MIK-21

Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku

Współczesne aspekty innowacyjne i inżynieryjne

Redakcja naukowa:

dr Radosław Luft

Opracowanie i skład DPT:

Zuzanna Wieczorek

Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH

Lublin 2026

Recenzent:
dr Adam Weinert, Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu

Projekt okładki: mgr Paweł Stadnicki

Korekta: dr Adrian Szary

Opracowanie i skład DPT: Zuzanna Wieczorek

© Copyright by Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH
© Copyright by Authors
© Copyright by Grupa Wydawnicza FNCE, Poznań 2026

Wydawnictwo Naukowe FNCE
e-ISBN 978-83-69008-21-9

Grupa Wydawnicza FNCE
e-ISBN 978-83-68841-83-1

Wydano nakładem:
Wydawnictwa Naukowego FNCE
https://www.wydawnictwo.fnce.info/

Dystrybucja:
Grupa Wydawnicza FNCE Sp. z o.o.
https://www. fnce.info/

Spis treści

Przedmowa..... 5

Cyfrowa i relacyjna dojrzałość outsourcingu usług biznesowych jako determinanta innowacyjności, elastyczności i efektywności organizacji. Mediacyjna rola współtworzenia wiedzy i innowacji **(mgr Izabela Seweryn)** 7

Czas reakcji na sygnały akustyczne jako kryterium projektowe lokalnego systemu wspomagającego dla osób z ubytkiem słuchu dedykowanego w formie aplikacji na urządzenia mobilne **(Jakub Krzysiak)** 27

Innowacyjne metody kontroli stabilności materiałowej jako czynnik konkurencyjności przedsiębiorstw produkcyjnych na przykładzie parafinowo-roślinnych systemów organicznych **(Ewa Muzal, dr Kinga Wzgarda-Raj, dr hab. Zdzisław Kinart)**..... 35

Metody pomiaru obciążenia pracą a ocena wielozadaniowości w symulowanym środowisku kontroli ruchu lotniczego
(Norbert Kostka, Tomasz Baranowski, mgr inż. Katarzyna Pietrzak)..... 44

Model mentoringu technicznego prowadzonego przez studentów z koła naukowego zrób to sam jako forma popularyzacji elektroniki, robotyki i druku 3d
(Maciej Zyśk, Krystian Tilzen, Ziemowit Tłusty) 55

Ocena zależności między stanem zdrowia akumulatorów trakcyjnych a dostrzeganym przez użytkowników pogorszeniem zasięgu samochodów elektrycznych
(Łukasz Menderak)..... 69

Radionamiernik interferometryczny w paśmie s do zastosowań w śledzeniu dronów i rakiet **(Aleksander Kopyto, Mikołaj Sala)**..... 83

Reception retention as a proxy for brand equity transfer in nostalgia-based video game remakes and remasters **(mgr Marcin Brojanowski)** 95

Teoria kolejek w nurcie business process management: możliwe zastosowania i kierunki badawcze **(mgr Gerard Motak)** 116

The railway coefficient (j_{rail}) as a measure of the efficiency and intensity of transport infrastructure use in freight transport within the European Union
(dr inż. Jarosław Mikołajczyk) 126

The road coefficient (j_{road}) as a measure of the efficiency and intensity of transport infrastructure use in freight transport within the European Union
(dr inż. Jarosław Mikołajczyk) 133

Wielka nauka jako źródło innowacji pedagogicznej. Programy nauczycielskie CERN w perspektywie transferu wiedzy do szkoły **(dr Rafał Czupryn)** 140

Przedmowa

Jeżeli wiek XX był stuleciem, w którym o pozycji gospodarek i przedsiębiorstw decydowały skala produkcji i dostęp do surowców, to wiek XXI coraz wyraźniej okazuje się epoką, w której podstawową walutą konkurencyjności staje się zdolność do innowacji. Nie chodzi już wyłącznie o wynalazek rozumiany jako jednorazowe zdarzenie, lecz o innowacyjność jako trwałą właściwość organizacji, sektorów i całych systemów; umiejętność nieustannego przekształcania wiedzy w produkty, procesy, usługi i rozwiązania techniczne, które odpowiadają na potrzeby rynku szybciej i lepiej niż propozycje konkurentów. Cechą tej epoki jest zarazem zatarcie granicy między sferą inżynieryjną a sferą zarządzania: decyzje technologiczne stały się decyzjami strategicznymi, a problemy strategiczne coraz częściej wymagają odpowiedzi formułowanej w języku parametrów, pomiarów i modeli. Właśnie temu pograniczu poświęcony jest niniejszy tom.

Przymiotnik „międzynarodowa" w tytule monografii nie jest ozdobnikiem. Współczesna konkurencja toczy się w skali ponadnarodowej, a jej reguły wyznaczają wspólne rynki, normy techniczne, polityki sektorowe Unii Europejskiej oraz globalne łańcuchy dostaw, w których zakłócenie w jednym ogniwie odczuwane jest natychmiast w pozostałych. W tych warunkach innowacja przestaje być sprawą pojedynczego laboratorium czy przedsiębiorstwa zaś rodzi się w sieciach współpracy łączących uczelnie, wielkie ośrodki badawcze, przemysł i administrację, a jej wartość mierzy się tym, jak szybko i jak daleko potrafi się rozprzestrzenić.

Aktualności tak zarysowanej problematyki trudno przecenić. Transformacja energetyczna i rozwój elektromobilności zmieniają nie tylko przemysł motoryzacyjny, lecz także sposób, w jaki użytkownicy postrzegają wartość i niezawodność produktu. Cyfryzacja usług biznesowych oraz upowszechnienie narzędzi sztucznej inteligencji przekształcają relacje między organizacjami, przesuwając źródła przewagi z posiadanych zasobów ku zdolności do współtworzenia wiedzy z partnerami. Rosnące znaczenie bezpieczeństwa, od ochrony przestrzeni powietrznej przed bezzałogowymi statkami powietrznymi po niezawodność systemów, w których o skutkach błędu decydują sekundy, przywraca rangę badaniom nad techniką radiolokacyjną, ergonomią i obciążeniem pracą operatora. Polityka transportowa Unii Europejskiej, dążąca do przeniesienia części przewozów towarowych z dróg na tory, wymaga narzędzi pozwalających rzetelnie porównywać efektywność i intensywność wykorzystania infrastruktury w poszczególnych państwach. We wszystkich tych obszarach powraca ta sama zasada: nie sposób doskonalić tego, czego nie potrafi się zmierzyć.

Innowacyjność i konkurencyjność ujawniają się przy tym na wielu poziomach jednocześnie. Na poziomie przedsiębiorstwa produkcyjnego decyduje o nich jakość kontroli materiałowej i zdolność do stabilizowania właściwości wyrobu; na poziomie organizacji usługowej; dojrzałość procesów i relacji, które można opisać i optymalizować z użyciem aparatu matematycznego; na poziomie systemów infrastrukturalnych; efektywność wykorzystania sieci transportowych; na poziomie pojedynczego operatora granice ludzkiej uwagi w warunkach wielozadaniowości. Do tego dochodzi poziom, który przez długi czas pozostawał poza polem widzenia inżynierów: percepcja użytkownika. Współczesny rynek uczy, że produkt technicznie doskonały może przegrać z produktem, który lepiej zarządza oczekiwaniami, pamięcią i emocjami odbiorcy niezależnie od tego, czy mowa o rzeczywistym zasięgu samochodu elektrycznego, czy o odnowionej wersji gry sprzed dwóch dekad.

Żadna z tych płaszczyzn nie istniałaby bez ludzi, którzy potrafią myśleć technicznie i twórczo zarazem. Dlatego istotnym wątkiem tomu jest kształcenie, rozumiane szeroko: od popularyzacji elektroniki, robotyki i druku 3D w ramach studenckich inicjatyw mentoringowych po transfer wiedzy z wielkich międzynarodowych ośrodków badawczych do szkół. Innowacyjność, o której traktuje niniejsza monografia, zaczyna się na długo przed wdrożeniem: w pracowni, laboratorium, kole naukowym i klasie szkolnej, tam gdzie ciekawość zostaje po raz pierwszy skonfrontowana z rygorem metody.

Jedenaście zamieszczonych tu opracowań łączy perspektywa innowacyjna i inżynieryjna: znalazły się wśród nich prace z zakresu inżynierii materiałowej i kontroli jakości w przedsiębiorstwach produkcyjnych, radioelektroniki i radiolokacji, elektromobilności i diagnostyki akumulatorów trakcyjnych, ekonomiki infrastruktury transportowej Unii Europejskiej, czynnika ludzkiego w systemach o wysokiej niezawodności, cyfrowej dojrzałości outsourcingu i matematycznego modelowania procesów biznesowych, marketingu produktów cyfrowych oraz dydaktyki nauk technicznych i przyrodniczych. Różnorodność metod od badań eksperymentalnych i symulacyjnych, przez analizy empiryczne i konstrukcję wskaźników, po przeglądy literatury i modele koncepcyjne odzwierciedla przekonanie, że innowacyjność jest zjawiskiem z natury interdyscyplinarnym, a jej badanie wymaga równoczesnego udziału inżynierów, ekonomistów i pedagogów.

Monografia oddawana jest do rąk Czytelników z nadzieją, że okaże się użyteczna dla badaczy nauk technicznych i nauk o zarządzaniu, dla praktyków przemysłu i usług, a także dla nauczycieli i studentów, którzy w prezentowanych rozwiązaniach mogą odnaleźć inspirację do własnych poszukiwań. Słowa podziękowania należą się Autorom, którzy zechcieli podzielić się wynikami swoich badań.

dr Radosław Luft
Redaktor naukowy

mgr Izabela Seweryn

Kanclerz honorowy Loży Radomskiej Business Centre Club

Cyfrowa i relacyjna dojrzałość outsourcingu usług biznesowych jako determinanta innowacyjności, elastyczności i efektywności organizacji. Mediacyjna rola współtworzenia wiedzy i innowacji

Słowa kluczowe: outsourcing usług biznesowych, dojrzałość cyfrowa, dojrzałość relacyjna, współtworzenie wiedzy, innowacyjność, elastyczność, efektywność.

Streszczenie

Cyfryzacja usług biznesowych oraz wzrost znaczenia relacji międzyorganizacyjnych zmieniają logikę outsourcingu z transakcyjnego transferu czynności w układ współtworzenia zdolności organizacyjnych. Celem artykułu jest określenie, w jaki sposób cyfrowa i relacyjna dojrzałość outsourcingu wpływają na innowacyjność, elastyczność oraz efektywność organizacji, a także ocena, czy współtworzenie wiedzy i innowacji stanowi mechanizm pośredniczący. Badanie przeprowadzono metodą analizy danych zastanych oraz triangulacji źródeł. Materiał obejmuje zweryfikowane publikacje naukowe z lat 2022 do 2026, raporty Association of Business Service Leaders oraz statystykę publiczną Głównego Urzędu Statystycznego. W latach objętych analizą wartość eksportu sektora wzrosła z 26,4 do 42,3 miliarda dolarów, liczba centrów z 1714 do 2081, a zatrudnienie z poziomu przekraczającego 400 tysięcy do 488,7 tysiąca osób. Eksport rósł zatem znacznie szybciej niż zasoby ilościowe, czemu towarzyszyły automatyzacja, upowszechnienie sztucznej inteligencji, wzrost udziału usług wiedzochłonnych i rozszerzanie zakresu funkcji. Wyniki wspierają tezę o komplementarności dojrzałości cyfrowej i relacyjnej. Technologia zwiększa dostępność i skalowalność informacji, natomiast jakość relacji umożliwia ich interpretację, dzielenie się wiedzą i rekonfigurację procesów. Dane zagregowane nie pozwalają jednak statystycznie potwierdzić mediacji, dlatego wynik interpretowany jest jako empiryczne uprawdopodobnienie mechanizmu. Wkład artykułu polega na zintegrowaniu perspektywy dynamicznych zdolności, zarządzania wiedzą i relacyjnego tworzenia wartości oraz na wskazaniu mierzalnych przejawów dojrzałości outsourcingu.

1. Wstęp

Outsourcing usług biznesowych coraz rzadziej sprowadza się do decyzji o przeniesieniu funkcji do podmiotu, który wykona ją taniej. Współczesne kontrakty obejmują analitykę, automatyzację, rozwój rozwiązań cyfrowych,

cyberbezpieczeństwo, badania i rozwój oraz zastosowania sztucznej inteligencji. Dostawca staje się uczestnikiem projektowania procesu, a granica organizacji miejscem intensywnej wymiany danych, wiedzy i odpowiedzialności. Przegląd badań nad strategiczną innowacją poprzez outsourcing pokazuje ewolucję od logiki redukcji kosztów ku logice uzyskiwania dostępu do komplementarnych zdolności i wspólnego tworzenia innowacji[1]. Jednocześnie metaanaliza wyników outsourcingu wskazuje na ich niejednorodność, zależną od charakteru wydzielanej aktywności, lokalizacji, warunków organizacyjnych i sposobu zarządzania relacją[2].

Problem badawczy nie polega więc na ustaleniu, czy outsourcing jest korzystny przeciętnie, lecz na identyfikacji konfiguracji, w której zasoby zewnętrzne mogą zostać przekształcone w trwałą zdolność organizacyjną. Badanie polskich przedsiębiorstw wskazuje, że outsourcing informatyczny może wzmacniać konkurencyjność przez dostęp do specjalistycznej wiedzy, elastyczność i koncentrację na działalności podstawowej, ale wartość ta zależy od jakości wdrożenia i dopasowania do potrzeb przedsiębiorstwa[3]. Ujęcie to jest zgodne z wynikami badań międzynarodowych, które pokazują, że nieudany outsourcing technologii może obniżać zdolności wewnętrzne i innowacyjność, jeżeli organizacja traci kontrolę nad krytyczną wiedzą, źle projektuje kontrakt albo nie utrzymuje kompetencji nadzorczych[4].

Artykuł przyjmuje, że podstawową jednostką analizy jest nie sam kontrakt, lecz system międzyorganizacyjny obejmujący technologie, dane, role, praktyki współpracy, reguły decyzyjne i mechanizmy uczenia się. W tym systemie wyróżniono dwa komplementarne wymiary dojrzałości. Dojrzałość cyfrowa oznacza zdolność partnerów do wspólnego integrowania danych, technologii i procesów. Dojrzałość relacyjna oznacza zdolność do koordynacji interesów, wzajemnego uczenia się, konstruktywnego rozwiązywania problemów oraz stabilnego działania przy niepełności kontraktu.

Celem głównym jest określenie relacji pomiędzy oboma wymiarami dojrzałości a innowacyjnością, elastycznością i efektywnością organizacji oraz ocena mediacyjnej roli współtworzenia wiedzy i innowacji. Postawiono trzy pytania. Po pierwsze, jakie przejawy cyfrowej i relacyjnej dojrzałości można

---

[1] Marfri Gambal, Aleksandre Asatiani, Julia Kotlarsky, Strategic innovation through outsourcing: A theoretical review, „The Journal of Strategic Information Systems" 2022, 31(2), art. 101718.

[2] Somnath Lahiri, Amit Karna, Sai Chittaranjan Kalubandi, Saneesh Edacherian, Performance implications of outsourcing: A meta-analysis, „Journal of Business Research" 2022, 139, s. 1303– 1316.

[3] Damian Kocot, Maria Kocot, IT outsourcing and factors of increasing the competitiveness of enterprises, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2024, 195, s. 287–299.

[4] Liam Murphy, The influence of IT outsourcing on organisational success and innovation, „Future Business Journal" 2024, 10(1), art. 84.

rozpoznać w polskim sektorze usług biznesowych. Po drugie, czy ich rozwojowi towarzyszą rezultaty zgodne ze wzrostem innowacyjności, elastyczności i efektywności. Po trzecie, czy sekwencja obserwowanych zmian jest spójna z mechanizmem, w którym cyfrowe możliwości i relacyjna jakość zostają przekształcone w wyniki za pośrednictwem wspólnego tworzenia oraz wykorzystywania wiedzy.

Wkład teoretyczny polega na połączeniu dynamicznych zdolności z relacyjną perspektywą tworzenia wartości. Wkład metodologiczny obejmuje triangulację literatury, danych sektorowych i statystyki publicznej przy wyraźnym oddzieleniu zgodności danych z mechanizmem od dowodu przyczynowego. Wkład aplikacyjny dotyczy projektowania takich relacji outsourcingowych, w których efektywność bieżąca nie odbywa się kosztem zdolności klienta do uczenia się i strategicznej kontroli.

2. Ramy teoretyczne dojrzałości outsourcingu

Outsourcing może być rozumiany jako zewnętrzna realizacja określonych procesów, lecz z perspektywy zarządzania strategicznego ważniejszy jest sposób integrowania zasobów po obu stronach relacji. W modelu wykonawczym klient definiuje czynność, dostawca ją realizuje, a podstawowymi instrumentami zarządzania są cena, poziom usług i kontrola zgodności. W modelu dojrzałym dostawca uczestniczy w diagnozie problemu, projektowaniu rozwiązania i doskonaleniu procesu. Wymaga to jednoczesnego wykorzystania formalnych oraz relacyjnych mechanizmów zarządzania. Badania outsourcingu sztucznej inteligencji wskazują, że formalne reguły ograniczają niejednoznaczność odpowiedzialności, natomiast zarządzanie relacyjne umożliwia adaptację do technologicznej niepewności i sytuacji, których nie można wyczerpująco przewidzieć w kontrakcie[5].

2.1. Dojrzałość cyfrowa

Dojrzałości cyfrowej nie należy utożsamiać z liczbą zakupionych technologii. Oznacza ona zdolność organizacyjną do łączenia infrastruktury, danych, kompetencji i praktyk zarządczych z celami strategicznymi. Badania wskazują, że zasoby cyfrowe przynoszą rezultat dopiero wtedy, gdy są uruchamiane przez dynamiczne zdolności do rozpoznawania szans, wykorzystywania możliwości

5 Erik Beulen, Albert Plugge, Jos van Hillegersberg, Formal and relational governance of artificial intelligence outsourcing, „Information Systems and e-Business Management" 2022, 20(4), s. 719– 748.

i rekonfiguracji zasobów[6]. Transformacja przedsiębiorstw sektora energii w Polsce potwierdza, że cyfryzacja obejmuje równocześnie technologię, sposób zarządzania, strukturę procesów i kompetencje[7]. Podobny wniosek wynika z badań kompetencji wymaganych przez transformację logistyki, gdzie znaczenie mają analityka, uczenie się i współpraca człowieka z technologią[8].

Na potrzeby modelu cyfrowa dojrzałość outsourcingu obejmuje cztery zdolności. Pierwszą jest interoperacyjność systemów i danych, dzięki której informacje mogą być bezpiecznie łączone w poprzek granic organizacyjnych. Drugą jest transparentność procesu, pozwalająca identyfikować odchylenia i ich przyczyny. Trzecią jest skalowalność automatyzacji, analityki i sztucznej inteligencji. Czwartą jest cyfrowa zdolność zarządcza, czyli umiejętność przekładania możliwości technologicznych na decyzje, priorytety i mierzalne rezultaty biznesowe.

Badania dojrzałości w erze sztucznej inteligencji identyfikują jako stymulatory między innymi gotowość kierownictwa i organizacji, natomiast jako bariery wskazują niedobory wiedzy, infrastruktury, akceptacji i dostosowania systemu zarządzania[9]. Ważnym problemem jest luka implementacyjna. Badanie 697 polskich przedsiębiorstw wykazało rozbieżność pomiędzy samooceną a faktycznym poziomem wdrożenia rozwiązań cyfrowych, co uzasadnia mierzenie praktyk i efektów zamiast samych deklaracji[10]. Zróżnicowanie organizacyjnej dojrzałości cyfrowej między instytucjami potwierdza dodatkowo, że identyczne narzędzie może generować odmienne wyniki zależnie od kultury, strategii i zdolności integracyjnych odbiorcy[11].

---

[6] Anna Kwiotkowska, The interplay of resources, dynamic capabilities and technological uncertainty on digital maturity, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2022, 155, s. 221–236.

[7] Anna Chwiłkowska Kubala, Kamila Malewska, Katarzyna Mierzejewska, Digital transformation of energy sector enterprises in Poland: Rationale and practices, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2022, 162, s. 101–120.

[8] Marta Brzozowska, Jadwiga Kaczmarska Krawczak, Katarzyna Kolasińska Morawska, Ewa Stroińska, Competences 4.0 in the logistics sector against the challenges of sustainable digital transformation of the economy in the Polish perspective, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2022, 162, s. 53–85.

[9] Sylwia Bąk, Piotr Jedynak, Digital maturity in the era of artificial intelligence: Stimulators of and barriers to organizational changes, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, 241, s. 7–24.

[10] Magdalena Jaciow, The implementation gap in the digital maturity of Polish enterprises: Measurement and identification, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, 243, s. 257–277.

[11] Izabela Marzec, The organisational dimension of digital maturity in public and private institutions, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, 243, s. 533–546.

Perspektywa dynamicznych zdolności jest szczególnie użyteczna dla małych i średnich przedsiębiorstw, ponieważ pozwala analizować cyfryzację jako proces ciągłej rekonfiguracji, a nie jednorazowy projekt technologiczny[12]. Badania dotyczące transformacji podwójnej wskazują podobnie, że dynamiczne zdolności integrują cele technologiczne i szersze cele organizacji[13]. Uwarunkowania cyfryzacji polskich przedsiębiorstw mają ponadto charakter sieciowy, ponieważ obejmują kapitał ludzki, relacje, infrastrukturę wiedzy oraz ramy instytucjonalne[14]. Cyfrowa dojrzałość outsourcingu jest zatem zdolnością wspólnego działania na danych i procesach, a nie sumą narzędzi posiadanych przez klienta oraz dostawcę.

2.2. Dojrzałość relacyjna

Dojrzałość relacyjna oznacza zdolność stron do współpracy przewidywalnej w zakresie zasad, lecz adaptacyjnej w zakresie działań. Obejmuje jakość komunikacji, zaufanie oparte na doświadczeniu, zgodność celów, wzajemne zaangażowanie, reguły podziału ryzyka i korzyści oraz zdolność konstruktywnego rozwiązywania konfliktów. Wiedza w relacji międzyorganizacyjnej nie przepływa automatycznie. Badania współpracy uczelni i przedsiębiorstw pokazują, że znaczenie mają rozpoznawalność wiedzy partnera, zdolność absorpcyjna i tworzenie struktur umożliwiających jej integrację[15]. Współpraca wirtualna dodatkowo wymaga wspólnego celu, sprawnej komunikacji, zaufania i przygotowanych uczestników[16].

Dojrzałość relacyjna nie jest tożsama z miękkim partnerstwem ani z rezygnacją z formalizacji. Jej istotą jest zdolność do łączenia norm relacyjnych z audytowalnością, odpowiedzialnością i ochroną interesów. Polskie badania procesu outsourcingu informatycznego pokazują, że efektywność komunikacji wiąże się z jasnymi standardami, odpowiednimi technologiami i zaufaniem,

[12] Kamila Malewska, Digital transformation of SMEs in the view of dynamic capabilities: A bibliometric analysis, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, 225, s. 447–467.

[13] Magdalena Dominiczewska, Dynamic capabilities are integral to enabling the twin transition for sustainability and digital transformation, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, 243, s. 173–191.

[14] Izabela Czaja, Tomasz Kafel, Factors determining digitalization in Polish companies in the context of the European industrial strategy, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, 246, s. 87–110.

[15] Marcin Lis, Jolanta Kotelska, Knowledge based inter organizational cooperation of universities and businesses in the chemical sector, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2023, 172, s. 417–451.

[16] Anna Brzozowska, Katarzyna Topolska, Virtual cooperation: A contemporary view on the collaboration between businesses in the 21st century, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2023, 189, s. 69–85.

a więc z konfiguracją czynników formalnych i społecznych[17]. Analizy outsourcingu finansowo księgowego wskazują równocześnie na korzyści w postaci oszczędności czasu i dostępu do zasobów oraz na ryzyka opóźnień i utraty kontroli, co podkreśla znaczenie jakości nadzoru nad relacją[18].

Relacyjna dojrzałość wymaga architektury kontaktów przekraczającej poziom komitetu sterującego. Potrzebne są zespoły problemowe, właściciele procesów, role łączące organizacje, uzgodnione sposoby eskalacji oraz wspólne repozytoria wiedzy. Badania sieci dzielenia się wiedzą wskazują, że innowacyjność jest wspierana przez struktury wzajemnego uczenia się i łączenie lokalnych kompetencji w szerszy układ współpracy[19]. Kapitał relacyjny sam jednak nie wystarcza. Jego wpływ na innowacyjność jest uruchamiany przez praktyki dzielenia się wiedzą i odpowiednią kulturę organizacyjną[20].

2.3. Współtworzenie wiedzy i innowacji jako mechanizm pośredniczący

Współtworzenie wiedzy oznacza proces, w którym partnerzy nie tylko przekazują istniejące informacje, lecz wspólnie konstruują interpretacje, procedury, rozwiązania i standardy. Klient wnosi wiedzę domenową, strategiczną i regulacyjną. Dostawca wnosi doświadczenie procesowe, technologiczne i porównawcze. Nowa wartość powstaje, gdy oba zbiory wiedzy zostają połączone wokół problemu biznesowego. Badania strategicznych projektów międzyorganizacyjnych wykazują, że tworzenie wiedzy zależy od organizacji interakcji oraz równoległego wykorzystywania praktyk formalnych i nieformalnych[21]. W cyfrowej innowacji szczególne znaczenie mają role

[17] Damian Kocot, Katarzyna Olejko, Activities supporting communication efficiency in the IT outsourcing process in the aspect of own research, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, 215, s. 193–207.

[18] Urszula Słupska, Aleksandra Pilawa, Benefits and challenges of outsourcing financial and accounting services for contemporary enterprises, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, 220, s. 299–315.

[19] Lidia Gryszkiewicz, Stephanie Kaudela Baum, Piotr Kopyciński, Marek Oramus, Knowledge sharing networks of higher education institutions for innovation and entrepreneurship: Evidence from the DISCO project case study, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, 223, s. 91–111.

[20] Chung Chang Lee, Wen Chih Yeh, Zheng Yu, Yuan Chen Luo, Knowledge sharing and innovation performance: A case study on the impact of organizational culture, structural capital, human resource management practices, and relational capital of real estate agents, „Humanities and Social Sciences Communications" 2023, 10, art. 707.

[21] Anna Maija Nisula, Kirsimarja Blomqvist, Jukka Pekka Bergman, Seppo Yrjölä, Organizing for knowledge creation in a strategic interorganizational innovation project, „International Journal of Project Management" 2022, 40(4), s. 398–410.

przekraczające granice organizacji i mechanizmy integrujące odmienne domeny wiedzy[22].

Mechanizm pośredniczący można przedstawić w czterech etapach. Najpierw dojrzałość cyfrowa zwiększa dostępność, jakość i szybkość przepływu informacji. Następnie dojrzałość relacyjna obniża bariery ujawniania problemów i zachęca do dzielenia się wiedzą. W trzecim etapie partnerzy wspólnie interpretują dane, testują hipotezy i projektują rozwiązania. W etapie czwartym wiedza zostaje utrwalona w procesie, systemie, standardzie lub nowej usłudze. Dopiero wtedy powstaje wynik organizacyjny.

Mechanizm ten znajduje wsparcie w badaniach empirycznych. Międzyorganizacyjne dzielenie się wiedzą może zwiększać wyniki innowacyjne poprzez rozwój zdolności innowacyjnej[23]. Zdolność absorpcyjna pośredniczy pomiędzy potencjałem cyfrowym a innowacyjnością, co oznacza, że sama technologia nie wystarcza bez zdolności rozpoznawania, przyswajania i wykorzystywania wiedzy[24]. Systematyczny przegląd mediatorów dynamicznych zdolności wskazuje szerzej, że ich wpływ na efektywność jest często realizowany przez zdolności i procesy niższego rzędu[25]. Badanie modelu moderowanej mediacji pokazuje dodatkowo powiązania między zdolnościami cyfrowymi, innowacją i wynikami przedsiębiorstwa[26]. Najnowsze wyniki dotyczące cyfryzacji wiedzy wskazują zaś, że digitalizacja wiedzy może pośredniczyć pomiędzy innowacją cyfrową a międzyorganizacyjnym dzieleniem się wiedzą[27].

---

[22] Yunfei Shi, Tingru Cui, Sherah Kurnia, Value co-creation for digital innovation: An interorganizational boundary-spanning perspective, „Information & Management" 2023, 60(5), art. 103817.

[23] Wang Dongling, Zhang Yuming, Liu Xinmin, Jiakui Chen, Zhang Xiaoyi, He Chang, Can inter-organizational knowledge-sharing improve enterprise innovation performance? The mediator effect of innovation capability and the moderator effect of network characteristics, „Frontiers in Communication" 2022, 7, art. 856301.

[24] Ioanna Kastelli, Petros Dimas, Dimitrios Stamopoulos, Aggelos Tsakanikas, Linking digital capacity to innovation performance: The mediating role of absorptive capacity, „Journal of the Knowledge Economy" 2024, 15, s. 238–272.

[25] Luca Joachim Scheuer, Julia Thaler, How do dynamic capabilities affect performance? A systematic review of mediators, „European Management Journal" 2023, 41(6), s. 914–931.

[26] João J. M. Ferreira, Cristina I. Fernandes, Pedro Mota Veiga, The effects of knowledge spillovers, digital capabilities, and innovation on firm performance: A moderated mediation model, „Technological Forecasting and Social Change" 2024, 200, art. 123086.

[27] Qiang Cheng, Chun Peng, Yuanhui Dai, Shuangyang Zhang, Unlocking interorganizational knowledge sharing: the mediating role of knowledge digitization in the age of digital innovation, „Journal of Knowledge Management" 2026, 30(1), s. 69–89.

3. Model badawczy i propozycje teoretyczne

Model zakłada, że dojrzałość cyfrowa i relacyjna są odrębnymi, lecz komplementarnymi zdolnościami. Pierwsza określa możliwość integrowania technologii, danych i procesów. Druga określa możliwość koordynowania interesów, uczenia się i wspólnego działania. Współtworzenie wiedzy i innowacji pełni funkcję mechanizmu, przez który obie zdolności mogą przekładać się na trzy grupy rezultatów.

Innowacyjność oznacza zdolność tworzenia i wdrażania nowych lub istotnie ulepszonych procesów, usług, modeli działania i rozwiązań organizacyjnych. Współpraca z dostawcą może przyjąć postać outsourcingu innowacji albo wspólnej innowacji, a wybór i skuteczność formy zależą od charakteru relacji i otoczenia instytucjonalnego[28]. Elastyczność oznacza zdolność szybkiej zmiany skali, zakresu, konfiguracji zasobów i sposobu realizacji procesu. Badania transformacji małych i średnich przedsiębiorstw wskazują na współdziałanie zwinności organizacyjnej, zdolności cyfrowych i wsparcia najwyższego kierownictwa[29]. Efektywność obejmuje nie tylko koszt, lecz także jakość, szybkość, produktywność wartościową i wykorzystanie zasobów. Zarządzanie procesami biznesowymi stanowi mechanizm osadzający technologię w sekwencji działań i mierników, wspierając transformację oraz innowację cyfrową[30].

Sformułowano cztery propozycje. Pierwsza zakłada pozytywny związek cyfrowej dojrzałości outsourcingu z innowacyjnością, elastycznością i efektywnością. Druga zakłada analogiczny związek dojrzałości relacyjnej. Trzecia wskazuje, że współtworzenie wiedzy i innowacji pośredniczy w oddziaływaniu obu wymiarów na wyniki. Czwarta zakłada komplementarność, czyli silniejsze oddziaływanie każdego wymiaru przy wysokim poziomie drugiego. Komplementarność jest ważna, ponieważ wysoka cyfryzacja przy słabej relacji może prowadzić do automatyzacji źle zdefiniowanych czynności, natomiast dobra relacja bez zdolności cyfrowych ogranicza skalowanie i obiektywizację wiedzy.

Model uwzględnia czynniki ograniczające: krytyczność procesu, regulacje, bezpieczeństwo informacji, asymetrię wiedzy, koncentrację dostawców oraz

---

[28] Joel Ma, Muammer Ozer, Innovation outsourcing versus joint innovation in collaboration with suppliers: A strategic relational-institutional perspective, „Industrial Marketing Management" 2024, 120, s. 78–89.

[29] Mengxin Zhang, Xihui Chen, Hongming Xie, Luca Esposito, Anna Parziale, Shilpa Taneja, Ahsan Siraj, Top of tide: Nexus between organization agility, digital capability and top management support in SME digital transformation, „Heliyon" 2024, 10(10), art. e31579.

[30] Hasdi Putra, Mahendrawathi ER, The role of business process management in digital innovation and digital transformation: A systematic literature review, „Procedia Computer Science" 2024, 234, s. 829–836.

zdolność kierownictwa do sponsorowania zmiany. Badania kryzysowe pokazują, że trwałość wyników outsourcingu zależy od konfiguracji wzajemnie wzmacniających się warunków, a nie od pojedynczej praktyki[31]. Współtworzenie może też prowadzić do zależności technologicznej i asymetrii zawłaszczania korzyści. Z tego względu dojrzała relacja powinna chronić zdolność architektoniczną klienta i zapewniać transfer wiedzy.

Nowsze badania ekosystemów innowacji wskazują, że współtworzenie wiedzy może wspierać innowacje przełomowe poprzez rekonfigurację zdolności, choć rola rekonfiguracji może mieć charakter złożony[32]. Z kolei analiza przedsiębiorstw międzynarodowych pokazuje, że transformacja cyfrowa zmienia zachowania dotyczące outsourcingu zagranicznego, co potwierdza, że technologia wpływa również na granice organizacji i geograficzny podział pracy[33].

4. Metodyka badania

Badanie ma charakter eksploracyjny i opiera się na analizie danych zastanych. Strategię badawczą zbudowano jako triangulację trzech typów materiału: publikacji naukowych, raportów sektorowych oraz statystyki publicznej. Dobór literatury był celowy i obejmował lata 2022 do 2026. Uwzględniono prace odnoszące się do outsourcingu, dojrzałości cyfrowej, zarządzania relacjami, dynamicznych zdolności, zdolności absorpcyjnej, dzielenia się wiedzą i innowacyjności. Szczególną wagę nadano badaniom identyfikującym mediatory, ponieważ pozwalają one uniknąć technologicznego determinizmu.

Drugą grupę źródeł stanowią raporty Association of Business Service Leaders. Edycja 2022 wskazywała ponad 400 tysięcy pracujących, 1714 centrów, eksport o wartości 26,4 miliarda dolarów i udział sektora w produkcie krajowym brutto na poziomie 4,4 procent[34]. Raport 2023 informował o ponad 435 tysiącach pracujących, ponad 1800 centrach, eksporcie równym 30 miliardów dolarów oraz 57 procentach usług wiedzochłonnych[35]. W edycji 2024 odnotowano 457,1

[31] Ilan Oshri, Federica Angeli, Julia Kotlarsky, Jatinder S. Sidhu, Sustaining IT outsourcing performance during a systemic crisis: A configurational approach, „The Journal of Strategic Information Systems" 2025, 34(1), art. 101872.

[32] Yi Jin, Bo Liu, Knowledge co-creation in innovation ecosystems and breakthrough innovation: The contradictory roles of capability reconfiguration, „The Journal of Technology Transfer" 2025, publikacja internetowa wyprzedzająca druk, DOI 10.1007/s10961-025-10292-w.

[33] Jeoung Yul Lee, Lin Cui, Chinmay Pattnaik, Byungchul Choi, Digital transformation and the offshore outsourcing behavior of manufacturing MNEs, „Journal of International Business Studies" 2025, publikacja internetowa wyprzedzająca druk, DOI 10.1057/s41267-025-00816-9.

[34] Association of Business Service Leaders, Sektor nowoczesnych usług biznesowych w Polsce 2022, Warszawa 2022, passim.

[35] Association of Business Service Leaders, Sektor nowoczesnych usług biznesowych w Polsce 2023, Warszawa 2023, passim.

tysiąca pracujących, 1941 centrów, eksport 36,8 miliarda dolarów i udział w produkcie krajowym brutto równy 5,3 procent[36]. Raport 2025 wskazał 488,7 tysiąca pracujących, 2081 centrów, eksport 42,3 miliarda dolarów, udział w produkcie krajowym brutto 5,7 procent oraz 58,6 procent usług wiedzochłonnych[37].

Trzecią grupę tworzą publikacje Głównego Urzędu Statystycznego dotyczące społeczeństwa informacyjnego. Edycje 2022 i 2023 wykorzystano do osadzenia sektora usług biznesowych w szerszym kontekście cyfryzacji polskich przedsiębiorstw[38,39]. Edycja 2024 umożliwiła obserwację rosnącego wykorzystania sztucznej inteligencji oraz narzędzi wspierających cyfrowe procesy[40]. Dane za 2025 rok wykorzystano jako najnowszy dostępny punkt odniesienia dla analityki danych, chmury i sztucznej inteligencji w populacji przedsiębiorstw[41]. Zmiany formularzy i zakresów populacji oznaczają, że wskaźników GUS nie łączono mechanicznie w jeden szereg czasowy.

Jednostką analizy jest sektor nowoczesnych usług biznesowych w Polsce, obejmujący między innymi centra usług wspólnych, procesy biznesowe, usługi informatyczne oraz funkcje badawczo rozwojowe. Okres ilościowej analizy sektorowej obejmuje edycje raportów z lat 2022 do 2025. Wartości eksportu w kolejnych raportach odnoszą się zasadniczo do roku poprzedzającego publikację, podczas gdy część danych o zatrudnieniu i centrach ma charakter bieżący. Z tego względu porównania traktowane są jako analiza kierunku i skali zmian, nie jako synchroniczny panel roczny.

Zastosowano analizę dynamiki, zmian w punktach procentowych, porównanie tempa wzrostu eksportu, zatrudnienia i liczby centrów oraz jakościową triangulację wskaźników. Dojrzałość cyfrową operacjonalizowano poprzez automatyzację, sztuczną inteligencję, analitykę, strategie transformacji i udział usług wiedzochłonnych. Dojrzałość relacyjną przybliżano wielofunkcyjnością centrów, inwestycjami w kompetencje, rozszerzaniem portfela usług i zdolnością koordynacji złożonych funkcji. Współtworzenie wiedzy identyfikowano przez współwystępowanie transformacji, rozwoju nowych usług, uczenia się i zmian

---

[36] Association of Business Service Leaders, Sektor nowoczesnych usług biznesowych w Polsce 2024, Warszawa 2024, passim.

[37] Association of Business Service Leaders, Sektor usług biznesowych w Polsce 2025, Warszawa 2025, passim.

[38] Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2022 roku, Warszawa, Szczecin 2022, passim.

[39] Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2023 roku, Warszawa, Szczecin 2023, passim.

[40] Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2024 roku, Warszawa, Szczecin 2024, passim.

[41] Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2025 roku, Warszawa, Szczecin 2025, passim.

procesowych. Efektywność oceniano głównie przez relację dynamiki wartości eksportu do dynamiki zasobów. Metoda nie pozwala estymować klasycznego efektu mediacyjnego ani kontrolować wszystkich zmiennych makroekonomicznych.

5. Wyniki badania

W latach objętych analizą sektor zwiększył skalę we wszystkich podstawowych wymiarach. Liczba centrów wzrosła z 1714 do 2081, czyli o 21,4 procent. Zatrudnienie zwiększyło się z poziomu przekraczającego 400 tysięcy do 488,7 tysiąca osób, co oznacza wzrost mniejszy niż 22,2 procent, jeżeli rzeczywisty punkt startowy był wyższy od 400 tysięcy. Udział sektora w produkcie krajowym brutto wzrósł z 4,4 do 5,7 procent, czyli o 1,3 punktu procentowego i około 29,5 procent w ujęciu względnym. Najsilniejszą zmianę odnotowano w eksporcie, który zwiększył się z 26,4 do 42,3 miliarda dolarów, a więc o 60,2 procent.

Rozbieżność dynamiki ma znaczenie interpretacyjne. Wartość eksportu rosła około 2,7 raza szybciej niż minimalnie oszacowane tempo wzrostu zatrudnienia. Nie jest to ścisła miara produktywności pracy, ponieważ okresy referencyjne wskaźników nie są idealnie zgodne, a na wartość eksportu oddziałują również ceny, kursy walut, struktura usług i popyt zagraniczny. Wynik jest jednak niespójny z wyjaśnieniem zakładającym wyłącznie ekstensywną ekspansję przez zwiększanie zatrudnienia. Współwystępująca zmiana struktury usług wzmacnia interpretację o rosnącej intensywności wiedzy i wartości.

Tabela 1. Podstawowe wskaźniki sektora usług biznesowych w Polsce według edycji raportu

Edycja	Pracujący, tys.	Liczba centrów	Eksport, mld USD	Udział w PKB, proc.	Usługi wiedzochłonne, proc.
2022	ponad 400,0	1714	26,4	4,4	ponad 50,0
2023	ponad 435,0	ponad 1800	30,0	brak porównywalnej wartości	57,0
2024	457,1	1941	36,8	5,3	55,5
2025	488,7	2081	42,3	5,7	58,6

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportów Association of Business Service Leaders z lat 2022 do 2025. Wartości eksportu odnoszą się zasadniczo do roku poprzedzającego edycję raportu.

Udział usług wiedzochłonnych przekraczał połowę portfela już w 2022 roku. W 2023 wynosił 57 procent, w 2024 około 55,5 procent, a w 2025 około 58,6 procent. Niewielkie wahanie nie zmienia kierunku strukturalnego. Szczególnie

informacyjna jest struktura nowych jednostek: spośród 61 centrów uruchomionych od początku 2024 roku do końca pierwszego kwartału 2025 roku 42,6 procent miało profil informatyczny, a 26,2 procent badawczo rozwojowy. Łącznie 68,8 procent nowych centrów należało więc do funkcji silnie zależnych od technologii i specjalistycznej wiedzy.

Tabela 2. Dynamika wybranych wskaźników i znaczenie interpretacyjne

Wskaźnik	Porównanie	Zmiana	Interpretacja
Liczba centrów	2022 do 2025	21,4 proc.	ekspansja organizacyjna
Zatrudnienie	2022 do 2025	mniej niż 22,2 proc. przy wartości początkowej ponad 400 tys.	wzrost skali zasobowej
Wartość eksportu	2022 do 2025	60,2 proc.	wartość rośnie szybciej od zasobów
Udział sektora w PKB	2022 do 2025	1,3 p.p.	wzrost znaczenia makroekonomicznego
Profil IT i B+R nowych centrów	2024 do I kw. 2025	68,8 proc. nowych centrów	wzrost intensywności wiedzy i technologii

Źródło: obliczenia własne. Zmiany procentowe obliczono względem wartości początkowej; porównania mają charakter kierunkowy z uwagi na niesynchroniczne okresy referencyjne części wskaźników.

Przejawy dojrzałości cyfrowej są wyraźne w danych sektorowych. W 2024 roku około jedna czwarta centrów deklarowała automatyzację przekraczającą 30 procent procesów, a około 20 procent wykorzystywało sztuczną inteligencję w wybranych procesach finansowych, kadrowych lub informatycznych. Wśród planowanych kierunków transformacji dominowały automatyzacja, standaryzacja i rozwój zastosowań sztucznej inteligencji. W 2025 roku około 90 procent badanych firm deklarowało wykorzystanie sztucznej inteligencji do zadań poznawczych, a ponad 74 procent centrów stosowało inteligentną automatyzację. Ze względu na różnice konstrukcji pytań wartości te nie tworzą jednorodnego szeregu, ale dokumentują instytucjonalizację technologii.

Kontekst GUS pokazuje, że sektor usług biznesowych jest cyfrowo bardziej zaawansowany niż ogólna populacja przedsiębiorstw, chociaż zakresy definicyjne nie pozwalają na mechaniczne porównanie wskaźników. W 2025 roku sztuczną inteligencję wykorzystywało 8,7 procent przedsiębiorstw objętych statystyką publiczną, analizę danych prowadziło 25,9 procent, a płatne usługi chmurowe kupowało 55,3 procent. Zestawienie z danymi ABSL wskazuje na szczególnie wysoką intensywność wykorzystania technologii w sektorze, ale nie uzasadnia obliczania prostego ilorazu przewagi z powodu różnych populacji, pytań i momentów pomiaru.

Relacyjna dojrzałość jest słabiej obserwowalna bezpośrednio. Raporty sektorowe nie mierzą zaufania, zgodności celów czy sposobów rozwiązywania konfliktów na poziomie par klient oraz dostawca. Dostępne wskaźniki organizacyjne stanowią jednak pośrednie przesłanki. W 2024 roku 65,5 procent centrów miało charakter wielofunkcyjny, co zwiększa wymagania koordynacyjne i potrzebę integracji wiedzy. W 2025 roku 78 procent firm zwiększyło wydatki na szkolenia, a ponad połowa rozszerzała zakres świadczonych usług. Zjawiska te są zgodne z rozwojem zdolności do uczenia się, przekraczania granic funkcjonalnych i rekonfiguracji portfela.

Innowacyjność znajduje odzwierciedlenie w wysokiej skłonności sektora do zmian. W 2022 roku ponad 72 procent przedstawicieli sektora deklarowało wdrożenie innowacji w poprzednich trzech latach, wobec 26,1 procent dla ogółu przedsiębiorstw w porównywalnym zestawieniu, co dawało relację około 2,76. W 2024 roku 53,1 procent firm deklarowało zmianę produktów, usług, procesów albo sposobu działania w okresie trzech lat. Wartości nie są bezpośrednio porównywalne, ponieważ pytania różniły się zakresem.

Elastyczność przejawia się w rozszerzaniu portfela usług, wielofunkcyjności i przechodzeniu do bardziej złożonych funkcji. Efektywność jest natomiast zgodna z dysproporcją pomiędzy wzrostem eksportu a wzrostem zasobów. Wyniki nie dowodzą, że technologia spowodowała wzrost eksportu. Pokazują jednak współwystępowanie trzech elementów: rozwoju cyfrowego, wzrostu kompetencji oraz zwiększania wartości i złożoności usług. Taki układ jest zgodny z postulowanym mechanizmem komplementarności.

5.1. Ocena mechanizmu mediacyjnego

Dane zastane pozwalają ocenić logiczną sekwencję modelu, lecz nie umożliwiają formalnego testu mediacji. Pierwszym ogniwem jest wzrost zdolności cyfrowych, widoczny w automatyzacji, sztucznej inteligencji, chmurze, analityce i strategiach transformacji. Drugim jest rozwój zdolności organizacyjnych i relacyjnych, przybliżany przez wielofunkcyjność, szkolenia oraz rozszerzanie usług. Trzecim jest współtworzenie wiedzy, którego przejawem są zmiany procesów, usług i modeli działania. Czwartym są rezultaty: wzrost eksportu, znaczenia sektora w gospodarce oraz udziału funkcji wiedzochłonnych.

Najsilniejszy argument na rzecz mechanizmu pośredniczącego wynika z braku wystarczalności prostych wyjaśnień. Gdyby wynik był wyłącznie skutkiem automatyzacji, trudno byłoby wyjaśnić równoczesny wzrost nakładów szkoleniowych, rozszerzanie usług i rozwój funkcji badawczo rozwojowych. Gdyby wynik zależał wyłącznie od jakości relacji, nie wyjaśniałoby to skali upowszechnienia narzędzi cyfrowych. Bardziej spójny jest model, w którym technologia zwiększa możliwości pozyskiwania i skalowania wiedzy, relacja umożliwia jej ujawnienie i integrację, a współtworzenie przekształca zasoby w nowe rozwiązania.

Alternatywne wyjaśnienia pozostają istotne. Na eksport mogły wpływać kursy walut, ceny, popyt globalny, napływ inwestycji oraz zmiana lokalizacji usług. Wzrost szkoleń mógł wynikać także z niedoboru kompetencji. Dane sektorowe nie pozwalają ustalić, czy organizacje najbardziej cyfrowe są równocześnie najbardziej dojrzałe relacyjnie. Wniosek należy więc określić jako empiryczne uprawdopodobnienie, a nie przyczynową weryfikację mediacji.

5.2. Weryfikacja odporności wniosków

Ocena odporności wniosków wymaga sprawdzenia, czy zasadnicza interpretacja utrzymuje się po osłabieniu najbardziej wymagających założeń. Po pierwsze, nawet bez przypisywania wzrostu eksportu automatyzacji pozostaje obserwacja, że dynamika wartości była znacznie większa niż dynamika liczby centrów i zatrudnienia. Oznacza to zmianę relacji między wartością a skalą zasobową, chociaż nie identyfikuje jej przyczyny. Po drugie, wniosek o rosnącej cyfrowej intensywności sektora nie zależy od pojedynczego wskaźnika sztucznej inteligencji. Jest wspierany równocześnie przez dane o automatyzacji, strategiach transformacji, profilu nowych centrów, udziale funkcji informatycznych i badawczo rozwojowych oraz strukturze usług wiedzochłonnych. Po trzecie, interpretacja relacyjna jest słabsza empirycznie, ponieważ dostępne raporty nie zawierają reprezentatywnej skali zaufania ani jakości współpracy klienta z dostawcą. Dlatego wielofunkcyjność, szkolenia i rozszerzanie usług traktowane są wyłącznie jako wskaźniki pośrednie, a nie bezpośredni pomiar dojrzałości relacyjnej.

Sprawdzono także zgodność kierunku wnioskowania z wynikami badań naukowych. Literatura dotycząca outsourcingu wskazuje, że efekty zależą od konfiguracji relacji, kontraktu i kontekstu, a nie od samej decyzji o wydzieleniu. Badania cyfryzacji konsekwentnie podkreślają rolę zdolności absorpcyjnej, zwinności, kompetencji i zarządzania procesami. Literatura dotycząca dzielenia się wiedzą pokazuje natomiast, że przepływ wiedzy i zdolność innowacyjna mogą stanowić mechanizmy pośredniczące między zasobami a wynikami. Zbieżność tych niezależnych strumieni badań zwiększa wiarygodność modelu konceptualnego, lecz nie usuwa ograniczeń danych sektorowych.

Dodatkowym testem jest analiza hipotez konkurencyjnych. Wyjaśnienie kosztowe może tłumaczyć lokalizację usług w Polsce, ale słabiej objaśnia wzrost udziału funkcji wymagających wiedzy, inwestycje w szkolenia i szybkie upowszechnianie narzędzi poznawczych. Wyjaśnienie wyłącznie technologiczne nie tłumaczy potrzeby integracji funkcji i kompetencji. Wyjaśnienie oparte wyłącznie na kapitale relacyjnym nie tłumaczy rosnącej roli automatyzacji, analityki i sztucznej inteligencji. Najbardziej oszczędna interpretacja łączy zatem technologię, relację i proces uczenia się, pozostawiając otwartą kwestię względnej siły każdego mechanizmu.

Ważona ocena pewności jest najwyższa dla zmian skali sektora i cyfrowej intensywności, ponieważ opiera się na wielu zgodnych wskaźnikach. Umiarkowana jest dla wzrostu efektywności, gdyż eksport podlega czynnikom zewnętrznym. Najniższa pozostaje dla relacyjnej dojrzałości i mediacji, których pomiar jest pośredni. Taka gradacja zapobiega nadinterpretacji i wyznacza priorytety dla dalszych badań mikroekonomicznych. Z punktu widzenia metod ilościowych oznacza to, że przedstawione zależności należy traktować jako wzorzec współzmienności wsparty triangulacją, a nie jako oszacowanie parametru strukturalnego. Brak danych jednostkowych uniemożliwia kontrolę heterogeniczności przedsiębiorstw, testowanie interakcji między dojrzałością cyfrową i relacyjną oraz wyznaczenie przedziałów ufności dla efektów pośrednich. Nie ma również podstaw do określania kierunku przyczynowości wyłącznie na podstawie kolejności obserwowanych wskaźników. Mimo tych ograniczeń analiza pełni funkcję badania eksploracyjnego: zawęża zbiór prawdopodobnych mechanizmów, wskazuje zmienne wymagające bezpośredniego pomiaru i dostarcza empirycznych przesłanek do zaprojektowania kolejnego badania konfirmacyjnego na przedsiębiorstwach.

6. Dyskusja

Analiza wskazuje na przejście polskiego sektora usług biznesowych od modelu przewagi opartej głównie na skali zasobowej ku modelowi, w którym większe znaczenie mają wiedza, technologia i złożoność funkcji. Wzrost eksportu znacznie szybszy od wzrostu zatrudnienia i liczby centrów jest zgodny z rosnącą intensywnością wartości, choć nie przesądza o jej źródłach. Najważniejszym wnioskiem teoretycznym jest komplementarność dojrzałości cyfrowej i relacyjnej. Technologia bez zdolności koordynacji może przyspieszyć lokalnie proces, ale nie zapewnia rozwiązania problemu przekraczającego granice organizacyjne. Relacja bez infrastruktury danych i automatyzacji może wspierać komunikację, lecz ogranicza skalowanie wiedzy.

Wyniki rozszerzają perspektywę dynamicznych zdolności o poziom międzyorganizacyjny. Rozpoznawanie szans, wykorzystywanie możliwości i rekonfiguracja zasobów mogą odbywać się wspólnie przez klienta i dostawcę. Powstaje wtedy relacyjna zdolność dynamiczna, której nośnikiem są wspólne praktyki, dane, role i reguły działania. Zdolność ta pozostaje jednak strategicznie wartościowa tylko wtedy, gdy wiedza jest instytucjonalizowana i nie zależy wyłącznie od pojedynczych osób.

Istotne jest również rozróżnienie efektywności eksploatacyjnej i rozwojowej. Pierwsza oznacza stabilniejsze, szybsze i tańsze wykonanie obecnego procesu. Druga oznacza zdolność projektowania nowych procesów, usług i modeli współpracy. Kontrakt skoncentrowany wyłącznie na parametrach bieżących może paradoksalnie ograniczać innowacyjność, jeżeli każda eksperymentalna zmiana

zwiększa ryzyko niedotrzymania wskaźników. System zarządzania powinien dlatego równoważyć kontrolę jakości z przestrzenią dla uczenia się.

Z perspektywy zarządzania granicami organizacji outsourcing nie powinien oznaczać utraty zdolności rozumienia własnego modelu operacyjnego. Klient może przekazać wykonanie procesu, ale powinien zachować wiedzę o architekturze, danych, krytycznych ryzykach i zależnościach strategicznych. W przeciwnym razie krótkookresowa efektywność może zostać osiągnięta kosztem przyszłej zdolności negocjacyjnej i innowacyjnej.

7. Implikacje dla zarządzania

Praktyka zarządzania powinna opierać dojrzałość outsourcingu na trzech grupach mierników. Mierniki operacyjne obejmują jakość, koszt, terminowość i bezpieczeństwo. Mierniki rozwojowe powinny uwzględniać liczbę wdrożonych usprawnień, czas od pomysłu do zastosowania, skalę automatyzacji i wartość nowych rozwiązań. Mierniki relacyjne powinny dotyczyć jakości wymiany wiedzy, szybkości rozwiązywania sporów, stabilności zespołów i realizacji wspólnej mapy transformacji.

Organizacje powinny również budować wspólną architekturę uczenia się. Obejmuje ona zespoły przekraczające granice organizacyjne, repozytoria wiedzy, cykliczne przeglądy problemów, zasady eksperymentowania i transfer kompetencji. W portfelu automatyzacji priorytetem nie powinny być procesy najłatwiejsze technologicznie, lecz te, w których usunięcie ograniczenia tworzy mierzalną wartość dla klienta. Klient powinien równocześnie zachować prawa do kluczowych danych i dokumentacji oraz kompetencje pozwalające oceniać rozwiązania dostawcy.

8. Ograniczenia i kierunki dalszych badań

Podstawowym ograniczeniem jest wykorzystanie danych zagregowanych, pochodzących z różnych edycji raportów i częściowo zmiennych definicji. Nie można na ich podstawie estymować siły mediacji ani oddzielić wpływu dojrzałości od koniunktury, kursów walut, struktury popytu i napływu inwestycji. Wskaźniki relacyjne mają charakter pośredni. Dalsze badania powinny objąć pary klient oraz dostawca, zastosować walidowane skale cyfrowej i relacyjnej dojrzałości, osobno mierzyć współtworzenie wiedzy oraz wykorzystać modelowanie równań strukturalnych. Badanie podłużne pozwoliłoby uchwycić opóźnienie pomiędzy rozwojem relacji, wdrożeniem technologii i pojawieniem się wyników ekonomicznych.

9. Wnioski

Cyfrowa i relacyjna dojrzałość outsourcingu wspólnie tworzą zdolność przekształcania zasobów zewnętrznych w innowacyjność, elastyczność i efektywność. Analiza sektora usług biznesowych w Polsce dokumentuje wzrost eksportu, znaczenia usług wiedzochłonnych, automatyzacji i wykorzystania sztucznej inteligencji przy wolniejszym wzroście zasobów ilościowych. Obserwacje są zgodne z modelem, w którym współtworzenie wiedzy pośredniczy między dojrzałością a wynikami, lecz nie stanowią statystycznego dowodu mediacji. Strategiczna wartość outsourcingu powstaje wtedy, gdy partnerzy potrafią łączyć dane i wiedzę, wspólnie interpretować problemy, eksperymentować oraz utrwalać rozwiązania w procesach, zachowując przy tym zdolność klienta do świadomego zarządzania architekturą własnej organizacji.

10. Bibliografia

1 Anna Kwiotkowska, The interplay of resources, dynamic capabilities and technological uncertainty on digital maturity, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2022, nr 155, s. 221–236.

2 Marta Brzozowska, Jadwiga Kaczmarska Krawczak, Katarzyna Kolasińska Morawska, Ewa Stroińska, Competences 4.0 in the logistics sector against the challenges of sustainable digital transformation of the economy in the Polish perspective, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2022, nr 162, s. 53–85.

3 Anna Chwiłkowska Kubala, Kamila Malewska, Katarzyna Mierzejewska, Digital transformation of energy sector enterprises in Poland: Rationale and practices, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2022, nr 162, s. 101–120.

4 Marcin Lis, Jolanta Kotelska, Knowledge based inter organizational cooperation of universities and businesses in the chemical sector, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2023, nr 172, s. 417–451.

5 Anna Brzozowska, Katarzyna Topolska, Virtual cooperation: A contemporary view on the collaboration between businesses in the 21st century, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2023, nr 189, s. 69–85.

6 Lidia Gryszkiewicz, Stephanie Kaudela Baum, Piotr Kopyciński, Marek Oramus, Knowledge sharing networks of higher education institutions for innovation and entrepreneurship: Evidence from the DISCO project case study, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, nr 223, s. 91–111.

7 Sylwia Bąk, Piotr Jedynak, Digital maturity in the era of artificial intelligence: Stimulators of and barriers to organizational changes, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, nr 241, s. 7– 24.

8 Kamila Malewska, Digital transformation of SMEs in the view of dynamic capabilities: A bibliometric analysis, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, nr 225, s. 447–467.
9 Magdalena Jaciow, The implementation gap in the digital maturity of Polish enterprises: Measurement and identification, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, nr 243, s. 257–277.
10 Izabela Marzec, The organisational dimension of digital maturity in public and private institutions, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, nr 243, s. 533–546.
11 Magdalena Dominiczewska, Dynamic capabilities are integral to enabling the twin transition for sustainability and digital transformation, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, nr 243, s. 173–191.
12 Izabela Czaja, Tomasz Kafel, Factors determining digitalization in Polish companies in the context of the European industrial strategy, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2026, nr 246, s. 87–110.
13 Damian Kocot, Maria Kocot, IT outsourcing and factors of increasing the competitiveness of enterprises, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2024, nr 195, s. 287–299.
14 Damian Kocot, Katarzyna Olejko, Activities supporting communication efficiency in the IT outsourcing process in the aspect of own research, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, nr 215, s. 193–207.
15 Urszula Słupska, Aleksandra Pilawa, Benefits and challenges of outsourcing financial and accounting services for contemporary enterprises, „Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series" 2025, nr 220, s. 299–315.
16 Association of Business Service Leaders, Sektor nowoczesnych usług biznesowych w Polsce 2022, Warszawa 2022, passim.
17 Association of Business Service Leaders, Sektor nowoczesnych usług biznesowych w Polsce 2023, Warszawa 2023, passim.
18 Association of Business Service Leaders, Sektor nowoczesnych usług biznesowych w Polsce 2024, Warszawa 2024, passim.
19 Association of Business Service Leaders, Sektor usług biznesowych w Polsce 2025, Warszawa 2025, passim.
20 Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2022 roku, Warszawa, Szczecin 2022, passim.
21 Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2023 roku, Warszawa, Szczecin 2023, passim.
22 Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2024 roku, Warszawa, Szczecin 2024, passim.
23 Główny Urząd Statystyczny, Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2025 roku, Warszawa, Szczecin 2025, passim.
24 Marfri Jay Gambal, Aleksandre Asatiani, Julia Kotlarsky, Strategic innovation through outsourcing: A theoretical review, „The Journal of Strategic Information Systems" 2022, nr 2, t. 31, art. 101718.

25 Erik Beulen, Albert Plugge, Jos van Hillegersberg, Formal and relational governance of artificial intelligence outsourcing, „Information Systems and e-Business Management" 2022, nr 4, t. 20, s. 719–748.
26 Somnath Lahiri, Amit Karna, Sai Chittaranjan Kalubandi, Saneesh Edacherian, Performance implications of outsourcing: A meta-analysis, „Journal of Business Research" 2022, t. 139, s. 1303–1316.
27 Anna Maija Nisula, Kirsimarja Blomqvist, Jukka Pekka Bergman, Seppo Yrjölä, Organizing for knowledge creation in a strategic interorganizational innovation project, „International Journal of Project Management" 2022, nr 4, t. 40, s. 398–410.
28 Wang Dongling, Zhang Yuming, Liu Xinmin, Jiakui Chen, Zhang Xiaoyi, He Chang, Can inter-organizational knowledge-sharing improve enterprise innovation performance? The mediator effect of innovation capability and the moderator effect of network characteristics, „Frontiers in Communication" 2022, t. 7, art. 856301.
29 Yunfei Shi, Tingru Cui, Sherah Kurnia, Value co-creation for digital innovation: An interorganizational boundary-spanning perspective, „Information & Management" 2023, nr 5, t. 60, art. 103817.
30 Luca Joachim Scheuer, Julia Thaler, How do dynamic capabilities affect performance? A systematic review of mediators, „European Management Journal" 2023, nr 6, t. 41, s. 914–931.
31 Chung Chang Lee, Wen Chih Yeh, Zheng Yu, Yuan Chen Luo, Knowledge sharing and innovation performance: A case study on the impact of organizational culture, structural capital, human resource management practices, and relational capital of real estate agents, „Humanities and Social Sciences Communications" 2023, t. 10, art. 707.
32 Ioanna Kastelli, Petros Dimas, Dimitrios Stamopoulos, Aggelos Tsakanikas, Linking digital capacity to innovation performance: The mediating role of absorptive capacity, „Journal of the Knowledge Economy" 2024, t. 15, s. 238–272.
33 Mengxin Zhang, Xihui Chen, Hongming Xie, Luca Esposito, Anna Parziale, Shilpa Taneja, Ahsan Siraj, Top of tide: Nexus between organization agility, digital capability and top management support in SME digital transformation, „Heliyon" 2024, nr 10, t. 10, art. e31579.
34 Hasdi Putra, Mahendrawathi ER, The role of business process management in digital innovation and digital transformation: A systematic literature review, „Procedia Computer Science" 2024, t. 234, s. 829–836.
35 Liam Murphy, The influence of IT outsourcing on organisational success and innovation, „Future Business Journal" 2024, nr 1, t. 10, art. 84.
36 Joel Ma, Muammer Ozer, Innovation outsourcing versus joint innovation in collaboration with suppliers: A strategic relational-institutional perspective, „Industrial Marketing Management" 2024, t. 120, s. 78–89.
37 Ilan Oshri, Federica Angeli, Julia Kotlarsky, Jatinder S. Sidhu, Sustaining IT outsourcing performance during a systemic crisis: A configurational approach, „The Journal of Strategic Information Systems" 2025, nr 1, t. 34, art. 101872.
38 Yi Jin, Bo Liu, Knowledge co-creation in innovation ecosystems and breakthrough innovation: The contradictory roles of capability reconfiguration, „The Journal of Technology Transfer" 2025, publikacja internetowa wyprzedzająca druk, DOI 10.1007/s10961-025-10292-w.

39 Jeoung Yul Lee, Lin Cui, Chinmay Pattnaik, Byungchul Choi, Digital transformation and the offshore outsourcing behavior of manufacturing MNEs, „Journal of International Business Studies" 2025, publikacja internetowa wyprzedzająca druk, DOI 10.1057/s41267-025-00816-9.
40 João J. M. Ferreira, Cristina I. Fernandes, Pedro Mota Veiga, The effects of knowledge spillovers, digital capabilities, and innovation on firm performance: A moderated mediation model, „Technological Forecasting and Social Change" 2024, t. 200, art. 123086.
41 Qiang Cheng, Chun Peng, Yuanhui Dai, Shuangyang Zhang, Unlocking interorganizational knowledge sharing: the mediating role of knowledge digitization in the age of digital innovation, „Journal of Knowledge Management" 2026, nr 1, t. 30, s. 69–89.

Jakub Krzysiak

Politechnika Lubelska, Szkoła Doktorska

Czas reakcji na sygnały akustyczne jako kryterium projektowe lokalnego systemu wspomagającego dla osób z ubytkiem słuchu dedykowanego w formie aplikacji na urządzenia mobilne

Słowa kluczowe: *ubytek słuchu, czas reakcji, technologie asystujące, detekcja zdarzeń dźwiękowych, aplikacja mobilna, przetwarzanie brzegowe*

Streszczenie

Artykuł ma charakter przeglądowo-koncepcyjny. Omówiono w nim problem percepcji akustycznych sygnałów ostrzegawczych przez osoby z ubytkiem słuchu oraz zaproponowano, aby czas reakcji człowieka na sygnał traktować nie tylko jako wielkość psychofizjologiczną, lecz jako nadrzędne kryterium projektowe mobilnego systemu wspomagającego. Przedstawiono pojęcie budżetu czasowego ścieżki „zdarzenie – wykrycie – powiadomienie – reakcja", wskazano czynniki wpływające na poszczególne jego składowe oraz omówiono zalety i ograniczenia architektury lokalnej (przetwarzanie na urządzeniu, bez udziału chmury). Rozważania osadzono w kontekście innowacyjności i konkurencyjności rozwiązań z obszaru technologii asystujących.

1. Wstęp

2. Według Światowej Organizacji Zdrowia ubytek słuchu dotyczy obecnie ponad 1,5 mld osób na świecie, a u około 430 mln ma on charakter wymagający rehabilitacji; prognozy wskazują, że do 2050 roku liczba osób z pewnym stopniem ubytku słuchu może sięgnąć 2,5 mld[42]. Skala zjawiska sprawia, że problem przestaje być niszowy, a staje się zagadnieniem społecznym, gospodarczym i technologicznym.

3. Środowisko, w którym funkcjonujemy, w znacznej mierze komunikuje zagrożenie dźwiękiem: syrena pojazdu uprzywilejowanego, klakson, alarm pożarowy, sygnał cofającego pojazdu czy dzwonek przejazdu kolejowego. Sygnały te projektowano z założeniem, że odbiorca je usłyszy, co odzwierciedlają

42 World Health Organization. World report on hearing. Geneva: WHO; 2021.

również normy dotyczące akustycznych sygnałów niebezpieczeństwa[43]. Dla osoby niesłyszącej lub niedosłyszącej informacja o zagrożeniu bywa więc niedostępna albo docierać może zbyt późno, by skutecznie zareagować.

4. Smartfon i smartwatch – urządzenia powszechnie dostępne, wyposażone w mikrofony, moduł wibracji i wydajne procesory – stanowią naturalną platformę do „tłumaczenia" zdarzeń akustycznych na bodźce wizualne i dotykowe. Istniejące prace badawcze i rozwiązania komercyjne pokazują, że jest to technicznie wykonalne[44]. Rzadziej jednak stawia się pytanie, *jak szybko* taki system musi działać, by jego użycie realnie zwiększało bezpieczeństwo. Celem niniejszego artykułu jest zarysowanie tego zagadnienia i wskazanie, dlaczego czas reakcji powinien być punktem wyjścia, a nie efektem ubocznym procesu projektowego.

5. Czas reakcji – podstawowe pojęcia

6. Czas reakcji to odstęp między pojawieniem się bodźca a rozpoczęciem odpowiedzi motorycznej. Klasyczna psychologia eksperymentalna rozróżnia czas reakcji prostej (jeden bodziec, jedna odpowiedź) oraz czas reakcji z wyborem, który rośnie wraz z liczbą możliwych bodźców i odpowiedzi; zależność tę opisuje prawo Hicka–Hymana[45]. Obszerną syntezę badań nad czasami reakcji i ich modelami przedstawia monografia Luce'a[46]. Z punktu widzenia projektowania interfejsów przydatny jest także model Card, Morana i Newella, rozkładający reakcję na etapy percepcyjny, poznawczy i motoryczny[47].

---

43 ISO 7731:2003. Ergonomics – Danger signals for public and work areas – Auditory danger signals. Geneva: International Organization for Standardization; 2003.

44 Bragg D, Huynh N, Ladner RE. A personalizable mobile sound detector app design for deaf and hard-of-hearing users. In: Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS '16). ACM; 2016. p. 3–13.

Jain D, Mack K, Amrous A, Wright M, Goodman S, Findlater L, Froehlich JE. HomeSound: an iterative field deployment of an in-home sound awareness system for deaf or hard of hearing users. In: Proceedings of CHI 2020. ACM; 2020.

Jain D, Ngo H, Patel P, Goodman S, Findlater L, Froehlich JE. SoundWatch: exploring smartwatch-based deep learning approaches to support sound awareness for deaf and hard of hearing users. In: Proceedings of ASSETS '20. ACM; 2020

45 Hick WE. On the rate of gain of information. Quarterly Journal of Experimental Psychology. 1952;4(1):11–26.

Hyman R. Stimulus information as a determinant of reaction time. Journal of Experimental Psychology. 1953;45(3):188–196.

46 Luce RD. Response times: their role in inferring elementary mental organization. New York: Oxford University Press; 1986.

47 Card SK, Moran TP, Newell A. The psychology of human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1983.

7. Istotne dla omawianego problemu są trzy obserwacje. Po pierwsze, czas reakcji zależy od modalności bodźca – inaczej reagujemy na bodziec słuchowy, wzrokowy i dotykowy. Po drugie, w warunkach rzeczywistych czas reakcji jest wyraźnie dłuższy niż w laboratorium, ponieważ uwaga jest rozproszona, a bodziec konkuruje z innymi zadaniami. Teoria zasobów wielokrotnych Wickensa wskazuje, że kanały, które nie są aktualnie obciążone (np. dotyk podczas patrzenia na drogę), mogą przenosić sygnał skuteczniej[48]. Po trzecie, sama reakcja nie wystarcza – użytkownik musi zrozumieć, *co* się dzieje, zatem liczba i czytelność kategorii powiadomień wpływają na czas decyzji, zgodnie z prawem Hicka–Hymana.
8. Dla osoby słyszącej sygnał akustyczny jest odbierany bezpośrednio. Osoba z ubytkiem słuchu otrzymuje ten sam komunikat pośrednio – przez urządzenie, które musi go najpierw wykryć, rozpoznać i przekazać w innej modalności. Każdy z tych etapów wnosi dodatkowe opóźnienie.

9. Czas reakcji jako kryterium projektowe

10. Proponowane podejście polega na odwróceniu typowej kolejności projektowania. Zamiast budować system i następnie mierzyć jego opóźnienie, przyjmuje się jako punkt odniesienia czas reakcji osoby słyszącej na dany sygnał ostrzegawczy. Celem projektowym jest zbliżenie łącznego czasu od wystąpienia zdarzenia do reakcji użytkownika z ubytkiem słuchu do tego punktu odniesienia, przy zachowaniu wysokiej skuteczności ostrzegania. Całkowity czas można zapisać jako sumę składowych:

$$T_{\text{całk}} = t_{\text{akw}} + t_{\text{det}} + t_{\text{pow}} + t_{\text{perc}} + t_{\text{odp}}$$

11. gdzie poszczególne składniki oznaczają kolejno: akwizycję dźwięku, detekcję i klasyfikację zdarzenia, dostarczenie powiadomienia, percepcję bodźca zastępczego oraz decyzję i odpowiedź ruchową użytkownika. Pierwsze trzy składniki leżą po stronie techniki i podlegają optymalizacji inżynierskiej; dwa ostatnie wynikają z właściwości człowieka, ale projektant wpływa na nie pośrednio – poprzez wybór modalności, intensywności i czytelności komunikatu.

Tabela 1. Składowe budżetu czasowego systemu wspomagającego (opracowanie własne)

Składowa	Główne czynniki	Możliwości wpływu projektanta
Akwizycja (t_{akw})	długość bufora audio, położenie urządzenia (kieszeń, nadgarstek), poziom tła	krótkie ramki analizy, ciągłe nasłuchiwanie w tle, przetwarzanie strumieniowe

48 Wickens CD. Multiple resources and performance prediction. Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2002;3(2):159–177.

Składowa	Główne czynniki	Możliwości wpływu projektanta
Detekcja (t_{det})	złożoność modelu, liczba klas, moc obliczeniowa urządzenia	lekkie modele sieci neuronowych, kwantyzacja, ograniczenie klas do zagrożeń
Powiadomienie (t_{pow})	opóźnienia systemu operacyjnego, łączność z zegarkiem lub chmurą	ograniczenie pośredników w transmisji, priorytet powiadomień krytycznych
Percepcja (t_{perc})	modalność bodźca, obciążenie uwagi, warunki otoczenia	wibracja jako kanał główny, wzorce wibracji rozróżnialne dotykiem, błysk ekranu
Odpowiedź (t_{odp})	liczba kategorii, jednoznaczność komunikatu, trening użytkownika	niewielka liczba czytelnych kategorii, spójne kodowanie kierunku i typu zagrożenia

Źródło: Opracowanie własne

12. Szybkość nie może być jednak jedynym kryterium. System, który reaguje błyskawicznie, ale nie wykrywa części zagrożeń, lub którego powiadomienie pozostaje niezauważone, nie spełnia swojej funkcji – brak reakcji jest w praktyce gorszy niż reakcja opóźniona. Kryterium czasowe musi więc iść w parze z wysoką skutecznością wykrywania zagrożeń i ograniczaniem przypadków braku reakcji użytkownika. Takie ujęcie ma kilka praktycznych konsekwencji. Pozwala porównywać różne warianty systemu również pod względem czasu do reakcji, obok skuteczności wykrywania zagrożeń. Ujawnia też kompromisy: model bardziej rozbudowany może trafniej rozpoznawać dźwięki, ale jeśli wydłuża detekcję, jego przewaga w sytuacji zagrożenia może okazać się pozorna. Wreszcie wymusza włączenie do procesu projektowego samych użytkowników, ponieważ składowe percepcji i odpowiedzi można wiarygodnie określić wyłącznie w badaniach z udziałem osób niesłyszących i niedosłyszących.
13. Pomiary czasu reakcji na akustyczne sygnały niebezpieczeństwa, mogące służyć jako punkt odniesienia dla takiego podejścia, autor przedstawia w odrębnej publikacji[49]. Nie obejmowały one porównania modalności bodźców ani oceny działania systemu wspomagającego – zagadnienia te pozostają przedmiotem dalszych prac. Niniejszy tekst ogranicza się do ramy koncepcyjnej i jej implikacji dla projektowania.

14. Architektura lokalna – niezależność od sieci i prywatność

15. W architekturze lokalnej cały łańcuch – od mikrofonu do wibracji – realizowany jest na urządzeniu użytkownika. Jej główną zaletą jest niezależność

49 Krzysiak J, Hedrih A, Rusinek R, Wydra M. Reaction time to hazardous acoustic signals as a design benchmark for a local assistive system for people with hearing loss. Advances in Science and Technology Research Journal. Przyjęty do druku (t. 21, 2027).

od Internetu: system oparty na chmurze w miejscach bez zasięgu (tunele, parkingi podziemne, tereny pozamiejskie) traci funkcję ostrzegawczą, a jego opóźnienie zależy od jakości połączenia. Nie oznacza to jednak, że przetwarzanie lokalne jest zawsze najszybsze – serwer dysponuje większą mocą obliczeniową, a lekki model uruchomiony na słabszym urządzeniu może działać wolniej niż model w chmurze przy dobrym połączeniu. Wybór architektury powinien więc wynikać z pomiaru rzeczywistego budżetu czasowego, a rozwiązania hybrydowe pozostają uzasadnioną opcją. Postęp w dziedzinie detekcji zdarzeń dźwiękowych[50], dostępność dużych zbiorów danych, takich jak AudioSet[51], oraz modele wstępnie wytrenowane[52] umożliwiają dziś uruchamianie klasyfikatorów bezpośrednio na urządzeniach mobilnych. Wcześniejsze prace nad aplikacjami dla osób z ubytkiem słuchu, w tym z wykorzystaniem smartwatcha, potwierdzają praktyczną wykonalność takiego rozwiązania[53].

16. Architektura lokalna ma również wymiar etyczny i prawny. Ciągłe nasłuchiwanie otoczenia oznacza przetwarzanie dźwięków, które mogą zawierać rozmowy osób trzecich. Analiza na urządzeniu, bez zapisu i przesyłania nagrań, istotnie ogranicza ryzyko naruszenia prywatności i ułatwia zgodność z przepisami o ochronie danych. Dla użytkownika oznacza to większe zaufanie do narzędzia, co w technologiach asystujących jest warunkiem jego rzeczywistego używania.

17. Nie bez znaczenia pozostaje energochłonność. System działający w trybie ciągłym musi być oszczędny, dlatego rozważa się rozwiązania dwustopniowe: prosty, energooszczędny detektor zdarzeń akustycznych uruchamia bardziej złożony klasyfikator dopiero wtedy, gdy w otoczeniu pojawi się dźwięk o potencjalnym znaczeniu ostrzegawczym.

---

50 Mesaros A, Heittola T, Virtanen T, Plumbley MD. Sound event detection: a tutorial. IEEE Signal Processing Magazine. 2021;38(5):67–83.

51 Gemmeke JF, Ellis DPW, Freedman D, Jansen A, Lawrence W, Moore RC, Plakal M, Ritter M. Audio Set: an ontology and human-labeled dataset for audio events. In: Proceedings of IEEE ICASSP 2017. p. 776–780.

52 Hershey S, Chaudhuri S, Ellis DPW, et al. CNN architectures for large-scale audio classification. In: Proceedings of IEEE ICASSP 2017. p. 131–135.

Kong Q, Cao Y, Iqbal T, Wang Y, Wang W, Plumbley MD. PANNs: large-scale pretrained audio neural networks for audio pattern recognition. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2020;28:2880–2894

53 Jain D, Mack K, Amrous A, Wright M, Goodman S, Findlater L, Froehlich JE. HomeSound: an iterative field deployment of an in-home sound awareness system for deaf or hard of hearing users. In: Proceedings of CHI 2020. ACM; 2020.

Jain D, Ngo H, Patel P, Goodman S, Findlater L, Froehlich JE. SoundWatch: exploring smartwatch-based deep learning approaches to support sound awareness for deaf and hard of hearing users. In: Proceedings of ASSETS ’20. ACM; 2020

18. Innowacyjność i konkurencyjność rozwiązania

19. Rynek technologii asystujących dla osób z ubytkiem słuchu tradycyjnie koncentrował się na aparatach słuchowych i implantach, a więc na poprawie samego słyszenia. Aplikacje mobilne rozpoznające dźwięki stanowią uzupełnienie tego podejścia: nie przywracają słuchu, lecz zastępują utraconą informację innym kanałem sensorycznym. Ich przewagą konkurencyjną jest niski próg wejścia – wykorzystują sprzęt, który użytkownik zazwyczaj już posiada – oraz możliwość szybkiej aktualizacji i personalizacji[54].

20. Wyróżnikiem proponowanego podejścia jest oparcie specyfikacji systemu na mierzalnym, zorientowanym na człowieka kryterium czasowym. Pozwala to jasno komunikować wartość rozwiązania – zarówno użytkownikom i ich organizacjom, jak i potencjalnym partnerom wdrożeniowym, np. pracodawcom zobowiązanym do zapewnienia bezpieczeństwa pracownikom z niepełnosprawnością słuchu czy zarządcom przestrzeni publicznej. Wskaźnik czasu do reakcji może stać się elementem specyfikacji zamówień oraz podstawą porównań między produktami, podobnie jak parametry akustyczne w normach dotyczących sygnałów niebezpieczeństwa[55].

21. Warto zaznaczyć, że rozwiązanie projektowane z myślą o osobach z ubytkiem słuchu może znaleźć szersze zastosowanie – u osób pracujących w ochronnikach słuchu, w hałaśliwym środowisku przemysłowym czy u osób starszych z postępującym, często niezdiagnozowanym pogorszeniem słuchu. Jest to przykład projektowania uniwersalnego, w którym potrzeba jednej grupy prowadzi do innowacji użytecznej dla wielu.

22. Ograniczenia i kierunki dalszych prac

23. Przedstawiona rama ma charakter koncepcyjny i wymaga dalszego doprecyzowania. Punkt odniesienia, jakim jest czas reakcji osoby słyszącej, różni się w zależności od rodzaju sygnału, wieku użytkownika i kontekstu sytuacyjnego, dlatego nie powinien być traktowany jako jedna stała wartość. Otwarta pozostaje kwestia fałszywych alarmów: zbyt częste powiadomienia prowadzą do ich ignorowania, co w praktyce wydłuża reakcję na alarm prawdziwy. Konieczne są także badania terenowe w warunkach codziennego użytkowania oraz dalsza współpraca ze społecznością osób głuchych i niedosłyszących przy projektowaniu wzorców powiadomień.

---

54 Bragg D, Huynh N, Ladner RE. A personalizable mobile sound detector app design for deaf and hard-of-hearing users. In: Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS '16). ACM; 2016. p. 3–13

55 ISO 7731:2003. Ergonomics – Danger signals for public and work areas – Auditory danger signals. Geneva: International Organization for Standardization; 2003.

24. Podsumowanie

25. Czas reakcji na sygnał ostrzegawczy jest wielkością, która bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo użytkownika. Potraktowanie go jako nadrzędnego kryterium projektowego porządkuje proces tworzenia mobilnego systemu wspomagającego dla osób z ubytkiem słuchu, pod warunkiem że idzie w parze ze skutecznym wykrywaniem zagrożeń: wskazuje, które elementy techniczne wymagają optymalizacji, pozwala świadomie wybrać architekturę przetwarzania i łączy parametry inżynierskie z doświadczeniem użytkownika. W szerszej perspektywie podejście to wpisuje się w rozwój innowacyjnych i konkurencyjnych technologii asystujących, opartych na powszechnie dostępnych urządzeniach i mierzalnych korzyściach dla odbiorcy.

26. Bibliografia

Bragg D, Huynh N, Ladner RE. A personalizable mobile sound detector app design for deaf and hard-of-hearing users. In: Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS ’16). ACM; 2016. p. 3–13.

Card SK, Moran TP, Newell A. The psychology of human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1983.

Gemmeke JF, Ellis DPW, Freedman D, Jansen A, Lawrence W, Moore RC, Plakal M, Ritter M. Audio Set: an ontology and human-labeled dataset for audio events. In: Proceedings of IEEE ICASSP 2017. p. 776–780.

Hershey S, Chaudhuri S, Ellis DPW, et al. CNN architectures for large-scale audio classification. In: Proceedings of IEEE ICASSP 2017. p. 131–135.

Hick WE. On the rate of gain of information. Quarterly Journal of Experimental Psychology. 1952;4(1):11–26.

Hyman R. Stimulus information as a determinant of reaction time. Journal of Experimental Psychology. 1953;45(3):188–196.

ISO 7731:2003. Ergonomics – Danger signals for public and work areas – Auditory danger signals. Geneva: International Organization for Standardization; 2003.

Jain D, Mack K, Amrous A, Wright M, Goodman S, Findlater L, Froehlich JE. HomeSound: an iterative field deployment of an in-home sound awareness system for deaf or hard of hearing users. In: Proceedings of CHI 2020. ACM; 2020.

Jain D, Ngo H, Patel P, Goodman S, Findlater L, Froehlich JE. SoundWatch: exploring smartwatch-based deep learning approaches to support sound awareness for deaf and hard of hearing users. In: Proceedings of ASSETS ’20. ACM; 2020.

Kong Q, Cao Y, Iqbal T, Wang Y, Wang W, Plumbley MD. PANNs: large-scale pretrained audio neural networks for audio pattern recognition. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2020;28:2880–2894.

Krzysiak J, Hedrih A, Rusinek R, Wydra M. Reaction time to hazardous acoustic signals as a design benchmark for a local assistive system for people with hearing loss. Advances in Science and Technology Research Journal. Przyjęty do druku (t. 21, 2027).

Luce RD. Response times: their role in inferring elementary mental organization. New York: Oxford University Press; 1986.

Mesaros A, Heittola T, Virtanen T, Plumbley MD. Sound event detection: a tutorial. IEEE Signal Processing Magazine. 2021;38(5):67–83.
Wickens CD. Multiple resources and performance prediction. Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2002;3(2):159–177.
World Health Organization. World report on hearing. Geneva: WHO; 2021.

Ewa Muzal [1,2,3]dr Kinga Wzgarda-Raj [1] dr hab. Zdzisław Kinart, prof. UŁ [1]

1.Uniwersytet Łódzki, Wydział Chemii, Katedra Chemii Fizycznej, ul. Pomorska 163/165, 90-236 Łódź

2.Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Uniwersytet Łódzki, ul. Matejki 21/23, 90-237 Łódź

3. GALA POLAND Sp. z o.o., ul. Fabryczna 10, 98-300 Wieluń

Innowacyjne metody kontroli stabilności materiałowej jako czynnik konkurencyjności przedsiębiorstw produkcyjnych na przykładzie parafinowo-roślinnych systemów organicznych

Słowa kluczowe: systemy parafinowo-roślinne, konkurencyjność, jakość, DSC, materiały organiczne

Streszczenie

Przesłanką opracowania jest rosnące znaczenie stabilności materiałowej jako czynnika jakości, kosztów i przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw produkcyjnych. Celem pracy jest przedstawienie wykorzystania zaawansowanej analityki materiałowej do ograniczania wad w parafinowo-roślinnych systemach organicznych stosowanych w produktach konsumenckich. Analiza obejmuje zależność między parametrami procesu, warunkami przechowywania oraz powstawaniem defektów wizualnych i strukturalnych. W pracy wykorzystano podejście analityczno-aplikacyjne oparte na interpretacji danych termicznych, spektroskopowych, statystycznych i makroskopowych. Wykazano, że połączenie kontroli procesu z mierzalnymi wskaźnikami stabilności może wspierać prewencyjne zarządzanie jakością, ograniczać straty produkcyjne i wzmacniać konkurencyjność przedsiębiorstwa. Przedstawiono również praktyczny model wdrożenia badań materiałowych do systemu kontroli jakości oraz wskazano możliwość dalszego rozwoju w kierunku predykcyjnego monitorowania procesu.

27. Wstęp

Innowacyjność w przedsiębiorstwach produkcyjnych nie ogranicza się obecnie do wdrażania nowych produktów lub automatyzacji. Coraz większe znaczenie ma zdolność do przewidywania problemów jakościowych, ograniczania strat surowcowych i utrzymywania powtarzalności wyrobu w całym cyklu życia

produktu. W warunkach wysokiej konkurencji odbiorca ocenia nie tylko funkcjonalność, lecz także estetykę, trwałość i zgodność produktu z deklarowaną jakością[56].

Szczególne znaczenie ma to w przypadku wyrobów konsumenckich opartych na złożonych układach organicznych, takich jak: mieszaniny parafin, frakcji roślinnych, dodatków zapachowych i barwników. Ich właściwości zależą od składu, temperatury przetwarzania, szybkości chłodzenia, sposobu homogenizacji czy warunków magazynowania. Nawet niewielkie różnice procesu mogą prowadzić do zmian w krystalizacji, migracji składników niskotopliwych lub reorganizacji struktury materiału.

Zaawansowana analityka fizykochemiczna może być istotnym elementem innowacyjnego zarządzania jakością. Jej wykorzystanie pozwala powiązać właściwości materiałów z przebiegiem procesu technologicznego, a tym samym wspierać optymalizację produkcji, ograniczanie wad oraz budowanie przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa[57].

28. Stabilność materiałowa jako element konkurencyjności przedsiębiorstwa

Konkurencyjność przedsiębiorstwa produkcyjnego obejmuje zdolność do oferowania wyrobów spełniających oczekiwania odbiorców przy jednoczesnym utrzymaniu kosztów, terminowości i powtarzalności jakości. W produktach o silnym komponencie estetycznym wada wizualna może obniżyć wartość handlową nawet wtedy, gdy podstawowa funkcja wyrobu pozostaje zachowana[58].

Defekty takie jak pęknięcia, ubytki, zmętnienia powierzchni, pocenie się produktu czy niejednorodność wizualna oddziałują zarówno na proces technologiczny, jak i na koszty oraz wizerunek przedsiębiorstwa. Generują koszty selekcji, naprawy, ponownego przetwarzania, utylizacji oraz obsługi reklamacji. Z tego względu kontrola jakości powinna wykraczać poza ocenę gotowego produktu i obejmować identyfikację przyczyn niestabilności materiałowej.

W takim ujęciu stabilność materiałowa staje się elementem przewagi konkurencyjnej. Przedsiębiorstwo, które potrafi powiązać parametry technologiczne z późniejszym zachowaniem produktu, może szybciej reagować

---

[56] Bloch P.H., Seeking the ideal form: Product design and consumer response, Journal of Marketing, 59, 1995.
Hamrol A., Zarządzanie jakością z przykładami, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.

[57] Stankiewicz M.J., Konkurencyjność przedsiębiorstwa. Budowanie konkurencyjności przedsiębiorstwa w warunkach globalizacji, Wydawnictwo Domu Organizatora, Toruń 2005.

[58] Urbaniak M., Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka, Difin, Warszawa 2004.

na nieprawidłowości w przebiegu procesu i ograniczać ryzyko wad ukrytych, ujawniających się dopiero podczas magazynowania lub transportu.

29. Problem technologiczny parafinowo-roślinnych systemów organicznych

Parafinowo-roślinne systemy organiczne są układami wieloskładnikowymi. Parafina, zbudowana głównie z n-alkanów, wykazuje względnie uporządkowane zachowanie krystalizacyjne. Komponenty roślinne, w tym częściowo uwodornione oleje, wprowadzają większą złożoność wynikającą z odmiennej budowy chemicznej, obecności frakcji o różnych temperaturach topnienia oraz możliwego polimorfizmu lipidów[59].

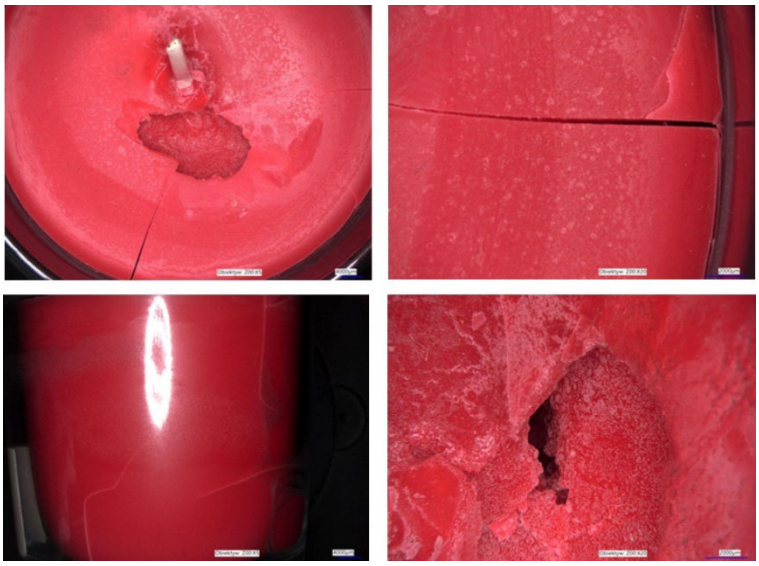
Dodatki zapachowe, barwniki i modyfikatory mogą pełnić funkcję lokalnych czynników zaburzających krystalizację. W konsekwencji końcowa struktura materiału zależy nie tylko od receptury, lecz także od historii termicznej. Proces prowadzony w innych warunkach temperaturowych może prowadzić do odmiennego stopnia homogenizacji, różnej liczby centrów nukleacji i odmiennego rozkładu frakcji krystalicznych.

We wcześniejszych badaniach analizowano układy wytwarzane w dwóch wariantach technologicznych i przechowywane w różnych temperaturach. Uzyskane wyniki wskazały, że zarówno warunki procesu, jak i magazynowania wpływają na profile topnienia i krystalizacji oraz na prawdopodobieństwo powstawania wad makroskopowych. W niniejszym artykule stanowią one podstawę do opracowania modelu kontroli jakości ukierunkowanego na innowacyjność i konkurencyjność przedsiębiorstwa[60]. Typowe manifestacje tych problemów technologicznych, w postaci pęknięć strukturalnych, ubytków oraz powierzchniowych niejednorodności krystalicznych, zaobserwowane przy użyciu mikroskopii cyfrowej, przedstawia Rys. 1.

---

[59] Sato K., Crystallization behaviour of fats and lipids - a review, Chemical Engineering Science, 56, 2001.
Zhou Y., Hartel R.W., Phase behavior and crystallization of lipid-based materials, Annual Review of Food Science and Technology, 8, 2017.

[60] Muzal E., Wzgarda-Raj K., Kinart Z., Multiscale Physicochemical Analysis of Defect Formation in Paraffin-Based Organic Systems: DSC Evaluation of Processing and Storage Conditions, Processes, 14, 2026



Rys. 1. Makroskopowe i mikroskopowe przejawy niestabilności strukturalnej w parafinowo-roślinnych układach organicznych
Źródło: Opracowanie własne

30. Metodyka analityczna i jej znaczenie aplikacyjne

W ocenie stabilności omawianych układów szczególne znaczenie ma różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC), która umożliwia analizę procesów topnienia i krystalizacji. Parametry takie jak temperatura początku przemiany, temperatura maksimum piku, entalpia topnienia i krystalizacji oraz stopień przechłodzenia mogą stanowić wskaźniki jednorodności i powtarzalności materiału[61].

Metodą uzupełniającą jest spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FT-IR), pozwalająca ocenić zmiany w środowisku molekularnym, w tym organizację łańcuchów alifatycznych oraz obecność pasm charakterystycznych dla określonych grup funkcyjnych. Połączenie analizy termicznej i spektroskopowej umożliwia przejście od prostej oceny wizualnej do pogłębionej diagnostyki przyczyn defektów.

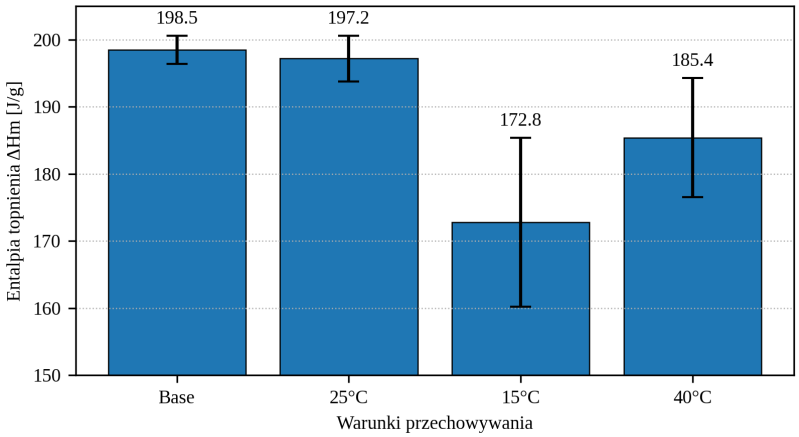
W praktyce przemysłowej kluczowe jest przełożenie wyników laboratoryjnych na kryteria decyzyjne. Obejmuje to identyfikację krytycznych

[61] Rastogi S., Crystallization and morphology of polymeric materials, Springer, Berlin 2012. Wesołowski M., Erecińska J., Thermal analysis in quality control of pharmaceutical and organic materials, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 88, 2007.

parametrów procesu, określenie akceptowalnych zakresów wartości pomiarowych oraz wskazanie poziomu zmienności, który może sygnalizować ryzyko niestabilności partii.

31. Wyniki jako podstawa decyzji jakościowych

Analiza danych termicznych wskazuje, że warunki przechowywania istotnie wpływają na właściwości materiału. Najbardziej niekorzystny efekt zaobserwowano dla próbek przechowywanych w temperaturze 15°C, dla których odnotowano obniżenie entalpii topnienia oraz wyraźny wzrost zmienności wyników. W ujęciu praktycznym oznacza to mniejszą powtarzalność struktury i większe ryzyko ujawnienia defektów po zakończeniu produkcji (Rys. 2.)



Rys. 2. Wpływ warunków przechowywania na entalpię topnienia układu parafinowo-roślinnego
Źródło: Opracowanie własne

Z punktu widzenia przedsiębiorstwa znaczenie ma nie tylko średnia wartość parametru, ale również jego zmienność wyrażona odchyleniem standardowym. Jej wzrost wskazuje na mniejszą przewidywalność jakościową partii, utrudnia stabilizację procesu i może zwiększać ryzyko reklamacji. Wybrane wartości entalpii topnienia, wyznaczone dla liczebności n = 120 próbek w każdym wariancie (przy dwukrotnym powtórzeniu pomiaru dla weryfikacji powtarzalności), przedstawiono w Tab. 1.

Tab. 1. Wybrane wartości entalpii topnienia parafinowo-roślinnego systemu organicznego

Parametr	Grupa	Liczebność (n)	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Poziom istotności statystycznej (p)*
Entalpia topnienia ΔH_m [J/g]	Próbka referencyjna	120	198,5	2,1	-
Entalpia topnienia ΔH_m [J/g]	25°C	120	197,2	3,4	0,412
Entalpia topnienia ΔH_m [J/g]	15°C	120	172,8	12,6	<0,001
Entalpia topnienia ΔH_m [J/g]	40°C	120	185,4	8,9	0,024

*Wartości p wyznaczono za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA) z zastosowaniem testu post-hoc Dunnetta dla porównań wielokrotnych względem grupy referencyjnej, przy czym dla każdej z 120 próbek uwzględniono średnią z dwóch pomiarów weryfikacyjnych.
Źródło: Opracowanie własne

Dane zestawione w Tab. 1 wskazują, że próbki przechowywane w temperaturze 15°C różnią się od grup referencyjnych zarówno średnią wartością entalpii topnienia, jak i poziomem zmienności wyników. W praktyce takie wyniki mogą pełnić funkcję wczesnego ostrzeżenia: partia produktu nie musi jeszcze wykazywać widocznych wad, ale jej profil termiczny może wskazywać na większe ryzyko późniejszej reorganizacji struktury. Tego typu diagnostyka wpisuje się w logikę kontroli prewencyjnej, w której decyzja technologiczna jest podejmowana przed ujawnieniem problemu na rynku.

32. Model wdrożenia w przedsiębiorstwie

Wyniki analiz fizykochemicznych można przekształcić w prosty model zarządzania jakością. Pierwszym etapem jest identyfikacja krytycznych parametrów procesu: temperatury zalewania, czasu homogenizacji, szybkości chłodzenia oraz temperatury przechowywania. Drugim etapem jest wybór mierzalnych wskaźników jakości, takich jak ΔH_m, T_{onset}, ΔT lub wybrane relacje intensywności pasm FT-IR. Trzecim etapem jest ustalenie dopuszczalnych zakresów zmienności, a czwartym wdrożenie procedur korygujących.

Procedury te mogą obejmować zmianę temperatury procesu, wydłużenie homogenizacji, korektę chłodzenia, dodatkowe sezonowanie partii lub zmianę warunków magazynowania. Istotne jest, aby decyzje te były oparte na danych, a nie wyłącznie na końcowej ocenie wizualnej. Tak rozumiana analityka materiałowa wspiera przejście od reaktywnej kontroli jakości do systemu predykcyjnego.

W dłuższej perspektywie dane z analiz DSC, FT-IR i kontroli makroskopowej mogą zasilać bazy produkcyjne. Ich powiązanie z informacjami o reklamacjach, sezonowości, partiach surowca oraz parametrach linii technologicznej może

umożliwić tworzenie modeli predykcyjnych i wspierać rozwój produkcji opartej na danych.

33. Wymiar gospodarczy i środowiskowy

Wdrożenie kontroli stabilności materiałowej ma bezpośrednie znaczenie ekonomiczne. Ograniczenie wad zmniejsza koszty braków, reklamacji, ponownego przetwarzania oraz utylizacji. Poprawa powtarzalności produktu wzmacnia również zaufanie odbiorców i może stanowić element przewagi marketingowej.

Istotny jest także wymiar środowiskowy. Każdy wadliwy produkt oznacza zużycie surowców, energii, opakowań i pracy, które nie przekładają się na pełnowartościowy wyrób. Redukcja braków produkcyjnych jest więc działaniem zgodnym z ideą efektywnego gospodarowania zasobami i może wspierać budowanie odpowiedzialnego wizerunku przedsiębiorstwa.

Istotną cechą przedstawionego podejścia jest jego interdyscyplinarny charakter. Łączy ono analitykę materiałową, zarządzanie jakością, analizę danych, optymalizację kosztów oraz aspekty środowiskowe. Takie ujęcie zwiększa praktyczną wartość proponowanego rozwiązania i pozwala traktować je jako przykład innowacji możliwej do wdrożenia w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

34. Dyskusja

Przedstawione podejście wskazuje, że badania fizykochemiczne mogą pełnić funkcję strategiczną, a nie wyłącznie laboratoryjną. Włączenie analityki materiałowej do systemu jakości pozwala lepiej zrozumieć zależności między procesem, strukturą materiału i właściwościami końcowymi produktu.

Należy jednocześnie podkreślić ograniczenia metod DSC i FT-IR. Są to techniki dostarczające informacji pośrednich, dlatego ich wyniki powinny być interpretowane łącznie z obserwacją makroskopową, analizą statystyczną oraz znajomością procesu technologicznego. Pełne potwierdzenie mechanizmów strukturalnych wymagałoby uzupełnienia badań o mikroskopię, dyfrakcję rentgenowską lub metody rozpraszania promieniowania rentgenowskiego[62].

Mimo tych ograniczeń podejście jest użyteczne aplikacyjnie. Przedsiębiorstwo nie zawsze potrzebuje pełnej charakterystyki krystalograficznej, aby podejmować skuteczne decyzje jakościowe. Często wystarczające jest zdefiniowanie wskaźników ryzyka, które informują, czy proces prowadzi do stabilnego

[62] Schenck H., Peschar R., Understanding the structure of fats and oils by X-ray diffraction, Current Opinion in Colloid & Interface Science, 9, 2004

i powtarzalnego produktu. Takie wskaźniki mogą być szczególnie przydatne w produkcji seryjnej, gdzie liczy się szybkość decyzji oraz ograniczenie strat.

35. Wnioski

Zaawansowana analityka materiałowa może stanowić istotny element innowacyjnego zarządzania jakością w przedsiębiorstwach produkcyjnych. W przypadku parafinowo-roślinnych systemów organicznych szczególne znaczenie ma kontrola procesów topnienia, krystalizacji oraz zmian zachodzących podczas przechowywania.

Połączenie DSC, FT-IR, analizy statystycznej i obserwacji makroskopowej pozwala identyfikować przyczyny defektów oraz ograniczać ryzyko ich wystąpienia. Dzięki temu przedsiębiorstwo może przechodzić od wykrywania wad gotowego produktu do prewencyjnego zarządzania parametrami procesu.

Stabilność materiałowa powinna być traktowana jako czynnik konkurencyjności. Powtarzalny, estetyczny i trwały produkt ogranicza koszty reklamacji, wzmacnia zaufanie odbiorców i poprawia pozycję przedsiębiorstwa na rynku. Jednocześnie redukcja braków produkcyjnych sprzyja bardziej efektywnemu wykorzystaniu surowców oraz ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko.

Kolejnym etapem wdrożenia może być opracowanie wewnętrznych kryteriów akceptacji partii produkcyjnych, opartych na parametrach DSC i FT-IR, oraz powiązanie ich z danymi procesowymi. Pozwoliłoby to rozwijać predykcyjny system kontroli jakości, który wspiera decyzje technologiczne i wzmacnia konkurencyjność przedsiębiorstwa.

36. Bibliografia

1 Bloch P.H., Seeking the ideal form: Product design and consumer response, Journal of Marketing, 59, 1995.
2 Hamrol A., Zarządzanie jakością z przykładami, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
3 Muzal E., Wzgarda-Raj K., Kinart Z., Multiscale Physicochemical Analysis of Defect Formation in Paraffin-Based Organic Systems: DSC Evaluation of Processing and Storage Conditions, Processes, 14, 2026.
4 Rastogi S., Crystallization and morphology of polymeric materials, Springer, Berlin 2012.
5 Sato K., Crystallization behaviour of fats and lipids - a review, Chemical Engineering Science, 56, 2001.
6 Schenck H., Peschar R., Understanding the structure of fats and oils by X-ray diffraction, Current Opinion in Colloid & Interface Science, 9, 2004.
7 Stankiewicz M.J., Konkurencyjność przedsiębiorstwa. Budowanie konkurencyjności przedsiębiorstwa w warunkach globalizacji, Wydawnictwo Domu Organizatora, Toruń 2005.

8 Urbaniak M., Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka, Difin, Warszawa 2004.
9 Wesołowski M., Erecińska J., Thermal analysis in quality control of pharmaceutical and organic materials, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 88, 2007.
10 Zhou Y., Hartel R.W., Phase behavior and crystallization of lipid-based materials, Annual Review of Food Science and Technology, 8, 2017.

Norbert Kostka, Tomasz Baranowski, mgr inż. Katarzyna Pietrzak

Politechnika Poznańska

Metody pomiaru obciążenia pracą a ocena wielozadaniowości w symulowanym środowisku kontroli ruchu lotniczego

Słowa kluczowe: Obciążenie pracą, obciążenie zadaniowe, wielozadaniowość

Streszczenie

Wielozadaniowość i wpływ zmęczenia oraz stresu na jakość i szybkość wykonywanych zadań stanowią kluczowe obszary badań w lotnictwie. Z uwagi na istotę tych kwestii, odpowiednie ich badanie stanowi podstawę dalszego rozwoju sektora bezpieczeństwa i efektywnej pracy w branży lotniczej. W niniejszej pracy rozróżniono pojęcia związane z obciążeniem, a także dokonano przeglądu metod mierzenia poziomu obciążenia pracą. Dodatkowo zaprezentowano koncepcję działania programu badającego wielozadaniowość i wpływ obciążenia, który obecnie tworzony jest w ramach inicjatywy „Project Based Learning: Stanowisko laboratoryjne do badania wielozadaniowości" na Politechnice Poznańskiej.

1. Wstęp

Od wielu dekad bezpieczeństwo to wartość o najwyższym priorytecie w lotnictwie. Utrzymywanie go na wysokim poziomie i jednoczesne ciągłe zwiększanie na przestrzeni lat jest kluczowym aspektem w rozwoju lotnictwa. To zasługa wielu ludzi, czy ustalających wszelkie regulacje prawne, czy członkom personelu każdego lotu. Piloci w wielu sytuacjach dają z siebie wszystko, żeby było bezpiecznie. Przez większość czasu załoga lotnicza jest zmuszona wykonywać kilka zadań jednocześnie, pod dużą presją czasu. Podobna sytuacja dotyczy kontrolera ruchu lotniczego. Wielozadaniowość jest zatem jedną z najbardziej pożądanych cech w środowisku lotniczym. Jej ocena jednak nie wymaga realizowania zadań w prawdziwym samolocie. Łatwiej oraz skuteczniej jest to badać w sztucznym środowisku. Obecnie na Politechnice Poznańskiej realizowana jest inicjatywa „Project Based Learning" w ramach której tworzone jest narzędzie zdolne do oceny wielozadaniowości – umiejętności alokowania

czasu podczas wykonywania kilku zadań jednocześnie[63]. Projekt stanowiska czerpie inspirację z środowiska pracy kontrolera ruchu lotniczego poprzez odwzorowanie w pewnym stopniu dostępnych dla niego systemów.

Wzorowanie się na środowisku kontroli ruchu lotniczego jest nieprzypadkowe, gdyż wielozadaniowość jest umiejętnością wymaganą i testowaną wśród przyszłych kontrolerów. Kandydaci podchodząc do testów FEAST (ang. *First European Air Traffic Control Selection Test*) mierzą się z zadaniami mającymi sprawdzić ich wielozadaniowość już w drugiej fazie (FEAST II) rekrutacji. Wykorzystanie więc środowiska, którego jednym z filarów jest właśnie ta cecha, wydało się odpowiednim wyborem.

Wielozadaniowość jest złożonym zagadnieniem, dlatego nie da się jej zmierzyć wyłącznie jednym parametrem. Podczas realizacji projektu traktowana jest jako składowa świadomości sytuacyjnej, obciążenia zadaniowego, jak i przebodźcowania zmysłowego.

Celem niniejszego artykułu jest zgłębienie metod obciążenia osób badanych, jak i metod odpowiedzialnych za pomiar owego obciążenia, a także omówienie implementacji rozwiązań wykorzystanych w programie, jak i jego wpływu na obciążenie osób badanych.

2. Obciążenie badanego

Biorąc pod uwagę zagadnienie obciążania człowieka zarówno mentalnie jak i fizycznie, należy wyróżnić dwa pojęcia, jakimi są obciążenie zadaniowe (ang. *taskload*) oraz obciążenie pracą (ang. *workload)*[64].

Obciążenie zadaniowe odwołuje się do stresorów oraz wymogów stawianych badanemu z wykorzystaniem zadań czy całej struktury systemu. Do czynników mogących zwiększać odczucie zmęczenia należą m.in. złożoność zadań, czy stawiana presja czasu[65].

Obciążenie pracą jest natomiast definiowane poprzez personalne predyspozycje wykonywania przedstawionych zadań. Nie ma jednak uniwersalnej, ogólnie przyjętej definicji tego pojęcia. Często jest ono przedstawiane w powiązaniu do poziomu uwagi podczas podejmowania decyzji[66].

Pomimo tego, że obciążenia te dotyczą dwóch różnych z pozoru rzeczy to są one ze sobą powiązane (Rys. 1.). Relacja między tymi pojęciami jest

---

[63] Benbunan-Fich R., Adler R.F., Mavlanova T., M*easuring Multitasking Behavior with Activity-Based Metrics*, ACM Transactions on Computer-Human Interaction, tom 18, s. 1-22, 2011.

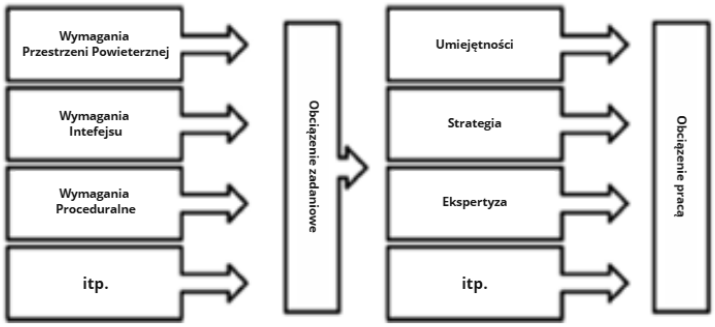
[64] Friedrich M., Biermann M., Gontar P., Biella M., Bengler K., *The influence of task load on situation awareness and control strategy in the ATC tower environment*, Cognition, Technology & Work, tom 20, s. 205-217, 2018.

[65] Ibidem

[66] Miller S., *Workload measures*, National Advanced Driving Simulator, University of Iowa, 2001

indywidualna dla każdego człowieka, gdyż każdy różnie reaguje na pojawiające się wyzwania.

W warunkach pracy obciążenie zadaniowe ma charakter stochastyczny i jest zależne od obecnie panujących warunków środowiskowych, w miejscu pracy. Natomiast w przypadku obciążenia pracą sam staż pozwala już na nabycie zdolności pozwalających na ograniczanie wpływu stresogennych sytuacji na poziom zmęczenia mentalnego.



Rys. 1. Relacja między obciążeniem zadaniowym, a obciążeniem pracą
Źródło: Interpretacja własna na podstawie - Abdul-Rahman S.M.B., Borst C., Mulder M., van Paassen M.M., Measuring Sector Complexity: Solution Space Based Model, Magister T. (red.), Advances in Air Navigation Services, IntechOpen, 2012.

Realizowany projekt skupia się na zagadnieniu obciążenia pracą, a dokładniej jego wpływie na psychikę badanego. Za główny czynnik, który intensyfikuje doświadczenie osoby badanej jest zmniejszanie czasu wymaganego do udzielenia odpowiedzi. Dokonywane jest to poprzez scenariusze, których trudność rośnie w poszczególnych fazach badania.

3. Metody mierzenia poziomu obciążenia pracą

3.1. Wprowadzenie

Ze względu na to, że nie ma ujednoliconej definicji obciążenia pracą powstało wiele metod, które są odpowiedzialne za mierzenie jego poziomu. Choć obciążenie psychiczne to zagadnienie złożone i wielowymiarowe, to właśnie

znalezienie odpowiedniej estymacji w wielu sytuacjach stanowi główną motywację do jego badania[67].

Istniejące metody można sklasyfikować w trzech kategoriach: subiektywne, fizjologiczne i oparte na wydajności. Szeroka gama metod, pozwala osobom przeprowadzającym badania na dopasowanie się w zależności od stawianych wymagań.

3.2. Metody subiektywne

Metody subiektywne opierają się na tym jak badany odczuwa zmęczenie wynikające z wykonywanych zadań. Głównym filarem tego rodzaju metod są pytania oraz odpowiedzi. Zaletą tych metod nad obiektywnymi jest fakt, że badany sam bierze pod uwagę swoją dyspozycję, samopoczucie czy zmęczenie, czyli czynniki, które mają wpływ na postrzeganie trudności zadania przez badanego. Do wad rozwiązań tego typu można zaliczyć trudność w zapewnieniu ciągłości danych, gdyż odpowiadanie na pytania przekierowuje świadomość badanego z zadania na odpowiedź. Wewnątrz tej grupy istnieje podział na dwie podkategorie, a mianowicie na metody jednowymiarowe i wielowymiarowe, które zapewniają dogłębniejszą analizę wyników.

Przykładem metody jednowymiarowej jest OW (ang. *Overall Workload Scale*). Jest to skala prosta w swojej budowie. Bazuje ona na skali od 0 do 100, gdzie 0 to bardzo niskie, a 100 to bardzo wysokie obciążenie. Reprezentowana jest przez 20 stopniową skalę, na której wartości przypisywane są z zaokrągleniem do najbliższej 5[68]. Metoda ta nie jest czasochłonna w wypełnianiu, a poziom jej czułości jest porównywalny do metod wielowymiarowych[69].

Najczęściej przytaczaną metodą wielowymiarową jest NASA-TLX (ang. *Task Load Index*). Wykorzystując tę metodę, można wyprowadzić ogólny poziom obciążenia na bazie średniej ważonej z wartości w poszczególnych grupach:

- Obciążenie mentalne (ang. *Mental Demand*);
- Obciążenie fizyczne (ang. *Physical Demand*);
- Obciążenie czasowe (ang. *Temporal Demand*);
- Wydajność (ang. *Performance*);
- Wysiłek (ang. *Effort*);
- Frustracja (ang. *Frustration*).

---

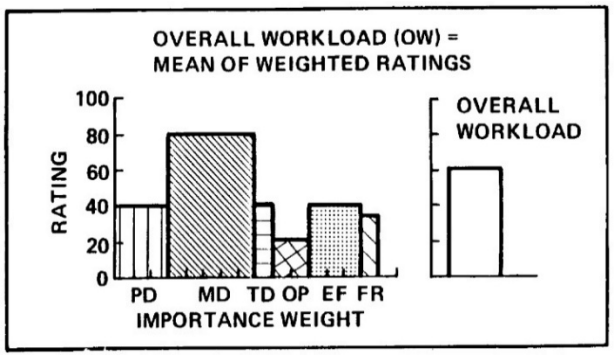
[67] Ibidem

[68] Hill S.G., Lavecchia H.P., Byers J.C., Bittner A.C., Zaklad A.L., Christ, R.E., *Comparison of 4 Subjective Workload Rating-Scales*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, tom 34, s. 429-439, 1992

[69] Miller S., *Workload measures*, National Advanced Driving Simulator, University of Iowa, 2001

Osoba wypełniająca arkusz przydziela każdej z powyżej wymienionych kategorii wagę. Odbywa się to poprzez zestawienie par kategorii, wybranie tej, która subiektywnie miała większe oddziaływanie, a następnie zliczenie, ile razy została ona wybrana. Przydział wartości, do poszczególnych z kategorii odbywa się identycznie jak w przypadku metody OW. To znaczy, że jest przypisana skala od 0 do 100 z stopniami co 5. Całkowite obciążenie jest liczone jako średnia ważona, każdego z poszczególnych elementów.

Metoda ta najbardziej odpowiadała i to ją najbardziej lubiły osoby w badaniu, gdzie porównywano metody subiektywne[70]. Powstała również wariacja NASA-RTLX (*Raw TLX*), która różni się tym, że nie ma etapu z ustalaniem wag, co zdecydowanie skraca czas przeprowadzenia badania, a rzetelność wyników jest podobna jak w oryginalnym rozwiązaniu.



Rys. 2. Graficzne przedstawienie przykładowych wyników formularza NASA-TLX
Źródło: NASA, NASA Task Load Index (TLX), https://www.nasa.gov/human-systems-integration-division/nasa-task-load-index-tlx/ (data dostępu: 13.07.2026 r.).

Drugą powszechnie stosowaną metodą jest SWAT (ang. *Subjective Workload Assessment Technique*). Jest to metoda opracowana przez Laboratorium Badań Medycznych Sił Powietrznych USA[71]. Bazuje ona na trzech poziomach: niskim (1), średnim (2) oraz wysokim (3), przypisywanych do każdej z trzech kategorii:

Obciążenie czasowe (ang. *Time Load*);

Obciążenie wysiłkiem psychicznym (ang. *Mental Effort Load*);

Obciążenie stresem (ang. *Psychological Stress Load*).

Prowadzenie tej metody podzielone jest na trzy kroki:

[70] Hill S.G., Lavecchia H.P., Byers J.C., Bittner A.C., Zaklad A.L., Christ, R.E., *Comparison of 4 Subjective Workload Rating-Scales*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, tom 34, s. 429-439, 1992

[71] Ibidem

Badany otrzymuje zestaw 27 kart, które zawierają każdą możliwą kombinację wymienionych powyżej kategorii. Następnie segreguje on karty tak, aby odwzorowywały jego postrzeganie rosnącego obciążenia pracą.

Przydzielenie wartości, która jest faktyczną oceną odbywanego zadania.

Stworzenie skali od 0 do 100, z wykorzystaniem danych z kroku pierwszego.

W subiektywnym odczuciu metoda ta jest bardziej czasochłonna, mimo że może prowadzić do bardziej spersonalizowanych rezultatów.

3.3. Metody fizjologiczne

Głównym założeniem tego typu metod jest analizowanie reakcji ciała na zadane obciążenie pozwalając na uzyskanie obiektywnych wyników, co wpływa pozytywnie na rzetelność wyników ze względu na brak konieczności konsultacji z badanym. Aczkolwiek fizjologiczne reakcje człowieka nie są wywoływane wyłącznie przez obciążenie psychiczne, lecz są składową wielu czynników mogących zaburzać przez to rzetelność wyników. Reakcje człowieka bada się najczęściej w następujących obszarach[72]:

- aktywność sercowa;
- aktywność oddechowa;
- aktywność oka;
- miary mowy;
- aktywność mózgu.

Monitorowanie aktywności serca jest rzetelnym źródłem poziomu obciążenia oraz łatwo jest je interpretować. Do parametrów mierzonych należą: tętno, zmienność tętna oraz ciśnienie krwi. Powszechniejsze jest korzystanie z wartości skorelowanych z tętnem ze względu na łatwość ich zmierzenia i częste powiązanie wzrastającego tętna ze wzrostem obciążenia. Ważnym jest spersonalizowanie skali do badanego oraz zdefiniowanie poziomu pracy fizycznej na równi z umysłową.

Jeśli chodzi o aktywność układu oddechowego mierzona jest liczba oddechów badanego oraz objętościowy udział dwutlenku węgla w wydychanym powietrzu. Podobnie jak w przypadku tętna, mierzenie liczby oddechów w pewnym przedziale czasowym jest łatwe w wykonaniu oraz nieinwazyjne. Metody te mają jednak wadę, gdyż osiągnięte wyniki łatwo zaburzyć mową.

W przypadku oczu, mimo że bardziej kojarzą się z obciążeniem wzroku przez pracę to istnieją miary zdolne przewidzieć obciążenie psychiczne[73]. Parametrami badanymi w tej grupie są: pozioma aktywność oka, częstotliwość mrugania i czas zamknięcia powieki.

---

[72] Miller S., *Workload measures*, National Advanced Driving Simulator, University of Iowa, 2001

[73] Ibidem

Mowa rzadko jest wykorzystywana jako parametr stanowiący wyznacznik zmęczenia. Natomiast jeżeli jest już wykorzystywana to mierzona jest głośność, tonacja oraz częstotliwość, jako iż te trzy czynniki mają powiązanie z obciążeniem.

Ostatnią kategorią jest aktywność mózgu, która jest nadrzędna wobec wymienionych powyżej, gdyż wszystkie one zależą od sygnałów wysyłanych przez mózg. Aczkolwiek korzystanie z urządzeń zdolnych do mierzenia fal mózgowych wymaga odpowiedniego przygotowania. Powszechnie używane są elektroencefalografia (EEG) oraz elektrookulografia (EOG).

Metody te są o tyle wartościowe, że pozwalają na ciągłe monitorowanie poziomu zmęczenia przez całość trwania badania.

3.4. Metody oparte na wydajności

Wydajność może być zdefiniowana jako skuteczność w kończeniu konkretnych zadań. Mierzona może być przez prędkość oraz celność lub w edukacji przez wyniki testów[74]. Istnieją dwa sposoby mierzenia z wykorzystaniem metod opartych na wydajności, a mianowicie miary pierwotne i wtórne. Wychodzą one z założenia, że zasoby poznawcze ludzi są ograniczone. Miara pierwotna jest bardziej bezpośrednia, ale obie są wykorzystywane i akceptowane[75].

Miarą pierwotną jest mierzenie skuteczności badanego podczas wykonywania zadania głównego, zdefiniowanego wcześniej przez osoby prowadzące dane pomiary. Jest to miara bezpośrednia i nieinwazyjna w wykorzystaniu. Wadą jest fakt, iż nieznaczne zmiany poziomu obciążenia pracą nie będą wpływać na poziom wydajności badanego.

Miary wtórne mają za zadanie kompensować pierwotne. Ideą tych miar jest mierzenie różnicy między wykorzystywanymi zasobami na zadania główne, a całością dostępnych zasobów. Realizowana z wykorzystaniem zadań pobocznych, czy zadań, które są naturalnymi elementami danej sytuacji np. sprawdzanie lusterka w samochodzie podczas jazdy.

Do prawidłowego pomiaru obciążenia pracą, należy zaimplementować obie z przedstawionych miar ze względu na ich komplementarność.

---

[74] Paas F.G.W.C., Van Merrienboer J.J.G., *The efficiency of Instructional Conditions: An Approach to Combine Mental Effort and Performance Measures*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society., tom 35, nr 4, s. 737-747, 1993.

[75] Miller S., *Workload measures*, National Advanced Driving Simulator, University of Iowa, 2001.

4. Koncepcja działania systemu i zbierania danych badawczych

Na całość projektu realizowanego na Politechnice Poznańskiej składają się trzy programy połączone w jeden. Pierwszy z nich jest wzorowany na Systemie Wyświetlania Informacji wykorzystywanym przez Polską Agencję Żeglugi Powietrznej (PANDORA). Następnie implementowana jest interpretacja EFPS (ang. *Electronic Flight Progress Strips*), czyli elektronicznych pasków postępu lotu. Całość spięta jest trzecim systemem, który służy do wyświetlania zadań oraz zawiera informacje potrzebne badanym do wykonywania scenariuszy badawczych.

Cel mierzenia stopnia obciążenia osób badanych realizowany jest pośrednio, poprzez analizę wyników realizacji określonych scenariuszy testowych. Powodem wybrania takiego podejścia do badania tego parametru jest zależność, którą można zauważyć między obciążeniem pracą, a poprawnością i szybkością wykonywania zadań[76]. Oznacza to, że poddając interpretacji rezultat wykonania scenariusza można określić, w przybliżonym stopniu, wpływ obciążenia pracą i obciążenia zadaniowego na osobę badaną.

Opracowany program składa się z serii zadań, które wymagają udzielenia konkretnej odpowiedzi, bądź podjęcia konkretnej akcji, pojawiają się one w określonym czasie, a także, co najistotniejsze dla tego badania, są ograniczone czasowo. Ponadto, część z tych zadań posiada dodatkowe elementy rozpraszające lub opiera się na pamięci osoby badanej poprzez odwoływanie się do poprzednich zadań, bądź zakrywanie części interfejsu zgodnie z techniką SAGAT. Następnie możliwa jest analiza informacji zebranych podczas wykonywania zadań, takich jak: poprawność rozwiązań lub podjętych akcji, czas wykorzystany przez osobę badaną na rozwiązanie zadania, a także to czy zostało ono w ogóle rozwiązane. Tym sposobem można określić jak osoba badana poradziła sobie z konkretnymi zadaniami, a odpowiednio konstruując scenariusze, manipulując występowaniem zadań, ich złożonością, jak i czasem przeznaczonym na ich rozwiązanie, można tworzyć określone warunki, które mogą być bardziej lub mniej obciążające. Dzięki temu możliwa jest analiza wpływu stworzonych sytuacji w programie na jakość i szybkość rozwiązań, co dalej umożliwia analizę ich wpływu na osobę badaną.

Wpływ komunikacji z oprogramowaniem na zmęczenie i stres użytkownika. Badanie poziomu obciążenia za pomocą danych zbieranych przez program wiążę się jednak z pewnymi zagrożeniami. Pierwszym z nich jest wpływ ciągłego testowania osoby badanej na jej możliwości radzenia sobie z obciążeniem, a w szczególności na poziom zmęczenia. Ograniczone czasowo scenariusze

[76] Young M.S., Brookhuis K.A., Wickens C.D., Hancock P.A., *State of science: mental workload in ergonomics,* Ergonomics, tom 58, nr 1, s. 1-17, 2015.

konstruowane są w taki sposób, aby osoba badana działała wyłącznie w ramach tego konkretnego scenariusza. Oznacza to, że powtarzanie go lub wykonywanie kilku z rzędu może zwracać oscylujące wyniki. Przyczyną wahania, może być pojawiające się zmęczenie mentalne wynikające z długotrwałego obciążenia poznawczego, które wymaga nieprzerwanego skupienia osoby badanej[77]. W tym artykule mianem obciążenia poznawczego określone będzie to jak bardzo wymagające mentalnie jest dla osoby badanej rozwiązanie zadania. Konstruowane w tym projekcie scenariusze jak i zbierane dane w analizie komputerowej nie biorą pod uwagę efektów zmęczenia. Stąd też długotrwałe zbieranie danych u jednego badanego staje się nierzetelne, co skłania do prowadzenia pojedynczych iteracji scenariuszy w pewnym okresie. Ponadto powtarzanie tego samego scenariusza przez tę samą osobę badaną może doprowadzić do poznania przez nią schematu zadań co może skutkować obniżeniem poziomu stresu oraz obciążenia pracą ze względu na znajomość scenariusza.

Drugim zagrożeniem natomiast jest wpływ interfejsu programu, a także działania systemu na obciążenie poznawcze. Sam program ma istotne znaczenie w tym aspekcie, gdyż to w jego obrębie wykonywane jest badanie. Oznacza to, że sposób działania programu ma bezpośredni wpływ na udzielane odpowiedzi. Większość zadań w scenariuszu wymusza na badanym interakcję z systemem, co najmniej w pewnym stopniu. Niektóre wymagają podjęcia konkretnej akcji, podczas gdy inne wymagają odnalezienia informacji wyświetlanych przez centralny system, zawartych w systemie PANDORA bądź w systemie EFPS. Przez to czynniki takie jak złożoność informacji, przejrzystość interfejsu czy łatwy dostęp do wymaganych informacji mają wpływ na skuteczność rozwiązania zadań. Podstawowa znajomość funkcjonowania systemu jest kluczowa. W ramach wstępu do badania należy ograniczyć wpływ nieznajomości interfejsu, jak również sposobu działania systemu na poprawność wyników.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę związaną z tematem obciążenia pracą. Przytoczono uproszczony podział obciążeń, jakie występują u osób podczas wykonywania zadań lub w całokształcie ich pracy.

Opisano również metody wykorzystywane do pomiaru poziomu obciążenia. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury można stwierdzić, że

[77] Kosch T., Karolus J., Zagermann J., Reiterer H., Schmidt A., Woźniak P.W., *A Survey on Measuring Cognitive Workload in Human-Computer Interaction*, ACM Computing Surveys, tom 55, nr 13, s. 1-39, 2023.

różnorodność metod pozwala na odpowiednie dopasowanie jej do prowadzonych badań. Co więcej, jak podkreśla literatura, aby osiągnąć rzetelny wynik zalecane jest wykorzystanie kilku metod jednocześnie, które wspólnie będą uzupełniać swoje braki. Jako że tłem dla tego artykułu jest projekt realizowany na Politechnice Poznańskiej podczas jego realizacji wykorzystywany będzie formularz NASA-TLX, jako subiektywna metoda do walidacji projektu. Wykorzystana zostanie również pochodna metod opartych na wydajności, dzięki implementacji w projekcie zadań głównych oraz zadań pobocznych.

Dodatkowo w powyższej pracy zaprezentowana została koncepcja działania programu tworzonego w ramach realizowanego projektu i również sposób zbierania danych, które posłużą do wykonywania badań. Ponadto przedstawione zostały zagrożenia związane z wykorzystaniem tych metod, jak i znaczenie wpływu systemu informatycznego na odczucia obciążenia osoby badanej. Dzięki tym informacjom będzie można skutecznie skorzystać i zrekompensować wyniki wykonania scenariuszy badawczych oraz zastosować zewnętrzną metodę pomiaru obciążenia.

6. Bibliografia

1 Abdul-Rahman S.M.B., Borst C., Mulder M., van Paassen M.M., *Measuring Sector Complexity: Solution Space Based Model,* Magister T. (red.), Advances in Air Navigation Services, IntechOpen, 2012.

2 Benbunan-Fich R., Adler R.F., Mavlanova T., *Measuring Multitasking Behavior with Activity-Based Metrics,* ACM Transactions on Computer-Human Interaction, tom 18, s. 1-22, 2011.

3 Friedrich M., Biermann M., Gontar P., Biella M., Bengler K., T*he influence of task load on situation awareness and control strategy in the ATC tower environment,* Cognition, Technology & Work, tom 20, s. 205-217, 2018.

4 Hart S.G, Staveland L.E., *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research*, Advances in Psychology, tom 52, s.139-183, 1988.

5 Hill, S.G., Lavecchia, H.P., Byers, J.C., Bittner, A.C., Zaklad, A.L., Christ, R.E., *Comparison of 4 Subjective Workload Rating-Scales*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, tom 34, s. 429-439 1992.

6 Kosch T., Karolus J., Zagermann J., Reiterer H., Schmidt A., Woźniak P.W., *A Survey on Measuring Cognitive Workload in Human-Computer Interaction*, ACM Computing Surveys, tom 55, nr 13, s. 1-39, 2023.

7 Miller S., *Workload measures*, National Advanced Driving Simulator, University of Iowa, 2001.

8 Paas F.G.W.C., Van Merrienboer J.J.G., *The efficiency of Instructional Conditions: An Approach to Combine Mental Effort and Performance Measures*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society., tom 35, nr 4, s. 737-747 1993.

9 Young M.S., Brookhuis K.A., Wickens C.D., Hancock P.A., *State of science: mental workload in ergonomics*, Ergonomics., tom 58, nr 1, s. 1-17, 2015.

10 NASA, NASA Task Load Index (TLX), https://www.nasa.gov/human-systems-integration-division/nasa-task-load-index-tlx/ (data dostępu: 13.07.2026 r.).

Maciej Zyśk, Krystian Tilzen, Ziemowit Tłusty

Politechnika Warszawska

Model mentoringu technicznego prowadzonego przez studentów z koła naukowego Zrób To Sam jako forma popularyzacji elektroniki, robotyki i druku 3D

Słowa kluczowe: mentoring techniczny, edukacja STEM, robotyka edukacyjna, druk 3D

Streszczenie

Praktyczna edukacja STEM wymaga sytuacji, w których uczestnicy mogą projektować, budować, programować, testować i modyfikować rozwiązania techniczne. W działalności Koła Naukowego Zrób To Sam Politechniki Warszawskiej taką funkcję pełnią warsztaty z elektroniki, robotyki, druku 3D, Arduino, lutowania, prototypowania oraz wydarzenia popularyzujące naukę i technikę. Opracowanie ma charakter jakościowego studium przypadku. Materiał źródłowy objął dokumentację działań, scenariusze, obserwacje prowadzących i analizę komunikacji koła, a efekty rozpatrzono w wymiarze procesowym: przez przebieg pracy uczestnika, zauważenie błędów, poradzenie sobie z nimi i możliwość modyfikacji rozwiązania. Rezultatem jest autorski model obejmujący pięć warstw: infrastrukturę technologiczną, scenariusz dydaktyczno-techniczny, rolę studenta-mentora, aktywność uczestnika oraz organizację i skalowanie działań.

1. Wprowadzenie

W warsztatach technicznych pojęcia z zakresu elektroniki, programowania i projektowania są weryfikowane przez budowę oraz uruchamianie rzeczywistych układów. Podczas takich zajęć uczestnik może zbudować układ, uruchomić program i sprawdzić, jak zmiana kodu lub połączenia wpływa na działanie urządzenia. Taki typ doświadczenia odpowiada kierunkom edukacji technicznej, w których podkreśla się aktywne uczenie się, projektowanie i rozwiązywanie problemów[78].

Samo udostępnienie sprzętu nie gwarantuje jednak jego edukacyjnego wykorzystania. Drukarka 3D, zestaw robotyczny czy mikrokontroler mogą

[78] Vennix J., den Brok P., Taconis R., *Do Outreach Activities in Secondary STEM Education Motivate Students and Improve Their Attitudes Towards STEM?*, "International Journal of Science Education" 2018, 40(11), s. 1263-1283.

pozostać jedynie atrakcyjnym dodatkiem, jeśli nie towarzyszą im scenariusze zajęć, przygotowane stanowiska, bezpieczna organizacja pracy i osoba potrafiąca przeprowadzić uczestników przez typowe problemy techniczne. Istotna staje się więc nie tylko dostępność narzędzi, ale także model ich użycia.

Studenckie koła naukowe mogą pełnić rolę pośrednika między uczelnią techniczną a szkołami. Łączą zaplecze akademickie, doświadczenie projektowe i entuzjazm osób, które same niedawno przechodziły przez etap wyboru ścieżki edukacyjnej. Koło Naukowe Zrób To Sam Politechniki Warszawskiej stanowi przykład środowiska, w którym działalność projektowa, warsztatowa i popularyzatorska łączy się z mentoringiem technicznym. Celem artykułu jest opracowanie i scharakteryzowanie modelu mentoringu technicznego prowadzonego przez studentów Koła Naukowego Zrób To Sam, opartego na warsztatowym wykorzystaniu elektroniki, robotyki i druku 3D w działaniach popularyzujących edukację STEM. Główne pytanie badawcze brzmi: w jaki sposób studenci koła naukowego mogą organizować i prowadzić warsztaty techniczne, aby wspierać ich uczestników w praktycznym poznawaniu elektroniki, robotyki i druku 3D?

2. Elektronika, robotyka i druk 3D w edukacji STEM

Elektronika pokazuje uczestnikom zajęć, że technika nie jest zbiorem definicji, lecz systemem zależności możliwych do sprawdzenia w działaniu. Praca z diodą, rezystorem, czujnikiem, przyciskiem lub silnikiem pozwala zobaczyć, że połączenia fizyczne i instrukcje programu tworzą wspólny układ. Szczególną rolę odgrywa Arduino, czyli platforma prototypowania oparta na mikrokontrolerach. Typowy cykl pracy obejmuje montaż układu, napisanie programu, uruchomienie, obserwację, diagnozę błędu i poprawę rozwiązania. Badania nad wykorzystaniem Arduino w edukacji podstawowej wskazują, że narzędzia tego typu mogą wspierać rozwój myślenia technicznego i problemowego, zwłaszcza gdy są osadzone w dobrze przygotowanych zadaniach[79].

Robotyka edukacyjna rozszerza ten proces, integrując elektronikę, programowanie, mechanikę, sensorykę i sterowanie. Robot jest systemem technicznym, którego zachowanie można obserwować w przestrzeni: decyzja algorytmu przekłada się na ruch silników, reakcję na czujnik albo zmianę trajektorii. Uczestnik dostrzega wówczas, że błąd w kodzie lub połączeniu elektrycznym jest przyczyną konkretnego zachowania urządzenia. Przeglądy badań nad robotyką edukacyjną pokazują, że jej wartość wynika nie tylko

[79] García-Tudela P.A., Marín-Marín J.A., *Use of Arduino in Primary Education: A Systematic Review*, "Education Sciences" 2023, 13(2), 134.

z atrakcyjności sprzętu, ale przede wszystkim z jakości zadania, poziomu wsparcia i możliwości samodzielnego testowania[80].

Druk 3D wnosi do edukacji STEM wymiar cyfrowego prototypowania. Jego znaczenie nie ogranicza się do wytworzenia przedmiotu. Pełny proces obejmuje rozpoznanie potrzeby, opracowanie koncepcji, modelowanie przestrzenne, przygotowanie parametrów druku, wykonanie prototypu, ocenę jakości i modyfikację projektu. Uczestnik obserwuje, że model cyfrowy podlega ograniczeniom materiałowym, technologicznym i konstrukcyjnym. Dzięki temu druk 3D może rozwijać myślenie projektowe, przestrzenne i iteracyjne[81].

Działania tego typu można osadzić w konstruktywizmie, konstrukcjonizmie Seymoura Paperta, uczeniu się przez doświadczenie, edukacji projektowej oraz maker education, czyli edukacji opartej na projektowaniu, tworzeniu i eksperymentowaniu. Uczenie staje się szczególnie wartościowe wtedy, gdy osoba ucząca się tworzy konkretną rzecz: program, model, urządzenie, robota albo prototyp[82]. W działaniach typu DIY, od angielskiego do it yourself, ważne jest nie tylko wykonanie obiektu, ale także rozumienie procesu i przyczyn błędów.

3. Mentoring techniczny prowadzony przez studentów

Działalność edukacyjna Koła Naukowego Zrób To Sam opiera się na koncepcji mentoringu typu near-peer, czyli relacji wsparcia między osobami o niewielkim dystansie wieku lub etapu edukacji. Student pełni funkcję przewodnika technicznego wspierającego uczestnika zajęć w praktycznym poznawaniu elektroniki, robotyki i druku 3D. Ma większe doświadczenie projektowe niż uczestnik, ale pozostaje mu bliższy niż nauczyciel akademicki lub zawodowy inżynier. Literatura wskazuje, że taka relacja może skracać dystans komunikacyjny i wzmacniać wiarygodność mentora jako osiągalnego wzorca ścieżki edukacyjnej[83].

Rola mentora technicznego wykracza poza przekazywanie instrukcji. Student organizuje środowisko pracy, sprawdza stanowisko, demonstruje podstawową

---

[80] Ouyang F., Xu W., *The Effects of Educational Robotics in STEM Education: A Multilevel Meta-analysis*, "International Journal of STEM Education" 2024, 11, 7.

[81] Abu Khurma O., Ali N., Swe Khine M., *Exploring the Impact of 3D Printing Integration on STEM Attitudes in Elementary Schools*, "Contemporary Educational Technology" 2023, 15(4), ep458.

[82] Papert S., *Situating Constructionism*, [w:] I. Harel, S. Papert (red.), *Constructionism*, Ablex Publishing Corporation, Norwood 1991, s. 1–11; Kolb D.A., *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1984.

[83] Tenenbaum L.S., Anderson M.K., Jett M., Yourick D.L., *An Innovative Near-Peer Mentoring Model for Undergraduate and Secondary Students: STEM Focus*, "Innovative Higher Education" 2014, 39(5), s. 375-385; Price E., Siyahhan S., Marshall J., DeLeone C., *Mobile Making: A Research-Based Afterschool Program Led by STEM Undergraduates Serving as Near-Peer Mentors*, "Journal of STEM Outreach" 2023, 6(1), s. 1-12.

operację, obserwuje postępy uczestnika i pomaga w diagnozowaniu błędów w kodzie, obwodzie lub konfiguracji sprzętu. Szczególnie ważne jest odchodzenie od gotowej odpowiedzi na rzecz pytania naprowadzającego. Zamiast natychmiast poprawiać kod lub połączenia, mentor może zapytać, który element powinien otrzymać zasilanie, co dzieje się po zmianie warunku w programie albo gdzie w obwodzie może występować przerwa. W miarę postępów uczestnika pomoc jest ograniczana, aby wzmacniać samodzielność i myślenie diagnostyczne.

Tab. 1. Role studenta-mentora w modelu mentoringu technicznego

Rola studenta-mentora	Opis funkcji w modelu warsztatowym	Kluczowy wpływ na uczestnika zajęć
Instruktor techniczny	Przekazywanie inżynierskiej wiedzy praktycznej (podstawy elektroniki, obsługa drukarek 3D, programowanie).	Nabycie twardych kompetencji technologicznych i obsługa nowoczesnych narzędzi.
Bliski rówieśnik (near-peer)	Utrzymywanie relacji opartej na partnerstwie oraz zniwelowanym dystansie wiekowym i hierarchicznym.	Redukcja stresu, większa śmiałość w zadawaniu pytań oraz otwartość na eksperymentowanie.
Facylitator	Wspieranie samodzielnego rozwiązywania problemów konstrukcyjnych zamiast podawania gotowych odpowiedzi.	Rozwój kreatywności, myślenia analitycznego oraz nauka radzenia sobie z błędami.
Popularyzator nauki	Prezentowanie fascynujących, praktycznych zastosowań technologii w sposób angażujący i zrozumiały.	Przełamanie stereotypów o „trudnej inżynierii" i wzrost ogólnej motywacji do nauki.
Wzór do naśladowania	Reprezentowanie środowiska akademickiego i dzielenie się własną pasją do nauk ścisłych (STEM).	Budowanie tożsamości naukowej uczestnika i wiary we własne możliwości („też mogę być inżynierem").

Źródło: opracowanie własne.

W warsztatach technicznych student jest również pośrednikiem między światem cyfrowym a fizycznym. Uczestnik pracuje z interfejsem programistycznym, kodem blokowym lub tekstowym, schematem połączeń, płytką stykową, czujnikiem, robotem, wydrukiem 3D albo wyświetlaczem. Mentor pomaga mu rozpoznać, że te elementy nie są osobnymi obszarami, lecz częściami jednego procesu projektowego. Na potrzeby artykułu mentoring techniczny definiuje się jako proces wspierania uczestnika w samodzielnym projektowaniu, budowaniu, programowaniu, testowaniu i doskonaleniu rozwiązania technicznego przez osobę posiadającą większe doświadczenie praktyczne.

4. Metodologia badania

Zastosowano jakościowe studium przypadku, w którym jednostką analizy nie jest pojedyncze wydarzenie, lecz powtarzalny sposób organizacji warsztatów prowadzonych przez studentów Koła Naukowego Zrób To Sam. Badanie obejmuje działania z zakresu elektroniki, robotyki, druku 3D, prototypowania, konkursów robotycznych i popularyzacji techniki. Celem była rekonstrukcja modelu mentoringu technicznego oraz wskazanie warunków jego powielania w podobnych inicjatywach.

Materiał badawczy obejmuje dokumentację działań koła, scenariusze i opisy warsztatów, obserwacje prowadzących, analizę publicznej komunikacji koła oraz materiały dotyczące przygotowania stanowisk. Zastosowano triangulację źródeł: zestawiono założenia scenariuszy, publiczne opisy działań, obserwacje przebiegu zajęć i typowe problemy techniczne identyfikowane przez prowadzących. Efekty warsztatów sprawdzano jakościowo, przez wskaźniki procesowe: przejście uczestnika przez zadanie, uruchomienie układu lub programu, zlokalizowanie błędu, wprowadzenie poprawki, wykonanie rozwiązania technicznego i jego prezentację.

Analiza przebiegała w czterech krokach: wyodrębniono główne obszary technologiczne, uporządkowano formy działań, opisano role studentów-mentorów i zsyntetyzowano model mentoringu technicznego. Kategorie analityczne obejmowały organizację technologii, sposób udzielania wsparcia, aktywność uczestnika, diagnozę błędów oraz możliwość powielania warsztatu. Wnioski interpretowano w odniesieniu do literatury o mentoringu near-peer, maker education oraz popularyzacji STEM[84].

Tab. 1. Kategorie analityczne wykorzystane w opisie modelu mentoringu technicznego

Kategoria analityczna	Zakres analizy	Elementy uwzględniane w opisie
Organizacja technologii	Sposób przygotowania sprzętu, oprogramowania i stanowisk warsztatowych	Kompletność zestawów, sprawność urządzeń, konfiguracja oprogramowania, dostępność elementów zapasowych i zasady bezpieczeństwa.
Sposób udzielania wsparcia	Działania podejmowane przez studentów-mentorów podczas realizacji zadania	Demonstracja podstawowych czynności, pytania naprowadzające, pomoc w lokalizowaniu problemu i stopniowe ograniczanie wsparcia.

[84] Pluth M.D., Boettcher S.W., Nazin G.V., Greenaway A.L., Hartle M.D., *Collaboration and Near-Peer Mentoring as a Platform for Sustainable Science Education Outreach*, "Journal of Chemical Education" 2015, 92(4), s. 625-630.

Kategoria analityczna	Zakres analizy	Elementy uwzględniane w opisie
Aktywność uczestnika	Zakres samodzielnego udziału uczestnika w realizacji zadania technicznego	Montaż układu, programowanie, modelowanie, testowanie, wprowadzanie zmian i prezentacja rozwiązania.
Diagnozowanie błędów	Sposób rozpoznawania i usuwania problemów technicznych pojawiających się podczas warsztatu	Identyfikacja błędu w kodzie, połączeniu lub konfiguracji sprzętu, sprawdzanie możliwych przyczyn i wprowadzanie poprawek.
Możliwość powielania warsztatu	Warunki umożliwiające ponowne przeprowadzenie zajęć przez innych członków koła	Przygotowany scenariusz, przeszkolenie mentorów, uporządkowane zestawy, opis typowych problemów, podział ról i organizacja sprzętu.

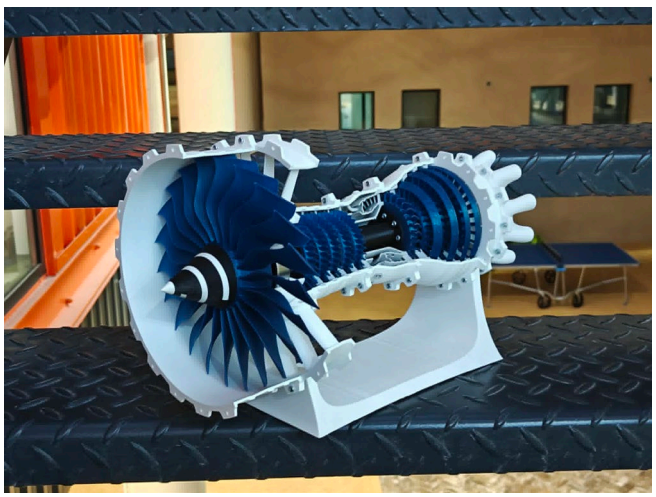
Źródło: opracowanie własne.

Charakterystyka prowadzonych warsztatów i działań. Koło Naukowe Zrób To Sam funkcjonuje jako środowisko edukacji technicznej, w którym aktywność projektowa studentów łączy się z popularyzacją technologii. Obszary działania koła obejmują elektronikę, programowanie mikrokontrolerów, robotykę, druk 3D, modelowanie, prototypowanie i majsterkowanie. Działania te przyjmują formę warsztatów, pokazów i konkursów dostępnych dla uczestników oraz innych osób zainteresowanych praktycznym poznawaniem techniki.

Pierwszą grupę stanowią warsztaty z elektroniki i Arduino, m.in. zajęcia dla licealistów oraz wydarzenia typu Arduino Days. Ich celem jest wprowadzenie uczestników w zależności między elementami układu, połączeniami i kodem. W zależności od poziomu grupy obejmują pracę z diodami, rezystorami, potencjometrami, czujnikami, płytkami stykowymi i mikrokontrolerami. Kolejną grupę tworzą działania związane z robotyką edukacyjną i konkursami robotycznymi, takie jak BattleBoty czy Wola Koduje. Uczestnicy pracują z konstrukcją, napędem, czujnikami, sterowaniem i algorytmem, a konkurs lub pokaz domyka proces budowy, testowania i poprawy urządzenia.

Rys. 1. Robot edukacyjny jako przykład integracji mechaniki, elektroniki i programowania
Źródło: dokumentacja własna Koła Naukowego Zrób To Sam.

Kolejny obszar obejmuje druk 3D, modelowanie i prototypowanie, obecne m.in. w Akademii DIY, szkoleniach z druku 3D oraz projektach wymagających wykonania elementów konstrukcyjnych, obudów lub prototypów. Druk 3D uzupełnia elektronikę i robotykę, pokazując, że rozwiązanie techniczne wymaga także formy mechanicznej. Czwarty obszar obejmuje wydarzenia popularyzatorskie: Drzwi Otwarte Politechniki Warszawskiej, pikniki naukowe, pokazy, konferencje i współprace z innymi kołami. Ich funkcją jest obniżanie progu wejścia w technologie.



Rys. 2. Przykładowy wydruk 3D wykorzystywany w działaniach prototypowych
Źródło: dokumentacja własna Koła Naukowego Zrób To Sam.

Odrębnym elementem modelu jest przygotowanie studentów do roli mentorów. Koło szkoli nowych członków w zakresie modelowania, druku 3D, podstaw elektroniki, Arduino, pracy ze scenariuszami i organizacji stanowisk. Z perspektywy modelu nie jest to osobny cel edukacyjny, lecz warunek powtarzalności warsztatów: mentor musi znać technologię, przewidywać typowe usterki i umieć wyjaśnić problem prostym językiem. Dzięki temu działalność edukacyjna nie zależy wyłącznie od pojedynczych osób.

5. Technologiczna organizacja i przebieg warsztatów

Działalność warsztatowa i popularyzatorska prowadzona w szkołach, na uczelni oraz podczas wydarzeń naukowych wymaga organizacji technologicznej, logistycznej i metodycznej. W analizowanym modelu można wyróżnić siedem powtarzalnych etapów, obecnych w zajęciach z elektroniki, robotyki, druku 3D, Arduino i prototypowania.

Rys. 3. Etapy technologicznej organizacji warsztatu
Źródło: opracowanie własne.

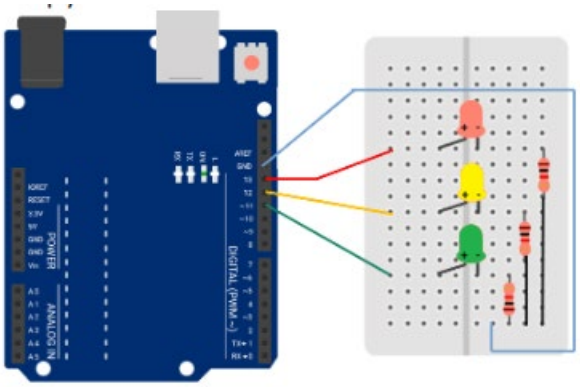
Pierwszym etapem jest przygotowanie technologii i środowiska pracy: wybór sprzętu, kompletowanie zestawów, sprawdzenie płytek stykowych, mikrokontrolerów, czujników, modułów zasilania i robotów, przygotowanie komputerów, instalacja środowisk blokowych lub tekstowych oraz testowanie programów. Drugim etapem jest szkolenie studentów-mentorów. Studenci

poznają scenariusz, przechodzą przez zadanie z perspektywy uczestnika i identyfikują miejsca, w których mogą pojawić się błędy.

Trzecim etapem jest wprowadzenie uczestników. Mentorzy prezentują cel zajęć, elementy stanowiska, zasady bezpieczeństwa i zakładany rezultat. Czwartym etapem jest samodzielna realizacja zadania: uczestnicy budują obwody z diodami, rezystorami, potencjometrami lub czujnikami, programują mikrokontrolery, uruchamiają roboty, projektują elementy albo testują prototypy. Mentor nie przejmuje zadania, lecz obserwuje pracę i interweniuje wtedy, gdy uczestnik potrzebuje wsparcia.

Piątym etapem jest diagnoza i rozwiązywanie problemów. W warsztatach technicznych błędy są nieuniknione: dioda może być podłączona odwrotnie, przewód może nie stykać, program może zawierać zły warunek, robot może reagować niezgodnie z oczekiwaniem, a model 3D może wymagać poprawy. Z perspektywy edukacyjnej błąd nie jest przerwaniem procesu, lecz jego częścią. Szóstym etapem jest rozszerzenie i modyfikacja projektu: dodanie funkcji, zmiana parametrów, poprawa konstrukcji albo zaprojektowanie własnego wariantu.

Przykładem może być warsztat z Arduino, w którym uczestnicy budują prosty układ z diodą lub czujnikiem, uruchamiają program, sprawdzają reakcję elementu, a następnie zmieniają parametr działania. Mentor demonstruje zasadę, obserwuje pracę grupy i naprowadza pytaniami: gdzie jest zasilanie, co zmieniło się w kodzie, dlaczego element nie reaguje. Dzięki temu model staje się konkretną procedurą pracy, a nie tylko ogólną deklaracją wsparcia.



Rys. 4. Schemat układu z płytką mikrokontrolera i diodami LED wykorzystywanego podczas warsztatów
Źródło: SIC Start!, dział „Elektronika”, kurs E.001 „Prawo Ohma i LEDy”, https://start.sic.edu.pl/course/index.php?categoryid=15 (dostęp: 16.07.2026).

Siódmym etapem jest podsumowanie. Uczestnicy prezentują działanie rozwiązania, omawiają problemy i wskazują możliwe rozwinięcia. Mentorzy

łączą doświadczenie warsztatowe z szerszym kontekstem: zastosowaniami przemysłowymi, studiami technicznymi, projektami studenckimi lub możliwością kontynuacji pracy w domu.

6. Wyniki

Zgromadzony materiał pozwala wyróżnić cztery grupy ustaleń dotyczących działania modelu. Pierwsza dotyczy organizacji technologicznej. Powtarzalność warsztatów wynika z połączenia sprzętu, oprogramowania, scenariuszy i ról prowadzących w jeden system. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie zajęć o różnym poziomie trudności: od krótkich pokazów po warsztaty projektowe.

Drugą grupę stanowią mechanizmy edukacyjne po stronie uczestników. Wskaźnikami efektu nie były deklaracje ankietowe, lecz obserwowalne elementy procesu: poprawnie zmontowany układ, działający program, samodzielnie zlokalizowany błąd, modyfikacja projektu lub prezentacja rezultatu. W ujęciu Bandury takie doświadczenie może wzmacniać poczucie własnej skuteczności, czyli przekonanie uczestnika, że potrafi poradzić sobie z zadaniem technicznym[85]. Podobny kierunek zależności zaobserwowano w badaniu zajęć projektowych prowadzonych z wykorzystaniem platformy Arduino wśród studentów pierwszego roku Politechniki Warszawskiej[86].

Trzecia grupa ustaleń dotyczy ról pełnionych przez studentów-mentorów. W modelu ZTS student występuje jako instruktor, opiekun grupy, doradca techniczny, diagnosta usterek, moderator pracy zespołowej i popularyzator nauki. Te role są ważniejsze niż sam fakt posiadania wiedzy technicznej, ponieważ decydują o tym, czy uczestnik pozostaje wykonawcą instrukcji, czy przechodzi do samodzielnego testowania rozwiązania. Czwarta grupa ustaleń ma charakter popularyzatorski: technologie pojawiają się w szkołach, podczas dni otwartych, pikników naukowych, konkursów i wydarzeń uczelnianych, budując pomost między uczelnią techniczną a środowiskiem szkolnym.

7. Autorski model mentoringu technicznego

Na podstawie analizy działań Koła Naukowego Zrób To Sam można zaproponować pięciowarstwowy model mentoringu technicznego. Pierwszą warstwę stanowi infrastruktura technologiczna: sprzęt, oprogramowanie, zestawy

---

[85] Bandura A., *Self-efficacy: Toward a Unifying Theory of Behavioral Change*, "Psychological Review" 1977, 84(2), s. 191-215.

[86] Manujło A., Hackiewicz K., Gąsior M., Cichosz A., *Wpływ zajęć projektowych prowadzonych z wykorzystaniem innowacyjnych metod kształcenia na poziom poczucia uogólnionej własnej skuteczności studentów*, [w:] Ł. Wójtowicz (red.), *MIK-21. Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI w.*, Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2020, s. 421–430.

warsztatowe, płytki stykowe, mikrokontrolery, czujniki, roboty, materiały dydaktyczne, narzędzia, elementy zapasowe i środowiska programistyczne. Infrastruktura wpływa na poziom trudności zadania, czas przygotowania, bezpieczeństwo i możliwość samodzielnej pracy uczestnika.

Drugą warstwą jest scenariusz dydaktyczno-techniczny. Określa on cel zadania, etapy, wymagane elementy, przewidywany rezultat, warianty rozszerzenia, poziom trudności i typowe problemy. Dobry scenariusz nie jest wyłącznie instrukcją montażu. Musi zostawiać przestrzeń na decyzje uczestnika, diagnozę i modyfikację. Trzecią warstwę stanowi mentor techniczny, czyli student przygotowany do prowadzenia warsztatu. Mentor zna sprzęt, rozumie scenariusz, przewiduje błędy, dba o bezpieczeństwo i prowadzi uczestnika tak, aby nie zastępować jego pracy własnym działaniem.

Rys. 5. Pięciowarstwowy model mentoringu technicznego ZTS
Źródło: opracowanie własne.

Czwartą warstwą jest aktywność uczestnika. Uczestnik projektuje, buduje, programuje, testuje, poprawia i prezentuje rozwiązanie. Nawet proste zadanie powinno zawierać decyzję techniczną: wybór połączenia, zmianę parametru, interpretację błędu albo ocenę prototypu. Piątą warstwą jest organizacja i skalowanie: przygotowanie kolejnych mentorów, dokumentowanie scenariuszy, porządkowanie zestawów, logistyka sprzętu, ewaluacja zajęć i przekazywanie wiedzy nowym członkom koła.

Schemat logiczny modelu można przedstawić następująco: przygotowanie mentorów i infrastruktury; rozpoznanie poziomu grupy; demonstracja zadania;

samodzielne działanie uczestników; wsparcie mentorskie; diagnoza i rozwiązanie problemu; modyfikacja projektu; prezentacja efektów; refleksja i wskazanie dalszych możliwości pracy. Układ ten odpowiada logice uczenia się przez doświadczenie: działaniu, obserwacji skutków, refleksji oraz korekcie rozwiązania. W takim ujęciu mentoring techniczny jest metodą prowadzenia zajęć oraz sposobem organizacji środowiska uczenia się.

8. Dyskusja

Model ZTS wpisuje się w kilka nurtów obecnych w literaturze. Po pierwsze, wykorzystuje elektronikę i Arduino jako narzędzia łączące kod z fizycznym działaniem urządzenia. Następnie działania robotyczne koła pokazują wartość zadań integrujących mechanikę, sensorykę i programowanie, co odpowiada ustaleniom badań nad robotyką edukacyjną[87]. Ponadto druk 3D i prototypowanie wzmacniają konstrukcjonistyczny charakter modelu, ponieważ uczestnik tworzy obiekt lub element systemu, który można ocenić, poprawić i wykorzystać. Istotnym elementem jest również to, że model ZTS jest zgodny z założeniami maker education: uczenie odbywa się przez tworzenie, eksperymentowanie, współpracę i iteracyjne poprawianie błędów[88].

Szczególną cechą modelu jest rola studentów jako mentorów. W przeciwieństwie do klasycznego układu nauczyciel-uczeń relacja near-peer pozwala budować mniej formalne środowisko uczenia się. Student jest wystarczająco kompetentny, aby wspierać uczestnika technicznie, ale jednocześnie wystarczająco bliski, aby stanowić osiągalny wzorzec. Wartość modelu polega więc na integracji infrastruktury, scenariuszy, przygotowania mentorów, aktywności uczestnika i skalowania działań. Dopiero taki układ pozwala mówić o powtarzalnym modelu mentoringu technicznego.

9. Ograniczenia badania

Opracowanie dotyczy jednego koła naukowego i ma charakter studium przypadku, dlatego wyniki należy odnosić przede wszystkim do mechanizmów organizacji i prowadzenia warsztatów, a nie do wszystkich form edukacji STEM. Analizowane działania obejmowały różne formaty, grupy wiekowe, poziomy trudności i konteksty organizacyjne. Dalsze badania mogłyby porównać różne

---

[87] Sapounidis T., Tselegkaridis S., Stamovlasis D., *Educational Robotics and STEM in Primary Education: A Review and a Meta-Analysis*, "Journal of Research on Technology in Education" 2024, 56(4), s. 462-476.

[88] Hsu Y.-C., Baldwin S., Ching Y.-H., *Learning Through Making and Maker Education*, "TechTrends" 2017, 61(6), s. 589-594.

typy scenariuszy, zakres samodzielności uczestników oraz trwałość zainteresowania techniką po zakończeniu zajęć.

10. Wnioski

Analiza działalności Koła Naukowego Zrób To Sam pokazuje, że popularyzacja elektroniki, robotyki i druku 3D wymaga nie tylko dostępu do sprzętu, lecz także modelu pracy umożliwiającego uczestnikom samodzielne działanie. Kluczowe znaczenie mają studenci-mentorzy, scenariusze, sprawdzone stanowiska, diagnozowanie błędów i przestrzeń do modyfikowania rozwiązań.

Proponowany pięciowarstwowy model porządkuje najważniejsze elementy organizacji i prowadzenia warsztatów technicznych. Dzięki temu koło naukowe może pełnić funkcję edukacyjnego pomostu między uczelnią a szkołami, udostępniając uczestnikom zajęć technologie, które w zwykłym trybie nauczania bywają trudno dostępne.

Najważniejsza wartość modelu polega na połączeniu near-peer mentoringu z konstrukcjonistycznym uczeniem przez tworzenie. Student nie tylko pokazuje technologię, ale wspiera uczestnika zajęć w przejściu przez cykl techniczny: od przygotowania rozwiązania do jego samodzielnego przetestowania i poprawy. Taki model może wzmacniać zainteresowanie STEM, poczucie sprawczości i dostępność edukacji technicznej.

11. Bibliografia

1 Abu Khurma O., Ali N., Swe Khine M., *Exploring the Impact of 3D Printing Integration on STEM Attitudes in Elementary Schools*, "Contemporary Educational Technology" 2023, 15(4), ep458.

2 Bandura A., *Self-efficacy: Toward a Unifying Theory of Behavioral Change*, "Psychological Review" 1977, 84(2), s. 191-215.

3 García-Tudela P.A., Marín-Marín J.A., *Use of Arduino in Primary Education: A Systematic Review*, "Education Sciences" 2023, 13(2), 134.

4 Hsu Y.-C., Baldwin S., Ching Y.-H., *Learning Through Making and Maker Education*, "TechTrends" 2017, 61(6), s. 589-594.

5 Kolb D.A., *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1984.

6 Manujło A., Hackiewicz K., Gąsior M., Cichosz A., *Wpływ zajęć projektowych prowadzonych z wykorzystaniem innowacyjnych metod kształcenia na poziom poczucia uogólnionej własnej skuteczności studentów*, [w:] Ł. Wójtowicz (red.), *MIK-21. Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI w.*, Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2020, s. 421–430.

7 Ouyang F., Xu W., *The Effects of Educational Robotics in STEM Education: A Multilevel Meta-analysis*, "International Journal of STEM Education" 2024, 11, 7.

8 Papert S., *Situating Constructionism*, [w:] I. Harel, S. Papert (red.), *Constructionism*, Ablex Publishing Corporation, Norwood 1991, s. 1–11.

9 Pluth M.D., Boettcher S.W., Nazin G.V., Greenaway A.L., Hartle M.D., *Collaboration and Near-Peer Mentoring as a Platform for Sustainable Science Education Outreach*, "Journal of Chemical Education" 2015, 92(4), s. 625-630.
10 Price E., Siyahhan S., Marshall J., DeLeone C., *Mobile Making: A Research-Based Afterschool Program Led by STEM Undergraduates Serving as Near-Peer Mentors*, "Journal of STEM Outreach" 2023, 6(1), s. 1-12.
11 Sapounidis T., Tselegkaridis S., Stamovlasis D., *Educational Robotics and STEM in Primary Education: A Review and a Meta-Analysis*, "Journal of Research on Technology in Education" 2024, 56(4), s. 462-476.
12 SIC Start!, Elektronika: E.001 Prawo Ohma i LEDy, https://start.sic.edu.pl/course/index.php?categoryid=15 (dostęp: 16.07.2026).
13 Tenenbaum L.S., Anderson M.K., Jett M., Yourick D.L., *An Innovative Near-Peer Mentoring Model for Undergraduate and Secondary Students: STEM Focus*, "Innovative Higher Education" 2014, 39(5), s. 375-385.
14 Vennix J., den Brok P., Taconis R., *Do Outreach Activities in Secondary STEM Education Motivate Students and Improve Their Attitudes Towards STEM?*, "International Journal of Science Education" 2018, 40(11), s. 1263-1283.

Łukasz Menderak

AGH w Krakowie

Ocena zależności między stanem zdrowia akumulatorów trakcyjnych a dostrzeganym przez użytkowników pogorszeniem zasięgu samochodów elektrycznych

Słowa kluczowe: akumulator trakcyjny, samochody elektryczne, SOH, użytkownicy, zasięg pojazdu

Streszczenie

Stan zdrowia akumulatora trakcyjnego jest jednym z podstawowych parametrów wykorzystywanych do oceny kondycji technicznej samochodu elektrycznego. Celem przeprowadzonego badania było określenie związku między stanem zdrowia akumulatora trakcyjnego a deklarowanym przez użytkowników zaobserwowaniem pogorszenia zasięgu pojazdu. Analizą objęto 312 obserwacji, wykorzystując testy zależności i regresję logistyczną. Wyniki wykazały, że niższa deklarowana kategoria stanu zdrowia akumulatora wiązała się z częstszym deklarowaniem spadku zasięgu, również w grupach pojazdów o porównywalnym wieku i przebiegu. Rozbieżności między deklarowaną kondycją akumulatora a oceną użytkownika występowały częściej w przypadku starszych pojazdów. Uzyskane wyniki wskazują, że deklarowany przez użytkownika stan zdrowia akumulatora stanowi istotny, lecz samodzielnie niewystarczający punkt odniesienia dla oceny zmian zasięgu. Łączne uwzględnienie tego parametru i doświadczeń użytkownika może wspierać diagnostykę oraz wycenę używanych samochodów elektrycznych.

1. Wstęp

Zasięg samochodu elektrycznego dostępny po naładowaniu akumulatora stanowi istotny wyznacznik jego praktycznej użyteczności. W warunkach rzeczywistej eksploatacji nie jest on jednak wartością stałą, ponieważ zależy od warunków pogodowych oraz sposobu użytkowania pojazdu[89]. Jego zmienność pogłębiają warunki termiczne oraz działanie układów pomocniczych

[89] X. Hao, H. Wang, Z. Lin, M. Ouyang, *Seasonal effects on electric vehicle energy consumption and driving range: A case study on personal, taxi, and ridesharing vehicles*, Journal of Cleaner Production, 249, 2020, s. 1.

wpływających na bieżące zużycie energii[90]. Osiągany w praktyce dystans jest zatem wynikiem zarówno właściwości pojazdu, jak i warunków jego eksploatacji.

Obok krótkookresowych wahań zużycia energii na możliwości przejazdu oddziałuje również postępujące starzenie akumulatora trakcyjnego, prowadzące do utraty pojemności i ograniczenia zasięgu przy pełnym naładowaniu[91]. Stopień tej degradacji opisuje wskaźnik SOH (ang. *State of Health* - stan zdrowia akumulatora trakcyjnego), odnoszony zazwyczaj do pozostałej pojemności lub energii pakietu względem jego stanu początkowego[92]. Różnice w kondycji akumulatorów sprawiają, że pojazdy tego samego typu, mimo jednakowego poziomu naładowania, mogą oferować odmienny zasięg[93].

Uwzględnienie SOH w procesie estymacji zasięgu może zwiększać dokładność informacji o pozostałym dystansie prezentowanej kierowcy[94]. Z perspektywy użytkownika znaczenie mają jednak także dostępny bufor zasięgu oraz niepewność dotycząca zużycia energii przez pojazd[95]. Zasięg technicznie dostępny nie zawsze odpowiada więc dystansowi rzeczywiście wykorzystywanemu przez kierowcę. W ocenie użyteczności samochodu elektrycznego znaczenie ma również zakres, który użytkownik uznaje za możliwy do komfortowego wykorzystania[96].

Ocena możliwości dalszej jazdy zależy zatem od właściwości pojazdu, informacji udostępnianych kierowcy i sposobu ich interpretacji. Zależności między tymi elementami stanowią istotny kontekst dla analizy zmian zasięgu dostrzeganych przez użytkowników samochodów elektrycznych w toku eksploatacji pojazdu.

---

[90] J. Seo, J. Cha, *Real-world analysis of energy consumption in a battery electric vehicle: Effects of ambient temperatures and thermal management system operation*, Energy Conversion and Management, 345, 2025, s. 1.

[91] Y. Xing, E.W.M. Ma, K.L. Tsui, M. Pecht, *Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles*, Energies, 4(11), 2011, s. 1846.

[92] P. Bilfinger, M. Schreiber, P. Rosner, K. Abo Gamra, J. Schöberl, C. Grosu, M. Lienkamp, *Why we need a standardized state of health measurement procedure for electric vehicle battery packs—A proposal for energy- and capacity-based metrics*, npj Clean Energy, 1, 2025, s. 1.

[93] Z. Wang, S. Zeng, J. Guo, *Understanding the influence of state of health on the range anxiety of battery electric vehicle drivers*, IET Intelligent Transport Systems, 15(2), 2021, s. 287.

[94] Ibidem, s. 288.

[95] N. Rauh, T. Franke, J.F. Krems, *User experience with electric vehicles while driving in a critical range situation – a qualitative approach*, IET Intelligent Transport Systems, 9(7), 2015, s. 734.

[96] T. Franke, I. Neumann, F. Bühler, P. Cocron, J.F. Krems, *Experiencing Range in an Electric Vehicle: Understanding Psychological Barriers*, Applied Psychology: An International Review, 61(3), 2012, s. 385-388.

2. Przegląd literatury

Proces degradacji akumulatora trakcyjnego obejmuje starzenie kalendarzowe i cykliczne. Starzenie kalendarzowe postępuje wraz z upływem czasu również w okresach, w których akumulator nie jest aktywnie eksploatowany[97]. Jego tempo zależy w szczególności od temperatury oraz poziomu naładowania utrzymywanego podczas postoju, przy czym wzrost obu tych parametrów przyspiesza degradację[98].

Starzenie cykliczne zachodzi w następstwie kolejnych cykli ładowania i rozładowania, a jego intensywność zależy m.in. od temperatury pracy, szybkości ładowania i rozładowania oraz wartości napięć granicznych występujących w trakcie eksploatacji[99].

Brak ujednoliconej procedury pomiaru SOH sprawia, że nadal nie funkcjonuje jednolity sposób wyznaczania tego wskaźnika[100]. Jednocześnie modele pozostałego zasięgu oparte wyłącznie na nominalnej pojemności akumulatora i bieżącym poziomie naładowania mogą nie odzwierciedlać zmian pojemności pakietu wynikających z postępującej degradacji[101]. Pozostały zasięg powinien być zatem wyznaczany na podstawie energii dostępnej przy aktualnej kondycji akumulatora oraz przewidywanego zużycia energii podczas dalszej jazdy[102][103].

Zasięg technicznie możliwy nie jest tożsamy z zasięgiem praktycznie użytecznym. Franke i Krems wyróżniają trzy psychologiczne poziomy zasięgu: osiągalny, typowy i komfortowy. Odpowiadają one kolejno maksymalnemu dystansowi możliwemu do uzyskania przez użytkownika, zasięgowi zwykle osiąganemu w codziennej jeździe oraz dystansowi, który użytkownik może

---

[97] S.S. Madani, Y. Shabeer, F. Allard, M. Fowler, C. Ziebert, Z. Wang, S. Panchal, H. Chaoui, S. Mekhilef, S.X. Dou, K. See, K. Khalilpour, *A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis*, Batteries, 11(4), 2025, s. 7-8.

[98] D. Werner, S. Paarmann, T. Wetzel, *Calendar Aging of Li-Ion Cells–Experimental Investigation and Empirical Correlation*, Batteries, 7(2), 2021, s. 1.

[99] J. Zhang, H. Huang, G. Zhang, Z. Dai, Y. Wen, L. Jiang, *Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: A review*, Journal of Energy Storage, 93, 2024, s. 1, 3.

[100] P. Bilfinger, M. Schreiber, P. Rosner, K. Abo Gamra, J. Schöberl, C. Grosu, M. Lienkamp, *Why we need a standardized*… op. cit., s. 1.

[101] K. Esakkiappan, P. Gowtham, V.B.S. Ammani Ammal, D. Shalini, T. Mariprasath, S. Al Bustanji, V. Bereznychenko, *A physics-guided temporal convolutional learning with XGBoost integration for degradation-aware and robust electric vehicle range prediction*, Scientific Reports, 16, 2026, s. 1.

[102] Z. Wang, S. Zeng, J. Guo, *Understanding the influence*… op. cit., s. 288.

[103] P. Mei, H.R. Karimi, C. Huang, F. Chen, S. Yang, *Remaining driving range prediction for electric vehicles: Key challenges and outlook*, IET Control Theory & Applications, 17(14), 2023, s. 1885.

pokonać bez odczuwania stresu[104]. Ocena, czy dostępny zasięg jest wystarczający, zależy zatem od tego, jak użytkownik postrzega jego dopasowanie do własnych potrzeb mobilności[105]. Postrzeganie zasięgu pozostaje także zależne od kontekstu podróży. Najmniejsze nasilenie obaw związanych z zasięgiem odnotowano podczas spontanicznych przejazdów, a większe na nieznanych trasach i w skrajnych warunkach pogodowych[106]. W konsekwencji zmiany technicznie dostępnego zasięgu nie muszą być jednakowo dostrzegane przez wszystkich użytkowników.

W eksperymencie symulatorowym uwzględnienie obniżonej wartości SOH w estymacji pozostałego zasięgu, a następnie udostępnienie kierowcom tej wartości, wiązało się z niższym deklarowanym stresem w sytuacji krytycznej[107]. W badaniu terenowym z udziałem 63 osób większa wiedza o czynnikach wpływających na zasięg oraz doświadczenie w użytkowaniu samochodów elektrycznych wiązały się z niższym poziomem stresu[108]. Badanie ankietowe przeprowadzone wśród ponad 200 respondentów wykazało, że przy podejmowaniu decyzji o ładowaniu właściciele takich pojazdów byli mniej wrażliwi na poziom naładowania akumulatora i pozostały zasięg niż pozostali respondenci[109]. W innym eksperymencie terenowym zastosowanie systemów informacji pokładowej wiązało się z oceną sytuacji krytycznej pod względem zasięgu jako mniej wymagającej i zagrażającej[110]. Dotychczasowe badania koncentrowały się zatem przede wszystkim na stresie związanym z zasięgiem pojazdu oraz znaczeniu doświadczenia kierowców i informacji prezentowanych w pojeździe.

W przeanalizowanej literaturze techniczne analizy degradacji akumulatorów oraz badania nad postrzeganiem zasięgu przez użytkowników są prowadzone głównie jako odrębne nurty. Nie zidentyfikowano natomiast opracowań,

---

[104] T. Franke, J.F. Krems, *Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use*, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 48, 2013, s. 110-112.
[105] T. Franke, M. Günther, M. Trantow, J.F. Krems, *Does this range suit me? Range satisfaction of battery electric vehicle users*, Applied Ergonomics, 65, 2017, s. 192.
[106] J. Zatsarnaja, K. Reiter, M. Mehdizadeh, A. Nayum, T. Nordfjærn, *Charged up with peace in mind: Unraveling the factors of range anxiety among norwegian electric vehicle drivers*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 110, 2025, s. 21-22.
[107] Z. Wang, S. Zeng, J. Guo, *Understanding the influence*… op. cit., s. 288-294.
[108] N. Rauh, M. Günther, J.F. Krems, *Positive influence of practical electric vehicle driving experience and range related knowledge on drivers' experienced range stress*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 71, 2020, s. 182.
[109] D. Pevec, J. Babic, A. Carvalho, Y. Ghiassi-Farrokhfal, W. Ketter, V. Podobnik, *A survey-based assessment of how existing and potential electric vehicle owners perceive range anxiety*, Journal of Cleaner Production, 276, 2020, s. 1, 11.
[110] M. Eisel, I. Nastjuk, L.M. Kolbe, *Understanding the influence of in-vehicle information systems on range stress – Insights from an electric vehicle field experiment*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 43, 2016, s. 199, 209.

w których wartość SOH zestawiono bezpośrednio z deklarowanym przez użytkowników pogorszeniem zasięgu w toku rzeczywistej eksploatacji pojazdu. Na tej podstawie zidentyfikowano lukę badawczą dotyczącą relacji między kondycją akumulatora a zmianami zasięgu dostrzeganymi przez użytkowników.

3. Metodyka przeprowadzonych badań

Celem przeprowadzonego badania było określenie związku pomiędzy deklarowaną kategorią SOH, a zauważanym przez użytkowników pogorszeniem zasięgu samochodu elektrycznego, a także ocena, w jakim stopniu zależność ta jest zróżnicowana ze względu na wiek, przebieg oraz intensywność użytkowania pojazdu.

Problem badawczy dotyczył określenia, w jakim stopniu deklarowana kategoria SOH akumulatora trakcyjnego, znajduje odzwierciedlenie w zauważanym przez użytkowników pogorszeniu zasięgu pojazdu elektrycznego.

Dla uszczegółowienia zakresu prowadzonych analiz sformułowano pięć pytań badawczych (tab. 1).

Tab. 1. Pytania badawcze przyjęte w badaniu

Nr	Treść pytania badawczego
PB1	Czy udział użytkowników deklarujących zauważalny spadek zasięgu różni się pomiędzy deklarowanymi przedziałami SOH akumulatora trakcyjnego?
PB2	Czy wśród pojazdów o zbliżonym wieku i przebiegu istnieje związek między deklarowaną kategorią SOH a obserwowanym przez użytkownika spadkiem zasięgu?
PB3	Czy średni dzienny dystans pokonywany przez użytkownika pojazdu różnicuje zależność pomiędzy deklarowaną kategorią SOH a zauważanym spadkiem zasięgu?
PB4	Czy wiek, przebieg i intensywność codziennego użytkowania pojazdu są związane z rozbieżnościami między deklarowaną kategorią SOH a obserwowanym przez użytkownika spadkiem zasięgu?
PB5	Czy większa intensywność codziennego użytkowania pojazdu wzmacnia zależność między niższą deklarowaną kategorią SOH a zauważanym przez użytkownika spadkiem zasięgu?

Źródło: opracowanie własne

Z uwagi na cel badania, obejmujący analizę zależności pomiędzy deklarowaną kategorią SOH a zauważanym pogorszeniem zasięgu, przyjęto podejście ilościowe, powszechnie stosowane w naukach o zarządzaniu i jakości[111]. Pozwala ono na identyfikację czynników istotnych dla badanego zjawiska oraz statystyczną ocenę występujących między nimi relacji[112]. Materiał empiryczny zgromadzono metodą sondażową z wykorzystaniem kwestionariusza ankiety,

[111] W. Czakon, *W kierunku rozwoju badań ilościowych w naukach o zarządzaniu*, Organizacja i Kierowanie, 3, 2016, s. 44.
[112] J.W. Creswell, *Projektowanie badań naukowych: metody jakościowe, ilościowe i mieszane*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2009, s. 119.

a uzyskane odpowiedzi, mające głównie charakter kategorialny, zakodowano i poddano analizom statystycznym[113][114].

Przeprowadzono wtórną analizę danych zastanych pod kątem nowego problemu badawczego. Badanie pierwotne przeprowadzono z wykorzystaniem autorskiego, 14-pytaniowego kwestionariusza ankiety przygotowanego w Microsoft Forms. Formularz udostępniono dwukrotnie w okresie od 23 października do 6 listopada 2025 r. w wybranych, częściowo pokrywających się społecznościach internetowych polskich użytkowników samochodów elektrycznych. Dobór próby miał charakter nieprobabilistyczny, a udział respondentów był dobrowolny. Spośród 481 uzyskanych odpowiedzi do dalszego opracowania zakwalifikowano 479. Określoną kategorię SOH podało 376 respondentów, natomiast główne analizy zależności między SOH a zauważonym spadkiem zasięgu przeprowadzono na 312 obserwacjach, dla których dostępna była również jednoznaczna odpowiedź dotycząca zmiany zasięgu pojazdu.

W analizie zastosowano statystyki opisowe, test χ^2 Pearsona, dokładny test Fishera oraz binarną regresję logistyczną. Siłę zależności oceniano za pomocą współczynników V Craméra lub φ, a w porównaniach wielokrotnych zastosowano korektę Bonferroniego. Ze względu na kierunkowy charakter PB5 interakcję kategorii SOH i średniego dziennego dystansu oceniono także jednostronnie. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0{,}05$. Obliczenia wykonano w programach Microsoft Excel i Statistica.

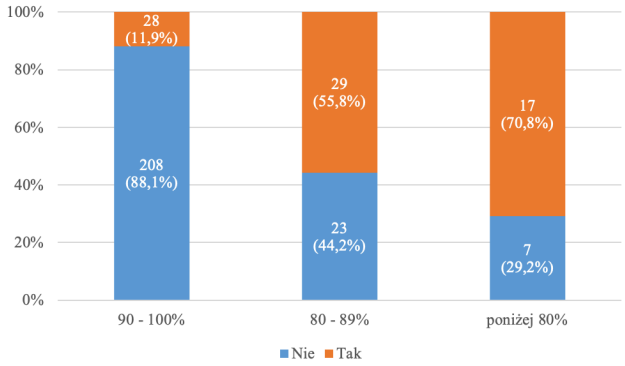
4. Wyniki badań

Zależność między deklarowaną kategorią SOH a obserwowaniem spadku zasięgu

Analizą objęto 312 respondentów, którzy wskazali kategorię SOH oraz jednoznacznie ocenili zmianę zasięgu pojazdu. Pogorszenie zasięgu zadeklarowało 23,7% badanych. Odsetek ten był wyższy w niższych kategoriach SOH i wynosił: 11,9% w grupie 90 - 100%, 55,8% w grupie 80 - 89% oraz 70,8% wśród użytkowników pojazdów o SOH poniżej 80% (wyk. 1).

[113] Ibidem, s. 38.

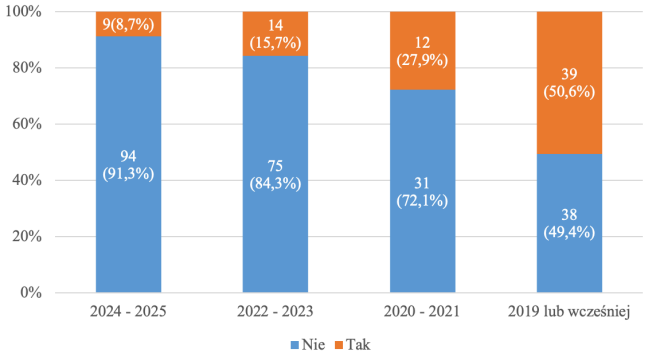
[114] E.R. Babbie, *Badania społeczne w praktyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2004, s. 12-13, 19, 267-268.



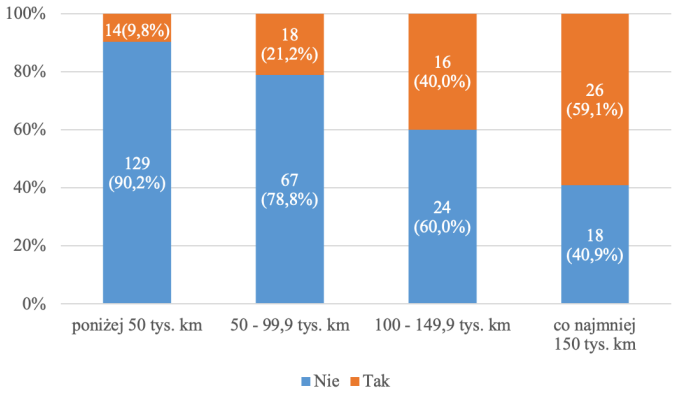
Rys. 1. Rozkład odpowiedzi dotyczących zauważonego spadku zasięgu według deklarowanej kategorii SOH
Źródło: opracowanie własne

Zależność między deklarowaną kategorią SOH a deklarowanym pogorszeniem zasięgu była istotna statystycznie: $\chi^2(2) = 77{,}30$; $p < 0{,}001$; V Craméra = 0,498. Porównania parami z korektą Bonferroniego wykazały istotnie większy udział deklaracji pogorszenia zasięgu w grupach SOH 80 - 89% oraz poniżej 80% niż w grupie 90 - 100% (w obu przypadkach $p < 0{,}001$). Różnica między kategoriami 80 - 89% i poniżej 80% nie była istotna statystycznie ($p = 0{,}313$).

Na poziomie opisowym udział deklaracji pogorszenia zasięgu był zróżnicowany w zależności od wieku i przebiegu pojazdu. W skrajnych kategoriach wynosił 8,7% dla pojazdów z lat 2024 - 2025 oraz 50,6% dla pojazdów z 2019 r. lub starszych (wyk. 2), a także 9,8% przy przebiegu poniżej 50 tys. km i 59,1% przy przebiegu co najmniej 150 tys. km (wyk. 3).



Rys. 2. Rozkład odpowiedzi dotyczących zauważonego spadku zasięgu według wieku pojazdu
Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Rozkład odpowiedzi dotyczących zauważonego spadku zasięgu według przebiegu pojazdu
Źródło: opracowanie własne

W celu oceny zależności między deklarowaną kategorią SOH a deklarowanym pogorszeniem zasięgu, z jednoczesnym uwzględnieniem wieku i przebiegu pojazdu, zastosowano binarną regresję logistyczną. Model był istotny statystycznie, $\chi^2(8) = 78{,}14$; $p < 0{,}001$. Istotny efekt stwierdzono dla kategorii SOH, $\chi^2(2) = 25{,}1$; $p < 0{,}001$, natomiast wiek i przebieg pojazdu nie były istotne statystycznie (tab. 2). Kategorię SOH 90 - 100% przyjęto jako kategorię odniesienia.

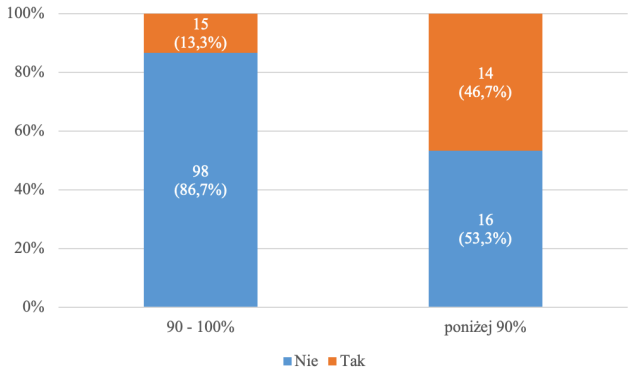
Tab. 2. Wyniki binarnej regresji logistycznej dla deklarowanego pogorszenia zasięgu

Zmienna lub porównanie	Miara	Wynik	p
Deklarowana kategoria SOH	χ^2 LR(2)	25,11	<0,001
Wiek pojazdu	χ^2 LR(3)	0,68	0,877
Przebieg pojazdu	χ^2 LR(3)	5,24	0,155
SOH 80 - 89% względem 90 - 100%	OR (95% PU)	5,28 (2,17 - 12,81)	<0,001
SOH poniżej 80% względem 90 - 100%	OR (95% PU)	13,04 (4,08 - 41,64)	<0,001

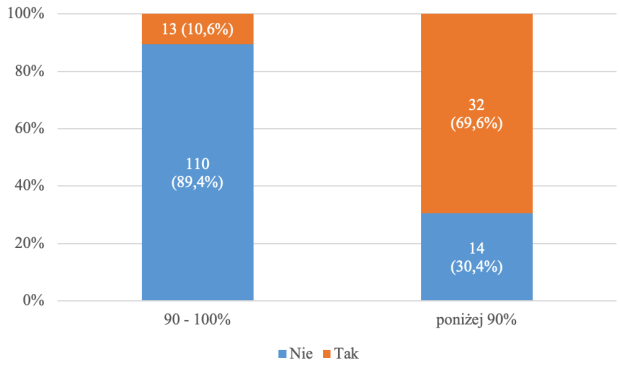
Źródło: opracowanie własne

Intensywność użytkowania pojazdu a zależność między deklarowaną kategorią SOH i zaobserwowaniem pogorszenia zasięgu

Intensywność użytkowania pojazdu analizowano z uwzględnieniem dwóch kategorii średniego dziennego dystansu. Wśród użytkowników pokonujących poniżej 50 km dziennie pogorszenie zasięgu deklarowało 13,3% respondentów przy SOH 90 - 100% oraz 46,7% przy SOH poniżej 90% (wyk. 4). W grupie pokonującej co najmniej 50 km dziennie odsetki te wyniosły odpowiednio 10,6% i 69,6% (wyk. 5).



Rys. 4. Deklarowany spadek zasięgu według SOH przy dystansie poniżej 50 km dziennie
Źródło: opracowanie własne

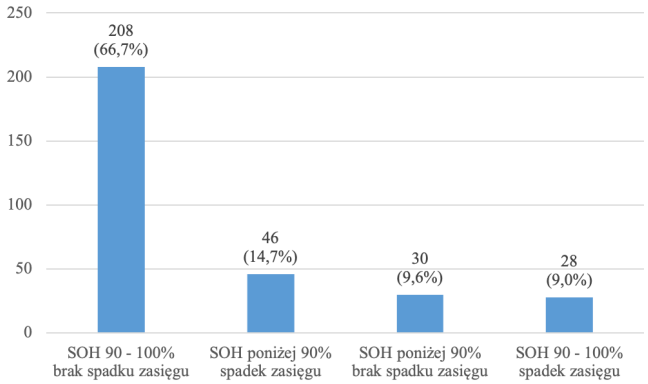


Rys. 5. Deklarowany spadek zasięgu według SOH przy dystansie co najmniej 50 km dziennie
Źródło: opracowanie własne

Analiza regresji logistycznej nie wykazała, aby średni dzienny dystans istotnie różnicował zależność między deklarowaną kategorią SOH a deklarowanym pogorszeniem zasięgu. Pomimo widocznych różnic (wyk. 4, 5), interakcja deklarowanej kategorii SOH i średniego dziennego dystansu nie była istotna statystycznie w ocenie dwustronnej, χ^2 LR(1) = 3,00; p = 0,083. Uzupełniająca ocena jednostronna, przeprowadzona na podstawie statystyki z, dała wynik istotny statystycznie, z = 1,73; p = 0,042.

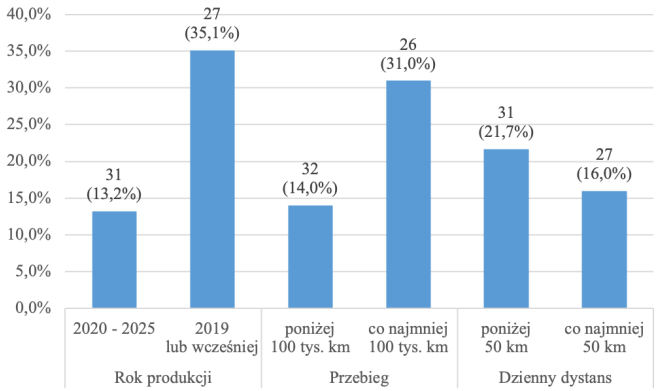
Rozbieżności między deklarowaną kategorią SOH a zaobserwowanym pogorszeniem zasięgu

Rozbieżności między deklarowaną kategorią SOH a deklarowanym pogorszeniem zasięgu obejmowały przypadki, w których użytkownik zauważał spadek zasięgu przy SOH 90 - 100% albo nie zauważał go przy SOH poniżej 90%. Profile te wystąpiły łącznie w 58 z 312 obserwacji, stanowiąc 18,6% analizowanej próby. Pozostałe 81,4% obserwacji odpowiadało oczekiwanemu kierunkowi zależności (wyk. 6).



Rys. 6. Rozkład profili SOH i deklarowanego spadku zasięgu
Źródło: opracowanie własne

Strukturę rozbieżności przeanalizowano następnie z uwzględnieniem wieku, przebiegu oraz średniego dziennego dystansu. Na poziomie opisowym udział takich przypadków wynosił 13,2% dla pojazdów z lat 2020 - 2025 i 35,1% dla pojazdów z 2019 r. lub starszych. W grupach przebiegu poniżej 100 tys. km i co najmniej 100 tys. km było to odpowiednio 14,0% i 31,0%, natomiast wśród użytkowników pokonujących poniżej 50 km oraz co najmniej 50 km dziennie 21,7% i 16,0% (wyk. 7).



Rys. 7. Udział rozbieżności według wieku, przebiegu i dziennego dystansu
Źródło: opracowanie własne

Powyższe zależności zweryfikowano za pomocą binarnej regresji logistycznej obejmującej wiek, przebieg oraz średni dzienny dystans. Model był istotny statystycznie, χ^2 LR(3) = 19,96; p < 0,001. Po jednoczesnym uwzględnieniu wszystkich zmiennych istotny związek z występowaniem rozbieżności stwierdzono wyłącznie dla wieku pojazdu. W pojazdach z 2019 r. lub starszych szanse wystąpienia rozbieżności były 2,75-krotnie większe niż w pojazdach z lat 2020 - 2025. Przebieg oraz średni dzienny dystans nie były istotne statystycznie (tab. 3). Za kategorie odniesienia przyjęto pojazdy z lat 2020 - 2025, przebieg poniżej 100 tys. km oraz dystans poniżej 50 km dziennie.

Tab. 3. Wyniki regresji logistycznej dla występowania rozbieżności

Zmienna	OR	Dolna granica 95% PU	Górna granica 95% PU	p
Wiek bin.	2,748	1,098	6,877	0,031
Przebieg bin.	1,527	0,591	3,947	0,382
Dystans bin.	0,570	0,306	1,061	0,076

Źródło: opracowanie własne

Dodatkowe analizy przeprowadzone odrębnie dla obu rodzajów rozbieżności nie wykazały istotności statystycznej modeli ani uwzględnionych w nich zmiennych.

5. Wnioski

Przeprowadzone analizy wskazują, że deklarowana kategoria SOH stanowi istotny punkt odniesienia w ocenie zmian zasięgu, jednak nie odzwierciedla w pełni doświadczeń użytkowników. Niższe deklarowane kategorie SOH wiązały się z częstszym zauważaniem pogorszenia zasięgu również wśród pojazdów o porównywalnym wieku i przebiegu, natomiast znaczenie intensywności codziennego użytkowania nie zostało jednoznacznie potwierdzone. Częstsze rozbieżności w starszych pojazdach wskazują ponadto, że zgodność między deklarowaną kategorią SOH a oceną użytkownika może zmniejszać się wraz z wiekiem pojazdu. Syntetyczne odpowiedzi na pytania badawcze (tab. 1) zestawiono w tabeli (tab. 4).

Tab. 4. Syntetyczne odpowiedzi na pytania badawcze

Nr	Odpowiedź
PB1	Tak, udział użytkowników deklarujących spadek zasięgu różnił się między deklarowanymi kategoriami SOH. Różnice wystąpiły między kategorią 90 - 100% a obiema niższymi kategoriami, lecz nie między kategoriami 80 - 89% i poniżej 80%.
PB2	Tak, wśród pojazdów o zbliżonym wieku i przebiegu stwierdzono istotny związek między deklarowaną kategorią SOH a obserwowanym spadkiem zasięgu
PB3	Nie, średni dzienny dystans nie różnicował istotnie zależności między deklarowaną kategorią SOH a zauważanym spadkiem zasięgu.
PB4	Występowanie rozbieżności wiązało się z wiekiem pojazdu. Nie stwierdzono natomiast niezależnego związku z jego przebiegiem ani intensywnością codziennego użytkowania.

PB5	W ocenie kierunkowej większy średni dzienny dystans był związany ze wzmocnieniem zależności między obniżoną deklarowaną kategorią SOH a zaobserwowanym pogorszeniem zasięgu, przy czym efekt osiągnął istotność wyłącznie w teście jednostronnym.

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badania

Całość uzyskanych ustaleń pozwala stwierdzić, że niższe deklarowane kategorie SOH wiązały się z częstszym deklarowaniem pogorszenia zasięgu samochodu elektrycznego. Zależność ta nie ma jednak charakteru bezwzględnego, ponieważ ocena użytkownika nie zawsze pozostaje zgodna z deklarowaną kategorią SOH, szczególnie w przypadku starszych pojazdów. W odniesieniu do głównego problemu badawczego oznacza to, że deklarowana kategoria SOH stanowi istotny punkt odniesienia dla doświadczeń użytkownika związanych z zasięgiem, lecz nie wyjaśnia ich w pełni.

Wartość użytkowa badania wynika ze wskazania, że deklarowana kategoria SOH i zaobserwowane pogorszenie zasięgu opisują komplementarne, lecz nietożsame aspekty kondycji eksploatacyjnej samochodu elektrycznego. Ich łączne uwzględnienie może wspierać pełniejszą ocenę stanu pojazdu. Ustalenia te mogą być przydatne właścicielom i nabywcom używanych samochodów elektrycznych, a także podmiotom zajmującym się ich diagnostyką i wyceną.

Ograniczenia badania obejmują nieprobabilistyczny dobór próby i dobrowolny udział respondentów, co ogranicza możliwość uogólniania wyników. Kategorie SOH nie były niezależnie weryfikowane, a pogorszenie zasięgu miało charakter deklaratywny i nie zostało zmierzone obiektywnie. Przekrojowy charakter badania nie pozwala ponadto na wnioskowanie przyczynowe, a stwierdzone zależności mogły wiązać się z nieuwzględnionymi warunkami eksploatacji.

Dalsze badania powinny zostać ukierunkowane na pozyskiwanie danych z systemów BMS, bezpośrednie pomiary zasięgu w kolejnych okresach eksploatacji tych samych pojazdów oraz objęcie analizą większej i bardziej zróżnicowanej próby. Należy w nich uwzględnić temperaturę, styl jazdy, sposób ładowania, pojemność akumulatora i charakter tras. Pozwoli to dokładniej określić, w jakich warunkach obniżenie SOH jest dostrzegane przez użytkowników jako pogorszenie zasięgu oraz z czego wynikają rozbieżności między tymi ocenami.

6. Bibliografia

1 Babbie E.R., *Badania społeczne w praktyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2004.

2 Bilfinger P., Schreiber M., Rosner P., Abo Gamra K., Schöberl J., Grosu C., Lienkamp M., *Why we need a standardized state of health measurement procedure for electric vehicle battery packs—A proposal for energy- and capacity-based metrics*, npj Clean Energy, 1, 2025, DOI: 10.1038/s44406-025-00010-8.

3 Creswell J.W., *Projektowanie badań naukowych: metody jakościowe, ilościowe i mieszane*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2009.

4 Czakon W., *W kierunku rozwoju badań ilościowych w naukach o zarządzaniu*, Organizacja i Kierowanie, 3, 2016.
5 Eisel M., Nastjuk I., Kolbe L.M., *Understanding the influence of in-vehicle information systems on range stress – Insights from an electric vehicle field experiment*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 43, 2016, DOI: 10.1016/j.trf.2016.10.015.
6 Esakkiappan K., Gowtham P., Ammani Ammal V.B.S., Shalini D., Mariprasath T., Al Bustanji S., Bereznychenko V., *A physics-guided temporal convolutional learning with XGBoost integration for degradation-aware and robust electric vehicle range prediction*, Scientific Reports, 16, 2026, DOI: 10.1038/s41598-026-49119-5.
7 Franke T., Krems J.F., *Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use*, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 48, 2013, DOI: 10.1016/j.tra.2012.10.010.
8 Franke T., Günther M., Trantow M., Krems J.F., *Does this range suit me? Range satisfaction of battery electric vehicle users*, Applied Ergonomics, 65, 2017, DOI: 10.1016/j.apergo.2017.06.013.
9 Franke T., Neumann I., Bühler F., Cocron P., Krems J.F., *Experiencing Range in an Electric Vehicle: Understanding Psychological Barriers*, Applied Psychology: An International Review, 61(3), 2012, DOI: 10.1111/j.1464-0597.2011.00474.x.
10 Hao X., Wang H., Lin Z., Ouyang M., *Seasonal effects on electric vehicle energy consumption and driving range: A case study on personal, taxi, and ridesharing vehicles*, Journal of Cleaner Production, 249, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119403.
11 Madani S.S., Shabeer Y., Allard F., Fowler M., Ziebert C., Wang Z., Panchal S., Chaoui H., Mekhilef S., Dou S.X., See K., Khalilpour K., *A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis*, Batteries, 11(4), 2025, DOI: 10.3390/batteries11040127.
12 Mei P., Karimi H.R., Huang C., Chen F., Yang S., *Remaining driving range prediction for electric vehicles: Key challenges and outlook*, IET Control Theory & Applications, 17(14), 2023, DOI: 10.1049/cth2.12486.
13 Pevec D., Babic J., Carvalho A., Ghiassi-Farrokhfal Y., Ketter W., Podobnik V., *A survey-based assessment of how existing and potential electric vehicle owners perceive range anxiety*, Journal of Cleaner Production, 276, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122779.
14 Rauh N., Franke T., Krems J.F., *User experience with electric vehicles while driving in a critical range situation – a qualitative approach*, IET Intelligent Transport Systems, 9(7), 2015, DOI: 10.1049/iet-its.2014.0214.
15 Rauh N., Günther M., Krems J.F., *Positive influence of practical electric vehicle driving experience and range related knowledge on drivers' experienced range stress*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 71, 2020, DOI: 10.1016/j.trf.2020.03.013.
16 Seo J., Cha J., *Real-world analysis of energy consumption in a battery electric vehicle: Effects of ambient temperatures and thermal management system operation*, Energy Conversion and Management, 345, 2025, DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120372.

17 Wang Z., Zeng S., Guo J., *Understanding the influence of state of health on the range anxiety of battery electric vehicle drivers*, IET Intelligent Transport Systems, 15(2), 2021, DOI: 10.1049/itr2.12023.
18 Werner D., Paarmann S., Wetzel T., *Calendar Aging of Li-Ion Cells–Experimental Investigation and Empirical Correlation*, Batteries, 7(2), 2021, DOI: 10.3390/batteries7020028.
19 Xing Y., Ma E.W.M., Tsui K.L., Pecht M., *Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles*, Energies, 4(11), 2011, DOI: 10.3390/en4111840.
20 Zatsarnaja J., Reiter K., Mehdizadeh M., Nayum A., Nordfjærn T., *Charged up with peace in mind: Unraveling the factors of range anxiety among norwegian electric vehicle drivers*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 110, 2025, DOI: 10.1016/j.trf.2025.02.006.
21 Zhang J., Huang H., Zhang G., Dai Z., Wen Y., Jiang L., *Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: A review*, Journal of Energy Storage, 93, 2024, DOI: 10.1016/j.est.2024.112231.

Aleksander Kopyto[1], Mikołaj Sala[2]

1 Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

2 Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektroniki i Telekomunikacji

Radionamiernik interferometryczny w paśmie S do zastosowań w śledzeniu dronów i rakiet

Słowa kluczowe: radar, kąt nadejścia sygnału, lotnictwo, drony

Streszczenie

Śledzenie dronów i rakiet badawczych w fazie startu pozostaje istotnym aspektem komunikacji, gromadzenia danych wideo oraz zapewnienia bezpieczeństwa lotu. W celu automatycznego śledzenia rakiety nośnej i utrzymania z nią łączności powszechnie stosuje się rozwiązania radarowe. W pracy zaprezentowano i porównano dwa radionamierniki interferometryczne określające kąt nadejścia sygnału (AoA). Pierwszy z nich to mikrofalowy system pracujący w paśmie 2,4 GHz, wykonany głównie w technologii mikropaskowej. Składa się on z dwóch par anten odbiorczych, wzmacniaczy niskoszumowych, tłumików, pasywnego korelatora pięciowrotowego oraz systemu akwizycji danych z detektorami mocy i przetwornikiem analogowo-cyfrowym. System ten przeznaczony jest do estymacji kąta elewacji i azymutu źródła fali o częstotliwości 2,4 GHz. Obliczenie pozycji obiektu opiera się na zależnościach występujących w pięciowrotowym układzie pomiarowym. Drugi system mierzy różnicę faz między sygnałami z par czterech anten rozmieszczonych względem siebie w odległości połowy długości fali. W torze sygnałowym zastosowano odbiornik superheterodynowy, co pozwala na uzyskanie wyższych wzmocnień bez pogorszenia stabilności systemu. Konstrukcję uzupełniają funkcje takie jak automatyczne śledzenie częstotliwości i identyfikacja celu. Dzięki możliwości pomiaru zarówno różnicy faz, jak i amplitudy, możliwe jest zastosowanie różnych metod określania kąta, takich jak namierzanie poprzez porównanie amplitud. Oba systemy opierają się na radiolatarni umieszczonej na pokładzie, przy czym modulacja częstotliwości pozwala na identyfikację celu. Oba systemy zostały poddane analizie i porównane.

1. Wstęp

Pasywny system wyznaczania kąta nadejścia sygnału (AoA) opiera się na analizie sygnałów pochodzących z różnych kierunków, bez konieczności generowania własnych fal elektromagnetycznych. W praktyce oznacza to

wykorzystanie sygnałów z różnych źródeł, takich jak sygnały radiowe, telewizyjne, satelitarne czy telekomunikacyjne, do określenia kierunku, z którego nadchodzi dany sygnał. Podejście to jest szczególnie cenne w aplikacjach takich jak śledzenie obiektów latających, gdzie ważna jest dokładna i szybka determinacja parametrów trajektorii. W przypadku systemu używanego do śledzenia lotu rakiety kluczowe jest precyzyjne określenie azymutu i kąta elewacji, co pozwoli na dokładne odwzorowanie jej pozycji w przestrzeni. Współczesne systemy lokalizacji dronów coraz częściej wykorzystują metody radiowe oparte na estymacji kierunku lub kąta nadejścia sygnału, zarówno w układach wielokanałowych, jak i rozwiązaniach z przełączanymi charakterystykami antenowymi[115].

2. Radiolatarnia

Ponieważ prezentowane rozwiązanie jest systemem radionamiernika interferometrycznego, konieczne jest użycie pokładowej radiolatarni. Ze względu na zmieniającą się w trakcie lotu orientację rakiety, zastosowano antenę mikropaskową o polaryzacji kołowej ze ściętymi krawędziami. Radiolatarnia składa się z modułu VCO 2,4 GHz, modulatora w postaci oscylatora audio 1 kHz oraz wzmacniacza mocy o wyjściu 30 dBm. Tłumik jest używany do regulacji sygnału modulującego, tak aby odchylenie częstotliwości było odpowiednie. Układ jest zamontowany z tyłu koszyka na ogniwo litowo-jonowe 18500. Ogniwo pozwala na minimum 5 godzin ciągłej pracy przy poborze mocy 2 W.

3. System oparty na korelatorze fazy do estymacji kierunku nadejścia sygnału

3.1. Koncepcja

Założeniem tego projektu jest wykrywanie i dostarczanie informacji o pozycji obiektu w przestrzeni, który generuje fale o częstotliwości 2,4 GHz — w tym przypadku rakiety sondującej w fazie startu. System został zaprojektowany do śledzenia rakiety poruszającej się z prędkością okołodźwiękową. Nadajnik umieszczony na pokładzie rakiety wysyła sygnał komunikacyjny do naziemnej stacji obsługi przez antenę dipolową. Podczas lotu rakieta może obracać się wokół

[115] Martian A., Paleacu C., Marcu I.-M., Vladeanu C., Direction-finding for unmanned aerial vehicles using radio frequency methods, Measurement, 2024, vol. 235, art. 114883, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114883
Han S., Jang B.-J., Drone's Angle-of-Arrival Estimation Using a Switched-Beam Antenna and Single-Channel Receiver, Sensors, 2025, vol. 25, no. 8, art. 2376, doi: 10.3390/s25082376

własnej osi podłużnej w sposób niekontrolowany, dlatego konieczne jest zastosowanie anten o polaryzacji kołowej, aby odbierać sygnał przy dowolnej pozycji rakiety. Po odebraniu sygnału przez anteny mikropaskowe, jest on wstępnie wzmacniany przez układ wzmacniacza niskoszumowego (LNA) oraz tłumików sterowanych programowo. Następnie trafia do korelatora pięciowrotowego, pasywnego mikropaskowego systemu pomiarowego, w którym sygnały wejściowe interferują ze sobą w sposób konstruktywny i destruktywny, dając odpowiednio modulowane poziomy mocy na wyjściu. Amplitudy sygnałów wyjściowych z korelatora są wzmacniane do zakresów roboczych detektorów mocy umieszczonych dalej w torze. Detektory mocy konwertują moc sygnału wejściowego na napięcie stałe, które odczytywane jest za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC). Odczytane poziomy mocy trafiają do mikrokontrolera (STM32), gdzie obliczane są kąty elewacji i azymutu. Cały system został zaprojektowany i dopasowany do impedancji Z0 = 50 Ω.

Cały projekt podzielony jest na cztery płytki PCB: dwie z nich zawierają pary anten, trzecia obejmuje układ wzmacniający, a system pomiarowy i układ akwizycji danych znajdują się na czwartej płytce. Wynikiem działania całego systemu DoA są dwa kąty: elewacja θ oraz azymut φ.

3.2. Anteny

Z wyżej wymienionych powodów konieczne było zaprojektowanie anteny o polaryzacji kołowej[116]. Geometria anteny, jej polaryzacja i dopasowanie impedancji są ze sobą ściśle powiązane. Projektowanie anteny i proces symulacji przeprowadzono w oprogramowaniu AWR Microwave Office. Laminat, na którym zaprojektowano ścieżki sygnałowe, anteny i korelator, to RO4003C o grubości d = 0,508 mm i stałej dielektrycznej εr = 3,55. Charakteryzuje się on niskimi stratami dielektrycznymi i łatwością obróbki.

Antena wykorzystuje dwa porty zasilające ustawione pod kątem 90° w płaszczyźnie względem siebie, połączone z osobnymi wejściami sprzęgacza kierunkowego z podziałem mocy 3 dB. Początkową długość boku anteny wyznaczono ze wzoru:

$$L_{TE0} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon r}} \qquad (1)$$

gdzie: L_TE0 – początkowa długość boku anteny [m], εr – względna przenikalność elektryczna laminatu, f0 – częstotliwość robocza [Hz], c – prędkość światła w próżni [m/s].

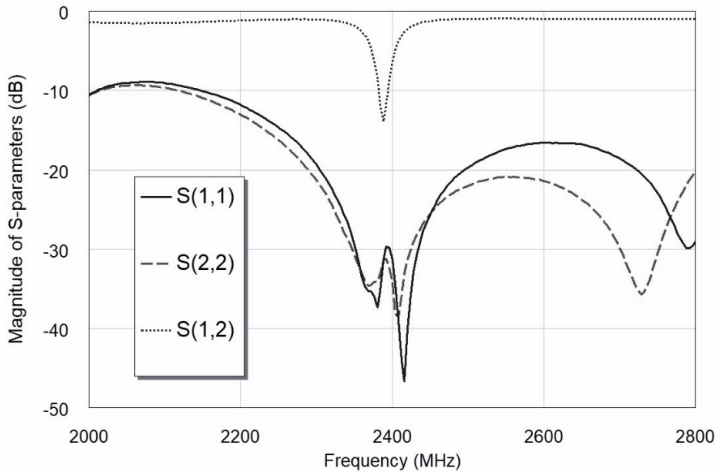
[116] Xu K., Broadband Microstrip Antenna Overview, Highlights in Science Engineering and Technology, 2022, vol. 27, s. 8

Z równania (1) dla przyjętych założeń otrzymano początkową długość boku anteny L_TE0 = 33,17 mm. Aby poprawić dopasowanie impedancji (impedancja krawędziowa ZE = 448 Ω), zastosowano transformator ćwierćfalowy. Odległość między antenami została następnie wyznaczona z równania (2):

$$a = \frac{\lambda_0}{2} \qquad (2)$$

gdzie: a – odległość między antenami [m], λ0 – długość fali w wolnej przestrzeni [m].

Z równania (2) dla częstotliwości 2,4 GHz otrzymano a = 62,5 mm. W celu niezależnego pomiaru kąta elewacji i azymutu wymagane są dwie prostopadłe pary anten.



Rys. 1. Zmierzone parametry S zaprojektowanej anteny
Źródło: oprac. własne.

Charakterystyki wskazują wyraźne minima współczynnika odbicia w pobliżu częstotliwości roboczej 2,4 GHz, co potwierdza dostrojenie zaprojektowanej anteny do zakładanego pasma pracy.

3.3. Układ wzmacniający

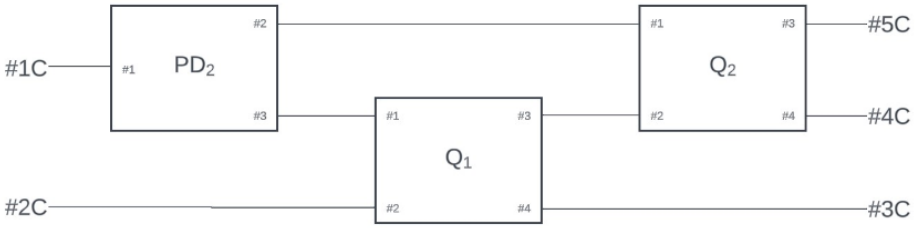
Przed każdym wejściem korelatora umieszczono obwód wzmacniający z programowo sterowanymi tłumikami (w relacji wzmacniacz-tłumik-wzmacniacz-tłumik), dający pełną kontrolę wzmocnienia. Użyto wzmacniaczy ADL5611 o wzmocnieniu 20,9 dB oraz tłumików HMC1122 z możliwością regulacji tłumienia do 31,5 dB.

Rys. 2. Schemat układu pomiarowego
Źródło: oprac. własne.

Schemat pokazuje przepływ dwóch sygnałów wejściowych z anten A1 i A2 do trzech wyjść pomiarowych P3–P5, których poziomy mocy są wykorzystywane do estymacji różnicy faz.

3.4. Pięciowrotowy korelator

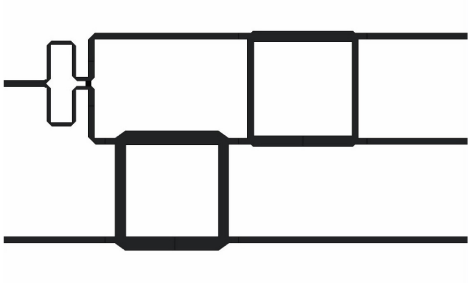
Pięciowrotowy korelator to układ zaprojektowany do pomiaru różnicy faz między dwoma sygnałami wejściowymi. Zbudowany jest z dzielnika mocy Wilkinsona oraz dwóch sprzęgaczy gałęziowych i linii transmisyjnej o długości elektrycznej 90°. Zasada działania pięciowrotników i powiązane z nimi zagadnienia opisane zostały szczegółowo w literaturze[117].



Rys. 3. Schemat korelatora pięciowrotowego
Źródło: oprac. własne.

[117] Staszek K., Gruszczynski S., Wincza K., Six-Port Reflectometer Providing Enhanced Power Distribution, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, vol. 64, no. 3, s. 939- 951
Staszek K., Piekarz I., Sorocki J., Koryciak S., Wincza K., Gruszczynski S., Low-Cost Microwave Vector System for Liquid Properties Monitoring, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, vol. 65, no. 2, s. 1665-1674
Vu V.Y., Braga A.J., Huyart B., Begaud X., Huyen N.B., Elevation/Azimuth Propagation Angle Measurements Using Five-Port Wave Correlators, 2006 First International Conference on Communications and Electronics, 2006

Dzielnik mocy oraz dwa sprzęgacze gałęziowe realizują kontrolowane relacje amplitudowo-fazowe pomiędzy trzema wyjściami korelatora, stanowiące podstawę wyznaczania ΔΦ.



Rys. 4. Projekt obwodu korelatora pięciowrotowego
Źródło: oprac. własne.

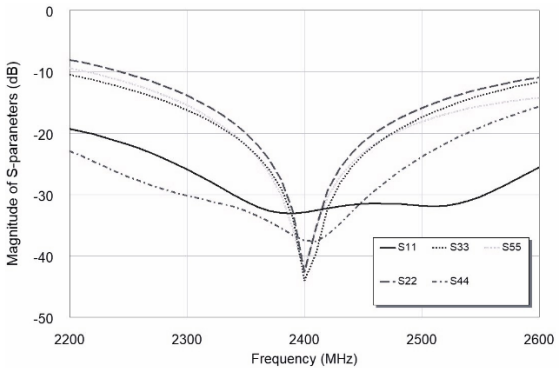
Przedstawiony układ jest fizyczną realizacją korelatora w technologii mikropaskowej, przygotowaną do pracy w paśmie 2,4 GHz.

Ostatecznie moduł różnicy faz sygnałów I1 i I2 można wyznaczyć z zależności mocy:

$$\Delta\Phi = \cos^{-1}\left(\frac{P5 - P4 + P3 - P4}{\sqrt{3}(P3 - P4)}\right) \qquad (3)$$

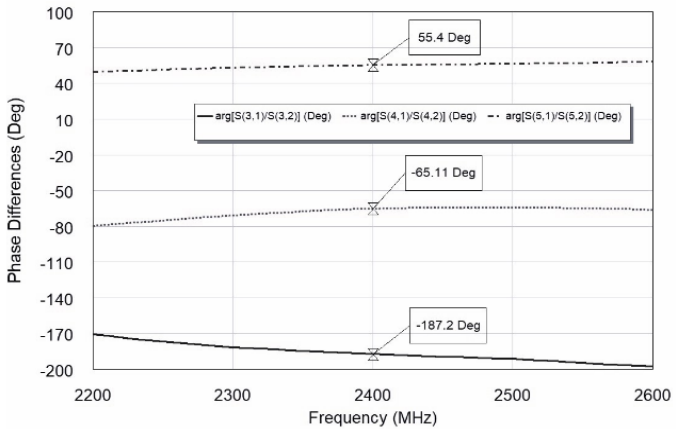
gdzie: ΔΦ – różnica faz; P3, P4, P5 – moce sygnałów

Zależność (3) umożliwia wyznaczenie różnicy faz wyłącznie na podstawie trzech zmierzonych poziomów mocy, bez bezpośredniego pomiaru faz sygnałów wejściowych.



Rys. 5. Obliczone elektromagnetycznie parametry S zaprojektowanego korelatora pięciowrotowego
Źródło: oprac. własne.

Symulowane parametry S wykazują największe zmiany w otoczeniu 2,4 GHz, co potwierdza dostrojenie korelatora do częstotliwości projektowej.



Rys. 6. Obliczone elektromagnetycznie różnice faz wyjściowych zaprojektowanego korelatora pięciowrotowego
Źródło: oprac. własne.

W częstotliwości roboczej różnice faz pomiędzy odpowiednimi wyjściami pozostają bliskie wymaganym przesunięciom około 120°, umożliwiając zastosowanie zależności (3).

3.5. Akwizycja danych

System akwizycji używa detektorów mocy LTC5587 i 8-kanałowego przetwornika ADC AD7606. Mikrokontroler odczytuje napięcie i oblicza pozycję wg wzorów:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\Phi\lambda_0}{2\pi a}\right) \quad (4)$$

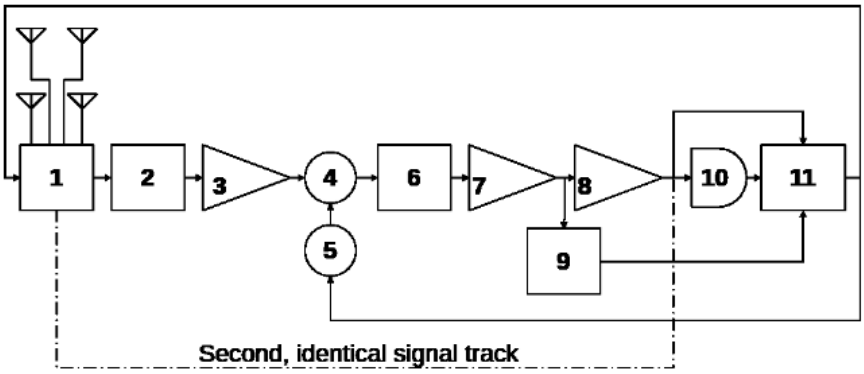
$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\Phi\lambda_0}{2\pi a}\right) \quad (5)$$

gdzie: θ – kąt elewacji [rad], φ – kąt azymutu [rad], ΔΦ – różnica faz [rad], a – odległość między antenami [m], λ_0 – długość fali w wolnej przestrzeni [m].

Równania (4) i (5) przekształcają zmierzoną różnicę faz na kąty kierunku nadejścia sygnału; zależność stosuje się niezależnie dla dwóch prostopadłych par anten.

4. Porównanie faz z przemianą w dół do estymacji kierunku nadejścia sygnału

Drugie podejście wykorzystuje różnicę faz sygnałów odebranych przez parę anten z zastosowaniem odbiornika superheterodynowego i przełączania anten. Wzmocnione i przetworzone sygnały podawane są do detektora fazy w postaci bramki AND.



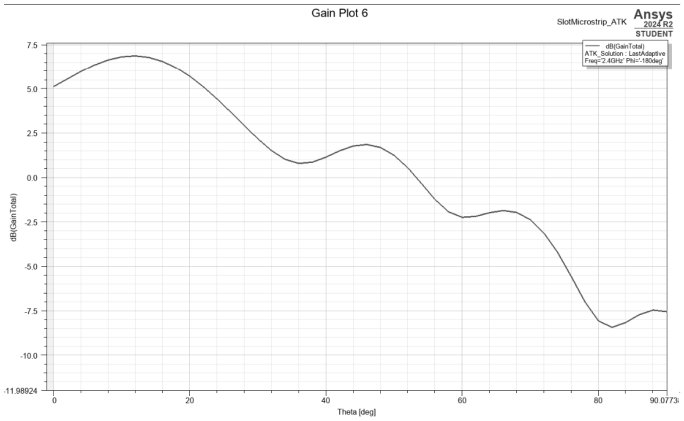
Rys. 7. Schemat blokowy systemu. 1 – przełącznik antenowy, 2 – filtr RF, 3 – LNA, 4 – mikser, 5 – stabilizowany VCO, 6 – filtr IF, 7 – wzmacniacz ograniczający IF, 8 – układ dopasowania poziomu sygnału do TTL, 9 – demodulator FM, 10 – detektor fazy AND, 11 – system mikrokontrolera
Źródło: oprac. własne.

Schemat ilustruje dwa równoległe tory odbiorcze ze wspólnym generatorem lokalnym; po przemianie do częstotliwości pośredniej sygnały są ograniczane i kształtowane przed detekcją różnicy faz.

4.1. Kwestie projektowe i system antenowy

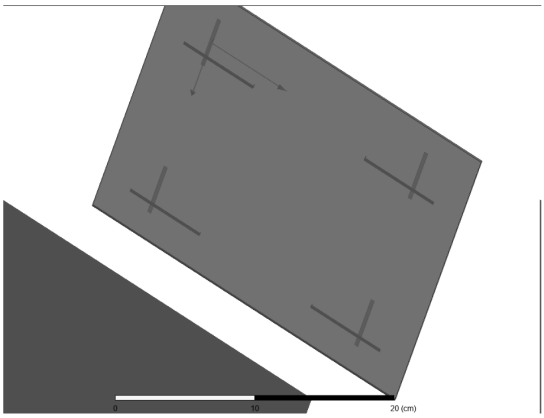
Oczekiwany stosunek sygnału do szumu (SNR) wynosi ponad 20 dB, a poziom szumu obniżono dzięki odpowiedniemu doborowi elementów na poziomie LNA. W systemie tym rozstawiono cztery anteny mikropaskowe w odstępach $3\lambda/2$, co dla częstotliwości 2,4 GHz odpowiada 187,5 mm. Zwiększony odstęp zmniejsza wpływ sprzężeń wzajemnych, choć wymusza rozwiązywanie niejednoznaczności fazy drogą programową i przez odpowiednią modulację. System wykorzystuje mikrokontroler z zaimplementowanym rozszerzonym filtrem Kalmana (EKF)

w celu stabilizacji śledzenia[118]. Rozwiązanie bazuje także na znanych metodach śledzenia radarowego[119].



Rys. 8. Charakterystyka zysku układu antenowego w płaszczyźnie pionowej (90 stopni to ziemia)
Źródło: oprac. własne.

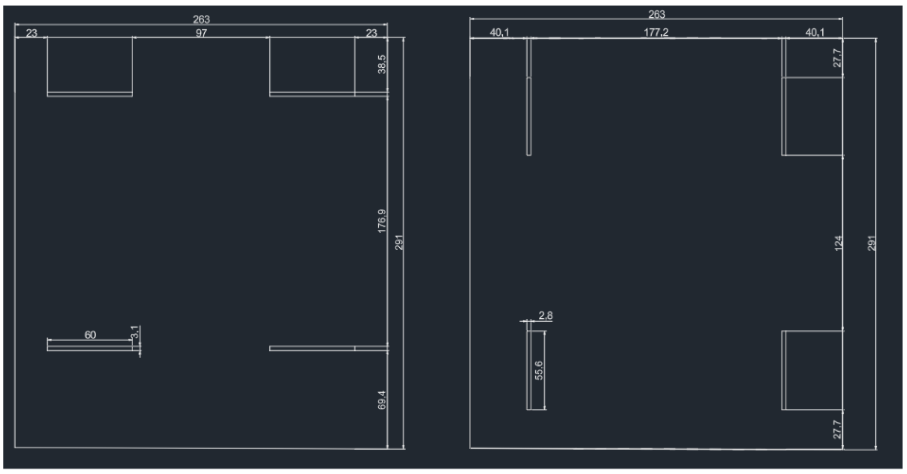
Charakterystyka pokazuje kierunkową odpowiedź układu antenowego w płaszczyźnie pionowej; spadek zysku dla większych kątów ogranicza odbiór sygnałów spoza głównego obszaru obserwacji.



Rys. 9. Szyk antenowy
Źródło: oprac. własne.

[118] Griffiths D.H., Baker C.J., An Introduction to the Passive Radar, 2022
[119] Edge A., Angle of Arrival/Direction Finding Techniques, CRFS Limited, 2023, White Paper CR-003676-WP-3

Geometria szyku czterech anten zapewnia możliwość wykonywania pomiarów różnicy faz dla dwóch osi, a zwiększona baza antenowa poprawia czułość fazową kosztem występowania niejednoznaczności fazy.

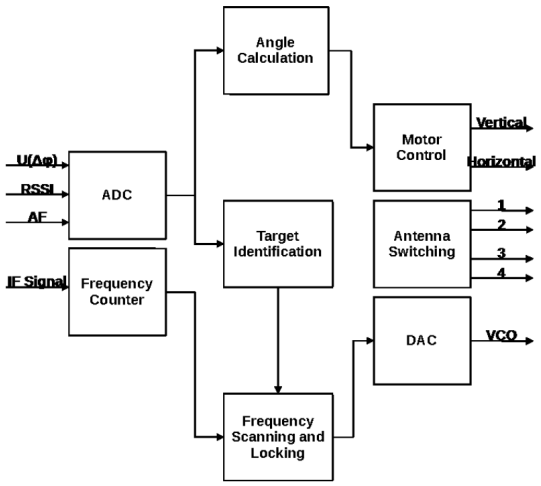


Rys. 10. Schematy przodu (po lewej) i tyłu (po prawej) anteny
Źródło: oprac. własne.

Widok obu stron anteny przedstawia geometrię elementu mikropaskowego oraz rozmieszczenie szczelin i linii zasilających wykorzystywanych w szyku odbiorczym.

4.2. System mikrokontrolera

Mikrokontroler zarządza przełączaniem anten, akwizycją danych, obliczaniem kątów, sterowaniem silnikami, zliczaniem częstotliwości, identyfikacją celu oraz skanowaniem i blokowaniem częstotliwości.



Rys. 11. Architektura i schemat sterowania
Źródło: oprac. własne.

Architektura sterowania łączy akwizycję amplitudy i częstotliwości z identyfikacją celu, obliczaniem kątów, przełączaniem anten oraz sterowaniem napędem układu śledzącego.

5. Wnioski

W prezentowanym artykule porównano dwa rozwiązania służące do śledzenia rakiet badawczych w fazie startu. Pierwsze rozwiązanie opiera się na mikrofalowym systemie wyznaczania kąta nadejścia sygnału, z użyciem korelatora pięciowrotowego. Drugie rozwiązanie estymuje kierunek nadejścia poprzez powielanie sygnałów w bramce logicznej AND, pełniącej rolę detektora fazy, poddając wcześniej sygnał przemianie częstotliwości i wzmocnieniu. System korelatora pięciowrotowego cechuje się wyższą dokładnością, lecz wymaga bardziej skomplikowanego toru o wysokim wzmocnieniu z ryzykiem niestabilności. Z kolei drugi z systemów przetwarza sygnał na niższej częstotliwości pośredniej, przez co jest bardziej niezawodny we wdrażaniu. Prace przyszłościowe skupią się na badaniach polowych i prototypowaniu obu rozwiązań.

6. Bibliografia

1 Edge A., Angle of Arrival/Direction Finding Techniques, CRFS Limited, 2023, White Paper CR-003676-WP-3.
2 Griffiths D.H., Baker C.J., An Introduction to the Passive Radar, 2022.

3 Staszek K., Gruszczynski S., Wincza K., Six-Port Reflectometer Providing Enhanced Power Distribution, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, vol. 64, no. 3, s. 939-951.
4 Staszek K., Piekarz I., Sorocki J., Koryciak S., Wincza K., Gruszczynski S., Low-Cost Microwave Vector System for Liquid Properties Monitoring, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, vol. 65, no. 2, s. 1665-1674.
5 Vu V.Y., Braga A.J., Huyart B., Begaud X., Huyen N.B., Elevation/Azimuth Propagation Angle Measurements Using Five-Port Wave Correlators, 2006 First International Conference on Communications and Electronics, 2006.
6 Xu K., Broadband Microstrip Antenna Overview, Highlights in Science Engineering and Technology, 2022, vol. 27, s. 8.
7 Martian A., Paleacu C., Marcu I.-M., Vladeanu C., Direction-finding for unmanned aerial vehicles using radio frequency methods, Measurement, 2024, vol. 235, art. 114883, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114883.
8 Han S., Jang B.-J., Drone's Angle-of-Arrival Estimation Using a Switched-Beam Antenna and Single-Channel Receiver, Sensors, 2025, vol. 25, no. 8, art. 2376, doi: 10.3390/s25082376.

mgr Marcin Brojanowski

Fundacja Visere

Reception retention as a proxy for brand equity transfer in nostalgia-based video game remakes and remasters

Keywords: Brand equity, nostalgia marketing, video games, remakes, remasters

Abstract

This study examines how far the positive reception of established video games carries over to their remakes and remasters. It compares Metacritic User Scores and Metascores for 56 pairs consisting of an original video game released before 2014 and its counterpart released from 2020 onward. Score changes and retention are used as indirect proxies for brand equity transfer. Since the sample included only original games with a User Score of at least 7.5, their counterparts had greater numerical scope for decrease than increase. User Scores declined in 87.5% of the pairs and Metascores declined in 80.4%. However, median retention exceeded 90% for both measures and 64.3% of counterparts retained a "Generally Favorable" User Score. The findings indicate that remakes and remasters of established titles often preserve much of the original game's positive reception. For managers, established titles may both support the development and marketing of video game remakes and remasters, while also increasing consumer expectations and the risk of a negative response. Further research requires a broader framework to distinguish the role and effect of nostalgia from other drivers of player reception, including product quality and its pricing.

1. Introduction

The global video game market continues to grow and its revenue is projected to rise from $263 billion in 2025 to $353 billion by 2030, an approximately 34% increase[120]. Despite this growth, video game development remains financially risky, particularly at the scale of AAA video game development, where unsuccessful releases can generate large losses for investors[121]. Although the

[120] Pagano E., Paizanis G., Joniškis P., Danielsen N., Smart F., Modi S., Anderson H., *Video Gaming Report 2026: How Platforms Are Colliding and Why This Will Spark the Next Era of Growth*, Boston Consulting Group, Boston 2025.

[121] Semenchenko N., Melnychuk V., Zaporozhchenko A., Molchanov M., *Video Game Industry as a Part of Creative and Digital Economics*, Norwegian Journal of Development of the International Science, 155, 2025, pp. 51–54.

video game industry observed a pandemic-related surge in gaming engagement and revenues during COVID-19 outbreak[122], it was followed by a 20% decline in playtime after lockdown restrictions were lifted[123]. Moreover, the video game industry also entered a period of project cancellations and mass layoffs, with more than 22,000 jobs eliminated between 2022 and March 2024[124], and the downsizing continued into 2026[125] [126]. By the time of writing, Gaming Layoffs, an industry layoff tracker, recorded more than 9,000 job losses across more than a hundred unique companies in 2026, which represents a 125% increase compared with 2025[127].

These conditions may encourage publishers to seek strategies that draw on established intellectual properties (IP) and their existing audiences (player base). A recognized IP can reduce some of the uncertainty and risk associated with expensive AAA development[128], while video game remakes and remasters provide developers with reference material and hindsight that are unavailable when creating an entirely new IP from scratch[129]. This approach can also be understood through customer-based brand equity (CBBE), defined as the effect that prior brand knowledge has on consumer response to a product's marketing[130]. Recent research conducted in China indicates that players' accumulated

---

[122] Yang J., Wang R., Cook A., Fuller R., Gaming During the COVID-19 Pandemic: Examining Its Effect on Loneliness & Motivation, Playing and Gratification Differences Between Competitive and Recreational Gamers, Telematics and Informatics Reports, 11, 2023, Article 100093, https://doi.org/10.1016/j.teler.2023.100093.

[123] Kaczmarek Ł.D., Chwiłkowska P., Behnke M., Drążkowski D., *Video Game Play and Well-Being During the COVID-19 Pandemic: A Meta-Analysis of Global Findings*, Humanities and Social Sciences Communications, 12, 2025, Article 1388, https://doi.org/10.1057/s41599-025-05581-6.

[124] Farough A., Futter M., *The Game Industry's Cataclysmic Layoffs: Where Do We Go from Here?*, Games: Research and Practice, 2(1), 2024, Article 1, pp. 1–3, https://doi.org/10.1145/3651280.

[125] Richardson T., *Xbox Workers Stunned after Jobs "Bloodbath"*, BBC News, 15 July 2026, https://www.bbc.com/news/articles/c932eynvq1do (accessed: 30 July 2026).

[126] McEvoy S., *New Data Suggests Layoffs Will Affect 14,259 People by the End of 2026, Up 78% from First Forecast of the Year*, GamesIndustry.biz, 28 July 2026, https://www.gamesindustry.biz/new-data-suggests-layoffs-will-affect-14259-people-by-the-end-of-2026-up-78-from-first-forecast-of-the-year (accessed: 30 July 2026).

[127] Mike Straw Media, *2026 Games Industry Layoffs*, https://gaminglayoffs.com/ (accessed: 30 July 2026).

[128] Schudey A., Kasperovich P., Ikram A., Panhans D., *Game Changer: Accelerating the Media Industry's Most Dynamic Sector*, Boston Consulting Group, 9 June 2023, https://www.bcg.com/publications/2023/drivers-of-global-gaming-industry-growth (accessed: 29 July 2026).

[129] Virtuos, *The Golden Age of Video Game Remakes and Remasters*, 2024, https://www.virtuosgames.com/news/the-golden-age-of-video-game-remakes-and-remasters/ (accessed: 25 July 2026).

[130] Keller K.L., Swaminathan V., Strategic Brand Management: Building, Measuring, and Managing Brand Equity, 5th ed., Pearson, Harlow 2020.

experiences, interactions, and impressions of a game can promote trust and game-brand loyalty[131].

Nostalgia marketing seeks to reactivate such associations by connecting a current product with a valued past[132]. Video games are well-suited for this strategy because they allow players to both remember an earlier experience but also to revisit an interactive environment it is associated with[133]. MTM's survey of 1,500 monthly console and PC players in the United States and United Kingdom illustrates this appeal: 90% of gamers have played a remake or remaster, 76% considered them appealing, and 80% regarded them as comforting and nostalgic[134]. These releases can also introduce established games to new audiences: 67% of respondents used them to discover older titles they had not previously played.

For the purposes of this study, remakes and remasters are distinguished from other products derived from an existing game or franchise, such as reboots and legacy sequels, and adopts the following definitions. A remake seeks to recreate the experience of an original game while adapting it to contemporary technology and player expectations[135]. A remaster republishes an older game on modern platforms and remains close to its source material, while still aligning its audiovisual and technological presentation with contemporary standards[136]. A reboot disrupts continuity and restarts a franchise, whereas a legacy sequel, or "legacyquel", maintains continuity and returns older characters to pass the franchise to a new generation[137].

The boundaries between these categories are not always stable and publishers may use the terms inconsistently. This study reaches beyond marketing labels and

---

[131] Zhao X., Sam T., Zhang X., Liu Y., *The Influencing Factors of Game Brand Loyalty*, Heliyon, 10(10), 2024, Article e31324, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31324.

[132] Jain T., Mishra V.K., Kothari D., *Digital Nostalgia Marketing: How Past-Centric Ads Affect Gen Z Consumption*, Advances in Consumer Research, 2(4), 2025, pp. 4279–4291.

[133] Heineman D.S., *Public Memory and Gamer Identity: Retrogaming as Nostalgia*, Journal of Games Criticism, 1(1), 2014, pp. 1–24, https://gamescriticism.org/2023/07/19/public-memory-and-gamer-identity-retrogaming-as-nostalgia/ (accessed: 30 July 2026).

[134] MTM, *Remake vs Innovate: Is the Past the Future of Gaming?*, 2025, https://marketing.wearemtm.com/remakevsinnovate (accessed: 14 July 2026).

[135] Yokosaka T., Isogaya Y., Ohtani T., Maruya K., Video-Game Retrospective Effect: How Playing Remakes Alters Experience Evaluations for Original Works, [in:] Companion Proceedings of the 2025 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, Association for Computing Machinery, New York 2025, pp. 203–208, https://doi.org/10.1145/3744736.3749344.

[136] Bosman F.G., *Video Game Romanticism: On Retro Gaming, Remakes, Reboots, Game Nostalgia, and Bad Games*, Journal for Religion, Film and Media, 9(1), 2023, pp. 25–44, https://doi.org/10.25364/05.9:2023.1.3.

[137] Loock K., *Reboot, Requel, Legacyquel: Jurassic World and the Nostalgia Franchise*, [in:] Herbert D., Verevis C. (eds.), *Film Reboots*, Edinburgh University Press, Edinburgh 2020, pp. 173– 188.

attempts to categorize video game re-releases based on other cues, such as the extent and types of changes to their technology, gameplay, and narrative.

Remakes and remasters were chosen for this study as they preserve the clearest product-level relationship with a specific original game, which could help in assessing how far the favorable reception of established video games carries over to their counterparts. The study compares Metacritic User Scores and Metascores for positively received original titles released before 2014 and their counterparts released from 2020 onward. Changes in reception are treated as indirect indicators of brand equity transfer rather than direct measurements of brand equity. Accordingly, the study asks to what extent remakes and remasters retain the favorable reception of users and critics associated with the original games.

2. Methodology

2.1. Data source and sample selection

The initial sampling frame was derived from the publicly available *Metacritic Games Dataset* published by Mohamed Adel on Kaggle[138]. This initial dataset contained 13,913 video game records from Metacritic, a review aggregation platform covering video games, TV shows, movies, and music albums. Metacritic combines selected professional critics' evaluations into a weighted Metascore and reports a separate User Score based on ratings submitted by registered users[139] .

Game records in the dataset included, among other variables, game titles, release dates, platforms, Metascores, User Scores, and the number of critic reviews and user ratings. The dataset was imported into Google Sheets, where records were filtered, manually screened, and subsequently paired with eligible counterparts.

Sample selection was conducted in two stages. First, the original games were identified using five criteria. A title was eligible if it:

- had been released no later than 31 December 2013;
- had a Metascore, which requires a minimum of four reviews;
- had a Metacritic User Score of at least 7.5;
- had received at least 100 user ratings on the selected platform; and
- represented a standalone base game.

This release date cut-off was chosen because 2013 marked a major transition in the home video game console market, including the launches of the PlayStation

[138] Adel M., *Metacritic Games Dataset*, Kaggle, https://www.kaggle.com/datasets/mohamedasak/metacritic-games-dataset/ (accessed: 14 July 2026).
[139] Metacritic, *About Us*, https://www.metacritic.com/about-us/ (accessed: 14 July 2026).

4 and Xbox One from the eighth console generation[140]. The cut-off helped identify games associated with an earlier technological and market context, which could be a foundation for nostalgia-based repositioning and marketing.

The availability of a Metascore for eligible titles was required to allow for an analysis of changes in both critic reception and in the user-critic gap.

A threshold of 7.5 for the User Score serves two purposes. First, rather than being an entirely arbitrary cut-off, it reflects an established platform boundary on Metacritic between "Generally Favorable" and "Mixed or Average". Second, it focuses the study on original games that were positively evaluated, and that had accumulated sufficient consumer goodwill to make the examination of its retention meaningful.

The minimum of 100 user ratings on the selected platform was adopted as a pragmatic threshold to reduce the influence of unstable scores caused by sparse reviews. Consequently, for multiplatform releases of a given title, the one with the most ratings was selected rather than aggregating scores from multiple platforms. Its purpose was to reduce the influence of scores based on very small numbers of user ratings.

Applying the first four criteria as spreadsheet filters in Google Sheets reduced the dataset to 1,150 candidate records.

These records were then manually checked against the fifth criterion. A total of 74 records were excluded because they represented expansion packs or downloadable content (DLC) rather than standalone base games. This stage produced 1,076 eligible original games for further screening in search for games having eligible counterparts.

In the second stage, the 1,076 eligible titles were manually screened to identify whether they had official remakes or remasters released on or after 1 January 2020. This date was selected to create a contemporary observation period and to establish a minimum difference of approximately six years between the two products. The separation was aimed at reducing the likelihood of including routine technical or tactical ports and same-generation upgrades, and subsequently to allow sufficient time for the original title to acquire legacy or nostalgia-related value. This period also encompasses the COVID-19 pandemic and its aftermath[141].

Because the initial dataset contained records only through 2025, it constituted a starting point for the identification of video game counterparts, but each eligible original game was also subjected to a structured web search using Google and

---

[140] Banfi R., *Gaming I, II, and III: Arcades, Video Game Systems, and Modern Game Streaming Services*, Games and Culture, 19(8), 2024, pp. 1000–1037, https://doi.org/10.1177/15554120231186634.

[141] J. Yang, R. Wang, A. Cook, R. Fuller, *Gaming During the COVID-19 Pandemic…*, op. cit., p. 2.

specialist video game websites. The search covered titles up to the data collection cut-off date of 14 July 2026. Announced or upcoming titles that had not been released by that date were excluded. Searches combined the original title with terms “remake” and “remaster”. The identified counterparts were subsequently verified using official developer, publisher or digital distribution platform sources (e.g. Steam, GOG.com, the PlayStation store) whenever available.

The counterpart games were identified using five criteria. A title was included if it:

- was an official remake or remaster of an eligible original title from the first step;
- had been released on or after 1 January 2020;
- had a Metascore, which requires a minimum of four reviews;
- had received at least 100 user ratings on the selected platform; and
- was separately evaluated on Metacritic, through a dedicated page or a distinct platform entry, rather than exclusively as a part of a multi-game collection or bundle.

Commercial labelling alone did not determine eligibility. Titles marketed under alternative designations, such as “Resynced”, “Reloaded” or “Definitive Edition”, and also titles without an explicit label, were included if the scope of their modifications was consistent with the operational definition of a remake or remaster adopted in this study. Conversely, sequels (including legacy sequels), prequels, reboots, spin-offs, downloadable content, fan-made projects, technical ports, and simple emulated releases, were all excluded.

Multi-game collections, bundles, and other titles remaking or remastering multiple games in one, were excluded from analysis when Metacritic reported only an aggregate score for the complete package. Such a score could not be attributed to an individual game, which would potentially duplicate observations or prevent a consistent comparison.

To improve the stability and consistency with the original eligible titles, both a published Metascore and User Score based on at least 100 user ratings on the selected platform were maintained for the counterpart games. However, no minimum User Score threshold was imposed on the “remade” titles as the retention or decline of positive user reception was a part of the analysis.

After a remake or remaster had been identified and verified, its Metascore, User Score, and number of user ratings were collected directly from its Metacritic page or platform entry, and then used in a paired comparison with the original game from the initial Kaggle dataset. The second selection stage produced 56 eligible original-counterpart pairs.

2.2. Measures

To assess the extent to which a counterpart retained the favorable reception associated with an original game, six measures were organized into three complementary pairs. Together, these measures track changes, gaps, and retention in User Score and Metascore, and thus serve as operational proxies for brand equity transfer.

User Score was treated as an indicator of consumer reception, while Metascore represented aggregated critic reception. Taken together, this pair provided indicators of whether the favorable reception of the original game was preserved, weakened, or strengthened in its remake or remaster.

Metacritic reports User Scores on a 0-10 scale and Metascores on a 0-100 scale. To ensure comparability, User Scores were multiplied by 10 before the calculations were performed.

In the following measures, U denotes User Score, M denotes Metascore, "original" denotes the original game, "counterpart" denotes its remake or remaster, R denotes retention, G denotes user-critic gap, and Δ represents the change between the two versions of a given score.

The first pair of measures captured changes in user and critic reception.

Change in User Score was calculated as:

$$\Delta U = U_{\text{counterpart}} - U_{\text{original}} \quad (1)$$

Change in Metascore was calculated as:

$$\Delta M = M_{\text{counterpart}} - M_{\text{original}} \quad (2)$$

For both of these measures, a positive value indicated that the counterpart received a higher score than the original game, while a negative value indicated a decline in reception, and zero indicated no change.

The second pair of measures examined differences between user and critic reception of a title and whether these differences changed between the original and its counterpart.

The user-critic gap for a given title was defined as:

$$G = U - M \quad (3)$$

The change in the gap between the original game and its counterpart was calculated as:

$$\Delta G = \left(U_{\text{counterpart}} - M_{\text{counterpart}}\right) - \left(U_{\text{original}} - M_{\text{original}}\right) \quad (4)$$

The gap was calculated separately for each original game and its counterpart. A positive value of G indicated that users evaluated the title more favorably than critics. A negative value indicated less favorable user reception. A negative ΔG indicated that user reception deteriorated relative to critic reception after the release of the counterpart. Conversely, a positive ΔG indicated that user reception improved relative to critic reception.

The third pair of measures captured the relative retention of the original scores.

User Score retention was calculated as:

$$R_U = \frac{U_{\text{counterpart}}}{U_{\text{original}}} \times 100\% \quad (5)$$

Metascore retention was calculated as:

$$R_M = \frac{M_{\text{counterpart}}}{M_{\text{original}}} \times 100\% \quad (6)$$

A retention value of 100% indicated that the counterpart matched the score of the original game. Retention value below 100% indicated lower reception, while value above 100% indicated that the counterpart exceeded the original game's score.

Retention was included in the analysis because the screening deliberately selected positively evaluated original games ("Generally Favorable" and "Universal Acclaim" in Metacritic terms). Consequently, it could be argued that the resulting sample had greater numerical scope for a decline than for further improvement. These values were treated as descriptive score ratios and not as literal percentages of retained brand equity.

3. Results

3.1. Changes in reception, score retention, and user-critic alignment

The final analytical sample consisted of 56 unique pairs of original games and their post-2020 counterparts. The original games were released between 1997 and 2013, while their counterparts were released between 2020 and 2026. The

difference between their release years ranged from 7 to 29 years, with a mean of 15.32 years (SD = 5.11) and a median of 14.5 years (IQR = 11–19).

Complete data for all 56 unique pairs is provided in Appendix A.

Table 1. User Score and Metascore changes

Measure	Original mean (SD)	Counterpart mean (SD)	Mean Δ (SD)	Median Δ (IQR)	Decline, n (%)	Increase, n (%)	No change, n (%)
User Score	84.75 (4.63)	74.68 (14.37)	−10.07 (14.30)	−7.00 (−12.25 to −3.00)	49 (87.5%)	7 (12.5%)	0 (0.0%)
Metascore	86.32 (7.18)	79.96 (7.29)	−6.36 (8.36)	−5.50 (−10.50 to −2.00)	45 (80.4%)	9 (16.1%)	2 (3.6%)

Source: Author's own calculations based on the dataset presented in Appendix A.

As shown in Table 1, counterpart games generally received lower User Scores and Metascores than their respective original games. User Score declined in 87.5% of the pairs, compared with 80.4% decrease for Metascore. The decrease in scores was larger and more variable among users than among critics.

Table 2. Score retention and user–critic alignment

Measure	Mean (SD)	Median (IQR)	Range
User Score retention	88.20% (16.13)	92.03% (84.11–96.72)	6.52–107.32%
Metascore retention	93.09% (9.72)	93.83% (87.95–97.38)	64.13–123.88%
Original user–critic gap	−1.57 (6.82)	−2.00 (−5.25 to 1.00)	−14 to 19
Counterpart user–critic gap	−5.29 (11.67)	−4.50 (−8.00 to 0.25)	−53 to 20
Change in user–critic gap	−3.71 (11.92)	−1.00 (−7.00 to 2.00)	−53 to 20

Source: Author's own calculations based on the dataset presented in Appendix A.

As shown in Table 2, despite the predominance of negative score changes, median retention remained above 90% for both measures. Metascore retention was slightly higher than User Score retention. Thirty-six counterpart games (64.3%) retained a User Score of at least 7.5 and thus remained within Metacritic's "Generally Favorable" category or above. The remaining 20 counterparts (35.7%) fell below the minimum User Score threshold applied to the original games.

The user–critic gap became more negative in 28 pairs (50.0%), more positive in 21 pairs (37.5%), and remained unchanged in seven pairs (12.5%). Its median

change was small, but there are visible variations between individual titles. Overall, these numbers suggest that user reception tended to decline somewhat more than critic reception, but this pattern was not uniform across the entire sample.

3.2. Sensitivity analysis

Warcraft III: Reforged was the most extreme observation in the sample. When compared to *Warcraft III: Reign of Chaos*, its User Score declined by 86 points and its Metascore by 33 points, with User Score retention of 6.52% and a 53-point negative change in the user-critic gap.

After this pair was excluded, the magnitude of the mean User Score decline changed from −10.07 to −8.69 points, but the median remained −7 points. Mean Metascore change was reduced from −6.36 to −5.87 points, with a median of −5 points. The mean change in the user–critic gap decreased from −3.71 to −2.82 points, and the median changed from −1 to 0.

The exclusion of the *Warcraft III* original-counterpart case reduced the magnitude of the observed changes in scores. However, it did not alter the overall direction of the User Score and Metascore results. Because of how extreme the user sentiment was in this case, the user-critic gap was more sensitive to it, and should therefore be interpreted cautiously.

4. Discussion and conclusions

This study examined changes in the favorable reception of established video games released before 2014 and whether it transferred to their post-2020 remakes and remasters. A descriptive comparison of 56 original-counterpart pairs focused on changes in user and critic reception, score retention, and user-critic alignment. These measures were treated as proxies for brand equity transfer rather than direct measures of brand equity.

The findings indicate that positive reception of an original game does not transfer automatically or completely to its remake or remaster. Most counterparts in the study received lower scores than their respective originals: User Score declined in 87.5% of the pairs and Metascore in 80.4%. At the same time, median retention exceeded 90% for both these measures, and almost two-thirds of the counterpart games remained within Metacritic's "Generally Favorable" category or above. The original games were selected precisely because they had been positively received, with User Scores of at least 7.5, creating greater numerical scope for decline than for further improvement. However, it may also reflect regression to the mean. A negative average change could be interpreted not as complete loss of favorable reception but as evidence of varying degrees of erosion. This suggests that, although a counterpart may receive a lower score than the original, a substantial part of the favorable reception associated with the

established title. This partial retention may also help explain the strategic appeal of both nostalgia-based video game development and marketing. This is particularly relevant in the video game industry, characterized by rising development costs and increasing commercial risk[142].

The period between the originals and their counterparts ranged from 7 to 29 years, with a mean of 15.32 years, allowing time over which nostalgic attachments could develop. Such attachment can support favorable attitudes toward video game remakes[143], making it a valuable tool to game developers and marketers. However, inherited brand equity may be double-edged: while nostalgia may benefit a brand, substantial changes can provoke particularly negative responses among nostalgic consumers[144]. Therefore, a failure to meet expectations may turn the original game's legacy from an asset into a reputational risk.

The case of *Warcraft III: Reforged* illustrates this potential risk of relying on nostalgia and established brand equity. Importantly, nostalgia alone does not fully explain the game's reception, as contemporary reporting also identified other issues such as technical problems and the omission of previously promised features[145]. The game recorded both the largest declines in User Score and Metascore, and the lowest User Score retention in the entire sample. It received 31,274 user ratings, the largest number in the entire analytical sample, while its User Score was 53 points below its Metascore. This combination of unusually intense rating activity combined with a substantial user-critic gap is consistent with review bombing. Coronado-Blázquez identifies Warcraft III: Reforged as one of the examples of this phenomenon and shows that review bombing may arise from, among other factors, "gaming nostalgia" and remakes or remasters failing to meet these nostalgic expectations[146].

There are several limitations to these conclusions. First, Metacritic scores capture only observable user and critic reception, an incomplete perspective on game performance. These scores serve as proxies for brand equity rather than its

---

[142] Ma J., From the Atari Shock to a Modern Crisis: Analyzing Mass Layoffs in the Post-Pandemic U.S. Video Game Industry, ACM Games, 4(1), 2025, Article 2, pp. 1–27, https://doi.org/10.1145/3774758.

[143] Butcher L., Toh A., *Strolling Down Memory Card Lane: Nostalgia, Age, and Video Game Remakes*, Journal of Marketing Management, 41(9–10), 2025, pp. 892–909, https://doi.org/10.1080/0267257X.2025.2520859.

[144] Shields A.B., Johnson J.W., *What Did You Do to My Brand? The Moderating Effect of Brand Nostalgia on Consumer Responses to Changes in a Brand*, Psychology & Marketing, 33(9), 2016, pp. 713–728, https://doi.org/10.1002/mar.20912.

[145] Schreier J., *Blizzard Botched Warcraft III Remake After Internal Fights, Pressure over Costs*, Bloomberg, 22 July 2021, https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-22/inside-activision-blizzard-s-botched-warcraft-iii-reforged-game (accessed: 14 July 2026).

[146] Coronado-Blázquez J., *A NLP Approach to "Review Bombing" in Metacritic PC Videogames User Ratings*, arXiv, 2024, arXiv:2405.06306, https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.06306.

direct measure. Although user and critic reviews have been associated with video game sales[147], evidence concerning the commercial relevance of Metacritic is not uniform. In a model incorporating data from Steam, Twitch, and Metacritic, Ma found no statistically significant relationship between Metascore and estimated Steam revenue[148].

In this study, for multiplatform releases, the platform with most ratings was selected rather than aggregating ratings across all platforms. This reduced reliance on sparsely rated versions, but it did not account for the potential differences in reception across PC and console ecosystems. In addition, multi-game collections and bundles were omitted as their aggregate scores could not be assigned reliably to individual games. Most importantly, the paired design cannot distinguish the effects of nostalgia and pre-existing brand equity from those of product quality, technical performance of games, their pricing, or the fulfillment of consumer expectations. This is a general limitation of change-score analyses using observational data[149], meaning that these findings should be interpreted as patterns consistent with partial brand equity transfer in nostalgia-based video games rather than evidence that consumer nostalgia or goodwill alone caused this reception.

Future studies could adopt a broader research design by combining platform-level scores with platform-specific sales data (e.g. PC and consoles), marketing variables, and the analysis of the content of available reviews and other forms of electronic word of mouth (eWOM) along with direct measures of player's prior experience and nostalgic attachment or lack thereof.

Overall, most remakes and remasters received lower scores than their original games, but favorable reception was rarely lost entirely. This suggests that some goodwill associated with the original game may carry over to its new version, although the extent of this transfer varies considerably between games in the study. Even though nostalgia and prior consumer goodwill may provide a good starting point, they do not guarantee favorable reception and may increase both the players' expectations and reputational consequences of disappointing them.

---

[147] Kraemer T., Weiger W.H., Heidenreich S., *Do All Stars Shine the Same? Investigating the Nonlinear Effects of User and Critic Reviews on Video Game Sales*, Journal of Business Research, 188, 2025, Article 115034, https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.115034.

[148] Ma J., *Unveiling Success Drivers in Gaming: A Machine Learning Study Across Steam, Twitch, and Metacritic*, International Journal of Computer Games Technology, 2025, Article 5776632, pp. 1–16, https://doi.org/10.1155/ijcg/5776632.

[149] Tennant P.W.G., Arnold K.F., Ellison G.T.H., Gilthorpe M.S., *Analyses of "Change Scores" Do Not Estimate Causal Effects in Observational Data*, International Journal of Epidemiology, 51(5), 2022, pp. 1604–1615, https://doi.org/10.1093/ije/dyab050.

5. Data availability

The initial dataset used to identify eligible original games is publicly available on Kaggle[150]. The derived analytical dataset containing the 56 original-counterpart pairs is provided in Appendix A.

6. References

1 Adel M., *Metacritic Games Dataset*, Kaggle, https://www.kaggle.com/datasets/mohamedasak/metacritic-games-dataset/ (accessed: 14 July 2026).

2 Banfi R., *Gaming I, II, and III: Arcades, Video Game Systems, and Modern Game Streaming Services*, Games and Culture, 19(8), 2024, pp. 1000–1037, https://doi.org/10.1177/15554120231186634.

3 Bosman F.G., *Video Game Romanticism: On Retro Gaming, Remakes, Reboots, Game Nostalgia, and Bad Games*, Journal for Religion, Film and Media, 9(1), 2023, pp. 25–44, https://doi.org/10.25364/05.9:2023.1.3.

4 Butcher L., Toh A., *Strolling Down Memory Card Lane: Nostalgia, Age, and Video Game Remakes*, Journal of Marketing Management, 41(9–10), 2025, pp. 892–909, https://doi.org/10.1080/0267257X.2025.2520859.

5 Coronado-Blázquez J., *A NLP Approach to "Review Bombing" in Metacritic PC Videogames User Ratings*, arXiv, 2024, arXiv:2405.06306, https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.06306.

6 Farough A., Futter M., *The Game Industry's Cataclysmic Layoffs: Where Do We Go from Here?*, Games: Research and Practice, 2(1), 2024, Article 1, pp. 1–3, https://doi.org/10.1145/3651280.

7 Heineman D.S., *Public Memory and Gamer Identity: Retrogaming as Nostalgia*, Journal of Games Criticism, 1(1), 2014, pp. 1–24, https://gamescriticism.org/2023/07/19/public-memory-and-gamer-identity-retrogaming-as-nostalgia/ (accessed: 30 July 2026).

8 Jain T., Mishra V.K., Kothari D., *Digital Nostalgia Marketing: How Past-Centric Ads Affect Gen Z Consumption*, Advances in Consumer Research, 2(4), 2025, pp. 4279–4291.

9 Kaczmarek Ł.D., Chwiłkowska P., Behnke M., Drążkowski D., *Video Game Play and Well-Being During the COVID-19 Pandemic: A Meta-Analysis of Global Findings*, Humanities and Social Sciences Communications, 12, 2025, Article 1388, https://doi.org/10.1057/s41599-025-05581-6.

10 Keller K.L., Swaminathan V., *Strategic Brand Management: Building, Measuring, and Managing Brand Equity*, 5th ed., Pearson, Harlow 2020.

11 Kraemer T., Weiger W.H., Heidenreich S., *Do All Stars Shine the Same? Investigating the Nonlinear Effects of User and Critic Reviews on Video Game Sales*,

[150] M. Adel, Metacritic Games Dataset…, op. cit.

Journal of Business Research, 188, 2025, Article 115034, https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.115034.
12 Loock K., *Reboot, Requel, Legacyquel: Jurassic World and the Nostalgia Franchise*, [in:] Herbert D., Verevis C. (eds.), *Film Reboots*, Edinburgh University Press, Edinburgh 2020, pp. 173–188.
13 Ma J., *From the Atari Shock to a Modern Crisis: Analyzing Mass Layoffs in the Post-Pandemic U.S. Video Game Industry*, ACM Games, 4(1), 2025, Article 2, pp. 1–27, https://doi.org/10.1145/3774758.
14 Ma J., *Unveiling Success Drivers in Gaming: A Machine Learning Study Across Steam, Twitch, and Metacritic*, International Journal of Computer Games Technology, 2025, Article 5776632, pp. 1–16, https://doi.org/10.1155/ijcg/5776632.
15 McEvoy S., *New Data Suggests Layoffs Will Affect 14,259 People by the End of 2026, Up 78% from First Forecast of the Year*, GamesIndustry.biz, 28 July 2026, https://www.gamesindustry.biz/new-data-suggests-layoffs-will-affect-14259-people-by-the-end-of-2026-up-78-from-first-forecast-of-the-year (accessed: 30 July 2026).
16 Metacritic, *About Us*, https://www.metacritic.com/about-us/ (accessed: 14 July 2026).
17 Metacritic, *Games*, https://www.metacritic.com/game/ (accessed: 14 July 2026).
18 Mike Straw Media, *2026 Games Industry Layoffs*, https://gaminglayoffs.com/ (accessed: 30 July 2026).
19 MTM, *Remake vs Innovate: Is the Past the Future of Gaming?*, 2025, https://marketing.wearemtm.com/remakevsinnovate (accessed: 14 July 2026).
20 Pagano E., Paizanis G., Joniškis P., Danielsen N., Smart F., Modi S., Anderson H., *Video Gaming Report 2026: How Platforms Are Colliding and Why This Will Spark the Next Era of Growth*, Boston Consulting Group, Boston 2025.
21 Richardson T., *Xbox Workers Stunned after Jobs "Bloodbath"*, BBC News, 15 July 2026, https://www.bbc.com/news/articles/c932eynvq1do (accessed: 30 July 2026).
22 Schreier J., *Blizzard Botched Warcraft III Remake After Internal Fights, Pressure over Costs*, Bloomberg, 22 July 2021, https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-22/inside-activision-blizzard-s-botched-warcraft-iii-reforged-game (accessed: 14 July 2026).
23 Schudey A., Kasperovich P., Ikram A., Panhans D., *Game Changer: Accelerating the Media Industry's Most Dynamic Sector*, Boston Consulting Group, 9 June 2023, https://www.bcg.com/publications/2023/drivers-of-global-gaming-industry-growth (accessed: 29 July 2026).
24 Semenchenko N., Melnychuk V., Zaporozhchenko A., Molchanov M., *Video Game Industry as a Part of Creative and Digital Economics*, Norwegian Journal of Development of the International Science, 155, 2025, pp. 51–54.
25 Shields A.B., Johnson J.W., *What Did You Do to My Brand? The Moderating Effect of Brand Nostalgia on Consumer Responses to Changes in a Brand*, Psychology & Marketing, 33(9), 2016, pp. 713–728, https://doi.org/10.1002/mar.20912.
26 Tennant P.W.G., Arnold K.F., Ellison G.T.H., Gilthorpe M.S., *Analyses of "Change Scores" Do Not Estimate Causal Effects in Observational Data*, International Journal of Epidemiology, 51(5), 2022, pp. 1604–1615, https://doi.org/10.1093/ije/dyab050.

27 Virtuos, *The Golden Age of Video Game Remakes and Remasters*, 2024, https://www.virtuosgames.com/news/the-golden-age-of-video-game-remakes-and-remasters/ (accessed: 25 July 2026).
28 Yang J., Wang R., Cook A., Fuller R., *Gaming During the COVID-19 Pandemic: Examining Its Effect on Loneliness & Motivation, Playing and Gratification Differences Between Competitive and Recreational Gamers*, Telematics and Informatics Reports, 11, 2023, Article 100093, https://doi.org/10.1016/j.teler.2023.100093.
29 Yokosaka T., Isogaya Y., Ohtani T., Maruya K., *Video-Game Retrospective Effect: How Playing Remakes Alters Experience Evaluations for Original Works*, [in:] *Companion Proceedings of the 2025 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, Association for Computing Machinery, New York 2025, pp. 203–208, https://doi.org/10.1145/3744736.3749344.
30 Zhao X., Sam T., Zhang X., Liu Y., *The Influencing Factors of Game Brand Loyalty*, Heliyon, 10(10), 2024, Article e31324, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31324.

Appendix A

Table A1. Eligible original games included in the analytical sample

Pair ID	Original video game title	Release year	Metascore	Critic ratings, n	User Score	User ratings, n
1	Final Fantasy VII	1997	92	20	89	2982
2	Star Fox 64	1997	88	16	87	369
3	Oddworld: Abe's Exoddus	1998	88	13	84	156
4	Half-Life	1998	96	24	89	5815
5	Resident Evil 3: Nemesis	1999	91	19	88	507
6	Diablo II	2000	88	34	88	1967
7	Gothic	2001	81	14	86	1388
8	Silent Hill 2 (2001)	2001	89	34	93	2288
9	Metroid Prime	2002	97	70	91	1710
10	Warcraft III: Reign of Chaos	2002	92	40	92	2838
11	Age of Mythology	2002	89	31	88	919

Pair ID	Original video game title	Release year	Metascore	Critic ratings, n	User Score	User ratings, n
12	SpongeBob SquarePants: Battle for Bikini Bottom	2003	71	10	82	114
13	Fatal Frame II: Crimson Butterfly	2003	81	40	87	173
14	Paper Mario: The Thousand-Year Door (2004)	2004	87	55	90	791
15	Mafia	2004	66	33	84	364
16	Shin Megami Tensei: Nocturne	2004	82	42	88	265
17	Metal Gear Solid 3: Snake Eater	2004	91	68	93	2182
18	Age of Empires III	2005	81	52	79	774
19	Resident Evil 4 (2005)	2005	96	82	91	3010
20	Dead Rising	2006	85	82	75	391
21	Gears of War	2006	94	88	82	2184
22	The Elder Scrolls IV: Oblivion	2006	94	90	85	1711
23	Pokemon Pearl Version	2007	85	39	81	564
24	Pokemon Diamond Version	2007	85	42	81	786
25	Final Fantasy VI	2007	92	25	84	550
26	Crysis	2007	91	56	80	2840
27	Final Fantasy Tactics	2007	88	41	88	334
28	Shin Megami Tensei: Persona 3	2007	86	52	84	252
29	Ninja Gaiden II	2008	81	74	82	250
30	Crisis Core: Final Fantasy VII	2008	83	67	81	637
31	Dead Space (2008)	2008	89	79	87	1103
32	Shin Megami Tensei: Persona 4	2008	90	47	88	752

Pair ID	Original video game title	Release year	Metascore	Critic ratings, n	User Score	User ratings, n
33	Demon's Souls (2009)	2009	89	81	87	1698
34	Call of Duty: Modern Warfare 2	2009	94	100	80	3104
35	Disney Epic Mickey	2010	73	78	75	228
36	NIER	2010	67	60	86	232
37	Mafia II	2010	74	79	82	1379
38	Donkey Kong Country Returns	2010	87	77	86	708
39	Need for Speed: Hot Pursuit	2010	88	73	75	480
40	Sonic Colors	2010	78	58	79	753
41	Red Dead Redemption	2010	95	96	89	4550
42	Alan Wake	2010	83	100	81	1546
43	Kirby's Return to Dream Land	2011	77	49	88	340
44	Tactics Ogre: Let Us Cling Together	2011	87	49	86	165
45	Saints Row: The Third	2011	84	70	76	838
46	The Elder Scrolls V: Skyrim	2011	96	89	86	7441
47	The Legend of Zelda: Skyward Sword	2011	93	81	83	2978
48	Sonic Generations	2011	77	49	84	900
49	Kingdoms of Amalur: Reckoning	2012	80	71	77	506
50	Brothers: A Tale of Two Sons	2013	86	56	84	565
51	Assassin's Creed IV: Black Flag	2013	88	36	83	2807
52	The Stanley Parable	2013	88	47	80	2571
53	Luigi's Mansion: Dark Moon	2013	86	74	84	789

Pair ID	Original video game title	Release year	Metascore	Critic ratings, n	User Score	User ratings, n
54	Pikmin 3	2013	87	79	88	857
55	Super Mario 3D World	2013	93	83	88	2577
56	The Last of Us	2013	95	98	92	16803

Source: Author's own compilation based on the *Metacritic Games Dataset*[151]. User Scores in the table are presented on the 0-100 scale used in the analysis.

Table A2. Eligible remakes and remasters included in the analytical sample

Pair ID	Counterpart video game title	Release year	Metascore	Critic reviews, n	User Score	User ratings, n
1	Final Fantasy VII Remake	2020	87	126	82	9417
2	Star Fox	2026	81	120	82	370
3	Oddworld: Soulstorm	2021	67	51	63	297
4	Black Mesa	2020	84	26	87	1640
5	Resident Evil 3	2020	79	83	68	5256
6	Diablo II: Resurrected	2021	80	46	37	2566
7	Gothic 1 Remake	2026	73	45	85	694
8	Silent Hill 2 (2024)	2024	86	105	90	5044
9	Metroid Prime Remastered	2023	94	95	88	1859
10	Warcraft III: Reforged	2020	59	46	6	31274
11	Age of Mythology: Retold	2024	83	57	78	178
12	SpongeBob SquarePants: Battle for Bikini Bottom - Rehydrated	2020	68	38	88	2327
13	Fatal Frame II: Crimson Butterfly REMAKE	2026	74	57	80	175

[151] M. Adel, Metacritic Games Dataset…, op. cit.

Pair ID	Counterpart video game title	Release year	Metascore	Critic reviews, n	User Score	User ratings, n
14	Paper Mario: The Thousand-Year Door	2024	88	106	87	983
15	Mafia: Definitive Edition	2020	78	46	77	3638
16	Shin Megami Tensei III: Nocturne HD Remaster	2021	76	35	77	111
17	Metal Gear Solid Delta: Snake Eater	2025	85	94	77	965
18	Age of Empires III: Definitive Edition	2020	75	48	67	190
19	Resident Evil 4	2023	93	126	90	9615
20	Dead Rising Deluxe Remaster	2024	83	57	55	190
21	Gears of War: Reloaded	2025	79	56	69	275
22	The Elder Scrolls IV: Oblivion Remastered	2025	80	39	74	966
23	Pokemon Shining Pearl	2021	73	88	49	564
24	Pokemon Brilliant Diamond	2021	73	89	51	1233
25	Final Fantasy VI Pixel Remaster	2022	87	14	82	162
26	Crysis Remastered	2020	66	29	75	184
27	FINAL FANTASY TACTICS - The Ivalice Chronicles	2025	88	83	76	201
28	Persona 3 Reload	2024	87	68	86	2116
29	Ninja Gaiden 2 Black	2025	80	23	79	337
30	Crisis Core: Final Fantasy VII Reunion	2022	78	81	76	665
31	Dead Space	2023	89	89	84	2796
32	Persona 4 Golden	2020	87	29	89	1112
33	Demon's Souls	2020	92	100	83	5017
34	Call of Duty: Modern Warfare 2 Campaign Remastered	2020	71	39	77	485

Pair ID	Counterpart video game title	Release year	Metascore	Critic reviews, n	User Score	User ratings, n
35	Disney Epic Mickey: Rebrushed	2024	76	40	76	173
36	NieR Replicant ver.1.22474487139...	2021	83	91	83	1012
37	Mafia II: Definitive Edition	2020	72	32	68	1188
38	Donkey Kong Country Returns HD	2025	77	99	72	181
39	Need for Speed: Hot Pursuit Remastered	2020	75	36	63	274
40	Sonic Colors: Ultimate	2021	74	54	64	463
41	Red Dead Redemption and Undead Nightmare	2023	83	23	67	491
42	Alan Wake Remastered	2021	79	43	73	1093
43	Kirby's Return to Dream Land Deluxe	2023	79	112	85	240
44	Tactics Ogre: Reborn	2022	84	30	76	159
45	Saints Row: The Third Remastered	2020	74	44	70	184
46	The Elder Scrolls V: Skyrim Anniversary Edition	2021	73	14	64	256
47	The Legend of Zelda: Skyward Sword HD	2021	81	106	76	1096
48	Sonic x Shadow Generations	2024	80	78	89	1163
49	Kingdoms of Amalur: Re-Reckoning	2020	72	40	71	181
50	Brothers: A Tale of Two Sons Remake	2024	79	24	74	145
51	Assassin's Creed Black Flag Resynced	2026	84	89	86	808
52	The Stanley Parable: Ultra Deluxe	2022	90	15	82	841
53	Luigi's Mansion 2 HD	2024	77	91	76	198
54	Pikmin 3 Deluxe	2020	85	93	86	358
55	Super Mario 3D World + Bowser's Fury	2021	89	122	86	1713

Pair ID	Counterpart video game title	Release year	Metascore	Critic reviews, n	User Score	User ratings, n
56	The Last of Us Part I	2022	89	115	81	6492

Source: Author's own compilation based on the *Metacritic Games Dataset*[152] and data collected from Metacritic game pages[153]. User Scores in the table are presented on the 0-100 scale used in the analysis.

[152] M. Adel, Metacritic Games Dataset…, op. cit.
[153] Metacritic, *Games*, https://www.metacritic.com/game/ (accessed: 14 July 2026).

Gerard Motak

Université Paris Dauphine-PSL, SGH Warsaw School of Economics

Teoria kolejek w nurcie Business Process Management: możliwe zastosowania i kierunki badawcze

Słowa kluczowe: business process management, process mining, teoria kolejek, symulacja procesów, alokacja zasobów

Streszczenie

Business Process Management opiera się dziś w dużej mierze na danych zdarzeniowych rejestrowanych przez systemy informatyczne, jednak dominujące techniki analizy koncentrują się na przepływie sterowania i traktują przypadki procesu jako niezależne od siebie. Tymczasem w rzeczywistych organizacjach przypadki rywalizują o te same, ograniczone zasoby, a znaczna część czasu przejścia to czas oczekiwania. Przesłanką niniejszej pracy jest obserwacja, że aparat teorii kolejek, rozwijany od dziesięcioleci w badaniach operacyjnych, wchodzi w obszar BPM w sposób rozproszony i pod różnymi nazwami, przez co trudno ocenić, co już zostało zrobione i gdzie leżą luki. Celem pracy jest uporządkowanie tych zastosowań oraz wskazanie kierunków dalszych badań. Zastosowaną metodą jest narracyjny przegląd literatury obejmujący prace źródłowe poszczególnych nurtów oraz publikacje z lat 2021–2025, zestawione według pytania badawczego, roli przypisywanej kolejce, metody oraz ograniczeń. Wyodrębniono siedem obszarów zastosowań: queue mining, analizę zachowania zasobów, symulację procesów biznesowych, symulację agentową, modele gruboziarniste, operacyjne sterowanie alokacją zasobów oraz uczenie modeli kolejkowych wprost z danych zdarzeniowych. Z analizy wynika, że kolejka pełni w tych obszarach zupełnie różne role — od jawnie modelowanego obiektu po produkt uboczny symulacji — a w żadnym z nich uczestnicy procesu nie są modelowani jako podmioty podejmujące decyzje strategiczne. Głównym wnioskiem jest to, że BPM zapożyczył z teorii kolejek warstwę opisową, pomijając warstwę decyzyjną. Jako kierunki dalszych badań wskazano modelowanie strategicznego zachowania uczestników procesu, badanie sprawiedliwości reżimów obsługi wynikających z logów oraz walidację uczonych symulatorów na rzeczywistych danych organizacyjnych.

1. Wstęp

Business Process Management jest jednym z fundamentalnych obszarów zarządzania operacyjnego. Jego empirycznym skrzydłem jest process mining, czyli zbiór technik odkrywania modeli procesów, sprawdzania zgodności

i wzbogacania modeli na podstawie logów zdarzeń[154]. Techniki te odniosły duży sukces praktyczny, mają jednak istotne ograniczenie: skupiają się na przepływie sterowania i w domyśle traktują poszczególne przypadki procesu jako wykonywane niezależnie od siebie.

Założenie to jest w praktyce rzadko spełnione. W przychodni, banku czy centrum obsługi klienta przypadki rywalizują o te same, ograniczone zasoby, a znaczna część całkowitego czasu przejścia to nie czas obsługi, lecz czas oczekiwania. Zjawisko to od dziesięcioleci opisuje teoria kolejek — jeden z filarów badań operacyjnych. Uderzające jest przy tym, że obie dyscypliny przez długi czas rozwijały się równolegle, niemal nie wymieniając się wynikami.

Spotkanie obu dyscyplin jest więc naturalne, następuje jednak w sposób rozproszony i pod wieloma nazwami: raz jako queue mining, raz jako analiza zachowania zasobów, raz jako kalibracja modeli symulacyjnych. W efekcie dorobek pozostaje rozproszony, a obok siebie funkcjonuje wiele modeli i wyników, których nie sposób bezpośrednio porównać. Warto przy tym podkreślić, że teoria kolejek wnosi do BPM nie tylko narzędzia opisowe, lecz także całą tradycję analizy strategicznej zapoczątkowaną przez Naora[155], która w literaturze BPM pozostaje praktycznie nieobecna.

Niniejsza praca stawia zatem pytanie o aktualny stan wiedzy: w jakich rolach aparat kolejkowy występuje dziś w BPM i skąd bierze się nowość współczesnych modeli. Szczególną uwagę poświęcono najistotniejszym pytaniom badawczym oraz problemom pozostającym otwartymi. Przyjęto metodę narracyjnego przeglądu literatury: punktem wyjścia były prace źródłowe wyznaczające poszczególne nurty, uzupełnione o publikacje z lat 2021–2025 pochodzące z czasopism z zakresu systemów informacyjnych i badań operacyjnych oraz z konferencji poświęconych process miningowi. Do przeglądu włączano prace recenzowane, w których aparat kolejkowy pełni rolę konstytutywną, a nie wyłącznie ilustracyjną; zestawiono je następnie według czterech kryteriów — zadawanego pytania badawczego, roli przypisywanej kolejce, zastosowanej metody oraz ograniczeń. Wkładem pracy jest synteza tego dorobku oraz wskazanie kierunków dalszych badań i możliwych obszarów własnego wkładu. Adresatami są przede wszystkim badacze process miningu, a także praktycy zarządzania operacyjnego w ochronie zdrowia, administracji i usługach.

---

[154] W.M.P. van der Aalst, *Process Mining: Data Science in Action*, Springer, Heidelberg 2016.
[155] P. Naor, *The Regulation of Queue Size by Levying Tolls*, Econometrica, 37(1), 1969.

2. Queue mining

Jedną z fundamentalnych prac tego nurtu jest Senderovich, Weidlich, Gal i Mandelbaum: *Queue Mining – Predicting Delays in Service Processes*, w której autorzy postulują traktowanie kolejek jako obiektów pierwszej klasy w operacyjnym process miningu oraz wykorzystanie teorii kolejek jako podstawy technik analitycznych[156]. Wartość podejścia demonstrują na problemie predykcji opóźnienia online, pokazując, że na podstawie samych danych zdarzeniowych można trafnie przewidzieć czas oczekiwania przypadku[157]. Jest to istotne badanie, ponieważ jako pierwsze przenosi punkt ciężkości z pojedynczego przypadku na zasób, o który przypadki konkurują.

Kolejną pracą, która rozszerza ten problem, jest analiza predykcji opóźnień w procesach wieloklasowych[158]. Autorzy zestawiają dwie rodziny predyktorów: pierwsza wywodzi się z tradycyjnego process miningu i rozszerza regresyjne techniki predykcji czasu o informację o kolejkach i obciążeniu systemu, druga wywodzi się z teorii kolejek i wykorzystuje własności modelu kolejkowego, w tym zasadę migawkową. Najcenniejszy jest tu jednak nie sam algorytm, lecz obszerne porównanie empiryczne obu tradycji przeprowadzone na tych samych danych.

Osobnym problemem jest jakość danych, którą podejmuje praca o odkrywaniu kolejek z logów o różnym poziomie informacji[159]. Autorzy pokazują, że przy pełnej informacji kolejkowej, czyli znajomości momentów wejścia do kolejki i wyjścia z niej, zadanie jest trywialne, w praktyce jednak logi rejestrują zwykle wyłącznie zakończenia aktywności, a wtedy długość kolejki trzeba estymować[160]. Jest to ograniczenie o charakterze fundamentalnym, ponieważ sam obiekt badania nie jest bezpośrednio obserwowalny w danych.

W ramach tego nurtu pojawiają się zatem pytania o to, jak daleko można posunąć estymację kolejki z logów ubogich informacyjnie oraz w jakim stopniu jakość predykcji zależy od trafności założeń kolejkowych, a w jakim od samej informacji o obciążeniu systemu.

3. Zachowanie zasobów i zależności między przypadkami

---

[156] A. Senderovich, M. Weidlich, A. Gal, A. Mandelbaum, *Queue Mining – Predicting Delays in Service Processes*, [w:] Advanced Information Systems Engineering, Springer, Cham 2014.
[157] Ibidem.
[158] A. Senderovich, M. Weidlich, A. Gal, A. Mandelbaum, *Queue mining for delay prediction in multi-class service processes*, Information Systems, 53, 2015.
[159] A. Senderovich, S.J.J. Leemans, S. Harel, A. Gal, A. Mandelbaum, W.M.P. van der Aalst, *Discovering Queues from Event Logs with Varying Levels of Information*, [w:] Business Process Management Workshops, Springer, Cham 2016.
[160] Ibidem.

Podczas gdy queue mining skupia się na czasie oczekiwania, ciekawym nurtem jest analiza zachowania samych zasobów. Nakatumba i van der Aalst zwracają uwagę, że zarówno symulacja, jak i process mining koncentrują się na przepływie sterowania i nie analizują zachowania zasobów w sposób szczegółowy[161]. Autorzy skupiają się na zależności prędkości obsługi od obciążenia, powołując się na prawo Yerkesa–Dodsona, zgodnie z którym ludzie pracują najwydajniej przy pewnym poziomie obciążenia, a przy niskim obciążeniu wykonują zadania wolniej. Zasadniczym wkładem tej pracy jest pokazanie, jak taką zależność włączyć do modelu symulacyjnego i wyuczyć ją z logu zdarzeń. Wynik ten podważa jedno z podstawowych założeń klasycznych modeli kolejkowych — stałą stopę obsługi.

Pokrewnym zjawiskiem jest przetwarzanie wsadowe. Martin, Pufahl i Mannhardt proponują techniki wykrywania aktywności wsadowych w logach zdarzeń[162]. Warto zauważyć, że z perspektywy kolejkowej batching jest po prostu reżimem obsługi, który organizacja stosuje samorzutnie, często bez formalnej decyzji projektowej. Jest to przy tym reżim, który daje się odtworzyć z danych, ale którego efektywność rzadko bywa przedmiotem badania.

Wspólnym mianownikiem tego nurtu jest przejście od perspektywy pojedynczego przypadku do perspektywy systemu: zachowanie procesu ujawnia się jako stan wielu współdziałających komponentów, którego nie da się uchwycić, patrząc na pojedyncze instancje[163]. Pojawia się tu pytanie, czy odkrywane empirycznie reżimy obsługi — wsadowe, priorytetowe, zależne od obciążenia — są w ogóle świadomym wyborem organizacji, czy raczej niezamierzonym efektem lokalnych decyzji pracowników.

4. Symulacja procesów biznesowych

Odrębnym nurtem jest symulacja, której rola w BPM jest odmienna niż rola process miningu: symulacja jest sterowana modelem i pozwala badać scenariusze przez zmianę parametrów, podczas gdy process mining jest sterowany danymi i pozwala analizować zachowanie zaobserwowane. Klasyczne opracowanie na temat warunków poprawnego zbudowania symulacji procesu wskazuje typowe

[161] J. Nakatumba, W.M.P. van der Aalst, *Analyzing Resource Behavior Using Process Mining*, [w:] Business Process Management Workshops, Springer, Heidelberg 2010.
[162] N. Martin, L. Pufahl, F. Mannhardt, *Detection of batch activities from event logs*, Information Systems, 95, 2021.
[163] A. Senderovich, M. Weidlich, A. Gal, A. Mandelbaum, Queue mining for delay prediction… op.cit.

błędy tego podejścia[164], wśród których kluczowe jest nierealistyczne modelowanie zasobów.

Współczesny nurt zmierza do automatycznego uczenia modeli symulacyjnych z danych. Camargo, Báron, Dumas i González-Rojas proponują hybrydowe podejście łączące process mining z uczeniem głębokim[165]. Jedną z najnowszych prac jest López-Pintado i Dumas, w której autorzy modelują probabilistycznie przerywaną dostępność zasobów oraz wielozadaniowość[166]. Podejście to trafia dokładnie w te zjawiska, które klasyczny model kolejkowy ukrywa w założeniu o serwerze pracującym bez przerwy i obsługującym jednego klienta naraz.

5. Symulacja agentowa

Kirchdorfer i współautorzy przedstawili AgentSimulator, w którym zachowanie procesu wyłania się z decyzji poszczególnych agentów odpowiadających zasobom[167]. Dla niniejszego przeglądu jest to podejście kluczowe: spośród omawianych nurtów najbliżej mu do traktowania kolejki jako zjawiska wyłaniającego się z zachowań, a nie zadanego z góry. Pokrewnym wątkiem jest integracja uczenia maszynowego z symulacją w czasie działania procesu[168].

6. Modele gruboziarniste

Nurt modeli gruboziarnistych, rozwijany przez Pourbafraniego i van der Aalsta, polega na wyodrębnianiu z logu zagregowanych cech procesu w oknach czasowych[169]. Argumentem autorów jest to, że przy decyzjach wysokiego szczebla średni czas obsługi przypadków w ciągu dnia jest ważniejszy niż czas obsługi pojedynczego przypadku. Nurt ten został podsumowany w rozprawie

---

[164] W.M.P. van der Aalst, J. Nakatumba, A. Rozinat, N. Russell, *Business Process Simulation: How to Get It Right?*, [w:] J. vom Brocke, M. Rosemann (red.), Handbook on Business Process Management 1, Springer, Berlin 2010.

[165] M. Camargo, D. Báron, M. Dumas, O. González-Rojas, *Learning business process simulation models: A hybrid process mining and deep learning approach*, Information Systems, 117, 2023.

[166] O. López-Pintado, M. Dumas, *Business process simulation: probabilistic modeling of intermittent resource availability and multitasking behavior*, Information Systems, 127, 2025.

[167] L. Kirchdorfer, R. Blümel, T. Kampik, H. van der Aa, H. Stuckenschmidt, *AgentSimulator: An Agent-Based Approach for Data-Driven Business Process Simulation*, [w:] 6th International Conference on Process Mining, IEEE, Kgs. Lyngby 2024.

[168] F. Meneghello, C. Di Francescomarino, C. Ghidini, M. Ronzani, *Runtime integration of machine learning and simulation for business processes: Time and decision mining predictions*, Information Systems, 128, 2025.

[169] M. Pourbafrani, W.M.P. van der Aalst, *Extracting Process Features from Event Logs to Learn Coarse-Grained Simulation Models*, [w:] Advanced Information Systems Engineering, Springer, Cham 2021.

poświęconej symulacji opartej na danych[170]. Otwartym pytaniem pozostaje, czy model zagregowany i model drobnoziarnisty prowadzą do tych samych rekomendacji projektowych.

7. Operacyjne sterowanie alokacją zasobów

Innym nurtem, rozwijanym głównie po stronie informatycznej, jest preskryptywne monitorowanie procesów, czyli rekomendowanie działań w czasie wykonania. Przegląd tego obszaru wskazuje na jego szybki rozwój i znaczne rozproszenie metodyczne[171]. Z perspektywy kolejkowej istotne jest jedno konkretne ograniczenie: Shoush i Dumas zauważają, że istniejące podejścia zakładają nieograniczoną liczbę zasobów dostępnych do wykonania interwencji, co w praktyce jest założeniem nierealistycznym[172].

Zasadniczym wkładem tej pracy jest metoda łącząca uczenie ze wzmocnieniem z predykcją konformalną, oparta na argumencie, że przy ograniczonych zasobach decyzja o interwencji powinna uwzględniać nie tylko jej potrzebę i skuteczność, ale również aktualny poziom wykorzystania zasobów oraz niepewność szacunków[173]. W istocie rozwiązywany jest tu problem sterowania dostępem do kolejki, sformułowany jednak w języku uczenia maszynowego, a nie teorii kolejek. Dobrze ilustruje to rozproszenie pojęciowe całego nurtu.

8. Uczenie modeli kolejkowych z danych zdarzeniowych

Najmłodszy z omawianych nurtów odwraca kierunek zależności: zamiast wykorzystywać teorię kolejek do analizy logów, buduje się modele kolejkowe wprost z danych zdarzeniowych. Mittal, Zheng, Dong i Namkoong wychodzą od obserwacji, że modele sieci kolejkowych są wprawdzie potężnym narzędziem analizy systemów usługowych, ale ich konstrukcja wymaga znacznego nakładu pracy i wiedzy eksperckiej[174].

Wkładem tej pracy jest przeformułowanie zadania modelowania jako problemu uczenia rozkładu sekwencji: zamiast jawnie specyfikować proces przybyć, mechanizm obsługi i logikę trasowania, autorzy uczą warunkowych

---

[170] M. Pourbafrani, *Forward-Looking Process Mining: Data-Driven Simulation*, Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen 2023.
[171] K. Kubrak, F. Milani, A. Nolte, M. Dumas, *Prescriptive process monitoring: Quo vadis?*, PeerJ Computer Science, 8, 2022.
[172] M. Shoush, M. Dumas, *Prescriptive Process Monitoring Under Resource Constraints: A Reinforcement Learning Approach*, KI – Künstliche Intelligenz, 2024.
[173] Ibidem.
[174] D. Mittal, S. Zheng, J. Dong, H. Namkoong, *Data-Driven Stochastic Modeling Using Autoregressive Sequence Models: Translating Event Tables to Queueing Dynamics*, arXiv:2509.05839, 2025.

rozkładów typów zdarzeń i momentów ich wystąpienia[175]. Znaczenie tej pracy polega przede wszystkim na zatarciu granicy między logiem zdarzeń a modelem kolejkowym: pierwszy staje się bezpośrednim wejściem dla drugiego. Istotnym ograniczeniem jest jednak to, że walidację przeprowadzono na tablicach zdarzeń wygenerowanych z sieci kolejkowych, a nie na rzeczywistych logach organizacyjnych.

9. Porównanie

Zestawienie omówionych nurtów według czterech kryteriów przedstawiono w tabeli (tab. 1.).

Tab. 1. Zastosowania aparatu kolejkowego w Business Process Management

Nurt	Pytanie badawcze	Rola kolejki	Metoda	Ograniczenie
Queue mining	ile czasu przypadek będzie czekał	jawny model kolejkowy odtwarzany z logu	teoria kolejek, regresja	wymaga bogatych znaczników czasu
Zachowanie zasobów	jak obciążenie zmienia tempo pracy	kolejka jako źródło obciążenia zasobu	analiza logu, statystyka	brak modelu decyzji zasobu
Symulacja procesów (BPS)	co się stanie po zmianie procesu	kolejka jako efekt uboczny rywalizacji o zasoby	symulacja zdarzeń dyskretnych	kalibracja parametrów, dokładność
Symulacja agentowa	jak zachowania zasobów kształtują wynik	kolejka wyłania się z decyzji agentów	modelowanie agentowe	agenci bez celu strategicznego
Modele gruboziarniste	jak zmieniać proces na poziomie zagregowanym	kolejka jako zmienna systemowa	dynamika systemów	utrata poziomu przypadku
Sterowanie operacyjne	komu przydzielić ograniczony zasób	kolejka jako ograniczenie zdolności	uczenie ze wzmocnieniem	perspektywa jednego decydenta
Uczenie modeli kolejkowych	jak zbudować symulator bez eksperta	kolejka jako rozkład warunkowy zdarzeń	modele autoregresyjne	walidacja na danych syntetycznych

Źródło: oprac. własne.

10. Wnioski

[175] Ibidem.

Przeprowadzony przegląd pokazuje przede wszystkim, że kolejka pełni w poszczególnych nurtach BPM zupełnie różne role. W queue miningu jest jawnie modelowanym obiektem, którego parametry odtwarza się z logu. W analizie zachowania zasobów jest źródłem obciążenia wpływającego na tempo pracy. W symulacji procesów biznesowych jest produktem ubocznym rywalizacji o zasoby, którego nikt nie modeluje wprost. W modelach gruboziarnistych staje się zagregowaną zmienną systemową. Ta wielość ról tłumaczy, dlaczego wyniki z poszczególnych nurtów tak trudno ze sobą zestawiać.

Drugim wnioskiem jest to, że barierą nie jest brak metod, lecz obserwowalność. Kolejki w większości logów zdarzeń nie są rejestrowane bezpośrednio: system zapisuje zakończenie aktywności, a nie moment, w którym przypadek zaczął czekać[176]. Cały aparat analityczny opiera się więc na wielkości estymowanej, a nie mierzonej, a jest to ograniczenie o charakterze infrastrukturalnym, którego nie usunie lepszy algorytm.

Trzecim i najważniejszym wnioskiem jest to, że BPM zapożyczył z teorii kolejek warstwę opisową, pomijając warstwę decyzyjną. W żadnym z omówionych nurtów uczestnik procesu nie jest modelowany jako podmiot podejmujący decyzje strategiczne. Nawet w symulacji agentowej agenci odpowiadają zasobom wykonującym pracę, a nie klientom decydującym, czy w ogóle do kolejki dołączyć[177]. Podobnie w preskryptywnym monitorowaniu procesów jedynym decydentem jest menedżer systemu[178]. Tymczasem nurt zapoczątkowany przez Naora opiera się właśnie na założeniu, że klient sam decyduje o wejściu do systemu, porównując nagrodę z kosztem oczekiwania[179].

11. Kierunki badawcze

Najważniejszym kierunkiem wydaje się wprowadzenie do modeli BPM strategicznego zachowania uczestników procesu. W wielu procesach obsługiwanych przez organizacje publiczne i komercyjne klient rzeczywiście decyduje, czy podjąć próbę obsługi, kiedy się zgłosić i czy porzucić oczekiwanie. Aparat racjonalnej teorii kolejek[180] dostarcza tu gotowych pojęć — progu odcięcia, równowagi w strategiach przybycia czy strategicznego porzucania kolejki — które można kalibrować z logów zdarzeń. Naturalnym punktem wyjścia

---

[176] A. Senderovich, S.J.J. Leemans, S. Harel i in., Discovering Queues from Event Logs… op.cit.
[177] L. Kirchdorfer, R. Blümel, T. Kampik, H. van der Aa, H. Stuckenschmidt, *AgentSimulator*… op.cit.
[178] M. Shoush, M. Dumas, Prescriptive Process Monitoring… op.cit.
[179] P. Naor, The Regulation of Queue Size… op.cit.
[180] R. Hassin, M. Haviv, *To Queue or Not to Queue: Equilibrium Behavior in Queueing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston 2003.

technicznego jest symulacja agentowa, wymaga ona jednak rozszerzenia populacji agentów o stronę popytową.

Drugim kierunkiem jest badanie sprawiedliwości reżimów obsługi odkrywanych z danych. Techniki process miningu potrafią wykryć, że organizacja stosuje przetwarzanie wsadowe albo faktyczny priorytet dla pewnych klas przypadków, nie odpowiadają jednak na pytanie, czy tak wyłoniony reżim jest efektywny i czy jest możliwy do uzasadnienia wobec klientów. Jest to pytanie szczególnie doniosłe w ochronie zdrowia i administracji publicznej, gdzie reżim obsługi bywa przedmiotem sporu publicznego.

Trzecim kierunkiem jest walidacja uczonych symulatorów kolejkowych na rzeczywistych danych organizacyjnych. Podejścia oparte na modelach sekwencyjnych obiecują automatyczną budowę symulatora bez udziału eksperta, dotąd testowano je jednak na danych wygenerowanych z modeli kolejkowych[181]. Otwarte pozostaje pytanie, czy zachowają one jakość na logach rzeczywistych, w których występują braki znaczników czasu, aktywności wsadowe i zmienna dostępność zasobów. Byłby to wynik istotny praktycznie, ponieważ rozstrzyga, czy cyfrowy bliźniak procesu jest narzędziem wdrażalnym, czy jedynie koncepcją badawczą. Na koniec należy zaznaczyć ograniczenie samego przeglądu: ma on charakter narracyjny, a nie systematyczny, obejmuje więc dorobek wybrany celowo, a nie wyczerpujący. Sformalizowanie procedury wyszukiwania i rozszerzenie kwerendy na literaturę badań operacyjnych spoza nurtu BPM pozwoliłoby zweryfikować, czy zidentyfikowana luka decyzyjna utrzymuje się także poza analizowanym zbiorem prac.

12. Bibliografia

1 Camargo M., Báron D., Dumas M., González-Rojas O., *Learning business process simulation models: A hybrid process mining and deep learning approach*, Information Systems, 117, 2023.

2 Hassin R., Haviv M., *To Queue or Not to Queue: Equilibrium Behavior in Queueing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston 2003.

3 Kirchdorfer L., Blümel R., Kampik T., Van der Aa H., Stuckenschmidt H., *AgentSimulator: An Agent-Based Approach for Data-Driven Business Process Simulation*, [w:] 6th International Conference on Process Mining, IEEE, Kgs. Lyngby 2024.

4 Kubrak K., Milani F., Nolte A., Dumas M., *Prescriptive process monitoring: Quo vadis?*, PeerJ Computer Science, 8, 2022.

5 López-Pintado O., Dumas M., *Business process simulation: probabilistic modeling of intermittent resource availability and multitasking behavior*, Information Systems, 127, 2025.

[181] D. Mittal, S. Zheng, J. Dong, H. Namkoong, Data-Driven Stochastic Modeling… op.cit.

6 Martin N., Pufahl L., Mannhardt F., *Detection of batch activities from event logs*, Information Systems, 95, 2021.
7 Meneghello F., Di Francescomarino C., Ghidini C., Ronzani M., *Runtime integration of machine learning and simulation for business processes: Time and decision mining predictions*, Information Systems, 128, 2025.
8 Mittal D., Zheng S., Dong J., Namkoong H., *Data-Driven Stochastic Modeling Using Autoregressive Sequence Models: Translating Event Tables to Queueing Dynamics*, arXiv:2509.05839, 2025.
9 Nakatumba J., Van der Aalst W.M.P., *Analyzing Resource Behavior Using Process Mining*, [w:] Business Process Management Workshops, Springer, Heidelberg 2010.
10 Naor P., *The Regulation of Queue Size by Levying Tolls*, Econometrica, 37(1), 1969.
11 Pourbafrani M., *Forward-Looking Process Mining: Data-Driven Simulation*, Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen 2023.
12 Pourbafrani M., Van der Aalst W.M.P., *Extracting Process Features from Event Logs to Learn Coarse-Grained Simulation Models*, [w:] Advanced Information Systems Engineering, Springer, Cham 2021.
13 Senderovich A., Weidlich M., Gal A., Mandelbaum A., *Queue Mining – Predicting Delays in Service Processes*, [w:] Advanced Information Systems Engineering, Springer, Cham 2014.
14 Senderovich A., Weidlich M., Gal A., Mandelbaum A., *Queue mining for delay prediction in multi-class service processes*, Information Systems, 53, 2015.
15 Senderovich A., Leemans S.J.J., Harel S., Gal A., Mandelbaum A., Van der Aalst W.M.P., *Discovering Queues from Event Logs with Varying Levels of Information*, [w:] Business Process Management Workshops, Springer, Cham 2016.
16 Shoush M., Dumas M., *Prescriptive Process Monitoring Under Resource Constraints: A Reinforcement Learning Approach*, KI – Künstliche Intelligenz, 2024.
17 Van der Aalst W.M.P., *Process Mining: Data Science in Action*, Springer, Heidelberg 2016.
18 Van der Aalst W.M.P., Nakatumba J., Rozinat A., Russell N., *Business Process Simulation: How to Get It Right?*, [w:] Vom Brocke J., Rosemann M. (red.), Handbook on Business Process Management 1, Springer, Berlin 2010.

dr inż. Jarosław Mikołajczyk

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła

https://orcid.org/0000-0001-9196-0039

The Railway Coefficient (J_{rail}) as a Measure of the Efficiency and Intensity of Transport Infrastructure Use in Freight Transport within the European Union

Keywords: Eurostat, R programming language, transport infrastructure

Abstract:

This paper presents the results of calculations of the proposed road coefficient Jrail which serves as a type of indicator for assessing the efficiency and intensity of transport infrastructure utilization in freight transport within the European Union. The above-mentioned calculations were performed based on publicly available statistical data from Eurostat using the R software environment.

1. Introduction

Human labor produces either goods or services. Goods within a given country (or between countries) can travel from point A to point B by water, land, and air, or a combination of both. Each mode of transportation has its own characteristics. Need, as the driving force behind human activity, determines the choice of the appropriate transportation route. Needs change over time, so the choices of transportation routes will also change over time.

Among the numerous statistical parameters related to rail transport, a logical justification can be found for comparing the TKM parameter (million tons/kilometer of railway line) with the population size of a given country. It should be expected that the larger the population of a given country, the greater the need to move goods, and therefore, the higher the TKM value. A country's population is a variable number, and the TKM figure for a given year also varies.

2. Methodology

The parameter proposed for the analysis is conventionally referred to as the J coefficient**.** This coefficient is defined as the ratio of the population of a given

country to the TKM value**,** specifically TKM_{rail} (from the English term *rail*, referring to railway land transport infrastructure).

The higher the value of this parameter, the more people there are per million tons/kilometer of rail (TKM). In the extreme case, for extremely low values of this parameter, we can say that a given country is a rail transit country, a transport hub.

Table 1 presents the results of the calculated J_{rail} parameter for individual EU countries for a given year. Generally, it can be seen that its value changes over time for each country.

Table 1. Summary of the J_{rail} coefficient values for individual EU countries in a given year

No.	Country	J 2016	J 2017	J 2018	J 2019	J 2020	J 2021	J 2022	J 2023	J 2024
1.	Belgium	----------	-------	----------	--------	------	------	------	-----	-----
2.	Bulgaria	487.76	427.29	456.71	445.82	401.20	361.93	336.04	376.95	412.04
3.	Czechia	107.65	109.61	106.84	107.79	117.64	105.42	115.83	130.26	135.57
4.	Denmark	608.25	617.22	635.51	682.11	675.89	841.99	756.98	878.13	925.23
5.	Germany	209.12	223.40	233.22	228.94	255.77	228.67	225.65	236.25	242.84
6.	Estonia	51.88	48.27	47.43	62.08	84.11	57.07	75.19	135.16	202.40
7.	Ireland	8134.74	8789.66	9410.34	14278.36	11163.92	12209.38	12301.38	15323.82	24215.75
8.	Greece	9812.99	8062.90	-------	------	------	-----	----	----	17797.19
9.	Spain	1751.39	1681.40	1717.35	1786.16	2126.27	1917.82	1907.49	2012.78	2226.79
10.	France	694.78	682.96	762.92	745.92	820.65	721.48	768.09	900.17	877.13
11.	Croatia	413.73	334.93	298.60	274.67	262.37	256.53	237.58	255.55	246.42
12.	Italy	647.28	637.06	616.66	634.36	658.81	568.41	564.65	615.42	623.35
13.	Cyprus	-------	------	------	------	-------	------	-----	------	----
14.	Latvia	41.18	44.54	39.27	46.28	79.30	86.96	88.04	122.70	169.32
15.	Lithuania	60.77	54.32	49.78	50.94	52.59	55.03	90.58	104.95	112.48
16.	Luxemb.	128.57	134.06	131.30	139.36	80.45	78.29	86.60	92.62	100.47
17.	Hungary	195.41	184.88	185.12	185.58	186.72	189.13	185.90	209.78	209.69
18	Holan	398.4	405.9	410.7	405.17	435.00	410.02	395.57	452.75	474.62

.	dia	3	4	0						
19.	Austria	84.61	81.55	83.81	86.36	91.28	84.87	86.44	98.49	96.99
20.	Poland	170.62	158.55	152.36	162.45	173.82	155.83	155.27	159.84	164.42
21.	Portugal	1010.68	989.62	1011.23	1103.42	1231.35	1147.65	1245.65	1229.30	1354.00
22.	Romania	375.55	350.27	352.41	330.13	389.15	334.38	345.06	389.94	443.17
23.	Slovenia	111.01	97.10	96.96	95.01	108.05	103.69	103.00	110.49	115.18
24.	Slovakia	114.12	113.81	109.65	117.43	131.29	109.32	116.35	122.54	122.50
25.	Finland	151.74	143.06	135.39	143.46	143.87	137.73	177.66	205.57	210.35
26.	Sweden	145.99	144.13	146.41	149.96	147.95	143.25	147.34	154.06	160.10

Source: Own elaboration

Figure 1 graphically presents the average J_{rail} coefficient values for the years 2016÷2024 for individual countries. One country stands out significantly from the rest: Ireland. On average, there are nearly 13,000 people per million tonnes/kilometer of rail (TKM).

Table 2. Summary of average values of the J_{rail} coefficient for individual EU countries in the period 2016÷2024, sorted in ascending order

No.	Country	Average value J_{rail} 2016÷2024
1.	Lithuania	70.16
2.	Latvia	79.73
3.	Estonia	84.84
4.	Austria	88.27
5.	Slovenia	104.50
6.	Luxembourg	107.97
7.	Czechia	115.18
8.	Slovakia	117.45
9.	Sweden	148.80
10.	Finland	160.98
11.	Poland	161.46
12.	Hungary	192.47
13.	Germany	231.54
14.	Croatia	286.71
15.	Romania	367.78
16.	Bulgaria	411.75
17.	Holandia	420.91
18.	Italy	618.44
19.	Denmark	735.70
20.	France	774.90
21.	Portugal	1146.99

22.	Spain	1903.05
23.	Ireland	12869.71

Source: Own elaboration

Fig. 1 clearly shows that at least Ireland (No. 23) may be an outlier for the J_{rail} parameter. To determine this unambiguously, the data from Table 2 are implemented into the R software[182] to generate a box plot of the J_{rail} parameter.

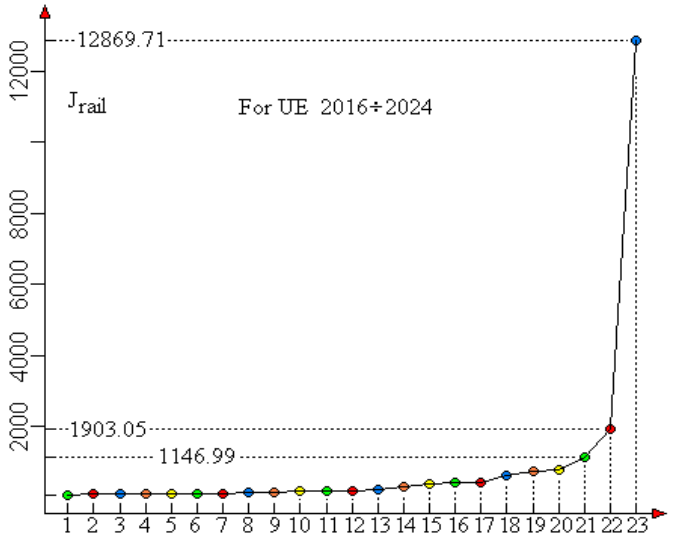


Fig. 1. Graphical representation of the average values of the J_{rail} coefficient sorted in ascending order for individual EU countries in the years 2016÷2024

1 – Lithuania; 2 – Latvia; 3 – Estonia; 4 – Austria; 5 – Slovenia; 6 – Luxemburg; 7 – Czechia; 8 – Slovakia; 9 – Sweden; 10 – Finland; 11 – Poland; 12 – Hangary; 13 – Germany; 14 – Croatia; 15 – Romania; 16 – Bulgaria; 17 – Holandia; 18 – Italy; 19 – Denmark; 20 – France; 21 – Portugal; 22 – Spain; 23 – Ireland

Source: Own elaboration

A boxplot resembles a box with whiskers, hence its other name: a box-and-whisker plot. Almost all results fall between the whiskers of this plot, except for outliers. Outliers are those that deviate from the quartiles by more than 1.5 IQR

[182] Arnold S.F.: The theory of lineal models and multivariate analysis. Wiley, New York, 1981.
Bailey N.T.J.: Statistical Methods in Biology. The English Universities Press Ltd, London, 1959.
Bendat J. S., Piersol A. G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
Biecek P.: Przewodnik po pakiecie R. Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2017.
Biecek P.: Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
Crawley M.: The R Bock. Press Wiley-Blackwell, 2012

(1.5 is the default value of the R range argument). Fifty percent of the results fall within the box defined by the quarter.

Based on Fig. 2, three outliers are visible. These are the following countries: Ireland, Spain, and Portugal. Their J_{rail} parameter values deviate by more than 1.5 IQR.

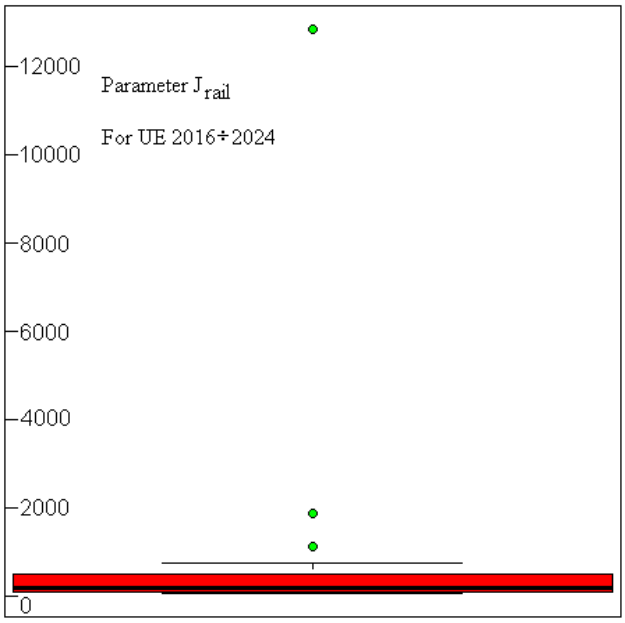


Fig. 2. Box-plot of the J_{rail} parameter for the period 2016÷2024 of EU countries
Source: Own elaboration

Table 3. Summary of selected statistical parameters for the J_{rail} coefficient calculated in R for the EU in the period 2016÷2024

Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max	d_1	R	IQR	sd
79.16	111.58	192.47	921.71	519.67	12869.71	1143.88	12799.55	408.1	2640.214

Min – minimum value; 1st Qu. – first quartile; Median – median; Mean – average value; 3rd Qu. – third quartile; Max – maximum value; d1 – average deviation; R – sample range; IQR – interquartile range; sd – statistical deviation

Source: Own elaboration

3. Conclusion

The J_{rail} indicatorproposed in this paper represents a novel alternative to assessing the efficiency and intensity of using transport infrastructure in freight transport in the European Union. The above-mentioned calculations were based

on publicly available Eurostat statistical data using the R software environment[183]. Will this type of statistical data interpretation be accepted? This will depend on its usefulness in data analysis.

4. Literature:

1 Arnold S.F.: The theory of lineal models and multivariate analysis. Wiley, New York, 1981.
2 Bailey N.T.J.: Statistical Methods in Biology. The English Universities Press Ltd, London, 1959.
3 Bendat J. S., Piersol A. G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych.* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
4 Biecek P.: Przewodnik po pakiecie R. Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2017.
5 Biecek P.: Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
6 Crawley M.: The R Bock. Press Wiley-Blackwell, 2012.
7 Everitt B., Hothorn T.: A Handbook of Statistical Analyses Using R. Chapman&Hall/CRC Computer Science & Data Analysis. 2010.
8 Gągolewski M.: *Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje.* Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
9 Gillespie C., Lovelace R.: *Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu.* APN Promise, Warszawa 2018.
10 Koronacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.
11 Krzysztofiak M., Urbanek D.: *Metody statystyczne*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.

[183] Everitt B., Hothorn T.: A Handbook of Statistical Analyses Using R. Chapman&Hall/CRC Computer Science & Data Analysis. 2010.
Gągolewski M.: Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
Gillespie C., Lovelace R.: Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu. APN Promise, Warszawa 2018.
Koronacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.
Krzysztofiak M., Urbanek D.: Metody statystyczne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
Krzyśko M: Statystyka matematyczna. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1996.
Luszniewicz A.: Statystyka ogólna. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1987.
Morrison D. F.: Wielowymiarowa analiza statystyczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
Żakowski W., Kołodziej W.: Matematyka cz. II. Analiza matematyczna. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.

12 Krzyśko M: *Statystyka matematyczna*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1996.
13 Luszniewicz A.: *Statystyka ogólna*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1987.
14 Morrison D. F.: *Wielowymiarowa analiza statystyczna.* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
15 Żakowski W., Kołodziej W.: *Matematyka cz. II. Analiza matematyczna*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.

dr inż. Jarosław Mikołajczyk

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła

https://orcid.org/0000-0001-9196-0039

The Road Coefficient (J_{road}) as a Measure of the Efficiency and Intensity of Transport Infrastructure Use in Freight Transport within the European Union

Keywords: Eurostat, R programming language, transport infrastructure

Abstract:

This paper presents the results of calculations of the proposed road coefficient (Jroad) introduced as an indicator of the efficiency and intensity of transport infrastructure utilization in freight transport within the European Union. The calculations were performed using publicly available statistical data from Eurostat and implemented in the R programming environment.

1. Introduction

Goods within a country or between countries are transported from one location to another, most commonly in response to orders placed by customers or consignees. It is relatively uncommon for goods to be produced and consumed in the same location. The destination markets for products are primarily determined by prevailing economic conditions, market demand for specific goods, and the demand for related services. With the current level of technological development, certain services can be delivered remotely, for example via the Internet. However, tangible goods must still be physically transported by one or more modes of transport, including road, rail, inland waterway, maritime, or air transport. Each mode of transport is characterized by distinct and specific operational features. The selection of a particular transport mode for a given commodity or service is determined by the current requirements and prevailing circumstances. When delivery time is the primary factor, air transport is selected despite its high cost. In contrast, when transporting very large quantities of goods or high-mass cargo, maritime transport is generally preferred. Rail transport represents an intermediate solution, combining characteristics of the two aforementioned modes of transport.

Among the numerous statistical parameters related to transport, a logical basis can be found for comparing the TKM parameter (million tonne-kilometers per kilometer of road infrastructure) with the population size of a given country. It can

be assumed that the larger the population of a country, the greater the demand for the movement of goods, and consequently the higher the expected value of TKM. The population of a country is a variable parameter, and the TKM value for a given year is also subject to variation.

2. Methodology

The parameter proposed for analysis is conventionally referred to as the J coefficient. This coefficient is defined as the ratio of the population of a given country to the value of TKM, more specifically TKM road, where *road* refers to land-based road transport.

The logical interpretation of the Jroad parameter is that it indicates the number of inhabitants (citizens) corresponding to one unit of TKM (million tonne-kilometers of road freight transport).

Table 1 presents the calculated values of the J_{road} parameter for individual EU countries in a given year. In general, it can be observed that the value of this parameter changes over time for each country. Figure 1 illustrates the variation in the J_{road} coefficient values for Belgium in individual years. Figure 2 presents a boxplot of the J_{road} coefficient values for Belgium over the analyzed period. A supplementary analysis is provided in Table 2, which summarizes selected statistical parameters of the J_{road} coefficient calculated using the R programming environment[184] for Belgium during the period 2016÷2024.

For each of the countries presented in Table 1, an analogous analysis to that performed for Belgium can be conducted. However, an examination of the J_{road} coefficient values reveals several countries with distinctive characteristics. In particular, Cyprus demonstrates an extremely high value of this parameter. Cyprus is a relatively small island state located in the eastern part of the Mediterranean Sea. The J_{road} parameter for this country fluctuates around a value of one thousand. Cyprus is situated at the intersection of communication routes connecting three continents: Africa, Europe, and Asia; however, these routes are predominantly maritime rather than land-based. An interesting observation derived from the analysis of the J_{road} parameter is that, since 2022, its value for Cyprus has started

[184] Arnold S.F.: The theory of lineal models and multivariate analysis. Wiley, New York, 1981.
Bailey N.T.J.: Statistical Methods in Biology. The English Universities Press Ltd, London, 1959.
Bendat J. S., Piersol A. G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
Biecek P.: Przewodnik po pakiecie R. Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2017.
Biecek P.: Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
Crawley M.: The R Bock. Press Wiley-Blackwell, 2012.

to decline. The question arises: what factors contributed to this decrease? Could this change have been influenced by the war in Ukraine?

The second country characterized by a very high value of the J_{road} parameter is Greece, for which this parameter fluctuates around a value of 500. Both of the aforementioned countries are geographically close to each other and share the characteristic of being maritime countries.

Other large EU countries, both in terms of population and territorial area, such as France, Spain, Germany, Sweden, and Finland, exhibit similar values of the J_{road} parameter, ranging approximately from 200 to 400.

A very interesting phenomenon can be observed in countries characterized by relatively small territorial areas and high values of the J_{road} parameter, such as Portugal, Hungary, Austria, the Netherlands, Denmark, Estonia, Italy, Croatia, and others.

Table 1. Summary of the values of the J_{road} coefficient for individual EU countries in a given year

No.	State	J 2016	J 2017	J 2018	J 2019	J 2020	J 2021	J 2022	J 2023	J 2024
1.	Belgium	269.69	279.82	288.97	270.10	278.15	267.46	296.71	319.85	315.73
2.	Bulgaria	195.89	194.55	250.35	323.69	201.62	185.69	184.20	194.47	239.01
3.	Czechia	209.23	238.10	257.55	271.55	190.08	164.26	159.59	166.74	154.66
4.	Denmark	354.59	370.82	385.41	387.28	396.46	380.61	387.35	361.59	357.67
5.	Germany	268.61	272.16	270.25	275.99	283.32	280.80	283.75	301.23	308.73
6.	Estonia	196.26	213.16	229.38	278.15	312.48	255.19	294.78	327.08	316.46
7.	Ireland	413.35	408.23	423.12	401.78	440.98	407.70	419.15	415.49	388.03
8.	Greece	505.43	501.59	387.92	486.67	499.65	501.18	493.79	519.60	504.09
9.	Spain	213.92	201.19	195.18	188.01	195.32	175.45	178.04	182.57	179.02
10.	France	427.59	398.40	389.96	386.58	397.68	387.33	392.78	403.42	394.60
11.	Croatia	364.46	344.75	317.77	317.95	320.89	285.58	282.66	268.75	269.63
12.	Italy	534.15	501.88	479.84	433.51	447.69	408.57	390.68	406.40	386.26
13.	Cyprus	1228.68	1053.12	984.98	1037.52	1272.82	1250.99	979.73	927.75	881.72
14.	Latvia	139.75	131.61	130.28	129.27	140.40	126.44	129.79	144.76	126.86
15.	Lithuania	93.54	73.17	64.87	52.97	50.84	48.69	52.19	45.29	43.57
16.	Luxembo	91.18	94.49	88.53	83.17	101.3	91.94	87.77	94.89	105.6

	urg					8				0
17.	Hungary	245.51	246.29	256.88	263.78	302.62	261.65	257.82	289.55	281.66
18.	Holandia	249.68	251.97	245.71	248.29	256.28	249.83	268.21	284.03	284.56
19.	Austria	344.19	348.12	353.30	345.34	365.31	339.69	345.11	358.13	361.78
20.	Poland	130.59	113.28	120.23	108.82	106.95	97.60	95.79	97.26	99.42
21.	Portugal	297.77	300.88	313.77	321.05	428.20	324.33	325.34	392.89	460.49
22.	Romania	410.21	359.09	332.43	318.07	351.29	310.48	295.93	292.05	283.09
23.	Slovenia	110.54	99.41	93.09	86.76	92.58	84.54	86.77	94.13	97.29
24.	Slovakia	150.35	153.68	153.11	160.78	172.75	181.21	172.88	206.18	177.81
25.	Finland	204.39	196.78	194.50	191.28	186.22	186.83	181.37	196.91	203.01
26.	Sweden	233.12	241.21	234.81	242.54	242.47	221.21	220.79	251.33	261.51

Source: Own elaboration

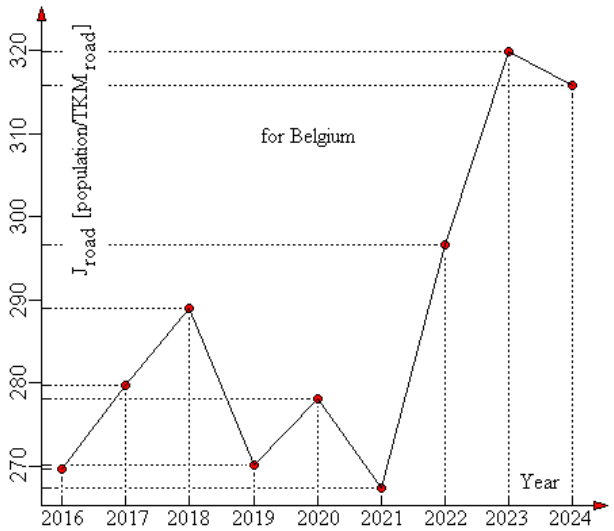


Fig. 1. Change in the value of the J_{road} coefficient for Belgium in individual years
Source: Own elaboration

Fig. 2 shows a boxplot of J_{road} values for Belgium by year. The graph shows no outliers.

A boxplot resembles a box with whiskers, hence its other name: a box-and-whisker plot. Almost all results fall between the whiskers of this plot, except, of

course, the outliers. Outliers are those that deviate from the quartiles by more than 1.5 IQR (1.5 is the default value of the R range argument). Fifty percent of the results fall within the box defined by the quarter.

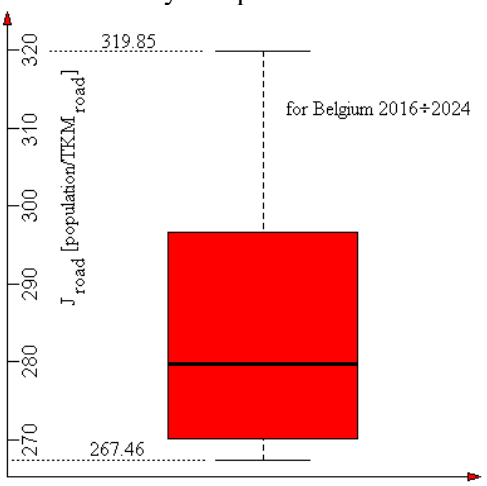


Fig. 2. Boxplot of the J_{road} coefficient for Belgium by year
Source: Own elaboration

Table 2. Summary of selected statistical parameters for the J_{road} coefficient calculated in R for Belgium in the period 2016÷2024

Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max	d_1	R	IQR	Sd
267.46	270.1	279.8	287.4	296.7	319.85	15.9363	52.39	26.61	19.67958

Min – minimum value; 1st Qu. – first quartile; Median – median; Mean – average value; 3rd Qu. – third quartile; Max – maximum value; d1 – average deviation; R – sample range; IQR – interquartile range; sd – statistical deviation

Source: Own elaboration

In Poland, a continuous decline in this parameter can be observed from 2016 (130.59) to 2024 (99.42). An exception was observed in 2018, when an increase in this parameter was recorded (120.23), as well as in the years 2023 and 2024. This can be interpreted as meaning that Poland is a transit country for goods. Transport is an important sector of the national economy.

3. Conclusion

The J_{road} indicator proposed in this paper represents a novel alternative to assessing the efficiency and intensity of using transport infrastructure in freight transport in the European Union. The above-mentioned calculations were based

on publicly available Eurostat statistical data using the R software environment[185]. Will this type of statistical data interpretation be accepted? This will depend on its usefulness in data analysis.

4. Literature:

1 Arnold S.F.: The theory of lineal models and multivariate analysis. Wiley, New York, 1981.
2 Bailey N.T.J.: Statistical Methods in Biology. The English Universities Press Ltd, London, 1959.
3 Bendat J. S., Piersol A. G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych.* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
4 Biecek P.: Przewodnik po pakiecie R. Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2017.
5 Biecek P.: Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
6 Crawley M.: The R Bock. Press Wiley-Blackwell, 2012.
7 Everitt B., Hothorn T.: A Handbook of Statistical Analyses Using R. Chapman&Hall/CRC Computer Science & Data Analysis. 2010.
8 Gągolewski M.: *Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje.* Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
9 Gillespie C., Lovelace R.: *Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu.* APN Promise, Warszawa 2018.
10 Koronacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.
11 Krzysztofiak M., Urbanek D.: *Metody statystyczne*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
12 Krzyśko M: *Statystyka matematyczna*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1996.

[185] Everitt B., Hothorn T.: A Handbook of Statistical Analyses Using R. Chapman&Hall/CRC Computer Science & Data Analysis. 2010.
Gągolewski M.: Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
Gillespie C., Lovelace R.: Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu. APN Promise, Warszawa 2018.
Koronacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.
Krzysztofiak M., Urbanek D.: Metody statystyczne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
Krzyśko M: Statystyka matematyczna. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1996.
Luszniewicz A.: Statystyka ogólna. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1987.
Morrison D. F.: Wielowymiarowa analiza statystyczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
Żakowski W., Kołodziej W.: Matematyka cz. II. Analiza matematyczna. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.

13 Luszniewicz A.: *Statystyka ogólna*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1987.
14 Morrison D. F.: *Wielowymiarowa analiza statystyczna.* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
15 Żakowski W., Kołodziej W.: *Matematyka cz. II. Analiza matematyczna*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.

dr Rafał Czupryn

Zespół Szkół Ekonomicznych w Radomiu

Wielka nauka jako źródło innowacji pedagogicznej. Programy nauczycielskie CERN w perspektywie transferu wiedzy do szkoły

Słowa kluczowe: innowacja pedagogiczna, doskonalenie nauczycieli, CERN, infrastruktura badawcza, kapitał ludzki

Streszczenie

Przesłanką opracowania jest narastający rozziew między tempem rozwoju fizyki wysokich energii a obrazem materii utrwalonym w szkolnych programach nauczania, w których fizyka cząstek pozostaje wątkiem marginalnym lub fakultatywnym. Celem artykułu jest identyfikacja mechanizmów, za których pośrednictwem udział nauczycieli w programach doskonalenia prowadzonych w wielkich infrastrukturach badawczych na przykładzie Polish Teacher Programme 2026 w CERN - przekłada się na innowacje pedagogiczne w szkole oraz na budowę kapitału ludzkiego. Opracowanie ma charakter przeglądowy: zastosowano narracyjny przegląd literatury z zakresu badań nad doskonaleniem zawodowym nauczycieli, dydaktyki fizyki cząstek i ekonomii infrastruktur badawczych oraz analizę dokumentacji programu (program ramowy, regulamin naboru, sprawozdania z wdrożeń). Z przeprowadzonej analizy wynika, że struktura programu odpowiada cechom skutecznego doskonalenia zawodowego opisanym w literaturze, a transfer wiedzy do szkoły dokonuje się przede wszystkim w postaci innowacji metodycznych i organizacyjnych, których nośnikiem jest projekt edukacyjny realizowany przez uczestnika po powrocie. W ujęciu ekonomicznym programy nauczycielskie stanowią przedłużenie kanału kapitału ludzkiego, uznawanego za największą składową korzyści społecznych generowanych przez Wielki Zderzacz Hadronów. W konkluzji wskazano na potrzebę systemowego wsparcia wdrożeń oraz badań efektów programu wśród polskich nauczycieli i uczniów.

1. Wstęp

Odległość dzieląca podziemny tunel Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC) od szkolnej pracowni fizycznej mierzy się nie tylko w kilometrach, lecz także w dekadach: obraz materii, jaki wynosi ze szkoły przeciętny absolwent, zatrzymuje się na ogół na poziomie jądra atomowego, podczas gdy współczesna fizyka od półwiecza posługuje się językiem kwarków, bozonów i oddziaływań fundamentalnych. Przegląd dwudziestu siedmiu programów nauczania fizyki

z całego świata wykazał, że jedynie dwanaście z nich zawiera wyodrębniony dział poświęcony fizyce cząstek, pojęcia z zakresu fizyki eksperymentalnej pojawiają się wyłącznie w programach z takim działem, a współczesne detektory cząstek nie występują w żadnym z analizowanych dokumentów; polska podstawa programowa została zaliczona do grupy piętnastu programów pozbawionych działu poświęconego fizyce cząstek[186]. Jednocześnie europejskie dokumenty strategiczne od blisko dwóch dekad wskazują, że odnowa edukacji przyrodniczej wymaga odwrócenia dominującej pedagogiki dedukcyjnej na rzecz metod opartych na dociekaniu, a kluczowymi aktorami tej zmiany pozostają nauczyciele, których należy wspierać poprzez szkolenia i sieci współpracy[187].

W tę lukę wpisuje się działalność edukacyjna Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN), która w swojej misji - obok badań podstawowych i rozwoju technologii wymienia kształcenie nowych pokoleń fizyków, inżynierów i techników oraz angażowanie wszystkich obywateli w badania i wartości nauki[188]. Programy nauczycielskie CERN, prowadzone od 1998 roku, objęły dotąd ponad piętnaście tysięcy nauczycieli ze stu dwunastu państw i terytoriów[189]. Polska, będąca państwem członkowskim organizacji od 1991 roku[190], uczestniczy w tym przedsięwzięciu za pośrednictwem Polish Teacher Programme, którego edycja z marca 2026 roku stanowi materiał ilustracyjny niniejszego opracowania.

Celem artykułu jest identyfikacja - na podstawie literatury przedmiotu i dokumentacji programu - mechanizmów, przez które doskonalenie zawodowe nauczycieli w środowisku wielkiej infrastruktury badawczej przekłada się na innowacje pedagogiczne w szkole oraz na tworzenie kapitału ludzkiego. Realizacji tego celu służą trzy pytania przeglądowe: w jakim stopniu struktura programu odpowiada cechom skutecznego doskonalenia zawodowego opisanym w literaturze; jakimi drogami dokonuje się transfer zdobytej wiedzy do praktyki szkolnej; jaki jest ekonomiczny wymiar tego transferu w perspektywie innowacyjności i konkurencyjności. Opracowanie ma charakter przeglądowy i nie zawiera badań empirycznych własnych; zastosowano narracyjny przegląd literatury oraz analizę dokumentów - programu ramowego opublikowanego

---

[186] A. Kranjc Horvat, J. Wiener, S.M. Schmeling, A. Borowski, *What Does the Curriculum Say? Review of the Particle Physics Content in 27 High-School Physics Curricula*, „Physics" 2022, 4(4), s. 1278-1298.

[187] M. Rocard, P. Csermely, D. Jorde, D. Lenzen, H. Walberg-Henriksson, V. Hemmo, *Science Education Now: A Renewed Pedagogy for the Future of Europe*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 2007, s. 2-3.

[188] CERN, *Our mission*, https://home.cern/about/who-we-are/our-mission (data dostępu: 09.09.2026).

[189] CERN & Society Foundation, *National Teacher Programmes*, https://cernandsocietyfoundation.cern/national-teacher-programmes/ (data dostępu: 09.09.2026).

[190] CERN, *Member States*, https://home.cern/about/who-we-are/member-states (data dostępu: 09.09.2026).

w systemie Indico, regulaminu naboru Ośrodka Rozwoju Edukacji oraz sprawozdań z wdrożeń. Autor uczestniczył w edycji 2026 programu, co pozwoliło na weryfikację opisu jego struktury; udział ten nie stanowi jednak źródła danych badawczych.

2. Innowacja pedagogiczna i doskonalenie nauczycieli - ramy pojęciowe

Współczesna definicja innowacji, przyjęta w czwartym wydaniu Podręcznika Oslo, określa ją jako nowy lub ulepszony produkt bądź proces (lub ich kombinację), który znacząco różni się od dotychczasowych produktów lub procesów danej jednostki i został udostępniony potencjalnym użytkownikom lub wprowadzony do użytku[191]. Przeniesienie tej definicji na grunt oświaty prowadzi do wniosku, że organizacje edukacyjne rzadziej tworzą innowacje produktowe, częściej natomiast wprowadzają innowacje procesowe: nowe metody nauczania i ich kombinacje, nowe sposoby organizowania pracy oraz nowe formy relacji z otoczeniem[192]. W polskiej tradycji pedagogicznej innowacja pedagogiczna rozumiana jest jako zmiana struktury systemu szkolnego jako całości lub struktury jego ważnych składników, podejmowana w celu wprowadzenia ulepszeń o charakterze wymiernym[193]; ujęcia nowsze podkreślają, że proces innowacyjny należy rozpatrywać jednocześnie w wymiarze jednostkowym i zbiorowym, wewnętrznym i zewnętrznym[194]. Po reformie z 2017 roku prawo oświatowe nie zawiera definicji legalnej innowacji pedagogicznej, zalicza jednak stosowanie innowacyjnych rozwiązań programowych, organizacyjnych lub metodycznych do zadań systemu oświaty, a inspirowanie nauczycieli do ich wdrażania - do istoty nadzoru pedagogicznego[195]. Analizy leksykograficzno-prawne wskazują przy tym, że innowacyjność pojawia się w tekstach prawnych sporadycznie i z reguły w odniesieniu do szkoły, a nie do nauczyciela[196].

---

[191] OECD/Eurostat, *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*, wyd. 4, OECD Publishing, Paris 2018, s. 20.
[192] S. Vincent-Lancrin, J. Urgel, S. Kar, G. Jacotin, *Measuring Innovation in Education 2019: What Has Changed in the Classroom?*, OECD Publishing, Paris 2019, s. 17.
[193] W. Okoń, *Nowy słownik pedagogiczny*, Wydawnictwo Akademickie „Żak", Warszawa 2007, hasło: innowacja pedagogiczna.
[194] B. Przyborowska, *Pedagogika innowacyjności. Między teorią a praktyką*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2013.
[195] Ustawa z dnia 14 grudnia 2016 r. - Prawo oświatowe (Dz. U. z 2026 r. poz. 820 z późn. zm.), art. 1 pkt 18, art. 55 ust. 1 pkt 4.
[196] A. Sarbiewska, D. Stępkowski, *Autonomiczność, sprawczość i innowacyjność nauczyciela we współczesnej leksykografii pedagogicznej i jurysprudencji. Analiza lingwistycznopedagogiczna*, „Kultura i Edukacja" 2024, nr 1 (143), s. 96-121.

Skoro innowacja pedagogiczna urzeczywistnia się w działaniu nauczyciela, pytanie o jej źródła jest w istocie pytaniem o skuteczne doskonalenie zawodowe. Konsensus badawczy wyróżnia pięć jego cech krytycznych: koncentrację na treści przedmiotowej, aktywne uczenie się, spójność z wiedzą i przekonaniami nauczyciela oraz z polityką oświatową, odpowiedni czas trwania oraz uczestnictwo zbiorowe[197]. Późniejsze syntezy uzupełniają ten katalog o modelowanie skutecznej praktyki, wsparcie eksperckie oraz sposobność do informacji zwrotnej i refleksji[198]. Istotny dla dalszych rozważań jest również model zmiany nauczyciela, zgodnie z którym trwała zmiana przekonań następuje dopiero wtedy, gdy nauczyciel dostrzeże efekty nowej praktyki w uczeniu się uczniów - doskonalenie musi zatem prowadzić do wdrożenia, a nie kończyć się na inspiracji[199]. Ramy te dopełniają koncepcja uczenia się sytuacyjnego, w której wiedza rodzi się z uprawnionego, początkowo peryferyjnego uczestnictwa we wspólnocie praktyki[200], oraz cykl uczenia się przez doświadczenie, prowadzący od konkretnego przeżycia przez refleksję i konceptualizację do aktywnego eksperymentowania[201]. Pobyt nauczyciela w laboratorium badawczym jest z tej perspektywy nie tyle wykładem o nauce, ile czasowym wejściem do wspólnoty, która naukę uprawia.

3. CERN jako instytucja edukacyjna: programy nauczycielskie

Kształcenie nauczycieli zajmuje w działalności CERN miejsce szczególne. Pierwszy międzynarodowy program dla nauczycieli szkół średnich (High School Teacher Programme) odbył się w 1998 roku, a obecnie każdego roku organizowanych jest około czterdziestu kursów narodowych w dwudziestu jeden językach[202]. Raport Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) poświęcony oddziaływaniu CERN na innowacje i społeczeństwo przytacza przesłankę leżącą u podstaw tej strategii - założenie, że kształcenie nauczycieli jest znacznie skuteczniejsze niż kształcenie samych uczniów - oraz odnotowuje,

---

[197] L.M. Desimone, *Improving Impact Studies of Teachers' Professional Development: Toward Better Conceptualizations and Measures*, „Educational Researcher" 2009, 38(3), s. 183.
[198] L. Darling-Hammond, M.E. Hyler, M. Gardner, *Effective Teacher Professional Development*, Learning Policy Institute, Palo Alto 2017, s. 4.
[199] T.R. Guskey, *Professional Development and Teacher Change*, „Teachers and Teaching: Theory and Practice" 2002, 8(3), s. 383.
[200] J. Lave, E. Wenger, *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*, Cambridge University Press, Cambridge 1991, s. 29.
[201] D.A. Kolb, *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, wyd. 2, Pearson Education, Upper Saddle River 2015, rozdz. 2.
[202] J. Wiener, *Inspiring the inspirers*, „CERN Courier" 3.11.2023, https://cerncourier.com/a/inspiring-the-inspirers/ (data dostępu: 09.09.2026); CERN & Society Foundation, *National Teacher Programmes*, op.cit.

że działalność edukacyjna finansowana jest z niespełna jednego procenta budżetu organizacji[203]. Symbolicznym domknięciem tej polityki stało się otwarcie w październiku 2023 roku Science Gateway - centrum edukacji i popularyzacji nauki zaprojektowanego dla pół miliona odwiedzających rocznie, w którym mieszczą się laboratoria warsztatowe wykorzystywane także w programach nauczycielskich[204].

Programom towarzyszy rozwijający się nurt badań edukacyjnych. Trójrundowe badanie delfickie z udziałem ponad stu interesariuszy z czterdziestu dwóch państw pozwoliło ustalić hierarchię celów kształcenia dla programów doskonalenia w laboratoriach fizyki cząstek; na jej szczycie znalazło się pogłębienie wiedzy nauczycieli o pojęciach i modelach naukowych oraz o programach nauczania, przy niemal identycznym rankingu we wszystkich grupach respondentów[205]. Badania prowadzone w laboratorium S'Cool LAB na próbie 509 uczniów z trzynastu państw wykazały bardzo wysoki poziom zainteresowania sytuacyjnego i obrazu własnych możliwości po półdniowych zajęciach praktycznych oraz zniwelowanie początkowej różnicy motywacyjnej między dziewczętami a chłopcami[206]. Z kolei nauczyciele przygotowani w krótkim programie doskonalenia byli w stanie samodzielnie wdrożyć i zbadać jednostkę dydaktyczną wprowadzającą kwarki już na poziomie dwunastolatków, uzyskując szeroką akceptację jej kluczowych idei[207]. Oferta rozszerzana jest także na nauczycieli edukacji wczesnoszkolnej, dla których od 2016 roku prowadzony jest kurs „Playing with Protons"[208]. Należy jednak odnotować, że - jak wskazano w 2023 roku - efekty samych programów nauczycielskich CERN nie były dotąd przedmiotem opublikowanego badania w schemacie pre-post; badanie takie, oparte na mapach pojęciowych, jest w toku[209]. Pośrednich dowodów dostarczają analizy amerykańskich programów staży badawczych dla nauczycieli

---

[203] OECD, *The Impacts of Large Research Infrastructures on Economic Innovation and on Society: Case Studies at CERN*, OECD Global Science Forum, Paris 2014, s. 58-59.

[204] CERN, *CERN inaugurates Science Gateway, its new outreach centre for science education*, 7.10.2023, https://home.cern/cern-inaugurates-science-gateway-its-new-outreach-centre-for-science-education/ (data dostępu: 09.09.2026).

[205] A. Kranjc Horvat, J. Wiener, S. Schmeling, A. Borowski, *Learning Goals of Professional Development Programs at Science Research Institutions: A Delphi Study with Different Stakeholder Groups*, „Journal of Science Teacher Education" 2022, 33(1), s. 32-54.

[206] J. Woithe, A. Müller, S. Schmeling, J. Kuhn, *Motivational outcomes of the science outreach lab S'Cool LAB at CERN: A multilevel analysis*, „Journal of Research in Science Teaching" 2022, 59(6), s. 930-968.

[207] G.J. Wiener, S.M. Schmeling, M. Hopf, *Why not start with quarks? Teachers investigate a learning unit on the subatomic structure of matter with 12-year-olds*, „European Journal of Science and Mathematics Education" 2017, 5(2), s. 140-146.

[208] A. Alexopoulos, M. Pavlidou, S. Cherouvis, *'Playing with Protons': a training course for primary school teachers at CERN*, „Physics Education" 2019, 54(1), art. 015013.

[209] J. Wiener, *Inspiring the inspirers*, op.cit.

w laboratoriach narodowych: uczniowie nauczycieli z doświadczeniem badawczym wykazywali istotnie wyższą świadomość karier w obszarze STEM (nauk ścisłych, technologii, inżynierii i matematyki), wyżej cenili uczenie się przedmiotów ścisłych i przejawiali większą wytrwałość w zadaniach, choć nie odnotowano różnic w osiągnięciach mierzonych testami[210].

4. Polish Teacher Programme 2026 - analiza struktury programu

Polskie programy nauczycielskie w CERN mają historię sięgającą 2007 roku - do 2026 roku odbyło się osiemnaście edycji[211] - a od 2025 roku ich organizacja ma charakter systemowy: Ośrodek Rozwoju Edukacji (ORE) realizuje - jako zadanie zlecone przez Ministerstwo Edukacji Narodowej i na podstawie porozumienia z CERN - koordynację wyjazdu polskich nauczycieli fizyki, pokrywając koszty przelotu, pobytu i ubezpieczenia[212]. W naborze na edycję 2026 przewidziano czterdzieści osiem miejsc: trzydzieści dwa dla nauczycieli fizyki szkół ponadpodstawowych i doradców metodycznych oraz szesnaście dla nauczycieli konsultantów z wojewódzkich placówek doskonalenia nauczycieli, po jednym z każdego województwa; celem szkolenia jest zdobycie wiedzy z zakresu fizyki i jej upowszechnienie poprzez realizację projektu edukacyjnego[213]. Organizatorzy po stronie CERN oczekują, że uczestnicy powrócą do Polski jako ambasadorzy przekazujący wiedzę kolejnemu pokoleniu fizyków, inżynierów i informatyków[214].

Program edycji 2026, zrealizowanej w dniach 22-27 marca w Genewie, łączy cztery komponenty. Komponent wykładowy obejmował trzyczęściowy cykl wprowadzenia do fizyki cząstek oraz wykłady o antymaterii, detektorach, akceleratorach, eksperymencie AMS (Alpha Magnetic Spectrometer), fizyce jądrowej XXI wieku, informatyce w CERN i zastosowaniach akceleratorów, detektorów i promieniotwórczości w medycynie - prowadzone w języku polskim przez polskich fizyków i inżynierów związanych z CERN oraz krajowymi instytutami badawczymi. Komponent wizyt studyjnych objął Centrum Sterowania

---

[210] J. Keller, S. Buxner, D. Donnelly-Hermosillo, E. Bailey, M. Citkowicz, L. Horvath, D. Moreno, M. Yisak, B. Zhu, E. Fulbeck, D. Sessoms, S. Vokos, C. Chen, M. Pardo, *Impact of Teachers With Research Experiences: Student Gains in STEM Career Awareness, Perception of Value of STEM Learning, and Persistence in STEM Course Tasks*, „Science Education" 2025, 109(3), s. 769-795.
[211] CERN, *Poland - Teacher Programmes*, https://education-programmes.web.cern.ch/poland/ (data dostępu: 09.09.2026).
[212] Ośrodek Rozwoju Edukacji, *Szkolenie w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych w Genewie*, 30.01.2026, https://ore.edu.pl/2026/01/szkolenie-w-europejskiej-organizacji-badan-jadrowych-w-genewie/ (data dostępu: 09.09.2026); CERN, *Polish Teacher Programme 2026*, https://indico.cern.ch/event/1532163/ (data dostępu: 09.09.2026).
[213] Ośrodek Rozwoju Edukacji, *Szkolenie w Europejskiej Organizacji…*, op.cit.
[214] CERN, *Polish Teacher Programme 2026*, op.cit.

CERN, halę testów magnesów SM18, synchrocyklotron, sterownię eksperymentu ATLAS, detektor CMS, akcelerator LEIR i ośrodek ISOLDE, Fabrykę Antymaterii oraz centrum danych. Komponent warsztatowy stanowiły samodzielna budowa komory mgłowej i praca z ekspozycjami Science Gateway, a komponent refleksyjno-sieciowy - sesja pytań i odpowiedzi, praca w grupach nad pytaniem, czego uczestnicy się nauczyli, co mogą przenieść do swoich uczniów i jakie działania podejmą po powrocie, sesja zamykająca „What's next?" oraz spotkania nieformalne, w tym przyjęcie w Stałym Przedstawicielstwie Rzeczypospolitej Polskiej przy Biurze Narodów Zjednoczonych w Genewie[215]. Zestawienie tych komponentów z cechami skutecznego doskonalenia zawodowego przedstawia tabela 1 (tab. 1).

Tab. 1. Komponenty Polish Teacher Programme 2026 a cechy skutecznego doskonalenia zawodowego nauczycieli

Komponent	Realizacja w programie 2026	Odpowiadająca cecha skutecznego doskonalenia
Wykłady	trzyczęściowy cykl wprowadzenia do fizyki cząstek; antymateria, detektory, akceleratory, fizyka jądrowa, zastosowania medyczne	koncentracja na treści przedmiotowej
Wizyty studyjne	Centrum Sterowania CERN, SM18, synchrocyklotron, ATLAS, CMS, LEIR/ISOLDE, Fabryka Antymaterii, centrum danych	modelowanie autentycznej praktyki badawczej; uczenie się sytuacyjne
Warsztaty	budowa komory mgłowej; ekspozycje Science Gateway	aktywne uczenie się
Refleksja i sieciowanie	sesja pytań i odpowiedzi; praca w grupach nad transferem do uczniów; sesja „What's next?"; spotkania nieformalne	informacja zwrotna i refleksja; uczestnictwo zbiorowe
Wdrożenie po powrocie	projekt edukacyjny przewidziany regulaminem ORE; udział konsultantów wojewódzkich	spójność z polityką oświatową; wsparcie eksperckie; trwałość

Źródło: oprac. własne na podst.: CERN, *Polish Teacher Programme 2026*, op.cit.; Ośrodek Rozwoju Edukacji, *Szkolenie w Europejskiej Organizacji…*, op.cit.; L.M. Desimone, *Improving Impact Studies…*, op.cit., s. 183; L. Darling-Hammond, M.E. Hyler, M. Gardner, *Effective Teacher…*, op.cit., s. 4.

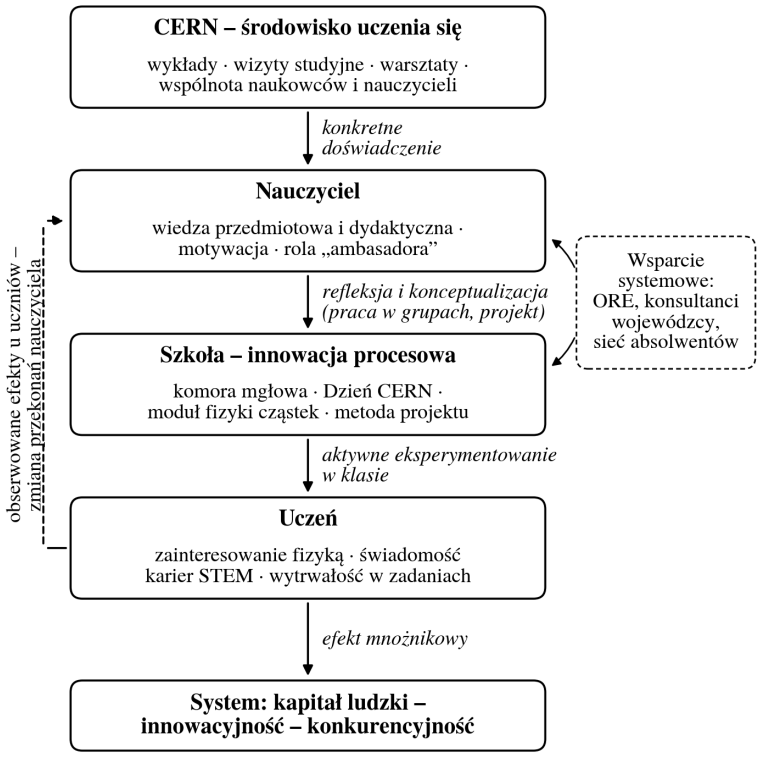
Analiza ujawnia wysoką zgodność struktury programu z katalogiem cech skutecznego doskonalenia. Cechą spełnioną jedynie częściowo jest czas trwania: sześć dni intensywnego pobytu odpowiada raczej modelowi zanurzenia niż długotrwałego, rozłożonego w czasie wsparcia. Lukę tę wypełniają dwa rozwiązania systemowe - projekt edukacyjny, który przenosi ciężar uczenia się na okres po powrocie, oraz włączenie do grupy konsultantów wojewódzkich,

[215] Ibidem.

tworzące potencjalny mechanizm mnożnikowy w regionalnych sieciach doskonalenia. W kategoriach uczenia się sytuacyjnego uczestnik przechodzi w ciągu tygodnia drogę od peryferyjnego obserwatora do rozmówcy naukowców w ich własnej sterowni - i właśnie ta zmiana pozycji, a nie sama suma wysłuchanych wykładów, wydaje się najsilniejszym bodźcem dla późniejszej innowacji.

5. Transfer do praktyki szkolnej jako innowacja dydaktyczna

Droga od doświadczenia zdobytego w laboratorium do zmiany w klasie szkolnej przebiega w modelu przedstawionym na rysunku 1 (rys. 1). Pobyt w CERN dostarcza konkretnego przeżycia, sesja grupowa i projekt - refleksji i konceptualizacji, a wdrożenie w szkole - aktywnego eksperymentowania; zamknięcie cyklu następuje wówczas, gdy nauczyciel obserwuje reakcję uczniów, co zgodnie z modelem zmiany nauczyciela utrwala nowe przekonania dydaktyczne.



Rys. 1. Model transferu wiedzy z infrastruktury badawczej do szkoły
Źródło: oprac. własne na podst.: T.R. Guskey, *Professional Development…*, op.cit., s. 383; D.A. Kolb, *Experiential Learning…*, op.cit.; J. Lave, E. Wenger, *Situated Learning…*, op.cit.

Sprawozdania z wdrożeń po edycji 2025 wskazują między innymi na trzy formy transferu: budowę komór mgłowych w szkołach, organizację szkolnych festiwali nauki pod nazwą „Dzień CERN" oraz opracowanie modułu dydaktycznego poświęconego fizyce cząstek elementarnych[216]. W rozumieniu Podręcznika Oslo są to innowacje procesowe na poziomie szkoły - nowe metody i formy organizacyjne wprowadzone do użytku - a w kategoriach prawa oświatowego innowacyjne rozwiązania metodyczne i organizacyjne, których stosowanie ustawa zalicza do zadań systemu oświaty. Komora mgłowa zasługuje na szczególną uwagę: prosty przyrząd, w którym ślady cząstek promieniowania kosmicznego i tła naturalnego stają się widoczne gołym okiem, przekształca abstrakcyjne zapisy o promieniowaniu jonizującym w bezpośrednie doświadczenie. Badania nad pokazami z użyciem komory mgłowej wykazały, że pomagają one uczestnikom - w tym przyszłym nauczycielom - uchwycić powszechność promieniowania tła i jego względną nieszkodliwość[217], co odpowiada wprost wymaganiu podstawy programowej dotyczącemu wpływu promieniowania jonizującego na organizmy żywe.

Relacja z podstawą programową wyznacza zarazem granice transferu. Fizyka jądrowa stanowi ostatni dział kształcenia w zakresie podstawowym, a jedyne wymaganie odnoszące się do cząstek i antycząstek - opis kreacji i anihilacji par - należy do zakresu rozszerzonego i od roku szkolnego 2024/2025 ma charakter fakultatywny, nieobjęty egzaminem maturalnym[218]. Fizyka cząstek pozostaje więc w polskiej szkole przestrzenią otwartą, którą wypełnić może jedynie inicjatywa nauczyciela - i to właśnie ta okoliczność czyni programy nauczycielskie CERN źródłem innowacji, a nie jedynie uzupełnieniem kwalifikacji. Barierami pozostają presja egzaminacyjna, ograniczony wymiar godzin i brak wyposażenia; ich przezwyciężaniu sprzyja postulowany w dokumentach europejskich model otwartej szkoły, oparty na partnerstwach nauczycieli, uczniów i badaczy wokół rzeczywistych wyzwań naukowych[219].

---

[216] Ośrodek Rozwoju Edukacji, *Sprawozdanie z działalności uczestników szkolenia w CERN*, 2025, https://ore.edu.pl/2025/06/sprawozdanie-z-dzialalnosci-uczestnikow-szkolenia-w-cern/ (data dostępu: 09.09.2026).

[217] S. Manninen, A. Lehtinen, M. Laitinen, *The impact of a cloud chamber demonstration on lay people's conceptions of ionizing radiation*, „Physics Education" 2025, 60(3), art. 035023.

[218] Rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej z dnia 30 stycznia 2018 r. w sprawie podstawy programowej kształcenia ogólnego dla liceum ogólnokształcącego, technikum oraz branżowej szkoły II stopnia (Dz. U. poz. 467 z późn. zm.), załącznik nr 1, fizyka, działy XI i XII, w brzmieniu nadanym rozporządzeniem z dnia 28 czerwca 2024 r. (Dz. U. poz. 1019).

[219] E. Hazelkorn, C. Ryan, Y. Beernaert, C.P. Constantinou, L. Deca, M. Grangeat, M. Karikorpi, A. Lazoudis, R. Pintó Casulleras, M. Welzel-Breuer, *Science Education for Responsible Citizenship*, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2015, s. 10.

6. Wymiar innowacyjności i konkurencyjności: infrastruktura badawcza a kapitał ludzki

Wielkie infrastruktury badawcze bywają oceniane wyłącznie przez pryzmat odkryć; rachunek korzyści społecznych jest jednak znacznie szerszy. Model analizy kosztów i korzyści opracowany dla tego typu przedsięwzięć wyróżnia sześć kategorii korzyści: efekty technologiczne dla dostawców, kształtowanie kapitału ludzkiego, publikacje naukowe, efekty kulturowe, usługi dla podmiotów trzecich oraz wartość odkrycia jako dobra publicznego[220]. Zastosowanie tego modelu do Wielkiego Zderzacza Hadronów w horyzoncie lat 1993-2025 przyniosło oszacowanie, zgodnie z którym korzyści z kształcenia około 36,8 tysiąca młodych badaczy - studentów, doktorantów i stażystów podoktorskich - zwracają 41 procent całkowitego kosztu społecznego przedsięwzięcia i stanowią największą pojedynczą pozycję po stronie korzyści, a prawdopodobieństwo, że łączne korzyści przewyższą koszty, wynosi około 90 procent[221]. Podstawą tych szacunków była premia płacowa, jaką byli studenci i doktoranci eksperymentów LHC przypisują swojemu doświadczeniu, oceniana na 5-12 procent[222]. Równolegle wykazano, że przedsiębiorstwa realizujące zamówienia technologiczne dla LHC zwiększały nakłady na badania i rozwój, aktywność patentową i produktywność pracy[223] - co dla Polski, wnoszącej składkę członkowską od 1991 roku, oznacza, że zwrot z uczestnictwa w organizacji ma charakter zarówno przemysłowy, jak i edukacyjny.

Programy nauczycielskie stanowią przedłużenie kanału kapitału ludzkiego poza mury laboratorium. Ich logika ekonomiczna opiera się na efekcie mnożnikowym: nauczyciel, który w ciągu jednej kariery zawodowej kształci setki uczniów, przenosi impuls poznawczy na skalę, jakiej żaden program adresowany bezpośrednio do uczniów nie osiągnąłby przy porównywalnym koszcie - i właśnie tę zależność OECD wskazuje jako uzasadnienie strategii CERN[224]. Skoro wyniki badań łączą doświadczenie badawcze nauczyciela z wyższą świadomością karier

---

[220] M. Florio, E. Sirtori, *Social benefits and costs of large scale research infrastructures*, „Technological Forecasting and Social Change" 2016, 112, s. 65-78.
[221] M. Florio, S. Forte, E. Sirtori, *Forecasting the socio-economic impact of the Large Hadron Collider: A cost-benefit analysis to 2025 and beyond*, „Technological Forecasting and Social Change" 2016, 112, s. 38-53.
[222] T. Camporesi, G. Catalano, M. Florio, F. Giffoni, *Experiential learning in high energy physics: a survey of students at the LHC*, „European Journal of Physics" 2017, 38(2), art. 025703.
[223] P. Castelnovo, M. Florio, S. Forte, L. Rossi, E. Sirtori, *The economic impact of technological procurement for large-scale research infrastructures: Evidence from the Large Hadron Collider at CERN*, „Research Policy" 2018, 47(9), s. 1853-1867.
[224] OECD, *The Impacts of Large Research Infrastructures…*, op.cit., s. 58.

STEM u jego uczniów[225], a spadek zainteresowania młodzieży naukami ścisłymi uznawany jest za zagrożenie dla zdolności innowacyjnej Europy[226], to inwestycja w programy nauczycielskie jawi się jako jedno z tańszych ogniw łańcucha łączącego naukę podstawową z innowacyjnością gospodarki.

7. Wnioski

Przeprowadzony przegląd pozwala na sformułowanie następujących wniosków. Po pierwsze, struktura Polish Teacher Programme 2026 wykazuje wysoką zgodność z cechami skutecznego doskonalenia zawodowego - koncentracją na treści, aktywnym uczeniem się, modelowaniem autentycznej praktyki, refleksją i uczestnictwem zbiorowym - przy częściowym spełnieniu kryterium trwałości, kompensowanym przez projekt wdrożeniowy i udział konsultantów wojewódzkich. Po drugie, transfer wiedzy do szkoły dokonuje się w postaci innowacji procesowych - komór mgłowych, szkolnych festiwali nauki i modułów fizyki cząstek - które wypełniają przestrzeń pozostawioną przez podstawę programową traktującą fizykę cząstek jako treść fakultatywną. Po trzecie, w ujęciu ekonomicznym programy nauczycielskie stanowią niskokosztowe przedłużenie kanału kapitału ludzkiego, uznawanego za największą składową korzyści społecznych generowanych przez LHC, i wzmacniają zwrot z członkostwa Polski w CERN.

Z przeglądu wynikają również rekomendacje. Utrwaleniu efektów służyłoby zbudowanie krajowej sieci absolwentów programu wspieranej przez wojewódzkie placówki doskonalenia, włączenie eksperymentalnej fizyki cząstek do podstawy programowej w wymiarze wykraczającym poza wymagania fakultatywne oraz podjęcie badań efektów programu w Polsce w schemacie pre-post, obejmujących zarówno wiedzę i przekonania nauczycieli, jak i zainteresowania oraz aspiracje ich uczniów. Ograniczeniem niniejszego opracowania jest jego przeglądowy charakter oraz oparcie analizy na jednej edycji programu; wskazane kierunki badań pozwoliłyby zweryfikować, czy obraz zarysowany na podstawie literatury zagranicznej znajduje potwierdzenie w warunkach polskiej szkoły.

---

[225] J. Keller, S. Buxner, D. Donnelly-Hermosillo, E. Bailey, M. Citkowicz, L. Horvath, D. Moreno, M. Yisak, B. Zhu, E. Fulbeck, D. Sessoms, S. Vokos, C. Chen, M. Pardo, *Impact of Teachers…*, op.cit., s. 769-795.

[226] M. Rocard, P. Csermely, D. Jorde, D. Lenzen, H. Walberg-Henriksson, V. Hemmo, *Science Education Now…*, op.cit., s. 2.

8. Bibliografia

1 Alexopoulos A., Pavlidou M., Cherouvis S., *'Playing with Protons': a training course for primary school teachers at CERN*, Physics Education, 54(1), 2019, art. 015013.
2 Camporesi T., Catalano G., Florio M., Giffoni F., *Experiential learning in high energy physics: a survey of students at the LHC*, European Journal of Physics, 38(2), 2017, art. 025703.
3 Castelnovo P., Florio M., Forte S., Rossi L., Sirtori E., *The economic impact of technological procurement for large-scale research infrastructures: Evidence from the Large Hadron Collider at CERN*, Research Policy, 47(9), 2018, s. 1853-1867.
4 CERN, *CERN inaugurates Science Gateway, its new outreach centre for science education*, 7.10.2023, https://home.cern/cern-inaugurates-science-gateway-its-new-outreach-centre-for-science-education/ (data dostępu: 09.09.2026).
5 CERN, *Member States*, https://home.cern/about/who-we-are/member-states (data dostępu: 09.09.2026).
6 CERN, *Our mission*, https://home.cern/about/who-we-are/our-mission (data dostępu: 09.09.2026).
7 CERN, *Poland - Teacher Programmes*, https://education-programmes.web.cern.ch/poland/ (data dostępu: 09.09.2026).
8 CERN, *Polish Teacher Programme 2026*, https://indico.cern.ch/event/1532163/ (data dostępu: 09.09.2026).
9 CERN & Society Foundation, *National Teacher Programmes*, https://cernandsocietyfoundation.cern/national-teacher-programmes/ (data dostępu: 09.09.2026).
10 Darling-Hammond L., Hyler M.E., Gardner M., *Effective Teacher Professional Development*, Learning Policy Institute, Palo Alto 2017.
11 Desimone L.M., *Improving Impact Studies of Teachers' Professional Development: Toward Better Conceptualizations and Measures*, Educational Researcher, 38(3), 2009, s. 181-199.
12 Florio M., Forte S., Sirtori E., *Forecasting the socio-economic impact of the Large Hadron Collider: A cost-benefit analysis to 2025 and beyond*, Technological Forecasting and Social Change, 112, 2016, s. 38-53.
13 Florio M., Sirtori E., *Social benefits and costs of large scale research infrastructures*, Technological Forecasting and Social Change, 112, 2016, s. 65-78.
14 Guskey T.R., *Professional Development and Teacher Change*, Teachers and Teaching: Theory and Practice, 8(3), 2002, s. 381-391.
15 Hazelkorn E., Ryan C., Beernaert Y., Constantinou C.P., Deca L., Grangeat M., Karikorpi M., Lazoudis A., Pintó Casulleras R., Welzel-Breuer M., *Science Education for Responsible Citizenship*, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2015.
16 Keller J., Buxner S., Donnelly-Hermosillo D., Bailey E., Citkowicz M., Horvath L., Moreno D., Yisak M., Zhu B., Fulbeck E., Sessoms D., Vokos S., Chen C., Pardo M., *Impact of Teachers With Research Experiences: Student Gains in STEM Career Awareness, Perception of Value of STEM Learning, and Persistence in STEM Course Tasks*, Science Education, 109(3), 2025, s. 769-795.
17 Kolb D.A., *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, wyd. 2, Pearson Education, Upper Saddle River 2015.

18 Kranjc Horvat A., Wiener J., Schmeling S., Borowski A., *Learning Goals of Professional Development Programs at Science Research Institutions: A Delphi Study with Different Stakeholder Groups*, Journal of Science Teacher Education, 33(1), 2022, s. 32-54.
19 Kranjc Horvat A., Wiener J., Schmeling S.M., Borowski A., *What Does the Curriculum Say? Review of the Particle Physics Content in 27 High-School Physics Curricula*, Physics, 4(4), 2022, s. 1278-1298.
20 Lave J., Wenger E., *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*, Cambridge University Press, Cambridge 1991.
21 Manninen S., Lehtinen A., Laitinen M., *The impact of a cloud chamber demonstration on lay people's conceptions of ionizing radiation*, Physics Education, 60(3), 2025, art. 035023.
22 OECD, *The Impacts of Large Research Infrastructures on Economic Innovation and on Society: Case Studies at CERN*, OECD Global Science Forum, Paris 2014.
23 OECD/Eurostat, *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*, wyd. 4, OECD Publishing, Paris 2018.
24 Okoń W., *Nowy słownik pedagogiczny*, Wydawnictwo Akademickie „Żak", Warszawa 2007.
25 Ośrodek Rozwoju Edukacji, *Sprawozdanie z działalności uczestników szkolenia w CERN*, 2025, https://ore.edu.pl/2025/06/sprawozdanie-z-dzialalnosci-uczestnikow-szkolenia-w-cern/ (data dostępu: 09.09.2026).
26 Ośrodek Rozwoju Edukacji, *Szkolenie w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych w Genewie*, 30.01.2026, https://ore.edu.pl/2026/01/szkolenie-w-europejskiej-organizacji-badan-jadrowych-w-genewie/ (data dostępu: 09.09.2026).
27 Przyborowska B., *Pedagogika innowacyjności. Między teorią a praktyką*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2013.
28 Rocard M., Csermely P., Jorde D., Lenzen D., Walberg-Henriksson H., Hemmo V., *Science Education Now: A Renewed Pedagogy for the Future of Europe*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 2007.
29 Rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej z dnia 30 stycznia 2018 r. w sprawie podstawy programowej kształcenia ogólnego dla liceum ogólnokształcącego, technikum oraz branżowej szkoły II stopnia (Dz. U. poz. 467 z późn. zm.).
30 Sarbiewska A., Stępkowski D., *Autonomiczność, sprawczość i innowacyjność nauczyciela we współczesnej leksykografii pedagogicznej i jurysprudencji. Analiza lingwistycznopedagogiczna*, Kultura i Edukacja, nr 1 (143), 2024, s. 96-121.
31 Ustawa z dnia 14 grudnia 2016 r. - Prawo oświatowe (Dz. U. z 2026 r. poz. 820 z późn. zm.).
32 Vincent-Lancrin S., Urgel J., Kar S., Jacotin G., *Measuring Innovation in Education 2019: What Has Changed in the Classroom?*, OECD Publishing, Paris 2019.
33 Wiener G.J., Schmeling S.M., Hopf M., *Why not start with quarks? Teachers investigate a learning unit on the subatomic structure of matter with 12-year-olds*, European Journal of Science and Mathematics Education, 5(2), 2017, s. 134-157.
34 Wiener J., *Inspiring the inspirers*, CERN Courier, 3.11.2023, https://cerncourier.com/a/inspiring-the-inspirers/ (data dostępu: 09.09.2026).
Woithe J., Müller A., Schmeling S., Kuhn J., *Motivational outcomes of the science outreach lab S'Cool LAB at CERN: A multilevel analysis*, Journal of Research in Science Teaching, 59(6), 2022, s. 930-968.