wprost nie można.

Piśmiennictwo dostarcza przykładów szeregu innych podejść w zakresie pomiaru innowacyjności zarządczej, zróżnicowanych zarówno w aspekcie analizowanych wymiarów innowacyjności, jak i dedykowanych do tego narzędzi badawczych (Kraśnicka, Ingram 2014, s. 79).

W tabeli 2 zaprezentowano wybrane przykłady narzędzi badawczych wykorzystywanych w pomiarach innowacyjności zarządczej przedsiębiorstw.

Wśród krajowych projektów badawczych poświęconych innowacyjności organizacyjnej i stricte zarządczej zrealizowanych w Polsce wskazać można przykładowo dwa:

Badania M. Pichlak (2012), w których wykorzystany został złożony model determinant innowacyjności organizacji, uwzględniający: zasoby badawcze, systemy komunikacji, typ kultury organizacyjnej, styl przywództwa, cechy członków zarządu, charakterystyki struktury organizacyjnej, a także charakterystykę otoczenia oraz strategię organizacji. Do oceny innowacyjności organizacji użyto

szeregu miar finansowych i pozafinansowych. Wyniki badań potwierdziły wpływ innowacyjności organizacji na jej efektywność.

T. Kraśnicka (2018) przeprowadziła badania innowacyjności zarządczej w 301 krajowych przedsiębiorstwach wykorzystując kwestionariusz badawczy oparty o wielowymiarową koncepcję innowacyjnego zarządzania. Wyróżniono w nim pięć wymiarów innowacyjności: strategiczny, strukturalny, metod motywowania i rozwoju pracowników, form relacji między organizacją a podmiotami otoczenia oraz technologii informacyjno-komunikacyjnych. Model badawczy obejmował również zewnętrzne uwarunkowania innowacyjności, innowacje procesowe i produktowe oraz finansowe i pozafinansowe rezultaty przedsiębiorstwa.

Tabela 2.

Narzędzia pomiaru innowacyjności zarządczej

Narzędzie	Opis	Wymiary oceniane	Sposób pomiaru	Źródło/rok
Skala MI 5D (JEMI)	Kwestionariusz do oceny poziomu innowacyjności zarządczej w 5 wymiarach	Strategia, Struktura, Motywacja i rozwój, Relacje zewnętrzne, ICT	7-punktowa skala Likerta	Kraśnicka, Głód, Wronka-Pośpiech (2016)
Innovative Leadership Measure	Pomiar kompetencji liderów wspierających innowacje	Kreatywność, Wola innowacji, Tolerancja, Wsparcie, Realizacja idei	Samoocena kadry	De Jong & Den Hartog (2010)
Management Innovation Survey (MIS)	Badanie firm nt. stosowanych innowacji zarządczych.	Praktyki MI (np. styl kierowania, decentralizacja)	Ankieta, dane ilościowe i jakościowe	OECD / Oslo Manual (2018)
Case study benchmarking	Porównawcza analiza wdrożeń MI w różnych firmach.	Kontekstowo zdefiniowane obszary MI	Wywiady, dokumenty, analiza porównawcza	WMS, Harvard, McKinsey (2020)
IMOT (Innovation Management Organization Tool)	Narzędzie do samooceny innowacyjności organizacji wg poziomu zarządzania.	Kierownictwo, Kultura, Procesy, Zasoby	Samoocena, checklista	InnoSupport, EU Project (2008)
IMProve (EU Benchmarking Tool)	Narzędzie online dla MŚP mierzące zarządzanie innowacjami.	Strategia, Organizacja, Procesy, Współpraca, Wyniki	Benchmarking + raport	IMP³rove Academy / EU (2009)
McKinsey Innovation Diagnostic	Diagnostyczne narzędzie doradcze oceniające gotowość innowacyjną.	Aspiracje, Wybór projektów, Mobilizacja, Skalowanie	Kwestionariusze + analiza doradcza	McKinsey (2020)
Organizational Innovation Audit (OIA)	Audyt innowacyjności systemów zarządzania w firmie.	Orientacja strategiczna, Struktury, Zachowania, Wartości	Formularze, matryce, ocena ekspercka	Dobni & Urban (2010), własne badania firm
Balanced Scorecard (zintegrowana z MI)	Modyfikacja klasycznej BSC pod kątem miar innowacyjnych.	Cele, KPI dla MI w wymiarach finansowych i niefinansowych	Miary ilościowe i jakościowe	Kaplan & Norton (z interpretacją innowacyjną)

Źródło: opracowanie własne.

Z kolei przypadki szeregu *large-scale surveys* poświęconych innowacyjności organizacyjnej przedsiębiorstw realizowanych w różnych krajach europejskich (Szwecji, Danii, Francji, Wielkiej Brytanii) i w skali Unii Europejskiej przytaczają Armbruster i in. (2008, s. 647-649).

Powyższe przykłady projektów i koncepcji badawczych dają obraz sposobu rozumienia pojęcia innowacyjności zarządczej wśród badaczy i używanych do jej oceny mierników oraz zakresu badań empirycznych nad przedmiotowym zjawiskiem. Wydaje się, że istotną słabością prezentowanych modeli badawczych jest brak systemowej, integratywnej koncepcji definiującej innowacyjność zarządczą, ujmującej wszystkie kluczowe aspekty procesu zarządzania organizacją, a także udział ocen subiektywnych i miar pośrednich w diagnozowaniu tego zjawiska.

Zamieszczona w kolejnej części opracowania koncepcja metody pomyślana jest jako krok ku dalszej systematyzacji problemu poprzez odwołanie się do koncepcji systemu zarządzania jako pojęcia generującego i integrującego ogół aktywności zarządczych w przedsiębiorstwie. Jest także próbą opracowania bardziej obiektywnego narzędzia pomiaru poziomu innowacyjności zarządczej, które co prawda odwołuje się w części do opinii kierownictwa przedsiębiorstw, ale opartych o pytania szczegółowe, dotyczące konkretnych rejestrowanych działań i stanów w systemach zarządzania tymi organizacjami.

Przegląd literatury wskazuje, że dotychczasowe badania nad innowacyjnością zarządczą koncentrowały się głównie na identyfikacji jej determinant, efektów lub wybranych wymiarów pomiaru. Brakuje natomiast zintegrowanego podejścia ujmującego innowacyjność zarządczą przez pryzmat systemu zarządzania jako całości oraz umożliwiającego wielowymiarową diagnozę tego zjawiska. Zidentyfikowana luka badawcza stała się podstawą opracowania autorskiej metodyki diagnozy innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami.

Metody

W niniejszym opracowaniu przyjęto podejście koncepcyjno-projektowe ukierunkowane na opracowanie metodyki diagnozy innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami. Proces badawczy obejmował analizę literatury przedmiotu, identyfikację kluczowych wymiarów innowacyjności zarządczej oraz opracowanie modelu badawczego i narzędzia diagnostycznego umożliwiającego jego przyszłą empiryczną weryfikację. Przyjęta procedura badawcza obejmowała kolejno: określenie celu i hipotez badawczych, opracowanie modelu metodyki, konstrukcję narzędzia badawczego oraz przygotowanie założeń planowanej analizy statystycznej.

1.1.Cel i hipotezy badawcze

Celem opracowania prezentowanej autorskiej koncepcji metody diagnozy innowacyjności SZ jest jej wykorzystanie w ocenie poziomu innowacyjności SZ polskich przedsiębiorstw połączonej z próbą określenia jej kontekstowych uwarunkowań oraz efektywnościowych konsekwencji. Dodatkowo Celem opracowania jest przedstawienie autorskiej metodyki diagnozy innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami oraz wskazanie założeń umożliwiających jej przyszłą empiryczną weryfikację. W celu operacjonalizacji modelu sformułowano hipotezę główną oraz hipotezy szczegółowe.

Sformułowano następującą hipotezę główną oraz hipotezy szczegółowe:
Hipoteza główna: Innowacyjne systemy zarządzania, będące wielowymiarowymi konstruktami, wpływają w istotny sposób na wdrażanie innowacji technologicznych oraz na finansowe i pozafinansowe wyniki przedsiębiorstw.
H1: Kierując się przesłankami płynącymi z niskiego poziomu innowacyjności polskiej gospodarki założono, że również poziom innowacyjności SZ badanych przedsiębiorstw jest relatywnie niski.
H2: Istnieje zależność pomiędzy poziomem innowacyjności SZ a charakterystykami kontekstowymi (uwarunkowaniami działalności) badanych przedsiębiorstw.
H3. Innowacyjność SZ pozytywnie wpływa na wdrażanie innowacji technologicznych (produktowych i procesowych).
H4. Innowacyjność systemów zarządzania pozytywnie koreluje z efektywnością przedsiębiorstw.

1.2.Projekt metodyki i model badawczy

Projekt metodyki oparto na założeniu, że innowacyjność zarządcza ma charakter wielowymiarowy i powinna być analizowana w odniesieniu do całego systemu zarządzania przedsiębiorstwem. W związku z tym opracowano model badawczy obejmujący podsystemy zarządzania oraz przekrojowe komponenty innowacyjności.

Przyjęto następujące założenia metodyczne:

- metodyka oparta zostanie na filozofii podejścia sytuacyjnego do zarządzania, wykorzystując elementy teorii wartościowania jakości, teorii pomiaru, analizy wskaźnikowej oraz wybrane metody analizy statystycznej;
- model badawczy obejmował będzie trzy grupy (obszary) charakterystyk (wymiarów, zmiennych) stanowiące przedmiot pomiaru i analiz, tj. charakterystyki innowacyjności SZ, charakterystyki kontekstu organizacyjnego i charakterystyki efektywności przedsiębiorstw;
- metodykę charakteryzować będzie wielowymiarowość i kompleksowość analiz, rozumiane jako: możliwość pomiaru i oceny innowacyjności SZ na poziomie wielu zmiennych (charakterystyk) wyodrębnionych w podsystemach SZ w kontekście wielu kryteriów ocen oraz możliwość analiz korelacyjnych pomiędzy charakterystykami trzech ww. grup;

- podstawą procesu oceny będzie bezpośredni, w możliwie wysokim stopniu zobiektywizowany pomiar charakterystyk;
- zakłada się możliwość kwantyfikacji i normalizacji procesu oceny, czyli wyrażanie natężenia cech oraz stopni spełnienia kryteriów w postaci liczb niemianowanych (wskaźników) z określonego przedziału zmienności (porównaj: Gliszczyński, 2013).

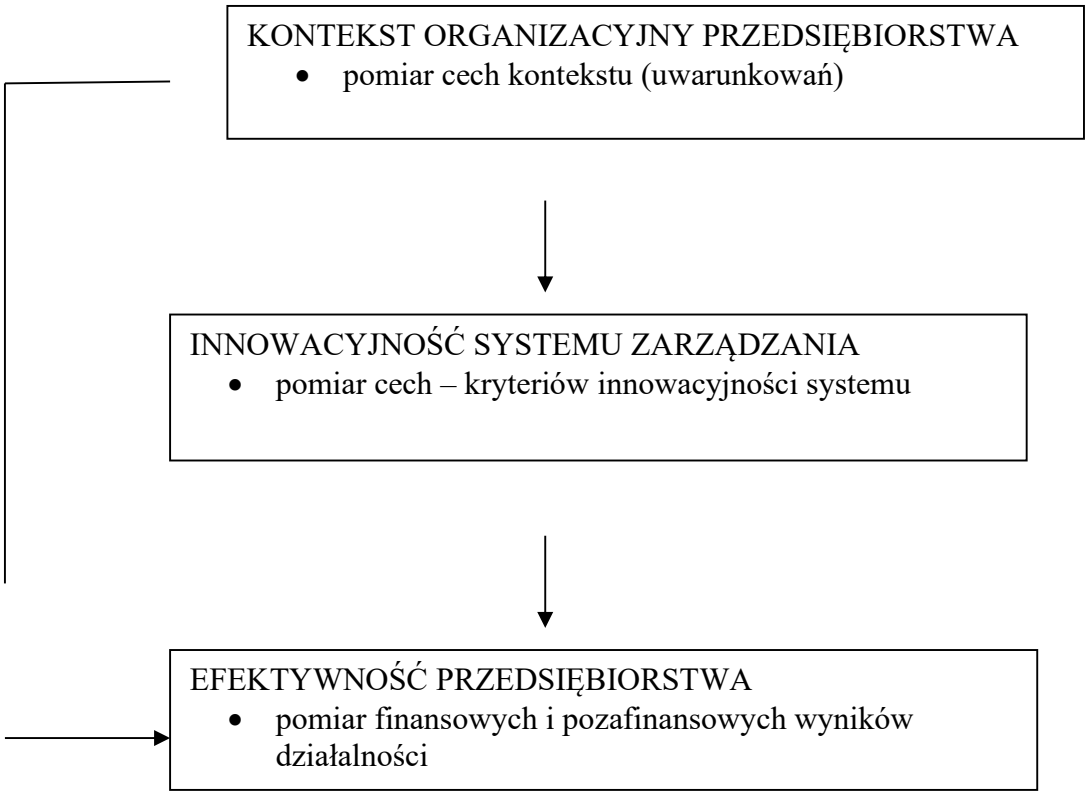
Na ogólną strukturę metodyki składać się będą następujące, główne jej elementy:

1. Określenie celów badań i sformułowanie hipotez badawczych.
2. Budowa *modelu badawczego*, obejmującego:
   - zdefiniowanie pojęcia SZ poprzez wyodrębnienie podsystemów i zmiennych strukturalnych;
   - opracowanie kryteriów oceny (miar) innowacyjności SZ (syntetyczne, obszarowe i częściowe);
   - kwantyfikacja kryteriów oceny innowacyjności – sformułowanie wskaźników innowacyjności;
   - wybór charakterystyk kontekstu organizacyjnego (uwarunkowań działalności) przedsiębiorstw;
   - wybór miar efektywności przedsiębiorstw;
   - określenie kierunków analiz korelacyjnych (współzmienności) badanych charakterystyk.
3. Opracowanie kwestionariusza diagnostycznego.
4. Dobór narzędzi statystycznych do analiz wyników badań.

Strukturę modelu badawczego innowacyjności SZ przedsiębiorstwami przedstawiono na rys. 1.

W zaproponowanej metodyce przyjęto następujące cele badawcze:

1) określenie poziomu innowacyjności SZ diagnozowanych przedsiębiorstw;
2) określenie związków innowacyjnosci SZ z innowacyjnością produktową, technologiczną i wynikami działalności przedsiębiorstw;
3) identyfikacja związków innowacyjności SZ z uwarunkowaniami wewnętrznymi i zewnętrznymi (kontekstem organizacyjnym) przedsiębiorstw.



Rys 1. Model diagnostyczny
Źródło: opracowanie własne.

Przyjęto następującą *definicję systemu zarządzania (SZ):* to zespół współzależnych cech (wymiarów i zmiennych), strukturalnych, proceduralnych i narzędziowych, wyodrębnionych w ramach *sześciu kluczowych podsystemów:*

- *podsystemu strategii i planowania* - zbioru cech opisujących strukturę celów organizacji, pozyskiwanie zasobów i sposoby realizacji celów;
- *podsystemu struktury organizacyjnej* - zbioru cech opisujących wewnętrzną budowę i uporządkowanie organizacji;
- *podsystemu procesów i procedur* - zbioru cech opisujących strukturę procesów biznesowych i pomocniczych składających się na realizację łańcucha wartości;
- *podsystemu kadrowego* - zbioru cech opisujących pozyskiwanie oraz skuteczne i twórcze motywowanie pracowników;
- *podsystemu kontroli* - zbioru cech opisujących zakres oceny kondycji przedsiębiorstwa oraz kluczowe procedury i metody takich analiz;

- *podsystemu narzędzi zarządzania* - zbioru cech opisujących zakres wspomagania procesów zarządzania poprzez dokumentację, środki techniczne, oprogramowanie i formalne procedury zarządcze (Gliszczyński, 2013, s. .....).

Zakres dekompozycji pojęcia SZ w serie zmiennych wpływał będzie na szczegółowość formułowania kryteriów oceny jego innowacyjności.

Za nadrzędne, *syntetyczne kryterium* oceny w metodyce przyjęto *kryterium stopnia innowacyjności SZ* rozumiane jako zdolność organizacji do tworzenia i upowszechniania nowych rozwiązań o charakterze produktów, technologii, procesów organizacyjnych, jak i do absorpcji wiedzy powstającej poza przedsiębiorstwem będącą konsekwencją określonych rozwiązań zarządczych (strukturalnych, proceduralnych, przywódczych, kulturowych i narzędziowych).

W oparciu o studia literaturowe i wcześniejsze doświadczenia badawcze autorów związane z oceną jakości SZ wyodrębniono *sześć komponentów innowacyjności SZ* stanowiących w metodyce badań *obszarowe kryteria oceny*. Są to:

- *transfer wiedzy i kreatywność*, rozumiane jako zdolność organizacji do pozyskiwania i przetwarzania wiedzy, informacji i doświadczeń w nowe i użyteczne pomysły (Oslo, 2018, s. 128);
- *elastyczność SZ,* rozumiana jako zdolność do szybkiej reakcji na zmiany otoczenia, wyrażonej zmianami strukturalno-funkcjonalnymi SZ (Krupski, 2005, s. 28);
- *aplikacja formalnych standardów innowacyjności*, rozumiana jako zakres wdrożenia i faktycznej adaptacji w praktyce zarządzania siedmiu standardów wspierających innowacyjność organizacji o symbolach CEN/TS 16555-1 do CEN/TS 16555-6 (Wyroba, Tkaczyk 2015);
- *cyfryzacja SZ* odzwierciedlająca zakres i tempo, w jakim w przedsiębiorstwie adaptuje się nowe technologie cyfrowe związane z zarządzaniem;
- *proinnowacyjność kultury organizacyjnej i przywództwa*, rozumiana jako wsparcie kulturowe i kierownicze dla procesów o charakterze twórczym, pracy zespołowej, dzielenia się wiedzą, budowania podmiotowości pracowników (O'Dell, Hubert, 2011, s. 129-142);
- *zakres relacji międzyorganizacyjnych*, odzwierciedlany poprzez liczbę, obszar, czas trwania i rezultaty aliansów strategicznych oraz innych form współpracy międzyorganizacyjnej.

W tabeli 3 przedstawiono *zbiór kryteriów oceny innowacyjności SZ* będący wynikiem nałożenia na siebie dwóch omówionych wyżej charakterystyk obszarowych – komponentów innowacyjności SZ i podsystemów SZ. Zamieszczone w oknach macierzy *charakterystyki innowacyjnosci SZ* są propozycjami *podstawowych kryteriów oceny,* będących efektem ich wyboru z liczniejszej zbiorowości w procesie eksperckiej oceny istotności kryteriów. Kryteria te stanowić będą podstawę sformułowania *kryteriów szczegółowych* w postaci *wskaźników oceny (miar innowacyjnosci SZ)* umożliwiających jej wartościowanie w obrębie określonego podstawowego kryterium oceny w postaci liczby niemianowanej z określonego przedziału zmienności warunkowanego techniką i skalą użytą w narzędziu pomiaru.

Założono, że pojęcie *efektywności przedsiębiorstwa* traktowane będzie w metodzie wielowymiarowo, można bowiem mówić o różnych kategoriach efektywności i odpowiadających im atrybutach, jak:

- *efektywność wynikowa,* określana przez stopień realizacji planów, wielkość produkcji, wynik finansowy;
- *efektywność systemowo – kontekstowa,* odzwierciedlająca trwanie, udział w rynku, udział nowych wyrobów, częstość zmian w technice;
- *efektywność w znaczeniu prakseologicznym,* utożsamiana ze skutecznością osiągania celów, adaptacyjnością do otoczenia, produktywnością zasobów;
- *efektywność ekonomiczna,* odzwierciedlająca wyniki ekonomiczne działalności, jak rentowność, płynność finansowa, wzrost wartości organizacji;
- *efektywność społeczna,* wskazująca stopień akceptacji organizacji przez jej interesariuszy – zadowolenie z pracy, poziom fluktuacji kadr, satysfakcja klientów, itp. (porównaj: Bielski, 1986; Gliszczyński, 2013).

Ustalono, ze miarami efektywności działalności przedsiębiorstwa będą zarówno mierniki finansowe, jak i rynkowe oraz produktowo-technologiczne.

Założono, że *kontekst organizacyjny* diagnozowanych przedsiębiorstw opisywany będzie przez ich charakterystyki wewnętrzne, jak rodzaj działalności, wielkość, poziom kwalifikacji kadry, itp.

Tabela 3.

Kryteria podstawowe oceny innowacyjności systemów zarządzania

		Podsystemy Systemu Zarządzania					
		Podsystem strategii i planowania	Podsystem struktury organizacyjnej	Podsystem procesów i procedur	Podsystem kadrowy	Podsystem kontroli	Podsystem narzędzi zarządzania
Komponenty innowacyjności SZ (kryteria przekrojowe)	Transfer wiedzy i kreatywność	Liczba ujętych w strategii i realizowanych w firmie projektów rozwojowych; poziom nakładów na B+R	Zmiany strukturalne wynikłe z wdrożenia koncepcji benchmarkingu, outsourcingu, lean managementu	Wyodrębnienie procesów zorientowanych na transfer wiedzy i kreatywność	Zakres uczestnictwa pracowników w konferencjach naukowych, szkoleniach i treningach umiejętności	Zakres niesformalizowanych metod kontroli wykonania zadań (samokontrola, kontrola wzajemna, inne)	Wdrożenie systemów informatycznych i praktyk zarządczych służących pozyskiwaniu, gromadzeniu i upowszechnianiu wiedzy i informacji
	Elastyczność/ adaptacyjność SZ	Liczba i zakres istotnych zmian w strategiach rozwoju i strategiach konkurencyjnych	Wdrożenie zmian uelastyczniających strukturę organizacyjną (decentralizacja, doraźne zespoły interdyscyplinarne)	Wdrożenie lub wzrost zakresu integracji ZSZ (liczba zintegrowanych podsystemów)	Powiązanie formalnego systemu ocen i awansów z kreatywnością i innowacyjnością kadry	Zakres alternatywnych form i metod kontroli kierowniczej	Zakres aplikacji nowoczesnych narzędzi wspomagania decyzji
	Aplikacja formalnych standardów innowacyjności wg CEN/TS 16555	Obecność strategii innowacji w miksie strategii funkcjonalnych	Wyodrębnienie i autonomia jednostek/ komórek organizacyjnych o profilu B+R lub zespołów projektowych	Wdrożenie systemu zarządzania innowacjami (MIS) lub wybranych procedur systemu	Premiowanie za jakość i kreatywność w systemach wynagrodzeń	Zakres wdrożenia metod oceny ryzyka i metod oceny efektywności innowacji	Zakres formalizacji ról i czynności dla stanowisk odpowiedzialnych za procesy innowacyjne (nowy regulamin organizacyjny)

	Podsystemy Systemu Zarządzania					
	Podsystem strategii i planowania	Podsystem struktury organizacyjnej	Podsystem procesów i procedur	Podsystem kadrowy	Podsystem kontroli	Podsystem narzędzi zarządzania
Cyfryzacja SZ	Zakres wykorzystania w procesach planistycznych informatycznych systemów i narzędzi zbierania i analizy danych i controllingu strategicznego	Zakres aplikacji koncepcji e-biznesu i m-biznesu w firmie	Zakres wykorzystania oprogramowania do zarządzania procesami (np. ADONIS, ARIS, własne)	Zakres korzystania z sieci społecznościowych w naborze pracowników	Zakres cyfryzacji procesów kontrolnych w firmie	Udział nakładów na IT w budżecie ogółem
Proinnowacyjność kultury organizacyjnej i przywództwa	Zakres udziału kultury zadania w miksie kulturowym firmy	Zakres stosowania innowacyjnych form strukturalnych	Stopień autonomiczności menedżerów (właścicieli) procesów	Zakres finansowego i organizacyjnego wsparcia dla kreowania liderów innowacji	Zakres monitorowania i diagnozowania zmian kulturowych	Korzystanie ze sformalizowanych narzędzi i procedur diagnozowania i monitorowania zmian kulturowych i efektywności przywództwa

3.3. Konstrukcja narzędzia diagnostycznego

W opracowaniu narzędzia diagnostycznego kierowanego do kadry kierowniczej przedsiębiorstw wykorzystano ogólną koncepcję kwestionariusza pomiarowego zaprezentowanego w pracy (Kraśnicka, 2018, s. 156) wprowadzając do niego autorskie modyfikacje. Wyodrębniono w nim trzy główne części.

W części pierwszej, autorskiej, obejmującej pomiar cech innowacyjności SZ przedsiębiorstwami, zamieszczono 36 stwierdzeń wyprowadzonych z kryteriów oceny innowacyjności SZ zawartych w tablicy 3 (po sześć stwierdzeń dla każdego z sześciu podsystemów SZ). Zadaniem respondenta jest oszacowanie w 7-stopniowej skali Likerta na ile poszczególne stwierdzenia odzwierciedlają rzeczywistą sytuację w zakresie istotnych, nowatorskich zmian zarządczych w badanym przedsiębiorstwie w ostatnich trzech latach, gdzie 1 na skali oznaczała odpowiedź całkowicie negatywną, 7 całkowicie pozytywną. Fragment stwierdzeń z pierwszej części kwestionariusza prezentuje poniższe zestawienie w tabeli 4.

Tabela 4.

Fragment pierwszej części kwestionariusza diagnostycznego

W ostatnich 3 latach wprowadziliśmy istotne zmiany w podsystemie strategii i planowania:							
1. W strategii rozwoju ujęliśmy realizację szeregu nowatorskich projektów inwestycyjnych, produktowych lub zarządczych. Zwiększyliśmy poziom nakładów na B+R	1	2	3	4	5	6	7
2. Strategię konkurencji przeorientowaliśmy na nowe rynki, produkty lub sposoby budowania przewagi konkurencyjnej	1	2	3	4	5	6	7
3. W miksie strategii funkcjonalnych wyodrębniliśmy strategię innowacji	1	2	3	4	5	6	7
4. Wykorzystywaliśmy nowe, cyfrowe metody i narzędzia gromadzenia i analizy danych planistycznych oraz controllingu strategicznego	1	2	3	4	5	6	7
5. Zadeklarowaliśmy w polityce firmy tworzenie warunków dla wdrażania kultury organizacyjnej typu zadaniowego	1	2	3	4	5	6	7
6. Uwzględniliśmy w planach rozwoju alianse strategiczne lub inne formy współpracy międzyorganizacyjnej	1	2	3	4	5	6	7

Źródło: opracowanie własne

W części drugiej kwestionariusza, obejmującej pomiar efektywności działalności przedsiębiorstwa ujęto następujące miary efektywności dla trzyletniego okres funkcjonowania przedsiębiorstwa:

1) liczbę innowacji produktowych;
2) liczbę innowacji technologicznych;
3) dynamikę wzrostu zatrudnienia;
4) poziom fluktuacji kadr;
5) dynamikę wzrostu sprzedaży;
6) dynamikę udziału w rynku w stosunku do głównych konkurentów;
7) poziom marży zysku netto;
8) zyskowność w relacji do głównych konkurentów.

Zadaniem respondenta jest oszacowanie dynamiki wymienionych czynników w okresie trzyletnim w skali 5-stopniowej.

W części trzeciej kwestionariusza (metrykalnej) zawarto 8 pytań o charakterystyki kontekstu organizacyjnego przedsiębiorstwa, tj.:

1) typ przedsiębiorstwa (produkcyjne, usługowe, handlowe);
2) branża;
3) forma organizacyjno-prawna;
4) forma własności;
5) wielkość (liczba zatrudnionych);
6) okres istnienia;
7) poziom kwalifikacji kadry kierowniczej;
8) stanowisko osoby udzielającej odpowiedzi.

W tej części dopuszczono inne niż szacunek na skali formy odpowiedzi.

3.4.Plan analizy statystycznej

W celu przyszłej empirycznej weryfikacji proponowanej metodyki opracowano plan analizy statystycznej obejmujący ocenę rzetelności narzędzia, analizę struktury zmiennych oraz identyfikację zależności pomiędzy innowacyjnością systemów zarządzania, kontekstem organizacyjnym oraz efektywnością przedsiębiorstw. W tym celu można zastosować m. in. wzór α Cronbacha (Stanisz, 2007, s. 441). Współczynnik α Cronbacha mierzy wewnętrzną spójność zestawu pytań. Zadowalająca rzetelność testu odpowiada wartościom współczynnika α Cronbacha między 0,7 a 0,95 (Tavakol & Dennick, 2011). Jedną z klasyfikacji współczynnika Cronbacha proponują George i Mallery (2016, s. 240): $\alpha > 0{,}9$ – rzetelność doskonała, $\alpha > 0{,}8$ – dobra, $\alpha > 0{,}7$ – akceptowalna, $\alpha > 0{,}6$ – wątpliwa, $\alpha > 0{,}5$ – słaba, $\alpha < 0{,}5$ – nieakceptowana. Teresa Kraśnicka akceptuje rzetelność stosowanego narzędzia pomiarowego już od poziomu 0,6 (Kraśnicka, 2018, s. 102).

W kolejnym etapie analizy warto zastosować statystykę opisową polegającą na wyliczeniu podstawowych statystyk dla każdego pytania. Przy dużej liczbie pytań, (36+8) z pierwszej i drugiej części kwestionariusza, można zastosować analizę czynnikową w celu wyodrębnienia głównych obszarów, które mierzy kwestionariusz, poprzedzoną analizą korelacyjną. Jeśli okazałoby się, że zmienne obserwowane w badaniu wykazują słabe skorelowanie, analiza czynnikowa nie powinna być stosowana. Im wyższe korelacje pomiędzy pewnymi zmiennymi obserwowanymi, tym bardziej usprawiedliwione będzie zastosowanie analizy czynnikowej. W przypadku, gdy korelacje będą niskie, tym mniej prawdopodobnym jest, że analizowane zmienne utworzą łatwy w interpretacji czynnik wspólny. Adekwatność macierzy korelacji do zastosowania analizy czynnikowej można ocenić za pomocą współczynnika KMO (Kaisera-Mayera-Olkina) przyjmującego wartości z przedziału $\langle 0,1 \rangle$. Przyjmuje się, że wartość współczynnika KMO powinna przekraczać 0,5 (Kisielińska i in., 2021, s. 149).

Do oceny czy różnice między medianami rożnych grup analizowanych czynników są statystycznie istotne (tzn. czy grupy różnią się od siebie w istotny sposób) można zastosować test Kruskala-Wallisa (Rabiej, 2012, s. 195). Test ten nie wymaga założeń dotyczących rozkładu danych (np. normalności) ani równości wariancji. Test ten porównuje rozkłady grup i sprawdza, czy przynajmniej jedna grupa różni się od pozostałych pod względem mediany, jeśli wynik jest statystycznie istotny, należy sprawdzić które grupy się różnią.

Ponieważ istotnym celem prowadzonych badań ma być próba wyłonienia wartości cech/wymiarów innowacjości systemów zarządzania i sprawdzenia, czy występują zależności pomiędzy tymi cechami, a charakterystykami kontekstu organizacyjnego przedsiębiorstw, należy założyć, że za pomocą analizy czynnikowej uda się zredukować dużą liczbę zmiennych (36+8) do mniejszej liczby ukrytych, nieobserwowanych czynników i te czynniki będzie można zinterpretować jako właśnie wymiary innowacji zarządczych.

Do badania zależności pomiędzy wartościami cech innowacji zarządczych a charakterystykami kontekstowymi (1-8) będzie można przeprowadzić test niezależności χ^2 (Rabiej, 2012, s. 213). Test ten

można wykorzystać także do badania zależności pomiędzy cechami innowacyjnosci zarządczej i charakterystykami efektywności przedsiębiorstw.

4.Wyniki

Wynikiem przeprowadzonych prac koncepcyjnych jest opracowanie autorskiej metodyki diagnozy innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami. Metodyka obejmuje model diagnostyczny, zestaw kryteriów oceny, konstrukcję kwestionariusza badawczego oraz propozycję procedury analizy danych.

W ramach opracowanej koncepcji przyjęto, że ocena innowacyjności systemów zarządzania będzie realizowana poprzez analizę sześciu podsystemów zarządzania oraz sześciu przekrojowych komponentów innowacyjności. Takie podejście pozwala na identyfikację zarówno poziomu innowacyjności zarządczej, jak również jej struktury i dominujących obszarów rozwoju.

Rezultatem opracowania jest również przygotowanie narzędzia diagnostycznego umożliwiającego przyszłe prowadzenie badań empirycznych oraz ocenę zależności pomiędzy innowacyjnością systemów zarządzania a efektywnością przedsiębiorstw.

5. Dyskusja

Przedstawiona metodyka diagnozy innowacyjności systemów zarządzania stanowi rozwinięcie dotychczasowych podejść do pomiaru innowacyjności zarządczej opisywanych w literaturze przedmiotu. W wielu wcześniejszych badaniach uwaga autorów koncentrowała się przede wszystkim na identyfikacji determinant innowacyjności, pomiarze innowacji produktowych i technologicznych lub analizie wybranych aspektów zmian organizacyjnych. Znacznie rzadziej podejmowano próbę objęcia analizą całego systemu zarządzania przedsiębiorstwem.

Proponowana koncepcja różni się od wcześniejszych podejść przede wszystkim przyjęciem systemu zarządzania jako podstawowej jednostki analizy. Oznacza to odejście od oceny pojedynczych praktyk lub rozwiązań organizacyjnych na rzecz zintegrowanej diagnozy obejmującej wzajemnie powiązane podsystemy zarządzania oraz komponenty innowacyjności organizacyjnej. Takie ujęcie pozwala lepiej uchwycić złożony charakter innowacji zarządczych oraz ich potencjalny wpływ na funkcjonowanie przedsiębiorstwa.

W porównaniu z wcześniejszymi propozycjami pomiaru innowacyjności zarządczej przedstawiony model rozszerza zakres oceny o elementy związane z transferem wiedzy, elastycznością systemu zarządzania, cyfryzacją, kulturą organizacyjną oraz relacjami międzyorganizacyjnymi. Integracja tych

wymiarów pozwala na bardziej kompleksową ocenę zdolności organizacji do generowania i wdrażania zmian.

Przedstawione w artykule założenia pozostają zgodne z wcześniejszymi ustaleniami dotyczącymi wielowymiarowego charakteru innowacji zarządczych oraz ich znaczenia dla rozwoju organizacji (Damanpour i Aravind, 2012; Birkinshaw, Hamel i Mol, 2008). Podobnie jak w ujęciu Kraśnickiej (2018), innowacyjność zarządcza traktowana jest jako zjawisko wykraczające poza wdrażanie pojedynczych rozwiązań organizacyjnych i obejmujące szerszy kontekst funkcjonowania przedsiębiorstwa. Jednocześnie proponowana metodyka rozszerza dotychczasowe podejścia poprzez próbę operacjonalizacji tego zjawiska w postaci spójnego modelu diagnostycznego.

W odróżnieniu od wcześniejszych koncepcji, które koncentrowały się przede wszystkim na identyfikacji determinant innowacyjności lub pomiarze wybranych obszarów zmian organizacyjnych (Armbruster i in., 2008; Hamel, 2006), w niniejszym opracowaniu zaproponowano podejście integrujące ocenę podsystemów zarządzania oraz komponentów innowacyjności w ramach jednego modelu analitycznego. Pozwala to nie tylko określić poziom innowacyjności zarządczej, ale również identyfikować jej profil i potencjalne zależności z charakterystykami organizacyjnymi oraz efektywnością przedsiębiorstw. Można zatem przyjąć, że proponowane rozwiązanie stanowi krok w kierunku bardziej systemowego i porównywalnego podejścia do oceny innowacyjności zarządczej.

Jednocześnie należy podkreślić, że opracowana metodyka ma obecnie charakter koncepcyjny i wymaga dalszej empirycznej weryfikacji. W szczególności konieczne jest przeprowadzenie badań pilotażowych oraz ocena trafności i rzetelności opracowanego narzędzia diagnostycznego. Dopiero wyniki takich analiz pozwolą określić, czy przyjęte wskaźniki rzeczywiście odzwierciedlają poziom innowacyjności systemów zarządzania oraz czy model może znaleźć zastosowanie w praktyce gospodarczej.

6. Wnioski

Przedstawiona w artykule koncepcja metodyki diagnozy innowacyjności zarządczej z jednej strony nawiązuje do wcześniejszych, przytoczonych w artykule konceptualizacji i modeli wykorzystywanych w badaniach tej kategorii pojęciowej, z drugiej zaś – proponuje nową jakość. Każda z dotychczas opracowanych koncepcji innowacyjności zarządczej odnosi się w jakiś sposób do szeroko traktowanego pojęcia systemu zarządzania, jednak, przynajmniej wg wiedzy autorów, brakowało do tej pory modelu innowacyjności przyjmującego system zarządzania za punkt wyjścia, a takie właśnie podejście proponowane jest w niniejszym opracowaniu. Jego aplikacja w metodyce diagnozy pozwoli poddać innowacyjność zarządczą przedsiębiorstw precyzyjnemu badaniu oraz kategoryzacji, bowiem wyróżnione komponenty innowacyjności SZ w liczbie sześciu oraz sześć podsystemów systemu zarządzania, pozwalają zdefiniować jako minimum przynajmniej trzydzieści sześć kryteriów oceny poziomu innowacyjności zarządczej. Dzięki oparciu modelu innowacyjności SZ na wielowymiarowej koncepcji systemu można mieć pewność, że żaden przejaw innowacyjności zarządczej przedsiębiorstw w takich badaniach, mówiąc kolokwialnie, nie umknie uwadze. Autorzy przewidują, że dzięki szczegółowości i systemowości przedstawianego modelu uda się diagnozować nie tylko stopień, ale też profil innowacyjności systemów zarządzania przedsiębiorstwami, rozumiany jako charakterystyczny dla danego przedsiębiorstwa wzór powiązań wartości kryterialnych wskaźników innowacyjności. Przewidziana w metodyce identyfikacja relacji między poziomem i profilem innowacyjności SZ a charakterystykami kontekstu organizacyjnego i miarami efektywności przedsiębiorstw pozwoli wskazać z jednej strony czynniki kształtujące innowacyjność zarządczą, z drugiej zaś dowieść znaczenia jej wpływu na wyniki działalności przedsiębiorstw.

Ograniczeniem opracowania jest brak empirycznej weryfikacji zaproponowanej metodyki, w szczególności brak badań pilotażowych pozwalających ocenić trafność i użyteczność narzędzia diagnostycznego. Kolejnym etapem badań powinno być przeprowadzenie walidacji modelu w przedsiębiorstwach. Pomimo wskazanego ograniczenia opracowanie wnosi wkład do rozwoju metod oceny innowacyjności zarządczej poprzez przedstawienie autorskiego, wielowymiarowego podejścia do diagnozy systemów zarządzania.

Jednocześnie należy podkreślić, że przedstawiona koncepcja ma obecnie charakter modelowy i wymaga dalszej empirycznej weryfikacji. Ograniczeniem opracowania jest brak badań pilotażowych oraz brak oceny trafności i rzetelności opracowanego narzędzia diagnostycznego, co na obecnym etapie nie pozwala na jednoznaczne potwierdzenie skuteczności zaproponowanych wskaźników w pomiarze innowacyjności systemów zarządzania. Ograniczenie to wynika z przyjętego celu artykułu, którym było opracowanie założeń metodycznych i konstrukcji narzędzia badawczego.

Pomimo wskazanych ograniczeń opracowanie wnosi nową wartość do badań nad innowacyjnością zarządczą poprzez przyjęcie systemu zarządzania jako podstawowej jednostki analizy oraz integrację

różnych wymiarów innowacyjności w jednym modelu diagnostycznym. W ujęciu teoretycznym proponowana metodyka rozwija podejście do pomiaru innowacyjności zarządczej i może stanowić punkt wyjścia do dalszych badań nad relacjami pomiędzy rozwiązaniami zarządczymi a wynikami działalności przedsiębiorstw. W ujęciu praktycznym może znaleźć zastosowanie jako narzędzie wspierające identyfikację obszarów wymagających zmian oraz projektowanie działań ukierunkowanych na wzrost innowacyjności organizacyjnej.

Kolejnym etapem badań powinno być przeprowadzenie pilotażowej weryfikacji opracowanej metodyki na grupie przedsiębiorstw oraz ocena właściwości opracowanego kwestionariusza diagnostycznego. Planowane badania będą obejmowały ocenę rzetelności narzędzia, analizę struktury czynnikowej oraz identyfikację zależności pomiędzy poziomem i profilem innowacyjności systemów zarządzania, charakterystykami kontekstu organizacyjnego oraz efektywnością przedsiębiorstw. Uzyskane wyniki pozwolą na dalsze doskonalenie modelu oraz ocenę możliwości jego wykorzystania w szerszej praktyce badawczej i gospodarczej.

Bibliografia

Książki :

1. Dubouloz, S. (2012, June, 06). Organizational Innovation: Clarifying the concept as output and as process and suggesting research avenues from these two angles of analysis. Paper presented at 21ème congrès de l'Association Internationale de Management Stratégique (AIMS), Lille.
2. Francik, A. (2003). Sterowanie procesami innowacyjnymi w organizacji. Kraków: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej.
3. George, D., & Mallery, P. (2016). IBM SPSS Statistics 23 Step by Step: A Simple Guide and Reference (14th ed.). New York: Routledge.
4. Gliszczyński, G. (2013). Diagnoza systemów zarządzania przedsiębiorstwami w górnictwie węgla kamiennego. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
5. Kisielińska, J., i in. (2021). Wielowymiarowa analiza danych w ekonomice rolnictwa. Warszawa: Wydawnictwo SGGW. sggw.pl
6. Kozera I., Skuteczność procesów komunikacji społecznej jako determinanta innowacyjności w organizacji, „Innowacje i kreatywność we współczesnym przedsiębiorstwie - Aktualności badawcze", Naukowe Wydawnictwo IVG, 2023.
7. Kraśnicka, T. (2018). Innowacje w zarządzaniu. Nowe ujęcie. Warszawa: C.H. Beck.
8. Kraśnicka, T., and Ingram, T. (Eds.) (2014). Innowacyjność przedsiębiorstw – koncepcje, uwarunkowania i pomiar. Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego.
9. Krupski, R. (2005). Elastyczność organizacji jako odpowiedź na turbulencje otoczenia. In: R. Krupski (Ed.), Zarządzanie przedsiębiorstwem w turbulentnym otoczeniu (pp. 21-35). Warszawa: PWE.
10. Lam, A. (2004). Organizational Innovation. In: J. Fagerberg and D.C. Mowery (Eds.), The Oxford Handbook of Innovation (pp. 115-147). Oxford: Oxford University Press.
11. Myjak, T. (2024). Antycypowane działania i determinanty wspierające innowacyjność przedsiębiorstw. Nauki Ekonomiczne, 40.
12. O'Dell, C., and Hubert, C. (2011). The New Edge in Knowledge Management. Hoboken: John Wiley & Sons.
13. Oslo manual. Guidelines for collecting and interpreting innovation data (2005). Organisation for Economic Co-operation and Development, Statistical Office of the European Communities, Paris.
14. Oslo manual. Guidelines for collecting and interpreting innovation data (2018). Organisation for Economic Co-operation and Development, Statistical Office of the European Communities, Paris.

15. Pichlak, M. (2012). Uwarunkowania innowacyjności organizacji. Studium teoretyczne i wyniki badań empirycznych. Warszawa: Difin.
16. Rabiej, M. (2012). Statystyka z programem STATISTICA. Gliwice: Helion.
17. Schumpeter, J. (1960). Teoria rozwoju gospodarczego. Warszawa: PWN.
18. Szulczewska-Remi, A. (2023). Pomiar działalności innowacyjnej przedsiębiorstw. In Analiza ekonomiczna przedsiębiorstw w warunkach niepewności (pp. 156-172). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu.
19. Stanisz, A. (2007). Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 3. Analizy wielowymiarowe. Kraków: StatSoft.

Artykuły naukowe w czasopismach z DOI:

20. Armbruster, H., Bikfalvi, A., Kinkel, S., and Lay, G. (2008). Organizational innovation: The challenge of measuring non-technical innovation in large-scale surveys. *Technovation, 28(10)*, 644-657. doi: 10.1016/j.technovation.2008.03.003.
21. Damanpour, F., and Aravind, D. (2012). Managerial Innovation: Conceptions, Processes and Antecedents. *Management and Organization Review, 8(02),* 423-454. doi: 10.1111/ j.1740-8784.2011.00233.x.
22. Dobni, C.B. (2008). Measuring innovation culture in organizations. *European Journal of Innovation Management, 11(4),* 539-559. doi: 10.1108/14601060810911156.
23. Kraśnicka, T., Głód, W., and Wronka, M. (2014). Pojęcie, determinanty i znaczenie innowacji zarządczych (management innovation) – stan badań nad zjawiskiem. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Organizacja i Zarządzanie, 73,* 333-349. doi: 10.13140/2.1.3878.8805.
24. McCabe, D. (2002). Waiting for Dead Men's Shoes': Towards a Cultural Understanding of Management Innovation. *Human Relations, 55(5)*, 505-536. doi: https://doi.org/10.1177/ 0018726702055005426.
25. Rosenbusch, N., and Brinckmann, J., and Bausch, A. (2011). Is innovation always beneficial? A meta-analysis of the relationship between innovation and performance in SMEs. *Journal of Business Venturing, 26(4)*, 441-457. doi: 10.1016/j.jbusvent.2009. 12.002.
26. Saleh, D., and Wang, C. (1993). The Management of Innovation: Strategy, Structure, and Organizational Climate. *IEEE Transactions on Engineering Management, 40(1)*, 14-21. doi: 10.1109/17.206645.
27. Schippers, M.C., West, M.A., and Dawson, J.F. (2012). Team Reflexivity and Innovation: The Moderating Role of Team Context. *Journal of Management, 41(3)*, 769-788. doi: https://doi.org/10.1177/0149206312441210.

Artykuły naukowe bez DOI:

28. Birkinshaw, J., Hamel, G., and Mol, M.J. (2008). Management Innovation. *Academy of Management Review, 4*, 825-845.

29. Dess, G.G., and Robinson, R.B. Jr. (1984). Measuring Organizational Performance in the Absence of Objective Measures: The Case of the Privately-held Firm and Conglomerate Business Unit. *Strategic Management Journal, 5(3),* 265-273.
30. Hamel, G. (2006). The Why, What, and How of Management Innovation. *Harvard Business Review, 84(2)*, 72-84.
31. Hecker, A., and Ganter, A. (2013). The Influence of Product Market Competition on Technological and Management Innovation: Firm-Level Evidence from a Large-Scale Survey. *European Management Review, 10(1)*, 17-33.
32. Hollen, R.M.A., Van Den Bosch, F.A.J., and Volberda, H.W. (2013). The role of management innovation in enabling technological process innovation: an inter-organizational perspective. *European Management Review, 10(1)*, 35-50.
33. Hrabovska, I. (2025). Innowacje organizacyjno-zarządcze jako konieczny warunek efektywnego zarządzania biznesem w oparciu o kreatywność. *Managerial practices and challenges in various*, 98.
34. Jabłońska, M. (2024). Wpływ innowacji na rozwój biznesu. Przykład umiarkowanych innowatorów i krajów Grupy Wyszehradzkiej. Comparative Economic Research, 27(1), 7.
35. Matysik, S. (2024). Przegląd koncepcji pojęcia innowacji. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Zarządzanie*, *1*(55), 160-176.
36. Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). *Making Sense of Cronbach's Alpha.* International Journal of Medical Education, 2, 53-55.
37. Vaccaro, I., Jansen, J., Van Den Bosch, F., Volberd, H. (2010). Management Innovation and Leadership: The Moderating Role of Organizational Size. *Journal of Management Studies, 49(1)*, 28-51.
38. Wyroba, A., and Tkaczyk, J. (2015). Zarządzanie innowacjami. *Quality Review, 82(2)*, 4-13.
39. Zastempowski, M. (2013). Potencjał innowacyjny małych i średnich przedsiębiorstw na tle liderów polskiej gospodarki w świetle badań empirycznych. *Współczesne Zarządzanie, 2,* 68-75.

Strony internetowe:

40. https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/4253%2Cpojecie.html?utm_source.com [dostęp: 13.05.2025r.]
41. https://mfiles.pl/pl/index.php/Zarządzanie_przez_innowacje?utm_source.com[dostęp: 13.05.2025r.]
42. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0148296323008044?utm_source.com [dostęp: 01.07.2025r.]
43. https://link.springer.com/article/10.1007/s11846-017-0229-0?utm.com [dostęp:01.07.2025r.]

NOWE TECHNOLOGIE W POJAZDACH O NAPĘDZIE ELEKTRYCZNYM

Tadeusz SZELIGA[1], Patryk ŁĄTKA[2], Jakub ROCZEK[3], Wojciech FARON[4], Adrian MORAWSKI[5], Dawid SUCHOŃ[6], Konrad ŁAZARSKI[7], Dorian BOBER[8], Tomasz CHYBIORZ[9], Mikołaj PIEKARZ[10], Mateusz KACZOROWSKI[11], Patrycja LASOTA[12],Tomasz WĘGRZYN[13],

[1] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; ts310749@student.polsl.pl

[2] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; pl318551@student.polsl.pl

[3] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; jr318594@student.polsl.pl

[4] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; wf315452@student.polsl.pl

[5] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; am315485@student.polsl.pl

[6] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; ds315483@student.polsl.pl

[7] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; kl315486@student.polsl.pl

[8] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; db315491@student.polsl.pl

[9] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; tc305243@student.polsl.pl

[10] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; mp315481@student.pols.pl

[11] Politechnika Śląska, Katowice; student, identyfikator ORCID – brak; mk318720@student.polsl.pl

[12] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej; student, ORCID – 0009-0005-8536-5539; pl315065@student.polsl.pl

[13] Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, e-mail: tomasz.węgrzyn@polsl.pl; identyfikator ORCID - 0000-0003-2296-1032

* Korespondencja: tomasz.wegrzyn@polsl.pl; Tel.: +48 504 816 362

Streszczenie: Artykuł dotyczy przeglądu nowych technologii w pojazdach o napędzie elektrycznym między innymi akumulatorów Semi-Solid State (półprzewodnikowe) oraz baterie Sodowo-Jonowe, architektura 800-900 V i Ultra-Fast Charging, silniki o strumieniu osiowym, pojazd jako magazyn energii V2G, a także jak sztuczna inteligencja może zmienić przyszłość pojazdów o napędzie elektrycznym.

Słowa kluczowe: nowe technologie, samochody, baterie, silniki

SORTING CENTRE IN DELIVERY COMPANIES

Abstract: This article provides an overview of new technologies in electric vehicles, including semi-solid-state (semiconductor) batteries and sodium-ion batteries, 800–900 V architecture and ultra-fast charging, axial-flow motors, vehicles as V2G energy storage, and how artificial intelligence could change the future of electric vehicles.

Keywords: new technologies, cars, batteries, engines

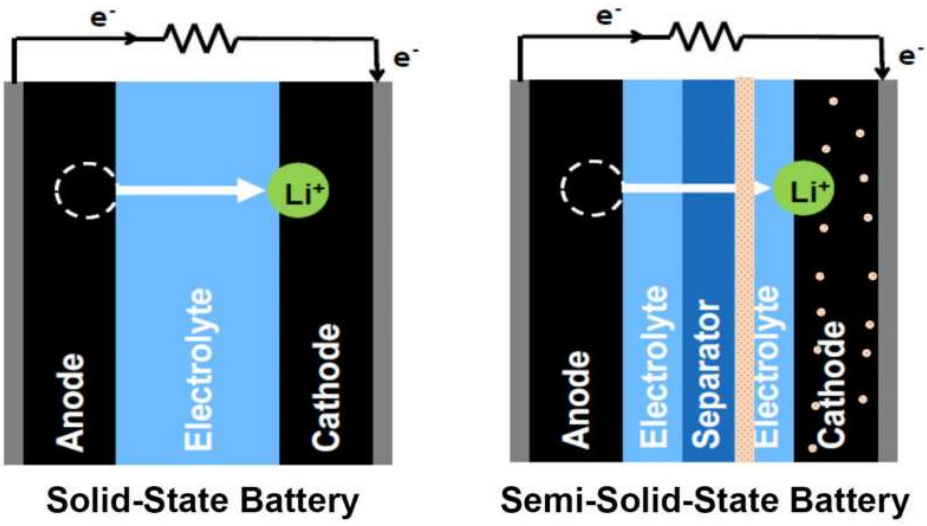
Wprowadzenie

Rozwój elektromobilności w ostatnich latach nabrał charakteru systemowego i wielowymiarowego, obejmując nie tylko same pojazdy, ale również infrastrukturę ładowania, technologie magazynowania energii oraz integrację z sieciami elektroenergetycznymi. W odpowiedzi na rosnące wymagania dotyczące zasięgu, czasu ładowania, bezpieczeństwa oraz efektywności energetycznej, branża motoryzacyjna intensywnie rozwija nowe rozwiązania technologiczne wykraczające poza klasyczne podejście do konstrukcji pojazdów elektrycznych.

Baterie Semi-Solid State (Półstałe)

Baterie semi-solid state (półstałe) stanowią pomost technologiczny między konwencjonalnymi akumulatorami litowo-jonowymi a wyczekiwanymi bateriami w pełni stałymi (all-solid-state). Jest to obecnie jedna z najbardziej obiecujących gałęzi rozwoju magazynowania energii, szczególnie w sektorze elektromobilności (rys. 1) [1][3][4].

W tradycyjnych bateriach litowo-jonowych elektrody są oddzielone płynnym elektrolitem, który jest łatwopalny i podatny na wycieki. W bateriach semi-solid state część tego płynu zostaje zastąpiona stałym przewodnikiem (np. ceramiką lub polimerem) lub elektrolitem o konsystencji żelu/gliny [1][2].



Rysunek 1. Porównanie budowy baterii Solid-State i Semi-Solid-State: (10.04.2026) https://www.evgreat.com/purchasing-guides/frequent-ask-questions/are-solid-state-batteries-possible/

Kluczową różnicą jest to, że elektrolit stały i płynny współistnieją wewnątrz ogniwa. Pozwala to na zachowanie dobrych właściwości przewodzenia jonów (typowe dla cieczy) przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa i gęstości energii (typowe dla ciał stałych) [1][2].

Największym beneficjentem tej technologii jest branża motoryzacyjna. Chińscy producenci, tacy jak NIO, we współpracy z firmą WeLion, wprowadzili już do użytku pakiety baterii semi-solid o pojemności 150 kWh, które pozwalają na przejechanie ponad 1000 km na jednym ładowaniu (według cyklu CLTC) [3][4].

Wyższa gęstość energii: Ogniwa te pozwalają na stosowanie gęstszych materiałów na anodzie (np. krzemu), co przekłada się na większy zasięg pojazdów przy tej samej masie akumulatora. Obecne prototypy osiągają gęstość rzędu 360 Wh/kg (dla porównania, standardowe ogniwa to ok. 250–300 Wh/kg) [1][3].

Bezpieczeństwo: Zredukowana ilość płynnego elektrolitu drastycznie zmniejsza ryzyko zapłonu w przypadku przebicia baterii lub jej przegrzania (thermal runaway)[1].

Szybsze ładowanie: Dzięki lepszej stabilności termicznej, baterie te mogą przyjmować wysoki prąd ładowania bez degradacji struktury ogniwa [1][3].

Łatwiejsza produkcja: W przeciwieństwie do baterii w pełni stałych, technologia semi-solid może być wdrażana na istniejących liniach produkcyjnych z niewielkimi modyfikacjami, co obniża koszty wejścia [3].

Architektura 900 V+ i Ultra-Fast Charging

Przejście na architekturę wysokonapięciową w pojazdach elektrycznych to konieczność wynikająca bezpośrednio z praw fizyki. Fundamentem tej zmiany jest równanie mocy prądu elektrycznego $P=U \cdot I$ [6], z którego wynika, że zwiększenie napięcia systemowego (U) pozwala na uzyskanie znacznie niższego natężenia prądu (I) przy zachowaniu tej samej, wysokiej mocy ładowania. Ma to krytyczne znaczenie dla wydajności cieplnej całego układu, którą opisuje prawo Joule'a określające straty rezystancyjne wzorem $P_{straty}=I^2 \cdot R$. Współczesna literatura inżynieryjna podkreśla, że ponieważ natężenie występuje w tym równaniu w drugiej potędze, dwukrotne podniesienie napięcia i obniżenie natężenia o połowę skutkuje aż czterokrotnym spadkiem generowanego ciepła. Wyeliminowanie tej bariery termicznej pozwala na radykalne odchudzenie okablowania oraz ominięcie konieczności budowy masywnych układów chłodzenia cieczą w samej architekturze pojazdu [5][6].

W praktyce te fizyczne optymalizacje umożliwiają bezpieczne przyjmowanie przez akumulatory mocy rzędu 450–500 kW. W ujęciu funkcjonalnym oznacza to, że użytkownik może uzupełnić około 400 kilometrów zasięgu w zaledwie 8 do 10 minut. W efekcie proces ten staje się czasowo całkowicie porównywalny z klasycznym tankowaniem samochodu spalinowego i zrobieniem krótkiej przerwy na kawę [6].

W stosowaniu wysokonapięciowej architektury 800/900 V prym wiodą azjatyccy producenci samochodów, głównie z Chin i Korei Południowej, w tym miejscu nie sposób nie wspomnieć takich marek jak Zeekr, NIO czy XPENG czy doskonale znane na Naszym rynku koreańskie marki takie jak KIA i Hyundai które stosują z powodzeniem takie rozwiązania dla poprawy szybkości ładowania ale także na zwiększenie całkowitego zasięgu na jednym łądowaniu, nie należy zapominać o amerykańskiej marce Lucid, której to samochodem udało się w Niemczech pobić rekord Guinessa dotyczący zasięgu na jednym ładowaniu, Lucid Air pokonał 1205 km, jednocześnie 900 V architektura pojazdu, pozwalała na przyrost zasięgu o 32 kilometry po każdej mijającej minucie ładowania (rys. 2) [6][7].



Rysunek 2. Na rysunku przedstawiono samochód Lucid Air Grand Touring który pobił rekord Guinessa i pokonał 1205 km na jednym ładowaniu: (10.04.2026) https://www.prnewswire.com/news-releases/lucid-air-grand-touring-wins-guinness-world-records-title-with-1-205-kilometers-on-a-single-charge-302499577.html

V2G (Vehicle-to-Grid) – Samochód jako Elektrownia

Technologia Vehicle-to-Grid (V2G) przekształca pojazdy elektryczne (EV) z pasywnych odbiorników w aktywne, mobilne magazyny energii. Dzięki dwukierunkowemu przepływowi prądu, samochód może nie tylko pobierać energię z sieci (G2V), ale także oddawać ją w momentach szczytowego zapotrzebowania. W 2026 roku, dzięki standaryzacji protokołów komunikacyjnych, V2G staje się fundamentem stabilizacji nowoczesnych systemów energetycznych (rys. 3.) [8][9].

Dwukierunkowa konwersja energii (Hardware)

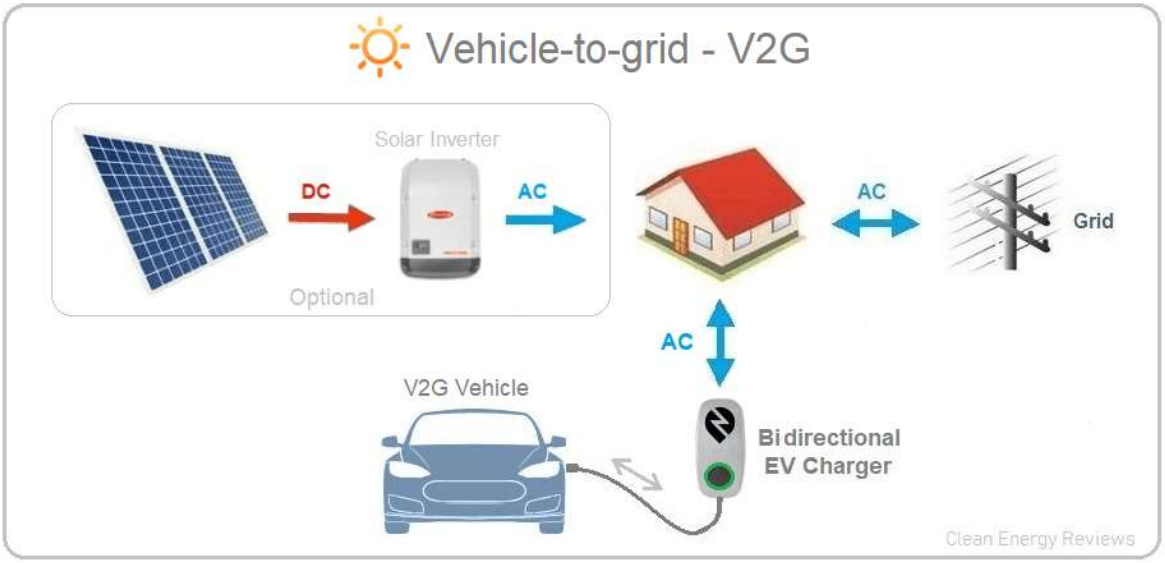
Sercem V2G jest inwerter (przekształtnik) dwukierunkowy. W standardowym aucie ładowarka pokładowa potrafi jedynie zamienić prąd zmienny (AC) z gniazdka na prąd stały (DC) dla baterii. W systemie V2G urządzenie to musi działać w obie strony.

Obecnie stosuje się dwa rozwiązania: albo ta zaawansowana elektronika znajduje się wewnątrz samochodu (ładowarki AC), albo jest częścią zewnętrznej stacji ładowania (ładowarki DC). To drugie rozwiązanie pozwala na szybszą wymianę energii i mniejsze obciążenie cieplne samego pojazdu [8].

Protokół komunikacyjny ISO 15118-20

Bezpieczna współpraca auta z siecią wymaga precyzyjnej wymiany danych. Standard ISO 15118-20 umożliwia autoryzację i automatyczne sterowanie procesem. System BMS (Battery Management System) pojazdu przesyła do sieci kluczowe parametry:

- SOC (State of Charge): Jaki jest aktualny poziom naładowania baterii?
- Capacity: Ile energii może oddać, żeby kierowca wciąż mógł rano dojechać do pracy?
- Power Limits: Z jaką maksymalną mocą (np. 11 kW) może bezpiecznie przesyłać prąd, by nie przegrzać instalacji [8].



Rysunek 3. Schemat działania domowej sieci z użyciem pojazdu V2G: (10.04.2026) https://www.cleanenergyreviews.info/blog/bidirectional-ev-charging-v2g-v2h-v2l

Agregacja i Wirtualne Elektrownie (VPP)

Z punktu widzenia elektrowni, jeden samochód to bardzo małe źródło energii. Jednak 2026 rok to czas, w którym tysiące aut są łączone w tzw. Wirtualne Elektrownie (Virtual Power Plants).

Specjalne oprogramowanie (agregator) zarządza całą flotą podłączonych pojazdów. Gdy w sieci brakuje prądu, agregator wysyła sygnał i 10 000 aut jednocześnie oddaje niewielką część swojej energii. Dla systemu jest to zastrzyk mocy rzędu kilkudziesięciu megawatów, co pozwala uniknąć awarii lub uruchamiania brudnych elektrowni węglowych [9].

Co z żywotnością baterii?

Badania pokazują jednak, że inteligentne V2G nie musi niszczyć ogniw. Systemy zarządzania baterią (BMS) w 2026 roku operują w tzw. „złotym środku" naładowania (40–70% SOC). Praca w tym zakresie, przy niskim natężeniu prądu, jest dla chemii litowo-jonowej mniej obciążająca niż szybkie ładowanie od 0 do 100%. Wiele systemów V2G wręcz optymalizuje stan baterii, zapobiegając jej zbyt długiemu pozostawaniu w stanie pełnego naładowania, co bywa szkodliwe [8].

AI-Defined Vehicles (Samochody definiowane przez AI)

Koncepcja AI-Defined Vehicle (AIDV) to kolejny krok po modelu Software-Defined Vehicle (SDV). W klasycznym SDV oprogramowanie steruje funkcjami auta, ale w AIDV to sztuczna inteligencja staje się centralnym „mózgiem" zarządzającym całą architekturą pojazdu. Przełom polega na przeniesieniu obliczeń do potężnych jednostek centralnych, takich jak NVIDIA DRIVE Thor czy Snapdragon Ride, które zastępują setki mniejszych sterowników [10][11][12].

Z perspektywy informatycznej i użytkowej, kluczowe zmiany obejmują:

Agenci AI (Agentic AI): Zamiast sztywno zaprogramowanych reakcji, pojazd wykorzystuje agentów AI, którzy uczą się stylu jazdy kierowcy i aktywnie optymalizują parametry podróży w czasie rzeczywistym. Dzięki temu systemy takie jak tempomat stają się proaktywne, dostosowując dynamikę do nawyków użytkownika i przewidywanych sytuacji na drodze [10].

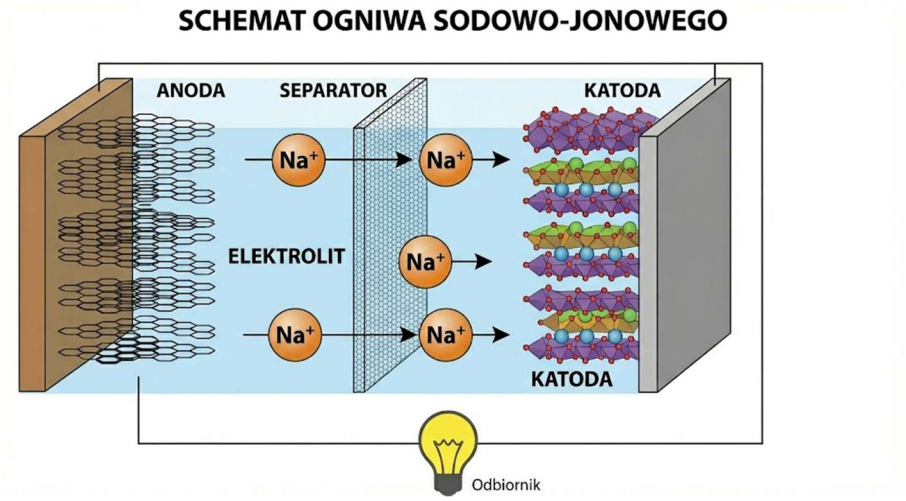
Integracja z chmurą i danymi zewnętrznymi: AIDV w czasie rzeczywistym przetwarza dane o pogodzie oraz natężeniu ruchu pobierane z chmury. Pozwala to na inteligentne zarządzanie termiką ogniw – system może np. schłodzić lub ogrzać baterię z wyprzedzeniem, bazując na prognozowanej temperaturze na trasie, co znacząco wydłuża jej żywotność i efektywność ładowania[10][12].

Predictive Maintenance (Utrzymanie predykcyjne): Wykorzystując zaawansowaną analitykę danych z sensorów, AI potrafi zidentyfikować mikro-odchylenia w pracy podzespołów. Pozwala to na wykrycie potencjalnej awarii (np. pompy chłodziwa czy łożysk) na długo przed tym, zanim wystąpi fizyczne uszkodzenie, co redefiniuje pojęcie niezawodności pojazdu [12].

W efekcie AI-Defined Vehicle staje się dynamicznym systemem, który dzięki ciągłemu uczeniu się i aktualizacjom Over-the-Air, staje się z czasem coraz bardziej wydajny i dopasowany do kierowcy [10].

Baterie Sodowo-Jonowe (Na-ion)

Baterie sodowo-jonowe (Na-ion) stanowią jedną z najbardziej perspektywicznych alternatyw dla technologii litowo-jonowych, szczególnie w kontekście rosnących kosztów i ograniczonej dostępności surowców krytycznych. W odróżnieniu od konwencjonalnych ogniw Li-ion wykorzystują one sód pierwiastek powszechnie dostępny w środowisku naturalnym, co znacząco ogranicza ryzyko związane z łańcuchem dostaw oraz obniża koszty produkcji [13][14] (rys. 4.).



Rysunek 4. Schemat budowy ogniwa sodowo-jonowego (Na-ion): (10.04.2026) https://globenergia.pl/akumulatory-sodowo-jonowe-na-ion-czy-to-koniec-ery-litu/

Dynamiczny rozwój tej technologii doprowadził w ostatnich latach do jej wdrażania w sektorze elektromobilności, szczególnie w segmencie niskobudżetowych pojazdów miejskich. Z literatury wynika, że ogniwa sodowo-jonowe charakteryzują się korzystnym profilem bezpieczeństwa oraz większą stabilnością pracy w niższych temperaturach w porównaniu do baterii litowo-jonowych, co ogranicza spadki pojemności eksploatacyjnej w warunkach zimowych [13][14].

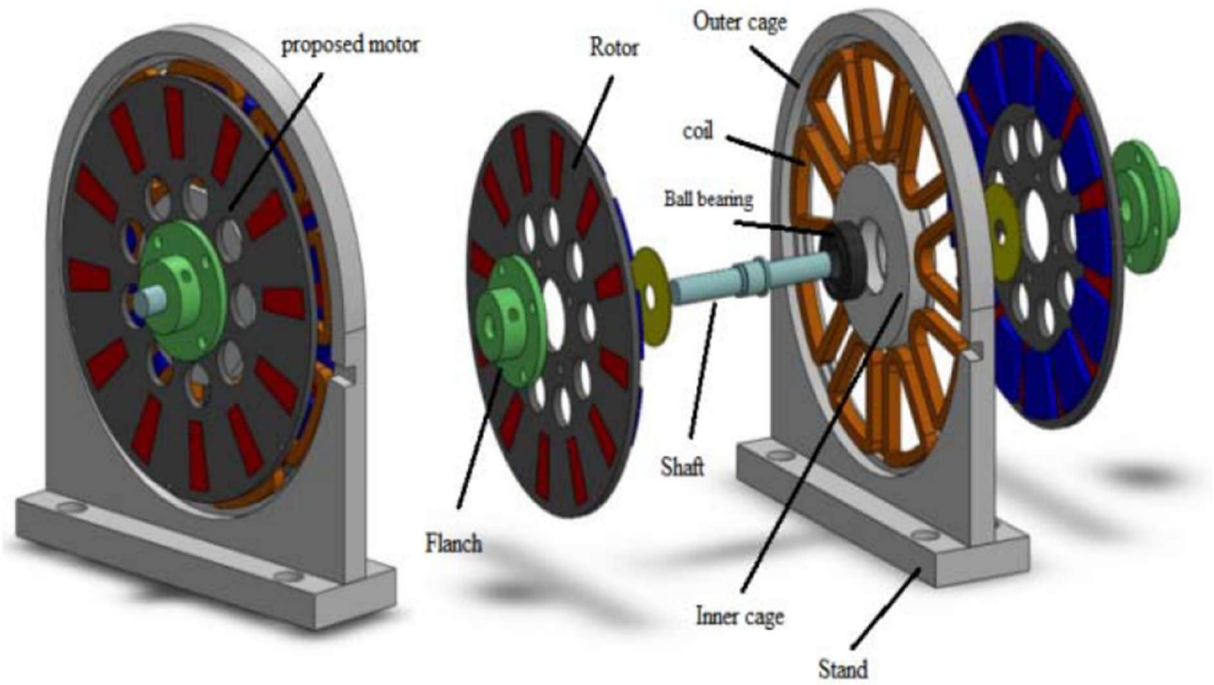
Z ekonomicznego punktu widzenia zastosowanie sodu jako materiału aktywnego umożliwia istotne obniżenie kosztów produkcji akumulatorów, przy jednoczesnym zmniejszeniu zależności od surowców krytycznych, takich jak lit czy kobalt. Dodatkowo uproszczony proces recyklingu oraz mniejsze obciążenie środowiskowe czynią tę technologię bardziej zrównoważoną w całym cyklu życia produktu.

W konsekwencji baterie sodowo-jonowe mogą odegrać kluczową rolę w dalszym rozwoju elektromobilności, szczególnie w segmencie pojazdów miejskich, przyczyniając się do zwiększenia dostępności technologii dla szerokiego grona użytkowników [13][14].

Silniki Axial Flux (O strumieniu osiowym)

Silniki typu axial flux (o strumieniu osiowym) stanowią jedną z najbardziej zaawansowanych i przełomowych technologii w dziedzinie napędów elektrycznych. W odróżnieniu od klasycznych silników radialnych, w których strumień magnetyczny rozchodzi się promieniście, tutaj przebiega on równolegle do osi obrotu. Ta fundamentalna różnica skutkuje zupełnie odmienną konstrukcją – zamiast formy cylindrycznej stosuje się płaski, dyskowy układ przypominający „kanapkę", złożony z wirników i stojana ułożonych osiowo [15].

Największą zaletą tej technologii jest wyjątkowo wysoka gęstość mocy i momentu obrotowego, która znacząco przewyższa możliwości tradycyjnych silników elektrycznych. Konstrukcje axial flux mogą być nawet o około 50% mniejsze i lżejsze, przy jednoczesnym zachowaniu tej samej lub wyższej mocy. Dzięki większej średnicy roboczej generują imponujący moment obrotowy już przy niskich prędkościach, co przekłada się na znakomitą dynamikę i natychmiastową reakcję na przyspieszenie [15][17] (rys. 5).



Rysunek 5. Schemat budowy silnika Axial Flux o strumieniu osiowym: (10.04.2026) https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-epa.2020.0126

W porównaniu do silników radialnych, różnice są widoczne zarówno w działaniu, jak i w budowie. Tradycyjne jednostki mają strukturę cylindryczną, gdzie wirnik obraca się wewnątrz stojana, a linie pola magnetycznego biegną od środka na zewnątrz. Silniki axial flux wykorzystują natomiast układ dyskowy, w którym elementy są rozmieszczone równolegle, a strumień magnetyczny przepływa wzdłuż osi. Taka geometria pozwala na lepsze wykorzystanie materiałów aktywnych, krótszą drogę przepływu strumienia oraz bardziej efektywne generowanie momentu obrotowego [15].

Dodatkowo silniki axial flux wyróżniają się wyższą sprawnością energetyczną oraz większą elastycznością konstrukcyjną. Ich kompaktowe rozmiary umożliwiają integrację w różnych częściach pojazdu – przy osiach, centralnie, a nawet bezpośrednio w kołach. W efekcie pozwalają nie tylko poprawić osiągi, ale również zoptymalizować przestrzeń w pojeździe, zwiększając miejsce na baterie lub kabinę pasażerską. Technologia ta jest rozwijana między innymi przez YASA i wdrażana w pojazdach marek takich jak Mercedes-Benz czy Ferrari, co potwierdza jej rosnące znaczenie w nowoczesnej elektromobilności [15][16][17].

Podsumowanie

Analiza przedstawionych technologii wskazuje jednoznacznie, że rozwój elektromobilności nie opiera się na pojedynczym przełomie, lecz na równoległej ewolucji wielu komplementarnych obszarów. Postęp w dziedzinie magazynowania energii, reprezentowany przez baterie semi-solid state oraz sodowo-jonowe, prowadzi do poprawy bezpieczeństwa, obniżenia kosztów oraz zwiększenia dostępności surowców. Jednocześnie wdrażanie architektur wysokonapięciowych umożliwia znaczące skrócenie czasu ładowania, co bezpośrednio wpływa na komfort użytkowania pojazdów elektrycznych.

Istotnym elementem transformacji jest również integracja pojazdów z systemem elektroenergetycznym poprzez technologie V2G, które przekształcają flotę EV w rozproszony magazyn energii, wspierający stabilność sieci. Równolegle rozwój zaawansowanych układów napędowych, takich jak silniki axial flux, oraz implementacja sztucznej inteligencji w architekturze pojazdów prowadzą do zwiększenia efektywności, niezawodności i poziomu automatyzacji.

Bibliografia

1. Janek, J., Zeier, W. G. (2023). Challenges in speeding up solid-state battery development. Nature Energy.
2. Chiang, Y.-M., Duduta, M., Ho, B., Wood, K. C. (2010). Semi-solid Lithium Rechargeable Flow Battery. Advanced Energy Materials.
3. Stoikou, E., et al. (2024). Energy Storage Outlook: Trends in Battery Chemistries and Manufacturing. BloombergNEF.
4. Teter, J., Connelly, E., et al. (2024). Global EV Outlook: Catching up with the battery technology frontier. International Energy Agency.
5. Ilahi, T., Izhar, T., Zahid, M., Rasool, A., Tesamae, K., Zahid, T., & Khan, E. M. (2024). Design analysis of high-power level 4 smart charging infrastructure using next-generation power devices for EVs and heavy duty EVs. World Electric Vehicle Journal, 15(2), 66.
6. Sadi, M. H., Sadeghi, Z., & Bauman, J. (2025). A comprehensive review of universal fast-charging techniques for 400-V and 800-V electric vehicles. IEEE Access.
7. https://elektromobilni.pl/lucid-air-z-zasiegowym-rekordem-guinnessa/
8. (Dostęp: 10.04.2026)
9. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174525002703
10. (Dostęp: 10.04.2026)
11. https://www.transportenvironment.org/articles/ev-batteries-on-wheels-can-save-power-systems-over-eur100bn-fraunhofer (Dostęp: 10.04.2026)
12. Qualcomm (2024), From Software-Defined to AI-Defined Vehicle. https://www.qualcomm.com/news/onq/2026/01/from-software-defined-to-ai-defined-vehicle-snapdragon-chassis-agents (Dostęp: 10.04.2026)
13. NVIDIA (2022), DRIVE Thor: Centralized Car Computer. https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-unveils-drive-thor-centralized-car-computer-unifying-cluster-infotainment-automated-driving-and-parking-in-a-single-cost-saving-system (Dostęp: 10.04.2026)
14. IEEE Denver (2022), The Journey to Software-Defined Vehicles. https://ieee-denver.org/wp-content/uploads/sites/23/2023/01/SofwareDefinedVehicle_v4.pdf (Dostęp: 10.04.2026)
15. Hwang, J.-Y., Myung, S.-T., Sun, Y.-K. (2017). Sodium-ion batteries: present and future. Chemical Society Reviews.
16. Yabuuchi, N., Kubota, K., Dahbi, M., Komaba, S. (2014). Research development on sodium-ion batteries. Chemical Reviews.
17. https://www.stanfordmagnets.com/advantages-and-disadvantages-of-axial-flux-motors.html (Dostęp: 10.04.2026)

18. https://yasa.com/technology/ (Dostęp: 10.04.2026)
19. https://www.wired.com/story/yasa-motors-mercedes-axial-flux-202
(Dostęp: 10.04.2026)

ROZWÓJ KOMPETENCJI PRZYSZŁOŚCI W DOBIE ZIELONEJ I CYFROWEJ TRANSFORMACJI

Marek Krannich
Politechnika Śląska; marek.krannich@polsl.pl; ORCID 0000-0001-6513-5369
Małgorzata Koszembar-Wiklik
Politechnika Śląska; malgorzata.koszembar-wiklik@polsl.pl; ORCID 0000-0002-8603-1646
Aneta Aleksander
Politechnika Śląska; aneta.aleksander@polsl.pl; ORCID 0000-0001-5442-5520

Streszczenie: Artykuł podejmuje problematykę relacji między szkolnictwem wyższym a rynkiem pracy, ze szczególnym uwzględnieniem oczekiwań pracodawców wobec absolwentów uczelni wyższych. Celem niniejszego artykułu jest analiza pojęcia kompetencji przyszłości w warunkach zielonej i cyfrowej transformacji oraz wskazanie kluczowych obszarów kompetencyjnych na podstawie aktualnych źródeł tj. polityk UE, ram kompetencyjnych oraz raportów instytucji rynkowych. W opracowaniu uwzględniono wpływ oczekiwań pracodawców na kształtowanie programów studiów wyższych. Autorzy stawiają tezę, iż zielona i cyfrowa transformacja i wynikające z niej oczekiwania pracodawców implikują potrzebę dostosowania i rozwoju kompetencji absolwentów uczelni w trzech zasadniczych obszarach: organizacji i zarządzania, wiedzy merytorycznej z zakresu danej dyscypliny oraz kompetencji miękkich. Struktura analityczna artykułu prowadzi od zdefiniowania koncepcji zielonej i cyfrowej transformacji, przez omówienie istoty pojęcia kompetencji przyszłości, opis raportów wskazujących na kompetencje oczekiwane przez pracodawców z uwzględnieniem inżynierii biomedycznej, aż do opracowania modelu powiązań między zieloną i cyfrową gospodarką, wymaganiami rynku pracy a kompetencjami na poziomie kształcenia wyższego. W szczególności skoncentrowano się na kompetencjach w branży inżynierii biomedycznej, gdyż jest to jedna z najszybciej rozwijających się dziedzin wiedzy i kierunków studiów na uczelniach.

Słowa kluczowe: zielona transformacja, gospodarka cyfrowa, kompetencje przyszłości, rynek pracy.

FUTURE COMPETENCIES AS AN ELEMENT OF SHAPING THE GRADUATE PROFILE IN HIGHER EDUCATION

Abstract: This paper examines the relationship between higher education and the labour market, with particular emphasis on employers' expectations of university graduates. The aim of this article is to discuss the concept of future-oriented competences in the context of the green and digital transition and to identify key competence areas based on current sources, i.e. EU policies, competence frameworks and reports from market institutions. The study takes into account the influence of employers' expectations on the design of higher education programmes. The authors argue that Polish employers expect job candidates to possess a broad set of competences in three key areas: organisation and management, subject-specific knowledge within a given discipline, and soft skills. The analytical structure of the article proceeds from defining the concepts of green and digital transformation, through a discussion of the essence of the concept of future competencies, a description of reports indicating the competencies expected by employers with regard to biomedical engineering, to the development of a model of the links between the green and digital economy, labour market requirements and competencies at the higher education level. In particular, the focus is on competences in the biomedical engineering sector, as this is one of the fastest-growing fields of knowledge and areas of study at universities.

Keywords: green transition, digital economy, future-oriented skills, labour market.

Wstęp

Relacja między szkolnictwem wyższym a rynkiem pracy stanowi jeden z kluczowych problemów współczesnej polityki edukacyjnej. W warunkach dynamicznie zmieniającej się gospodarki opartej na wiedzy oraz zielonej i cyfrowej transformacji, pytanie o to, jakich kompetencji oczekują pracodawcy od absolwentów uczelni wyższych, nabiera pierwszorzędnego znaczenia. Problem ten jest szczególnie wyraźny w obszarach o silnym wymiarze interdyscyplinarnym, takich jak inżynieria biomedyczna, gdzie od absolwenta wymaga się zarówno głębokiej wiedzy technicznej, biomedycznej i szerokiego wachlarza kompetencji organizacyjnych oraz kompetencji miękkich. Oczekiwania pracodawców stanowią istotny, choć nie jedyny czynnik kształtujący programy studiów wyższych. W niniejszym artykule wykazano, że polscy pracodawcy oczekują od absolwentów szerokich kompetencji w czterech zasadniczych obszarach: organizacji i zarządzania, wiedzy merytorycznej z zakresu danej dyscypliny oraz kompetencji miękkich. Obszary te wzajemnie się przenikają i tworzą kompleksowy profil pożądanego pracownika. Ponadto profil kompetencji pracownika zawiera w sobie warunek konieczny dla rozwoju innych kompetencji

czyli tzw. metakompetencje, rozumiane jako umiejętności wyższego rzędu. Metakompetencjami w obliczu dynamiki zmian rynkowych są m.in. uczenie się przez całe życie oraz myślenie holistyczne (systemowe).

W przypadku absolwentów inżynierii biomedycznej oczekiwania pracodawców nabierają szczególnej złożoności ze względu na interdyscyplinarny charakter tej dziedziny. Od inżyniera biomedycznego rynek pracy oczekuje połączenia głębokiej wiedzy technicznej i biomedycznej z kompetencjami zarządczymi, komunikacyjnymi i społecznymi. Dynamiczny rozwój sektora „medtech", wzrost znaczenia sztucznej inteligencji w opiece zdrowotnej oraz postępująca regulacja rynku wyrobów medycznych tworzą środowisko zawodowe, w którym stale podnoszenie kwalifikacji jest koniecznością, a nie opcją.

Programy kształcenia akademickiego muszą w sposób systemowy i ciągły uwzględniać sprzężenie zwrotne płynące ze strony pracodawców oraz wymogi jakie stawia zielona i cyfrowa gospodarka. Jednocześnie muszą zachowywać autonomię akademicką niezbędną dla formowania refleksyjnie nastawionych, krytycznych i twórczych absolwentów. Wypracowanie tej trudnej równowagi jest jednym z najważniejszych wyzwań stojących przed polskim szkolnictwem wyższym w nadchodzących latach.

Zielona i cyfrowa transformacja - wyzwania kompetencyjne

Zielona i cyfrowa transformacja, często ujmowana łącznie jako podwójna transformacja (twin transition), staje się dominującą osią przebudowy gospodarek, instytucji publicznych oraz modeli biznesowych w Europie. Jej skala wykracza poza wdrażanie pojedynczych technologii lub polityk środowiskowych: obejmuje równoległe przekształcenia infrastruktury energetycznej i przemysłowej, sposobów wytwarzania i konsumpcji, łańcuchów dostaw, organizacji pracy oraz kompetencji wymaganych na rynku pracy. W tym ujęciu kompetencje przyszłości nie są wyłącznie listą umiejętności cyfrowych, lecz zestawem zdolności adaptacyjnych, poznawczych, społecznych i etycznych, które umożliwiają jednostkom i organizacjom funkcjonowanie w warunkach wysokiej niepewności technologicznej i regulacyjnej, a także rosnącej presji klimatycznej (IPCC, 2023; OECD, 2023).

W ramach polityki Unii Europejskiej podwójna transformacja została silnie powiązana z rozwojem kapitału ludzkiego. „European Skills Agenda" akcentuje konieczność masowego podnoszenia i zmiany kwalifikacji (upskilling i reskilling) dla utrzymania konkurencyjności oraz spójności społecznej (European Commission, 2020). Równolegle „2030 Digital Compass" oraz program „Digital Decade" ustanawiają cele dotyczące kompetencji cyfrowych obywateli i zasobów talentów ICT jako warunku powodzenia cyfryzacji (European Commission, 2021; Decision (EU) 2022/2481). W obszarze zielonej transformacji rośnie znaczenie kompetencji związanych z rozumieniem złożoności systemów społeczno-ekologicznych, efektywnością

zasobową, dekarbonizacją i gospodarką o obiegu zamkniętym, co znajduje odzwierciedlenie m.in. w europejskich ramach kompetencji zrównoważonego rozwoju GreenComp (Bianchi et al., 2022). Z perspektywy edukacji i uczenia się przez całe życie istotnym punktem odniesienia pozostają także rekomendacje UNESCO dotyczące edukacji dla zrównoważonego rozwoju w dekadzie 2020–2030 (UNESCO, 2020).

Cyfrowa transformacja wnosi natomiast zarówno narzędzia, takie jak automatyzacja, analityka danych, sztuczna inteligencja, platformizacja, jak i nowe ryzyka np. nierówności kompetencyjne, polaryzacja pracy, cyberzagrożenia, problemy jakości informacji, wyzwania przejrzystości danych danych. Z tego powodu rozwój kompetencji cyfrowych coraz częściej konceptualizuje się szerzej niż obsługa narzędzi, obejmuje krytyczne rozumienie technologii, bezpieczeństwo, etykę, współpracę człowiek - technologia oraz zdolność do uczenia się i aktualizacji umiejętności w cyklach krótszych niż dotychczas (OECD, 2023). Europejskie ramy DigComp 2.2 porządkują ten obszar, podkreślając znaczenie m.in. informacji i danych, komunikacji i współpracy, tworzenia treści cyfrowych, cyberbezpieczeństwa oraz rozwiązywania problemów (Vuorikari et al., 2022). W praktyce organizacyjnej obserwuje się przesunięcie od wdrażania pojedynczych rozwiązań w stronę całościowej transformacji procesów, co zwiększa popyt na kompetencje przekrojowe: analityczne, projektowe, komunikacyjne i zarządcze, uzupełniające kompetencje ściśle techniczne (World Economic Forum, 2020; World Economic Forum, 2023).

Zielona transformacja jest analogicznie wielowymiarowa: obejmuje modernizację energetyki, elektryfikację i efektywność energetyczną, rozwój niskoemisyjnych technologii przemysłowych, zmiany w budownictwie i transporcie, a także adaptację do skutków zmian klimatu. Wymaga to kompetencji technicznych np. w obszarach energii odnawialnej czy zarządzania energią, lecz również kompetencji systemowych: oceny wpływu środowiskowego, pracy z danymi środowiskowymi, rozumienia regulacji i standardów raportowania, a także zdolności do wdrażania innowacji w warunkach napięć społecznych związanych z kosztami transformacji (ILO, 2022; IPCC, 2023). W tym kontekście szczególnie istotne staje się rozróżnienie pomiędzy *green jobs* a *greening of all jobs*. Wiele zawodów nie staje się zielonych w sensie sektorowym, ale ulega zazielenieniu poprzez nowe zadania, normy i wymagania kompetencyjne (ILO, 2022).

Istotą pojęcia kompetencji przyszłości jest więc nie tyle przewidzenie jednego docelowego zestawu umiejętności, ile identyfikacja kompetencji o charakterze transferowalnym, które pozwalają działać na styku zmian technologicznych i środowiskowych. OECD wskazuje, że systemy umiejętności (skills systems) muszą szybciej reagować na zmiany popytu na kompetencje, a polityki edukacyjne i rynku pracy powinny integrować dane o umiejętnościach, mechanizmy walidacji oraz zachęty do uczenia się przez całe życie (OECD, 2023). Z kolei raporty „Future of Jobs" podkreślają rosnącą wagę umiejętności poznawczych i społecznych (myślenie analityczne, kreatywność, odporność, praca zespołowa) oraz kompetencji technologicznych (w tym data literacy) jako wspólnego mianownika w wielu branżach (World

Economic Forum, 2020; World Economic Forum, 2023). Z perspektywy europejskiej ramy GreenComp uwypuklają komponenty postaw i wartości (odpowiedzialność, sprawczość, troska o dobro wspólne) obok wiedzy i umiejętności praktycznych, co wskazuje, że transformacja dotyczy również wymiaru kulturowego i obywatelskiego (Bianchi et al., 2022).

W literaturze i praktyce wdrożeniowej pojawiają się jednak napięcia, które uzasadniają potrzebę pogłębionej analizy. Po pierwsze, ramy kompetencyjne dla obszaru cyfrowego i zielonego rozwijały się często w odrębnych ekosystemach instytucjonalnych, co utrudnia projektowanie spójnych ścieżek kształcenia i rozwoju w organizacjach. Po drugie, rośnie ryzyko redukcjonizmu, kompetencje cyfrowe bywają zawężane do narzędzi, a zielone do deklaracji wartości, bez operacjonalizacji w zadaniach zawodowych i wskaźnikach. Po trzecie, transformacje te mogą wzmacniać nierówności, jeśli polityki upskillingu i reskillingu nie będą wystarczająco inkluzywne oraz oparte na rzetelnej diagnozie potrzeb kompetencyjnych (OECD, 2023; European Commission, 2020). Wreszcie, w obliczu przyspieszenia rozwoju sztucznej inteligencji rośnie znaczenie pytań o jakość pracy, etykę i odpowiedzialne wdrażanie technologii w procesach organizacyjnych, co wprost przekłada się na profil kompetencji wymaganych od menedżerów i specjalistów.

Oczekiwania pracodawców a jakość kształcenia akademickiego – perspektywa systemowa

Wprowadzenie w Polsce Krajowych Ram Kwalifikacji (KRK) było próbą systemowego rozwiązania tego problemu. W założeniu KRK miało powiązać efekty uczenia się z wymaganiami rynku pracy i ułatwić absolwentom przejście do aktywności zawodowej (Budnikowski i in., 2012). Niemniej jednak sama regulacyjna zmiana nazewnictwa celów kształcenia nie rozwiązuje problemu strukturalnego niedopasowania. Jak wskazywał raport NCBiR z 2022 roku, „wyniki z pierwszej edycji badania pozostają aktualne", co oznacza, że mimo upływu lat i licznych reform programowych, kompetencyjne braki absolwentów są wciąż tymi samymi brakami, które identyfikowano dekadę wcześniej (Jelonek, 2022). Pracodawcy niezmiennie wskazują na niedobory w zakresie umiejętności miękkich, logicznego myślenia, samoorganizacji pracy i komunikatywności.

Zgodnie z raportem opracowanym przez Konfederację Lewiatan i Uniwersytet SWPS, „absolwent kończąc edukację, ma umiejętności, które zdezaktualizują się w ciągu kilku lat, o ile w ogóle na starcie przystają do wymogów rynku pracy" (Dębowska, 2026). W tej perspektywie kluczowego znaczenia nabiera rozwijanie tzw. metakompetencji - zdolności do uczenia się, adaptacji oraz gotowości do nieustannego podnoszenia kwalifikacji. Szacunki Światowego Forum Ekonomicznego wskazują, że aż sześciu na dziesięciu pracowników będzie

wymagało przekwalifikowania przed 2027 rokiem, a tylko połowa z nich ma dostęp do odpowiednich możliwości szkoleniowych (Dębowska, 2026). Stawia to przed uczelniami wyższymi wyzwanie nie tylko transferu wiedzy, ale i kształtowania postaw prorozwojowych.

Kompetencje w zakresie organizacji i zarządzania

Wśród kompetencji najbardziej poszukiwanych przez pracodawców szczególne miejsce zajmuje umiejętność organizacji pracy i zarządzania czasem. Kompetencje organizacyjne i zarządcze nabierają szczególnego znaczenia w kontekście rosnącej popularności projektowego modelu pracy. W branżach technologicznych, a zwłaszcza w sektorze medyczno-inżynieryjnym, praca organizowana jest w formie projektów o ograniczonym czasie trwania i złożonej strukturze zadaniowej. Raport Konfederacji Lewiatan z 2021 roku wskazał, że wśród najtrudniej dostępnych kompetencji znalazły się właśnie „kompetencje techniczne i inżynieryjne (18%)“ oraz umiejętności zarządcze i organizacyjne (Lisicki, 2021). Dane te potwierdzają, że zdolność do efektywnej samoorganizacji i zarządzania projektami jest kompetencją, na którą rynek pracy wykazuje systematyczny niedobór podaży.

W obszarze inżynierii biomedycznej zarządzanie projektami zyskuje dodatkowy wymiar. Interdyscyplinarność tej dziedziny, łączącej nauki techniczne, biologiczne i medyczne, wymaga od inżyniera nie tylko wiedzy specjalistycznej, lecz również zdolności do koordynowania prac wielodyscyplinarnych zespołów. Politechnika Wrocławska, jako jedna z wiodących uczelni kształcących w tym obszarze, wskazuje, że jej absolwenci „potrafią projektować, konstruować i rozwijać urządzenia medyczne oraz formułować i rozwiązywać złożone problemy inżynierskie w obszarze biomedycznym” (Politechnika Wrocławska, 2024). Jednakże samo posiadanie kompetencji technicznych nie wystarczy bez umiejętności zarządzania procesem projektowym i współpracy z partnerami o różnych profilach zawodowych.

W odpowiedzi na te potrzeby niektóre polskie uczelnie techniczne wprowadzają do programów nauczania przedmioty z zakresu zarządzania projektami i organizacji pracy zespołowej.

Kompetencje merytoryczne z zakresu inżynierii biomedycznej

Inżynieria biomedyczna należy do dziedzin o bardzo wysokim i szybko rosnącym zapotrzebowaniu na wykwalifikowanych specjalistów. Jak wskazuje Politechnika Śląska,

„inżynieria biomedyczna to jedna z najszybciej rozwijających się dziedzin wiedzy, w szczególności w krajach o dużym stopniu zaawansowania technologicznego. Kształcenie w tym zakresie stanowi odpowiedź na zapotrzebowanie rynku poszukującego wyspecjalizowanej kadry inżynierskiej" (Politechnika Śląska, 2024). Dynamika zmian technologicznych w sektorze medycznym przekłada się bezpośrednio na wymagania stawiane przez pracodawców wobec absolwentów tej dyscypliny.

Pracodawcy z sektora wyrobów medycznych i technologii zdrowotnych poszukują absolwentów posiadających wiedzę z kilku kluczowych obszarów. Zwracają uwagę, iż niezbędna jest gruntowna znajomość podstaw inżynieryjnych - elektroniki, mechaniki, informatyki - osadzona w kontekście biomedycznym. Potrzebna jest wiedza także wiedza z zakresu regulacji dotyczących wyrobów medycznych, w tym znajomość rozporządzenia MDR (Medical Device Regulation) obowiązującego w Unii Europejskiej. Politechnika Białostocka uruchomiła specjalne studia podyplomowe z zakresu certyfikacji wyrobów medycznych, w ramach których absolwenci mogą uzyskać certyfikat TÜV Nord Polska, co odpowiada na rosnące zapotrzebowanie rynku na specjalistów potrafiących przeprowadzić wyrób medyczny przez złożone procedury dopuszczenia do obrotu (Politechnika Białostocka, 2024). Ponadto pracodawcy coraz częściej wskazują na zapotrzebowanie na kompetencje z zakresu sztucznej inteligencji i analizy danych w kontekście medycznym. Raport branżowy opublikowany przez portal Devire (2024) informuje, że „rynek AI w opiece zdrowotnej wzrośnie z 15,4 miliarda dolarów w 2022 roku aż do 208,2 miliarda dolarów w 2030 roku", co generuje rosnące zapotrzebowanie na inżynierów zdolnych do projektowania i wdrażania rozwiązań opartych na uczeniu maszynowym w środowisku klinicznym (Devire, 2024). Politechnika Wrocławska odpowiada na te trendy, oferując specjalność Informatyka Medyczna, w ramach której kształci się specjalistów w zakresie „analizy danych biomedycznych, bioinformatyki, projektowania systemów informatycznych oraz zarządzania projektem informatycznym i wykorzystania sztucznej inteligencji w medycynie" (Politechnika Wrocławska, 2024).

Warto podkreślić, że pracodawcy z sektora sprzętu medycznego zwracają uwagę na rosnące znaczenie certyfikatów zawodowych jako narzędzia weryfikacji kompetencji. Portal „Devire" wskazuje, że „praca w tej branży niezmiennie od lat wiąże się z koniecznością ciągłego doskonalenia kompetencji oraz inwestowaniem w rozwój zawodowy", a pracownicy branży są coraz bardziej świadomi własnej wartości rynkowej (Devire, 2024). Oznacza to, że uczelnie muszą nie tylko przekazywać wiedzę techniczną, ale i kształtować u studentów nawyk ciągłego uczenia się oraz świadomość potrzeby regularnego aktualizowania kompetencji zawodowych.

Kompetencje miękkie i ich znaczenie dla pracodawców

Spośród wszystkich kompetencji wymienianych w badaniach nad oczekiwaniami pracodawców, komunikacja interpersonalna pojawia się jako absolutny priorytet. Raport z 2018 roku podkreślił, że pracodawcy szczególnie cenią komunikatywność i zdolność do pracy w środowiskach wielojęzycznych (CJO UG, 2018). Wyniki tego badania wskazują, że kompetencje komunikacyjne należy rozpatrywać nie tylko w wymiarze języka ojczystego, ale i obcego – co ma szczególne znaczenie dla absolwentów branż technicznych, gdzie literatura fachowa oraz kontakty z partnerami biznesowymi mają często charakter międzynarodowy.

Badania NCBiR wskazały, że „absolwenci powinni potrafić jasno wyrażać swoje myśli i pomysły, słuchać innych, negocjować i rozwiązywać konflikty. Niestety, często brakuje im pewności siebie i umiejętności skutecznego porozumiewania się z innymi" (NCBiR / Cegos, 2023). Diagnoza ta wskazuje na konieczność włączenia do programów studiów zajęć rozwijających kompetencje komunikacyjne w sposób praktyczny – nie tylko w formie wykładów, ale przede wszystkim poprzez ćwiczenia, symulacje, warsztaty i pracę projektową.

Pojęcie „kompetencji miękkich" – obejmujące szeroki zakres cech osobowościowych, społecznych i komunikacyjnych – zyskało w ostatnich latach status kluczowej kategorii analitycznej zarówno w naukach o zarządzaniu, jak i w pedagogice szkolnictwa wyższego. Badania prowadzone w Polsce wskazują jednoznacznie, że pracodawcy przywiązują do nich ogromną wagę, nierzadko większą niż do kompetencji twardych czy wyników akademickich. Jak wskazują dane publikowane przez portal Powiślańskiej Akademii Nauk Stosowanych, „57% pracodawców ceni umiejętności miękkie bardziej niż twarde" (Powiślańska ANS, 2025).

Do najczęściej wskazywanych przez polskich pracodawców kompetencji miękkich należą: komunikatywność, elastyczność, umiejętność dostosowania się do zmian, kreatywność i zdolność do generowania nowych rozwiązań (eGospodarka.pl, 2012). Badania realizowane w latach 2021–2022 w ramach ewaluacji Programów Rozwoju Kompetencji finansowanych przez NCBiR wykazały, że pracodawcy wskazują na braki absolwentów przede wszystkim w obszarze „kompetencji ogólnych i społecznych, takich jak: logiczne myślenie, samodzielność (samoorganizacja pracy), komunikatywność, podejmowanie wyzwań, zaangażowanie, kreatywność czy work-life balance" (Jelonek, 2022).

Szczególną rolę w zbiorze kompetencji miękkich odgrywa umiejętność pracy w zespole. W dobie projektowego modelu organizacji pracy zdolność do efektywnej współpracy staje się warunkiem koniecznym sukcesu zawodowego. Raport badań jakościowych przeprowadzonych przez uczelnie w ramach systemu monitorowania losów absolwentów wskazuje, że firmy biorące udział w badaniach „poza rozwojem kompetencji miękkich – ze szczególnym

naciskiem na współpracę pomiędzy zespołami, komunikację i umiejętność dawania informacji zwrotnej – wskazywały też potrzebę dostosowania się do oczekiwań nowego pokolenia" (SciencePR, 2020). Zdolność do udzielania i przyjmowania informacji zwrotnej jest przy tym kompetencją, której brakuje zarówno wśród absolwentów, jak i wśród doświadczonych pracowników.

Warto zwrócić uwagę na szczególny wymiar kompetencji miękkich w pracy inżyniera biomedycznego. Inżynier pracujący w środowisku szpitalnym czy laboratoryjnym musi wykazywać się empatią, cierpliwością i zdolnością do budowania zaufania – cechami, które tradycyjnie przypisywano osobom wykonującym zawody pomocowe, nie zaś inżynierskie. Powiślańska Akademia Nauk Stosowanych podkreśla, że „na inteligencję emocjonalną składają się kluczowe kompetencje miękkie, takie jak: empatia, asertywność oraz samokontrola w komunikacji", a ich rozwinięcie „znacząco wpływa na jakość relacji międzyludzkich" w środowisku zawodowym (Powiślańska ANS, 2025). Jest to perspektywa szczególnie istotna w kontekście kształcenia inżynierów pracujących w bezpośrednim kontakcie z personelem medycznym i pacjentami.

Program Rozwoju Kompetencji, realizowany w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój, był jedną z pierwszych systemowych prób włączenia kształcenia kompetencji miękkich do programów polskich uczelni wyższych. Jak wskazywało Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, *„główną ideą jest wprowadzenie do programu studiów zajęć, które doskonalą kompetencje w obszarach kluczowych dla gospodarki i rozwoju kraju, z naciskiem na miękkie kompetencje poszukiwane przez pracodawców m.in. umiejętności związane z komunikacją, współpracą w grupie czy analitycznym myśleniem"* (NCBiR, 2015). Wyniki ewaluacji tego programu okazały się obiecujące, choć wskazały też na potrzebę większej indywidualizacji wsparcia i koncentracji na kompetencjach przydatnych bezpośrednio przy wejściu na rynek pracy (Jelonek, 2022).

W kontekście inżynierii biomedycznej zdolności komunikacyjne są szczególnie istotne z uwagi na specyficzny charakter środowiska zawodowego. Inżynier biomedyczny działa na styku świata techniki i medycyny, co oznacza konieczność efektywnej komunikacji z przedstawicielami odmiennych dyscyplin – zarówno z inżynierami różnych specjalności, jak i z personelem medycznym, administracją szpitalną oraz pacjentami. Politechnika Białostocka podkreśla

w ofercie swoich studiów podyplomowych, że absolwenci branży wyrobów medycznych muszą posiadać kompetencje pozwalające na skuteczne poruszanie się w środowisku regulacyjnym, co wymaga umiejętności zarówno technicznej dokumentacji, jak i komunikacji z organami nadzoru (Politechnika Białostocka, 2024).

Wyzwania dla programów studiów wyższych – model kompetencyjny i kierunki zmian

Na podstawie przeprowadzonych analiz autorzy zaproponowali syntetyczny model kompetencji przyszłości w dobie zielonej i cyfrowej transformacji. Model ten jest spójnym, hierarchicznym narzędziem analitycznym, które porządkuje złożoną problematykę relacji między rynkiem pracy a szkolnictwem wyższym. Jego uniwersalnym podejściem jest integracja kontekstu makroekonomicznego, oczekiwań pracodawców, struktury kompetencji i roli uczelni w jednym schemacie przyczynowo-skutkowym. Diagram ma postać wielopoziomowego schematu blokowego o strukturze hierarchiczno-przyczynowej i odwzorowuje logiczny ciąg powiązań: od szerokiego kontekstu makroekonomicznego, przez wymagania rynku pracy, do konkretnych kompetencji absolwenta. Na szczycie schematu umieszczono blok kontekstu zewnętrznego opisujący podwójną transformację (zieloną i cyfrową). Wskazuje on na trzy siły sprawcze kształtujące współczesny rynek pracy:

- dynamicznie zmieniający się rynek pracy,
- automatyzację procesów,
- sztuczną inteligencję (SI) oraz regulacje Unii Europejskiej.

Blok ten pełni rolę ramy makroekonomicznej i regulacyjnej, w której osadzone są wszystkie pozostałe elementy modelu.

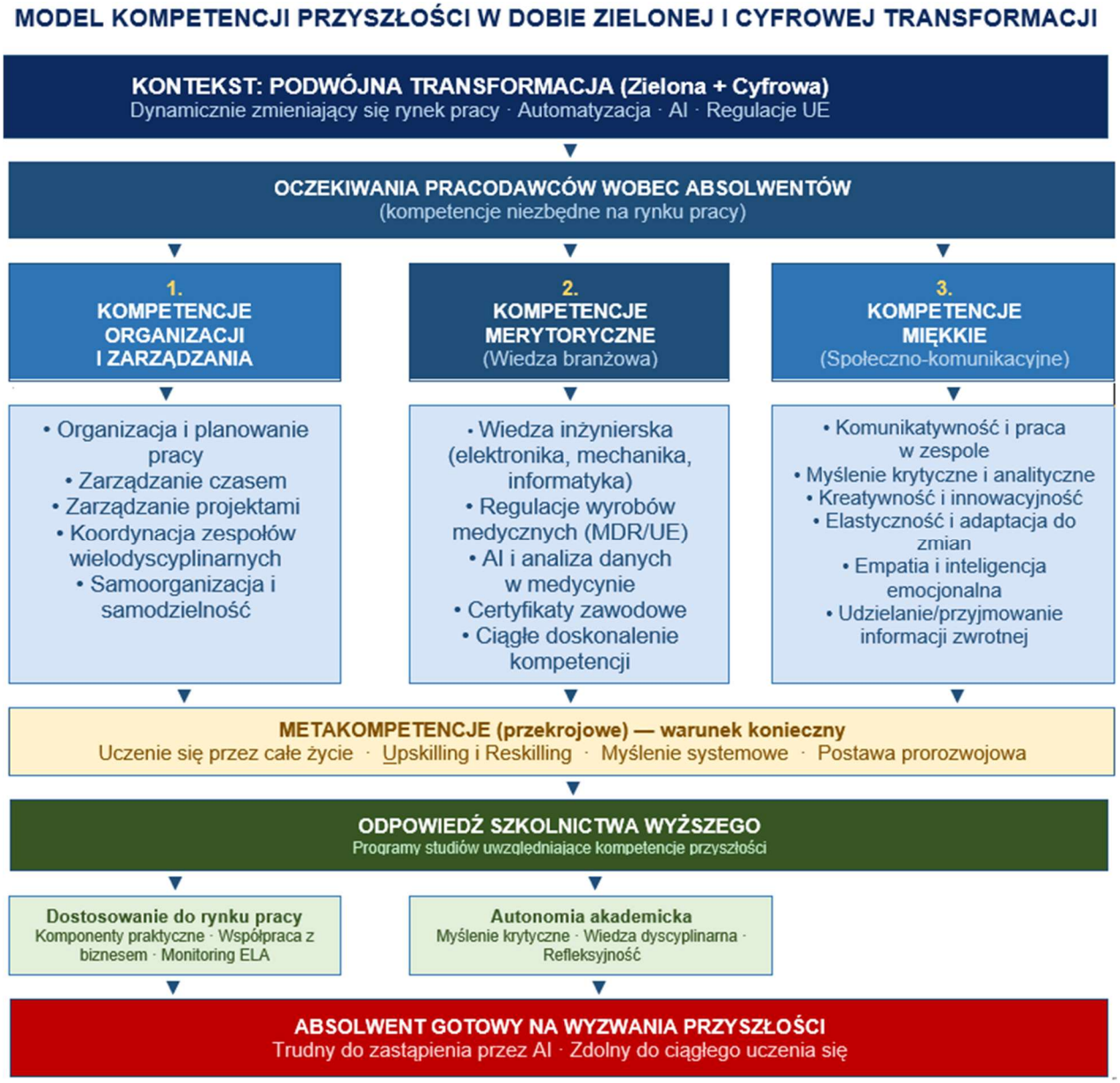
Drugi poziom schematu to blok „Oczekiwań pracodawców wobec absolwentów", opisywany jako kompetencje niezbędne na rynku pracy. Stanowi ogniwo pośrednie między kontekstem transformacji a szczegółowymi kompetencjami. Pracodawcy - jako bezpośredni odbiorcy efektów kształcenia akademickiego - definiują konkretny zestaw wymagań kompetencyjnych. Z bloku oczekiwań pracodawców wyłaniają się filary kompetencji. Każdy filar zawiera szczegółowe przykłady niezbędnych rynkowo umiejętności.

"Metakompetencje (przekrojowe) – warunek konieczny", są to kompetencje wyższego rzędu, bez których pozostałe obszary nie mogą być efektywnie rozwijane. Wyróżnienie metakompetencji jako osobnego, horyzontalnego poziomu podkreśla ich funkcję fundamentu - są one warunkiem wstępnym dla efektywnego rozwijania wszystkich pozostałych kompetencji.

Następny poziom w schemacie to blok "Odpowiedź szkolnictwa wyższego", który rozgałęzia się w dwa równoległe i komplementarne kierunki działania uczelni. Zestawienie tych dwóch kierunków jako równoległych (a nie sprzecznych) sygnalizuje, że autorzy modelu postrzegają je jako dwa filary misji uczelni, które muszą być utrzymywane w dynamicznej i elastycznej rynkowo oraz środowiskowo równowadze.

Na najniższym poziomie schematu - jako wynik całego procesu - umieszczono blok opisujący docelowy profil absolwenta: "trudny do zastąpienia przez AI" i "zdolny do ciągłego uczenia się". Jest to element syntetyczny modelu, w którym wszystkie wcześniejsze elementy

sprowadzają się do konkretnej, operacyjnej i pragmatyczno-utylitarnej definicji celów kształcenia.



Źródło: Opracowanie własne.

Model jednoznacznie odrzuca wąskie, jednoaspektowe podejście do kompetencji. Żaden z trzech filarów nie jest samodzielnie wystarczający - dopiero ich integracja, uzupełniona metakompetencjami, tworzy profil pożądanego pracownika. Oznacza to, że projektowanie programów studiów musi opierać się na myśleniu systemowym, a nie na dodawaniu kolejnych, izolowanych, nieomal „wyspowych" przedmiotów w szerokim archipelagu wytyczanych efektów kształcenia. W obliczu przyspieszenia technologicznego konkretna wiedza techniczna ma krótki termin użytecznej kwalifikacyjnie przydatności, natomiast gotowość do nieustannego podnoszenia kompetencji pozostaje aktualna przez całe życie zawodowe. Uczelnie powinny ten wymiar traktować priorytetowo. Umieszczenie kompetencji miękkich jako odrębnego, równorzędnego filaru, obok wiedzy branżowej i kompetencji zarządczych, jest istotnym

sygnałem dla systemu edukacji. W szczególności dotyczy to kierunków technicznych (na przykład takich jak inżynieria biomedyczna), gdzie historycznie dominował nacisk na wiedzę specjalistyczną, a kompetencje komunikacyjne, empatia czy inteligencja emocjonalna były marginalizowane, bądź znacząco redukowane. Model wyraźnie wskazuje, że odpowiedź uczelni na potrzeby rynku musi być zrównoważona zachowaniem autonomii akademickiej. Zbyt silne podporządkowanie kształcenia aktualnym wymaganiom pracodawców grozi instrumentalizacją edukacji i utratą jej formacyjnego wymiaru. Jednocześnie oderwanie od realiów rynku pracy skazuje absolwentów na kompetencyjne niedopasowanie. Dylemat ten nie ma jednoznacznego rozwiązania, ale model sugeruje, że obydwa kierunki muszą współistnieć. W operacyjnym wymiarze modelowania tych procesów nie jest istotą rzeczy to, by absolwent rywalizował z technologicznymi innowacjami w obszarach, gdzie SI jest lepsza, takich jak szybkość, precyzja, przetwarzanie danych. Chodzi o to, by rozwijał kompetencje niereplikowalne: empatię, kreatywność, myślenie krytyczne, zdolność do rozwiązywania złożonych, nieustrukturyzowanych problemów oraz przywództwo. Model wyznacza zatem kierunek kształcenia, który jest antytezą wąskiej specjalizacji. Umieszczenie podwójnej transformacji jako ramy całego modelu sygnalizuje, że kompetencje przyszłości nie mogą być definiowane w oderwaniu od trendów makroekonomicznych i regulacyjnych. Programy studiów muszą uwzględniać wymagania zielonej gospodarki: efektywność zasobowa, dekarbonizacja, gospodarka obiegu zamkniętego oraz cyfrowej transformacji: SI, analityka danych, cyberbezpieczeństwo, jako stałe, a nie opcjonalne komponenty kształcenia. Powiązanie bloku oczekiwań pracodawców bezpośrednio z kontekstem transformacji i z odpowiedzią szkolnictwa wyższego sugeruje, że dialog między uczelniami a pracodawcami powinien mieć charakter ciągły i systemowy, a nie jednorazowy, np. wyłącznie przy okazji akredytacji programów kształcenia. Narzędzia takie jak monitoring losów absolwentów i współpraca z podmiotami branżowymi stanowią mechanizmy sprzężenia zwrotnego, które powinny na bieżąco aktualizować treści kształcenia.

Kluczowe przesłanie stworzonego modelu można ująć następująco: w dobie zielonej i cyfrowej transformacji celem kształcenia akademickiego jest absolwent, który potrafi uczyć się przez całe życie, łączy kompetencje techniczne z miękkimi i zarządczymi, a swoją unikalną wartość na rynku pracy buduje na tym, co nieautomatyzowalne i niepowtarzalne nawet z wykorzystaniem technologii informacyjnych, to jest: twórczości, empatii, krytycznym myśleniu i zdolności do działania w warunkach złożoności i niepewności.

Podsumowanie

Analiza oczekiwań pracodawców prowadzi do kilku istotnych wniosków dla projektowania programów studiów wyższych, w szczególności na kierunkach technicznych i interdyscyplinarnych, takich jak inżynieria biomedyczna. Programy kształcenia powinny w znacznie większym stopniu uwzględniać komponenty praktyczne, realizowane we współpracy z podmiotami branżowymi. System ELA - Ogólnopolski system monitorowania Ekonomicznych Losów Absolwentów szkół wyższych - pokazuje, że absolwenci nauk technicznych oraz medycznych i o zdrowiu mają statystycznie lepszą sytuację na rynku pracy niż absolwenci innych kierunków, jednak różnice te nie wynikają wyłącznie z treści kształcenia, lecz w dużej mierze z możliwości zdobycia doświadczenia zawodowego w trakcie studiów (ELA, 2025).

Konieczne jest również redefiniowanie pojęcia „efektów uczenia się" w kierunku większego uwzględnienia kompetencji przekrojowych. Jak wykazały badania UJ dotyczące kwalifikacji
i kompetencji kluczowych dla zwiększenia szans absolwentów na rynku pracy, „kompetencje kluczowe wg obszarów kształcenia" powinny być identyfikowane we współpracy z pracodawcami, a nie wyłącznie na podstawie akademickiego kanonu wiedzy dyscyplinarnej (Analiza kwalifikacji i kompetencji, 2014). Dialog z biznesem i sektorem publicznym powinien być procesem ciągłym, a nie jednorazowym wydarzeniem przy okazji akredytacji programu.

Ponadto w dobie postępującej cyfryzacji i automatyzacji, uczelnie muszą przygotowywać absolwentów na rynek pracy, który będzie wymagał od nich stałego podnoszenia kwalifikacji. Raport SWPS i Konfederacji Lewiatan wskazuje, że kluczowe stają się kompetencje „które odróżniają ludzką pracę od zadań realizowanych przez systemy informatyczne, roboty czy sztuczną inteligencję i sprawiają, że człowiek będzie trudny do zastąpienia" (Dębowska, 2026). Są to przede wszystkim: myślenie krytyczne, kreatywność, empatia, przywództwo i zdolność do rozwiązywania złożonych, nieustrukturyzowanych problemów. Uczelnie wyższe, kształtując programy studiów, muszą brać pod uwagę nie tylko aktualne oczekiwania pracodawców, ale i antycypować przyszłe potrzeby rynku.

Bibliografia

1. Bianchi, G., Pisiotis, U., Cabrera Giraldez, M. (2022). GreenComp: The European sustainability competence framework. Publications Office of the European Union / Joint Research Centre. Dostępny online:
2. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128040 [dostęp: 05.06.2026].
3. Budnikowski, A., Dąbrowski, D., Gąsior, U., Macioł, S. (2012). Pracodawcy o poszukiwanych kompetencjach i kwalifikacjach absolwentów uczelni – wyniki badania. E-mentor, nr 4 (46), s. 4–17.
4. CJO UG (2018). Kompetencje językowe absolwentów szkół wyższych a oczekiwania pracodawców – raport z badania. Gdańsk: Centrum Języków Obcych Uniwersytetu Gdańskiego. Dostępne online:
5. https://cjo.ug.edu.pl/sites/cjo.ug.edu.pl/files/_nodes/strona/115732/files/kompetencje-jezykowe-absolwentow-szkol-wyzszych-oczekiwania-pracodawcow-raport.pdf [dostęp: 18.05.2026].
6. Dębowska, A. (2026). Twoje kompetencje przyszłości w świecie AI – raport Uniwersytetu SWPS i Konfederacji Lewiatan. Warszawa: Konfederacja Lewiatan / Uniwersytet SWPS. Dostępny online:
7. https://www.swps.pl/images/DOKUMENTY/Raport_Twoje_Kompetencje_Przyszlosci_Uniwersytet_SWPS_compressed.pdf [dostęp: 18.06.2026].
8. Decision (EU) 2022/2481 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 establishing the Digital Decade Policy Programme 2030. (2022). Dostępny online: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2022/2481/oj/eng [dostęp: 09.06.2026].
9. Devire (2024). Branża sprzętu medycznego na polskim rynku pracy – trendy i wyzwania. Devire Consulting. Dostępny online: https://www.devire.pl/blog/branza-sprzetu-medycznego-na-polskim-rynku-pracy-trendy-wyzwania/ [dostęp: 18.05.2026].
10. eGospodarka.pl (2012). Kompetencje interpersonalne cenione przez pracodawców. eGospodarka.pl. Dostępny online: https://www.egospodarka.pl/85630 [dostęp: 18.05.2026].
11. ELA (2025). Ogólnopolski system monitorowania Ekonomicznych Losów Absolwentów szkół wyższych – edycja X. Warszawa: OPI PIB. Dostępny online: https://ela.nauka.gov.pl [dostęp: 18.05.2026].
12. European Commission. (2020). European Skills Agenda for sustainable competitiveness, social fairness and resilience (COM(2020) 274 final). Dostepny

online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:274:FIN [dostęp: 09.06.2026].
13. European Commission. (2021). 2030 Digital Compass: the European way for the Digital Decade (COM(2021) 118 final). Dostępny online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0118 [dostęp: 09.06.2026]
14. ILO. (2022). World Employment and Social Outlook 2022: Greening with jobs. International Labour Office. Dostępny online:
15. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@dcomm/@publ/documents/publication/wcms_834081.pdf [dostęp: 09.06.2026].
16. Instytut Badań Edukacyjnych (IBE) (2015). Monitorowanie losów absolwentów uczelni wyższych z wykorzystaniem danych administracyjnych ZUS. Warszawa: IBE. Dostępny online: https://eduentuzjasci.pl/images/stories/publikacje/ibe-raport-monitorowanie-losow-absolwentow.pdf [dostęp: 18.05.2026].
17. IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. ections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Dostępny online: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf [dostęp: 09.06.2026].
18. Jelonek, M. (2022). W jakie kompetencje studentów warto inwestować? Raport z ewaluacji Programów Rozwoju Kompetencji. Kraków: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju / Centrum Ewaluacji i Analiz Polityk Publicznych UJ.
19. Jelonek, M., Skrzyńska, J., Szklarczyk, D. (2014). Analiza kwalifikacji i kompetencji kluczowych dla zwiększenia szans absolwentów na rynku pracy. Warszawa / Kraków: Instytut Badań Edukacyjnych.
20. Lisicki, R. (2021). Kompetencje przyszłości – raport Konfederacji Lewiatan. Warszawa: Konfederacja Lewiatan.
21. NCBiR (2015). Uczelnie przyszłości – założenia programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Warszawa: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Dostępny online: https://www.ncbr.gov.pl [dostęp: 18.05.2026].
22. NCBiR / Cegos (2023). Jakich kompetencji współcześnie brakuje absolwentom studiów wyższych? Cegos.pl. Dostępny online: https://www.cegos.pl [dostęp: 18.05.2026].
23. OECD. (2023). OECD Skills Outlook 2023: Skills for a Resilient Green and Digital Transition, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/27452f29-en. Dostępny online: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/11/oecd-skills-outlook-2023_df859811/27452f29-en.pdf [dostęp: 09.06.2026].

24. Perspektywy (2012). Absolwent idealny – wyniki badania SGH, AmCham, Ernst & Young. Perspektywy.pl. Dostępny online: https://perspektywy.pl [dostęp: 18.05.2026].
25. Politechnika Białostocka (2024). Nowy kierunek studiów podyplomowych: Certyfikacja i wprowadzenie wyrobu medycznego na rynek. Białystok: Politechnika Białostocka. Dostępny online: https://pb.edu.pl [dostęp: 18.05.2026].
26. Politechnika Śląska (2024). Inżynieria biomedyczna – oferta kształcenia. Gliwice: Politechnika Śląska. Dostępny online: https://rekrutacja.polsl.pl [dostęp: 18.05.2026].
27. Politechnika Wrocławska (2024). Inżynieria biomedyczna – specjalności: Informatyka Medyczna, Inżynieria Medyczna. Wrocław: Politechnika Wrocławska. Dostępny online: https://rekrutacja.pwr.edu.pl [dostęp: 18.05.2026].
28. POLMED (2023). Podsumowanie 2023 roku i perspektywy na rok 2024 dla wyrobów medycznych. Warszawa: Polska Izba Producentów Urządzeń Medycznych POLMED. Dostępny online: https://polmed.org.pl/podsumowanie-2023-roku-i-perspektywy-na-rok-2024-dla-wyrobow-medycznych/ [dostęp: 18.05.2026].
29. Powiślańska Akademia Nauk Stosowanych (2025). Umiejętności miękkie – jak przydają się w życiu zawodowym? Powiślańska ANS. Dostępny online: https://powislanska.edu.pl [dostęp: 18.05.2026].
30. SciencePR (2020). Od pracowników kompetencji miękkich, od uczelni praktycznego podejścia – tego chce biznes. SciencePR.pl. Dostępny online: https://sciencepr.pl [dostęp: 18.05.2026].
31. UNESCO. (2020). Education for Sustainable Development: A Roadmap. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Dostępny online: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374802 [dostęp: 09.06.2026].
32. Vuorikari, R., Kluzer, S. and Punie, Y. (2022). DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens - With new examples of knowledge, skills and attitudes, EUR 31006 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-48882-8, doi:10.2760/115376, JRC128415.
33. World Economic Forum. (2020). The Future of Jobs Report 2020. Dostępny online: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2020.pdf [dostęp: 09.06.2026].
34. World Economic Forum. (2023). The Future of Jobs Report 2023. Dostępny online: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2023.pdf [dostęp: 09.06.2026].
35. WUP Poznań (2012). Trudności we wchodzeniu na rynek pracy absolwentów wyższych uczelni. Poznań: Wojewódzki Urząd Pracy w Poznaniu. Dostępny online: https://wuppoznan.praca.gov.pl/documents/161065/1003499/Trudnosci_absolwenci.pdf/9c3db4b9-5ddd-4503-928a-efc65ebffc53?t=1410131690000 [dostęp: 18.05.2026]

ŚRODOWISKO PRACY JAKO REGULATOR ZASPOKOJENIA POTRZEB PSYCHOLOGICZNYCH: TEORIA AUTODETERMINACJI JAKO MODEL PROJEKTOWANIA ORGANIZACJI WSPIERAJĄCYCH EFEKTYWNOŚĆ

Maksymilian PRZERWA[1]*, Iwona ULENBERG[2], and Marcin TYL[2]

[1] Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Instytut Psychologii, Lublin; mprzerwa123@student.kul.pl; ORCID: 0009-0003-1503-5046

[2] Uniwersytet Gdański, Instytut Psychologii, Gdańsk; i.ulenberg.374@studms.ug.edu.pl; ORCID: 0009-0005-8473-2771 (Ulenberg I.), m.tyl.378@studms.ug.edu.pl; 0009-0004-4026-4315 (Tyl M.)

* Korespondencja: przerwa.maks@gmail.com; Tel.: +515-126-640

Streszczenie: Niniejszy artykuł przyjmuje integracyjne, oparte na teorii podejście przeglądowe w celu wyjaśnienia, w jaki sposób środowisko pracy funkcjonuje jako regulator zaspokojenia podstawowych potrzeb psychologicznych w ujęciu Teorii Autodeterminacji (SDT). Analiza syntetyzuje wyniki badań empirycznych, w tym metaanaliz i badań organizacyjnych, identyfikując kluczowe antecedenty środowiskowe oraz ich wpływ na jakość motywacji i efektywność pracy. Wyniki wskazują, że przywództwo wspierające autonomię, projekt pracy sprzyjający zaspokojeniu potrzeb oraz systemy ocen i nagród pełniące funkcję informacyjną (a nie kontrolującą) są konsekwentnie powiązane z wyższym poziomem motywacji autonomicznej, która z kolei sprzyja bardziej trwałym, adaptacyjnym i jakościowo lepszym wynikom pracy. W przeciwieństwie do tego środowiska o charakterze kontrolującym sprzyjają motywacji kontrolowanej oraz kosztom psychologicznym, osłabiając długoterminową efektywność. Uzyskane wyniki wspierają procesualny model, w którym efektywność pracy jest mediowana przez zaspokojenie potrzeb psychologicznych i jakość regulacji motywacyjnej, podkreślając rolę projektowania organizacji jako strategicznego mechanizmu umożliwiającego jednoczesne wzmacnianie wyników i dobrostanu pracowników.

Slowa kluczowe: Teoria Autodeterminacji (SDT); motywacja autonomiczna; projektowanie organizacji; zaspokojenie potrzeb psychologicznych; efektywność pracy

THE WORK ENVIRONMENT AS A REGULATOR OF PSYCHOLOGICAL NEED SATISFACTION: THE SELF-DETERMINATION THEORY AS A MODEL FOR DESIGNING ORGANIZATIONS THAT SUPPORT PERFORMANCE

Abstract: This article adopts an integrative, theory-driven review approach to examine how the work environment functions as a regulator of psychological need satisfaction within the Self-Determination Theory (SDT) framework. The analysis synthesizes empirical findings, including meta-analyses and organizational studies, to identify key environmental antecedents and their effects on motivational quality and work performance. Results indicate that autonomy-supportive leadership, need-supportive job design, and informational (rather than controlling) reward systems are consistently associated with higher levels of autonomous motivation, which in turn predicts more sustainable, adaptive, and high-quality performance. In contrast, controlling environments tend to foster controlled motivation and psychological costs, undermining long-term effectiveness. The findings support a process-based model in which work performance is mediated by psychological need satisfaction and motivational regulation, highlighting the role of organizational design as a strategic mechanism for simultaneously enhancing performance and employee well-being.

Keywords: Self-Determination Theory (SDT); autonomous motivation; organizational design; psychological need satisfaction; work performance

Introduction

In organizational research, work performance is often conceptualized in a narrow manner, as the short-term attainment of quantitative targets or productivity indicators. Such an approach tends to overestimate solutions based on pressure, control, and external reward systems, which may yield rapid but frequently unsustainable results. In response to this reductionist perspective, Self-Determination Theory (SDT) proposed by Ryan and Deci (2000) offers an alternative conceptualization of performance, assuming that sustainable and high-quality work outcomes are largely a function of motivational quality and the environmental conditions that shape motivation through the satisfaction of basic psychological needs (Ryan & Deci, 2000; Deci & Ryan, 2000).

In the present analysis, "performance" is understood multidimensionally as behaviors and outcomes relevant to organizational goals, including at least: (a) task performance, referring to the quality and effectiveness of fulfilling formal job responsibilities; (b) contextual performance, which supports the organization (e.g., cooperation, initiative); and (c) adaptability

and learning, which are particularly critical in knowledge-based and dynamic work environments (Campbell & Wiernik, 2015; Borman & Motowidlo, 1997). This perspective moves beyond a simplified understanding of performance as mere productivity and incorporates its qualitative and long-term dimensions.

Self-Determination Theory is particularly useful in organizational analysis because it operates at two complementary levels: the individual level (experiences of autonomy, competence, and relatedness; motivational quality; well-being) and the systemic level (need-supportive climate, leadership style, work architecture, evaluation and reward systems) (Gagné & Deci, 2005). From this perspective, the work environment is not a neutral backdrop to employee behavior but an active regulator of motivational processes. An organization may create conditions that foster goal internalization and self-regulation, or conditions that generate controlled motivation and psychological costs (Van den Broeck et al., 2016).

Empirical research confirms that the satisfaction of basic psychological needs at work is strongly associated with higher motivational quality, as well as with employee performance and well-being. A meta-analysis across various occupational contexts demonstrated that autonomy support and need satisfaction are significant predictors of engagement, job performance, and job satisfaction (Slemp et al., 2024; Van den Broeck et al., 2016). This suggests that designing organizations in ways that account for psychological needs is not merely a well-being intervention, but may also serve as a strategic tool for fostering sustainable performance.

The aim of this article is to develop a theory-driven integrative framework explaining how the work environment functions as a regulator of basic psychological need satisfaction and, through this mechanism, influences motivational quality and multidimensional work performance within the Self-Determination Theory perspective. Accordingly, the present article adopts the perspective that the work environment functions as a regulator of autonomy, competence, and relatedness need satisfaction and, through these mechanisms, influences motivational quality and multidimensional organizational performance. This approach integrates the psychological level with the level of organizational system design, offering a theoretical framework for building work environments that support both performance outcomes and employee well-being.

Methodological approach

This article adopts an integrative, theory-driven methodological approach, as the focal problem concerns the relationship between work environment characteristics and psychological need satisfaction within the Self-Determination Theory framework, rather than a single narrowly defined predictor. The relevant evidence is distributed across several related research domains, including work motivation, job design, leadership, and organizational psychology. An integrative review was therefore selected as the most appropriate approach, as it enables the synthesis of empirical findings, meta-analyses, and conceptual contributions relevant to the examined mechanisms.

The literature search was conducted between November 2025 and March 2026 using major academic databases, including Web of Science, Scopus, and Google Scholar. The search strategy combined keywords related to Self-Determination Theory (e.g., "self-determination theory," "autonomous motivation," "psychological needs"), work environment factors (e.g., "job design," "leadership," "work environment"), and work outcomes (e.g., "performance," "well-being," "engagement"). Backward and forward citation tracking was also applied to identify additional relevant studies.

Priority was given to peer-reviewed journal articles, particularly meta-analyses, review papers, and empirical studies in organizational and work psychology. Studies were included if they addressed (a) psychological need satisfaction or frustration, (b) environmental or organizational antecedents, and (c) work-related outcomes. The review was iterative rather than strictly systematic, and sources were selected based on their theoretical and empirical relevance to explaining the mechanisms linking work environment, motivational regulation, and performance.

Self-Determination Theory as a Model of Functioning in the Organizational Context

Self-Determination Theory (SDT) is a theory of motivational quality and of the conditions that support optimal human functioning. At its core, in organizational applications, the theory encompasses (a) three basic psychological needs and (b) a continuum of behavioral regulation – ranging from autonomous motivation to controlled motivation and amotivation (Ryan & Deci, 2000; Vansteenkiste et al., 2020). Autonomy refers to the experience of volition and authorship of one's actions, that is, the sense that one's behavior is aligned with personal values and beliefs.

It is not synonymous with independence or the absence of interdependence, but rather concerns the subjective experience of acting as the origin of one's behavior (Vansteenkiste et al., 2020). Competence refers to the sense of effectiveness, growth, and the ability to manage optimally challenging tasks; in the workplace, it is strongly linked to the quality of feedback, clarity of task structure, and access to learning opportunities (Vansteenkiste et al., 2020). Relatedness denotes the sense of belonging, being noticed and accepted, and functioning safely within relationships; in organizational settings, it translates into the quality of collaboration, social support, and team climate (Van den Broeck et al., 2016).

The theory differentiates types of motivation not in terms of "how much" motivation is present, but in terms of the "kind" of regulation underlying action—that is, the qualitative source of behavior. In the workplace, it is particularly important to distinguish autonomous motivation (acting out of meaning, values, or interest) from controlled motivation (acting out of pressure, coercion, reward/punishment contingencies, or fear of evaluation). This distinction has implications for the quality of performance, psychological costs, and the durability of outcomes (Gagné & Deci, 2005; Van den Broeck et al., 2021).

Autonomous motivation is associated with higher levels of engagement, persistence, and creativity, as behavior is congruent with one's identity and internally integrated values. In contrast, controlled motivation may enhance short-term productivity, but often generates greater strain, reduces well-being, and increases the risk of burnout. Organizational research suggests that motivational processes influence performance through complex regulatory mechanisms rather than through simple linear increases in effort, highlighting the role of self-efficacy and feedback dynamics in shaping work outcomes (Vancouver & Purl, 2017).

Organizational Antecedents of Need Satisfaction

In its "organizational" application, SDT centers on the question: which practices and structural arrangements increase the likelihood of satisfying the needs for autonomy, competence, and relatedness, and which systematically frustrate them. The most frequently examined antecedents include leadership, reward and performance evaluation systems, and job design as shown in Table 1.

Table 1.
Design Levers: Antecedents → Psychological Needs → Practices

organizational level	primary influence on psychological needs	example design practices	SDT rationale and typical consequences
Leadership: autonomy-supportive behaviors	Autonomy (strongly), competence and relatedness (indirectly)	Shared decision-making and genuine choice; providing rationales for requirements; non-controlling language; interest in the employee's perspective	Autonomy support is associated with higher autonomous motivation and more favorable work outcomes in meta-analytic research (Slemp et al., 2018; Deci et al., 1989).
Reward and performance evaluation systems	Autonomy (risk of frustration), competence (potential support)	Bonuses framed as information about meeting standards; qualitative feedback; limiting rankings and public shaming; developmental goals alongside quantitative targets	Rewards and evaluations may function in a controlling manner (undermining autonomy) or in an informational manner (supporting competence). Overall, contingent external rewards more often undermine intrinsic motivation in experimental studies, although in practice they may also coexist with high performance when appropriately designed (Deci et al., 1999; Cerasoli et al., 2014).
Job design	Autonomy, competence, relatedness (depending on the element)	Decision and planning autonomy; optimal challenge; access to resources; performance feedback; collaboration and social support	Work characteristics explain a substantial portion of variance in attitudes and behaviors; particularly important are autonomy-supportive and developmental job features, as well as social characteristics of work (Humphrey et al., 2007; Morgeson & Humphrey, 2006; Hackman & Oldham, 1976).

Leadership as a Key Antecedent.

In workplace research, "leader autonomy support" is one of the most consistently replicated predictors of favorable motivational and functional outcomes. A meta-analysis in organizational settings indicates positive associations between autonomy support and autonomous motivation, as well as a broad range of beneficial outcomes, and no significant association with controlled motivation, which is consistent with SDT predictions (Slemp et al., 2018). These findings suggest that leadership style operates primarily through the quality of employees' motivational regulation, rather than through direct behavioral control or the intensification of performance pressure.

Early organizational SDT studies further demonstrated that managers' orientations (more autonomy-supportive vs. more controlling) are associated with employees' experiences and attitudes within the organization, supporting the view that interpersonal style functions as a "carrier" of environmental influence (Deci et al., 1989). Broader work motivation research indicates that perceived autonomy support from supervisors is also linked to higher task performance and greater employee well-being, underscoring its relevance for both organizational outcomes and the sustainability of occupational functioning (Kanfer et al. 2008).

1.1. Reward and Performance Evaluation Systems as an Ambivalent Antecedent.

Within SDT, rewards are not treated as "inherently bad," but rather as stimuli with two possible psychological meanings: informational (supporting competence) or controlling (frustrating autonomy) (Ryan & Deci, 2000; Gagné & Deci, 2005). Thus, the critical factor is not the mere presence of a reward, but the way it is communicated, the context of its implementation, and the perceived organizational intent. A reward may enhance feelings of effectiveness and recognition when interpreted as information about competence; conversely, it may undermine autonomy if perceived as a tool of pressure or behavioral conditioning.

A meta-analysis of experimental studies shows that many types of contingent external rewards (dependent on task engagement or performance) are associated with decreases in intrinsic motivation, measured, among other indicators, by choice of activity during free time, which is consistent with the SDT "control" mechanism (Deci et al., 1999). This effect is particularly evident when rewards are tightly linked to task performance and communicate an external source of behavioral regulation. The mechanism is interpreted as a shift in attribution from internal causes of action to external sources of control.

At the same time, a meta-analysis spanning 40 years of research indicates that intrinsic motivation and external incentives can coexist as predictors of performance, suggesting the need for nuanced design of motivational systems rather than simplistic dichotomies such as "rewards work / do not work" (Cerasoli et al., 2014). At the same time, research on paradoxical leader behaviors indicates that effective people management often requires simultaneously maintaining performance demands and supporting employee autonomy, as this balance is associated with higher adaptability, proactivity, and task proficiency (Zhang et al., 2015). Consequently, the design of reward systems in organizations should account for both their

informational function and the potential psychological costs of excessive control, especially in roles requiring creativity, learning, and initiative.

1.2. Job Design as a Structural Antecedent.

Job design (autonomy, task structure, informational feedback, social interactions) constitutes the "hard" layer of the work environment that influences the likelihood of need satisfaction independently of individual differences. A meta-analytic synthesis of the work design literature indicates that motivational, social, and contextual job characteristics explain a substantial portion of the variance in employee attitudes and behaviors (including satisfaction, stress, and perceived performance) (Humphrey et al., 2007).

From an SDT perspective, those components of job design are particularly compatible that provide (a) decision latitude (autonomy), (b) optimal challenge and performance feedback (competence), and (c) social support and collaboration (relatedness) (Morgeson & Humphrey, 2006; Van den Broeck et al., 2016). In process terms, this implies that job design may function as a structural mechanism regulating motivational quality by systematically supporting or frustrating psychological needs. Empirical research suggests that task autonomy and the ability to influence how work is performed are significantly associated with higher engagement and performance, particularly in complex job contexts (Kanfer et al., 2008).

At the same time, the quality of feedback and clarity of task structure facilitate the development of competence perceptions, which are key predictors of persistence and quality of performance. Job characteristics models indicate that experienced meaningfulness, responsibility, and knowledge of results constitute central motivational mechanisms linking job design to performance (Humphrey et al., 2007). Integrating these elements within the SDT framework allows them to be interpreted as structural conditions that facilitate internalization and autonomous behavioral regulation.

Furthermore, contemporary analyses emphasize the importance of the social dimension of work—interactions, interdependence, and team support—as factors strengthening relatedness and psychological safety, which in turn promote adaptability and team learning (Grant & Parker, 2009). In this sense, job design represents not merely a set of task characteristics but a systemic architecture of employees' motivational experiences.

Mechanism: Need Satisfaction → Motivational Quality → Work Outcomes

The central mechanism of SDT assumes the following sequence: need-supportive environment → need satisfaction → autonomous motivation → positive work outcomes, alongside a parallel pathway in which control and need frustration foster controlled motivation and psychological costs (Gagné & Deci, 2005; Vansteenkiste et al., 2020). The core mechanism

linking the work environment, psychological need satisfaction, motivational quality, and work outcomes can be conceptualized as a sequential, process-based model (see Figure 1).

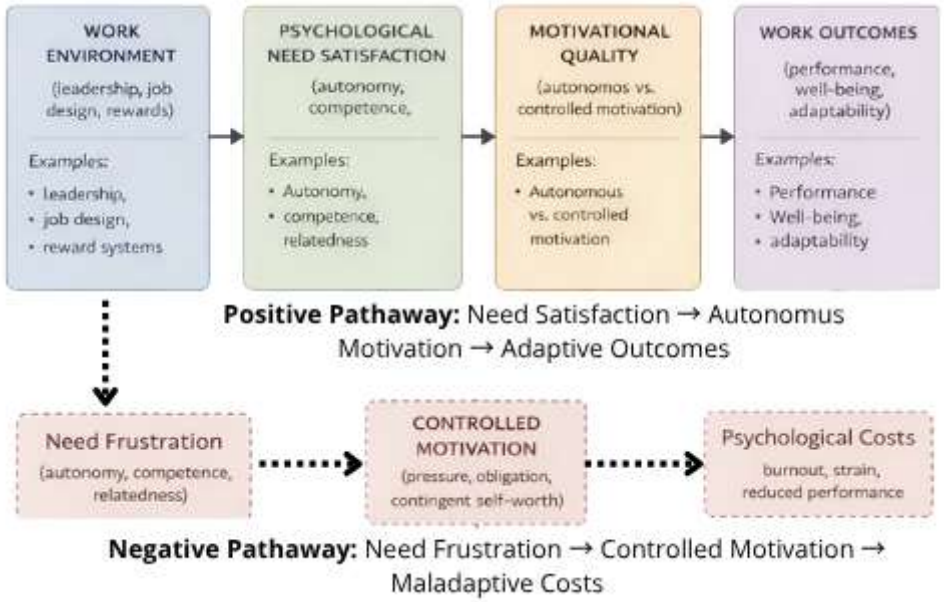


Figure 1. Mechanism linking work environment, psychological need satisfaction, motivational quality, and work outcomes within the Self-Determination Theory framework.

In this model, organizational conditions such as leadership, job design, and reward systems influence the degree to which employees experience autonomy, competence, and relatedness. These experiences, in turn, shape the quality of motivation, ranging from autonomous to controlled regulation, which ultimately determines the sustainability and quality of work outcomes.

1.3. Evidence for Mediation and the "Processual" Nature of the Model.

Job design (autonomy, task structure, informational feedback, social interactions) constitutes the "hard" layer of the work environment that influences the likelihood of need satisfaction independently of individual differences. A meta-analytic synthesis of the work design literature indicates that motivational, social, and contextual job characteristics explain a substantial portion of the variance in employee attitudes and behaviors (including satisfaction, stress, and perceived performance) which is shown in Tabel 2. (Humphrey et al., 2007; Olafsen et al., 2017).

Table 2.
Motivational Quality and the Profile of Work Outcomes

Dimension	Autonomous Motivation	Controlled Motivation
Dominant "why" of action	Meaning, values, interest; acceptance of the goal	Pressure, fear, contingent self-worth; reward/punishment
Typical consequences for performance	Greater persistence of effort, learning, higher quality, and adaptability	Greater short-term compliance, but risk of reduced well-being and performance stability
Empirical associations in the workplace	More frequent positive associations with satisfaction, engagement, and performance; mechanisms controlled in meta-analytic models	More frequent associations with burnout/turnover and weaker attitudes; effects dependent on context and performance measures
Environmental sources	Autonomy support, informational feedback, meaningful goals	Controlling language, KPI pressure, shaming comparisons

Across the reviewed evidence, some environmental factors appear more consistently and strongly associated with performance-related outcomes than others. In particular, autonomy-supportive leadership demonstrates robust and replicable effects across meta-analytic studies, functioning as a proximal and scalable predictor of motivational quality (Slemp et al., 2018; Slemp et al., 2024). Job design factors, especially decision latitude and feedback quality, also show substantial and stable associations with engagement and performance, although their effects are more structurally embedded and context-dependent (Humphrey et al., 2007). In contrast, reward systems exhibit more variable effects, depending on their perceived function. Informational rewards may support competence and performance, whereas controlling reward structures are more likely to undermine motivational quality, leading to less stable outcomes (Cerasoli et al., 2014; Deci et al., 1999). This suggests that not all environmental antecedents

contribute equally to performance, and that their effects are mediated not only by their presence, but by their psychological interpretation within the work context.

The generalizations presented in the table are consistent with SDT syntheses in organizational research, although specific effect sizes vary depending on measures and context (Gagné & Deci, 2005; Van den Broeck et al., 2021; Hagger & McAnally, 2026).

Boundary Conditions and Moderators. SDT assumes the general importance of psychological needs; however, the strength and form of the relationships environment → needs → motivation → outcomes may vary depending on context. The most important moderators in organizational design concern the nature of the work, culture, and leadership style.

Nature of work (complexity, uncertainty, knowledge work vs. routine work). In jobs requiring self-regulation, problem solving, and learning, the importance of autonomy and competence increases. In routine work, authoritarian pressure may enhance short-term productivity, but at the cost of motivational quality, which may manifest in the long term as reduced well-being and less sustainable performance. Meta-analytic findings indicate moderating effects depending on job type and employee characteristics, supporting the conditional nature of these relationships (Hagger & McAnally, 2026; Humphrey et al., 2007).

Culture and macro-context. Cross-cultural research shows that need satisfaction and need frustration are associated with well-being across diverse cultural contexts, supporting the universalistic component of SDT, although organizational expressions of autonomy may take different forms (e.g., autonomy within interdependence) (Chen et al., 2015; Vansteenkiste et al., 2020). More recent syntheses in the workplace further suggest moderation by cultural orientation and country-level resources (e.g., development indicators), which may alter the "strength" of relationships across different work ecosystems (Hagger & McAnally, 2026).

Leadership style: support vs. control. Within the SDT framework, leadership style functions not only as an antecedent of motivation but also as a "transmission mechanism" through which systemic pressures (KPIs, demands, restructuring) are translated into employees' lived experiences. Empirical studies suggest that autonomy-supportive leadership is associated with job resources and engagement through mediating pathways, whereas controlling leadership may amplify job demands and well-being costs (Sarmah et al., 2022; Slemp et al., 2018).

Practical Implications for Organizational Design. From an SDT perspective, "organizational design" entails structuring conditions that increase the likelihood of: (a) need satisfaction, (b) internalization of organizational goals, and (c) maintaining high-quality motivation without psychological costs. The implications below are organized according to systemic levers. In theoretical terms, SDT-consistent organizational design involves shaping the social context in ways that foster autonomous regulation of behavior and durable internalization of norms and organizational goals (Olafsen et al., 2017). This implies a shift from controlling behavior to supporting motivational processes that promote self-organization

and internal responsibility. To facilitate practical interpretation, the mechanisms described above can be illustrated through concrete organizational examples. For instance, autonomy-supportive leadership may involve providing employees with meaningful rationales for tasks instead of relying solely on directives, which increases internalization and engagement. In contrast, a controlling approach—such as emphasizing strict KPI compliance without explanation—may produce short-term compliance but reduce long-term motivation and adaptability.

Similarly, job design that allows employees to decide how to organize their work and provides clear, developmental feedback supports both autonomy and competence, leading to higher-quality performance. Conversely, highly standardized roles with limited decision latitude may undermine need satisfaction and result in reduced engagement over time.

In the domain of reward systems, bonuses framed as informational feedback about performance (e.g., recognizing mastery or improvement) may strengthen competence perceptions, whereas rewards perceived as controlling (e.g., excessive monitoring or pressure tied to incentives) may shift motivation toward external regulation, potentially increasing strain and reducing sustainability of performance.

Designing leadership as a need-supportive infrastructure. Converging evidence from meta-analyses and organizational SDT research indicates that developing leaders' competence in autonomy support has the potential to influence motivation and performance at scale (Slemp et al., 2018; Van den Broeck et al., 2016). Autonomy support does not imply the absence of demands, but rather a specific mode of communicating them—providing rationale, minimizing arbitrary control, and framing feedback as developmental information. Training interventions targeting managers' motivational style have been empirically tested and represent one of the more direct implementation pathways for SDT in organizational settings (Hardré & Reeve, 2009).

Performance appraisal and reward architecture: minimizing control, maximizing developmental information. Experimental evidence suggests that contingent rewards carry a risk of undermining intrinsic motivation when experienced as controlling; at the same time, broader performance research indicates that incentives and intrinsic motivation may jointly predict performance (Deci et al., 1999; Cerasoli et al., 2014). From an SDT standpoint, this requires designing evaluation systems that: (a) strengthen competence perceptions (clear standards, high-quality feedback), (b) limit autonomy-thwarting pressure (avoid humiliating comparisons and excessive micromanagement), and (c) support internalization (integrating meaning- and quality-oriented goals alongside numerical targets) (Gagné & Deci, 2005; Van den Broeck et al., 2021).

Job design: autonomy + structure + learning + relationships. Meta-analyses in the work design literature demonstrate that motivational and social job characteristics are associated with employee attitudes and behaviors, offering organizations structural levers that operate beyond individual differences (Humphrey et al., 2007; Morgeson & Humphrey, 2006). Within the SDT

framework, particularly critical elements include autonomy in task execution, informational feedback and opportunities for competence development, as well as relational conditions that foster collaboration and support (Van den Broeck et al., 2016).

Evaluating implementation effectiveness: the need for triangulation. SDT-aligned organizational interventions carry a risk of measurement bias, especially when evaluation relies solely on self-report data. Classical methodological recommendations emphasize reducing common method bias by incorporating multiple data sources (employee, supervisor, objective indicators) and temporally separating measurements (Podsakoff et al., 2003). From a methodological rigor perspective, this implies designing multi-source and longitudinal research strategies (Conway & Lance, 2010). In practice, the effects of need-supportive interventions should be assessed in parallel using well-being indicators, attitudinal measures (e.g., satisfaction, engagement), and performance metrics (e.g., quality, timeliness, error rates, retention), with attention to job specificity and level of analysis (individual vs. team).

Conclusions

The integrative Self-Determination Theory perspective presented in this article shifts the emphasis from individual motivational differences to the structural and relational properties of organizations that systematically shape experiences of autonomy, competence, and relatedness. The most robustly documented environmental elements include autonomy-supportive leadership, job design that enables experiences of competence and meaning, and performance appraisal and reward systems that do not reduce motivation to pressure and control (Ryan & Deci, 2000; Slemp et al., 2018; Van den Broeck et al., 2016). Effectiveness thus emerges as an indirect outcome—mediated by the quality of motivational regulation.

Such an approach implies a redefinition of effectiveness as a dynamic construct, dependent on processes of internalization and self-regulation rather than solely on external performance indicators. Environments that support need satisfaction foster autonomous motivation, which is associated with greater sustainability of outcomes, adaptability, and lower psychological costs. Designing organizations in line with SDT may therefore be understood as a systemic optimization of motivational processes rather than merely a tool for behavioral control.

From an evidentiary standpoint, the growing body of meta-analyses testing process-based SDT models in the workplace confirms the mediating role of need satisfaction and motivational quality, while also highlighting the predominance of correlational research designs and context-dependent moderations (Hagger & McAnally, 2026). This underscores the need for more longitudinal and experimental research, as well as more advanced operationalizations of effectiveness, including objective indicators and multilevel modeling approaches.

Ultimately, the work environment should be conceptualized not as a neutral backdrop, but as an active regulatory mechanism of motivation, whose quality determines the simultaneous enhancement of performance and employee well-being.

References

1. Performance: The Meaning for Personnel Selection Research. Human Performance, 10(2), 99–109. https://doi.org/10.1207/s15327043hup1002_3
2. Campbell, J. P., & Wiernik, B. M. (2015). The Modeling and Assessment of Work Performance. Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior, 2(1), 47–74. https://doi.org/10.1146/annurev-orgpsych-032414-111427
3. Cerasoli, C. P., Nicklin, J. M., & Ford, M. T. (2014). Intrinsic motivation and extrinsic incentives jointly predict performance: A 40-year meta-analysis. Psychological Bulletin, 140(4), 980–1008. https://doi.org/10.1037/a0035661
4. Chen, B., Vansteenkiste, M., Beyers, W., Boone, L., Deci, E. L., Van Der Kaap-Deeder, J., Duriez, B., Lens, W., Matos, L., Mouratidis, A., Ryan, R. M., Sheldon, K. M., Soenens, B., Van Petegem, S., & Verstuyf, J. (2015). Basic psychological need satisfaction, need frustration, and need strength across four cultures. Motivation and Emotion, 39(2), 216–236. https://doi.org/10.1007/s11031-014-9450-1
5. Conway, J. M., & Lance, C. E. (2010). What Reviewers Should Expect from Authors Regarding Common Method Bias in Organizational Research. Journal of Business and Psychology, 25(3), 325–334. https://doi.org/10.1007/s10869-010-9181-6
6. Deci, E. L., Connell, J. P., & Ryan, R. M. (1989). Self-determination in a work organization. Journal of Applied Psychology, 74(4), 580–590. https://doi.org/10.1037/0021-9010.74.4.580
7. Deci, E. L., Koestner, R., & Ryan, R. M. (1999). A meta-analytic review of experiments examining the effects of extrinsic rewards on intrinsic motivation. Psychological Bulletin, 125(6), 627–668. https://doi.org/10.1037/0033-2909.125.6.627
8. Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The 'What' and 'Why' of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior. Psychological Inquiry, 11(4), 227–268. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01
9. Gagné, M., & Deci, E. L. (2005). Self-determination theory and work motivation. Journal of Organizational Behavior, 26(4), 331–362. https://doi.org/10.1002/job.322
10. Grant, A. M., & Parker, S. K. (2009). 7 Redesigning Work Design Theories: The Rise of Relational and Proactive Perspectives. Academy of Management Annals, 3(1), 317–375. https://doi.org/10.5465/19416520903047327
11. Hackman, J. R., & Oldham, G. R. (1976). Motivation through the design of work: Test of a theory. Organizational Behavior and Human Performance, 16(2), 250–279. https://doi.org/10.1016/0030-5073(76)90016-7

12. Hagger, M. S., & McAnally Star, K. (2026). Self-Determination Theory and Workplace Outcomes: A Meta-Analysis. Stress and Health, 42(1), e70151. https://doi.org/10.1002/smi.70151
13. Hardré, P. L., & Reeve, J. (2009). Training corporate managers to adopt a more autonomy-supportive motivating style toward employees: An intervention study. International Journal of Training and Development, 13(3), 165–184. https://doi.org/10.1111/j.1468-2419.2009.00325.x
14. Humphrey, S. E., Nahrgang, J. D., & Morgeson, F. P. (2007). Integrating motivational, social, and contextual work design features: A meta-analytic summary and theoretical extension of the work design literature. Journal of Applied Psychology, 92(5), 1332–1356. https://doi.org/10.1037/0021-9010.92.5.1332
15. Kanfer, R., Chen, G., & Pritchard, R. D. (Eds). (2008). Work Motivation (0 edn). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203809501
16. Morgeson, F. P., & Humphrey, S. E. (2006). The Work Design Questionnaire (WDQ): Developing and validating a comprehensive measure for assessing job design and the nature of work. Journal of Applied Psychology, 91(6), 1321–1339. https://doi.org/10.1037/0021-9010.91.6.1321
17. Olafsen, A. H., Niemiec, C. P., Halvari, H., Deci, E. L., & Williams, G. C. (2017). On the dark side of work: A longitudinal analysis using self-determination theory. European Journal of Work and Organizational Psychology, 26(2), 275–285. https://doi.org/10.1080/1359432X.2016.1257611
18. Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J.-Y., & Podsakoff, N. P. (2003). Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. Journal of Applied Psychology, 88(5), 879–903. https://doi.org/10.1037/0021-9010.88.5.879
19. Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. American Psychologist, 55(1), 68–78. https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68
20. Sarmah, P., Van Den Broeck, A., Schreurs, B., Proost, K., & Germeys, F. (2022). Autonomy supportive and controlling leadership as antecedents of work design and employee well-being. BRQ Business Research Quarterly, 25(1), 44–61. https://doi.org/10.1177/23409444211054508
21. Slemp, G. R., Field, J. G., Ryan, R. M., Forner, V. W., Van Den Broeck, A., & Lewis, K. J. (2024). Interpersonal supports for basic psychological needs and their relations with motivation, well-being, and performance: A meta-analysis. Journal of Personality and Social Psychology, 127(5), 1012–1037. https://doi.org/10.1037/pspi0000459
22. Slemp, G. R., Kern, M. L., Patrick, K. J., & Ryan, R. M. (2018). Leader autonomy support in the workplace: A meta-analytic review. Motivation and Emotion, 42(5), 706–724. https://doi.org/10.1007/s11031-018-9698-y

23. Van Den Broeck, A., Ferris, D. L., Chang, C.-H., & Rosen, C. C. (2016). A Review of Self-Determination Theory's Basic Psychological Needs at Work. Journal of Management, 42(5), 1195–1229. https://doi.org/10.1177/0149206316632058
24. Van Den Broeck, A., Howard, J. L., Van Vaerenbergh, Y., Leroy, H., & Gagné, M. (2021). Beyond intrinsic and extrinsic motivation: A meta-analysis on self-determination theory's multidimensional conceptualization of work motivation. Organizational Psychology Review, 11(3), 240–273. https://doi.org/10.1177/20413866211006173
25. Vancouver, J. B., & Purl, J. D. (2017). A computational model of self-efficacy's various effects on performance: Moving the debate forward. Journal of Applied Psychology, 102(4), 599–616. https://doi.org/10.1037/apl0000177
26. Vansteenkiste, M., Ryan, R. M., & Soenens, B. (2020). Basic psychological need theory: Advancements, critical themes, and future directions. Motivation and Emotion, 44(1), 1–31. https://doi.org/10.1007/s11031-019-09818-1
27. Zhang, Y., Waldman, D. A., Han, Y.-L., & Li, X.-B. (2015). Paradoxical Leader Behaviors in People Management: Antecedents and Consequences. Academy of Management Journal, 58(2), 538–566. https://doi.org/10.5465/amj.2012.0995

USING TAKT TIME, CYCLE TIME, PROCESS TIME AND LTAI FOR CONTINUOUS IMPROVEMENT OF PRODUCTION PROCESSES

Christ Lekuma LEBY[1]

[1] Faculty of Management, Czestochowa University of Technology, Czestochowa; Student Scientific Club "Promoter of Quality and Safety", christlebylekuma@gmail.com

* Korespondencja: christlebylekuma@gmail.com

Abstract: This paper provides an analysis of these three indicators: Takt Time, Cycle Time, and Process Time, highlighting their differences, complementarities, and managerial implications. Through different case studies drawn from manufacturing, fast-food services, administrative processes, and the healthcare sector, the study illustrates how misalignment between these indices leads to inefficiencies, delays, overproduction, and waste. Beyond this analysis, the paper introduces the Lean Time Alignment Index (LTAI), a synthetic performance indicator designed to integrate synchronization with demand and internal efficiency into a single metric. The LTAI enables a more holistic assessment of process performance and supports managerial decision-making within Lean and continuous improvement frameworks. The findings confirm that the combined and integrated use of Takt Time, Cycle Time, and Process Time constitutes a powerful lever for improving operational performance, reducing waste, and enhancing customer satisfaction. The study contributes both theoretically, by clarifying key Lean concepts, and practically, by proposing an operational tool for performance monitoring and continuous improvement.

Keywords: Takt Time, Cycle Time, Process Time, Lean management, performance measurement, continuous improvement.

WYKORZYSTANIE CZASU TAKTU, CZASU CYKLU, CZASU PRZETWARZANIA I LTAI W CELU CIĄGŁEGO DOSKONALENIA PROCESÓW PRODUKCYJNYCH

Abstract: Niniejszy artykuł przedstawia analizę trzech wskaźników: Czasu Taktu, Czasu Cyklu i Czasu Przetwarzania, podkreślając ich różnice, uzupełnianie się oraz skutki zarządcze. Poprzez studia przypadków zaczerpnięte z sektora produkcyjnego, usług fast-food, procesów administracyjnych i opieki zdrowotnej, badanie przedstawia, jak rozbieżność między tymi

czasami prowadzi do nieefektywności, opóźnień, nadprodukcji i marnotrawstwa. Poza tą analizą, artykuł wprowadza Wskaźnik Dostosowania Czasu Lean (LTAI), syntetyczny wskaźnik efektywności, zaprojektowany w celu zintegrowania synchronizacji z popytem i efektywności wewnętrznej w jedną metrykę. LTAI umożliwia bardziej całościową ocenę efektywności procesów i wspiera podejmowanie decyzji zarządczych w ramach koncepcji Lean i ciągłego doskonalenia. Wyniki potwierdzają, że połączone i zintegrowane wykorzystanie Czasu Taktu, Czasu Cyklu i Czasu Przetwarzania stanowi ważny czynnik poprawy wydajności operacyjnej, redukcji marnotrawstwa i zwiększenia satysfakcji klienta. Wartością dodaną niniejszego badania jest propozycja wskaźnika LTAI do monitorowania wydajności i ciągłego doskonalenia.

Słowa kluczowe: Czasu Taktu, Czasu Cyklu, Czasu Przetwarzania, Lean Management, pomiar wydajności, ciągłe doskonalenie.

Introduction

In today's globalized and highly competitive industrial environment, organizations face unprecedented pressure to deliver high-quality products and services while responding quickly to fluctuating customer demands. Customers increasingly expect not only timely delivery but also customizable solutions tailored to their specific needs (Slack, Chambers, & Johnston, 2010; Christopher, 2016). Simultaneously, companies operate under cost constraints, requiring them to optimize resources and reduce waste without compromising quality (Dennis, 2016; George, 2002). In such a context, the ability to understand, measure, and improve production processes is a critical determinant of operational performance and overall competitiveness. Structured performance measurement systems, particularly time-based indicators, enable managers to analyze flow efficiency, identify bottlenecks, and enhance the value delivered to customers (Bititci, Carrie, & McDevitt, 1997; Bourne et al., 2002).

Among these metrics, Takt Time (TT), Cycle Time (CT), and Process Time (PT) have emerged as core indicators within Lean Manufacturing and continuous improvement frameworks (Ohno, 1988; Liker, 2004; Rother & Shook, 2003). Takt Time, derived from the German term "Takt," meaning rhythm or beat, establishes the production pace required to meet customer demand. It acts as a metronome for the production system, setting a target against which all operations can be synchronized (Hopp & Spearman, 2011; Dennis, 2016). Misalignment of production pace with Takt Time can lead to overproduction, excess inventory, and waste, or conversely, underproduction and delivery delays, negatively affecting customer satisfaction and profitability (Hines, Holweg, & Rich, 2004; Womack & Jones, 2003). Takt Time provides a critical planning and control tool that guides workforce allocation, workstation

design, and process sequencing in alignment with real demand (Shah & Ward, 2007; Modig & Åhlström, 2015).

Cycle Time measures the actual time required to complete a unit, including both value-added and non-value-added activities (Shah & Ward, 2007; Bicheno & Holweg, 2016). Unlike Takt Time, which is theoretical, Cycle Time is measured empirically through observation or digital sensors (Melnyk, Stewart, & Swink, 2004; Graban, 2018). Comparing Cycle Time against Takt Time highlights process inefficiencies and bottlenecks, allowing organizations to implement corrective actions such as line balancing, workload redistribution, or task automation (Hopp & Spearman, 2011; Black, 2007). For instance, in electronics assembly, identifying stations with excessive Cycle Time enables targeted interventions to prevent delays and align production with demand (Ohno, 1988; Liker, 2004).

Process Time captures only the time devoted to value-added activities the transformations that create customer-recognized value excluding waiting, travel, and inspections (Bicheno & Holweg, 2016; Dennis, 2016). Evaluating the ratio of Process Time to Cycle Time provides insight into process efficiency, identifying opportunities to eliminate waste and enhance productivity (Rother & Shook, 2003; Graban, 2018). A high proportion of Process Time relative to Cycle Time reflects an efficient process, while a low proportion signals significant non-value-added activities that reduce operational efficiency (Shah & Ward, 2007; Imai, 2012). In service industries such as healthcare or fast-food, monitoring Process Time ensures resources are focused on core activities, improving service quality and customer satisfaction (Graban, 2018; George, 2002).

The combined use of Takt Time, Cycle Time, and Process Time is central to Lean continuous improvement initiatives (Ohno, 1988; Womack & Jones, 2003). While each metric provides valuable insights individually, analyzing them in isolation can be misleading. A Cycle Time aligned with Takt Time may still mask inefficiencies if the proportion of non-value-added work is high, while high Process Time with poor alignment to Takt Time may indicate that operations are inefficiently sequenced relative to demand (Slack et al., 2010; Shah & Ward, 2007; Hines et al., 2004). Integrated interpretation enables organizations to balance responsiveness, efficiency, and value creation, ensuring optimal operational performance and customer satisfaction (Bicheno & Holweg, 2016; Modig & Åhlström, 2015).

To support decision-making further, the Lean Time Alignment Index (LTAI) was introduced as a synthetic metric integrating TT, CT, and PT into a single measure of alignment and efficiency (Christ Lekuma Leby & Knop, 2024). The LTAI captures both the synchronization of actual production pace with customer-driven Takt Time and the proportion of value-added activities within the process. This index complements other metrics such as Lead Time, which reflects the total elapsed time from order placement to delivery, offering a holistic view of both internal process efficiency and customer responsiveness (Melnyk et al.,

2004; Hopp & Spearman, 2011). Applying LTAI and Lead Time together enables continuous improvement methods such as DMAIC and PDCA cycles to be more effectively implemented, highlighting priority areas and monitoring progress over time (Imai, 2012; Modig & Åhlström, 2015).

The practical significance of these indicators spans multiple industries. In automotive production, aligning workstations with Takt Time ensures vehicles are completed on schedule while minimizing inventory buildup (Ohno, 1988; Liker, 2004). In electronics assembly, evaluating Cycle Time helps identify bottlenecks and allocate resources more efficiently (Shah & Ward, 2007; Black, 2007). In fast-food operations, Process Time monitoring focuses staff efforts on value-adding activities like meal preparation and packaging, enhancing throughput and customer satisfaction (Graban, 2018; Dennis, 2016). In healthcare, balancing Takt Time and Cycle Time improves patient flow without compromising care quality (Slack et al., 2010; Graban, 2018). Across sectors, these indicators enable early detection of inefficiencies, optimization of workflows, and reduction of operational waste, contributing directly to cost savings, performance improvement, and customer satisfaction (George, 2002; Womack & Jones, 2003; Christopher, 2016).

Beyond operational efficiency, TT, CT, and PT provide a strategic management toolset. They guide workforce planning, support decisions on automation and investment, and inform standardization and training programs (Kaplan & Norton, 1996; Melnyk et al., 2004). By providing measurable and actionable insights into production dynamics, these metrics empower managers to implement targeted improvements, monitor outcomes, and align operations with strategic objectives (Bendell, 2006; Antony & Banuelas, 2002). They transform operational data into strategic intelligence, linking process performance to customer value and organizational success (Slack et al., 2010; Christopher, 2016).

Takt Time, Cycle Time, and Process Time are essential for analyzing, controlling, and improving production and service processes. When combined with synthetic metrics such as LTAI and complementary measures like Lead Time, they create a robust framework for continuous improvement, operational excellence, and sustainable competitive advantage (Ohno, 1988; Bicheno & Holweg, 2016; Modig & Åhlström, 2015). Embedding these indicators within Lean and continuous improvement frameworks allows organizations to enhance synchronization with demand, reduce waste, improve efficiency, and deliver higher customer value consistently (Shah & Ward, 2007; Graban, 2018; Hines et al., 2004).

The objective of this article is twofold. First, it aims to clarify the theoretical foundations, definitions, and calculation methods of Takt Time, Cycle Time, and Process Time. Second, it illustrates their practical application through numerical examples and case studies drawn from manufacturing, fast-food services, administrative processes, and the hospital sector. This analysis is embedded in the logic of Lean Management and continuous improvement, which

emphasizes the pursuit of flow, waste elimination, and customer value as key drivers of organizational competitiveness.

Theoretical background

The term Takt comes from the German language and means “rhythm” or “beat.” In Lean logic, Takt Time (TT) represents the maximum time a company has to produce a unit in order to accurately meet customer demand (Ohno, 1988; Liker, 2004; Womack & Jones, 2003). It functions as a production metronome: producing too slowly causes delays, while producing too quickly generates unnecessary inventory and overproduction (Hopp & Spearman, 2011; Dennis, 2016).

$$Takt\ Time = \frac{Available\ production\ time}{Customer\ demand} \quad (1)$$

Legend:

- Available Production Time: Net work period after subtracting breaks, maintenance, and downtime (Slack et al., 2010; Modig & Åhlström, 2015).
- Customer Demand: Quantity to be produced over the same period (Christopher, 2016; Shah & Ward, 2007).

Cycle time (CT) measures the actual time required to produce a unit, including both value-added (VA) and non-value-added (NVA) activities, such as waiting, inspections, or transport (Shah & Ward, 2007; Melnyk et al., 2004). Unlike *Takt Time*, which is theoretical, *Cycle Time* is measured empirically (Graban, 2018; Hopp & Spearman, 2011):

$$Cycle\ Time = \frac{Total\ observed\ time}{Number\ of\ units\ produced} \quad (2)$$

Legend:

- Total observed time: the cumulative time during which the process is actively producing units, including all operations, inspections, transport, and waiting periods.
- Number of units produced: the total count of completed units observed during the measurement period.

Process Time (PT) represents the duration of activities strictly contributing to value creation (VA) and excludes non-value-added steps (Rother & Shook, 2003; Dennis, 2016).

Fundamental relationship:

$$Cycle\ Time = Process\ Time\ (Value\ Added) + Time\ NVA\ (Non\text{-}Value\ Added) \quad (3)$$

The relationship between Cycle Time, Takt Time and Process Time is shown in Figure 1.

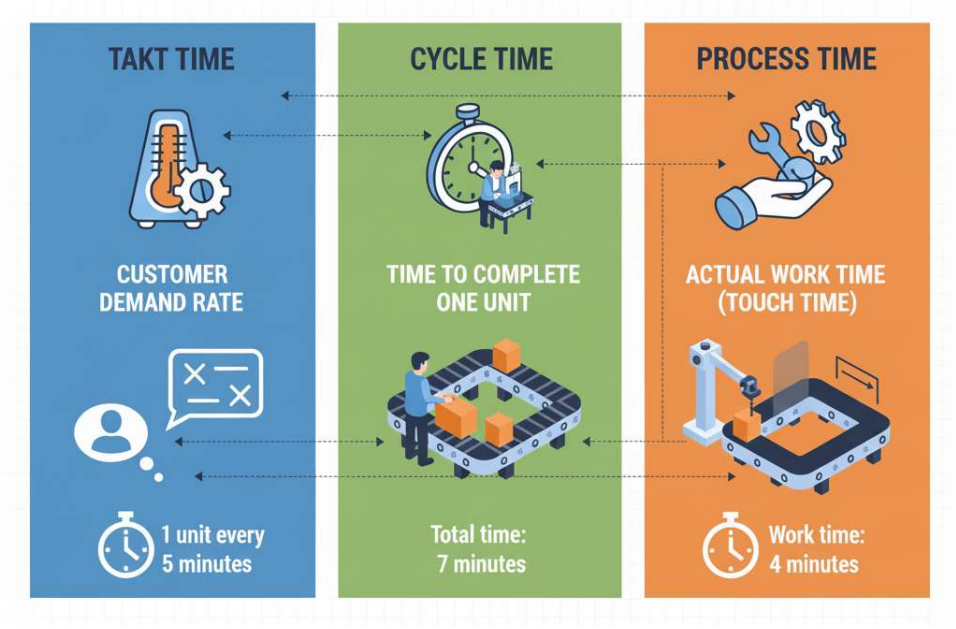


Fig. 1. The relationship between Cycle Time, Takt Time and Process Time
Source: own study

By measuring the proportion of Process Time to Cycle Time, organizations can assess process efficiency and identify waste (Ohno, 1988; Bicheno & Holweg, 2016). A high ratio indicates a lean and efficient process, whereas a low ratio suggests the presence of non-value-added activities requiring improvement (Imai, 2012; George, 2002).

Lead Time (LT) represents the total time elapsed from the initiation of an order to its delivery (Slack et al., 2010; Christopher, 2016). Unlike Takt Time, Cycle Time, and Process Time, Lead Time focuses on the customer perspective, encompassing all internal and external delays. It is calculated as:

Lead Time=Waiting Time + Processing Time + Transport Time + Inspection Time

Table 1.
Comparison between Takt Time, Cycle Time, Process Time (Value-Added Time) and Lead Time

Indicator	Definition	Formula	Purpose	Key Focus
Takt Time	Customer-driven production rhythm	TT = Available time / Demand	Align production with demand	Synchronization
Cycle Time	Actual time per unit (VA + NVA)	CT = Total observed time / Units produced	Measure real process speed	Bottleneck identification
Process Time	Time spent on value-added work	PT = sum of VA activities	Measure efficiency	Waste reduction
Lead Time	Total time from order to delivery	LT = Waiting + Processing + Transport + Inspection	Evaluate responsiveness	Customer perspective

The evaluation of a productive process using Takt Time, Cycle Time, and Process Time is based on a structured approach carried out in several steps. This methodology applies both to industry and services, and can be adapted to various contexts (hospital, catering, administration, logistics). It consists of 4 steps: 1. Takt Time Determination, 2. Cycle Time Measurement, 3. Process Time Identification, 4. Gap Analysis.

The first step consists in defining the pace imposed by customer demand. To do this, Takt Time is calculated from the net available working time and the customer demand.

- Key step: subtract planned downtime (breaks, maintenance, meetings) in order to obtain the actual available time.
- Expected result: a clear target, expressed in minutes or seconds per unit.

The second step consists in timing the actual process.

- Tools: direct observations, manual timing, automated sensors.
- Sampling: measure several cycles to obtain a representative average.
- Expected result: identify whether the actual pace is higher, equal to, or lower than the Takt Time.

The third step consists in distinguishing, within the observed cycle, what contributes to value-added and what does not.

- Method: value stream mapping (VSM), field observation, interviews with operators.

- Expected result: calculation of the percentage of value-added (VA/NVA) (Bicheno & Holweg, 2016).

Once the three times have been determined, it becomes possible to analyze the gaps:

- Cycle Time > Takt Time: capacity is insufficient → risk of delay.
- Cycle Time < Takt Time: overproduction → waste.
- Process Time ≪ Cycle Time: inefficient process, high presence of waste (Shah & Ward, 2007; Bicheno & Holweg, 2016).

The analysis of the four case studies reveals a common pattern: organizations often struggle to align their Cycle Time with the Takt Time. This gap, whether in excess or deficit, indicates either an overload of capacity or unnecessary overproduction.

- Cycle Time > Takt Time → risk of delays, queues, and customer dissatisfaction (Graban, 2018);
- Cycle Time < Takt Time → risk of overproduction, unnecessary storage, and waste of resources (Ohno, 1988; Liker, 2004).

Moreover, the difference between Cycle Time and Process Time highlights the significance of waste (muda), whether in the form of waiting times, movements, rework, or redundant administrative tasks (Rother & Shook, 2003; George, 2002). In industry, poor alignment can cause costly delivery delays and impact customer satisfaction. In catering, it leads to a decrease in perceived quality (excessive waiting times) and a loss of revenue. In healthcare, it directly affects the quality of care and patient safety. In administrative services, it results in delays in decision-making and user dissatisfaction.

To optimize the Cycle Time, Takt Time and Process Time it can be used different Lean methods (Imai, 2012; Bicheno & Holweg, 2016):

a) Reduce cycle time

In this aspect, it is possible to: standardize work methods, introduce pull workflows, and automate repetitive tasks (Dennis, 2016; Modig & Åhlström, 2015).

b) Maximize processing time (value-added time)

To do this: eliminate waste (waiting, unnecessary travel), digitize information flows, and reorganize workstations (5S method) (Ohno, 1988; Rother & Shook, 2003).

c) Adapt takt time

By: implementing line balancing, training operators to be versatile, and allocating resources based on the actual workload (Shah & Ward, 2007; Liker, 2004).

Lean effectiveness is measured by the ability to bring Cycle Time closer to Takt Time, and to maximize the proportion of Process Time (Bicheno & Holweg, 2016).

The indicators studied should not be considered in isolation but as complementary tools within a broader approach. In a Lean Six Sigma project, for example, their monitoring can support:

- The Measure phase (performance measurement).
- The Analyze phase (gap analysis and identification of root causes).
- The Improve phase (implementation of solutions to reduce the gap) (Imai, 2012; Dennis, 2016).

The goal is to transform these production times into strategic management indicators, guiding investments, human resource management, and organizational innovation.

Results

Various case studies were presented below to show how to calculate the three indicators: Takt Time, Cycle Time and Process Time.

Case-study 1: In an automotive company, production management seeks to align the production rate with actual customer demand. The net time available for production is set at 400 minutes per day, while the daily customer demand amounts to 200 vehicles.

$$Takt\ Time = \frac{400}{200} = 2\ minutes/unit$$

The factory must produce a car every 2 minutes.

Case-study 2: In a healthcare service, resource planning is based on balancing available time with patient demand. Let's assume that the net time available for care is 1200 minutes per day, and that the daily demand corresponds to 20 patients.

$$Takt\ Time = \frac{1200}{20} = 60\ minutes/Patient$$

In this case, each patient must be treated within one hour to meet the daily load.

Case-study 3: In an electronics assembly shop, production efficiency is measured by the time taken to complete a unit. During one observation, the total production time recorded was 200 minutes, and the quantity produced was 80 electronic cards.

$$Cycle\ Time = \frac{200}{80} = 2{,}5\ minutes/Unit$$

The process is slower than the target takt time of 2 minutes as a risk of delay.

Case-study 4: In a fast-food restaurant, the preparation times of ten orders were observed. The recorded times were as follows: 2.8; 3.0; 3.2; 2.7; 3.1; 3.0; 2.9; 2.8; 3.3; 3.0 minutes.

Mean Cycle Time: 2,9 minutes

If the target Takt Time is 2.8 minutes, the actual cycle time slightly exceeds the required rate.

Case-study 5: In the manufacturing of a metal part, the process involves several steps. Cutting the part takes 3 minutes and is a value-added (VA) activity. Drilling takes 2 minutes and is also a value-added activity. Then, the part undergoes a waiting period of 1.5 minutes, which is considered a non-value-added (NVA) activity. Finally, a quality control check is performed for 1.5 minutes, which is also a non-value-added activity.

Process Time = 3+2=5 minutes

Out of a total Cycle Time of 8 minutes, only 5 are value added efficiency VA = 62.5%.

Case-study 6: In preparing an artisan pizza, the process begins with preparation and topping, which takes 5 minutes and represents a value-added (VA) activity. Then, the pizza is baked for 7 minutes, which is also a value-added activity. After baking, there is a 2-minute waiting period before packaging, which is considered a non-value-added (NVA) activity. Finally, pizza packaging takes 1 minute and is a value-added activity.

Process Time = 5+7+1 = 13 minutes

Of the 15 minutes required to produce the pizza, the total value-added (VA) time is 13 minutes, which represents 86.7% of the total time, while the non-value-added (NVA) time is 2 minutes, which represents 13.3% of the total time.

While Takt Time, Cycle Time, and Process Time are powerful indicators individually, managers often face difficulties when interpreting them simultaneously, especially when they send mixed signals. For instance, a process may be well aligned with customer demand (Cycle Time close to Takt Time) but still inefficient due to a high proportion of non-value-added activities. Conversely, a process may exhibit a high value-added ratio but remain poorly synchronized with demand.

Therefore, there is a need for both a synthetic indicator capable of integrating dimensions into a single, easy-to-interpret measure. The Lean Time Alignment Index (LTAI) is proposed to fill this gap. It combines the degree of synchronization with customer demand and the internal

efficiency of the process into one metric, thus supporting managerial decision-making in Lean and continuous improvement initiatives.

The Lean Time Alignment Index (LTAI) is defined as:

$$LTAI = \left(1 - \frac{|CT - TT|}{TT}\right) \times \frac{PT}{CT} \tag{3}$$

where:

- TT = Takt Time,
- CT = Cycle Time,
- PT = Process Time (value-added time).

The LTAI is composed of two multiplicative terms:

- Synchronization term: $1 - \frac{|CT - TT|}{TT}$, which measures the deviation of the actual production rhythm from the required customer-driven rhythm.
- Efficiency term: $\frac{PT}{CT}$, which measures the proportion of value-added activities in the process.

The index is bounded between 0 and 1. LTAI close to 1 means that the process is well synchronized with customer demand (CT ≈ TT) and is highly efficient (a high proportion of cycle time is spent on value-added activities). LTAI close to 0 means that the process is either misaligned with customer demand (CT ≠ TT), or it has a low proportion of value-added time relative to the total cycle time, meaning it's less efficient. So, when LTAI is close to 1, it indicates that the process is both responsive to demand (aligned with takt time) and efficient in terms of producing value (high PT relative to CT).

The index can be interpreted as follows (Table 2):

Table 2.
LATI range and interpretation

LTAI range	Interpretation
0.90 – 1.00	Highly aligned and efficient process (Lean mature)
0.75 – 0.89	Acceptable alignment, improvement possible
0.60 – 0.74	Significant misalignment, corrective actions needed
< 0.60	Poorly aligned and inefficient process

Source: own study

Case-study 7: In a fast-food restaurant, the pace required by customer demand is equivalent to a Takt Time of 2.8 minutes per order. However, measurements on the shop floor show that the actual Cycle Time is slightly higher, reaching 2.9 minutes, while the Process Time strictly devoted to value creation (preparation and assembly of meals) is estimated at 2.5 minutes.

$$LTAI = \left(1 - \frac{|2.9 - 2.8|}{2.8}\right) \times \frac{2.5}{2.9}$$

$$LTAI = (1\text{-}0.036) \times 0.862 = 0.964 \times 0.862 = 0.83$$

This result indicates a relatively well-aligned process, but with room for improvement in reducing minor delays and non-value-added activities.

Case-study 8: In an industrial manufacturing environment, the customer demand defines a Takt Time of 6 minutes per unit. However, on-site measurements indicate that the actual Cycle Time reaches 8 minutes per unit, while the Process Time strictly devoted to value-added transformation activities is limited to 5 minutes.

$$LTAI = \left(1 - \frac{|8 - 6|}{6}\right) \times \frac{5}{8}$$

$$LTAI = (1\text{-}0.333) \times 0.625 = 0.667 \times 0.625 = 0.42$$

This low value reflects a poorly aligned and inefficient process, indicating a priority area for Lean interventions.

Case-study 9: In an electronics assembly line, the production manager wants to both evaluate synchronization with demand and process efficiency using the Lean Time Alignment Index (LTAI).

- Net available production time: 480 minutes/day
- Customer demand: 160 units/day → Takt Time (TT) = 480/160 = 3 minutes/unit
- Observed Cycle Time (CT): 3.5 minutes/unit
- Value-added Process Time (PT): 2.8 minutes/unit

LTAI Calculation:

$$LTAI = \left(1 - \frac{|3.5 - 3|}{3}\right) \times \frac{2.8}{3.5}$$

$$LTAI = (1 - 0.1667) \times 0.8 = 0.83333 \times 0.8 = 0.6667$$

The Lean Time Alignment Index (LTAI) of 0.667 indicates a notable misalignment between the actual process and customer demand, accompanied by only moderate efficiency. This value highlights that the cycle time exceeds the takt time, suggesting that the process is slower than required to meet demand, and that there is a significant opportunity to reduce non-value-added activities. To improve performance, several actions can be recommended. First, reorganizing workstations can help minimize unnecessary movements and handling times, thereby

streamlining the workflow. Second, standardizing repetitive tasks can reduce variability in cycle times and ensure a more predictable and consistent production rhythm. Finally, implementing cross-training for operators allows for more flexible allocation of resources, balancing workload across the team and ensuring that bottlenecks are minimized. Collectively, these measures aim to bring the cycle time closer to the takt time while maximizing the proportion of value-added activities, ultimately improving both efficiency and process alignment.

Case-study 10: Preparing burgers in a fast-food outlet.

- Net available time per shift: 480 minutes
- Customer demand: 160 burgers → Takt Time (TT) = 480/160 = 3 minutes/burger

Observed preparation times for 10 burgers (minutes): 3.1, 2.9, 3.0, 3.2, 3.0, 2.8, 3.1, 3.0, 2.9, and 3.2.

Calculation:

1. Cycle Time (CT) : average of observed times:

$$\text{CT} = \frac{3.1 + 2.9 + 3.0 + 3.2 + 3.0 + 2.8 + 3.1 + 3.0 + 2.9 + 3.2}{10} = 3.02 \text{ minutes/ Unit}$$

2. Process Time (PT) : sum of value-added activities (preparation and assembly only):

- Preparation = 1.5 min
- Cooking = 1.0 min
- Assembly and Packaging = 0.4 min
- Total PT = 2.9 min

3. Non-value-added time (NVA): waiting, delays, or movement = CT – PT = 3.02 – 2.9 = 0.12 min.

4. $LTAI = \left(1 - \frac{|CT - TT|}{TT}\right) \times \frac{PT}{CT} \Rightarrow LTAI = \left(1 - \frac{|3.02 - 3|}{3}\right) \times \frac{2.9}{3.02}$

$$\text{LTAI} = (1 - 0.0067) \times 0.9603$$
$$= 0.9933 \times 0.9603$$
$$\approx 0.953$$

An LTAI value of approximately 0.95 reflects a highly aligned and efficient process, indicating that the operation is very well synchronized with customer demand and that the majority of the cycle time is devoted to value-added activities. This strong alignment suggests that the process flow is stable, balanced, and capable of meeting demand without generating significant waste or delays. The minimal gap between takt time and cycle time demonstrates

effective workload distribution and good operational control. Nevertheless, even in such a high-performing process, minor improvements remain possible. Small, targeted actions such as optimizing ingredient placement, refining workstation layout, or reducing micro-delays between tasks can further streamline operations, eliminate residual inefficiencies, and help sustain long-term performance excellence.

The LTAI offers several advantages for operational and strategic management:

- It provides a single synthetic measure to monitor the overall health of a process;
- It facilitates the prioritization of improvement actions by identifying processes with the lowest alignment scores;
- It supports continuous improvement cycles (DMAIC, PDCA) by enabling before-and-after comparisons;
- It helps managers balance customer orientation (Takt Time) and internal efficiency (Process Time);
- It can be used as a Key Performance Indicator (KPI) in Lean dashboards.

The role of Takt Time, Cycle Time, Process Time, and Lean Time Adjustment Index (LTAI) in continuous improvement of manufacturing processes is presented in Table 1.

Table 3.
Role of Takt Time, Cycle Time, Process Time, and the Lean Time Alignment Index (LTAI) for continuous improvement of production processes

Metric	Role in Continuous Improvement	Impact on Performance
Takt Time	Defines the production rhythm required to meet customer demand and serves as a reference for capacity planning and workload balancing.	Prevents overproduction and underproduction, improves demand responsiveness, and supports stable flow.
Cycle Time	Measures the actual time required to complete one unit and helps identify bottlenecks, variability, and inefficiencies in the process.	Directly affects throughput, delivery reliability, and customer satisfaction.
Process Time (Value-Added Time)	Identifies activities that directly create value for the customer and supports waste elimination initiatives.	Increases operational efficiency, reduces non-value-added activities, and improves cost and quality performance.

Metric	Role in Continuous Improvement	Impact on Performance
Lean Time Alignment Index (LTAI)	Integrates Takt Time, Cycle Time, and Process Time into a single synthetic indicator to assess alignment with demand and process efficiency.	Enables rapid diagnosis of misalignment, supports decision-making, and guides targeted continuous improvement actions.

Source : own study

Together, Takt Time, Cycle Time, Process Time, and the Lean Time Alignment Index (LTAI) provide a comprehensive framework for continuously improving production processes. By focusing on the alignment and optimization of these metrics, businesses can achieve better synchronization with demand, reduce waste, enhance operational efficiency, and ultimately improve customer satisfaction. The LTAI serves as a tool to integrate these different time measures into a unified performance indicator, simplifying decision-making and guiding improvement efforts.

Conclusion

This article examines the role of Takt Time, Cycle Time, and Process Time as fundamental indicators for understanding, controlling, and improving industrial and service processes. While these three metrics are often treated separately, the analysis has shown that their combined use provides a richer and more operational understanding of flow dynamics, capacity constraints, and value creation.

Through theoretical clarification and empirical illustrations drawn from manufacturing, fast-food services, administrative activities, and healthcare, the study demonstrated that misalignment between Cycle Time and Takt Time leads either to delays and customer dissatisfaction or to overproduction and waste. Moreover, the gap between Cycle Time and Process Time highlights the presence of non-value-added activities, which constitute a major source of inefficiency in many organizations.

Beyond this analytical contribution, the paper introduced the Lean Time Alignment Index (LTAI) as a synthetic performance indicator integrating synchronization with demand and internal efficiency into a single metric. The LTAI enables managers to move from a descriptive analysis of operational times to a more strategic and actionable form of performance

management. By providing a clear and intuitive measure of process alignment, it supports prioritization of improvement actions, monitoring of Lean initiatives, and continuous performance tracking.

The results confirm that mastering and aligning Takt Time, Cycle Time, and Process Time is not merely a technical issue but a strategic lever for competitiveness, quality, and customer satisfaction. Embedding these indicators within a Lean and continuous improvement framework allows organizations to reduce waste, improve responsiveness, and enhance operational stability.

Future research could extend this work by empirically validating the LTAI across different industries, and organizational sizes, by examining its relationship with financial performance, customer satisfaction, and employee engagement. Such developments would further strengthen the role of time-based indicators as key drivers of sustainable organizational performance.

Bibliography

1. Antony, J., & Banuelas, R. (2002). Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. *Measuring Business Excellence*, 6(4), 20–27.
2. Bendell, T. (2006). A review and comparison of Six Sigma and the Lean organisations. *The TQM Magazine*, 18(3), 255–262.
3. Bicheno, J., & Holweg, M. (2016). *The Lean Toolbox: A Handbook for Lean Transformation*. Buckingham: PICSIE Books.
4. Bititci, U., Carrie, A., & McDevitt, L. (1997). Integrated performance measurement systems: A development guide. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(5), 522–534.
5. Black, J. T. (2007). *Design Rules for Implementing the Toyota Production System*. International Journal of Production Research, 45(16), 3639–3664.
6. Bourne, M., Neely, A., Platts, K., & Mills, J. (2002). The success and failure of performance measurement initiatives. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(11), 1288–1310.
7. Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management*. Pearson UK.
8. Cusumano, M. A. (1994). The limits of "lean". *Sloan Management Review*, 35(4), 27–32.
9. Dennis, P. (2016). *Lean Production Simplified*. New York: CRC Press.
10. George, M. L. (2002). *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Production Speed*. New York: McGraw-Hill.
11. Graban, M. (2018). *Lean Hospitals: Improving Quality, Patient Safety, and Employee Engagement*. CRC Press.
12. Hines, P., Holweg, M., & Rich, N. (2004). Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations & Production Management*, 24(10), 994–1011.
13. Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory Physics* (3rd ed.). Waveland Press.Shah, R., & Ward, P. T. (2007). Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management*, 25(4), 785–805.
14. Imai, M. (2012). *Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy*. New York: McGraw-Hill.
15. Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. Harvard Business Press.

16. Liker, J. K. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York: McGraw-Hill.
17. Melnyk, S. A., Stewart, D. M., & Swink, M. (2004). Metrics and performance measurement in operations management: Dealing with the metrics maze. *Journal of Operations Management*, 22(3), 209–217.
18. Modig, N., & Åhlström, P. (2015). *This is Lean: Resolving the Efficiency Paradox*. Stockholm: Rheologica Publishing.
19. Neely, A., Gregory, M., & Platts, K. (1995). Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, 15(4), 80–116.
20. Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Portland, OR: Productivity Press.
21. Rother, M., & Shook, J. (2003). *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*. Brookline, MA: Lean Enterprise Institute.
22. Shah, R., & Ward, P. T. (2007). Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management*, 25(4), 785–805.
23. Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R. (2010). *Operations Management*. Pearson Education.
24. Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Free Press.

ZARZĄDZANIE JAKOŚCIĄ W ORGANIZACJACH POZORNIE EFEKTYWNYCH: MODEL DECYZYJNY OPARTY NA SYMULACJI ILUZJI KPI

mgr inż. Aleksandra BAJERSKA [1]

[1] Główny analityk; Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku; a.w.bajerska@gmail.com; identyfikator ORCID: 0009-0008-9553-3681

Streszczenie: Celem artykułu jest analiza zjawiska pozornej efektywności w organizacjach zarządzanych w oparciu o wskaźniki KPI oraz opracowanie koncepcyjnego modelu decyzyjnego umożliwiającego wyjaśnienie mechanizmu powstawania iluzji efektywności. W pracy przyjęto perspektywę zarządzania jakością, zakładając rozróżnienie pomiędzy rzeczywistą jakością procesów organizacyjnych, a jej formalnym odwzorowaniem w systemach pomiaru efektywności. Zastosowana metodologia ma charakter koncepcyjno-symulacyjny i opiera się na formalnym modelu relacji pomiędzy rzeczywistą jakością działań, wskaźnikami KPI oraz decyzjami menedżerskimi podejmowanymi na podstawie zniekształconej informacji. W artykule wykazano, że nadmierna orientacja decyzyjna na KPI prowadzi do systematycznej rozbieżności pomiędzy deklarowaną a faktyczną efektywnością organizacji. Model ujawnia mechanizm samowzmacniającej się iluzji KPI, w której wzrost wskaźników ogranicza interwencje korygujące i sprzyja utrwalaniu praktyk nastawionych na poprawę mierników, a nie rzeczywistej jakości procesów. Wyniki analizy wskazują, że integracja KPI z informacją jakościową, taką jak audyty, wiedza ekspercka czy informacje zwrotne, znacząco redukuje skalę iluzji efektywności oraz zwiększa trafność decyzji menedżerskich. Uzyskane rezultaty mają istotne implikacje teoretyczne i praktyczne. Z jednej strony rozwijają literaturę dotyczącą zarządzania jakością i wskaźnikami KPI, z drugiej wskazują na konieczność projektowania systemów decyzyjnych w sposób wielowymiarowy, uwzględniający zarówno wskaźniki ilościowe, jak i ocenę jakościową. Artykuł stanowi podstawę do dalszych badań empirycznych nad ograniczaniem pozornej efektywności w organizacjach.

Słowa kluczowe: zarządzanie jakością, organizacje pozornie efektywne, gaming KPI, pozorna efektywność, analiza wskaźnikowa

Abstract: The aim of this article is to analyze the phenomenon of apparent efficiency in organizations managed primarily through Key Performance Indicators (KPIs) and to develop a conceptual decision-making model that explains the mechanism underlying the illusion of efficiency. The study adopts a quality management perspective, explicitly distinguishing between the actual quality of organizational processes and their formal representation within performance measurement systems. The applied methodology is conceptual and simulation-based, relying on a formal model that captures the relationships between real process quality, KPI values, and managerial decisions made on the basis of distorted or incomplete information.

The article demonstrates that a strong decision-making orientation toward KPIs leads to a systematic divergence between declared and actual organizational performance. The model reveals a self-reinforcing mechanism of KPI illusion, whereby increasing KPI values reduce corrective interventions and encourage practices focused on improving indicators rather than enhancing real process quality. As a result, KPIs gradually lose their diagnostic value and become weakly correlated with the underlying quality they are intended to measure. The analysis further shows that the integration of KPIs with qualitative information—such as quality audits, expert judgment, and feedback from stakeholders—significantly reduces the scale of the efficiency illusion and improves the accuracy and stability of managerial decisions. The findings have important theoretical and practical implications. From a theoretical perspective, the study contributes to the literature on quality management, performance measurement, and KPI gaming by conceptualizing apparent efficiency as a systemic outcome of indicator-driven governance. From a practical standpoint, the results highlight the need to design decision-making systems in a multidimensional manner, combining quantitative indicators with qualitative assessment and expert knowledge. The proposed model provides a foundation for future empirical research on mitigating apparent efficiency and improving the alignment between performance measurement systems and real organizational quality.

Keywords: quality management, apparently efficient organizations, KPI gaming, apparent efficiency, indicator-based analysis

Wprowadzenie

Współczesne organizacje funkcjonują w coraz bardziej złożonym i konkurencyjnym środowisku, w którym efektywność operacyjna i jakość procesów są kluczowymi determinantami sukcesu. W tym kontekście wskaźniki KPI (Key Performance Indicators) stały się podstawowym narzędziem monitorowania i oceny wyników jednostek organizacyjnych. Wskaźniki te umożliwiają menedżerom szybkie porównanie osiągniętych rezultatów z oczekiwaniami strategicznymi oraz identyfikację obszarów wymagających interwencji. Nadmierne poleganie na KPI może jednak prowadzić do zjawiska określanego w literaturze jako organizacja pozornej efektywności – sytuacji, w której wskaźniki wskazują na wysoką efektywność, podczas gdy rzeczywista jakość procesów i satysfakcja klientów pozostają na niskim poziomie. Problem ten ma istotne znaczenie praktyczne: decyzje podejmowane na podstawie mylących wskaźników mogą skutkować błędną alokacją zasobów, wzrostem liczby reklamacji, spadkiem lojalności klientów i długoterminowym pogorszeniem wyników organizacji.

Celem niniejszego artykułu jest opracowanie modelu decyzyjnego opartego na symulacji iluzji KPI, który pozwala zrozumieć mechanizmy powstawania efektu pozornej efektywności w organizacjach, ocenić wpływ iluzorycznych wskaźników na decyzje menedżerskie i rzeczywistą jakość procesów, a także sformułować rekomendacje dotyczące integracji wskaźników ilościowych z jakościowymi metodami oceny efektywności.

W ramach badań postawiono hipotezy badawcze, zgodnie z którymi:

- Organizacje, w których decyzje menedżerskie opierają się wyłącznie na KPI, wykazują istotnie wyższe wskaźniki pozornej efektywności w porównaniu z rzeczywistą jakością działań.
- Wprowadzenie niezależnych mechanizmów kontroli jakości (np. audytów, opinii klientów) redukuje efekt iluzji KPI i poprawia rzeczywistą jakość procesów.
- Efekt iluzji KPI jest bardziej wyraźny w jednostkach charakteryzujących się niską transparentnością procesów oraz wysoką rotacją pracowników.

Do weryfikacji postawionych hipotez zastosowano metodologię symulacyjną opartą na modelu agentowym, w której jednostki organizacyjne traktowane są jako agenci podejmujący decyzje operacyjne, a menedżerowie podejmują decyzje wyłącznie w oparciu o wskaźniki KPI, z możliwością wprowadzenia mechanizmów kontroli jakości niezależnych od KPI. Symulacja umożliwia obserwację dynamiki procesów decyzyjnych i jakościowych w czasie, a także analizę ryzyka decyzyjnego w różnych scenariuszach.

Przegląd literatury

W literaturze dotyczącej zarządzania organizacjami współczesnymi wskaźniki KPI (Key Performance Indicators) odgrywają rolę podstawowego narzędzia monitorowania efektywności operacyjnej i jakości procesów. Wskaźniki te umożliwiają menedżerom szybkie porównanie wyników jednostek organizacyjnych z celami strategicznymi oraz identyfikację obszarów wymagających interwencji. Pomimo szerokiego zastosowania KPI w praktyce, liczne badania wskazują, że nadmierne poleganie na wskaźnikach może prowadzić do powstania zjawiska określanego jako „organizacja pozornej efektywności", w której wskaźniki sugerują wysoką efektywność, podczas gdy rzeczywista jakość procesów pozostaje niska.

Jednym z najbardziej istotnych problemów jest zjawisko, które na potrzeby niniejszego artykułu nazwałam roboczo, tzw. gamingiem KPI, polegające na manipulowaniu wskaźnikami w celu poprawy pozornych wyników, które nie odzwierciedlają faktycznej jakości działań. Praktyki te obejmują selektywne raportowanie danych, przesuwanie zadań do okresów sprawozdawczych sprzyjających lepszym wskaźnikom oraz koncentrowanie się wyłącznie na aspektach mierzalnych liczbowo, kosztem jakościowych elementów procesów. Badania empiryczne wskazują, że gaming KPI pojawia się szczególnie w organizacjach charakteryzujących się silnym naciskiem na wyniki krótkoterminowe oraz tam, gdzie menedżerowie nie posiadają pełnej wiedzy o procesach operacyjnych lub nie mają dostępu do informacji jakościowych. Zjawisko to prowadzi do paradoksalnej sytuacji, w której wskaźniki KPI wzrastają, podczas gdy rzeczywista jakość działań oraz satysfakcja klientów ulegają pogorszeniu.

Ponadto nadmierne poleganie na KPI może wywoływać sytuację, w której menedżerowie skupiają się tylko i wyłącznie na wynikach liczbowych, ignorując całościowy przebieg procesów i sygnały jakościowe wymagające specjalistycznej wiedzy. Literatura dotycząca zarządzania jakością podkreśla, że skuteczne podejście powinno integrować wskaźniki ilościowe z oceną jakościową oraz doświadczeniem ekspertów. Brak tej integracji może prowadzić do ograniczenia innowacyjności, spadku zdolności do rozwiązywania problemów oraz nieoptymalnej alokacji zasobów. Wiedza specjalistyczna odgrywa w tym kontekście kluczową rolę, ponieważ pozwala identyfikować subtelne problemy jakościowe, które pozostają niewidoczne w prostych wskaźnikach efektywności. Specjaliści mogą wychwycić błędy procesowe, defekty produktów czy spadki satysfakcji klientów, które nie są odzwierciedlone w KPI, co podkreśla konieczność łączenia danych liczbowych z oceną ekspercką. W literaturze poświęconej modelowaniu i symulacji organizacyjnej wykazano, że podejścia agentowe i symulacje komputerowe pozwalają analizować konsekwencje decyzji podejmowanych na podstawie niepełnych lub zniekształconych danych. Symulacje te umożliwiają badanie efektu iluzji KPI, w którym wskaźniki przedstawiają rzeczywistość w sposób zniekształcony, prowadząc do podejmowania błędnych decyzji strategicznych. Badania pokazują, że integracja wskaźników ilościowych z mechanizmami kontroli jakości oraz wiedzą ekspercką pozwala na lepszą identyfikację rzeczywistych problemów i ogranicza ryzyko powstawania organizacji pozornej efektywności.

Metody badawcze

Zastosowane podejście badawcze ma charakter koncepcyjno-analityczny i opiera się na konstrukcji formalnego modelu decyzyjnego, którego celem jest teoretyczna analiza mechanizmów powstawania iluzji KPI w organizacjach zarządzanych w oparciu o wskaźniki efektywności. Badanie nie ma charakteru empirycznego i nie polega na analizie danych pochodzących z konkretnych organizacji; jego istotą jest opracowanie i eksploracja modelu symulacyjnego, który umożliwia systematyczne rozważanie zależności pomiędzy rzeczywistą jakością działań, jej reprezentacją w postaci KPI oraz decyzjami menedżerskimi podejmowanymi na podstawie tych wskaźników. Takie podejście jest uzasadnione w sytuacji, gdy badane zjawisko ma charakter ukryty, trudny do bezpośredniego pomiaru oraz silnie zależny od struktury systemu decyzyjnego.

Podstawowym założeniem metodologicznym jest rozróżnienie pomiędzy rzeczywistą jakością procesów organizacyjnych a jej formalnym odwzorowaniem w systemie pomiaru efektywności. Rzeczywista jakość została ujęta jako zmienna teoretyczna, oznaczona jako Qr, która odzwierciedla faktyczny poziom jakości działań, lecz pozostaje nie w pełni obserwowalna dla decydentów. Wskaźniki KPI, oznaczone jako K, stanowią natomiast uproszczoną i

częściową reprezentację tej jakości, obciążoną systematycznym zniekształceniem informacyjnym. Relacja pomiędzy tymi zmiennymi została sformalizowana jako:

$$K = Q_r + \Delta$$

gdzie Δ oznacza komponent iluzji KPI, wynikający z błędów pomiaru, asymetrii informacji oraz praktyk organizacyjnych prowadzących do pozornej efektywności.

Zmienna Δ została ujęta jako konstrukt analityczny, którego wartość i kierunek zależą od cech systemu zarządzania, a nie od losowych fluktuacji. W modelu przyjęto, że iluzja KPI wzmacnia się w warunkach niskiej transparentności procesów, wysokiej presji na wyniki krótkoterminowe, silnego powiązania ocen pracowniczych z wartościami wskaźników oraz ograniczonego wykorzystania wiedzy eksperckiej w procesach decyzyjnych. Takie ujęcie pozwala traktować iluzję KPI jako zjawisko systemowe, a nie jako pojedyncze odstępstwo od racjonalności.

Proces decyzyjny na poziomie menedżerskim został opisany jako mechanizm interpretacyjny, w którym obserwowane wartości KPI stanowią główne, lecz nie jedyne źródło informacji. W modelu wprowadzono pojęcie orientacji decyzyjnej na KPI, rozumianej jako stopień, w jakim decyzje dotyczące alokacji zasobów, interwencji korygujących oraz priorytetów strategicznych są determinowane przez wartości wskaźników liczbowych. Wysoka orientacja na KPI oznacza dominację logiki wskaźnikowej nad oceną jakościową i refleksją ekspercką, co sprzyja powstawaniu pozornej efektywności i utrwalaniu błędnych decyzji w czasie.

Model uwzględnia również możliwość istnienia alternatywnych źródeł informacji o jakości, takich jak audyty wewnętrzne, oceny eksperckie, informacje zwrotne od klientów lub pracowników oraz obserwacje procesowe. Źródła te nie są traktowane jako bezpośrednie miary jakości, lecz jako mechanizmy redukujące skalę zniekształcenia Δ, zwiększające trafność interpretacji KPI. W ujęciu metodologicznym pozwala to na porównanie hipotetycznych konfiguracji systemów zarządzania, różniących się stopniem integracji wskaźników ilościowych z informacją jakościową.

Analiza modelu ma charakter eksploracyjny i porównawczy. Polega ona na obserwacji relacji pomiędzy KPI a rzeczywistą jakością w różnych konfiguracjach systemu decyzyjnego, przy założeniu stałych reguł interpretacji wskaźników. W szczególności analizowana jest skala rozbieżności pomiędzy KPI a jakością, trwałość tych rozbieżności w czasie oraz ich konsekwencje dla stabilności decyzji menedżerskich. Wprowadzono pojęcie iluzji KPI jako syntetycznego efektu systemowego, rozumianego jako utrzymująca się różnica pomiędzy deklarowaną, a faktyczną efektywnością organizacji.

Zastosowana metodologia ma również jasno określone ograniczenia. Model ma charakter abstrakcyjny i nie uwzględnia wszystkich możliwych czynników wpływających na decyzje menedżerskie, takich jak uwarunkowania polityczne, emocjonalne czy kulturowe. Nie stanowi

on narzędzia prognostycznego, lecz ramę analityczną służącą do identyfikacji mechanizmów prowadzących do iluzji KPI. Ograniczenia te są jednak zgodne z celem badania, którym jest rozwój teorii zarządzania jakością i wsparcie refleksji nad projektowaniem systemów pomiaru efektywności, a nie empiryczna walidacja konkretnego przypadku organizacyjnego. Przyjęte podejście metodologiczne umożliwia uporządkowane i spójne rozważenie zjawiska pozornej efektywności oraz tworzy podstawę do dalszych badań empirycznych i eksperymentalnych, w których zaproponowany model może zostać wykorzystany jako punkt odniesienia do analizy rzeczywistych systemów zarządzania jakością.

W modelu zastosowano trzy scenariusze decyzyjne, różniące się dostępem menedżerów do dodatkowych źródeł informacji i mechanizmów kontroli jakości:

- Scenariusz 1: Menedżerowie podejmują decyzje wyłącznie na podstawie KPI, brak niezależnej weryfikacji jakości.
- Scenariusz 2: Menedżerowie korzystają z KPI oraz okresowych audytów jakości, które dostarczają niezależnych danych o rzeczywistej jakości działań.
- Scenariusz 3: Menedżerowie korzystają z KPI, audytów jakości oraz informacji zwrotnej od klientów i pracowników, co pozwala na pełniejszą ocenę rzeczywistej sytuacji.

Parametry modelu zostały ustalone na podstawie przeglądu literatury i danych empirycznych z badań nad organizacjami produkcyjnymi i usługowymi:

- Średnia rzeczywista jakość Q_r: 70 ± 10,
- Średnie odchylenie KPI Δ: 0–20 (zależne od rotacji pracowników i transparentności procesów),
- Wrażliwość menedżera na KPI Sm: 0,8,
- Liczba jednostek organizacyjnych: 100,
- Horyzont czasowy symulacji: 12 miesięcy.

Wyniki

Symulacja modelu agentowego pozwoliła na kompleksową analizę wpływu iluzji KPI na decyzje menedżerskie oraz rzeczywistą jakość działań w organizacjach. W badaniu uwzględniono trzy scenariusze decyzyjne: decyzje oparte wyłącznie na KPI, decyzje oparte na KPI i audytach jakości oraz decyzje oparte na KPI, audytach i dodatkowej informacji zwrotnej od klientów i pracowników. Analiza średnich wartości wskaźników KPI i rzeczywistej jakości działań wykazała istotne różnice między scenariuszami. W przypadku jednostek, których działania były monitorowane wyłącznie za pomocą KPI, średni wskaźnik KPI wyniósł 85, podczas gdy rzeczywista jakość $Q_r$osiągnęła wartość 68, co wskazuje na średnie odchylenie +17 punktów i wyraźną iluzję efektywności. W scenariuszu, w którym menedżerowie mieli dostęp do audytów jakości, średnie KPI wyniosły 80, a rzeczywista jakość 74, co zmniejszyło odchylenie do +6 punktów. Najbliższe dopasowanie między KPI a rzeczywistą jakością uzyskano w scenariuszu z dodatkowymi informacjami zwrotnymi od klientów, gdzie KPI wyniosły 78, a Q_r 76, dając odchylenie jedynie +2 punkty. Wyniki te pokazują, że włączenie niezależnych źródeł informacji znacząco redukuje efekt iluzji KPI.

Analiza rozkładu odchyleń KPI względem rzeczywistej jakości wykazała, że w przypadku decyzji opartych wyłącznie na KPI występowały duże wahania między jednostkami, przy czym niektóre osiągały różnicę nawet +35 punktów, co potwierdza istnienie silnej rozbieżności między pozorną a rzeczywistą efektywnością. W scenariuszach uwzględniających audyty jakości i informacje zwrotne rozkład odchyleń był zdecydowanie węższy, co wskazuje na stabilizację oceny jednostek i zmniejszenie ryzyka błędnych decyzji. Korelacja między KPI a rzeczywistą jakością w scenariuszu opartym wyłącznie na KPI wyniosła r = 0,42, natomiast po uwzględnieniu audytów wzrosła do r = 0,68, a w scenariuszu z pełną informacją zwrotną osiągnęła wartość r = 0,81. Wyniki te jednoznacznie pokazują, że integracja KPI z dodatkowymi źródłami danych poprawia trafność oceny jednostek organizacyjnych i ogranicza efekt iluzorycznej efektywności.

Analiza dynamiki zmian w czasie ujawniła, że w jednostkach monitorowanych wyłącznie przez KPI początkowy wzrost wskaźników nie przekładał się na poprawę rzeczywistej jakości działań, która pozostawała względnie stała lub malała. Menedżerowie, reagując na pozorny wzrost KPI, kierowali zasoby w sposób nieoptymalny, co skutkowało wzrostem odchyleń i powstawaniem ryzyka decyzyjnego. W scenariuszach z audytami i informacjami zwrotnymi dynamika KPI była bardziej zbieżna z rzeczywistą jakością, co pozwalało menedżerom podejmować decyzje skuteczniejsze pod względem jakości i efektywności procesów.

Dodatkowo model pozwolił na analizę wpływu transparentności procesów oraz rotacji pracowników na efekt iluzji KPI. Wyniki pokazały, że jednostki o niskiej transparentności i wysokiej rotacji pracowników wykazywały największe odchylenia między KPI a rzeczywistą jakością, osiągając w scenariuszu bez audytów średnie odchylenie +22 punkty. W jednostkach

o wysokiej transparentności procesów odchylenia nie przekraczały +10 punktów, co sugeruje, że struktura organizacyjna i stabilność kadry mają istotny wpływ na powstawanie pozornej efektywności.

Symulacja wykazała kilka istotnych zależności:

- W sytuacjach, gdy KPI były jedynym źródłem informacji, menedżerowie często podejmowali decyzje zwiększające wskaźniki, ale pogarszające rzeczywistą jakość procesów.
- Organizacje, które wdrożyły mechanizmy kontroli jakości niezależne od KPI, osiągały stabilniejsze wyniki jakościowe.
- Efekt iluzji KPI był najbardziej widoczny w jednostkach o wysokiej rotacji pracowników i niskiej transparentności procesów – tam wzrost wskaźników KPI nie korelował z poprawą satysfakcji klienta ani spadkiem liczby reklamacji.

Tabela 1 przedstawia średnie wyniki jakościowe i KPI po 12 miesiącach symulacji.

Tabela 1 Zestawienie wyników w poszczególnych scenariuszach.

Scenariusz	Średnie KPI	Średnia jakość rzeczywista Q_r	Odchylenie KPI
Numer 1	85	68	+17
Numer 2	80	74	+6
Numer 3	78	76	+2

Źródło: Opracowanie własne

Zgodnie z wynikami, zawartymi w powyższej tabeli, wskazać należy, że w scenariuszu numer 1 iluzja KPI jest najwyższa, co oznacza, że wskaźniki sugerują wysoki poziom jakości, podczas gdy rzeczywista jakość jest niższa, natomiast w przypadku scenariusza numer 2 i scenariusza numer 3 pokazują, że audyty i dodatkowe źródła informacji redukują efekt iluzji KPI. Symulacja wykazała, że decyzje oparte wyłącznie na KPI prowadzą do nadmiernego skupienia na poprawie wskaźników kosztem jakości, błędnej alokacji zasobów, jak również wzrostu liczby reklamacji i spadku satysfakcji klientów w dłuższym okresie.

Dyskusja

Wyniki przeprowadzonej symulacji jednoznacznie potwierdzają, że nadmierne poleganie na KPI w podejmowaniu decyzji menedżerskich prowadzi do powstawania efektu iluzorycznej efektywności, w którym wskaźniki liczbowo wskazują na wysoką efektywność jednostek, podczas gdy rzeczywista jakość procesów pozostaje niewystarczająca. Wynik ten jest zgodny z doniesieniami literaturowymi wskazującymi, że nadmierna koncentracja na miernikach ilościowych może prowadzić do zniekształcenia rzeczywistego obrazu efektywności organizacji (Balon, 2024; Xue, 2025). Zjawisko to znajduje potwierdzenie w literaturze

dotyczącej KPI, gdzie manipulowanie wskaźnikami lub nadmierne skupienie się na aspektach łatwych do zmierzenia prowadzi do paradoksalnej sytuacji, w której wskaźniki rosną, ale efekty rzeczywiste spadają. Podobne wnioski przedstawiają badania dotyczące systemów monitorowania procesów i wskaźników efektywności, które wskazują, że koncentracja na samych miernikach może ograniczać trafność oceny rzeczywistej jakości działań (Balon, 2024; Xue, 2025).Symulacja wykazała, że efekt iluzji KPI jest najbardziej widoczny w jednostkach charakteryzujących się niską transparentnością procesów oraz wysoką rotacją pracowników, co potwierdza obserwacje empiryczne wskazujące na znaczenie stabilności organizacyjnej i jakości procesów w ograniczaniu ryzyka pozornej efektywności. Integracja mechanizmów kontroli jakości, takich jak audyty wewnętrzne, oraz włączenie informacji zwrotnych od klientów i pracowników znacząco zmniejszało odchylenie między KPI a rzeczywistą jakością działań. Pozostaje to zgodne z wcześniejszymi badaniami, w których podkreślano znaczenie narzędzi jakości, kontroli procesowej oraz systemów reklamacyjnych w poprawie trafności oceny funkcjonowania organizacji (Janocha & Dubis, 2023; Skuza & Kardas, 2025; Tomaszewska, 2022). W scenariuszach uwzględniających audyty i dodatkowe źródła informacji korelacja między KPI a rzeczywistą jakością rosła z wartości niskiej ($r = 0,42$) w przypadku wyłącznie KPI do wartości wysokiej ($r = 0,81$) przy pełnej informacji zwrotnej. Wyniki te jednoznacznie wskazują, że wskaźniki liczbowo mierzące efektywność powinny być traktowane jako narzędzie wspierające decyzje, a nie jedyna podstawa ocen, i że konieczne jest ich uzupełnianie wiedzą ekspercką oraz mechanizmami kontroli jakości.

Uzyskane wyniki są spójne z wcześniejszymi badaniami nad systemami pomiaru efektywności i wspomagania decyzji, w których wskazywano, że wskaźniki KPI powinny być stosowane jako element szerszego, wielowymiarowego systemu oceny organizacji, a nie jako jedyne źródło informacji decyzyjnej (Czekaj & Stabryła, 2025; Kotarba, 2022; Skulimowski, 2022). W literaturze podkreśla się również, że pomiar efektywności powinien uwzględniać zarówno wymiar ilościowy, jak i jakościowy, ponieważ dopiero takie podejście pozwala uchwycić rzeczywistą jakość procesów oraz trwałość osiąganych rezultatów (Balon, 2024; Janocha & Dubis, 2023). Wyniki niniejszego badania potwierdzają te ustalenia, pokazując, że wzrost dostępności audytów i informacji zwrotnych poprawia zgodność między KPI a rzeczywistą jakością działań.

Analiza dynamiki zmian w czasie pokazała również, że w scenariuszach pozbawionych audytów menedżerowie reagowali głównie na pozorny wzrost KPI, alokując zasoby w sposób nieoptymalny i wzmacniając efekt iluzorycznej efektywności. W scenariuszach z audytami i informacjami zwrotnymi dynamika KPI była spójna z rzeczywistą jakością, co pozwalało podejmować decyzje bardziej trafne i sprzyjające długoterminowej poprawie procesów. Wyniki te wspierają teoretyczne koncepcje, które podkreślają konieczność holistycznego podejścia do zarządzania jakością, w którym wskaźniki ilościowe są integrowane z wiedzą ekspercką i obserwacjami jakościowymi.

W praktycznym wymiarze wyniki sugerują, że organizacje powinny projektować systemy monitorowania efektywności w sposób wielowymiarowy, łącząc KPI z audytami jakości, informacją zwrotną od klientów i pracowników oraz innymi wskaźnikami jakościowymi, które pozwalają na pełniejszą ocenę rzeczywistej sytuacji. Takie podejście jest zgodne z rekomendacjami obecnymi w literaturze dotyczącej zarządzania jakością i projektowania systemów pomiaru efektywności (Balon, 2024; Biały & Hąbek, 2024; Walczak, 2025). Konieczne jest również zwiększenie transparentności procesów oraz stabilizacja kadry pracowniczej, ponieważ jednostki o wysokiej rotacji i niskiej przejrzystości charakteryzowały się najwyższym odchyleniem między KPI a rzeczywistą jakością, co zwiększa ryzyko podejmowania decyzji opartych na złudzeniu efektywności (Depczyński, 2025; Klimek, n.d.; Kotarba, 2022)..

Podsumowując, wyniki badań wskazują na istotne implikacje zarówno teoretyczne, jak i praktyczne. Są one również zgodne z kierunkiem dotychczasowych badań, które wskazują na ograniczenia zarządzania opartego wyłącznie na wskaźnikach ilościowych oraz na potrzebę uzupełniania ich wiedzą ekspercką i mechanizmami kontroli jakości (Balon, 2024; Czekaj & Stabryła, 2025; Janocha & Dubis, 2023). Teoretycznie potwierdzają, że iluzja KPI jest realnym zagrożeniem dla prawidłowego zarządzania jakością, a nadmierne poleganie na wskaźnikach liczbowych może prowadzić do pozornej efektywności. Praktycznie wyniki sugerują, że organizacje powinny projektować systemy decyzyjne w sposób integrujący wskaźniki ilościowe, mechanizmy kontroli jakości i wiedzę specjalistyczną, co pozwala na ograniczenie ryzyka błędnych decyzji, poprawę rzeczywistej jakości działań i zwiększenie długoterminowej efektywności operacyjnej. Symulacja modelu agentowego dostarcza narzędzia umożliwiającego menedżerom i decydentom obserwację potencjalnych skutków pozornej efektywności i projektowanie bardziej skutecznych strategii zarządzania jakością (Przerwa 2025).

Wyniki sugerują, że tradycyjne podejście oparte wyłącznie na KPI może prowadzić do paradoksalnej sytuacji: organizacje wydają się efektywne „na papierze”, ale ich rzeczywista jakość spada. Model decyzyjny oparty na symulacji iluzji KPI pozwala identyfikować obszary ryzyka i wspiera w tworzeniu strategii integrującej wskaźniki jakości i wskaźniki efektywności operacyjnej. Ponadto wyniki wskazują na konieczność wprowadzenia mechanizmów walidacji KPI, np. audytów jakości, kontroli procesowej oraz integracji danych pochodzących od klientów i pracowników, aby ograniczyć efekt iluzorycznej efektywności.

Model sugeruje, że organizacje pozornej efektywności powstają głównie tam, gdzie KPI są jedynym źródłem decyzji menedżerskich. Efekt iluzorycznej efektywności może być mylący w krótkim okresie, ale prowadzi do pogorszenia wyników w dłuższej perspektywie.

Rekomendacje praktyczne zawierać się będą zatem w trzech, głównych założeniach:

- Integracja KPI z audytami jakości i informacją zwrotną od klientów.
- Zwiększenie transparentności procesów i kontroli rotacji pracowników.

- Ustalanie KPI nie tylko ilościowych, ale również jakościowych, powiązanych z celami strategicznymi organizacji.

Model decyzyjny może być używany jako narzędzie wspierające procesy szkoleniowe menedżerów, pozwalając im zrozumieć konsekwencje nadmiernego polegania na wskaźnikach.

Podsumowanie

Przeprowadzone badanie wskazuje, że nadmierne poleganie na KPI w zarządzaniu organizacjami prowadzi do powstawania efektu iluzorycznej efektywności, w którym wskaźniki sugerują wysoką efektywność jednostek, podczas gdy rzeczywista jakość procesów pozostaje niewystarczająca. Analiza wyników wykazała, że w scenariuszach opartych wyłącznie na KPI średnie odchylenie między wskaźnikami a rzeczywistą jakością osiągało znaczące wartości, a korelacja między KPI a rzeczywistą efektywnością była niska. Zjawisko to potwierdza obserwacje literaturowe dotyczące gaming KPI i organizacji pozornej efektywności, w których nadmierne skupienie na liczbach prowadzi do paradoksalnych sytuacji, w których wyniki wskaźników rosną, a faktyczne procesy pogarszają się. Włączenie mechanizmów kontroli jakości, takich jak audyty oraz informacje zwrotne od klientów i pracowników, znacząco poprawia trafność oceny jednostek organizacyjnych i zmniejsza odchylenie między KPI a rzeczywistą jakością działań. W scenariuszach uwzględniających audyty oraz pełną informację zwrotną średnie odchylenia spadły niemal do zera, a korelacja między wskaźnikami a rzeczywistą jakością osiągnęła wartości wysokie. Wyniki te wskazują, że wskaźniki KPI powinny być traktowane jako element systemu wspierającego decyzje, a nie jako jedyne kryterium oceny efektywności. Konieczne jest integrowanie wskaźników liczbowych z oceną jakościową i wiedzą ekspercką, aby ograniczyć ryzyko pozornej efektywności i podejmowania decyzji nieoptymalnych z punktu widzenia rzeczywistej wartości działań.

Dodatkowe eksperymenty w modelu wykazały, że czynniki organizacyjne, takie jak transparentność procesów i stabilność kadry pracowniczej, mają istotny wpływ na powstawanie efektu iluzji KPI. Jednostki o niskiej transparentności i wysokiej rotacji pracowników charakteryzowały się największymi odchyleniami między wskaźnikami a rzeczywistą jakością, co sugeruje, że poprawa struktury organizacyjnej i zwiększenie przejrzystości procesów jest istotnym elementem strategii ograniczania ryzyka decyzyjnego. Wyniki pokazały również, że decyzje oparte wyłącznie na KPI sprzyjają krótkoterminowym reakcjom na pozorne wzrosty wskaźników, zamiast trwałej poprawie procesów.

Należy jednak podkreślić, że przeprowadzone badanie ma również swoje ograniczenia. Model symulacyjny stanowi uproszczone odwzorowanie rzeczywistych procesów organizacyjnych i nie uwzględnia wszystkich czynników wpływających na decyzje

menedżerskie, takich jak kultura organizacyjna, specyfika branży, relacje interpersonalne czy presja otoczenia. Ograniczeniem jest także przyjęcie określonych założeń dotyczących zachowań jednostek i wpływu poszczególnych zmiennych na wyniki modelu. Z tego względu uzyskane rezultaty należy interpretować przede wszystkim jako identyfikację mechanizmów i zależności, które wymagają dalszej weryfikacji empirycznej.

Jednocześnie badanie wnosi nową wiedzę do obszaru zarządzania jakością, ponieważ pokazuje nie tylko sam fakt występowania iluzji KPI, ale również warunki organizacyjne sprzyjające jej nasileniu oraz mechanizmy ograniczające jej skalę. Znaczenie pracy wykracza poza analizowany model, ponieważ uzyskane wyniki mogą zostać wykorzystane zarówno w dalszych badaniach nad systemami oceny efektywności, jak i w praktyce organizacyjnej, zwłaszcza przy projektowaniu systemów decyzyjnych, audytowych i szkoleniowych.

Podsumowując, badania wskazują zarówno na istotne konsekwencje teoretyczne, jak i praktyczne. Teoretycznie potwierdzają, że efekt iluzji KPI jest realnym zagrożeniem dla zarządzania jakością i może prowadzić do pozornej efektywności, jeśli wskaźniki są stosowane w izolacji. Praktycznie wyniki sugerują, że organizacje powinny projektować systemy decyzyjne w sposób wielowymiarowy, integrując KPI z audytami jakości, informacją zwrotną od klientów i pracowników oraz wiedzą ekspercką. Takie podejście pozwala ograniczyć ryzyko błędnych decyzji, poprawić rzeczywistą jakość procesów oraz zwiększyć efektywność operacyjną i strategiczną organizacji. Model decyzyjny oparty na symulacji iluzji KPI stanowi przy tym wartościowe narzędzie zarówno do badania skutków nadmiernego polegania na wskaźnikach, jak i do projektowania bardziej odpornych systemów zarządzania jakością, które uwzględniają zarówno mierzalne wskaźniki, jak i aspekty jakościowe oraz wiedzę specjalistyczną. W przyszłych badaniach zasadne byłoby rozszerzenie modelu o dodatkowe zmienne organizacyjne oraz empiryczna weryfikacja uzyskanych zależności w rzeczywistych organizacjach.

Bibliografia

1. Balon, U., Dziadkowiec, J. M., & Dobrowolska, M. N. (2024). *Key performance indicators (KPIs) in the quality management system*. International Journal for Quality Research, 18(2).
2. Bednarska, P., Bożek, Ł., Kola, K., Nadolna, K., & Tarczoń, A. (2022). *System KPI do monitorowania dostawców dla zrównoważonego łańcucha dostaw*. Zeszyty Studenckie Wydziału Ekonomicznego „Nasze Studia", (12), 83–94.
3. Czekaj, J., & Stabryła, A. (2025). *Model decyzyjny w zarządzaniu projektami organizacyjnymi*. Organizacja i Kierowanie, 199(3), 39–54.
4. Depczyński, R. M. (2025). *Modelowanie zrównoważenia firmy produkcyjnej z użyciem metod wielokryterialnego wspomagania decyzji*. (Rozprawa doktorska, Uniwersytet Szczeciński). Retrieved from http://www.zar.usz.edu.pl
5. Janocha, S., & Dubis, D. (2023). *Zastosowanie narzędzi jakości do analizy i ograniczenia strat przedsiębiorstwa*.
6. Klimek, R., Kułakowski, K., & Szwed, P. (n.d.). *Metody i problemy systemów decyzyjnych*.
7. Kotarba, B. (2022). *Modele procesu decyzyjnego w systemowej analizie decyzyjnej*. Polityka i Społeczeństwo, 20(04), 148–159.
8. Lourenço, R., Tariq, A., Georgieva, P., Andrade-Campos, A., & Deliktaş, B. (2025). *On the use of physics-based constraints and validation KPI for data-driven elastoplastic constitutive modelling*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 437, 117743.
9. Przerwa, M., Ulenberg, I., & Tyl, M. (2025). *Modelowanie agentowe jako narzędzie symulacji złożonych systemów i procesów*. Management & Quality/Zarządzanie i Jakość, 7(3).
10. Biały, W., & Hąbek, P. (2024). *Zastosowanie wskaźnika OEE do oceny wykorzystania maszyn — studium przypadku*. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji. Retrieved from http://www.omega.polsl.pl
11. Skulimowski, A. M., Badecka, I., Hassan, A., Kara, M., Łydek, P., & Pukocz, P. (2022). *Nowe metody analizy i wspomagania decyzji oraz ich zastosowania w inteligentnych systemach autonomicznych*. Nauka-Technika-Technologia, 3, 141–156.
12. Skuza, Z., & Kardas, E. (2025). *System rozpatrywania reklamacji jako istotny element zarządzania jakością*. Gospodarka Materiałowa i Logistyka.
13. Tomaszewska, K. (2022). *Wykorzystanie narzędzi zarządzania jakością do identyfikacji problemów w procesie produkcyjnym wybranego przedsiębiorstwa*.

14. Walczak, B. (2025). *Przegląd rozwiązań zagranicznych i rekomendowane modele zewnętrznego zapewniania jakości walidacji i certyfikowania*.
15. Xue, J., Zhang, T., & Ye, H. (2025). *KPI-oriented process monitoring based on causal-weighted partial least squares*. Information Sciences, 689, 121470.