

INTEGRACJA TRANSPORTU I SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W ZARZĄDZANIU ŁAŃCUCHEM DOSTAW

Pod redakcją Sławomira Skiby



Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Zarządzania i Nauk o Jakości
Koło Naukowe Transportu i Logistyki TRANSLOG



INTEGRACJA TRANSPORTU I SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W ZARZĄDZANIU ŁAŃCUCHEM DOSTAW

REDAKTOR NAUKOWY: dr SŁAWOMIR SKIBA

KOMITET ORGANIZACYJNY: JULIA LINDSTEDT–CICHOSZ – KNTiL TRANSLOG

RECENZENCI:

dr JĘDRZEJ CHARŁAMPOWICZ – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr KAROLINA GWARDA – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr inż. ADAM KAIZER – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr MAGDALENA KLOPOTT – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr ROBERT MAREK – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr JOANNA MIKLIŃSKA – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr SŁAWOMIR SKIBA – Uniwersytet Morski w Gdyni

mgr inż. ADRIANNA KARAŚ – Uniwersytet Morski w Gdyni

mgr inż. MICHAŁ KUZIA – Uniwersytet Morski w Gdyni

WYDAWCA:



UNIWERSYTET MORSKI W GDYNI

ul. Morska 81-87

81-225 Gdynia

www.umg.edu.pl

ISBN 978-83-67428-73-6

REDAKCJA I KOREKTA: AGNIESZKA FRANKIEWICZ

SKŁAD I ŁAMANIE: ELŻBIETA STRZELECKA

PROJEKT OKŁADKI: ŁUKASZ NOWICKI

Za stronę merytoryczną, w tym poprawność i oryginalność treści, odpowiadają wyłącznie Autorzy. Redakcja nie dokonuje ingerencji w tym zakresie.

SPIS TREŚCI

JAKUB BROŻEK, JAN ADAMASZEK

Intermodalność 5.0: kiedy morze i tory wchodzą na wyższy level	5
--	---

TOMASZ BUŁA, JOANNA STASZKIEWICZ

Źródła energii w logistyce i transporcie – magazyny energii i zielona infrastruktura transportu drogowego i logistyki miejskiej.....	17
--	----

PAWEŁ CZWARNOWSKI, MATEUSZ DUDA

Sztuczna inteligencja w Logistyce 5.0 – wsparcie człowieka czy zastąpienie?	26
---	----

NATALIA KARALUS, AGATA HRABELSKA

Nowoczesne technologie śledzenia przesyłek – od RFID do systemów predykcyjnych.....	36
---	----

MACIEJ KWAŚNY, KONRAD CZYŻ

Współpraca robotów z ludźmi w magazynach przyszłości	46
--	----

VLADISLAV LIASHUK

Wykorzystanie instrumentów informatycznych do analizy elementów ekonomicznych wyboru dróg transportu lądowego towarów	58
---	----

ROKSANA MAKOWSKA, AMELIA KUNKEL

Internet rzeczy w logistyce: klucz do transformacji z Przemysłu 4.0 na Przemysł 5.0.....	69
--	----

DOMINIKA PRUSKA, JAKUB FLORCZYKIEWICZ

Kolej czy lotnictwo – międzygałęziowa współpraca czy konkurencja?... ..	81
---	----

MAGDALENA SIKORA WERONIKA NADOLNA

Wpływ sztucznej inteligencji na optymalizację łańcucha dostaw i gospodarkę magazynową.....	92
--	----

KACPER TESSMER

Sztuczna inteligencja w predykcji popytu i optymalizacji tras logistycznych	102
---	-----

Jakub Brożek, Jan Adamaszek

Politechnika Morska w Szczecinie, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

INTERMODALNOŚĆ 5.0: KIEDY MORZE I TORY WCHODZĄ NA WYŻSZY LEVEL

Wraz z dynamicznym rozwojem technologii i ciągłym dążeniem do optymalizacji procesów transportowych intermodalność zaczyna odgrywać coraz ważniejszą rolę w nowoczesnych systemach przewozu ładunków. Zagadnienie Intermodalności 5.0 wpisuje się w szerszą dziedzinę Przemysłu 5.0, który ma na celu automatyzację i cyfryzację obecnie stosowanych metod. Niniejszy artykuł analizuje wybrane zagadnienia związane z Portami morskimi 4.0 oraz Koleją 4.0, a ponadto opisuje badanie ankietowe przeprowadzone wśród studentów kierunków transportowych i logistycznych z całej Polski. Celem badania było zebranie opinii na temat obecnej i przyszłej współpracy między portami morskimi a koleją w kontekście rozwoju intermodalności w Polsce.

Słowa kluczowe: intermodalność, cyfryzacja transportu, Kolej 4.0, Porty morskie 4.0, Przemysł 5.0, automatyzacja transportu, badania ankietowe, zintegrowane systemy transportowe.

WSTĘP

W dobie dynamicznego rozwoju technologii oraz zachodzących przemian w gospodarce i transporcie coraz częściej mówi się o nadchodzącej erze Przemysłu 5.0. Nowe podejście zakłada nie tylko dalszą automatyzację i cyfryzację procesów, ale również ich integrację z potrzebami człowieka oraz dbałością o zrównoważony rozwój. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wybranych zagadnień wpisujących się w ten trend, ze szczególnym uwzględnieniem koncepcji Portów morskich 4.0 oraz Kolei 4.0. Na tej podstawie zaproponowano pojęcie Intermodalności 5.0, nowego poziomu integracji systemów transportowych, który opiera się na współpracy transportu morskiego i kolejowego w kontekście przewozów towarowych.

Opracowanie podejmuje również aspekt społeczny, prezentując opinie studentów kierunków transportowych, spedycyjnych i logistycznych z uczelni w całej Polsce. To właśnie oni jako przyszli pracownicy sektora TSL, będą wkraczać na rynek pracy w czasie trwającej rewolucji przemysłowej, uczestnicząc bezpośrednio w transformacji transportu intermodalnego.

1. GLOBALNE TRENDY W PORTACH MORSKICH: CYFRYZACJA, AUTOMATYZACJA I ZIELONE PORTY

1.1. Automatyzacja procesów portowych

Automatyzacja w portach morskich obejmuje wdrażanie pojazdów autonomicznych, zrobotyzowanych systemów przeładunkowych oraz zaawansowanych systemów zarządzania ruchem, co prowadzi do zwiększenia efektywności operacyjnej i poprawy bezpieczeństwa pracy.

Port Felixstowe jest pionierem, jeśli chodzi o automatyzację. W 2023 roku port ten rozpoczął wdrażanie autonomicznych elektrycznych ciężarówek sterowanych za pomocą sztucznej inteligencji (AI – *Artificial Intelligence*). Pojazdy te znane są jako Q-trucks i są wykorzystywane w operacjach terminalowych, co pozwala na zwiększenie efektywności i redukcję emisji CO₂. Q-trucks to nowoczesne, elektryczne i – co najważniejsze – autonomiczne ciężarówki zaprojektowane przez chińską firmę Shanghai Westwell Technology. Główne cele ich użytkowania to zwiększenie liczby operacji logistycznych oraz redukcja emisji w portach morskich. W 2023 roku firma Hutchison Ports podpisała umowę z Shanghai Westwell Technology na dostawę stu Q-Trucks. Felixstowe tym samym stał się pierwszym portem w Europie, który wprowadził autonomiczne ciężarówki do codziennych operacji [17]. Port w Barcelonie również inwestuje w automatyzację, dążąc do przekształcenia się w inteligentny port. Testuje system COMPASS+, który wykorzystuje technologie takie jak AI, *Big Data* oraz Internet rzeczy (IoT – *Internet of Things*) do optymalizacji procesów logistycznych i zwiększenia efektywności operacyjnej. Implementacja tych technologii pozwala na lepsze zarządzanie ruchem statków, pojazdów i ładunków, co przekłada się na skrócenie czasu obsługi oraz redukcję kosztów.

2. NOWOCZESNE TECHNOLOGIE WSPIERAJĄCE FUNKCJONOWANIE PORTÓW MORSKICH

Współczesne porty funkcjonują w dynamicznym, wielowarstwowym ekosystemie, w którym technologia staje się nie tylko wsparciem, ale i fundamentem operacyjnym. W dobie czwartej rewolucji przemysłowej rozwój inteligentnych rozwiązań portowych opiera się na integracji systemów cyfrowych, automatyzacji procesów logistycznych oraz analizie danych czasu rzeczywistego. W dalszej części artykułu omówiono najważniejsze obszary technologiczne, które definiują współczesną koncepcję Portu 5.0.

2.1. Systemy cyfrowej integracji i wymiany danych

Port Community System (PCS) to kręgosłup cyfrowego portu, bez niego niemożliwe jest wprowadzanie dalszych technologii, jak AI czy *blockchain*. System

ten stanowi cyfrową platformę wspierającą wymianę informacji między różnymi interesariuszami ekosystemu portowego: terminalami, przewoźnikami, agentami celnymi, logistyką wewnętrzną, administracją i klientami. Główną funkcją PCS jest zintegrowanie wielu rozproszonych systemów operacyjnych w jedną platformę, umożliwiającą szybką, bezpieczną i zgodną ze standardami komunikację [18]. Cyfrowe bliźniaki (*digital twins*) to wirtualne modele fizycznych obiektów, procesów i systemów, które są aktualizowane w czasie rzeczywistym dzięki integracji z sieciami czujników (IoT) i danymi operacyjnymi. Ich zastosowanie przynosi korzyści w zakresie planowania długoterminowego, predykcyjnego utrzymania ruchu, lepszego wykorzystania zasobów oraz ograniczenia opóźnień. Umożliwiają one prowadzenie symulacji, testowanie scenariuszy, przewidywanie zakłóceń, a także optymalizację działań bez konieczności ingerencji w realną infrastrukturę. Port to środowisko, w którym dane muszą być przetwarzane natychmiast [14]. Tradycyjna infrastruktura IT jest zbyt wolna, dlatego coraz większą rolę odgrywają architektura *edge computing*, lokalnego przetwarzania danych na „obrzeżach” sieci, oraz sieci 5G, które umożliwiają natychmiastową, stabilną transmisję danych [6].

2.2. Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe

Sztuczna inteligencja w środowisku portowym pełni funkcję inteligentnego „menedżera procesów”. Uczy się na podstawie ogromnych zbiorów danych (*Big Data*), rozpoznaje wzorce i podejmuje autonomiczne decyzje optymalizacyjne. AI nie tylko wspiera decyzje ludzi, lecz w niektórych przypadkach podejmuje je całkowicie samodzielnie, szczególnie w automatycznych terminalach kontenerowych. Internet rzeczy w porcie to sieć połączonych inteligentnych urządzeń i sensorów, które monitorują warunki środowiskowe, pozycję ładunków, stan techniczny maszyn, zużycie energii czy poziomy emisji. Dzięki temu istnieje możliwość automatycznej reakcji systemu na zmienne warunki oraz optymalizacji operacji w czasie rzeczywistym. IoT to podstawa dla bardziej zaawansowanych technologii, takich jak *Big Data Analytics* i AI [14]. *Blockchain* stanowi odpowiedź na potrzebę zaufania i transparentności w złożonym, wielopodmiotowym ekosystemie portowym. Technologia ta pozwala tworzyć nienaruszalne rejestry zdarzeń (*immutable ledgers*), co czyni ją idealnym narzędziem do zarządzania dokumentacją łańcucha dostaw, odpraw celnych czy te rejestracji kontenerów. Ostatnim, lecz fundamentalnym elementem technologicznym są automatyczne systemy fizyczne: zrobotyzowane dźwigi (ASC, RMG), autonomiczne pojazdy (AGV), automatyczne bramy (*gate automation*), systemy rozpoznawania tablic (OCR/ANPR) [18].

Współczesna automatyzacja oznacza:

- minimalizację interakcji człowieka w operacjach przeładunkowych;
- pełną synchronizację działań między sprzętem a systemem zarządzania;

- możliwość pracy w trybie 24/7 bez przestojów i błędów operacyjnych;
- znaczące ograniczenie kosztów personalnych i operacyjnych.

3. POLSKIE PORTY W KONTEKŚCIE INTERMODALNOŚCI 5.0

Rozwój intermodalności w polskich portach morskich znajduje się obecnie na etapie przejściowym między tradycyjnym modelem obsługi transportu a wdrażaniem koncepcji Intermodalności 5.0. Choć infrastruktura portowa i kolejowa w Polsce ulega modernizacji, a niektóre terminale podejmują próby cyfrowej integracji procesów, pełna współpraca między transportem morskim i kolejowym nadal pozostaje wyzwaniem. W terminalu Baltic Hub w Gdańsku funkcjonuje zaawansowany system operacyjny Navis N4, który zarządza ruchem kontenerów, ich rozmieszczeniem na placach składowych oraz obsługą bram wjazdowych [5]. Brakuje jednak synchronizacji tego systemu z kolejowymi rozkładami jazdy i harmonogramami dostaw. Informacje o składach kolejowych przekazywane są ręcznie, bez standaryzacji i integracji z planowaniem terminalowym [13]. Natomiast w porcie w Gdyni powstaje nowy terminal intermodalny, który ma docelowo umożliwić bezpośredni załadunek i rozładunek kontenerów z pociągów na place składowe i odwrotnie. Budowana infrastruktura obejmuje m.in. dwa tory ładunkowe o długości 750 metrów oraz place manewrowe. Jednak i tu nie wdrożono jeszcze systemu dynamicznego przydzielania torów czy zautomatyzowanego zarządzania harmonogramem przewozów [11].

W Polsce brakuje ogólnokrajowego systemu PCS, który w innych państwach Unii Europejskiej (np. Portbase w Holandii, Dakosy w Niemczech) integruje porty, koleje, przewoźników i administrację celną. W naszym kraju każdy port i terminal działają w swoim własnym środowisku IT, co znacznie utrudnia i ogranicza możliwość płynnego przepływu informacji w łańcuchu logistycznym.

4. AUTOMATYZACJA STEROWANIE RUCHEM KOLEJOWYM

4.1. Stopnie automatyzacji

Obecnie istniejący system automatycznego sterowania pociągami (ATO – *Automatic Train Operation*) w odniesieniu do istotności i roli człowieka zakłada i klasyfikuje pięć różnych poziomów automatyzacji za pomocą skali stopnia automatyzacji (GoA – *Grade of Automation*). Sama jego implementacja jest w stanie podnieść średnią prędkość pociągu o kilka kilometrów na godzinę, obniżyć koszty eksploatacji taboru oraz zredukować zapotrzebowanie energetyczne [9].

Wraz z coraz wyższym stopniem automatyzacji maleje niezbędność człowieka oraz podejmowania przez niego decyzji; zerowy stopień automatyzacji GoA0 oznacza, że na decyzjach maszynisty opierają się wszystkie kluczowe funkcje pojazdu, najwyższy poziom GoA4 pozostawia zaś pojazd bez jakiegokolwiek wykwa-

lifikowanej obsługi. Poziomy pośrednie są kombinacją poziomów skrajnych, a odpowiedzialność za prawidłowe działanie pociągu jest podzielona pomiędzy maszynistę, system autonomiczny i konduktora. Systemem wspomagającym automatyzację jest ATP (*Automatic Train Protection*), który nieustannie kontroluje, czy prędkość pojazdu jest zgodna z maksymalną dozwoloną prędkością wynikającą z sygnalizacji sterowania ruchem kolejowym. W sytuacji, gdy pociąg porusza się z niedozwoloną prędkością, system ATP automatycznie aktywuje hamulec bezpieczeństwa. Natomiast system ATO (*Automatic Train Operation*) pozwala na ruch pociągu bez maszynisty lub tylko z jego nadzorem. Szczegółowe przypisanie ról ze względu na stopień automatyzacji zostało przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Stopnie automatyzacji i ich kryteria

Stopień automa-tyzacji	Rodzaj obsługi pociągu	Wprawianie pociągu w ruch	Zatrzymywanie pociągu	Zamykanie drzwi	Działanie w przypadku zakłóceń
GoA0	Maszynista	Maszynista	Maszynista	Maszynista	Maszynista
GoA1	ATP z maszynistą	Maszynista	Maszynista	Maszynista	Maszynista
GoA2	ATP z ATO i maszynista	Automa-tyczne	Automatyczne	Maszynista	Maszynista
GoA3	Bez maszynisty	Automa-tyczne	Automatyczne	Konduktor	Konduktor
GoA4	Bez załogi	Automa-tyczne	Automatyczne	Automatyczne	Automatyczne

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15].

4.2. Europejskie rozwiązania automatyzacyjne

W celu integracji państw członkowskich Unii Europejskiej powstał Europejski System Sterowania Pociągami (ETCS – *European Train Control System*). Jego zadanie polega na harmonizacji wymagań technicznych, lokalnej infrastruktury i suprastruktury, co ma na celu doprowadzenie do interoperacyjności. ETCS jest wspierany przez szereg unijnych legislacji oraz zaleceń; docelowo ma się stać domyślnym systemem sterowania ruchem kolejowym w Europie [16]. ETCS zawiera w sobie trzy poziomy, spośród których już najniższy, ETCS 1, którego użyteczną zaletę stanowi łatwość implementacji do obecnie istniejących systemów sterowania, jest w stanie obliczyć maksymalną prędkość, z jaką może poruszać się pociąg, oraz określić krzywą hamowania pojazdu. Gwarantuje on również sygnalizację kabinową, niezbędną do osiągania wysokich prędkości. Wszystkie informacje potrzebne do obliczeń pobiera za pomocą cyfrowego systemu GSM-R współpracującego z eurobalisami (urządzeniami transmisyjnymi umieszczonymi na trasie szlaku kolejowego). Na poziomie ETCS 2 przepływ danych nie płynie już

tylko z balis, ale także poprzez cyfrową transmisję radiową GSM-R; dodanie kolejnego źródła danych umożliwia sterowanie ruchem kolejowym w sposób ciągły, jednocześnie zwiększając ogólny poziom bezpieczeństwa. Poziom trzeci, najbardziej zaawansowany, posiada wszystkie funkcje swoich poprzedników oraz dwa dodatkowe kluczowe systemy. W jeden z nich wyposażony jest sam pojazd – jest to system kontroli ciągłości składu, monitorujący czy końcowa część pociągu porusza się w sposób harmoniczny i spójny z częścią początkową, a dodatkowo mierzy on kontrolnie odległość pomiędzy początkiem a końcem pociągu.

Drugim systemem jest ruchomy system blokowy, dzięki któremu infrastruktura przykolejowa (m.in. semafor) może zostać ominięta podczas projektowania nowych linii kolejowych lub całkowicie usunięta w przypadku modernizowania linii kolejowych obecnie istniejących.

Według przepisów pochodzących od zarządcy narodowej sieci linii kolejowych, PKP Polskie Linie Kolejowe SA, pociąg może jechać z maksymalną dozwoloną prędkością tylko wtedy, gdy na semaforze wyświetla się światło ciągle zielone, oznaczane jako S2 [12]. Światło ciągle zielone jest uzależnione m.in. od tego, czy po następnych odcinkach blokowych porusza się jakiś pojazd kolejowy. W zależności od odległości pociągu od następnego odcinka zajętego oraz w odniesieniu do innych pobocznych czynników semafor będzie wyświetlał jedną z wielu możliwych kombinacji. Obecnie długość tych odcinków jest stała, jednak automatyzacja sterowania ruchem kolejowym pozwoliłaby na jej ustalanie na podstawie prędkości pojazdu w czasie rzeczywistym, co umożliwiłoby największe skrócenie odstępów pomiędzy pojazdami, nie tylko przy zachowaniu wszystkich rygorystycznych elementów bezpieczeństwa w ruchu kolejowym [2], ale również ze zmniejszeniem ryzyka ewentualnych komplikacji. Takie rozwiązanie poprawiłoby przepustowość, a wraz z nią elastyczność sieci, dając więcej swobody przewoźnikom operującym na danej sieci.

4.3. Korzyści wynikające z automatyzacji

Według UTK [1] w Polsce w 2020 roku długość linii kolejowych normalnotorowych wynosiła 18 893,3 kilometra, z czego linie dwutorowe stanowiły 46% (8945 km), a jednotorowe 54% (10 515 km), w tym prawie 62% (12 048,3 km) całej sieci było zelektryfikowane. Na ogromnej części polskiej sieci kolejowej (24%, 4600 km) występują problemy z przepustowością, które obniżają konkurencyjność kolei. Tzw. wąskie gardła powodują opóźnienia i hamują dynamiczny rozwój regionu, w którym występują [7], nie tylko zmniejszając atrakcyjność tego środka transportu, ale także oddziałując negatywnie na potencjał inwestycyjny terenów bliskich tej infrastrukturze. Implementacja systemu ETCS daje nadzieję na rozwiązanie tych problemów oraz na ekonomiczne pobudzenie regionów, przez które przebiegają tak zaprojektowane szlaki kolejowe.

Innym problemem są braki kadrowe sektora kolejowego w Polsce. UTK każdego roku podaje informacje o deficycie maszynistów. Kolejną złą wiadomością

jest fakt, że ponad 55% obecnie pracujących maszynistów znajduje się w grupie wiekowej 50+ [10]. Na podstawie aktualnego rozkładu wieku przewiduje się, że w najbliższych latach na emeryturę przejdzie 35% obecnie zatrudnionych maszynistów. Prawdopodobnie część przyszłych emerytów zostanie w przemyśle kolejowym, przechodząc na stanowiska z mniejszymi wymaganiami zdrowotnymi (np. stanowisko prowadzącego pociąg lub pojazdy kolejowe), nie rozwiązuje to jednak problemu związanego ze średnią wieku maszynistów [10]. Automatyzacja może wypełnić zarówno obecne braki kadrowe, jak i te w przyszłości.

Kolej 4.0 stanowi odpowiedź na obecnie odbywającą się rewolucję cyfrową – dokładniej jest to program cyfryzacyjny skupiający się na rozwiązaniach, które mają na celu wzniesienie przemysłu kolejowego na wyższy poziom bezpieczeństwa. W ramach tych założeń mogą być realizowane kwestie „przyziemne”, takie jak wspólny, zunifikowany bilet kolejowy lub jedna centralna aplikacja mobilna służąca do zakupu biletów, sprawdzania czasu oraz miejsca odjazdu pociągu lub ceny biletu i dostępności miejsc, albo kwestie fundamentalne, rewolucyjne i intersekcjonalne w obszarach takich jak interoperacyjność czy energetyka.

5. WYNIKI BADAŃ ANKIETOWYCH

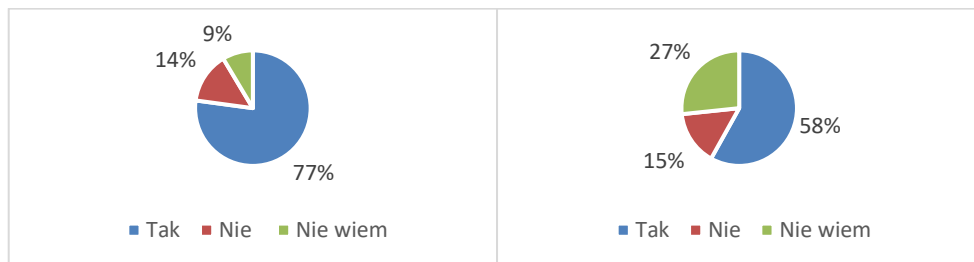
Celem badania było sprawdzenie opinii na temat postrzegania obecnego stanu intermodalności przez przyszłych pracowników sektorów transportowych, czyli obecnych studentów kierunków logistycznych i transportowych. Łącznie uzyskano 105 odpowiedzi. Pierwsze pytanie dotyczyło tego, czy ankietowani uważają, że polskie porty powinny inwestować w rozwiązania ułatwiające integrację z koleją. Znacząca większość, bo aż 92%, wskazała odpowiedź „zdecydowanie tak” lub „raczej tak”. Kolejne pytanie odnosiło się do tego, czy według ankietowanych porty są dzisiaj inteligentnymi węzłami, czy raczej działają w oderwaniu od innych gałęzi transportu. Niemal połowa wskazała na drugą odpowiedź, podczas gdy jedna trzecia – pierwszą. Graficznie odpowiedzi te zostały przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Udział odpowiedzi na pytania ankietowe 1 i 2

Źródło: opracowanie własne.

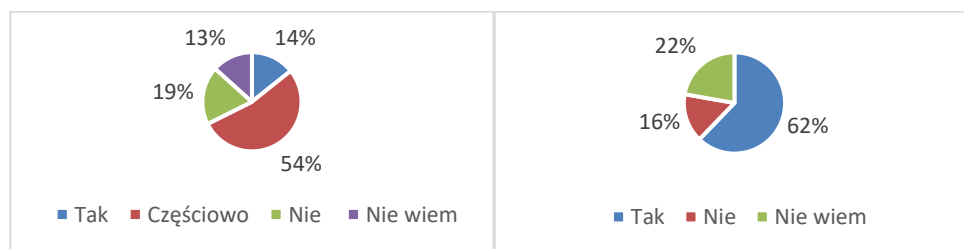
Następnie zapytano o to, czy cyfryzacja i automatyzacja działań w portach mogą realnie usprawnić współpracę z transportem kolejowym. Prawie 80% respondentów zgodziło się z tym stwierdzeniem. Kolejne pytanie dotyczyło kwestii, czy rozwój terminali intermodalnych (np. przy portach) zwiększy konkurencyjność kolei w przewozach towarowych. Ankietowani w prawie 60% przypadków wskazali odpowiedź „tak”. Odpowiedzi zostały przedstawione graficznie na rys. 2.



Rys. 2. Udział odpowiedzi na pytania ankiety 3 i 4

Źródło: opracowanie własne.

Następne pytanie odnosiło się do kolei, a dokładniej do tego, czy studenci uważają, że kolej w Polsce jest wystarczająco scyfryzowana, by działać w ramach nowoczesnego systemu intermodalnego. Ponad połowa respondentów wskazała odpowiedź „częściowo”, po kilkanaście procent uzyskały odpowiedzi „tak” i „nie”. Kolejne pytanie brzmiało: czy kolej potrzebuje modernizacji infrastruktury, aby lepiej współpracować z portami? 62% ankietowanych podało odpowiedź „tak”. Graficznie odpowiedzi na te pytania zostały przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Udział odpowiedzi na pytania ankiety 5 i 6

Źródło: opracowanie własne.

Wiedza na temat lokalizacji ładunków okazała się bardzo ważną cechą w pytaniu o to, czy współdzielenie danych między portem a koleją może poprawić efektywność systemu. Prawie 80% odpowiadających wskazało, że tak. Nieco mniej pozytywnych odpowiedzi (64%) udzielono na pytanie, czy rozwój kolei jako

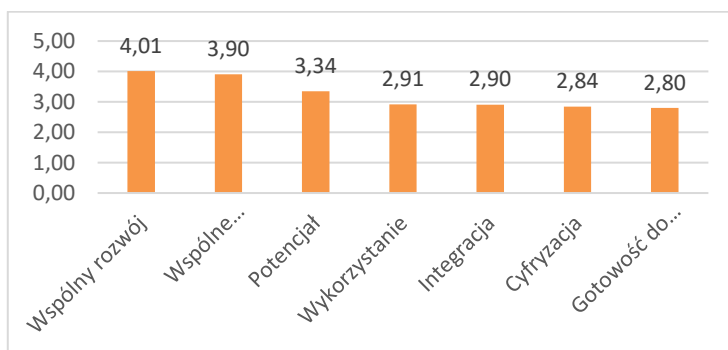
ekologicznego środka transportu wspiera cele nowoczesnej intermodalności. Odpowiedzi te zilustrowano na rys. 4.



Rys. 4. Udział odpowiedzi na pytania ankiety 7 i 8

Źródło: opracowanie własne.

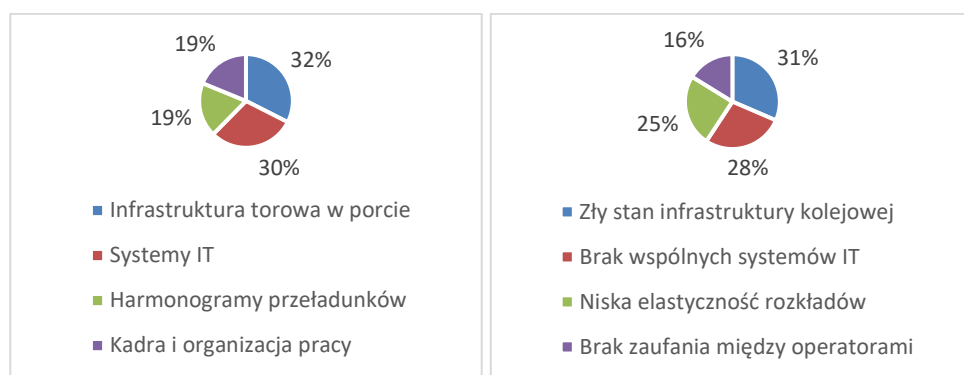
Respondenci zostali również poproszeni o dokonanie oceny siedmiu stwierdzeń w skali 1–5, przy czym 5 stanowiło ocenę najwyższą. Najwyższą średnią ocenę uzyskało stwierdzenie dotyczące istotności wspólnego rozwoju systemów cyfrowych w relacji port–kolej, zaraz za nim stwierdzenie na temat tego, jak ważne jest wspólne planowanie przewozów i operacji ładunkowych przez te dwie gałęzie transportu, trzecią najwyższą ocenę zaś otrzymało stwierdzenie dotyczące ogólnego potencjału Polski do wdrożenia cyfrowego systemu transportowego. Cztery kolejne miejsca z podobnymi notami przypadły stwierdzeniom odnoszącym się do tego, w jakim stopniu porty wykorzystują technologie do usprawnienia przeładunków z morza na tory, do poziomu integracji kolei z portami, poziomu cyfryzacji i automatyzacji portów w kontekście integracji z koleją oraz gotowości portów do obsługi dużych wolumenów ładunków z wykorzystaniem kolei zamiast transportu drogowego. Zestawienie wszystkich ocen zaprezentowano na rys. 5.



Rys. 5. Oceny poszczególnych stwierdzeń według ankietowanych

Źródło: opracowanie własne.

Na koniec ankietowani zostali poproszeni o wybranie elementów, jakie powinny zostać usprawnione w portach, by poprawić współpracę z koleją oraz o wskazanie tych, które są dziś największą przeszkodą we współpracy port–kolej. W pierwszej kategorii ankietowani wskazywali najczęściej infrastrukturę torową w porcie i systemy IT, a w dalszej kolejności harmonogram przeładunków wraz z kadrą i organizacją pracy. Największymi problemami okazały się natomiast zły stan infrastruktury kolejowej oraz brak wspólnych systemów IT, dalej niska elastyczność rozkładów, a za nią brak zaufania między operatorami. Dane te przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Udział odpowiedzi na pytania ankietowe 9 i 10

Źródło: opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Celem niniejszego opracowania było przeanalizowanie wybranych zagadnień, które wpisują się w definicję szeroko pojętego Przemysłu 5.0, w tym Portów morskich 4.0 oraz Kolei 4.0. Na tej podstawie stworzone zostało pojęcie Intermodalności 5.0, czyli nowego, zaawansowanego poziomu integracji systemów transportowych, zakładającego synergiczne połączenie transportu morskiego i kolejowego w kontekście przewozów towarowych. Koncepcja ta opiera się na wdrażaniu nowoczesnych technologii, takich jak: sztuczna inteligencja, systemy cyfrowej integracji i wymiany danych, Internet rzeczy (IoT), automatyzacja procesów czy rozwiązania rozważające sztuczną inteligencję oraz uczenie maszynowe, które mają na celu zwiększenie efektywności, skrócenie czasu realizacji przewozów, podniesienie poziomu bezpieczeństwa, a także obniżenie kosztów operacyjnych i zużycia energii.

W artykule zwrócono również uwagę na aspekt społeczny, uwzględniając opinie studentów kierunków transportowych, spedycyjnych i logistycznych reprezentujących uczelnie z różnych regionów Polski. To właśnie ci studenci jako

przyszli specjaliści branży TSL, będą uczestnikami i jednocześnie beneficjentami zachodzących przemian. Wkraczając na rynek pracy, obejmując stanowiska w portach morskich, spółkach kolejowych czy u operatorów logistycznych, będą musieli się zmierzyć z wyzwaniami oraz możliwościami, jakie niesie za sobą kolejna rewolucja przemysłowa.

Warto zaznaczyć, że autorzy opracowania jedynie powierzchownie opisali wybrane systemy cyfrowe, automatyczne i autonomiczne. Przemysł 5.0, a zwłaszcza Intermodalność 5.0 i nowoczesne połączenie portów morskich z koleją, to bardzo szerokie i ciągle rozwijające się zagadnienie. Dalszych badań wymaga wciąż wiele kwestii, np. związanych z prawem, infrastrukturą, wpływem na ludzi czy środowisko. Postęp technologiczny oraz zmiany na rynku będą przynosić nowe wyzwania, które mogą się stać tematami przyszłych prac i projektów badawczych. Dlatego niniejszy artykuł można traktować jako wprowadzenie i zachętę do dalszego zgłębiania tego zagadnienia.

LITERATURA

1. Biedrzycka A., *Sektor kolejowy w Polsce*, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 2021, 5, s. 14–28.
2. Jabłoński A., Jabłoński M., *Zarządzanie bezpieczeństwem w transporcie kolejowym – kluczowe aspekty*, Bezpieczeństwo: teoria i praktyka: czasopismo Krakowskiej Szkoły Wyższej im. Andrzeja Frycza Modrzewskiego 2014, 8/3, s. 57–68.
3. Poliński J., Ochociński K., *Cyfryzacja w transporcie kolejowym*, Problemy Kolejnictwa 2020, z. 188, s. 53–65.
4. Rydzkowski W., Wojewódzka-Król K. (red.), *Transport*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

Źródła internetowe

5. <https://baltichub.com/en/news/changes-in-navis-system> (dostęp 06.04.2025).
6. <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/12/23/el-puerto-de-valencia-se-convierte-en-un-referente-con-su-propia-red-de-conexion-5g-radio-valencia/> (dostęp 06.04.2025).
7. <https://igt.pl/node/1526> (dostęp 06.04.2025).
8. <https://intellinium.io/smart-rail-4-0-safety-solution-based-on-smart-ppe-to-improve-worker-safety-on-railyards/> (dostęp 06.04.2025).
9. https://uic.org/cdrom/2011/05_ERTMS_training2011/docs/ETCS_handbookf.pdf (dostęp 06.04.2025).
10. <https://utk.gov.pl/pl/aktualnosci/8007,Ilu-jest-w-Polsce-maszynistow.html> (dostęp 06.04.2025).
11. <https://www.bct.gdynia.pl/en/naviseng> (dostęp 06.04.2025).
12. <https://www.plk-sa.pl/klienci-i-kontrahenci/akty-prawne-i-przepisy/instrukcje-pkp-polskich-linii-kolejowych-sa/ruch-i-przewozy-kolejowe> (dostęp 06.04.2025).
13. <https://www.portgdansk.pl/en/events/port-of-gdansk-finalising-its-pcs-tests-the-use-of-the-pcs-brokerage-module-will-soon-be-mandatory/> (dostęp 06.04.2025).
14. <https://www.porttechnology.org/news/what-is-a-smart-port-2/> (dostęp 06.04.2025).

15. <https://www.rail-kn.com/2021/11/automatic-train-operation-overview.html> (dostęp 06.04.2025).
16. <https://www.thalesgroup.com/en/markets/transport/signalling/signalling-solutions-main-line-rail/european-train-control-system-etc>s (dostęp 06.04.2025).
17. <https://www.worldcargonews.com/news/2024/04/port-of-felixstowe-autonomous-truck-implementation/> (dostęp 06.04.2025).
18. portofrotterdam.com (dostęp 06.04.2025).

INTERMODALITY 5.0: WHEN SEA AND RAIL REACH THE NEXT LEVEL

With the dynamic development of technology and the continuous pursuit of transport process optimization, intermodality is gaining an increasingly important role in modern freight transport systems. The concept of Intermodality 5.0 fits into the broader domain of Industry 5.0, which aims to automate and digitize current methods. This article analyzes selected issues related to Seaports 4.0 and Railways 4.0. Moreover, it includes a survey conducted among students of transport and logistics programs from across Poland. The aim of the study was to gather opinions on the current and future cooperation between seaports and railways in the context of intermodality development in Poland.

Keywords: intermodality, transport digitalization, Railway 4.0, Seaports 4.0, Industry 5.0, transport automation, survey research, integrated transport system.

ŹRÓDŁA ENERGII W LOGISTYCE I TRANSPORCIE – MAGAZYNY ENERGII I ZIELONA INFRASTRUKTURA TRANSPORTU DROGOWEGO I LOGISTYKI MIEJSKIEJ

W opracowaniu przedstawiono zagadnienia związane ze zrównoważonym, transportem i logistyką. W odpowiedzi na wyzwania związane z dekarbonizacją musimy postawić na rozwój odnawialnych źródeł energii, takich jak biopaliwa, elektryczność i wodór, oraz inwestycje w zieloną infrastrukturę transportową.

Zielona infrastruktura transportu drogowego, w tym systemy zarządzania odpadami, zrównoważone projektowanie i innowacyjne rozwiązania w miastach, takie jak mikrohuby logistyczne, mają na celu poprawę jakości środowiska i zmniejszenie emisji spalin. Kluczowe znaczenie mają także magazyny energii, takie jak baterie litowo-jonowe i ogniwa paliwowe, które pozwalają na integrację odnawialnych źródeł energii z systemem transportowym, wspierając rozwój e-mobilności i zeroemisyjnych dostaw.

Słowa kluczowe: zrównoważony transport i logistyka, zielona infrastruktura, magazyny energii, redukcja emisji spalin.

WSTĘP

W Unii Europejskiej w 2022 roku sektor transportu odpowiadał za najwyższy, bo aż 31%, udział w końcowym zużyciu energii. Szczególną uwagę należy zwrócić na fakt, że transport drogowy generował 73,6% całkowitego zużycia energii w obrębie transportu. Polska znajduje się na piątym miejscu pod względem końcowego zużycia energii w transporcie drogowym, według produktów energetycznych [5].

Analizując powyższe dane oraz aktualne rozporządzenia Unii Europejskiej, takie jak Pakiet Mobilności oraz cele zawarte w Europejskim Zielonym Ładzie, łatwo dostrzec, jak istotną rolę odgrywa zrównoważony rozwój sektora transportu. W ramach tych inicjatyw szczególną uwagę poświęca się zarówno przejściu na alternatywne źródła energii, jak i inwestycjom w zieloną infrastrukturę, która może istotnie zmienić sposób funkcjonowania transportu drogowego i logistyki miejskiej.

W kontekście tych wyzwań rozwój magazynów energii oraz wdrażanie zielonej infrastruktury transportu drogowego staje się niezbędnym elementem strategii dekarbonizacji. Inwestycje w nowoczesne technologie, takie jak pojazdy elektryczne, stacje ładowania i zrównoważone rozwiązania w infrastrukturze logistycznej, nabierają kluczowego znaczenia dla osiągnięcia celów unijnych

w zakresie redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz poprawy efektywności energetycznej w transporcie.

1. POLITYKA ENERGETYCZNA POLSKI W TRANSPORCIE

Polska polityka energetyczna w transporcie skupia się przede wszystkim na dostosowaniu swoich przepisów do dyrektyw Unii Europejskiej, takich jak RED III, co przekłada się na zwiększanie wykorzystania odnawialnych źródeł energii, ograniczanie emisji CO₂ oraz rozwój elektromobilności. W najbliższych latach planowane jest stopniowe zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w transporcie, do 9,2% w 2025 roku, 10% w latach 2026–2029 i 14,9% w 2030 roku [10]. Cel ten ma być osiągnięty m.in. poprzez stosowanie biopaliw i odnawialnej energii elektrycznej.

Bardzo dużą wagę przywiązuje się do rozwoju elektromobilności, co wiąże się z nowymi unijnymi normami emisji CO₂ dla samochodów osobowych i dostawczych, co z kolei zmusza producentów do zwiększenia udziału pojazdów zero- i niskoemisyjnych [11]. W miastach liczących powyżej 100 tysięcy mieszkańców powstają strefy czystego transportu, ograniczające wjazd pojazdów z wysoką emisją spalin, a od 2026 roku samorządy będą zobowiązane do zakupu wyłącznie autobusów zeroemisyjnych [11]. Polska planuje również osiągnąć udział 4,5% energii z zaawansowanych biopaliw (drugiej i trzeciej generacji), które nie konkurują z produkcją żywności ani nie przyczyniają się do degradacji środowiska [9].

2. JAK MOŻEMY POZYSKIWAĆ ENERGIĘ DLA TRANSPORTU DROGOWEGO

Energia dla transportu drogowego bazuje na wykorzystaniu paliw kopalnych. Znaczący i szybki rozwój wielu sektorów, np. przemysłu, poskutkował również rozwojem transportu, ma to jednak duży wpływ na nasze zdrowie i środowisko. Emisje gazów cieplarnianych oraz zanieczyszczenie powietrza na całym świecie nieprzerwanie wzrastają, zwłaszcza w miastach. Według danych Światowej Organizacji Zdrowia (WHO – World Health Organization) w wyniku chorób wywołanych zanieczyszczeniem powietrza każdego roku umiera około 7 mln osób [17]. W odpowiedzi na szkodliwy wpływ transportu opartego na paliwach kopalnych wiele państw i regionów skupiło się na zmniejszeniu emisji w sektorze transportowym.

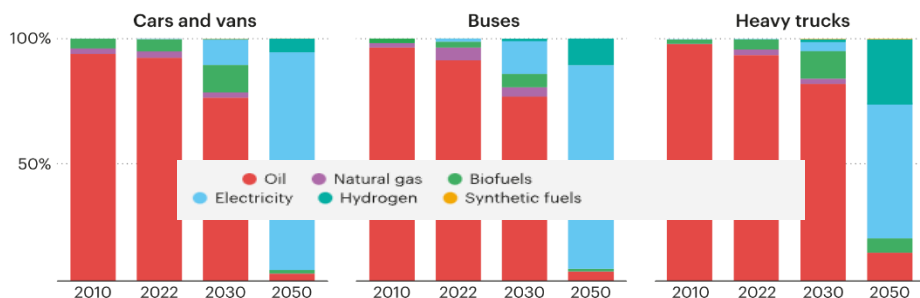
Ważnym elementem dekarbonizacji transportu drogowego są pojazdy elektryczne. Jeśli energia do ich zasilania jest pozyskiwana z odnawialnej energii elektrycznej, to pozwala to znacznie ograniczyć wszystkie szkodliwe emisje.

Biopaliwa, takie jak biodiesel czy bioetanol, mogą zastąpić paliwa tradycyjne w pojazdach silnikowych. Są one pozyskiwane z materiałów organicznych, np. biodiesel uzyskiwany jest z roślin oleistych. Dzięki temu nie ma konieczności wymiany floty pojazdów, co pozwala zredukować emisję CO₂. Powinniśmy pamiętać, że produkcja biopaliw musi się odbywać w sposób zrównoważony, tak by nie wpływała negatywnie na zasoby naturalne.

Paliwa syntetyczne mają taką samą budowę molekularną jak paliwa tradycyjne, a wytwarzane są z syntezy organicznej biomasy czy węgla. Syntetyczne paliwa wytwarzane z energii odnawialnej mogą zastąpić tradycyjne paliwa kopalne w sektorach, które są trudne do elektryfikacji.

Zielony wodór wyprodukowany z OZE może służyć wielu sektorom gospodarki. Produkowany w procesie elektrolizy wody, jest świetną alternatywą do napędzania autobusów czy pojazdów ciężarowych.

1 Jak podaje Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA – International Energy Agency), wzrost elektryfikacji i stosowanie biopaliw mają kluczowe znaczenie dla dekarbonizacji transportu drogowego do 2030 roku. Po tym okresie elektryfikacja stanie się głównym środkiem do tego celu, a energia elektryczna będzie stanowić trzy czwarte energii wykorzystywanej w transporcie drogowym do 2050 roku.



Rys. 1. Udział paliw w zużyciu energii w transporcie drogowym

Źródło: [15].

3. ZIELONA INFRASTRUKTURA TRANSPORTU DROGOWEGO

Zielona infrastruktura transportu drogowego to koncepcja, która łączy elementy przyrodnicze i ekologiczne z tradycyjną infrastrukturą drogową, a jej założenia obejmują poprawę jakości środowiska, redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie zrównoważenia transportu. Projektując zrównoważoną infrastrukturę transportową, należy się skoncentrować na zarządzaniu odpadami, redukcji zanieczyszczeń, ponownym wykorzystaniu oraz regeneracji naturalnych systemów.

Problemem jest fakt, że przez lata projektowaliśmy infrastrukturę tak, by była trwała, bez potrzeby konserwacji czy remontów. Trwałość jest istotna w kontekście jednorazowego cyklu życia zasobu, lecz stwarza wyzwania na etapie końca jego życia, szczególnie w zakresie odzyskiwania materiałów i elementów, które mogą zostać ponownie wykorzystane. Aktualnie ważne jest pojęcie gospodarki o obiegu zamkniętym. Skupia się ona na redukcji zużycia zasobów, emisji i odpadów oraz zwiększaniu odporności zasobów poprzez projektowanie, które pozwala na utrzymanie materiałów w obiegu i ich wykorzystanie przy jak najwyższej wartości przez możliwie najdłuższy czas. Korzyści zielonej infrastruktury wspierają ochronę środowiska, poprawiają zdrowie publiczne, są dostosowane do zmian klimatu i często generują niższe koszty utrzymania.

Zakres składników zielonej infrastruktury jest szeroki – od zielonych pasów i torowisk, po elementy oświetlenia czy permeabilne nawierzchnie. Przykładem mogą być zielone bariery – rozwiązanie, które coraz częściej wykorzystuje się w miastach i przy drogach. Pełnią one funkcję naturalnych ekranów akustycznych, skutecznie tłumiąc hałas pochodzący z ruchu ulicznego. Dodatkowo roślinność znajdująca się na takich barierach pomaga w oczyszczaniu powietrza, filtrując szkodliwe pyły i cząstki stałe. Zielone bariery zatrzymują również część wody opadowej, zmniejszając tym samym ryzyko lokalnych podtopień.

3.1. Budowa i rozwój infrastruktury ładowania i tankowania wodoru

Rozwój infrastruktury ładowania i tankowania wodoru jest niezwykle istotnym elementem wspierającym transformację transportu w kierunku bardziej ekologicznych rozwiązań. Niestety aktualnie w Polsce sieć stacji tankowania wodoru jest bardzo ograniczona – w momencie powstawania niniejszego artykułu istnieją jedynie dwie ogólnodostępne stacje w Warszawie i Rybniku [7]. Jednak w najbliższych latach sytuacja ma się znacząco zmienić. Grupa Orlen planuje do 2030 roku wybudować ponad sto stacji tankowania wodoru [14].

Mimo rosnących planów inwestycyjnych rozwój infrastruktury wodorowej wiąże się z wieloma wyzwaniami. Największe problemy to brak rozbudowanej sieci przesyłania wodoru oraz konieczność współpracy pomiędzy producentami i odbiorcami tego paliwa. Produkcja wodoru przyjaznego dla środowiska może odegrać kluczową rolę w transporcie zrównoważonym, stanowiąc alternatywę dla paliw kopalnych i przyczyniając się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych.

4. KONCEPCJA LOGISTYKI MIEJSKIEJ I JEJ WPŁYW NA ŚRODOWISKO

Logistyka miejska skupia się na organizacji przepływu towarów, usług oraz osób na obszarach zurbanizowanych. Jej głównym zadaniem jest optymalizacja procesów dostaw przy jednoczesnej minimalizacji kosztów ekonomicznych,

społecznych oraz środowiskowych. W kontekście postępującej urbanizacji w Polsce rola logistyki miejskiej staje się kluczowym elementem zrównoważonego rozwoju miast.

Cele logistyki miejskiej obejmują trzy główne obszary. Pierwszy z nich to aspekt ekonomiczny, który koncentruje się na redukcji kosztów poprzez skracanie tras dostaw czy zmniejszenie zużycia paliwa. Dobrym przykładem takiego rozwiązania jest system „zielona fala” w Krakowie [16], który pozwolił skrócić czas podróży. Drugi obszar to cel ekologiczny, związany z redukcją emisji spalin i hałasu. Trzecim obszarem jest cel społeczny, czyli dążenie do poprawy komfortu życia mieszkańców.

Wpływ logistyki miejskiej na środowisko jest znaczący. Obszary miejskie odpowiadają za produkcję znacznej ilości gazów cieplarnianych, a transport samochodowy jest głównym źródłem emisji spalin, co przyczynia się do pogorszenia jakości powietrza. Generowany przez średni ruch uliczny hałas na poziomie 40–60 decybeli jest szkodliwy dla zdrowia ludzi [9]. Dodatkowo kongestia transportowa zwiększa zużycie paliwa, generując tym samym dodatkową emisję spalin [19]. Skutkiem tego jest pogłębiający się problem emisji gazów cieplarnianych i samego efektu cieplarnianego.

Negatywny wpływ można natomiast zminimalizować, wprowadzając różnorodne rozwiązania. Przykładem może być np. konsolidacja frachtów, która polega na łączeniu przesyłek w większe ładunki, dzięki czemu zmniejsza się liczba pojazdów, co powoduje zmniejszenie emisji spalin oraz hałasu. Kolejnym rozwiązaniem mogą być mikrohuby logistyczne, które umożliwiają bardziej efektywną obsługę tzw. ostatniej mili, ograniczając konieczność wielokrotnych kursów i usprawniając cały proces dostaw. Dodatkowo coraz częściej wykorzystuje się innowacyjne technologie transportowe, takie jak projekt CITYLOG, dzięki któremu zwiększona zostaje efektywność energetyczna transportu i zmniejszony poziom zanieczyszczeń generowanych w miastach.

4.1. Inteligentne huby logistyczne i ich rola w transformacji energetycznej

Inteligentne huby logistyczne odgrywają coraz większą rolę w procesie transformacji energetycznej, znacząco wpływając na poprawę wydajności energetycznej. Dzięki zaawansowanym technologiom, takim jak sztuczna inteligencja (AI – *Artificial Intelligence*) oraz Internet rzeczy (IoT – *Internet of Things*), możliwe jest skuteczne optymalizowanie tras transportowych.

Aktualnie huby coraz częściej inwestują w zielone technologie, w tym odnawialne źródła energii, poprzez zainstalowanie instalacji fotowoltaicznych, dzięki którym istnieje możliwość zasilenia infrastruktury w sposób nieszkodliwy dla środowiska. Innym przykładem może być wykorzystywanie Lohr Railway System, który umożliwia załadunek naczep bez konieczności użycia dźwigów, co dodatkowo

obniża emisje, lub też zastosowanie pojazdów zeroemisyjnych na ostatniej mili w trakcie realizowania dostawy, co przyczynia się do poprawy jakości powietrza w miejskiej przestrzeni. Ważnym elementem funkcjonowania tych obiektów jest także promowanie intermodalności, która pozwala na bardziej ekologiczne zarządzanie przepływem towarów.

Omawiane huby logistyczne przyczyniają się do znacznej redukcji emisji gazów cieplarnianych poprzez optymalizację transportu i wykorzystanie zielonych technologii. Dzięki wykorzystywaniu OZE i inteligentnych systemów zarządzania energią zmniejsza się zużycie energii oraz poprawia się efektywność energetyczna. Inteligentne huby logistyczne pomagają również w poprawie jakości życia w miastach poprzez redukcję hałasu i zanieczyszczeń.

4.2. Mikrohuby i systemy transportu współdzielonego

Mikrohuby logistyczne i systemy transportu współdzielonego mają kluczowe znaczenie dla nowoczesnej logistyki miejskiej, poprawiając wydajność transportu i zmniejszając jego negatywny wpływ na środowisko. Są to małe punkty przeładunkowe, zlokalizowane głównie w centrach miast lub na dużych osiedlach mieszkaniowych. Ich głównym zadaniem jest przeładunek paczek z większych pojazdów na bardziej ekologiczne środki transportu, takie jak rowery cargo, co usprawnia dostawy na ostatniej mili i jednocześnie zmniejsza emisję spalin. Dzięki temu w miastach obserwuje się zmniejszoną obecność samochodów dostawczych, co przekłada się na poprawę jakości powietrza.

Współcześnie mikrohuby coraz częściej wprowadzają innowacyjne rozwiązania, takie jak wykorzystanie energii słonecznej czy materiałów z recyklingu do budowy infrastruktury, co dodatkowo wspiera ideę zrównoważonego rozwoju. Równie dynamicznie rozwijają się systemy transportu współdzielonego obejmujące usługi takie jak *car-sharing*, *bike-sharing* czy e-hulajnogi. Rozwiązania tego typu umożliwiają mieszkańcom miast swobodne podróżowanie bez potrzeby posiadania własnego pojazdu. Taka integracja przyczynia się do poprawy jakości życia w miastach poprzez redukcję korków, hałasu i zanieczyszczeń, jednocześnie zwiększając dostępność usług transportowych dla mieszkańców.

4.3. Zeroemisyjne dostawy na ostatniej mili

Zeroemisyjne dostawy na ostatniej mili stanowią kluczowy element transformacji logistyki miejskiej, przyczyniając się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i poprawy jakości powietrza w miastach. Pomimo tego rodzaju korzyści jest to najdroższy oraz najtrudniejszy etap dostaw, ze względu na uwarunkowania miejskie.

Najpopularniejszymi rozwiązaniami technologicznymi dla zeroemisyjnych dostaw jest wykorzystanie pojazdów elektrycznych, dronów, które oferują szybkie i elastyczne rozwiązania, szczególnie w obszarach trudno dostępnych, oraz rowerów cargo, które są szczególnie efektywne w zatłoczonych miastach.

W niedalekiej przyszłości można się spodziewać dalszego dynamicznego rozwoju technologii zeroemisyjnych, w tym bardziej zaawansowanych systemów transportu elektrycznego oraz wykorzystania alternatywnych źródeł energii. Skuteczne wdrożenie tych rozwiązań będzie wymagało ścisłej współpracy pomiędzy firmami logistycznymi, władzami miejskimi i dostawcami technologii w celu tworzenia wspólnie bardziej zrównoważonego modelu miejskiej logistyki.

5. MAGAZYNY ENERGII

Magazyny energii pełnią kluczową rolę w transformacji transportu drogowego i logistyki w stronę bardziej zrównoważonych rozwiązań. Zastosowanie zaawansowanych technologii magazynowania energii przyczynia się do poprawy efektywności energetycznej, redukcji emisji oraz umożliwia integrację odnawialnych źródeł energii. Wyróżniamy pięć rodzajów magazynów energii w transporcie i logistyce:

- baterie litowo-jonowe – najczęściej wykorzystywane w pojazdach elektrycznych, dzięki swojej wysokiej gęstości energii i długiej żywotności. W logistyce baterie te są stosowane w automatycznych pojazdach sterowanych, które służą do transportu ładunków w magazynach i centrach dystrybucyjnych;
- superkondensatory – mogą magazynować dużą ilość energii przy minimalnych jej stratach. Umożliwiają szybkie ładowanie i rozładowanie, co sprawia, że są idealne do krótkich cykli pracy, takich jak transport wewnątrzmagazynowy. W systemach hybrydowych mogą współpracować z innymi bateriami, poprawiając ich wydajność i wydłużając żywotność;
- wodorowe ogniwa paliwowe – stosowane głównie w pojazdach ciężarowych na długich dystansach, oferują wysoką gęstość energetyczną i szybkie tankowanie. Jednak ich wykorzystanie wiąże się z koniecznością rozbudowy infrastruktury do tankowania wodoru;
- koła zamachowe – wykorzystywane jako alternatywne źródła zasilania awaryjnego w centrach logistycznych i magazynach. Zapewniają szybkie i niezawodne zasilanie systemów krytycznych podczas przerw w dostawie prądu. Krótkoterminowo przechowują energię, więc nadają się też do odzyskiwania energii hamowania w pojazdach lub systemach transportowych;
- magazyny stacjonarne – instalowane przy trasach lub w magazynach, umożliwiają przechowywanie energii pozyskanej z hamowania pojazdów lub zasilanie urządzeń w okresach szczytowego zapotrzebowania na energię. Są wykorzystywane np. do magazynowania energii w zajezdniach autobusów elektrycznych, po to by optymalizować koszty i niezawodność.

Korzyści płynące z zastosowania takich magazynów energii to m.in. redukcja emisji, zwiększona elastyczność operacyjna, która pozwala na dostosowanie się do

różnych warunków pracy, oraz poprawa efektywności energetycznej i wsparcie dla e-mobilności.

PODSUMOWANIE

Sektor transportu, a w szczególności transport drogowy, jest jednym z głównych źródeł zużycia energii, co wiąże się z dużymi wyzwaniami w zakresie dekarbonizacji. Polska, zajmując piątą pozycję w Unii Europejskiej pod względem zużycia energii w transporcie drogowym, również stoi przed koniecznością wdrożenia działań zmierzających do zwiększenia efektywności energetycznej i obniżenia emisji gazów cieplarnianych. Kluczowym elementem realizacji celów zawartych w Europejskim Zielonym Ładzie jest rozwój odnawialnych źródeł energii, takich jak biopaliwa, pojazdy elektryczne oraz wodór. Magazyny energii, takie jak baterie litowo-jonowe, ogniwa paliwowe czy superkondensatory, stanowią fundament w transformacji sektora transportu i logistyki, pozwalając na lepszą integrację odnawialnych źródeł energii oraz zwiększenie efektywności operacyjnej.

Zielona infrastruktura transportu drogowego, oparta na zasadach gospodarki o obiegu zamkniętym, może stanowić kluczowy element poprawy jakości środowiska i zarządzania zasobami. W miastach szczególną rolę odgrywa logistyka miejska, która poprzez innowacyjne rozwiązania, takie jak mikrohuby czy zeroemisyjne dostawy na ostatniej mili, przyczynia się do zmniejszenia emisji spalin, hałasu i zatorów komunikacyjnych. Integracja nowoczesnych technologii, w tym inteligentnych systemów zarządzania oraz wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych pozwala na bardziej zrównoważony rozwój miast. Dzięki temu możliwe jest osiągnięcie zrównoważonego rozwoju zarówno w transporcie drogowym, jak i w logistyce miejskiej.

LITERATURA

1. Cisowski T., Szymanek A. (2006), *Zrównoważony rozwój transportu miejskiego*, Eksploatacja i Niezawodność 2006, 1, s. 15–26.
2. Skowroński A., *Zrównoważony rozwój perspektywą dalszego postępu cywilizacji*, Problemy Ekorozwoju 2006, 1(2), s. 47–57.

Źródła internetowe

3. <https://dudkowiak.pl/blog/zmiany-legislacyjne-w-polsce-i-europie-od-2025-roku-ochrona-srodowiska-elektromobilnosc-i-energetyka/> (dostęp 05.04.2025).
4. <https://e-magazyny.pl/eksperckim-okiem/smart-rdm-i-przemysl-4-0-rewolucja-w-integracji-transformacji-cyfrowej-i-esg-dla-zrownowazonego-rozwoju/> (dostęp 05.04.2025).
5. https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_transport_-_detailed_statistics (dostęp 05.04.2025).
6. https://european-union.europa.eu/priorities-and-actions/actions-topic/transport_pl (dostęp 05.04.2025).

7. <https://gsenergia.pl/2023/09/19/rozwój-infrastruktury-wodorowej-w-polsce-gdzie-zatankujesz-w-naszym-kraju/> (dostęp 05.04.2025).
8. https://mfiles.pl/pl/index.php/Logistyka_miejska (dostęp 05.04.2025).
9. https://sjsutst.polsl.pl/archives/2012/vol75/093_ZN75_2012_Tundys.pdf (dostęp 05.04.2025).
10. https://trinomics.eu/wp-content/uploads/2016/04/GI-and-Green-Infrastructure-in-the-Transport-sector_proof3.pdf (dostęp 05.04.2025).
11. <https://wysokienapiecie.pl/krotkie-spiecie/rz-d-ustali-minimalny-udzia-energii-z-oze-w-transporcie-na-9-2-w-2025-r> (dostęp 05.04.2025).
12. <https://www.arup.com/insights/how-a-layers-based-approach-can-help-design-more-sustainable-transport-infrastructure/> (dostęp 05.04.2025).
13. <https://www.forum-energii.eu/en/download/download/zrozumiec-cele-oze> (dostęp 05.04.2025).
14. <https://www.gramzielone.pl/woddor/20205629/pierwsza-w-polsce-ogolnodostepna-stacja-tankowania-wodoremlenu> (dostęp 05.04.2025).
15. <https://www.iea.org/reports/road-transport> (dostęp 05.04.2025).
16. https://www.krakow.pl/informacje/9538,27,komunikat,zielona_fala.html (dostęp 05.04.2025).
17. <https://www.oneearth.org/renewable-transport/> (dostęp 05.04.2025).
18. https://www.rees-journal.org/articles/rees/full_html/2021/01/rees210037/rees210037.html (dostęp 05.04.2025).
19. https://www.ue.katowice.pl/fileadmin/user_upload/wydawnictwo/SE_Artykuły_231_250/SE_249/14.pdf (dostęp 05.04.2025).

ENERGY SOURCES IN LOGISTICS AND TRANSPORT – ENERGY STORAGE AND GREEN INFRASTRUCTURE IN ROAD TRANSPORT AND URBAN LOGISTICS

The study presents issues related to sustainable transportation and logistics. In response to the challenges of decarbonization, we must focus on the development of renewable energy sources such as biofuels, electricity, and hydrogen, as well as investments in green transportation infrastructure.

Green road transport infrastructure, including waste management systems, sustainable design, and innovative solutions in cities like logistics microhubs, aims to improve environmental quality and reduce emissions. Energy storage systems, such as lithium-ion batteries and fuel cells, are also crucial as they enable the integration of renewable energy sources into the transport system, supporting the development of e-mobility and zero-emission deliveries.

Keywords: sustainable transportation and logistics, green infrastructure, energy storages, reduction of exhaust emissions.

SZTUCZNA INTELIGENCJA W LOGISTYCE 5.0 – WSPARCIE CZŁOWIEKA CZY ZASTĄPIENIE?

Niniejszy artykuł analizuje transformację logistyki w erze 5.0, skupiając się na roli sztucznej inteligencji w automatyzacji procesów. Przedstawia zarówno związane z tym korzyści (wzrost wydajności, redukcja emisji), jak i wyzwania (zmiany na rynku pracy, dylematy etyczne). Kluczowym obszarem jest relacja człowiek–technologia – czy AI zastąpi pracowników, czy stworzy nowe możliwości współpracy? Artykuł wskazuje na konieczność reskillingu i adaptacji do nowego modelu logistyki, w którym rola człowieka ogranicza się do nadzoru inteligentnych systemów.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, reskilling, Logistyka 5.0.

WSTĘP

Logistyka określa procesy pomagające ludziom w planowaniu, realizowaniu i kontrolowaniu transportu w optymalny sposób. Pojęcie logistyki jest stosowane już od lat 50. XX wieku. Słowo logistyka na początku oznaczało jedynie wprowadzenie podstawowej automatyzacji [4]. Na przestrzeni lat, w wyniku rewolucji przemysłowej, główne założenia logistyki pozostały niezmienione, jednak jej cechy oraz metody optymalizacji ulegały zmianom.

1. PODSTAWOWE POJĘCIA I PERSPEKTYWY

Sztuczna inteligencja (AI – *Artificial Intelligence*) to automatyzacja procesów poznawczych [10], natomiast reskilling to proces nabywania nowych umiejętności przez pracowników, który często wynika z postępu technologicznego i zmian gospodarczych. Z kolei Internet rzeczy (IoT – *Internet of Things*) to koncepcja integracji maszyn codziennego użytku z różnymi czujnikami i łącznością sieciową, co umożliwia zbieranie oraz przetwarzanie danych [3].

Logistyka to dziedzina uwzględniająca procesy [15]:

- planowania;
- realizowania;
- kontrolowania.

Działania logistyczne mogą obejmować m.in. obsługę klienta, prognozowanie popytu, przepływ informacji, czynności manipulacyjne i reparacyjne oraz realizowanie zamówień.

Chatbot – przykład systemu AI – jest jednym z najbardziej podstawowych oraz powszechnych przykładów interakcji człowiek–komputer. Chatbot to program komputerowy, który podczas rozmowy odpowiada jak inteligentna jednostka za pomocą tekstu dzięki przetwarzaniu języka naturalnego (NLP – *Natural Language Processing*) [2]. Sztuczna inteligencja w logistyce ma na celu optymalizację procesów transportowych, magazynowych oraz zarządzania łańcuchem dostaw. Wykorzystanie AI pozwala na zwiększenie efektywności, redukcję kosztów i poprawę precyzji w prognozowaniu popytu. Systemy oparte na AI są także pomocne w automatyzacji operacji, monitorowaniu dostaw w czasie rzeczywistym oraz minimalizacji błędów ludzkich.

Analiza dużych zbiorów danych przez AI, zarówno tych historycznych, jak i bieżących, umożliwia lepsze przewidywanie zapotrzebowania na produkty. Poprzez analizę danych można odpowiednio przygotować obiekt logistyczny do przewidywanych zamówień poprzez:

- optymalizację tras transportowych – algorytmy AI obliczają najkrótsze i najszybsze trasy dostaw, minimalizując koszty paliwa i czas transportu;
- wykorzystanie autonomicznych pojazdów i robotów magazynowych – samosterujące wózki AGV i drony pomagają w transporcie towarów w magazynach oraz w dostawach do klientów;
- zarządzanie zapasami – AI automatycznie monitoruje i uzupełnia stany magazynowe, eliminując nadmierne zapasy i braki towarów;
- automatyzację procesów logistycznych – chatboty i systemy AI wspomagają obsługę klienta, przetwarzanie zamówień i śledzenie przesyłek w czasie rzeczywistym.

W kolejnych etapach historycznych logistyka oraz stosowane metody zmieniały się i ewoluowały, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Etap przemiany logistyki

Aspekt	Rewolucja przemysłowa				
	Logistyka 1.0	Logistyka 2.0	Logistyka 3.0	Logistyka 4.0	Logistyka 5.0
Projektowanie sieci	Lokalnie zastosowane struktury	Globalnie zastosowane struktury	Częściowy lub pełny globalny system ERP	Otwarta i elastyczna przestrzeń robocza	Dostępność produktów we właściwym czasie, po odpowiednich kosztach, w potrzebnej lokalizacji
Logistyka transportu	Zdecentralizowane floty	Centralne lub predyktoryczne floty	Trasowanie w czasie rzeczywistym i nawigacja	Autonomiczne ciężarówki	Bezzałogowe pojazdy i drony
Logistyka zaopatrzeniowa	Proces dostawy typu „push”	Proces dostawy typu „pull”	Autonomiczne zarządzanie zapasami	Predyktoryczne zarządzanie logistyką dostaw (<i>Big Data</i>)	Ukierunkowanie łańcucha dostaw na klienta w połączeniu z inteligentnym społeczeństwem
Logistyka magazynowania	Brak automatyzacji	Automatyczny system magazynowy lub sieć magazynów	Sieć magazynów w łańcuchu dostaw	Brak magazynowania w łańcuchu dostaw	Magazyny z robotami działającymi jak ludzie i pracującymi w trybie ciągłym
Logistyka wewnętrzna	Ręcznie sterowany wagon	Ręczny wózek lub autonomiczne pojazdy transportowe	Naziemne autonomiczne pojazdy transportowe (AGV)	Autonomiczne pojazdy transportowe (AGV) sterowane przez maszyny produkcyjne	Samoregulujące i samokontrolujące się roboty
Logistyka dystrybucyjna	Proces dostawy na czas	Proces dostawy oparty na zamówieniach lub aktywna dostawa	Automatyczny proces dostawy	Predyktoryczne zarządzanie dostawami	Otrzymanie produktu w ciągu jednego dnia od zamówienia, zaufanie do zakupów i dostawy dzięki informacjom o sposobie realizacji dostawy

Źródło: [12].

Współczesna logistyka przechodzi głęboką transformację za sprawą AI, która przekształca tradycyjne modele operacyjne w zautomatyzowane, inteligentne ekosystemy [8]. Choć w niektórych obszarach AI jedynie wspomaga pracowników, w innych – takich jak automatyzacja procesów magazynowych – jej rola może niemal całkowicie wykluczyć udział człowieka.

Niewątpliwie AI zwiększa wydajność procesów logistycznych, jednak jej zastosowanie wciąż wymaga ludzkiego nadzoru. Technologia ta optymalizuje kluczowe obszary, w tym planowanie tras, zarządzanie zapasami czy prognozowanie popytu, co prowadzi do redukcji kosztów i czasu realizacji zleceń. Mimo to decyzje strategiczne, jak np. wybór dostawców w sytuacjach kryzysowych lub ocena jakości usług, nadal opierają się na doświadczeniu i intuicji człowieka, trudnej do zastąpienia przez algorytmy.

Jednocześnie upowszechnianie się rozwiązań opartych na AI wiąże się z redukcją miejsc pracy, szczególnie w sektorach wymagających niskich kwalifikacji. Proste, powtarzalne zadania, takie jak sortowanie towarów czy wprowadzanie danych, są coraz częściej wykonywane przez systemy autonomiczne. Według prognozy [8] do 2030 r. nawet 30% stanowisk magazynowych w krajach rozwiniętych może zostać zautomatyzowanych, co stawia przed branżą pytania o przyszłość zatrudnienia i konieczność przekwalifikowania pracowników.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Jednym z najbardziej powszechnych zastosowań AI są wszelkiego rodzaju chatboty, które w ogromny sposób zmieniły sposób porozumiewania się klientów z przedsiębiorcami. Wykorzystywane głównie w obsłudze klienta, chatboty często potrafią odpowiadać na zapytania użytkowników, prowadzić konwersacje na wyuczone tematy, jednak często rozwiązanie to nie jest dobrze odbierane ze względu na brak elementu ludzkiego [17].

AI znajduje też szerokie zastosowanie w sektorze logistycznym – optymalizuje trasy dostaw, przewiduje zapotrzebowanie i automatyzuje pracę. Jednym z kluczowych rozwiązań nowoczesnych centrach logistycznych są autonomiczne wózki AGV [5], które wykorzystują sztuczną inteligencję do samodzielnego poruszania się w przestrzeni magazynowej oraz transportu ładunku między strefami.

Oddzielnym zastosowaniem AI jest bieżąca analiza natężenia ruchu i wspomaganie zarządzania flotą pojazdów, po to by zminimalizować wszelkie możliwe do uniknięcia opóźnienia [7]. W obiektach magazynowych można wymienić następujące zastosowania AI:

1. systemy wizyjne i rozpoznawania obrazu:

- kontrola jakości,
- automatyczna kompletacja;

2. dynamiczne zarządzanie magazynem (WES – *Warehouse Execution System*):
 - systemy decydujące, czy zamówienie powinno być realizowane przez człowieka, czy przez robota;
3. predykcyjna konserwacja sprzętu:
 - analiza danych z czujników maszyn wraz z przewidywaniem awarii wózków czy taśmociągów, zanim nastąpi przestój.

2.1. Sztuczna inteligencja w logistyce – główne zastosowania

W dzisiejszych czasach AI jest na tyle rozwinięta, że może być wykorzystywana na niemal każdej płaszczyźnie. Głównymi zaletami AI w kontekście Logistyki 5.0 są odciążenie pracownika, przyspieszenie wykonywania operacji oraz zwiększenie dokładności wykonywania wszelakich procesów. W logistyce AI można wykorzystać w obszarach takich jak:

- prognozowanie popytu oraz optymalizacja zapasów – poprzez analizę historycznych danych sprzedażowych, trendów rynkowych, trendów sezonowych oraz danych geoprzestrzennych AI z wysoką dokładnością przewiduje popyt;
- optymalizacja tras magazynierów lub wózków AGV – poprzez stałą analizę oraz wykorzystanie np. algorytmów heurystycznych AI jest w stanie stale monitorować pozycje magazynierów oraz w odpowiedni sposób wyznaczać optymalne trasy, tak by jak najbardziej skrócić czas potrzebny na przetransportowanie ładunków w obiektach logistycznych;
- automatyzacja magazynów – przy użyciu AI oraz autonomicznych wózków jezdniowych i WMS możliwa jest częściowa automatyzacja magazynu;
- śledzenie przesyłek w czasie rzeczywistym – w wyniku połączenia z IoT sztuczna inteligencja jest w stanie śledzić przesyłki w czasie rzeczywistym oraz przewidywać ewentualne opóźnienia;
- konserwacja predykcyjna (*predictive maintenance*) – poprzez analizę danych z czujników w pojazdach i maszynach AI może przewidywać awarie oraz przypominać o serwisach;
- zarządzanie ryzykiem w łańcuchu dostaw – AI identyfikuje słabe punkty w łańcuchu dostaw oraz symuluje ewentualne sytuacje kryzysowe [14].

Wykorzystanie AI w logistyce nie jest futurystyczną wizją przyszłości, ale realnym udogodnieniem, które może odciążyć człowieka w jego pracy oraz przyspieszyć podejmowanie decyzji i wykonywanie zadań w obiekcie logistycznym. Poza faktem, że sztuczna inteligencja jest w stanie wykonywać wiele czynności samodzielnie, nie można jej traktować jako złotego środka, który nie popełnia żadnych błędów. Należy wyznaczyć odpowiednie osoby, które zajmą się kontrolowaniem zadań realizowanych przez AI oraz wychwytywaniem i korektą ewentualnych błędów.

2.2. Automatyzacja procesów magazynowych

Sztuczna inteligencja nadaje się przede wszystkim do wypełniania zadań monotonnych (w ramach procesów, w których stale wykonywane są takie same czynności) oraz takich, w których ludzie popełniają najwięcej błędów – AI pozwala zredukować błędy wynikające z czynnika ludzkiego. Jednym z przypadków, w których połączenie sztucznej inteligencji z pracą ludzką daje obiecujące efekty, jest automatyzacja procesów magazynowych. Przykładowe rozwiązania współpracy człowieka z AI w tym zakresie są następujące:

- eliminacja błędów przy użyciu zaawansowanych systemów, takich jak *Computer Vision*. Kody kreskowe przesyłek są skanowane w czasie rzeczywistym, dzięki czemu system wie, co powinno się znajdować w danej paczce. Na tej podstawie sprawdza, czy przesyłka została poprawnie i kompletnie spakowana;
- przyspieszenie pracy – poprzez wykorzystanie pojazdów autonomicznych, takich jak wózki AGV, obiekty logistyczne są w stanie transportować ładunki w trybie 24/7, podczas gdy pracownicy mogą się skupić na realizacji priorytetowych zadań, takich jak kontrola jakości czy obsługa klienta;
- zwiększenie wydajności – AI przy wykorzystaniu np. heurystyki jest w stanie optymalizować układ magazynu, co skraca czas poszukiwania asortymentu oraz odpowiednio segreguje ładunki, tak by były jak najłatwiejsze do znalezienia.

2.3. Personalizacja i obsługa klienta

Wiele firm wykorzystuje AI do personalizacji zamówień poprzez różne podejścia, jak np.:

- antycypacja logistyki – AI jest wykorzystywana do przewidywania zamówień na podstawie historii przeglądania produktów, lokalizacji oraz sezonowości. Poprzez taką analizę towary są magazynowane bliżej potencjalnego klienta, co może skrócić czas dostawy nawet do kilku godzin;
- personalizacja opakowania – firmy wykorzystują AI do projektowania opakowań dostosowanych do indywidualnych potrzeb klienta lub wyposażonych w dodatkowe zabezpieczenia, jak np.:
 - zabezpieczenia niezbędne w przypadku transportu delikatnych elementów,
 - inteligentne opakowania z wbudowanymi czujnikami IoT, które są w stanie stale monitorować parametry przesyłki (np. analizować, czy zawarta w niej żywność utrzymuje świeżość) oraz jej lokalizację [9],
 - zabezpieczenia antykradzieżowe,
 - spersonalizowany wygląd opakowania.

3. WSPÓŁPRACA CZY KONKURENCJA?

Logistyka 5.0 jest kolejnym etapem postępu przemysłu i stanowi odpowiedź na narastające wyzwania związane z coraz większą ilością danych oraz błędów popełnianych przez człowieka. Logistyka 5.0 skupia się na synergii człowieka z AI, a nie na wykluczeniu czynnika ludzkiego [15]. W tym koncepcie, aby najlepiej wykorzystać możliwości ludzi oraz AI, należy połączyć kreatywność ludzką z całym potencjałem AI. Sztuczną inteligencję warto również stosować w obszarach, w których występuje duża liczba danych i zmiennych, z czym człowiek nie byłby w stanie sobie poradzić w sprawny i poprawny sposób w czasie, w jakim zrobiłaby to AI. Natomiast praca człowieka jest niezbędna w obszarach takich jak bezpośredni kontakt z klientem (gdzie empatia i intuicja są niezastąpione) bądź różnego rodzaju awarie.

3.1. Zmiany w środowisku pracy

W momencie wprowadzenia Logistyki 5.0 do przedsiębiorstw potrzebne będzie nabycie nowych umiejętności przez pracowników, tak aby mogli oni w pełni zrozumieć, jak działa sztuczna inteligencja oraz w jaki sposób należy z niej korzystać. Dlatego istotne będzie przeszkolenie pracowników w zakresie:

- analizy danych;
- zarządzania systemami autonomicznymi;
- cyfrowej współpracy.

3.2. Ryzyko zastąpienia

Celem Logistyki 5.0 nie jest zastąpienie człowieka przez AI, ale połączenie ich różnych możliwości w różnych obszarach w celu wykorzystania w jak największym stopniu potencjału człowieka i AI [6]. Chociaż niektóre miejsca pracy mogą zostać zastąpione przez AI, to jednak powstaną nowe, związane z jej obsługą [11].

Warto pamiętać, że przy każdej rewolucji technologicznej jedne zawody zanikają, a inne powstają. Dlatego nie należy postrzegać wdrażania AI wyłącznie przez pryzmat utraty miejsc pracy. Z historii znamy już przypadki, kiedy pracownicy tracili zatrudnienie za sprawą mechanizacji, później natomiast tworzyły się dzięki temu nowe zawody, takie jak operator maszyn oraz liczne nowe miejsca pracy. W dzisiejszych czasach chcemy zastąpić przez AI pracę ludzką cechującą się wysoką powtarzalnością, częstym występowaniem błędów ludzkich czy też koniecznością analizy wielu czynników jednocześnie. Warto raz jeszcze podkreślić, że Logistyka 5.0 koncentruje się na połączeniu kompetencji człowieka oraz sztucznej inteligencji, a nie całkowitym zastąpieniu pracy ludzkiej przez AI.

4. WYZWANIA I DYLEMATY ETYCZNE

4.1. Etyka sztucznej inteligencji w logistyce

Wdrożenie AI w logistyce niesie ze sobą szereg wyzwań i dylematów etycznych, które mają istotne znaczenie zarówno dla przedsiębiorstw, jak i dla społeczeństwa.

Jednym z kluczowych problemów jest odpowiedzialność za decyzje podejmowane przez algorytmy, które w coraz większym stopniu zarządzają procesami transportowymi, magazynowymi i dystrybucyjnymi [3]. Systemy te przetwarzają ogromne ilości danych, co może powodować brak pewności co do ich decyzji, jak również rosnący brak ich zrozumienia.

Dodatkowy problem stanowi etyczne zarządzanie danymi wykorzystywanymi przez AI. Sztuczna inteligencja często operuje ważnymi danymi dotyczącymi klientów, dostawców i kontrahentów. Dylematem związanym z tą sytuacją pozostaje sposób, w jaki AI ma gromadzić i przechowywać te dane oraz nimi zarządzać [16].

4.2. Bariery prawne i technologiczne

Wiele magazynów używa przestarzałego systemu WMS, nieprzystosowanego do pracy z AI, co wymaga kosztownej i czasochłonnej modernizacji, biorąc pod uwagę fakt, że duże ilości przetwarzanych danych potrafią być niekompatybilne lub rozproszone między podsystemami. Główne wyzwania w poszczególnych obszarach prawnych dotyczących zastosowania AI przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Bariery prawne zastosowań sztucznej inteligencji

Obszar prawny	Główne wyzwania	Aktualny stan regulacji
Odpowiedzialność	Atrybucja odpowiedzialności za błędy AI	Brak jednolitych przepisów
Ochrona danych	Zgodność z RODO	Wymagana adaptacja systemowa
Bezpieczeństwo	Certyfikacja systemów autonomicznych	Rozwijające normy ISO
Prawo pracy	Redefinicja stanowisk i obowiązków	Brak kompleksowych rozwiązań

Źródło: opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Napędzana sztuczną inteligencją transformacja logistyki w erze 5.0 jest jednocześnie źródłem nadziei i niepokoju [15]. Mimo wyzwań, jakim należy sprostać dla osiągnięcia celów Logistyki 5.0, można wyodrębnić znaczące korzyści płynące z takiego rozwoju logistyki. Główne wyzwania to:

- zmiany w rynku pracy;
- bariery technologiczne i prawne;
- dylematy etyczne.

Korzyści zaś są następujące:

- redukcja błędów;
- personalizacja usług;
- wzrost wydajności.

Aby w pełni wykorzystać potencjał Logistyki 5.0, konieczne jest równoważenie automatyzacji z udziałem człowieka – AI powinna wspierać pracowników, a nie ich zastępować. Przedsiębiorstwa muszą inwestować w szkolenia, modernizację infrastruktury oraz etyczne standardy wykorzystania sztucznej inteligencji [8]. Tylko synergia między elementem ludzkim a precyzją AI umożliwia osiągnięcie zrównoważonego rozwoju w tym sektorze.

LITERATURA

1. Abbass H., *Editorial: What is Artificial Intelligence?*, IEEE Transactions of Artificial Intelligence 2021, 2(2), s. 94–95.
2. Adamopoulou E., Moussiades L., *An overview of chatbot technology*, Artificial Intelligence Applications and Innovations 2020, 584, s. 373–383.
3. Amitabh B., Deepshikha B., Naveen Kumar P., Guna S., Samrat R., *Industrial IoT and AI implementation in vehicular logistics and supply chain management for vehicle mediated transport systems*, International Journal of System Assurance Engineering and Management 2022, 13(1), s. 673–680.
4. Carayannis E.G., Dezi L., Gregori G., Calò E., *Smart environments and techno-centric and human-centric innovations for Industry and Society 5.0: a Quintuple Helix innovation system view towards smart, sustainable, and inclusive solutions*, Journal of the Knowledge Economy 2022, 13, s. 926–955.
5. Cservenák Á., Husár J., *A multidisciplinary learning model using AGV and AMR for Industry 4.0/5.0 laboratory courses: a study*, Applied Sciences 2024, 14(17), 7965.
6. Doyle-Kent M., Kopacek P., *Do we need synchronization of the human and robotics to make Industry 5.0 a success story*, International Symposium for Production Research, ISPR 2020, s. 302–311.
7. Gadde H., Raza F., *AI-augmented database management systems for real-time data analytics*, Revista de Inteligencia Artificial en Medicina 2024, 15(1).

8. Jefroy N., Azarian M., Yu H., *Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: what are the implications for smart logistics?*, Logistics 2022, 6(2), 26.
9. Khan A.A., Laghari A.A., Awan S.A., *Machine Learning in Computer Vision: a review*, EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems 2021, DOI: 10.4108/eai. 21-4-2021.169418.
10. Kumar R., Gupta P., Singh S., Jain D., *Human empowerment by Industry 5.0 in digital era: analysis of enablers*, [w:] *Advances in industrial and production engineering. Select Proceedings of FLAME*, red. R.K. Phanden i in., Springer 2021, s. 401–410.
11. Matindoust S., Nejad M.B., Shahrokh Abadi M.H., Zou Z., Zheng L.R., *Food quality and safety monitoring using gas sensor array in intelligent packaging*, Sensor Review 2016, 36(2), s. 169–183.
12. Oran I.B., Cezayirlioglu H.R., *AI – robotic applications in logistics industry and savings calculation*, Journal of Organizational Behavior Research 2021, 6(1), s. 148–165.
13. Ortner P., Steinhofler R., Leitgeb E., Fluhr H., *Augmented air traffic control system – Artificial Intelligence as digital assistance system to predict air traffic conflicts*, AI 2022, 3(3), s. 623–644.
14. Richey R.G. Jr., Chowdhury S., Davis-Sramek B., Giannakis M., Dwivedi Y.K., *Artificial Intelligence in logistics and supply chain management: a primer and roadmap for research*, Journal of Business Logistics 2023, 44(4), s. 532–549.
15. Sabra S., Allahham M., Al-Daradakah Y., *The mediating role of adaptive logistics. The transformational impact of artificial intelligence on industry 5.0*, Library of Progress-Library Science, Information Technology & Computer 2024, 44(3), 13934.
16. Siau K.L., Wang W., *Artificial Intelligence (AI) ethics: ethics of AI and ethical AI*, Journal of Database Management 2020, 31(2), s. 74–87.
17. Wailthare S., Gaikwad T., Khadse K., Dubey P., *Artificial Intelligence based chat-bot*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2018, 5(3), s. 1060–1062.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LOGISTICS 5.0 – SUPPORT FOR HUMANS OR REPLACEMENT?

This article examines the transformation of logistics in the era of 5.0, focusing on the role of Artificial Intelligence in process automation. It presents both the benefits (increased efficiency, reduced emissions) and challenges (labor market shifts, ethical dilemmas). A key area of discussion is the human-technology relationship – will AI replace workers, or will it create new opportunities for collaboration? The article is based on literature reviews and case studies (including Amazon and DHL), highlighting the need for reskilling and adaptation to a new logistics model where humans oversee intelligent systems.

Keywords: *Artificial Intelligence, reskilling, Logistics 5.0.*

NOWOCZESNE TECHNOLOGIE ŚLEDZENIA PRZESYŁEK – OD RFID DO SYSTEMÓW PREDYKCYJNYCH

W niniejszym artykule przedstawiono najnowsze technologie dotyczące śledzenia przesyłek. Omówiono kluczowe systemy, takie jak RFID, AIDC, GPS czy IoT. Cele pracy obejmują analizę i ocenę tych nowoczesnych technologii pod kątem ich skuteczności, dokładności oraz wpływu na optymalizację procesów logistycznych. Przedstawiono zarówno tradycyjne rozwiązania, jak i najnowsze systemy predykcyjne wykorzystujące sztuczną inteligencję oraz Big Data. Przeprowadzono ocenę punktową analizy SWOT, a także analizę porównawczą, na podstawie których zidentyfikowano najważniejsze determinanty. Omówiono także wyzwania związane z implementacją tych technologii oraz ich przyszły rozwój w kontekście automatyzacji i cyfryzacji łańcucha dostaw.

Słowa kluczowe: przesyłki, RFID, GPS, IoT, łańcuch dostaw, technologie, AIDC, AI.

WSTĘP

W dobie intensywnej cyfryzacji oraz postępujących procesów globalizacyjnych współczesna logistyka staje w obliczu wielu wyzwań wynikających z rosnącego zapotrzebowania na szybkie, precyzyjne i niezawodne dostawy. Równolegle dynamiczny rozwój technologii cyfrowych wpływa na konieczność dostosowywania i modernizacji tradycyjnych modeli operacyjnych. W warunkach silnej konkurencji rynkowej oraz rosnących oczekiwań klientów przedsiębiorstwa logistyczne zmuszone są do systematycznej optymalizacji swoich procesów w celu zapewnienia wysokiej efektywności operacyjnej przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów działalności. Istotnym elementem tych działań jest implementacja zaawansowanych systemów śledzenia przesyłek, umożliwiających monitorowanie ładunków w czasie rzeczywistym, prognozowanie ewentualnych opóźnień oraz zwiększenie poziomu bezpieczeństwa w transporcie. Tradycyjne metody monitorowania przesyłek, oparte m.in. na wykorzystaniu kodów kreskowych bądź ręcznym wprowadzaniu danych do systemów informatycznych, są stopniowo wypierane przez nowoczesne rozwiązania technologiczne. Do najważniejszych spośród nich należą: RFID (*Radio-Frequency Identification*), IoT (*Internet of Things*), AIDC (*Automatic Identification and Data Capture*), systemy GPS (*Global Positioning System*) oraz sztuczna inteligencja (AI – *Artificial Intelligence*). Technologie te przyczyniają się do istotnej poprawy efektywności operacyjnej, umożliwiają minimalizację błędów oraz optymalizację funkcjonowania łańcucha dostaw. W niniejszym opracowaniu dokonano analizy

wybranych technologii śledzenia przesyłek, wskazano ich kluczowe zalety oraz omówiono potencjalne kierunki ich zastosowania w nowoczesnych systemach logistycznych [5].

1. KIERUNKI ROZWOJU LOGISTYKI

1.1. Wzrost znaczenia logistyki i e-commerce

Dynamiczny rozwój rynku *e-commerce* w ostatnich latach czyni go jednym z najbardziej atrakcyjnych obszarów działalności dla podmiotów logistycznych. Dotyczy to zarówno firm o długoletnim doświadczeniu w branży, jak i nowych graczy, którzy dostrzegają potencjał obsługi małych przesyłek w segmentach B2B i B2C. Rosnąca liczba zamówień internetowych implikuje konieczność zapewnienia skutecznego wsparcia logistycznego na wszystkich etapach realizacji zamówienia, w tym także w zakresie obsługi zwrotów, reklamacji oraz wymiany towarów. Usługi te stają się kluczowym elementem umożliwiającym rozwój zarówno krajowego, jak i transgranicznego handlu elektronicznego. Warto zauważyć, że jednym z głównych czynników wpływających na decyzje zakupowe klientów internetowych są kwestie związane z logistyką. Najczęściej wskazywanymi przyczynami rezygnacji z zakupów online są: zbyt wysokie koszty dostawy, długi czas oczekiwania na przesyłkę oraz nieprzejrzysta polityka zwrotów – zwłaszcza brak możliwości darmowego zwrotu. Są to bariery istotne również w przypadku zakupów w zagranicznych sklepach internetowych, które utrudniają rozwój e-handlu na poziomie międzynarodowym.

Czynniki ekonomiczne odgrywają istotną rolę w kształtowaniu usług logistycznych dla segmentu B2C. Przykładem może być globalny kryzys gospodarczy oraz związane z nim spowolnienie wzrostu polskiej gospodarki w latach 2008–2010, które przyczyniły się do zmian zarówno w wolumenie przesyłek kurierskich, ekspresowych i paczkowych (KEP), jak i w strukturze zapotrzebowania na usługi logistyczne [1].

Z jednej strony nastąpiło wyhamowanie tempa wzrostu liczby przesyłek krajowych i międzynarodowych, z drugiej – wzrósł popyt na tańsze formy zakupów online oraz ekonomiczne usługi logistyczne, kosztem usług premium. W odpowiedzi na te zmiany wielu operatorów KEP, w poszukiwaniu nowych ścieżek rozwoju i efektywnego wykorzystania posiadanego potencjału oraz infrastruktury, zdecydowało się na rozszerzenie działalności o segment B2C. Choć obsługa klienta indywidualnego wiąże się z większymi wyzwaniem operacyjnymi, jak konieczność realizacji wielu dostaw w rozproszonych lokalizacjach, często w godzinach popołudniowych, to jednocześnie stanowi ona obiecujący kierunek rozwoju. Wyzwania związane z obsługą rynku B2C skłoniły operatorów logistycznych do wdrażania innowacyjnych rozwiązań mających na celu optymalizację

kosztów oraz poprawę efektywności doręczeń. Przykładami takich działań są: wprowadzenie dostaw do punktów odbioru, automatyzacja procesów, a także rozszerzenie funkcjonalności istniejących usług – m.in. poprzez umożliwienie klientom zmiany miejsca i terminu doręczenia przesyłki za pośrednictwem platform internetowych.

1.2. Rozwój technologii

Ewolucja technologii śledzenia przesyłek odzwierciedla szersze trendy w automatyzacji, cyfryzacji i inteligentnym zarządzaniu danymi. Początkowo wykorzystywano proste systemy oparte na kodach kreskowych, które wymagały manualnego skanowania w określonych punktach kontrolnych. Następnie na szeroką skalę zaczęto wdrażać technologię RFID, pozwalającą na automatyczną identyfikację paczek bez bezpośredniego kontaktu. Kolejnym krokiem było wprowadzenie systemów opartych na lokalizacji GPS i IoT, które umożliwiają śledzenie przesyłek w czasie rzeczywistym oraz zbieranie dodatkowych danych (np. o temperaturze czy wilgotności w transporcie). Obecnie obserwujemy silny rozwój systemów predykcyjnych wykorzystujących sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe. Dzięki nim istnieje możliwość nie tylko monitorowania, ale też przewidywania opóźnień, optymalizacji tras czy automatycznego informowania klientów o czasie dostawy z dokładnością do godzin. Kierunek ten prowadzi do jeszcze większej automatyzacji, personalizacji obsługi klienta i minimalizacji ryzyka operacyjnego w łańcuchach dostaw.

2. TECHNOLOGIE ŚLEDZENIA PACZEK

2.1. RFID (*Radio-Frequency Identification*)

RFID jest jedną z najstarszych technologii śledzenia przesyłek. Wykorzystuje ona fale radiowe do bezprzewodowej identyfikacji i śledzenia ładunku oraz do przesyłu danych pomiędzy tagami a czytnikami. Ma wiele zalet, wśród których można wyróżnić szerokie pole odczytu danych, zmniejszenie możliwości wystąpienia błędów, możliwość jednoczesnego odczytu wielu etykiet bądź monitoring w czasie rzeczywistym. Dzięki temu przedsiębiorstwo jest w stanie w znacznym stopniu obniżyć koszty, ponieważ zwiększa efektywność zarządzania ładunkiem [6].

2.2. IoT (*Internet of Things*)

IoT pozwala na inteligentne monitorowanie przesyłek w czasie rzeczywistym. Urządzenia komunikują się bowiem ze sobą w ramach istniejącej infrastruktury (Internetu) bez konieczności interwencji człowieka. Technologia ta jest kolejnym krokiem w ewolucji śledzenia przesyłek, ponieważ oferuje możliwość monitorowania nie tylko lokalizacji (jak w przypadku klasycznych metod

identyfikacji), ale także warunków transportu przesyłki, tj. temperatury i wilgotności transportowanych dóbr lub występowania wibracji i potencjalnych uszkodzeń w czasie transportu [3]. IoT zwiększa więc bezpieczeństwo i jakość dostaw, gdyż pozwala na niemal natychmiastowe wykrycie nieprawidłowości i szybką reakcję na awarie.

2.3. System GPS (*Global Positioning System*)

System GPS jest jedną z najczęściej stosowanych technologii w logistyce i organizacji transportu. Wykorzystuje ona satelity do określania położenia danej przesyłki. Satelity te umieszczone są na orbicie okołoziemskiej i wysyłają sygnały do odbiorników na powierzchni Ziemi. Odbiornik przetwarza te sygnały i na podstawie różnic czasowych w ich odbiorze oblicza dokładną pozycję geograficzną. Do zalet technologii należą więc monitorowanie lokalizacji w czasie rzeczywistym, globalny zasięg, optymalizacja tras, redukcja strat i zagubionych przesyłek oraz integracja z innymi technologiami [2].

2.4. AIDC (*Automated Identification and Data Capture*)

Technologia automatycznej identyfikacji i techniki przechwytywania danych, znana jako AIDC, stosowana jest w logistyce od lat, lecz dopiero jej rozwój w ostatniej dekadzie przyczynił się do zwiększenia efektywności całych łańcuchów dostaw. Firmy logistyczne coraz chętniej wdrażają zaawansowane systemy AIDC, które dostarczają im aktualizacje statusu przesyłki w trakcie trwania całego procesu transportowego. Oprócz przekazywania danych technologia znajduje zastosowanie również w analizie już opracowanych i istniejących procesów logistycznych oraz w szukaniu alternatywnych sposobów dostarczenia ładunku [7].

2.5. AI (*Artificial Intelligence*)

Sztuczna inteligencja jest doskonałym narzędziem do przetwarzania ogromnych ilości danych z różnych źródeł. Jej algorytmy potrafią analizować dane, uczyć się na podstawie tych zgromadzonych i podejmować decyzje w czasie rzeczywistym, dzięki czemu możliwa jest optymalizacja procesów transportowych i dystrybucyjnych [4]. AI integruje się z innymi technologiami śledzenia przesyłek, tworząc zaawansowane systemy logistyczne, które wspierają dokładność procesów i zwiększają ich efektywność.

3. ANALIZA DHL

Zastosowanie nowoczesnych technologii śledzenia przesyłek nie jest jedynie teoretycznym postulatem, lecz praktyką operacyjną stosowaną przez globalnych liderów sektora logistycznego. Jednym z nich jest firma DHL, która regularnie publikuje raporty branżowe i analizuje w nich wpływ innowacji technologicznych na funkcjonowanie sektora TSL. W przedstawionej w dalszej części artykułu analizie tych materiałów można zauważyć wyraźną zmianę kierunku rozwoju współczesnej logistyki – z modeli tradycyjnych na modele predykcyjne. W nowym podejściu kluczową rolę odgrywają przetwarzanie danych oraz ich zaawansowana analiza przy wykorzystaniu algorytmów sztucznej inteligencji. Takie połączenie wyznacza nowy poziom zarządzania oparty na pełnej automatyzacji procesów i integracji różnych źródeł danych w ramach jednego spójnego ekosystemu cyfrowego.

3.1. *The DHL logistics trend radar 7.0*

Raport *The DHL logistics trend radar 7.0*, opublikowany we wrześniu 2024 roku, stał się jednym z najważniejszych opracowań prognostycznych dotyczących przyszłości sektora logistycznego. DHL identyfikuje w nim 40 kluczowych trendów kształtujących przyszłość logistyki, z naciskiem na rosnące znaczenie AI i zrównoważonego rozwoju. Wśród trendów związanych z AI wyróżniono m.in. generatywną AI, audio AI oraz zaawansowaną analizę danych [9]. Raport promuje jednak elastyczne podejście do wdrażania innowacji, to znaczy w sposób dostosowany do specyfiki i potrzeb danego przedsiębiorstwa, tak by w sposób efektywny i bez zakłóceń móc zintegrować rozwiązania technologiczne z już istniejącymi strukturami. Publikacja ta przybrała zatem formę narzędzia strategicznego dla firm z sektora logistyki i transportu. Nie tylko wskazuje na najważniejsze trendy, lecz także identyfikuje obszary wymagające modernizacji lub dostosowania do zmieniającej się sytuacji na rynku [9].

3.2. *The real value of IoT in supply chains*

Raport *The real value of IoT in supply chains* analizuje praktyczne zastosowanie Internetu rzeczy w logistyce i jego wpływ na globalne łańcuchy dostaw. Ukazuje IoT jako kluczowy element transformacji cyfrowej logistyki, wyjaśnia potencjał technologii oraz przedstawia scenariusze wdrożeń i korzyści wynikających z integracji z innymi systemami logistycznymi. Autorzy publikacji podkreślają, że wartość IoT nie zawiera się wyłącznie w zbieraniu danych, ale przede wszystkim w ich umiejętnym wykorzystaniu [10]. Technologia ta została przedstawiona jako fundament logistyki predykcyjnej, w której dane są podstawą zarówno do automatycznego podejmowania decyzji, jak i do eliminowania zagrożeń [8]. Wskazano, że IoT jest już nie tyle innowacją technologiczną, co czynnikiem, który kreuje model działania niejednego przedsiębiorstwa logistycznego.

3.3. Podsumowanie analizy raportów

Analiza obu raportów prowadzi do jednoznacznych wniosków na temat rosnącego znaczenia technologii w logistyce i zarządzaniu łańcuchami dostaw. Prezentują one nie tylko potencjalne, ale również te już istniejące korzyści wynikające z wprowadzania i integracji technologii z procesami operacyjnymi. Dzięki możliwościom monitorowania w czasie rzeczywistym oraz automatycznego przesyłania danych przedsiębiorstwa są w stanie osiągnąć pełną widoczność, a zarazem kontrolę operacyjną, co wpływa bezpośrednio na redukcję kosztów, poprawę terminowości dostaw i zwiększenie elastyczności całego łańcucha dostaw. Zatem podsumowując, można stwierdzić, że technologie takie jak IoT czy AI nie tylko usprawniają codzienne działania operacyjne, ale także stanowią kluczowy element w budowaniu nowoczesnych i transparentnych systemów logistycznych.

4. ANALIZA SWOT

Bazując na analizie interdyscyplinarnych aspektów wpływających na śledzenie przesyłek, przeprowadzono ocenę punktową analizy SWOT jako kluczowego elementu. Celem analizy było oszacowanie wpływu implementacji nowych technologii na funkcjonowanie przedsiębiorstw. Zgodnie z metodologią analizy SWOT wyznaczono mocne i słabe strony wdrażania technologii oraz związane z nią szanse i zagrożenia. Aby określić najlepszą strategię wdrażania nowych technologii, każdemu czynnikowi przypisano wartość liczbową odzwierciedlającą jego wagę i znaczenie w skali 1–5. Wyniki tej oceny zaprezentowano w tabelach 1–4.

Tabela 1

Mocne strony – analiza SWOT

Lp.	Mocne strony	Skala (1–5)
1	Zwiększona efektywność dzięki implementacji nowych technologii	5
2	Precyzyjne monitorowanie przesyłek	5
3	Optymalizacja procesów logistycznych	4
4	Zwiększenie bezpieczeństwa dotyczącego kradzieży i zagubienia przesyłek	3
	SUMA	4,25/5

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2

Słabe strony – analiza SWOT

Lp.	Słabe strony	Skala (1–5)
1	Początkowe wysokie koszty wdrożenia	5
2	Trudności związane z integracją nowych technologii z już istniejącymi systemami	4
3	Ograniczenia technologiczne, np. zasięg	3
4	Zależność od ilości danych	3
	SUMA	3,75/5

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3

Szanse – analiza SWOT

Lp.	Szanse	Skala (1–5)
1	Rozwój rynku <i>e-commerce</i>	5
2	Innowacje technologiczne, np. AI, 5G, <i>blockchain</i>	5
3	Globalizacja łańcuchów dostaw	4
4	Wzrost oczekiwań klientów	4
	SUMA	4,5/5

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4

Zagrożenia – analiza SWOT

Lp.	Zagrożenia	Skala (1–5)
1	Bezpieczeństwo danych	5
2	Zmieniające się regulacje prawne	3
3	Cyberzagrożenia	5
4	Uzależnienie od technologii	4
	SUMA	4,25/5

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowując przeprowadzoną analizę, można wnioskować, że firmy powinny inwestować w modernizację technologii śledzenia przesyłek, biorąc pod uwagę ich przyszły potencjał w poprawie efektywności i jakości obsługi klienta. Przy tym należy się skupić na odpowiednim zabezpieczeniu danych i zgodności z przepisami dotyczącymi prywatności, aby minimalizować ryzyko związane z bezpieczeństwem. Warto rozważyć również etapowe wdrażanie potencjalnych technologii, zaczynając od prostszych rozwiązań, tak by zminimalizować koszty początkowe i ryzyko związane z integracją z aktualnymi systemami.

5. ANALIZA PORÓWNAWCZA

W przeprowadzonej przez nas analizie porównawczej wzięliśmy pod uwagę analizowane przez nas wcześniej technologie: system GPS, RFID, IoT, AIDC oraz systemy predykcyjne. Uwzględniliśmy kilka kluczowych aspektów, m.in. dokładność, koszty i zakres działań. Poniższa analiza ma na celu identyfikację

najlepszych rozwiązań, wskazanie największej efektywności oraz wytyczenie potencjalnych kierunków rozwoju.

Tabela 5

Analiza porównawcza nowoczesnych technologii

Kryterium	RFID	GPS	AIDC	IoT	AI
Zakres działania	Średni, głównie magazyny i centra logistyczne	Globalny, działa na całym świecie	Magazyny, punkty kontrolne	Globalny, dzięki sieci urządzeń	Zależny od dostępnych danych
Dokładność/ zasięg	Od kilku centymetrów do kilkudziesięciu metrów	Od kilku metrów do kilku centymetrów	Bardzo duża dokładność na małych dystansach	Wysoka dokładność dzięki integracji czujników	Zależne od danych
Zakres zastosowania	Magazyny, produkcja, transport, kontrola zapasów	Transport, śledzenie w czasie rzeczywistym	Inwentaryzacja, zarządzanie danymi, automatyzacja procesów	Śledzenie łańcucha dostaw, transport, zarządzanie flotą	Optymalizacja tras, predykcja opóźnień, analiza ryzyka
Koszty	Średnie, zależne od liczby tagów i czytników	Średnie, konieczność posiadania nadajników i subskrypcji	Niskie, np. kody kreskowe są tanie, RFID droższe	Średnie/ wysokie, zależne od infrastruktury	Wysokie, konieczność wykonywania zaawansowanej analizy i obliczeń
Zalety	Szybkie skanowanie, możliwość automatyzacji, brak potrzeby widoczności urządzeń	Globalny zasięg, śledzenie w czasie rzeczywistym	Uniwersalność, niski koszt, łatwa implementacja	Wysoka dokładność, dostęp do danych w czasie rzeczywistym	Optymalizacja procesów, analiza danych, podejmowanie decyzji w oparciu o AI
Wyzwania	Ograniczony zasięg, zakłócenia sygnału	Wymaga dostępu do sieci satelitarnej, wysoki koszt energii	Może wymagać ręcznej interwencji, nie zawsze działa w trudnych warunkach	Wysokie koszty wdrożenia, wymaga integracji z innymi systemami	Wymaga dużych ilości danych i dużej mocy obliczeniowej
Przykłady zastosowań	Śledzenie paczek w magazynach, automatyczna identyfikacja produktów	Monitorowanie transportu, śledzenie pojazdów	Kody kreskowe na paczkach, skanowanie dokumentów	Inteligentne śledzenie przesyłek, monitorowanie warunków transportu	Predykcja dostaw, inteligentne zarządzanie logistyką
Funkcje dodatkowe	Możliwość integracji z systemami ERP/ WMS	Geofencing, alerty o zmianie lokalizacji	Integracja z OCR i innymi systemami	Monitorowanie temperatury, wilgotności itp.	Zaawansowana analiza predykcyjna, automatyczna optymalizacja tras

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowując przeprowadzoną analizę, warto zauważyć, że RFID i AIDC sprawdzają się w magazynach i centrach dystrybucyjnych, natomiast GPS i IoT odgrywają kluczową rolę w monitorowaniu przesyłek w ruchu. Jeśli chodzi o koszty, to najwyższe są generowane przez AI + *Big Data* oraz IoT, ponieważ systemy te wymagają zaawansowanej infrastruktury, ale za to zapewniają największą automatyzację i optymalizację procesów. GPS jest natomiast niezaśmiany w globalnym śledzeniu, jednak wiąże się z wysokimi kosztami transmisji i zależnością od sygnału satelitarne. RFID oraz kody kreskowe są efektywne, ale mają ograniczony zasięg, wymagają istnienia punktów kontrolnych i nie pozwalają na ciągłe śledzenie przesyłek. Największą efektywność naszym zdaniem daje integracja różnych technologii, np. RFID do identyfikacji, a IoT do monitorowania warunków transportu. Dzięki odpowiedniemu doborowi i połączeniu technologii przedsiębiorstwa mogą zwiększać efektywność, redukować koszty i lepiej kontrolować proces dostaw.

PODSUMOWANIE

Współczesna logistyka stoi przed szeregiem wyzwań wynikających z globalizacji, rosnących oczekiwań klientów oraz potrzeby optymalizacji łańcuchów dostaw. W odpowiedzi na te wyzwania coraz większe znaczenie zyskują nowoczesne systemy śledzenia przesyłek, które dzięki wykorzystaniu technologii takich jak RFID, IoT, GPS, AIDC czy AI umożliwiają monitorowanie i zarządzanie przepływem towarów w czasie rzeczywistym.

Analiza dostępnych raportów branżowych, w tym *The DHL logistics trend radar 7.0* [9] oraz *The real value of IoT in supply chains* [10], wskazuje jednoznacznie na postępującą cyfryzację logistyki oraz wzrost znaczenia danych jako kluczowego zasobu w procesie decyzyjnym. Zastosowanie zaawansowanych narzędzi analitycznych pozwala nie tylko na zwiększenie efektywności operacyjnej, ale także na budowanie odporności łańcucha dostaw na zakłócenia.

Przeprowadzona analiza SWOT wykazała, że wdrażanie nowoczesnych systemów monitorowania przesyłek przynosi znaczące korzyści, przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu potencjalnych zagrożeń. Systemy te stanowią istotny element transformacji cyfrowej sektora TSL i są nieodzownym komponentem strategii zrównoważonego i innowacyjnego rozwoju przedsiębiorstw logistycznych.

LITERATURA

1. Cichosz M., Pluta-Zaremba A., *Wpływ turbulentnego otoczenia na funkcjonowanie łańcuchów dostaw – przykład branży KEP*, International Journal of Management and Economics 2011, 31, s. 78–98.

2. Fajczak-Kowalska A., Kowalska M., *Trendy i perspektywy rozwoju e-commerce w Polsce*, [w:] *Paradygmaty zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw logistycznych. E-logistyka*, red. D. Tokarski, A. Fajczak-Kowalska, Społeczna Akademia Nauk, Łódź 2023, s. 115–128.
3. Jones E.C., *Supply chain engineering and logistics. Handbook*, CRC Press, Boca Raton 2019.
4. Korczak J., Kijewska K., *Automatyczna identyfikacja w logistyce – szanse i zagrożenia*, Materiały Konferencyjne Konferencja KZZ, Zakopane 2009, s. 34–39.
5. Rusek D., Pniewski R., *Nowoczesne technologie IT stosowane w logistyce*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2016, 17(12), s. 1654–1657.
6. Shi Y.D., Pan Y.Y., Lang W.M., *The RFID application in logistics and supply chain management*, Research Journal of Applied Sciences 2009, 4(1), s. 57–61.
7. Šeba J., Hruška R., Švadlenka L., *Analysis of automatic identification and data capture systems use in logistics*, Logi – Scientific Journal on Transport and Logistics 2016, 7(1), s. 124–135.

Źródła internetowe

8. <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-internet-of-things-trend-report.pdf>
9. <https://www.dhl.com/discover/en-global/news-and-insights/reports-and-press-releases/logistics-trend-radar-2024>
10. <https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/the-value-of-iot-in-supply-chains.html>

MODERN SHIPMENT TRACKING TECHNOLOGIES – FROM RFID TO PREDICTIVE SYSTEMS

The study presents the latest technologies for tracking parcels. Key systems such as RFID, AIDC, GPS and IoT are discussed. The aim of the article is to analyze and evaluate these modern technologies for tracking parcels in terms of their effectiveness, accuracy and impact on the optimization of logistics processes. Both traditional solutions and the latest predictive systems using Artificial Intelligence and Big Data are presented. A point assessment of the SWOT analysis and a comparative analysis were conducted, based on which the most important determinants were identified. The challenges related to the implementation of these technologies and their future development in the context of automation and digitalization of the supply chain were also discussed.

Keywords: shipping, RFID, GPS, IoT, supply chain, technologies, AIDC, AI.

WSPÓŁPRACA ROBOTÓW Z LUDŹMI W MAGAZYNACH PRZYSZŁOŚCI

W niniejszym artykule omówiono współpracę robotów z ludźmi w magazynach przyszłości, koncentrując się na ich wspólnym działaniu w celu zwiększenia efektywności procesów logistycznych. Przedstawiono rolę robotów w automatyzacji zadań, takich jak transport towarów, kompletacja zamówień i zarządzanie przestrzenią magazynową. Zwrócono uwagę na korzyści wynikające z integracji systemów robotycznych z pracą ludzi, w tym zwiększenie wydajności, redukcję błędów oraz poprawę warunków pracy. Przybliżono także wyzwania związane z wdrażaniem nowych technologii i konieczność dostosowania środowiska pracy do współpracy człowieka z maszyną.

Słowa kluczowe: robotyka, automatyzacja, magazyny, człowiek–maszyna–otoczenie.

WSTĘP

Współczesna logistyka magazynowa dynamicznie ewoluuje, a jednym z kluczowych trendów jest integracja systemów robotycznych z pracą ludzką. Postępująca automatyzacja procesów oraz rozwój technologii sztucznej inteligencji zmieniają oblicze magazynów, podnosząc ich efektywność, redukując koszty i poprawiając warunki pracy. Stosowanie innowacyjnych systemów automatyzacji procesów magazynowych pozwala na zwiększenie konkurencyjności firmy w branży oraz wejście na wyższy poziom w zakresie realizacji usług i obsługi klientów.

Celem niniejszego opracowania jest analiza roli robotów w magazynach przyszłości oraz sposobów ich efektywnej współpracy z ludźmi, sprawdzenie jak dziś wygląda współpraca ludzi i robotów, jakie metody automatyzacji są wykorzystywane w magazynach oraz jak wpływają na procesy logistyczne w centrach dystrybucyjnych. Przedstawiony zostanie również wpływ robotyzacji na rynek pracy i zrównoważony rozwój w obszarze logistyki magazynowej.

1. TECHNOLOGIE WYKORZYSTYWANE OBECNIE W MAGAZYNACH

Kluczowe technologie stosowane obecnie w magazynach możemy podzielić na: sztuczną inteligencję, systemy sensoryczne i wizyjne, coboty oraz AMR czy AGV.

Sztuczną inteligencję (AI – *Artificial Intelligence*) próbuje się definiować jako dziedzinę wiedzy obejmującą m.in. sieci neuronowe, robotykę i tworzenie modeli

zachowań inteligentnych oraz programów komputerowych symulujących te zachowania, co w obecnym stanie techniki pozwala na otrzymanie względnie zautomatyzowanego systemu pozyskiwania, przetwarzania i analizy danych, który daje możliwość samoistnego (autonomicznego) ulepszania systemu lub przewidywania zachowań i działań na podstawie analizy zebranych danych i korelacji między nimi [6].

Systemy sensoryczne i wizyjne to czujniki i systemy wizyjne wraz z oprogramowaniem, które pozwalają na wykrywanie wad, pomiary wymiarów czy identyfikowanie kodów kreskowych oraz oznaczeń na opakowaniach.

Coboty natomiast są to roboty współpracujące, wspomagające pracowników np. podczas kompletacji zamówień, przyspieszając realizację zamówień i poprawiając komfort pracowników dzięki swojej ergonomicznej budowie [2].

AGV (*Automated Guided Vehicle*) to samojezdne roboty służące głównie do transportu ładunków, np. wielkogabarytowych, które poruszają się po magazynach oraz zakładach produkcyjnych przy pomocy wcześniej wyznaczonych linii [10].

AMR (*Autonomous Mobile Robot*) to urządzenia wykorzystywane w ten sam sposób jak wyżej wymienione AGV, z tą różnicą, że nie potrzebują wyznaczonych wcześniej ścieżek czy torów dzięki wyposażeniu w kamery, czujniki i skanery laserowe oraz oprogramowanie do tworzenia map i automatycznej nawigacji w przestrzeni magazynowej [7].

2. PRZYSZŁOŚĆ W MAGAZYNACH – TRENDY I PROGNOZY

Obecnie coraz więcej firm zwiększa swoje nakłady finansowe na robotyzację i automatyzację procesów logistycznych w magazynach i centrach dystrybucyjnych ze względu na wysoką stopę zwrotu i opłacalność takiej inwestycji.

Jak pokazują ostatnie raporty, wartość globalnego rynku robotyki magazynowej ma wzrosnąć z 2,03 biliona USD w 2024 roku do około 13,25 biliona USD w 2029 roku, a jego skumulowana roczna stopa wzrostu ma wynieść 45,5% [2].

Coraz większy wpływ na rozwój i efektywność działania centrów logistycznych ma zastosowanie sztucznej inteligencji, Internetu rzeczy oraz uczenia maszynowego. Dzięki zastosowaniu tego ostatniego w algorytmach do przewidywania możliwych awarii sprzętu i wykorzystaniu czujników montowanych na silnikach czy taśmociągach duża firma technologiczna zajmująca się m.in. logistyką czy *e-commerce* osiągnęła na przestrzeni 3 lat spadek nieplanowanych przestoju w centrach logistycznych w Europie aż o 69% [14].

Wykres widoczny na rys. 1 przedstawia zainteresowanie hasłem „robotyka magazynowa” na świecie w ujęciu czasowym. Liczby reprezentują poszczególne wskaźniki zainteresowania w wyszukiwaniu względem najwyższego punktu na wykresie. Wartość 100 oznacza najwyższą popularność hasła. Wartość 50 oznacza, że popularność hasła była dwukrotnie mniejsza. Wartość 0 wskazuje, że dla danego

hasła nie ma wystarczających danych. Liniami z komentarzem „Uwaga” oznaczone są miejsca, w których został poprawiony system gromadzenia danych – na wykresie są to daty 01.01.2016 oraz 01.01.2022.

Zainteresowanie w ujęciu czasowym

Google Trends

● warehouse robotics



Cały świat. Od 1.01.2015 do 1.01.2025. Wyszukiwarka Google.

Rys. 1. Zainteresowanie hasłem „robotyka magazynowa” na świecie w okresie od 01.01.2015 do 01.01.2025

Źródło: [13].

Mapa widoczna na rys. 2 przedstawia zainteresowanie hasłem „robotyka magazynowa” na świecie według regionu. Wartości są prezentowane na skali od 0 do 100, gdzie 100 oznacza lokalizację, w której hasło było wyszukiwane najczęściej spośród wszystkich wyszukiwań w tej lokalizacji, a 50 oznacza lokalizację o dwukrotnie mniejszej popularności hasła. Wartość 0 odnosi się do lokalizacji, w której nie ma wystarczających danych dla tego hasła. Ważnym aspektem jest to, że wyższa wartość oznacza wyższy odsetek wszystkich zapytań, a nie większą bezwzględną liczbę zapytań, dlatego wpływ na wynik danego kraju ma również jego wielkość.



Rys. 2. Zainteresowanie hasłem „robotyka magazynowa” na świecie według regionu w okresie od 01.01.2015 do 01.01.2025

Źródło: [13].

Na podstawie zaprezentowanych danych można stwierdzić, że zagadnienie robotyki magazynowej znacząco zyskuje na popularności w czasie. Największym zainteresowaniem hasło to cieszy się w krajach Ameryki Północnej czy Azji, takich jak USA, Kanada lub Chiny, a także w Australii. Z tego powodu państwa te znacznie wyróżniają się na arenie międzynarodowej, szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że na odcień koloru oznaczającego zainteresowanie wpływa również wielkość kraju, więc mniejsze kraje mogą osiągać wyższy wynik. Niewielkie powierzchniowo państwo, w którym 80% zapytań dotyczy danego tematu, osiągnie wynik dwukrotnie wyższy niż ogromny kraj, w którym odsetek zapytań wynosi jedynie 40%.

Umiejętne wykorzystywanie AI pozwala firmom stopniowo zwiększać bezpieczeństwo, ergonomiczność i wydajność pracy osób zatrudnionych, które współpracują z robotami. Wymienione zalety wykorzystywania nowych technologii mają kluczowe znaczenie przy wyborze kierunku innowacyjnych rozwiązań magazynowych, dlatego szczególnym zainteresowaniem cieszą się coboty. Ilustrują to wykresy zamieszczone na rys. 3 i rys. 4.



Cały świat. Od 1.01.2015 do 1.01.2025. Wyszukiwarka Google.

Rys. 3. Zainteresowanie hasłem „coboty” na świecie w okresie od 01.01.2015 do 01.01.2025

Źródło: [12].



Rys. 4. Zainteresowanie hasłem „coboty” na świecie według regionu w okresie od 01.01.2015 do 01.01.2025

Źródło: [12].

Jak można zauważyć, zagadnienie cobotów znajduje się w centrum zainteresowania już nie tylko krajów, których gospodarki są mocno rozwinięte, lecz także tych, których rynki się rozwijają. Wyróżniającymi się obszarami są tutaj:



Europa, Australia, Ameryka Północna i Południowa, a także Azja, która zbyt od nich nie odbiega. Zjawisko to na pewno powiązane jest z dynamicznymi zmianami i rosnącymi nakładami na automatyzację w zakresie logistyki i nie tylko.

Jasno klarujący się trend stanowi inwestowanie w nowe technologie, które znacząco wspomagają podejmowanie decyzji w procesach logistycznych oraz pozwalają optymalnie zarządzać przestrzenią i zasobami ludzkimi, dzięki czemu firmy z tej branży mogą się rozwijać bardziej dynamicznie, jednocześnie zachowując lub wręcz poprawiając jakość świadczonych usług.

3. ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ W MAGAZYNACH PRZYSZŁOŚCI

Zrównoważony rozwój w magazynach przyszłości koncentruje się na minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko poprzez redukcję emisji CO₂, optymalizację zużycia energii oraz poprawę warunków pracy. Firmy logistyczne wdrażają inteligentne systemy zarządzania energią, które monitorują i optymalizują zużycie prądu, co prowadzi do znaczących oszczędności energetycznych [2].

Roboty wspierające operacje magazynowe są wyposażone w technologie odzyskiwania energii kinetycznej oraz baterie o długiej żywotności, co ogranicza konieczność ich częstej wymiany i zmniejsza ilość odpadów [20]. Ponadto wykorzystanie sztucznej inteligencji w logistyce pozwala na optymalizację tras transportowych, zmniejszając emisję dwutlenku węgla oraz minimalizując liczbę pustych przebiegów pojazdów magazynowych [8].

Nowoczesne magazyny inwestują również w ekologiczną infrastrukturę. Systemy zarządzania odpadami i recykling umożliwiają efektywne przetwarzanie śmieci oraz ponowne wykorzystanie materiałów opakowaniowych, co wpisuje się w ideę gospodarki obiegu zamkniętego [11]. Wiele firm decyduje się na stosowanie biodegradowalnych opakowań oraz ograniczenie użycia plastiku w procesach logistycznych.

Wprowadzenie złożonych systemów zarządzania magazynem WMS pozwala także na optymalizację przestrzeni składowania. Nowoczesne algorytmy analizują rozmieszczenie produktów, minimalizując w ten sposób konieczność przenoszenia towarów i skracając czas transportu wewnętrznego [7]. W rezultacie magazyny mogą być bardziej kompaktowe, co zmniejsza ich ślad węglowy i zużycie energii na oświetlenie oraz klimatyzację.

Kolejnym aspektem zrównoważonego rozwoju jest poprawa warunków pracy ludzi w magazynach. Automatyzacja pomaga eliminować najbardziej wymagające fizycznie zadania, zmniejszając ryzyko kontuzji i chorób zawodowych. Wprowadzenie ergonomicznych stanowisk pracy oraz wspomagających robotów daje możliwość poprawy komfortu i efektywności pracy zatrudnionych osób.

4. ANALIZA WPŁYWU AUTOMATYZACJI NA EFEKTYWNOŚĆ PRACY

Automatyzacja magazynów stała się jednym z kluczowych czynników wpływających na wzrost efektywności operacyjnej w logistyce. Wprowadzenie nowoczesnych rozwiązań technologicznych, takich jak autonomiczne wózki widłowe, roboty transportowe, zrobotyzowane systemy kompletacji oraz systemy sztucznej inteligencji, ma istotny wpływ na optymalizację procesów magazynowych, redukcję kosztów operacyjnych i poprawę jakości obsługi klienta.

Podstawowym celem wprowadzania automatyzacji w magazynach jest zwiększenie efektywności operacyjnej poprzez skrócenie czasu realizacji procesów i zmniejszenie liczby błędów. Zastosowanie autonomicznych pojazdów magazynowych AGV pozwala na automatyczne przemieszczanie towarów w magazynach i eliminuje potrzebę ręcznego transportu. Roboty transportowe, które pracują w pełni autonomicznie, eliminują czas stracony na wykonywanie zadań przez pracowników, co umożliwia szybsze i bardziej precyzyjne zarządzanie ruchem towarów [3].

Wprowadzenie zautomatyzowanych systemów zarządzania magazynem WMS również przyczynia się do wzrostu efektywności. Systemy te, wykorzystując algorytmy sztucznej inteligencji, monitorują stan zapasów, analizują przepływ towarów oraz optymalizują procesy kompletacji. Dzięki tym technologiom magazyny mogą działać bardziej efektywnie, minimalizując ryzyko błędów związanych z ręcznym zarządzaniem zapasami oraz optymalizując wykorzystanie przestrzeni magazynowej [5].

Wykorzystanie robotów do kompletacji zamówień to jeden z najnowszych trendów w magazynach przyszłości. Zastosowanie robotów do automatycznego pobierania towarów i przekazywania ich do kolejnych etapów procesu magazynowego znacząco przyspiesza realizację zamówień. Badania pokazują, że systemy zrobotyzowane pozwalają na skrócenie czasu kompletacji nawet o 30–50% w porównaniu z tradycyjnymi metodami [15].

Warto też zwrócić uwagę na wpływ automatyzacji na redukcję kosztów operacyjnych. Według raportu z 2025 roku wprowadzenie autonomicznych systemów magazynowych może obniżyć koszty operacyjne o 25–40% i skrócić czas realizacji procesów o 35% [9]. Te dane potwierdzają, że automatyzacja umożliwia uzyskanie znacznych oszczędności w skali całej organizacji.

Korzyści z automatyzacji nie ograniczają się jednak tylko do oszczędności finansowych. Wdrożenie nowoczesnych rozwiązań technologicznych pozwala również na zwiększenie dokładności realizacji zamówień. Systemy, które realizują procesy kompletacji i pakowania, minimalizują błędy ludzkie, co przekłada się na wyższą jakość obsługi klienta. W magazynach, które wdrożyły robotyzację, zauważono zwiększenie dokładności zamówień do 99,7%, a poprawa dokładności zamówień przyczyniła się do wzrostu satysfakcji klientów [19].

Ważnym aspektem wpływającym na efektywność pracy w magazynach jest także zastosowanie sztucznej inteligencji do optymalizacji procesów logistycznych.



Algorytmy sztucznej inteligencji mogą prognozować zapotrzebowanie na określone towary, umożliwiając precyzyjne planowanie stanów magazynowych. Dzięki temu magazyny są w stanie uniknąć braków magazynowych, co redukuje koszty związane z niedoborem towarów, a także poprawia dostępność produktów dla klientów [1].

Wprowadzenie automatyzacji nie tylko przyczynia się do poprawy efektywności operacyjnej, ale też wpływa na zarządzanie zasobami ludzkimi w magazynach. Zmiana roli pracowników, którzy nie muszą już wykonywać ciężkich, monotonnych zadań, prowadzi do poprawy ich bezpieczeństwa i komfortu pracy. Automatyzacja w magazynach pomaga zredukować ryzyko kontuzji zawodowych, ponieważ roboty wykonują najcięższe i najbardziej niebezpieczne prace, takie jak transportowanie ciężkich ładunków czy prace na wysokości. Dzięki temu pracownicy mogą się skupić na bardziej kreatywnych i złożonych zadaniach [2].

Automatyzacja magazynów ma znaczący wpływ na poprawę efektywności pracy. Dzięki nowoczesnym rozwiązaniom technologicznym magazyny stają się wydajniejsze, dokładniejsze i bezpieczniejsze. Inwestycje w robotyzację pozwalają firmom nie tylko zwiększyć rentowność, lecz także poprawić jakość obsługi klienta.

5. ROBOTY W MAGAZYNACH – PARTNERZY CZY KONKURENCI?

Wprowadzenie robotów do magazynów budzi kontrowersje dotyczące ich wpływu na rynek pracy. Część ekspertów obawia się, że automatyzacja doprowadzi do masowej utraty miejsc pracy, szczególnie w obszarach, gdzie tradycyjnie zatrudniani byli pracownicy fizyczni, np. przy kompletacji zamówień, transporcie czy pakowaniu. Z drugiej strony automatyzacja może prowadzić do tworzenia nowych miejsc pracy w dziedzinach związanych z obsługą, konserwacją oraz programowaniem robotów. W rzeczywistości coraz częściej obserwujemy model współpracy robotów z ludźmi, w którym to maszyny wspierają ludzi, a nie zastępują ich całkowicie. W takich magazynach powstaje nowa forma pracy, w której roboty pełnią rolę asystentów, zwiększając efektywność i precyzję operacji, a ludzie koncentrują się na zadaniach wymagających kreatywności, nadzoru i decyzyjności.

Badania wskazują, że 65% firm, które wdrożyły robotyzację, odnotowało wzrost zatrudnienia, a 80% firm raportuje zwiększoną wydajność operacyjną [17]. W przypadku firm zajmujących się logistyką, szczególnie w magazynach *e-commerce*, wdrożenie robotyzacji pozwoliło nie tylko na zwiększenie liczby zamówień, które są one w stanie obsłużyć, lecz także na poprawę jakości świadczonych usług poprzez szybsze i dokładniejsze realizowanie zamówień. Proces kompletacji zamówień, który wcześniej angażował setki pracowników, teraz jest realizowany przy wsparciu robotów transportujących regały z produktami bezpośrednio do pracowników, którzy następnie kompletują zamówienia. Jest to przykład harmonijnej współpracy między ludźmi a robotami – roboty dostarczają

produkty do stanowisk pakowania, a pracownicy zajmują się kontrolą jakości i finalnym zabezpieczeniem przesyłek [18]. Taki model współpracy pozwala na znaczne zmniejszenie obciążenia fizycznego pracowników, redukcję monotonicznych i powtarzalnych czynności, a także poprawę ergonomii pracy. Roboty nie tylko wykonują ciężkie zadania, lecz również pomagają w precyzyjnym rozmieszczaniu produktów w magazynach w sposób, który optymalizuje przestrzeń magazynową. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych algorytmów sztucznej inteligencji roboty potrafią dynamicznie dostosowywać swoje ruchy, tak by optymalizować proces kompletacji i skracać do minimum czas oczekiwania.

Automatyzacja w magazynach prowadzi do tworzenia nowych miejsc pracy związanych z konserwacją, programowaniem i zarządzaniem systemami robotycznymi. Firmy muszą inwestować w szkolenie pracowników, którzy uczą się obsługi zaawansowanych technologii, co skutkuje wzrostem ich kompetencji oraz większą specjalizacją.

Bardzo istotnym aspektem współpracy robotów i ludzi w magazynach jest też poprawa bezpieczeństwa. Prace związane z transportem ciężkich ładunków, prace na wysokości oraz operacje wykonywane w wąskich przestrzeniach mogą się wiązać z ryzykiem wypadków. Zastosowanie robotów w tych obszarach umożliwia minimalizację tego ryzyka. Roboty zaprojektowano z myślą o poruszaniu się w wąskich przestrzeniach, przewożeniu ciężkich przedmiotów oraz zmniejszeniu ryzyka kolizji z ludźmi [16]. Dzięki automatyzacji zmniejsza się liczba wypadków, co pozytywnie wpływa na zdrowie i bezpieczeństwo pracowników.

Roboty w magazynach nie będą jedynie konkurencją dla ludzi, ale staną się ich niezastąpionymi partnerami. Współpraca ludzi i robotów ma na celu zwiększenie efektywności, bezpieczeństwa i komfortu pracy, a także optymalizację procesów logistycznych. Kluczowe jest odpowiednie połączenie technologii z umiejętnościami ludzkimi oraz dostosowanie struktur zatrudnienia do zmieniającego się charakteru pracy w magazynach.

Na rys. 5 przedstawiono odpowiedzi na pytanie dotyczące pełnej automatyzacji magazynów, zadane w ramach ankiety przeprowadzonej przez autorów niniejszego artykułu.

Jak można zauważyć, tylko 13,4% ankietowanych wskazuje, że pełna automatyzacja magazynów to pozytywny kierunek, natomiast większość, bo aż 43,9%, uważa, że pełna automatyzacja jest nieunikniona i wymaga dostosowania rynku pracy. Świadczy to prawdopodobnie o obawie przed utratą miejsca pracy przez pracowników zastąpionych robotami, którzy ze względu na stanowiska, jakie zajmowali, mimo swoich umiejętności i wiedzy nie będą w stanie znaleźć pracy na podobnej posadzie. Twierdzi tak 27,4% respondentów, którzy uważają, że taki trend doprowadzi do masowych zwolnień. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, że większość firm, które inwestują w robotyzację swoich obiektów logistycznych, stwarza wiele miejsc pracy związanych z serwisami, projektowaniem, tworzeniem oprogramowania czy chociażby nadzorem nad pracą robotów, a stanowiska, jakie są zastępowane, to zazwyczaj te, na których wykonuje się proste i monotonne zadania

lub czynności stwarzające duże zagrożenie dla człowieka poprzez występujące na nich obciążenia czy rozmiary transportowanych ładunków.

5. Jak oceniasz perspektywę pełnej automatyzacji magazynów, gdzie roboty zastąpią większość ludzi?

164 odpowiedzi



Rys. 5. Wyniki przeprowadzonej ankiety w odpowiedzi na pytanie: „Jak oceniasz perspektywę pełnej automatyzacji magazynów, gdzie roboty zastąpią większość ludzi?”

Źródło: badania własne.

Może to wskazywać na potrzebę kształcenia się nowych pokoleń w kierunkach takich jak inżynieria oprogramowania, budowa maszyn, elektronika czy robotyka i logistyka związana z transportem wewnętrznym, co wytworzy popyt na miejsca dla studentów na uczelniach wyższych, a także dla uczniów w technikach lub szkołach branżowych oferujących studia, kursy czy szkolenia związane z powyższymi tematami.

Na rys. 6 przedstawiono odpowiedzi na pytanie dotyczące nastawienia respondentów do pracy z robotami, zadane w ramach ankiety przeprowadzonej przez autorów niniejszego artykułu.

7. Jak oceniasz swoje nastawienie do pracy z robotami w magazynach?

164 odpowiedzi



Rys. 6. Wyniki przeprowadzonej ankiety w odpowiedzi na pytanie: „Jak oceniasz swoje nastawienie do pracy z robotami w magazynach?”

Źródło: badania własne.

Jak można wywnioskować z powyższego wykresu, nastawienie do współpracy ludzi z robotami w magazynach jest dość pozytywne. Zdecydowana większość respondentów twierdzi, że ich nastawienie jest „raczej pozytywne” (57,3% głosów) lub „bardzo pozytywne” (14,6%). Widoczne są tutaj zrozumienie korzyści dla pracowników, które wynikają z wykorzystywania automatyzacji w ich miejscu pracy, lub też potencjalna nieświadomość zagrożeń, jakie mogą wynikać z takiej sytuacji.

Takie podejście wśród osób już zatrudnionych bądź też potencjalnie zasilających rynek pracy to na pewno duża zaleta dla pracodawców, którzy planują wdrażać innowacyjne technologie w swoich centrach logistycznych w celu rozwijania swoich przedsiębiorstw i utrzymywania własnej konkurencyjności na tle innych firm z branży.

PODSUMOWANIE

Automatyzacja i robotyzacja magazynów stają się nieodłącznym elementem współczesnej logistyki. Wdrażanie zaawansowanych technologii, takich jak sztuczna inteligencja, coboty i autonomiczne systemy transportowe, prowadzi do wzrostu efektywności operacyjnej, poprawy warunków pracy oraz optymalizacji kosztów. Prognozy wskazują na dalszy dynamiczny rozwój sektora, z rosnącym znaczeniem automatycznych systemów zarządzania magazynami oraz inteligentnych algorytmów predykcyjnych. Jednocześnie automatyzacja nie prowadzi do eliminacji pracy ludzkiej, lecz przekształca jej charakter, umożliwiając efektywną współpracę robotów i ludzi. Kluczowym wyzwaniem pozostaje integracja nowych technologii w sposób zrównoważony, minimalizujący negatywne skutki dla środowiska oraz zapewniający optymalne wykorzystanie zasobów.

LITERATURA

1. Colangelo E., Fries C., Hinrichsen T.F., Szaller Á., Nick G., *Maturity model for AI in smart production planning and control system*, Procedia CIRP 2022, 107, s. 493–498.
2. CORDIS, *Socio-physical interaction skills for cooperative human-robot systems in agile production*, Publications Office of the European Union, Luksemburg 2024.
3. Koreis J., *Human–robot vs. human–manual teams: understanding the dynamics of experience and performance variability in picker-to-parts order picking*, Computers & Industrial Engineering 2024, 200(6–7), 110750.
4. Markets and Markets, *Humanoid Robot Market Size, Share & Growth*, Pune, India 2025.
5. ROBO Business, *Warehouse automation: rise of warehouse robots*, LogisticsIQ, New Delhi, India 2019.
6. Uchwała nr 196 Rady Ministrów z dnia 28 grudnia 2020 r. w sprawie ustanowienia „Polityki dla rozwoju sztucznej inteligencji w Polsce od roku 2020”, M.P. 2021 poz. 23.

7. Zając P., *Evaluation method of energy consumption in logistic warehouse system*, Springer International Publishing, Cham 2015.

Źródła internetowe

8. <https://enviogroup.com/sztuczna-inteligencja-w-tsl-rewolucja-w-transporcie-i-logistyce/> (dostęp 21.03.2025).
9. <https://epaper.industrial-production.de/frontend/mvc/catalog/by-name/INP?catalogName=INP2501D> (dostęp 23.03.2025).
10. <https://mobile-industrial-robots.com/pl/blog/agv-vs-amr> (dostęp 30.03.2025).
11. <https://nexelem.com/blog/circular-economy-w-akcji-czym-jest-i-jakie-korzystosci-ma-gospodarka-o-obiegu-zamknietym/> (dostęp 21.03.2025).
12. <https://trends.google.com/trends/explore?date=2015-01-01%202025-01-01&q=cobots&hl=pl> (dostęp 04.04.2025).
13. <https://trends.google.com/trends/explore?date=2015-01-01%202025-01-01&q=warehouse%20robotics&hl=pl> (dostęp 04.04.2025).
14. <https://www.aboutamazon.pl/wiadomosci/miejsca-pracy-i-inwestycje/sztuczna-inteligencja-internet-rzeczy-i-uczenie-maszynowe-trzy-sposoby-aws-na-optimalizacje-centrow-logistycznych-amazon> (dostęp 30.03.2025).
15. <https://www.automationworld.com/factory/robotics/article/55000709/the-changing-face-of-warehouse-automation?> (dostęp 23.03.2025).
16. <https://www.bcs.org/articles-opinion-and-research/the-future-of-warehousing-automation-robotics-and-energy-efficiency/> (dostęp 02.04.2025).
17. <https://www.businessinsider.com/robots-warehouses-human-workers-startups-investors-amr-fetch-robotics-2022-10?IR=T> (dostęp 02.04.2025).
18. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/getting-warehouse-automation-right?> (dostęp 02.04.2025).
19. <https://www.meteorspace.com/important-warehouse-automation-statistics/> (dostęp 28.03.2025).
20. <https://www.tritekbattery.com/pl/what-is-energy-recovery-in-lithiumbatteries/> (dostęp 21.03.2025).

COLLABORATION BETWEEN ROBOTS AND HUMANS IN THE WAREHOUSES OF THE FUTURE

The article discusses the collaboration between robots and humans in the warehouses of the future, focusing on their joint operation to improve logistics efficiency. It presents the role of robots in automating tasks such as transporting goods, order picking, and warehouse space management. The benefits of integrating robotic systems with human labor are highlighted, including increased productivity, error reduction, and improved working conditions. The challenges of implementing new technologies and the need to adapt the work environment for human-machine collaboration are also addressed.

Keywords: robotics, automation, warehouses, human-machine-environment.

WYKORZYSTANIE INSTRUMENTÓW INFORMATYCZNYCH DO ANALIZY ELEMENTÓW EKONOMICZNYCH WYBORU DRÓG TRANSPORTU LĄDOWEGO TOWARÓW

W 2024 roku przeprowadzono kompleksową analizę kosztów oraz możliwości optymalizacji transportu drogowego na trasie Polska–Szwecja–Polska, z wyłączeniem odcinka przeprawy promowej przez Morze Bałtyckie. Celem głównym badania było porównanie efektywności kosztowej korzystania z dróg płatnych i bezpłatnych na wybranych odcinkach dróg na terenie Polski oraz identyfikacja najbardziej opłacalnych rozwiązań z punktu widzenia przewoźnika.

Słowa kluczowe: koszty przejazdów, ekonomika transportu, transport drogowy, opłaty drogowe.

WSTĘP

Efektywne zarządzanie transportem drogowym, a w szczególności zarządzanie rozbudowaną flotą pojazdów ciężarowych, stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej logistyki i gospodarki transportowej. Wymaga ono nie tylko doskonałej organizacji operacyjnej, ale również implementacji nowoczesnych rozwiązań technologicznych, w tym systemów informatycznych, które wspierają podejmowanie decyzji na różnych szczeblach zarządzania [1, 6, 13, 15, 17]. Dynamiczny rozwój narzędzi informatycznych i oprogramowania stwarza nowe możliwości optymalizacji procesów transportowych, także pod względem ekonomicznym. W pracy podjęto próbę praktycznego zastosowania wybranego systemu informatycznego, który może wspierać decydenta w wyborze adekwatnej trasy transportu drogowego towarów, w zależności od zdefiniowanych kryteriów – ekonomicznych (takich jak koszty eksploatacyjne i opłaty drogowe) oraz środowiskowych (związanych m.in. z emisją spalin) [2, 3, 10, 12, 16]. System ten opiera się na analizie parametrów transportu realizowanego na terenie Polski, w szczególności w odniesieniu do przejazdów drogowych pomiędzy miejscem załadunku towaru a punktem rozładunku, z uwzględnieniem obecności terminali portowych. Należy podkreślić, że odcinek morski trasy – przeprawa promowa – został wyłączony z zakresu niniejszej analizy, ponieważ nie wpływa na proces decyzyjny w obszarze wyboru trasy lądowej. Lądowe fragmenty trasy generują znaczące koszty operacyjne dla firm transportowych. Do najistotniejszych z nich zaliczyć można m.in. opłaty za korzystanie z infrastruktury drogowej

(np. autostrady, drogi ekspresowe) oraz koszty związane z zatrudnieniem kierowców i organizacją ich czasu pracy [4, 5, 7, 11]. Ponadto w analizie uwzględniono koszty środowiskowe, wynikające z emisji spalin, które nabierają coraz większego znaczenia w kontekście polityki klimatycznej Unii Europejskiej i wprowadzanych stopniowo restrykcji prawnych w tym zakresie. W obliczu rosnących cen usług transportowych oraz zaostrzających się regulacji środowiskowych poszukiwanie sposobów na optymalizację całkowitych kosztów transportu drogowego staje się strategicznym priorytetem dla przedsiębiorstw branży TSL (transport–spedycja–logistyka). W dalszej części opracowania dokonano analizy i oceny wpływu wybranych czynników ekonomicznych i środowiskowych na decyzje dotyczące wyboru płatnych lub bezpłatnych tras transportu towarów w Polsce, na odcinkach od miejsca załadunku do miejsca rozładunku [15, 18]. Analiza i wynikające z niej wnioski stanowią podstawę do podejmowania działań w obszarze możliwości redukcji kosztów i emisji przy zachowaniu oczekiwanej efektywności operacyjnej.

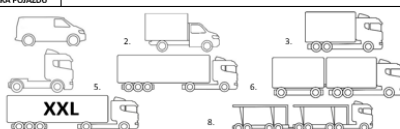
1. CEL PRACY

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie analizy ekonomicznej polegającej na porównaniu efektywności kosztowej wykorzystania infrastruktury drogowej – zarówno płatnej, jak i bezpłatnej – w transporcie drogowym realizowanym na trasie Polska–Szwecja. Szczególny nacisk położono na ocenę wpływu wyboru rodzaju drogi na całkowite koszty operacyjne ponoszone przez przedsiębiorstwa transportowe. W analizie uwzględniono nie tylko bezpośrednie koszty związane z opłatami drogowymi, lecz także koszty pośrednie, wynikające z emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Takie podejście ma na celu wskazanie najbardziej opłacalnych rozwiązań transportowych oraz wsparcie procesu podejmowania decyzji w sektorze TSL, z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych.

2. METODYKA PRACY

Do analizy wykorzystano dane ankietowe zgromadzone podczas rejsów promowych realizowanych przez armatora Polferries na czterech trasach: Świnoujście–Ystad (ŚW-Y), Ystad–Świnoujście (Y-ŚW), Gdańsk–Nynäshamn (GDN-NYN) oraz Nynäshamn–Gdańsk (NYN-GDN) czterema promami: M/F Varsovia, M/F Mazovia, M/F Nova Star oraz M/F Wawel. Narzędziem badań sondażowych był kwestionariusz ankietowy skierowany do kierowców samochodów ciężarowych odprawiających się w portach przed zaokrętowaniem na prom. Celem badania było m.in. uzyskanie informacji dotyczących wyboru tras transportu towarów (płatnych i bezpłatnych), wielkości zużycia paliwa oraz

charakterystyki pojazdu. Łącznie zebrano 186 ankiet, które przełożono do formularza elektronicznego. Do formularza nie wprowadzono ankiet niepełnych lub zawierających sprzeczne dane. Ostatecznie do dalszej analizy przyjęto 162 ankiety, z których utworzono bazę danych. Dodatkowo, dla potwierdzenia wiarygodności ankiety, na każdej z nich podano numer rejestracyjny ciągnika oraz naczepy. Wzór ankiety, dostępny także w Internecie za pomocą kodu QR, przedstawiono na rys. 1.

ANKIETA NR _____		Z DNIA/GODZINA WJAZDU NA PROM _____		PROM: _____		TRASA: _____	
1. MARIKA POJAZDU _____							
2. 							
2A. 1. - Chłodnia TAK NIE 2. - Chłodnia TAK NIE 3. - Zamknięta, - Otwarta, - Chłodnia, - Cysterna 4. _____ 5. - Lekka, - Średnia, - Ciężka _____ 6. - Zamknięta, - Otwarta, - Chłodnia, - Cysterna 7. Co przewozi? - Wysokość, - Szerokość, - Długość, - Waga 8. - Pusta, - Z ładunkiem. Czy są przewożone samochody elektryczne? TAK NIE							
2B. 1. Czy są przewożone ładunki niebezpieczne (ADR)? TAK NIE Klasa _____							
3. NR _____		Pojazdu: _____		Naczepy: _____			
4. CZY KIEROWCĄ/ KIEROWCZYNI JEST: _____		WŁAŚCIELEŃ/ WSPÓŁWŁAŚCIELEŃ POJAZDU LUB FIRMY PRZEWODZĄCEJ _____		PRACOWNIKIEM FIRMY PRZEWODZĄCEJ _____			
5. RODZAJ I ZUŻYCIE PALIWA NA 100 KM _____		L/100 km _____		INNE: _____ - Elektryczne, - Wodór, _____			
6. MIEJSCE/MIEJSC ZAŁADUNKOWA ŁADUNKÓW NA POJAZD: _____							
7. MIEJSCE/MIEJSC DOCELÓW ŁADUNKÓW: _____							
8. CZY KIEROWCĄ/ KIEROWCZYNI PŁYNIE PROMIEM Z POJAZDEM: _____		TAK _____		NIE _____			
9. CZY KIEROWCĄ/ KIEROWCZYNI OTRZYMUJE WYNAGRODZENIE _____		TYLKO ZA PRZEJECHANE KILOMETRY _____		ZA PRZEJECHANE KM I ZA CZAS POBYTU NA PROMIE _____		WYNEGOCZOWANA KWOTA, GD ZLECENIODAWCY _____	
10. INNE KIEROWCZY/ KIEROWCZYNI _____		_____					
11. NR TELEFONU/ ADRES E-MAIL _____		_____					



Rys 1. Ankieta dla kierowców dotycząca podstawowych danych realizowanej trasy

Źródło: opracowanie własne na podstawie realizowanej umowy z armatorem.

2.1. Analiza ekonomiczna porównawczej efektywności kosztowej wykorzystania płatnej i bezpłatnej infrastruktury drogowej

Analizę kosztów transportu drogowego z wykorzystaniem dróg płatnych i bezpłatnych przeprowadzono tylko na odcinkach dróg na terenie Polski. Analizie poddano długości drogi płatnej i drogi bezpłatnej od miejsca załadunku towaru na samochód do placu załadunkowego na prom w jednym z portów w Polsce (Świnoujście lub Gdańsk) oraz od miejsca opuszczenia promu w polskim porcie do miejsca rozładunku towarów. Na tej podstawie, wykorzystując aplikację Google Maps, określono długość trasy drogowej z wykorzystaniem dróg płatnych (pł) i bezpłatnych (bpł), a ich długości w kilometrach oznaczono odpowiednio $d_{pł}$ oraz

$d_{bpł}$. Na tej podstawie określono koszty K przewozu towarów drogami płatnymi $K_{pł}$ i bezpłatnymi $K_{bpł}$ z uwzględnieniem:

- kosztów paliwa C [zł] zużytego na drodze d [km], określonych wzorem:

$$C = d * z * c \quad (1)$$

gdzie:

z – średnie zużycie paliwa na 100 km [l/100 km],
 c – cena 1 litra paliwa [zł],

dodatkowo dla potrzeb dalszych obliczeń wprowadzono pojęcie ilości spalonego paliwa I_p , na trasie d :

$$I_p = d * z \quad (2)$$

- kosztów pracy kierowcy P_k [zł], określonych wzorem:

$$P_k = t_{pk} * s \quad (3)$$

gdzie:

t_{pk} – czas pracy kierowcy [h], określony jako czas jazdy samochodem t_p powiększony o czas obowiązkowych przerw w jeździe t_d , wskazany w [9], czyli:

$$t_{pk} = t_p + t_d \quad (4)$$

s – godzinowe wynagrodzenie kierowcy [zł] za czas pracy t_{pk} ;

- opłat drogowych O [zł] obliczonych na podstawie systemu poboru opłaty elektronicznej – e-TOLL;
- opłaty środowiskowej E [zł], określonej wzorem:

$$E = (I_p * 0,84) * 0,001 * ś \quad (5)$$

gdzie:

$ś$ – wielkość jednostkowej opłaty środowiskowej określonej na podstawie [8] [zł/l].

Dla drogi płatnej przedstawiają się one następująco:

$$K_{pt} = C_{pt} + P_{pt} + O_{pt} + E_{pt} \quad (6)$$

gdzie:

O_{pt} – suma opłat za korzystanie z drogi płatnej i opłaty wynikającej z masy pojazdu wyliczanej przez e-TOLL.

Natomiast dla drogi bezpłatnej mamy:

$$K_{bpt} = C_{bpt} + P_{bpt} + O_{bpt} + E_{bpt} \quad (7)$$

gdzie:

O_{bpt} – opłata wynikająca z masy pojazdu wyliczana przez e-TOLL.

Dla tak obliczonych kosztów K_{pt} i K_{bpt} analizie poddano ich różnicę Δ [zł], określoną wzorem:

$$\Delta = K_{pt} - K_{bpt} \quad (8)$$

Przypadek, gdy $\Delta < 0$, oznacza, że droga płatna jest prawidłowo wybraną drogą, natomiast przypadek, gdy $\Delta > 0$, oznacza, że droga płatna jest drogą gorszą z ekonomicznego punktu widzenia.

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ ANKIETOWYCH

Do analizy, zgodnie z przedstawioną wcześniej metodologią selekcji danych, wybrano 62 ankiety spośród łącznej liczby 162 dostępnych formularzy, które pochodziły ze zweryfikowanej bazy danych i dotyczyły transportu towarów realizowanego na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej. Kryteria wyboru stanowiły kompletność informacji oraz jednoznaczne wskazanie miejsca zarówno załadunku, jak i rozładunku towarów w relacji do polskich terminali portowych. Badanie skupiało się na określeniu rzeczywistych odległości pokonywanych przez środki transportu drogowego – przede wszystkim samochody ciężarowe – na odcinkach od miejsca załadunku do terminala portowego zlokalizowanego na terenie Polski, a także od terminala portowego do miejsca rozładunku. Tego rodzaju podejście umożliwiło ocenę rozpiętości geograficznej tras oraz zróżnicowania logistycznego w skali krajowej.

Analiza danych wskazała najkrótszą zarejestrowaną odległość pomiędzy punktem początkowym (miejsce załadunku) a portem wynoszącą 10,2 km (zgodnie z danymi zawartymi w ankiecie nr 32). Z kolei najdłuższy odcinek pokonywany w kierunku portu osiągał długość 751 km i został odnotowany w ankiecie nr 44.

Podobnej analizie poddano również trasę powrotną, tj. drogę od terminala portowego do miejsca rozładunku na terenie kraju, co pozwoliło na identyfikację kierunków dystrybucji towarów oraz potencjalnych punktów konsumpcji końcowej. Zgromadzony zbiór danych ankietowych stanowi źródło empiryczne i podstawę do analizy efektywności planowania tras transportowych w obrębie sieci drogowej Polski. Może on również zostać wykorzystany do opracowania modeli optymalizacyjnych, służących poprawie zarządzania logistyką transportu drogowego, z uwzględnieniem lokalizacji portów morskich jako kluczowych węzłów przeładunkowych.

4. WYNIKI ANALIZ

Podstawą analizy są uzyskane wartości Δ określone wzorem (8). Do obliczeń przyjęto następujące wartości poszczególnych składowych wartości K opisanych wzorami (6) i (7):

- średnie zużycie paliwa na trasie z_{bpl} określono, przyjmując, że zużycie paliwa na trasie bezpłatnej jest o 10% większe niż na trasie płatnej, co ustalono na podstawie rozmów z kierowcami w trakcie przeprowadzania ankiet, czyli można je opisać wzorem:

$$z_{bpl} = z_{pl}/0,90 \quad (9)$$

- cenę c 1 litra paliwa przyjęto na podstawie średniej ceny paliwa z 2024 roku;
- czas pracy kierowcy t_{pk} określono na podstawie [9]. W analizie przyjęto, że kierowcy po każdej 4,5 godziny nieprzerwanej jazdy odbywają obowiązkową, jednolitą przerwę trwającą 45 minut (0,75 godziny), co jest zgodne z obowiązującymi przepisami. Dobowy odpoczynek kierowcy został określony na poziomie 11 godzin i następuje po maksymalnie 9 godzinach jazdy dziennie. Możliwość skrócenia czasu odpoczynku do 9 godzin, dopuszczalna w ograniczonym zakresie, nie została uwzględniona w celu uproszczenia modelu. Dzienny czas jazdy został ograniczony do 9 godzin, bez zastosowania wyjątku umożliwiającego wydłużenie tego okresu do 10 godzin dwukrotnie w ciągu tygodnia. W kontekście tygodniowego czasu jazdy założono, że nie przekracza on 56 godzin, natomiast w ujęciu dwutygodniowym założono, że maksymalny łączny czas prowadzenia pojazdu nie przekracza 90 godzin. W przypadku ewentualnego przekroczenia tego limitu czas jazdy został proporcjonalnie obniżony do ustalonego pułapu. Dodatkowo przyjęto, że kierowca odbywa tygodniowy odpoczynek w wymiarze 24 godzin po każdych 56 godzinach jazdy. Wydłużone odpoczynki tygodniowe oraz możliwość ich skracania i późniejszej kompensacji nie zostały uwzględnione w obliczeniach.

W ramach modelu badawczego nie zaimplementowano szeregu dopuszczalnych, lecz bardziej złożonych regulacji. Pominięto m.in. skrócone odpoczynki dobowe (9 godzin, maksymalnie trzy razy w tygodniu), możliwość wydłużenia jazdy dziennej do 10 godzin dwa razy w tygodniu, a także pełne tygodniowe odpoczynki trwające 45 godzin. Zrezygnowano też z uwzględnienia mechanizmów redukcji i kompensacji odpoczynków tygodniowych oraz możliwości dzielenia 45-minutowej przerwy na dwa krótsze segmenty (np. 15 i 30 minut). Nie wprowadzono dodatkowych ograniczeń związanych z pracą w porze nocnej, które również wpływają na dopuszczalny czas prowadzenia pojazdu, model nie zakłada nierównomiernego rozłożenia limitu 90 godzin jazdy w okresie dwóch tygodni (np. 50 godzin w jednym tygodniu i 40 godzin w drugim) ani nie uwzględnia krajowych odstępstw wynikających z przepisów dotyczących międzynarodowego transportu drogowego. Taki zestaw założeń zapewnia odpowiednią równowagę między zgodnością z przepisami a funkcjonalnością modelu analitycznego, umożliwiając wiarygodną ocenę efektywności transportu drogowego z zachowaniem jednolitych ram czasowych;

- stawka godzinowa czasu pracy kierowcy $s = 50$ zł/h, określona na podstawie danych ankietowych;
- wielkość jednostkowej opłaty środowiskowej $\acute{s} = 6,04$ zł/kg.

Obliczone przy takich założeniach wartości Δ określone wzorem (8) przedstawiono w tabeli 1.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że:

- wielkość opłaty środowiskowej zawiera się w przedziale od 0,00 zł (ankiety nr 32, 53, 55, 62, 143, 152) do 1,4 zł (ankieta nr 10) i nie ma praktycznie wpływu na wyniki;
- założenie, że przy wartościach Δ zawartych w przedziale od -100 zł do 100 zł trasy płatne i bezpłatne są porównywalne pod względem ekonomicznym, pozwala uznać, że 24 trasy (38,7%) zostały wybrane prawidłowo. Gdyby jednak rozszerzyć ten przedział od -200 zł do 200 zł, to ten udział wzrasta do 44 tras (69,7%).



Tabela 1

Zestawienie badanych wskaźników dróg płatnych i bezpłatnych

LICZBA POCZĄTKOWA	NUMER ANKIETY	TRASA PŁATNA ILOŚĆ KM	TRASA BEZPŁATNA ILOŚĆ KM	OPŁATA ŚRODOWISKOWA TRASA PŁATNA	OPŁATA ŚRODOWISKOWA TRASA BEZPŁATNA	$\Delta p - \Delta bp$
1	2	3	4	5	6	7
		dpl	dbpl			
1	1	262,0	310,0	0,4	0,5	-301,9
2	2	546,0	616,0	0,6	0,9	-983,0
3	3	546,0	616,0	0,8	1,1	-1084,9
4	5	347,0	369,0	0,5	0,7	-274,2
5	6	548,0	548,0	0,6	0,7	-781,3
6	7	485,0	556,0	0,8	1,1	-1052,4
7	8	320,0	342,0	0,5	0,6	-197,6
8	9	262,0	235,0	0,4	0,4	17,8
9	10	605,0	637,0	1,1	1,4	-1007,4
10	14	271,0	258,0	0,4	0,4	-64,9
11	15	452,0	452,0	0,2	0,2	-30,2
12	17	399,0	372,0	0,6	0,6	-140,0
13	18	320,0	342,0	0,4	0,5	-176,9
14	23	714,0	715,0	1,1	1,3	-886,6
15	27	341,0	341,0	0,4	0,5	-136,1
16	29	262,0	235,0	0,3	0,4	26,7
17	32	10,2	10,2	0,0	0,0	-1,9
18	35	338,0	328,0	0,5	0,6	-121,5
19	37	715,0	667,0	1,0	1,2	-742,9
20	44	751,0	667,0	1,1	1,2	-22,5
21	47	260,0	260,0	0,4	0,5	48,1
22	49	617,0	615,0	0,8	1,0	-811,4
23	50	615,0	622,0	0,9	1,2	-882,2
24	51	615,0	622,0	1,2	1,5	-963,9
25	53	11,3	11,3	0,0	0,0	-1,4
26	55	11,3	11,3	0,0	0,0	-3,4
27	56	333,0	333,0	0,5	0,6	-150,6
28	57	338,0	328,0	0,6	0,7	-148,0
29	58	338,0	328,0	0,3	0,4	-77,2
30	59	338,0	328,0	0,6	0,7	-156,9
31	60	183,0	183,0	0,3	0,3	-87,5
32	62	25,1	25,1	0,0	0,0	-5,1
33	63	338,0	328,0	0,2	0,2	-50,7
34	64	326,0	329,0	0,2	0,2	-63,2
35	65	338,0	328,0	0,5	0,6	-130,3
36	66	347,0	418,0	0,4	0,6	-304,5
37	67	152,0	152,0	0,4	0,5	-147,7
38	72	46,3	46,3	0,1	0,1	-10,9
39	76	260,0	260,0	0,4	0,5	-103,3
40	140	615,0	622,0	0,9	1,1	-861,7
41	141	615,0	622,0	0,9	1,2	-882,2
42	143	11,3	11,3	0,0	0,0	-2,7
43	145	11,3	11,3	0,0	0,0	-2,3
44	146	333,0	333,0	0,5	0,6	-155,8
45	147	338,0	328,0	0,6	0,7	-152,5
46	148	338,0	328,0	0,6	0,8	-161,3
47	149	338,0	328,0	0,7	0,8	-165,7
48	150	183,0	183,0	0,2	0,3	-73,2
49	152	25,1	25,1	0,0	0,0	2,7
50	153	338,0	328,0	0,7	0,8	-165,7
51	154	326,0	329,0	0,5	0,7	-178,4
52	155	338,0	328,0	0,5	0,6	-130,3
53	156	347,0	418,0	0,4	0,6	-339,1
54	157	152,0	152,0	0,2	0,3	-81,2
55	162	46,3	46,3	0,1	0,1	-8,0
56	80	76,4	76,4	0,1	0,1	-65,7
57	82	76,4	76,4	0,1	0,1	-60,9
58	83	571,0	571,0	0,9	1,1	-804,6
59	96	579,0	579,0	0,7	0,9	-761,0
60	98	187,0	184,0	0,4	0,4	-101,7
61	127	118,0	118,0	0,2	0,3	-33,4
62	134	562,0	562,0	0,6	0,8	-732,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie zebranych danych z ankiet.

PODSUMOWANIE

Z przedstawionej analizy wynika, że możliwe jest opracowanie prostego systemu informatycznego, pozwalającego na ocenę efektywności wykorzystania dróg płatnych i bezpłatnych w transporcie towarów z dowolnego miejsca w Polsce do portu morskiego – zarówno w Świnoujściu, jak i w Gdańsku. System taki, oparty na analizie wariantów tras, może wspierać proces podejmowania decyzji w logistyce, uwzględniając zarówno aspekty ekonomiczne, jak i czasowe. Kluczową funkcjonalnością byłoby porównywanie różnych scenariuszy transportowych w kontekście całkowitych kosztów, czasu przejazdu oraz ryzyka operacyjnego wynikającego z aktualnych warunków drogowych. Wyniki badań ankietowych przeprowadzonych wśród przedstawicieli branży TSL, w szczególności spedytorów i kierowców zawodowych, wskazują, że mimo dodatkowych opłat większość respondentów preferuje korzystanie z dróg płatnych. W analizowanych przypadkach opcja ta okazała się bardziej opłacalna niż jazda trasami bezpłatnymi – głównie ze względu na skrócenie czasu przejazdu, niższe zużycie paliwa oraz mniejsze prawdopodobieństwo opóźnień spowodowanych korkami lub stanem nawierzchni. Podkreślić należy, że przedstawiona analiza ma charakter wstępny i opiera się w dużej mierze na uśrednionych danych oraz deklaracjach uczestników badania. Dla uzyskania większej precyzji w ocenie ekonomicznej oraz wiarygodności rekomendacji konieczne jest rozszerzenie modelu analitycznego o dodatkowe zmienne kosztowe, takie jak:

- amortyzacja pojazdów ciężarowych;
- koszty ubezpieczenia ładunków i pojazdów;
- wydatki eksploatacyjne (np. serwis, wymiana opon, naprawy);
- koszt pracy kierowców (zgodny z przepisami UE);
- opłaty związane z operacjami załadunku i rozładunku;
- wpływ jakości infrastruktury na stan techniczny pojazdu oraz bezpieczeństwo transportu.

Rekomenduje się, aby rozwój systemu informatycznego uwzględniał integrację z popularnymi usługami mapowymi (takimi jak Google Maps czy Open Street Map) oraz z narzędziami kalkulacyjnymi, które pozwolą na symulację kosztów w czasie rzeczywistym. Wskazane jest również oparcie przyszłych analiz na danych rzeczywistych pochodzących z firm transportowych – m.in. danych z tachografów, GPS oraz ewidencji kosztów przejazdów – w celu podniesienia dokładności i praktyczności narzędzia. Ponadto warto rozważyć utworzenie bazy danych przypadków transportowych z różnych regionów kraju, która umożliwi identyfikację zależności regionalnych i sezonowych. Dopełnieniem analizy powinno być uwzględnienie czynników środowiskowych (emisja CO₂, wpływ na środowisko naturalne), co wpisuje się w rosnące znaczenie zrównoważonego transportu. Dalsze działania powinny obejmować kontynuację i rozszerzenie badań ankietowych, tym razem z większą próbą respondentów oraz z uwzględnieniem pytań otwartych. Równocześnie warto nawiązać współpracę z podmiotami branżowymi oraz

jednostkami naukowymi w celu wspólnego rozwijania i testowania systemu w rzeczywistych warunkach operacyjnych.

LITERATURA

1. Ambrożkiewicz B., Nawłatyna B., Przystupa K., *Czas pracy kierowcy samochodu ciężarowego – teoria a praktyka*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2018, 19(12), s. 855–858.
2. Blagoev B., Muhr S.L., Ortlieb R., Schreyögg G., *Organizational working time regimes: drivers, consequences and attempts to change patterns of excessive working hours*, German Journal of Human Resource Management 2018, 32(3–4), s. 155–167.
3. Lach D.E., *Prawne aspekty czasu pracy kierowców*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie 2007, nr 12(84), s. 101–111.
4. Matejczyk E., Wegner-Kowalska J., Prasolek Ł., Hrycyk A., *Czas pracy kierowców po zmianach od 2 marca 2016 r.*, Wiedza i Praktyka, Warszawa 2016.
5. Mohd Mahudin N.D., Sakiman M.N., *Overworked and unsafe: a comparison of driving behaviour and safety culture according to driver types and working hours*, International Journal of Road Safety 2020, 1(2), s. 42–48.
6. Orzechowski M., Mrozik M., Danilecki K., *Wybrane aspekty analizy czasu pracy kierowcy*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2018, 19(9), s. 205–207.
7. Przystupa K., Gil L., Niewczas A., Pieniak D., *Working time of a Polish professional driver*, Archives of Transport 2019, 52(4), s. 57–66.
8. Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 11 grudnia 2019 r. w sprawie wykazów zawierających informacje i dane o zakresie korzystania ze środowiska oraz o wysokości należnych opłat, Dz.U. 2019, poz. 2443.
9. Rozporządzenie (WE) nr 561/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 marca 2006 r. w sprawie harmonizacji niektórych przepisów socjalnych odnoszących się do transportu drogowego oraz zmieniające rozporządzenia Rady (EWG) nr 3821/85 i (WE) 2135/98, jak również uchylające rozporządzenie Rady (EWG) nr 3820/85 (Tekst mający znaczenie dla EOG) – Deklaracja. Dz.U. L 102 z 11.4.2006, s. 1–14.
10. Sztorc S., *Wpływ czasu pracy kierowcy na dystrybucję towaru*, Praca inżynierska, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, Lublin 2017.
11. Szymańska E., Czerniakowska A., *Uwarunkowania efektywnego wykorzystania czasu pracy kierowcy w praktyce gospodarczej*, Ekonomia i Organizacja Logistyki 2021, 6(1), s. 69–83.

Źródła internetowe

12. <https://bazascm.we.uni.opole.pl/czas-pracy-kierowcy/> (dostęp 01.04.2025).
13. <https://poradniktransportowy.pl/03/taryfikator-kar-za-przekroczenie-czasu-pracy-kierowcy/> (dostęp 01.04.2025).
14. <https://slawatrans.pl/driver-time/czas-pracy-kierowcy-tira/> (dostęp 01.04.2025).
15. <https://www.biznes.gov.pl/pl/portal/005019> (dostęp 01.04.2025).
16. <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/czas-pracy-kierowcow> (dostęp 01.04.2025).
17. <https://www.gov.pl/web/rodzina/ustalanie-i-rozliczanie-czasu-pracy> (dostęp 01.04.2025).
18. <https://www.gov.pl/web/witd-opole/podstawowe-definicje> (dostęp 01.04.2025).

THE USE OF IT TOOLS FOR THE ANALYSIS OF ECONOMIC ELEMENTS IN THE SELECTION OF LAND FREIGHT TRANSPORT ROUTES

In 2024, a comprehensive cost analysis and optimization study of road transport on the Poland–Sweden–Poland route was conducted, excluding the ferry crossing segment over the Baltic Sea. The main objective of the study was to compare the cost-effectiveness of using toll and toll-free roads on selected sections within Poland, in order to identify the most profitable solutions from the carrier's perspective.

Keywords: *transport costs, transport economics, road transport, toll.*

INTERNET RZECZY W LOGISTYCE: KLUCZ DO TRANSFORMACJI Z PRZEMYSŁU 4.0 NA PRZEMYSŁ 5.0

Celem artykułu jest ukazanie roli, jaką odgrywa IoT w logistyce jako czynnik umożliwiający płynne przejście z koncepcji Przemysłu 4.0 do Przemysłu 5.0. W pracy przedstawiono charakterystykę obu koncepcji przemysłowych, omówiono aktualne zastosowania IoT w logistyce oraz wskazano, w jaki sposób technologie te mogą wspierać rozwój bardziej spersonalizowanego, zrównoważonego i człowiekocentrycznego przemysłu. W dalszej części zaprezentowano wyniki badania dotyczącego poziomu wdrożenia rozwiązań IoT w wybranych przedsiębiorstwach logistycznych.

Słowa kluczowe: transformacja, Internet rzeczy, Przemysł 4.0, Przemysł 5.0.

WSTĘP

Dynamiczny rozwój nowych technologii nieustannie kształtuje oblicze współczesnego przemysłu. W ostatnich latach szczególne znaczenie zyskała koncepcja Przemysłu 4.0, której fundamentami są automatyzacja, cyfryzacja procesów oraz integracja systemów cyberfizycznych. Jednym z kluczowych elementów tej rewolucji technologicznej jest Internet rzeczy (IoT – *Internet of Things*), umożliwiający wymianę danych pomiędzy urządzeniami w czasie rzeczywistym. Logistyka jako dziedzina wymagająca efektywności, precyzji i ciągłego monitoringu, w szczególności korzysta z możliwości, jakie oferuje IoT – od zarządzania flotą po inteligentne magazynowanie.

Obecnie jednak obserwujemy przejście na kolejny etap rozwoju przemysłowego – Przemysł 5.0, w którym technologia ma nie tylko wspierać procesy, ale także współdziałać z człowiekiem, z uwzględnieniem aspektów społecznych, indywidualnych potrzeb i zrównoważonego rozwoju. Transformacja ta wymaga nowego spojrzenia na dotychczasowe rozwiązania technologiczne i ich rolę w ekosystemie przemysłowym.

1. ROLA TECHNOLOGII W EWOLUCJI PRZEMYSŁU

1.1. Przemysł 1.0 – mechanizacja i energia parowa

Pierwsza rewolucja przemysłowa, która rozpoczęła się w drugiej połowie XVIII wieku, zapoczątkowała fundamentalne zmiany w sposobie organizacji pracy

oraz w strukturze produkcji. Kluczowym czynnikiem było wykorzystanie energii wodnej, a następnie parowej, do napędzania maszyn, co umożliwiło mechanizację wielu realizowanych dotychczas manualnie procesów. Wynalezienie maszyny parowej przez Jamesa Watta stało się kamieniem milowym w rozwoju przemysłu tekstylnego, górnictwa, hutnictwa oraz transportu. Przemiany te doprowadziły do powstania fabryk, koncentracji produkcji i urbanizacji, stanowiąc załączek nowoczesnej gospodarki przemysłowej [10].

1.2. Przemysł 2.0 – elektryczność i produkcja masowa

Druga rewolucja przemysłowa, datowana na przełom wieków XIX i XX, przyniosła ze sobą elektryfikację zakładów produkcyjnych oraz rozwój masowej produkcji, która zrewolucjonizowała sposób wytwarzania dóbr. Wprowadzenie linii montażowej przez Henry'ego Forda w 1913 roku pozwoliło na znaczne zwiększenie efektywności i standaryzacji procesów produkcyjnych. Elektryczność jako źródło energii umożliwiła większą elastyczność rozmieszczenia maszyn oraz poprawę bezpieczeństwa pracy. W tym okresie doszło również do istotnych przemian w logistyce i zarządzaniu zapasami, które zaczęto postrzegać jako integralny element produkcji.

1.3. Przemysł 3.0 – cyfryzacja i automatyzacja

Trzecia rewolucja przemysłowa, znana również jako rewolucja cyfrowa, rozpoczęła się w latach 70. XX wieku i opierała się na wykorzystaniu technologii informacyjnych oraz automatyzacji procesów produkcyjnych. Wprowadzenie mikroprocesorów, komputerów osobistych, a także sterowników PLC (*Programmable Logic Controllers*) pozwoliło na automatyczne sterowanie maszynami i procesami. Rozwój systemów zarządzania (ERP, MRP, SCM) umożliwił integrację różnych funkcji przedsiębiorstwa oraz lepszą koordynację działań w łańcuchach dostaw. Cyfryzacja przyczyniła się do wzrostu precyzji, redukcji kosztów operacyjnych, jak również zwiększenia elastyczności produkcji i logistyki.

1.4. Przemysł 4.0 – integracja systemów cyberfizycznych

Czwarta rewolucja przemysłowa oznacza głęboką integrację systemów fizycznych i cyfrowych, co prowadzi do powstania tzw. inteligentnych fabryk. Kluczowe znaczenie mają tu technologie takie jak Internet rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI – *Artificial Intelligence*), analiza danych w czasie rzeczywistym (*Big Data*), a także zaawansowana robotyka. Przemysł 4.0 zakłada pełną automatyzację i wzajemną komunikację pomiędzy maszynami (M2M – *machine-to-machine*), co umożliwia samodzielne podejmowanie decyzji operacyjnych przez systemy produkcyjne. W logistyce pojawiły się takie rozwiązania jak autonomiczne pojazdy, systemy śledzenia przesyłek w czasie rzeczywistym i zautomatyzowane magazyny, które znacząco zwiększają efektywność i redukują ryzyko błędów ludzkich.



1.5. Przemysł 5.0 – powrót człowieka do centrum uwagi

Przemysł 5.0 to koncepcja, która akcentuje konieczność ponownego uwzględnienia człowieka jako kluczowego uczestnika procesów przemysłowych. O ile Przemysł 4.0 koncentrował się na maksymalnej automatyzacji i efektywności, o tyle Przemysł 5.0 stawia na współpracę człowieka z maszyną (*human-machine collaboration*), personalizację produktów, zrównoważony rozwój oraz odpowiedzialność społeczną. Technologie takie jak IoT, AI, rozszerzona i wirtualna rzeczywistość (*augmented/virtual reality* – AR/VR), a także *blockchain* są wykorzystywane nie tylko do optymalizacji procesów, ale również do poprawy jakości życia i pracy. W logistyce oznacza to wdrażanie ergonomicznych rozwiązań, inteligentnych systemów zarządzania flotą oraz ekologicznych metod transportu [3].

1.6. Technologie jako siła napędowa transformacji

Na przestrzeni wieków technologia pełniła funkcję siły napędowej każdej kolejnej rewolucji przemysłowej, stając się podstawowym czynnikiem determinującym rozwój gospodarczy i społeczny. Od prostych narzędzi mechanicznych, przez elektryczność i komputery, aż po sztuczną inteligencję i inteligentne sieci – każda innowacja zmieniała nie tylko sposób produkcji, ale także relacje społeczne, modele biznesowe i kulturę pracy. Obecnie technologia staje się nie tylko narzędziem technicznym, lecz również środkiem wyrażania wartości społecznych, etycznych oraz środowiskowych. W kontekście logistyki oznacza to konieczność nieustannej adaptacji do nowych rozwiązań, rozwijania kompetencji cyfrowych, a także tworzenia elastycznych i odpornych łańcuchów dostaw, które będą w stanie sprostać wyzwaniom współczesnego świata [5].

2. CHARAKTERYSTYKA PRZEMYSŁU 4.0 I 5.0

2.1. Przemysł 4.0: automatyzacja, cyfryzacja, *Big Data*, IoT, sztuczna inteligencja

Przemysł 4.0, będący odpowiedzią na rosnącą potrzebę elastyczności, personalizacji i szybkości reakcji w globalnym środowisku produkcyjnym, charakteryzuje się szerokim zastosowaniem zaawansowanych technologii cyfrowych. Do kluczowych komponentów należą: Internet Rzeczy (IoT), przetwarzanie dużych zbiorów danych (*Big Data*), sztuczna inteligencja (AI), automatyzacja, uczenie maszynowe, technologia chmurowa oraz systemy cyberfizyczne (CPS – *Cyber-Physical Systems*) [9].

W kontekście logistyki Przemysł 4.0 umożliwił powstanie tzw. inteligentnych łańcuchów dostaw (*Smart Supply Chains*), w których informacje przepływają w czasie rzeczywistym, a decyzje są podejmowane automatycznie na podstawie danych zbieranych przez sensory i analizowanych przez algorytmy. Wykorzystanie

IoT pozwala na ciągle monitorowanie lokalizacji, temperatury oraz stanu technicznego produktów podczas transportu. *Big Data* z kolei daje możliwość prognozowania popytu, optymalizacji tras i zwiększania efektywności operacyjnej.

Technologie automatyzacji, takie jak autonomiczne wózki widłowe, drony czy zrobotyzowane magazyny (np. systemy typu AutoStore), skracają czas realizacji zamówień oraz minimalizują ryzyko błędów ludzkich. Wszystko to przekłada się na wyższy poziom dokładności, niższe koszty operacyjne i zwiększoną konkurencyjność przedsiębiorstw [2].

2.2. Przemysł 5.0: automatyzacja, cyfryzacja, *Big Data*, IoT, sztuczna inteligencja

Przemysł 5.0 stanowi odpowiedź na niedoskonałości modelu 4.0, w którym technologia zdominowała człowieka, często marginalizując jego kreatywność, potrzeby oraz wartości społeczne. Nowy paradygmat przemysłowy, wspierany przez Komisję Europejską, zakłada humanizację technologii, czyli rozwój rozwiązań zorientowanych na człowieka (*human-centric manufacturing*).

W tym ujęciu technologia nie ma jedynie zwiększać efektywności, ale również wspierać kreatywność, indywidualizm i jakość życia pracowników. Rozwój sztucznej inteligencji czy robotyki współpracującej (coboty) [14] nie służy zastąpieniu człowieka, lecz jego wzmocnieniu. Dzięki interfejsom typu *brain-computer*, rozszerzonej rzeczywistości (AR) oraz platformom *low-code/ no-code* pracownicy mogą efektywnie współdziałać z zaawansowanymi systemami bez konieczności posiadania głębokiej wiedzy technicznej.

W logistyce oznacza to większe zróżnicowanie ról, większą elastyczność pracy, a także personalizację usług logistycznych – od pakowania przesyłek po zarządzanie dostawami ostatniej mili (*last-mile delivery*). Przemysł 5.0 wspiera też ideę logistyki zrównoważonej, promując rozwiązania proekologiczne i społeczne, jak np. elektromobilność, gospodarka obiegu zamkniętego czy integracja z lokalnymi społecznościami [6].

2.3. Różnice i podobieństwa między Przemysłem 4.0 i 5.0

Podstawową różnicą między Przemysłem 4.0, a Przemysłem 5.0 jest zmiana orientacji z technologii na człowieka. O ile czwarta rewolucja przemysłowa skupiała się na maksymalizacji efektywności operacyjnej przez automatyzację i cyfryzację, o tyle piąta rewolucja kładzie nacisk na wartość społeczną, ekologiczną i indywidualną personalizację produktów i usług (tabela 1).

Wspólny mianownik stanowią rozwój inteligentnych systemów decyzyjnych, integracja danych oraz koncepcja łańcucha wartości opartego na wiedzy. Przemysł 5.0 rozszerza jednak tę wizję o komponenty etyczne, społeczne i środowiskowe, stanowiąc bardziej holistyczne podejście do rozwoju technologicznego [13].

Tabela 1

Kluczowe różnice i podobieństwa między Przemysłem 4.0 a Przemysłem 5.0

Lp.	Przemysł 4.0	Przemysł 5.0
1	Zastąpienie człowieka przez maszynę	Współpraca człowieka z maszyną
2	Masowa personalizacja	Indywidualna personalizacja
3	Niska świadomość ekologiczna	Silny nacisk na zrównoważony rozwój i ekologię
4	IoT, <i>Big Data</i> , AI, automatyzacja, CPS	IoT, AI, AR/VR, coboty, interfejsy człowiek–maszyna
5	Efektywność, obniżenie kosztów	Innowacja, personalizacja, odpowiedzialność społeczna

Źródło: opracowanie własne.

2.4. Znaczenie transformacji z Przemysłu 4.0 do Przemysłu 5.0 dla logistyki

Transformacja z Przemysłu 4.0 do 5.0 stanowi jeden z najważniejszych procesów współczesnej logistyki, redefiniując jej rolę w strukturze gospodarki. W erze 4.0 logistyka była przede wszystkim zorientowana na efektywność operacyjną, automatyzację procesów, minimalizację strat i kosztów oraz maksymalizację przepustowości. Nowe podejście 5.0 wprowadza elementy odpowiedzialności społecznej, elastyczności oraz indywidualizacji usług.

Logistyka 5.0 kładzie nacisk na:

- współpracę człowieka z inteligentnymi systemami (np. pracownik wspierany przez cobota przy kompletacji zamówień);
- zrównoważony transport (np. floty elektryczne, optymalizacja tras);
- rozwój logistyki miejskiej w zgodzie z koncepcją *Smart City*;
- personalizację usług logistycznych w oparciu o preferencje klienta;
- wzrost transparentności łańcucha dostaw dzięki *blockchain* i IoT [4].

Ponadto transformacja z 4.0 do 5.0 wymaga od menedżerów logistyki nowego typu kompetencji – nie tylko technicznych, ale również społecznych, etycznych i środowiskowych. Kluczowe stają się umiejętności zarządzania zespołami interdyscyplinarnymi, znajomość zrównoważonych modeli biznesowych i zdolność do adaptacji w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu technologicznym. W efekcie logistyka przestaje być jedynie funkcją operacyjną – staje się strategicznym elementem odpowiedzialnego rozwoju przemysłu przyszłości.

3. INTERNET RZECZY JAKO KLUCZOWY CZYNNIK PRZEJŚCIA DO PRZEMYSŁU 5.0

3.1. Jak IoT wspiera współpracę człowieka z technologią

W kontekście Przemysłu 5.0, który koncentruje się na człowieku jako centralnym elemencie procesu produkcyjnego i usługowego, Internet rzeczy staje się narzędziem wspierającym tę ideę poprzez tworzenie środowiska, w którym technologia nie zastępuje pracowników, lecz aktywnie wspomaga ich działania. Dzięki zastosowaniu sensorów, urządzeń połączonych z siecią oraz zaawansowanych systemów analitycznych IoT umożliwia współdziałanie ludzi i maszyn w czasie rzeczywistym, zwiększając efektywność, bezpieczeństwo i komfort pracy.

Jednym z przykładów takiej współpracy jest wykorzystanie inteligentnych urządzeń ubieralnych, takich jak opaski czy okulary rozszerzonej rzeczywistości (AR), które wspierają pracowników w magazynach i centrach dystrybucyjnych. Urządzenia te umożliwiają błyskawiczny dostęp do informacji o lokalizacji towaru, przebiegu realizacji zamówienia czy instrukcji operacyjnych, a także monitorują parametry fizjologiczne pracownika, zapobiegając przeciążeniom i wypadkom [1].

Z kolei czujniki umieszczone na pojazdach i w infrastrukturze magazynowej pozwalają na precyzyjne śledzenie warunków pracy – takich jak temperatura, wilgotność czy stan techniczny maszyn – i przekazują te dane operatorom, wspomagając ich w podejmowaniu decyzji w czasie rzeczywistym. Technologia ta daje możliwość szybszego reagowania na nieprawidłowości i minimalizowania przestoju, jednocześnie zwiększając komfort pracy.

IoT odgrywa również znaczącą rolę w koordynacji współpracy ludzi z robotami współpracującymi, które są zaprogramowane do wykonywania zadań wspólnie z człowiekiem. Roboty, dzięki komunikacji IoT, potrafią dostosowywać swoje działania do ruchów operatora, analizować otoczenie i unikać kolizji, co znacząco podnosi poziom bezpieczeństwa na hali produkcyjnej czy w magazynie [11].

Podsumowując, IoT w logistyce i transporcie staje się pomostem łączącym człowieka z technologią charakterystyczną dla Przemysłu 5.0. Wspiera operatorów, zwiększa ich zdolność do podejmowania decyzji oraz redukuje ryzyko błędów i wypadków, tworząc bardziej zintegrowane i ergonomiczne środowisko pracy.

3.2. Personalizacja usług logistycznych dzięki IoT

Internet rzeczy odgrywa także fundamentalną rolę w procesie personalizacji usług logistycznych, co stanowi jeden z kluczowych aspektów transformacji w kierunku Przemysłu 5.0. Dzięki integracji różnorodnych urządzeń IoT – takich jak czujniki lokalizacyjne, rejestratory parametrów środowiskowych czy inteligentne systemy zarządzania łańcuchem dostaw – możliwe staje się dopasowywanie usług do indywidualnych oczekiwań klientów, nawet w skali masowej.

Klienci mają możliwość modyfikacji terminu czy miejsca dostawy, otrzymują automatyczne powiadomienia o statusie przesyłki, a systemy logistyczne, bazując na danych z czujników i wcześniejszych zamówień, potrafią przewidywać zapotrzebowanie i dostosowywać działania operacyjne do preferencji klienta.

W zaawansowanych magazynach zastosowanie inteligentnych systemów zarządzania towarem (WMS), połączonych z czujnikami IoT, pozwala na optymalne rozmieszczanie produktów i skrócenie czasu kompletacji zamówień. Dzięki analityce predykcyjnej możliwe jest też oferowanie usług w modelu *just-in-time* lub *same-day delivery*, co wcześniej było dostępne wyłącznie dla wybranych klientów premium [7].

IoT daje także możliwość gromadzenia i analizowania danych o zachowaniach zakupowych klientów, co w połączeniu z uczeniem maszynowym umożliwia tworzenie indywidualnych rekomendacji dotyczących formy dostawy, typu opakowania czy kanału komunikacji. Tym samym logistyka przestaje mieć charakter jednolity i masowy, a staje się usługą szytą na miarę, ściśle powiązaną z profilem i oczekiwaniami odbiorcy.

W efekcie personalizacja oparta na IoT zwiększa lojalność klientów, poprawia jakość obsługi i umożliwia budowanie trwałych relacji w oparciu o elastyczność i przejrzystość procesów logistycznych [15].

3.3. Wpływ na zrównoważony rozwój – optymalizacja tras, zmniejszenie emisji CO₂

W dobie nasilającego się kryzysu klimatycznego i rosnącej presji społecznej na podejmowanie działań proekologicznych technologie IoT odgrywają kluczową rolę w realizacji celów zrównoważonego rozwoju w sektorze transportu i logistyki. Ich zastosowanie umożliwia optymalizację procesów pod kątem zużycia energii, ograniczenia emisji CO₂ oraz minimalizacji marnotrawstwa zasobów.

Jednym z głównych obszarów zastosowania IoT jest optymalizacja tras transportowych. Systemy zarządzania flotą, korzystające z danych GPS, czujników pokładowych oraz informacji o ruchu drogowym w czasie rzeczywistym, pozwalają na wybór najkrótszej i najbardziej efektywnej trasy przejazdu. Redukuje to zarówno czas dostawy, jak i ilość zużywanego paliwa, co bezpośrednio przekłada się na mniejsze emisje gazów cieplarnianych [8].

Dzięki zastosowaniu inteligentnych tachografów i rejestratorów zużycia paliwa możliwe jest monitorowanie stylu jazdy kierowców oraz parametrów pracy silnika, co pozwala identyfikować nieefektywne praktyki i wdrażać strategie ich poprawy. Równocześnie systemy konserwacji predykcyjnej (*predictive maintenance*) wykrywają zużycie podzespołów pojazdów, zanim dojdzie do awarii, co zapobiega nieplanowanym przestojom i zwiększa efektywność energetyczną.

IoT wspiera również zarządzanie chłodniami i transportem produktów wymagających kontroli temperatury. Stały monitoring warunków transportu pozwala na utrzymanie jakości towarów, ograniczenie strat i zmniejszenie liczby

reklamacji, a tym samym – ograniczenie konieczności ponownych dostaw i dodatkowego zużycia energii.

W szerszym ujęciu wdrożenie IoT umożliwia firmom logistycznym tworzenie strategii neutralności klimatycznej, wspierając raportowanie ESG (*Environmental, Social, Governance*) i zgodność z regulacjami unijnymi w zakresie ochrony środowiska. Dzięki integracji danych i automatyzacji decyzji działania ekologiczne nie są już jedynie kosztownym dodatkiem, lecz stanowią integralny element strategii operacyjnej [12].

4. ANALIZA SWOT INTERNETU RZECZY JAKO NAJWAŻNIEJSZEGO CZYNNIKA PRZEJŚCIA DO PRZEMYSŁU 5.0

4.1. Opis badania

Badanie przeprowadzono w celu oceny roli Internetu rzeczy w procesie transformacji z czwartej (4.0) do piątej (5.0) rewolucji przemysłowej, ze szczególnym uwzględnieniem sektora logistyki. Analiza ta bazuje na koncepcji SWOT, która umożliwia identyfikację mocnych i słabych stron, szans oraz zagrożeń związanych z implementacją IoT w kontekście zmian technologicznych i organizacyjnych.

Każdy z punktów analizy SWOT oceniono w skali 1–5, gdzie wartość 1 oznacza najmniejszą wagę, a 5 – największą: (tabele 2, 3). Wartości zostały przypisane na podstawie wyników badań terenowych oraz opinii ekspertów branżowych. Taka metodologia pozwala na uzyskanie obiektywnej oceny wpływu IoT na transformację przemysłową oraz wskazanie kluczowych obszarów, które wymagają uwagi podczas wdrażania technologii w firmach przechodzących z Przemysłu 4.0 do Przemysłu 5.0.

Tabela 2

Szanse i zagrożenia związane z Internetem rzeczy w procesie transformacji przemysłu z czwartej do piątej generacji

Lp.	Szanse	Wartość	Zagrożenia	Wartość
1	Współpraca człowieka z maszyną (coboty, AR)	5	Wysokie koszty i ryzyko inwestycyjne	3
2	Nowe modele biznesowe zorientowane na klienta	4	Złożoność zarządzania technologią	4
3	Nowoczesne technologie zrównoważonego rozwoju	5	Zależność od dostawców technologii	3
4	Rozwój logistyki miejskiej w kontekście <i>smart cities</i>	4	Problemy z integracją nowych technologii z istniejącymi systemami	5
5	Przewaga konkurencyjna dzięki innowacjom	5	Problemy związane z regulacjami prawnymi	4
SUMA		23	SUMA	19

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3

Mocne i słabe strony Internetu rzeczy w procesie transformacji przemysłu
z czwartej do piątej generacji

Lp.	Mocne strony	Wartość	Słabe strony	Wartość
1	Integracja człowieka z technologią (coboty)	5	Wysokie koszty początkowe	3
2	Personalizacja produktów i usług	4	Złożoność technologiczna	4
3	Zrównoważony rozwój	4	Potrzebna jest wyspecjalizowana infrastruktura IT	4
4	Zaawansowane analizy i integracja z AI	5	Obawy dotyczące prywatności i bezpieczeństwa danych	5
5	Poprawa efektywności operacyjnej	4	Opór pracowników przed zmianą	2
SUMA		22	SUMA	18

Źródło: opracowanie własne.

4.2. Obliczenia

Przy wykorzystaniu wyników z analizy SWOT możemy obliczyć ogólną zdolność transformacyjną firmy do wdrożenia IoT w kontekście przejścia z Przemysłu 4.0 do 5.0. To obliczenie polega na przypisaniu wag poszczególnym czynnikom SWOT, a następnie na ich sumowaniu:

$$ZTF = \frac{\sum(\text{Mocne strony}) + \sum(\text{Szanse}) - \sum(\text{Słabe strony}) - \sum(\text{Zagrożenia})}{\text{Liczba kategorii SWOT}}$$

$$ZTF = \frac{22 + 23 - 18 - 19}{4} = \frac{8}{4} = 2$$

$ZTF = 2$ oznacza, że firma ma umiarkowaną zdolność do transformacji z Przemysłu 4.0 do 5.0, biorąc pod uwagę zarówno mocne strony i szanse, jak i słabe strony oraz zagrożenia.

Dalej możemy obliczyć wskaźnik efektywności IoT w kontekście Przemysłu 5.0 na podstawie ocen mocnych stron i szans. Wskaźnik ten pokazuje, jak bardzo IoT przyczynia się do zrealizowania transformacji:

$$WEIoT = \frac{\sum(\text{Mocne strony}) + \sum(\text{Szanse})}{\sum(\text{Mocne strony}) + \sum(\text{Szanse}) + \sum(\text{Słabe strony}) + \sum(\text{Zagrożenia})}$$

$$WEIoT = \frac{22 + 23}{22 + 23 + 18 + 19} = \frac{45}{82} \approx 0,548$$

$WEIoT = 0,548$ oznacza, że IoT przyczynia się w 54,8% do sukcesu transformacji z Przemysłu 4.0 do 5.0 w kontekście mocnych stron i szans. To pokazuje, że technologia IoT odgrywa znaczącą rolę, ale nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na transformację.

Jako ostatni parametr możemy obliczyć wskaźnik ryzyka transformacji (WRT), który ocenia ryzyko związane z transformacją, uwzględniając zagrożenia oraz słabe strony. Wskaźnik ten daje firmom narzędzie do oceny, jak duże są ryzyka związane z wdrożeniem IoT:

$$WRT = \frac{\sum(\text{Słabe strony}) + \sum(\text{Zagrożenia})}{\sum(\text{Mocne strony}) + \sum(\text{Szanse}) + \sum(\text{Słabe strony}) + \sum(\text{Zagrożenia})}$$

$$WRT = \frac{18 + 19}{22 + 23 + 18 + 19} = \frac{37}{82} \approx 0,451$$

$WRT = 0,451$ oznacza, że ryzyko związane z transformacją z Przemysłu 4.0 do 5.0 w kontekście IoT wynosi około 45,1%. To wskazuje na znaczące wyzwania, jakie mogą wystąpić w procesie implementacji, ale także na potencjał do minimalizacji ryzyka, jeśli zostaną podjęte odpowiednie działania.

PODSUMOWANIE

Transformacja logistyki z Przemysłu 4.0 do Przemysłu 5.0 opiera się na coraz szerszym wykorzystaniu technologii Internetu rzeczy (IoT), która stanowi podstawę dla nowoczesnych, inteligentnych i elastycznych systemów zarządzania łańcuchem dostaw. IoT umożliwia automatyczne gromadzenie i analizę danych w czasie rzeczywistym, co przekłada się na lepsze zarządzanie zasobami, zwiększoną transparentność procesów oraz szybsze reagowanie na zmiany rynkowe i operacyjne.

W kontekście Przemysłu 5.0 szczególne znaczenie zyskuje integracja technologii z potrzebami człowieka. Zastosowanie rozwiązań IoT wspiera współpracę między ludźmi a systemami cyfrowymi, umożliwiając podejmowanie bardziej trafnych decyzji, podnoszenie jakości usług oraz personalizację procesów logistycznych. Dzięki inteligentnym urządzeniom możliwe jest dostarczanie usług dopasowanych do indywidualnych oczekiwań klientów i specyfiki operacyjnej danego przedsiębiorstwa.



Jednocześnie technologie IoT wspierają realizację celów związanych ze zrównoważonym rozwojem. Poprzez optymalizację tras transportowych, monitorowanie zużycia energii oraz zarządzanie emisją zanieczyszczeń istnieje możliwość zmniejszenia śladu węglowego logistyki i bardziej efektywnego wykorzystania zasobów. Tym samym Internet rzeczy nie tylko przyczynia się do cyfrowej transformacji branży logistycznej, ale również wspiera jej adaptację do wyzwań klimatycznych i społecznych.

Podsumowując, IoT odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu nowoczesnej logistyki, łącząc zalety automatyzacji, współpracy człowieka z technologią oraz działań proekologicznych, co czyni go fundamentem dla dalszego rozwoju Przemysłu 5.0.

LITERATURA

1. Baryannis G., Dani S., Antoniou G., *Predictive analytics and artificial intelligence in supply chain management*, Computers & Industrial Engineering 2019, 137, 106024.
2. Białoń L., *Przemysł 5.0 – nowa koncepcja rozwoju gospodarczego zorientowana na człowieka*, Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa 2022, nr 4, s. 16–23.
3. Demir K.A., Döven G., Sezen B., *Industry 5.0 and human-centric solutions: a conceptual framework*, Procedia Computer Science 2019, 158, s. 1042–1051.
4. Dyczkowska J., Jagoda A., *Internet rzeczy jako czynnik transformacji procesów logistycznych w kierunku Przemysłu 4.0*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu 2019, nr 63, s. 153–163.
5. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Breque M., De Nul L., Petridis A., *Industry 5.0 – towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union 2021.
6. Gubi E., Steglich D., Zsifkovits H., *IoT in logistics: a conceptual framework and research agenda*, Journal of Business Logistics 2020.
7. *Internet Rzeczy w Polsce – analiza potencjału i kierunków rozwoju*, Ministerstwo Cyfryzacji, Warszawa 2020.
8. *IoT w logistyce – raport z wdrożeń i dobrych praktyk*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2023.
9. Łopatowska J., *Od Przemysłu 4.0 do Przemysłu 5.0 – wyzwania i możliwości dla przedsiębiorstw*, Przegląd Organizacji 2021, nr 5, s. 21–28.
10. Mazur A., *Przemysł 4.0 – geneza, koncepcja, wyzwania*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie 2019, nr 139, s. 321–332.
11. Nowicka K., *Wpływ rozwiązań IoT na efektywność łańcucha dostaw*, Logistyka 2021, nr 3, s. 112–117.
12. Rada ds. Kompetencji Sektora Nowoczesnych Usług Biznesowych, *Technologie Przemysłu 5.0 a kompetencje przyszłości*, PARP, Warszawa 2022.
13. Scholz O., Lorenz P., *Smart factories and human-centric production systems*, Journal of Manufacturing Systems 2020, 57, s. 219–231.
14. Wortmann F., Flüchter K., *Internet of Things – technology and value added*, Business & Information Systems Engineering 2015, 57(3), s. 221–224.
15. *Zielona transformacja w logistyce i przemyśle 4.0*, PARP, Warszawa 2021.

INTERNET OF THINGS IN LOGISTICS: THE KEY TO TRANSFORMATION FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUSTRY 5.0

The aim of this article is to highlight the role of IoT in logistics as a factor enabling the seamless transition from the concept of Industry 4.0 to Industry 5.0. The paper presents the characteristics of both industrial concepts, discusses current IoT applications in logistics, and shows how these technologies can support the development of a more personalized, sustainable, and human-centered industry. The latter part presents the results of a study on the level of IoT solution implementation in selected logistics companies.

Keywords: transformation, Internet of Things, Industry 4.0, Industry 5.0.

KOLEJ CZY LOTNICTWO – MIĘDZYGAŁĘZIOWA WSPÓŁPRACA CZY KONKURENCJA?

W niniejszym artykule przedstawiono analizę międzygałęziową kolei oraz lotnictwa w kontekście zastępowania lotów transferowych połączeniami kolejowymi. Zatem bezpośrednie cele opracowania obejmują weryfikację możliwości współpracy systemów kolejowego i lotniczego oraz przeanalizowanie potencjalnych barier lub szans na ich wdrożenie przy jednoczesnym zastąpieniu lotów transferowych przez połączenia kolejowe oraz wprowadzenie biletu kolejowo-lotniczego. Celem pośrednim jest natomiast wskazanie ogólnych rozwiązań, które będą mogły zostać przełożone na inne trasy w Polsce.

Słowa kluczowe: kolej, lotnictwo, integracja systemów, loty transferowe.

WSTĘP

Odpowiednia korelacja pomiędzy pasażerskim transportem kolejowym i lotniczym jest jednym z największych wyzwań rozwoju systemu transportowego Polski. Obie gałęzie transportu odpowiadają za coroczne przewożenie znacznych ilości pasażerów w kraju. Jednak ich współpraca na rzecz przewozów pasażerskich jest na bardzo niskim poziomie w aspekcie zarówno wszelakich rodzajów integracji obu systemów transportowych, jak i współpracy pod względem przewozów na poszczególnych dystansach (krótkich – do ok. 3 h podróży, średnich – od 3 h do 7 h oraz długich – ponad 7 h podróży).

Przeprowadzone analizy dotyczące stosunku międzygałęziowego systemów w pierwszej kolejności odnoszą się do obecnych możliwości płynących z istniejącej infrastruktury kolejowej i lotniczej, połączeń realizowanych przez poszczególnych przewoźników, czasów przejazdu i przelotu, jak również maksymalnej pojemności taboru kolejowego oraz floty linii lotniczych. W dalszej części uwzględniają możliwości, które pojawiają się po zrealizowaniu podstawowych inwestycji lub też wprowadzeniu odpowiednich innowacyjnych rozwiązań integracji i ogólnego funkcjonowania systemów. Analizy te dotyczą trasy między dwoma największymi miastami w Polsce – Krakowem i Warszawą.

1. ANALIZA RYNKU PRZEWÓZÓW PASAŻERSKICH

Według dostępnych danych, opublikowanych przez Urząd Transportu Kolejowego, w 2024 roku przewoźnicy kolejowi na terenie Polski przewieźli 402,5 mln pasażerów [7]. Udział procentowy poszczególnych przewoźników, istotny w kontekście podziału pasażerów na podróżujących na kierunkach dalekodystansowych oraz regionalnych, został zaprezentowany w tabeli 1.

Tabela 1

Pasażerowie przewiezieni koleją w Polsce w 2024 roku według przewoźników

Lp.	Nazwa przewoźnika	Liczba osób [mln]	Udział w całości [%]
1	Polregio	99,66	24,76%
2	PKP Intercity	77,40	19,23%
3	Koleje Mazowieckie	64,00	15,90%
4	PKP Szybka Kolej Miejska w Trójmieście	48,46	12,04%
5	Koleje Dołnośląskie	22,26	5,53%
6	Koleje Śląskie	21,61	5,37%
7	Koleje Wielkopolskie	18,35	4,56%
8	Szybka Kolej Miejska – Warszawa	17,83	4,43%
9	Koleje Małopolskie	13,44	3,34%
10	Łódzka Kolej Aglomeracyjna	10,51	2,61%
11	Warszawska Kolej Dojazdowa	5,19	1,29%
12	Arriva RP	2,82	0,70%
13	Pozostali	0,97	0,24%

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7].

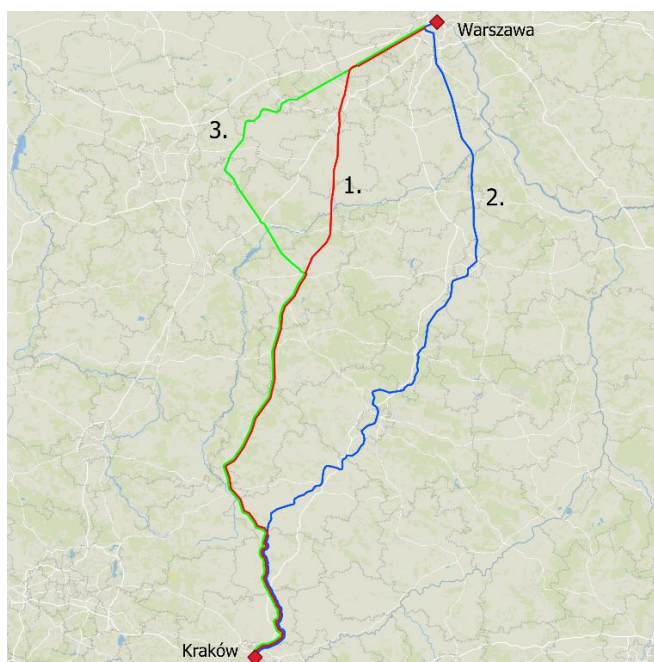
Przyjmując założenie, że PKP Intercity jest głównym przewoźnikiem dalekobieżnym, można stwierdzić, że na takie dystanse podróżuje rocznie ok. 77,4 mln osób. Z perspektywy analizowanego tematu ta grupa pasażerów jest najbardziej kluczowa. Pozostała grupa – ok. 325 mln osób – podróżuje na dystansach regionalnych. Należy też zaznaczyć, że dystanse dalekodystansowe na kolei uznaje się w lotnictwie za średniodystansowe, a często nawet krótkodystansowe.

Natomiast w przypadku drugiej gałęzi – lotnictwa – liczba pasażerów obsługiwanych przez wszystkie porty lotnicze w 2024 roku wyniosła 59,2 mln, z czego 55,6 mln w ruchu międzynarodowym, a 3,6 mln w ruchu krajowym [14]. Należy również przyjąć, że loty transferowe są uwzględnione w ruchu krajowym.

2. CHARAKTERYSTYKA FUNKCJONALNA SYSTEMU KOLEJOWEGO

2.1. Stan istniejący

Potok pasażerski pomiędzy Krakowem a Warszawą jest jednym z największych w Polsce. Istnieją trzy główne trasy kolejowe, które przenoszą całość ruchu pociągów pasażerskich. Wszystkie zostały oznaczone na rys. 1 numerami od 1 do 3. Długość trasy 1 wynosi 290 km, trasy 2 – 320 km, a trasy 3 – 330 km.



Rys. 1. Trasy kolejowe między Krakowem a Warszawą

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1].

Dla wymienionych tras została przygotowana szczegółowa analiza na podstawie obecnie istniejącego rozkładu jazdy pociągów [10]. Na początku w badaniu skupiono się na wybraniu trasy najszybszej i najbardziej perspektywicznej. W związku z tym do dalszych analiz wybrano trasę nr 1 ze względu na dopuszczenie na niej ruchu pociągów kolei dużych prędkości do 200 km/h, zgodnie z Dyrektywą 2016/797 Unii Europejskiej tworzącą sieć kolei UE [2] oraz planowane na niej podwyższenie maksymalnej prędkości do 250 km/h.

Następnie wyznaczone zostały bezpośrednie połączenia kolejowe [10], według kategorii, pomiędzy Krakowem i Warszawą oraz Warszawą i Krakowem, prędkości

handlowe przejazdów, a co za tym idzie – również średnie czasy przejazdów. Ponadto dla każdej kategorii określona została średnia maksymalna liczba pasażerów, jaka może zostać zabrana na pokład pociągu w danej kategorii, co przedstawia tabela 2.

Tabela 2

Analiza funkcjonalna istniejących połączeń kolejowych według kategorii pociągów

Lp.	Kategoria pociągu	Liczba par pociągów w ciągu doby	Średnia prędkość handlowa [km/h]	Średni czas przejazdu [min]	Średnia pojemność maksymalna składu pociągu [os.]
1	EIP	12	126,1	138	386
2	EIC	1	125,0	139	640
3	IC	3	100,0	174	597
4	TLK	1	112,3	155	704

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10, 11, 15].

Połączenia kategorii EIP są obsługiwane składami typu elektryczny zespół trakcyjny EZT, ED250 Pendolino, dostosowanymi do jazdy z prędkością do 250 km/h. Natomiast pozostałe są obsługiwane przez składy wagonowe z wagonami i lokomotywami o maksymalnej prędkości do 160 lub 200 km/h.

W kwestii częstotliwości pociągów można wskazać, że składy poruszają się w niemal jednolitym takcie co 1 h przez cały dzień, z wyjątkiem dwóch momentów, gdy jednorazowo wyruszają co 0,5 h lub 2 h. Podsumowując, oferta przewozowa jest stabilna i przewidywalna przez cały dzień. Średnia prędkość handlowa na badanym odcinku przekracza 120 km/h dla kategorii EIP oraz EIC, co jest dobrym wynikiem, nadal jednak możliwym do poprawy. Pojemność składów jest najmniejsza w przypadku EIP, co wynika ze stałej pojemności składu EZT i niewystarczającej liczby składów do uruchomienia pociągów w podwójnej trakcji.

2.2. Stan docelowy

Jeśli chodzi o perspektywiczny kształt systemu kolejowego na trasie Kraków–Warszawa, można wskazać następujące usprawnienia, które istotnie wpłyną na ruch kolejowy oraz usprawnienie oferty przewozowej:

- wprowadzenie systemu ETCS poziomu 2 oraz zabudowa systemu GSM-R na Centralnej Magistrali Kolejowej;
- uruchamianie pociągów ED250 w podwójnej trakcji;
- zwiększenie częstotliwości kursowania składów do 0,5 h;
- budowa inwestycji Kolei Dużych Prędkości pn. Węzeł Małopolsko-Śląski.

Realizacja wymienionych działań pozwoli na przyspieszenie kursowania składów do prędkości 250 km/h na kluczowym odcinku trasy, a przez to na skrócenie czasu przejazdu, dodatkowo zaś na zwiększenie możliwości przewo-

zowych i maksymalnej liczby pasażerów przewożonych. W tabeli 3 zestawiono propozycje i zmiany planowane do wprowadzenia w perspektywie 5 lat oraz propozycje, które są planowane do wprowadzenia w dłuższej perspektywie czasowej.

Tabela 3

Analiza funkcjonalna planowanych połączeń kolejowych według kategorii pociągów

Lp.	Kategoria pociągu	Liczba par pociągów w ciągu doby	Średnia prędkość handlowa [km/h]	Średni czas przejazdu [min]	Średnia pojemność maksymalna składu pociągu [os.]
1	EIP	17	152,6	114	772
2	EIC	17	142,2	122	768

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10, 11].

Ponadto należy wziąć pod uwagę fakt, że w analizach uwzględniono czasy przejazdu do stacji Warszawa Zachodnia. Dojazd do lotniska wymaga dodania jeszcze 15 min plus czas na przesiadkę ok. 5 min. Przewóz ten realizowany jest przez przewoźników: SKM Warszawa oraz Koleje Mazowieckie.

3. CHARAKTERYSTYKA FUNKCJONALNA SYSTEMU LOTNICZEGO

Trasa Kraków–Warszawa to jedno z kluczowych połączeń krajowych realizowanych przez Polskie Linie Lotnicze LOT. Mimo dostępności konkurencyjnych czasowo połączeń kolejowych rejsy lotnicze na tej trasie utrzymują się w rozkładzie z powodów strategicznych. Główną przyczyną nie jest bowiem transport *point-to-point*, lecz funkcja tzw. połączenia zasilającego hubu przesiadkowego w Warszawie na Lotnisku Chopina.

3.1. Operacyjny układ połączeń, tabor i czas lotu

Analizie poddano okres przejściowy od 23 marca do 5 kwietnia 2025 roku – ostatni tydzień obowiązywania zimowej siatki połączeń oraz pierwszy tydzień siatki letniej [8]. W tym czasie PLL LOT realizowały średnio od pięciu do sześciu rejsów dziennie w każdym kierunku (KRK–WAW–KRK). Rejsy są rozłożone w czasie równomiernie – pierwszy odlot z Krakowa ma miejsce już o godzinie 5:40, ostatni natomiast około 22:50 lub 18:15, w zależności od dnia tygodnia. Taki rozkład godzinowy umożliwia podłączenie pasażerów do głównych fal przesiadkowych w Warszawie – porannej między godzinami 7:00 a 9:00, popołudniowej między 13:00 a 15:00 oraz wieczornej od ok. 17:00 do 19:00.

Na analizowanej trasie wykorzystuje się w większości samoloty z rodziny Embraer – głównie modele E170, E175 oraz E195, rzadziej Boeingi. Pojemności tych samolotów wahają się od 72 do 132 miejsc w przypadku Embraerów lub od 160 do 180 osób w przypadku Boeingów. Dzienna pojemność połączeń w jednym kierunku wynosi przeciętnie od 500 do 650 miejsc, przy czym największe samoloty są podstawiane w godzinach o największym potencjale przesiadkowym [6].

Rozkładowy operacyjny czas przelotu z Krakowa do Warszawy wynosi nominalnie około 50–55 min. W praktyce jednak całkowity czas podróży obejmuje też dojazd na lotnisko, procedury odprawy, kontrolę bezpieczeństwa, boarding, czas kołowania samolotu oraz oczekiwanie na zgodę na odlot, a także całkowity czas potrzebny na opuszczenie samolotu i transfer do terminalu. Po zsumowaniu średniego czasu niezbędnego na te wszystkie czynności, mimo że sam czas przebywania w powietrzu to 1 h, można stwierdzić, że cała podróż zajmuje ok. 3–3,5 h.

3.2. Struktura i charakterystyka pasażerów

Kluczowym aspektem utrzymania połączeń KRK–WAW–KRK przez PLL LOT jest dominacja pasażerów tranzytowych. Według szacunków opartych na danych przewoźnika oraz raportach branżowych nawet 67–75% pasażerów tych rejsów to osoby przesiadające się w Warszawie na dalsze połączenia międzynarodowe. Typowymi kierunkami transferowymi są przede wszystkim loty, które nie są operowane z Międzynarodowego Portu Lotniczego w podkrakowskich Balicach lub ich częstotliwość jest dosyć niska, przede wszystkim Ameryka Północna na kierunkach: Nowy Jork (JFK), Chicago (ORD), Toronto (YYZ) oraz Azja na kierunkach: Tokio (NRT), Delhi (DEL), Seul (ICN) [3, 12]. Dla pasażerów tych lotów czas podróży do Warszawy nie jest wartością samą w sobie – kluczowe znaczenie ma zapewnienie zsynchronizowanej przesiadki, najlepiej z odprawą bagażu „do końca podróży” i minimalnym ryzykiem opóźnień. Z tego powodu wielu pasażerów transferowych wciąż wybiera połączenie do hubu – mimo wyższej ceny i zbliżonego czasu podróży względem kolei.

3.3. Sezonowość i zmiana siatki połączeń

Z dniem 31 marca nastąpiło przejście z siatki zimowej na letnią zgodnie z kalendarzem IATA [12]. W analizowanym przypadku przełożyło się to m.in. na: nieznaczne zwiększenie liczby dziennych rotacji z 5 na 6–7; przesunięcia w godzinach wylotów, które w siatce letniej są bardziej dopasowane do nowych fal przesiadkowych; rotacyjne podstawianie większych samolotów (więcej Embraerów E195 zamiast E170) [4]. Wskazuje to na fakt, że trasę traktuje się jako elastyczny łącznik z hubem, którego dostosowanie zależy od struktury całej siatki międzynarodowej.

4. POTENCJALNE SKUTKI WYGASZANIA POŁĄCZEŃ LOTNICZYCH

Likwidacja połączenia lotniczego pomiędzy Krakowem a Warszawą, choć coraz częściej pojawia się w przestrzeni publicznej jako działanie zgodne z polityką klimatyczną i postulatami racjonalizacji transportu, może w praktyce przynieść szereg poważnych konsekwencji dla całego krajowego systemu lotniczego. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że przy konkurencyjnym czasie przejazdu koleją – wynoszącym ok. 140 min – utrzymywanie rejsów powietrznych nie znajduje uzasadnienia ekonomicznego ani ekologicznego. Jednak z perspektywy funkcjonowania siatki połączeń PLL LOT oraz układu przesiadkowego na Lotnisku Chopina w Warszawie połączenie to pełni funkcję dalece wykraczającą poza lokalny transport międzyregionalny.

Trasa Kraków–Warszawa jest kluczowym elementem systemu zasilającego stołeczny hub pasażerami z południa Polski. Szacuje się, że nawet 65–75% pasażerów korzystających z tych rejsów to osoby przesiadające się w Warszawie na dalsze połączenia międzynarodowe – przede wszystkim do Ameryki Północnej, Azji i na Bliski Wschód. Z punktu widzenia modelu *hub-and-spoke*, na którym opiera się działalność PLL LOT, każdy rejs krajowy odgrywa rolę „kropli”, która dopełnia zbiornik rejsów interkontynentalnych. Utrata tej „kropli” może nie wydawać się istotna na poziomie pojedynczej operacji, ale w skali miesiąca czy całej siatki konsekwencje finansowe i operacyjne stają się już wymierne.

Brak połączenia lotniczego oznacza również utratę synchronizacji w planowaniu przesiadek. Kolej, mimo wysokiej jakości usług i coraz lepszej punktualności, nie zapewnia systemu biletowego zintegrowanego z przewoźnikiem lotniczym, nie oferuje gwarancji przesiadki ani możliwości odprawy bagażu do końca trasy. W efekcie pasażer, który obecnie może kupić bilet z Krakowa do Nowego Jorku lub Tokio z przesiadką w Warszawie w ramach jednej rezerwacji i jednego systemu, po likwidacji rejsu krajowego musiałby organizować pierwszy etap podróży we własnym zakresie. Wpływa to nie tylko na wygodę i poczucie bezpieczeństwa podróżnego, ale także na spadek atrakcyjności oferty LOT-u w globalnych systemach rezerwacyjnych.

Wygaszenie tego połączenia niesie także ryzyko odpływu pasażerów do konkurencyjnych przewoźników i portów przesiadkowych. Brak możliwości łatwej przesiadki w Warszawie sprawi, że coraz więcej podróżnych będzie się decydować na loty z innych portów europejskich, takich jak Frankfurt, Monachium czy Amsterdam, dokąd można polecieć bezpośrednio z Krakowa, a następnie kontynuować podróż do Ameryki, Azji czy na Bliski Wschód. Innymi słowy, brak połączenia krajowego nie tylko pozbawia LOT potencjalnych klientów, ale wręcz kieruje ich bezpośrednio w ręce konkurencji – silniejszych, bardziej rozpoznawalnych i globalnie osadzonych przewoźników.

Nie można również pominąć wpływu tej decyzji na działalność lotnisk regionalnych, w szczególności Portu Lotniczego Kraków-Balice. Połączenie z Warszawą to nie tylko źródło pasażerów, ale także przepływ środków z tytułu opłat lotniskowych, handlingu i usług towarzyszących. Ograniczenie liczby operacji może się przełożyć na spadek rentowności portu, a także na ograniczenie jego znaczenia w krajowym systemie transportu lotniczego. W dłuższej perspektywie może to oznaczać też spadek inwestycji infrastrukturalnych i redukcję zatrudnienia w sektorze usług lotniskowych.

Z punktu widzenia PLL LOT wygaszenie trasy krajowej może przynieść oszczędności w kosztach operacyjnych, jednak bilans finansowy całej operacji byłby zdecydowanie bardziej złożony. Utrata pasażerów transferowych oznacza bowiem spadek wypełnienia rejsów dalekodystansowych, a co za tym idzie – zmniejszenie przychodów z najbardziej dochodowych tras. Szacunkowo przy utracie ok. 300 pasażerów dziennie, z których choćby 40% przesiadało się na rejsy długodystansowe przy wartości *yield* na poziomie 1500 zł, roczna strata przychodów może sięgnąć nawet 45 mln zł [14]. W warunkach, w których linia lotnicza balansuje na granicy rentowności, może to przesądzić o opłacalności całych kierunków interkontynentalnych.

Wszystkie te czynniki prowadzą do wniosku, że likwidacja połączenia Kraków–Warszawa, mimo że uzasadniona w kontekście walki z emisjami i konkurencyjności kolei, może się okazać decyzją kosztowną dla krajowego lotnictwa pod względem zarówno finansowym, jak i strategicznym. Kluczowe staje się więc nie tyle samo wygaszenie rejsu, co wdrożenie takich rozwiązań systemowych, które pozwolą zachować funkcjonalność hubu i konkurencyjność narodowego przewoźnika. W przeciwnym razie wygaszenie krajowych rejsów stanie się nie tyle ruchem racjonalizującym, co początkiem erozji pozycji LOT-u jako linii sieciowej.

W kolejnym rozdziale przedstawione zostaną możliwe scenariusze i rozwiązania, które – zamiast likwidacji połączenia – pozwoliłyby przekształcić je w element nowoczesnego, multimodalnego systemu mobilności, zgodnego z ideą Logistyki 5.0 i realiami konkurencyjnego rynku lotniczego.

5. ZINTEGROWANY BILET KOLEJOWO-LOTNICZY JAKO ROZWIĄZANIE SYSTEMOWE

W kontekście postulatów ograniczenia krajowych połączeń lotniczych i zastępowania ich transportem szynowym najważniejszym wyzwaniem logistycznym i rynkowym pozostaje zachowanie spójności całego systemu przesiadkowego. Trasy Kraków–Warszawa czy Gdańsk–Warszawa nie są jedynie odcinkami lokalnymi – to elementy szerszej układanki operacyjnej, w której krajowe rejsy spełniają funkcję zasilania hubu przesiadkowego LOT-u na Lotnisku Chopina. Ich likwidacja bez wdrożenia rozwiązań kompensacyjnych oznaczałaby

zakłócenie tego systemu i uderzenie w pasażera tranzytowego – a więc tego, który przynosi przewoźnikowi realne przychody i buduje pozycję konkurencyjną narodowej linii lotniczej.

W odpowiedzi na to wyzwanie najbardziej logicznym i sprawdzonym w Europie rozwiązaniem jest wprowadzenie zintegrowanego biletu kolejowo-lotniczego. Taki model pozwala zachować „lotniczą” strukturę rezerwacji, w której pierwszy odcinek podróży – realizowany koleją – traktowany jest jako część połączenia lotniczego. Pasażer nie traci gwarancji przesiadki, nie ponosi dodatkowych kosztów i nie musi samodzielnie organizować segmentu krajowego. System ten działa z sukcesem w krajach takich jak Niemcy, Szwajcaria czy Austria i pozwala zastąpić krajowe rejsy bez szkody dla systemu hubowego.

5.1. Model austriacki – Rail & Fly z Austrian Airlines i ÖBB

Wiarygodnym przykładem skutecznej integracji kolei i lotnictwa w Europie Środkowej jest Austria, gdzie narodowy przewoźnik Austrian Airlines od lat rozwija partnerstwo z kolejami ÖBB. W ramach programu AIRail możliwe jest połączenie podróży pociągiem z takich miast jak Linz, Graz, Salzburg czy Innsbruck z lotem z lotniska w Wiedniu w ramach jednego biletu. Czas podróży koleją na trasach z tych miast do portu lotniczego VIE wynosi od ok. 1 h i 45 min do nawet 5 h (Innsbruck), a mimo to system cieszy się rosnącym zainteresowaniem.

W 2024 roku z rozwiązania AIRail skorzystało ponad 60 tys. pasażerów, co stanowi wzrost o 20% względem roku poprzedniego i jest traktowane przez przewoźnika jako wskaźnik sukcesu integracji. Kluczowym czynnikiem powodzenia tego rozwiązania jest pełna automatyzacja systemu rezerwacyjnego: pasażer kupuje bilet np. z Salzburga do Toronto przez Wiedeń, a segment Salzburg–VIE przebywa koleją. W razie opóźnienia pociągu bilet jest automatycznie przerejestrowywany na kolejny możliwy lot, a linia lotnicza gwarantuje przesiadkę na takich samych zasadach jak przy rejsach lotniczych. Dodatkowo za segmenty kolejowe przyznawane są mile w programie lojalnościowym Miles & More [5].

Rozwiązanie to pokazuje, że także trasy o czasie przejazdu powyżej 3 h są skutecznie wchłaniane przez kolej – pod warunkiem że system logistyczny, informatyczny i sprzedażowy działa na poziomie lotniczym, a nie kolejowym. Austria wprowadziła nawet możliwość odprawy bagażu na niektórych dworcach – w wybranych miastach pasażer może oddać walizkę w punkcie ÖBB i odebrać ją dopiero na lotnisku docelowym, co czyni podróż równie bezobsługową jak w przypadku połączenia lotniczego.

5.2. Potencjał wdrożenia w Polsce – warunki i bariery

W Polsce wdrożenie biletu zintegrowanego jest realne, choć wymaga koordynacji między PKP Intercity, przewoźnikami regionalnymi (SKM Warszawa, Koleje Mazowieckie), PLL LOT oraz operatorami systemów rezerwacyjnych

(np. Amadeus, Sabre, AccesRail). Ponieważ pociągi dalekobieżne nie dojeżdżają bezpośrednio na lotnisko, niezbędne byłoby wprowadzenie biletu łączonego – np. Kraków Główny → Warszawa Zachodnia → Lotnisko Chopina SKM – jako jednego, spójnego biletu z gwarancją przesiadki. Technologicznie jest to możliwe i stosowane już w wielu krajach poprzez rozwiązania oferowane przez platformy takie jak AccesRail, która współpracuje m.in. z Lufthansą i KLM [9, 13].

Z punktu widzenia operacyjnego taki system pozwoliłby ograniczyć liczbę rotacji krajowych, obniżyć emisję i koszty operacyjne PLL LOT, a jednocześnie nie stracić najważniejszego komponentu, jakim są pasażerowie tranzytowi. W typowym dniu na rejsy długodystansowe przesiada się ok. 300–350 pasażerów przylatujących z Krakowa do Warszawy. Przy średnim zysku na trasach interkontynentalnych na poziomie 1500 zł ich utrata oznaczałaby potencjalnie dziesiątki milionów złotych strat rocznie. Integracja z koleją pozwala zachować ten ruch – i co więcej, rozwijać go w sposób zrównoważony środowiskowo.

5.3. Zmiana mentalna i środki wspierające transformację

Aby takie rozwiązanie przyjęło się na rynku, konieczna jest zmiana mentalności pasażerów. Wielu z nich traktuje lot samolotem jako synonim szybkości i komfortu, nawet jeśli podróż pociągiem zajmuje realnie mniej czasu. Kluczowe będzie więc wprowadzenie środków miękkich, takich jak programy lojalnościowe integrujące segment kolejowy z lotniczym (np. przyznawanie mil w programie Miles & More za przejazd pociągiem), statusy premium przenoszące się między przewoźnikami, kampanie informacyjne pokazujące nową jakość podróży oraz dynamiczne taryfy cenowe.

Pasażer musi poczuć, że zintegrowany bilet to nie „niższy standard”, tylko nowy, inteligentny format podróżowania – bardziej elastyczny, wygodny i przewidywalny. Tylko w takim przypadku system ten stanie się realną alternatywą dla klasycznych połączeń krajowych i zyska akceptację nie tylko regulatorów i operatorów, ale przede wszystkim podróżnych.

PODSUMOWANIE

Podsumowując, wyzwania związane ze współpracą systemów kolejowego oraz lotniczego na określonych trasach są możliwe do rozwiązania tylko dzięki przyjęciu odpowiednich działań systemowych. Zastępowanie lotów transferowych połączeniami kolejowymi generuje korzyści w przypadku podejmowania odważnych, ale przemyślanych kroków.

Trasa kolejowa Kraków–Warszawa w ciągu najbliższych lat będzie przebiegać przez duży odcinek linii kolei dużych prędkości, co zdecydowanie poprawi ofertę przewozową. Dodatkowo działania takie jak wydłużenie składów pociągów i zwiększenie częstotliwości kursowania wpłyną na zwiększenie podaży i budowę

solidnych podstaw do stworzenia systemu dowozowego do Lotniska Chopina. Rozwiązanie to wprowadzili z sukcesem Austriacy, co przyczyniło się do poprawy komfortu podróży. W związku z tym potencjalne bariery są możliwe do rozwiązania.

LITERATURA

1. Dane OSM uzyskane dzięki programowi QGIS.
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej.
3. Raport roczny PLL LOT 2023 (fragmenty udostępnione prasowo) (dostęp 05.04.2025).

Źródła internetowe

4. <http://airfleets.net> (dostęp 05.04.2025).
5. <https://austrian.com> (dostęp 05.04.2025).
6. <https://ch-aviation.com> (dostęp 05.04.2025).
7. <https://dane.utk.gov.pl/sts/przewozy-pasazerskie/dane-eksploatacyjne/22185,Przewozy-pasazerskie.html>.
8. <https://flightradar24.com/> (dostęp 05.04.2025).
9. <https://iata.org> (dostęp 05.04.2025).
10. <https://intercity.pl/pl/site/dla-pasazera/kup-bilet/pociagi-i-stacje/zestawienia-pociagow.html> (dostęp 05.04.2025).
11. <https://koleo.pl/> (dostęp 05.04.2025).
12. <https://lot.com/pl/pl> (dostęp 05.04.2025).
13. <https://lufthansagroup.com> (dostęp 05.04.2025).
14. <https://ulc.gov.pl/> (dostęp 05.04.2025).
15. <https://vagonweb.cz/razeni/?lang=pl> (dostęp 05.04.2025).

RAIL OR AVIATION – INTERMODAL COOPERATION OR COMPETITION?

The scientific article presents an intermodal analysis of rail and aviation in the context of replacing connecting flights with rail connections. Therefore, the primary aim of the article is to examine the potential for cooperation between the rail and air transport systems and to analyze the possible barriers and opportunities for implementing such integration. This includes the replacement of connecting flights with rail services and the introduction of a combined rail-air ticket. Additionally, a secondary goal is to identify general solutions that could be applied to other routes across Poland

Keywords: rail, aviation, system integration, connecting flights.

WPŁYW SZTUCZNEJ INTELIGENCJI NA OPTYMALIZACJĘ ŁAŃCUCHA DOSTAW I GOSPODARKE MAGAZYNOWĄ

W opracowaniu przedstawiono najnowsze osiągnięcia technologiczne w kontekście łańcucha dostaw oraz gospodarki magazynowej. W dalszych częściach artykułu omówiono szczegółowo, w jaki sposób sztuczna inteligencja wpłynie na procesy magazynowe i transportowe. Ukazano również aspekty związane z postrzeganiem tego tematu w społeczeństwie. Celem pracy jest podkreślenie ogromnego potencjału sztucznej inteligencji w transformacji gospodarki magazynowej i łańcucha dostaw ze wskazaniem korzyści, wyzwań oraz przyszłych kierunków rozwoju w tym obszarze.

Słowa kluczowe: automatyzacja procesów, efektywność, gospodarka magazynowa, łańcuch dostaw, magazyn, optymalizacja, sztuczna inteligencja.

WSTĘP

Sztuczna inteligencja (SI, AI – *Artificial Intelligence*) to obecnie czynnik o kluczowym znaczeniu dla rozwoju technologii w logistyce. Odgrywa coraz większą rolę, co wpływa na funkcjonowanie zarówno łańcuchów dostaw, jak i całej gospodarki magazynowej. Dynamiczny rozwój AI jest nie tylko pomocą dla firm, ale także wyzwaniem, z którym muszą się zmierzyć. Przedsiębiorstwa z branży TSL (transport, spedycja, logistyka) zaczynają sięgać po nowocześniejsze metody głównie w celu:

- redukcji kosztów;
- zwiększenia efektywności;
- poprawy wydajności procesów;
- dostosowania się do potrzeb rynku.

W artykule przeanalizowano sposoby wdrażania sztucznej inteligencji w przedsiębiorstwie. Przedstawiono nowe metody logistyczne usprawniające optymalizację i funkcjonowanie całego łańcucha dostaw, jak również gospodarki magazynowej. Omówiono korzyści oraz trudności związane z tymi działaniami.

1. SZTUCZNA INTELIGENCJA W LOGISTYCE MAGAZYNOWEJ

Pod pojęciem sztucznej inteligencji kryje się system komputerowy, który jest w stanie rozwiązywać problemy na podstawie zgromadzonych danych. Głównym

celem AI jest ułatwienie podejmowania decyzji oraz rozwiązywania problemów poprzez wsparcie realizacji procesów. Możemy wyróżnić następujące rodzaje sztucznej inteligencji:

- wąska sztuczna inteligencja – realizuje proste czynności, jak np. przepływ materiałów czy udzielanie odpowiedzi na zapytania klientów. Ten rodzaj AI jest obecnie rozpowszechniony i użytkowany. W swoim zakresie działania nie ma świadomości i nie doświadcza emocji;
- ogólna sztuczna inteligencja – jest to system, który jest w stanie rozwiązywać bardziej rozbudowane zadania, a nawet dysponuje umiejętnością wydawania własnych werdyktów;
- sztuczna superinteligencja (ASI – *Artificial Superintelligence*) – jej architektura pod względem kompetencji przewyższa kompetencje ludzkie w przeważającej liczbie sfer [2].

Sztuczna inteligencja wraz z rozwojem technologicznym wkracza obecnie na nowy poziom. Staje się podstawowym sposobem na zminimalizowanie pracy ludzkiej przy jednoczesnym przyspieszeniu procesów, poprawie ich jakości i efektywności. Logistyka 4.0 zapoczątkowała trend automatyzacji procesów branży TSL, a podejście to jest wciąż rozwijane. Aktualnie sztuczna inteligencja nie tylko może być wykorzystywana do zarządzania bieżącymi procesami, ale również potrafi przeprowadzić prognozę popytu, zaplanować produkcję czy nawet przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie [6].

Szczególnie należy tu wyróżnić wsparcie ze strony chatbotów, czyli programów komputerowych, które symulują i przetwarzają ludzką rozmowę. Rozwiązanie to oszczędza czas w zakresie komunikacji z doradcami [5]. Wystarczy napisać swoje oczekiwania, a sztuczna inteligencja wygeneruje wszystkie możliwe rozwiązania. Oczywiście konieczna jest weryfikacja człowieka, ponieważ jak każdy system, również AI popełnia błędy. Może wygenerować odpowiedź nieprawidłową lub nieadekwatną do zapytania. Mimo usprawnień, jakie przynosi, wciąż nie można przyjmować odpowiedzi systemów AI ze stuprocentową pewnością.

2. WPŁYW SZTUCZNEJ INTELIGENCJI NA GOSPODARKĘ MAGAZYNOWĄ

Gospodarka magazynowa to zorganizowany system procesów, które obejmują przechowywanie, zarządzanie i dystrybucję towarów w magazynie. Ma na celu zapewnienie efektywnego i bezpiecznego przepływu towarów przy jednoczesnej minimalizacji kosztów.

Do magazynów coraz częściej są wprowadzane urządzenia wyposażone w AI automatyzujące procesy logistyczne. Jako przykład mogą tu posłużyć roboty kompletacyjne. Przy wykorzystaniu widzenia komputerowego maszyny mogą

odrzuć produkty, które nie wpisują się w kryteria określonego kształtu wyrobu, czy też wyodrębniać towary przeznaczone do jednego odbiorcy.

Dzięki zaawansowanej analizie danych, automatyzacji procesów oraz inteligentnym algorytmom AI może znacząco poprawić efektywność, dokładność i elastyczność operacji magazynowych.

Systemy komputerowe są w stanie lepiej przewidywać popyt na dany asortyment, dzięki czemu zmniejsza się ryzyko jego nadprodukcji lub produkcji zbyt małej ilości [3]. Sztuczna inteligencja pozwala również lepiej kontrolować jakość produktów oraz zwiększyć wydajność roboczą.

Dużą popularnością cieszą się także pojazdy autonomiczne, które pozwalają zaoszczędzić czas dzięki temu, że są w stanie przemieszczać ładunki w magazynie bez konieczności ingerencji ludzi. Tego typu technologia przyczynia się do poprawy produktywności transportu towaru.

Poza wymienionymi czynnikami wpływającymi na gospodarkę magazynową AI zwiększa bezpieczeństwo, np. poprzez zastosowanie systemów monitorowania w czasie rzeczywistym. Jednocześnie AI może zwiększać satysfakcję osób pracujących w przedsiębiorstwie, np. przez wyręczenie człowieka w wykonywaniu monotonicznych czynności [8]. Przykładowo firma Amazon wykorzystuje zaawansowaną AI do prognozy popytu, dzięki czemu unika ryzyka nadprodukcji bądź niedoboru asortymentu. Używa również robotów autonomicznych, które przemieszczają ładunki i zwiększają wydajność roboczą.

Sztuczna inteligencja umożliwia optymalizację, która jest niezbędnym elementem w dzisiejszych łańcuchach dostaw. Optymalizacja różnych aspektów pracy zwiększa efektywność, obniża koszty oraz poprawia jakość obsługi. Zastosowanie AI pozwala na utrzymanie całodobowej działalności, podwyższenie wydajności poprzez wsparcie pracowników lub możliwość samodzielnego funkcjonowania, a także zwiększenie dokładności wykonywania czynności, co skutkuje minimalizacją pomyłek. Jest również pomocne w dostosowywaniu się do zmieniających się warunków rynkowych.

Sztuczna inteligencja jest w stanie gromadzić i przetwarzać ogromne ilości danych oraz przeanalizować je w bardzo krótkim czasie, co skraca cykl przepływu informacji i wyciągania wniosków. Dodatkowo wspomaga konserwację predykcyjną, czyli monitorowanie i wcześniejsze wykrywanie problemów, a także wdrażanie działań zabezpieczających przed szkodliwymi skutkami [8].

3. WPROWADZENIE SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W ŁAŃCUCHU DOSTAW

Łańcuch dostaw jest systemem procesów, które obejmują wszystkie etapy związane z produkcją, transportem i dystrybucją towarów. Jego celem jest dostarczenie produktów we właściwym czasie oraz w odpowiedniej ilości i jakości, przy minimalizacji kosztów operacyjnych.

Sztuczna inteligencja znajduje coraz szersze zastosowanie w zarządzaniu łańcuchem dostaw, wspierając firmy w precyzyjnym monitorowaniu i optymalizacji procesów. Dzięki niej przedsiębiorstwa mogą podejmować trafniejsze decyzje oraz skuteczniej reagować na zmiany rynkowe. Mimo to wiele firm podchodzi ostrożnie do wdrażania takich rozwiązań, ponieważ poszukują one technologii wiążących się z możliwie najmniejszym ryzykiem. Choć korzyści są znaczne, pełne wykorzystanie potencjału AI wciąż nie jest proste ani oczywiste dla wszystkich organizacji.

Coraz nowsze i zaawansowane modele sztucznej inteligencji są czymś, co nie tylko przynosi rozwój i korzyści, ale także rodzi obawy przed wprowadzeniem ich do użytkowania. Może to być uargumentowane czynnikami przedstawionymi w tabeli 1.

Tabela 1

Analiza SWOT sztucznej inteligencji w łańcuchu dostaw

Lp.	Mocne strony	Słabe strony	Szanse	Zagrożenia
1	Poprawa wydajności	Generowanie fałszywych informacji	Zrównoważony rozwój	Negatywna opinia dotycząca AI
2	Zwiększenie szybkości dostaw	Wysokie koszty instalacji i obsługi	Sprawniejsza praca	Błędy i awarie systemu
3	Poprawa jakości produktów i usług	Brak wykwalifikowanego personelu	Wyższy poziom obsługi klienta	Rosnąca konkurencja
4	Obniżenie kosztów magazynowania i transportu	Problem integracji nowych technologii ze starymi	Nowe rozwiązania technologiczne	Potencjalne luki w oprogramowaniu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7, 9, 10].

Zestawienie zalet i wad sztucznej inteligencji obrazuje zarówno wewnętrzne, jak i zewnętrzne czynniki wpływające na podejście firm do AI. Ich poprawna analiza pozwala na lepszą kalkulację oraz przygotowanie się na czekające wyzwania związane z wprowadzeniem nowej technologii. Należy jednak równocześnie podkreślić, że AI prawdopodobnie nigdy nie zastąpi w pełni człowieka, a jedynie usprawni jego działania.

3.1. Opracowanie etapów wdrożenia AI

Wdrożenie sztucznej inteligencji do łańcucha dostaw zapewnia lepszą analizę i zarządzanie łańcuchem dostaw. Kluczowym pytaniem pozostaje, jak poprawnie przeprowadzić proces wdrożenia. Praktyka pokazuje, że przede wszystkim należałoby:

- przeanalizować aktualne potrzeby;
- wybrać odpowiednie narzędzia AI;
- wykonać próbę wdrożenia AI;

- przetestować nową technologię;
- zoptymalizować i dostosować AI.

Analiza potrzeb pozwoli precyzyjnie określić, jakie procesy należy usprawnić w przedsiębiorstwie. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie celów, które chce się osiągnąć. Ważne jest, aby dostosować AI do technologii, jakie już są używane (np. WMS, ERP), co wspomogę optymalizację działań.

System zarządzania magazynem WMS (*Warehouse Management System*) jest to oprogramowanie komputerowe, które wspiera bieżące zarządzanie procesami magazynowymi na podstawie baz danych odzwierciedlających strukturę i zależności w procesach magazynowych. Natomiast system planowania zapotrzebowania materiałowego ERP (*Enterprise Resource Planning*) interpretuje informacje otrzymywane od systemu nadrzędnego lub bezpośrednio od klienta [1].

Integracja AI z istniejącymi już systemami magazynowymi, takimi jak WMS czy ERP, to skomplikowany i kluczowy etap implementacji systemów AI w przedsiębiorstwie. Wymaga nie tylko technicznej kompatybilności, ale również ścisłej współpracy z zespołami IT oraz dogłębnej analizy i zrozumienia struktury istniejących procesów. Należy zadbać o odpowiednią synchronizację danych pomiędzy systemami, aby unikać błędów i opóźnień w działaniu. Ważne jest również monitorowanie efektywności integracji na bieżąco, tak by móc szybko wykrywać potencjalne problemy i je rozwiązywać. Po zrealizowaniu integracji systemy oparte na sztucznej inteligencji powinny umożliwiać ciągłą analizę danych oraz dostarczać wartościowych informacji, które wspomogą podejmowanie decyzji strategicznych i operacyjnych. Takie podejście pozwoli na stopniowe i efektywne wdrożenie sztucznej inteligencji do łańcucha dostaw, co zapewni oczekiwaną optymalizację.

3.2. Wpływ sztucznej inteligencji na łańcuch dostaw

Zastosowanie AI przynosi wiele korzyści procesom w łańcuchu dostaw. Dzięki uczeniu maszynowemu systemy wykorzystują zdobyte doświadczenia do identyfikacji wzorców (np. zwiększonego popytu). Rozpoznanie przez urządzenia określonego zdarzenia informuje użytkownika o jego zaistnieniu.

Jak już wspomniano wcześniej, obiekty magazynowe znacząco wpływają na szybkość realizacji zamówień realizowanych w łańcuchach dostaw. Sztuczna inteligencja jest w stanie porównać stan bieżący zapasów z popytem i określić, czy konieczne jest uzupełnienie zapasów – np. na podstawie analizy danych historycznych oraz bieżących trendów rynkowych. AI może także wspierać organizację przestrzeni magazynowej (m.in. rozlokowanie asortymentu) i dzięki temu usprawniać procesy wewnątrzmagazynowe.

Następnym zastosowaniem AI jest wybór odpowiedniej trasy. Posiadając zbiór danych, system ma możliwość przewidzenia zwiększonego natężenia na drodze, zmian w ruchu drogowym, warunków pogodowych czy lokalizacji magazynów i punktów dostaw. To z kolei przyczynia się do skrócenia czasu dostawy i redukcji emisji CO₂.

Sztuczna inteligencja wpływa także na zarządzanie ryzykiem, które może wystąpić w łańcuchu dostaw z powodu opóźnień powodowanych przez różnego typu awarie, zmiany, zakłócenia w produkcji czy katastrofy naturalne. System jest w stanie wskazać potencjalne zagrożenia i opracowanie strategii.

Sztuczna inteligencja szybko łączy platformy i systemy, z których korzysta się w przedsiębiorstwie. Można oszczędzić w ten sposób wiele czasu i pieniędzy. Możliwe jest też pozyskanie bazy danych, która w przyszłości umożliwi trafniejsze podejmowanie decyzji, co z kolei prowadzi do poprawy wyników biznesowych i przewagi konkurencyjnej.

3.3. Optymalizacja łańcucha dostaw

Optymalizacja to nieustanny proces wymagający monitorowania, analizy i dostosowania do warunków rynkowych, technologicznych oraz ekonomicznych. To przedsięwzięcie jest ukierunkowane na stworzenie systemu tańszego, szybszego i bardziej odpornego na zmiany.

Optymalizacja łańcucha dostaw polega na udoskonaleniu procesów operacyjnych, jak również logistycznych. Jest to kluczowy proces dla każdej firmy. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii oraz strategii zarządzania przedsiębiorstwa mogą zminimalizować koszty, poprawić wydajność i zwiększyć jakość obsługi wraz z zadowoleniem klienta [4].

Dysponując możliwością identyfikacji wzorców i otrzymywania dokładnych prognoz z AI, można poprawić efektywność, zwiększyć elastyczność i reaktywność systemu na zmieniające się warunki rynkowe.

Wśród największych zalet wprowadzenia sztucznej inteligencji do łańcucha dostaw możemy wymienić następujące:

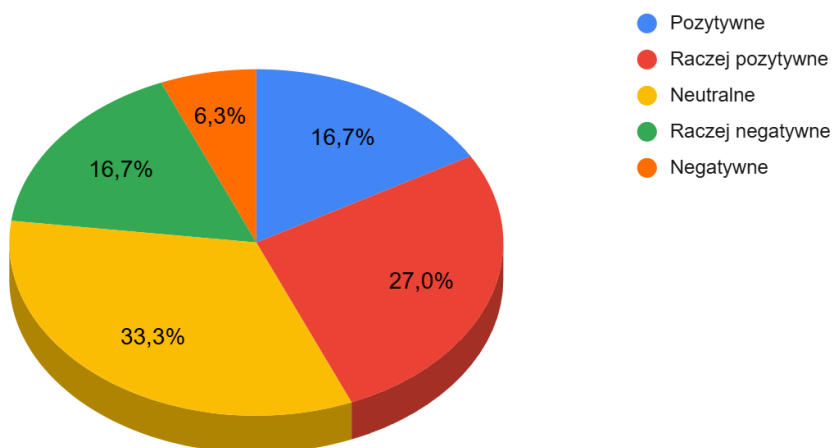
- niższe koszty operacyjne;
- mniejsza liczba błędów;
- dokładniejsze zarządzanie zapasami;
- redukcja liczby odpadów oraz wad produkcyjnych;
- zwiększenie bezpieczeństwa pracowników i materiałów;
- skrócenie czasu realizacji zamówień;
- poprawa jakości obsługi klienta;
- bardziej precyzyjne prognozowanie popytu.

Jak możemy wywnioskować w odniesieniu do powyższej listy korzyści, optymalizacja łańcucha dostaw nie tylko przynosi zyski finansowe, ale także poprawia wydajność organizacji, zwiększa konkurencyjność oraz dostosowuje się do dynamicznych zmian rynkowych. Dodatkowo nowoczesne systemy logistyczne związane z AI umożliwiają dynamiczny rozwój przedsiębiorstw, co daje im przewagę nad konkurencją.

4. JAK SPOŁECZEŃSTWO WIDZI SZTUCZNĄ INTELIGENCJĘ W LOGISTYCE MAGAZYNOWEJ

Temat sztucznej inteligencji jest poruszany wśród społeczeństwa, zwłaszcza w środowiskach pracowników, menedżerów, ale także konsumentów. Kwestia ta budzi szereg wątpliwości i pytań. Jednym z zagadnień w przeprowadzonej przez nas ankiecie był odbiór AI przez opinię publiczną. Wyniki przedstawiono na rys. 1.

Postrzeganie sztucznej inteligencji przez społeczeństwo



Rys. 1. Postrzeganie sztucznej inteligencji przez społeczeństwo

Źródło: opracowanie własne.

Jak można zauważyć, przeważająca większość społeczeństwa odbiera AI jako możliwość, a nie zagrożenie, co optymistycznie kreuje dalsze sposobności rozwoju.

W swoich wypowiedziach odnośnie do technologii, jakie zastosowaliby w celu optymalizacji łańcucha dostaw i gospodarki magazynowej, ankietowani wymieniali robotykę magazynową oraz algorytmy predykcyjne. W późniejszym pytaniu odpowiedzieli, że chcieliby je wykorzystywać do optymalizacji tras dostaw, a także do automatyzacji procesów magazynowych.

Wśród największych wyzwań związanych z wdrożeniem AI respondenci wskazywali problemy z integracją z już istniejącymi systemami, brak zaufania do technologii oraz brak wykwalifikowanych specjalistów. Największą korzyścią wynikającą z wykorzystania AI w logistyce było zaś skrócenie czasu realizacji zamówień przy jednoczesnych mniejszych stratach magazynowych.

Respondenci wyrażali także określone obawy dotyczące sztucznej inteligencji, m.in. obawę o utratę stanowisk pracy czy też związaną z ryzykiem wpływu potencjalnych błędów popełnianych przez AI na działanie firmy. Dodatkowo większość wypowiedziała się negatywnie o wpływie sztucznej inteligencji na

bezpieczeństwo w przedsiębiorstwie. Można podejrzewać, że wynika to ze zwiększenia zależności od systemów AI, większego narażenia na ataki cybernetyczne czy wspomnianą już wcześniej utratę miejsc pracy. Mimo to tylko 10% uczestników badania zaznaczyło, że nie zaimplementowałoby sztucznej inteligencji we własnym magazynie. W odniesieniu do automatyzacji gospodarki magazynowej w przyszłości aż 79% respondentów stwierdziło, że nastąpi ona częściowo, a 17% – że w pełni.

5. PRZYSZŁOŚĆ SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W LOGISTYCE MAGAZYNOWEJ

W najbliższych latach możemy się spodziewać, że systemy sztucznej inteligencji będą dalej wdrażane do magazynów. Będzie to mieć kluczowe znaczenie w optymalizacji łańcucha dostaw i gospodarki magazynowej. Głównym celem dla odważniejszych przedsiębiorstw będzie pełna automatyzacja. Stanie się to możliwe m.in. dzięki dronom, robotom, a także automatycznym systemom pakowania bądź wysyłki.

Ciągle prowadzone są prace nad dalszym doskonaleniem modeli predykcyjnych, co obejmuje samodzielne zamawianie brakujących towarów przez AI, automatyczne dostosowanie stanów magazynowych do popytu oraz optymalizację rozlokowania asortymentu w przestrzeni [6].

Rozwój technologii robotycznej przyczyni się do uzyskania większych korzyści w postaci minimalizacji kosztów, zwiększenia efektywności oraz wyeliminowania błędów już na etapie produkcji. Jednak w związku z postępującym rozwojem AI czekają nas także nowe wyzwania. Potencjalne problemy są związane głównie z cyberbezpieczeństwem, ekologią, a także kosztami wdrożenia. W przyszłości priorytetem będzie znalezienie optymalnego rozwiązania dla każdego z tych wyzwań.

Przede wszystkim kwestia cyberbezpieczeństwa wymaga stałego monitorowania i unowocześniania technologii związanych z ochroną danych, po to by zapobiegać atakom hakerskim oraz potencjalnej utracie cennych informacji. Z uwagi na liczbę urządzeń, które są podłączone do sieci, zapewnienie integralności systemów stanie się priorytetem.

W odniesieniu do ekologii przyszłość AI w logistyce magazynowej będzie musiała uwzględniać zrównoważony rozwój i minimalizację negatywnego wpływu na środowisko. Technologie takie jak optymalizacja tras dostaw będą miały istotne znaczenie w kontekście zmniejszania śladu węglowego.

Nieuniknione będą wyzwania związane z kosztami wdrożenia. Przedsiębiorstwa będą musiały się zmierzyć z wysokimi inwestycjami w infrastrukturę i technologie, jednak długoterminowe oszczędności i poprawa efektywności operacyjnej pozwolą na uzyskanie zwrotu nakładów.

Również współpraca człowieka z AI będzie wymagała nowych standardów i szkoleń. Pracownicy muszą się przygotować na integrację z technologiami, a ich rola może się przesunąć w stronę realizacji bardziej skomplikowanych bądź praktycznych zadań, podczas gdy rutynowe działania przejmą roboty i systemy oparte na AI. Stworzenie środowiska, w którym człowiek i maszyna współpracują bez zarzutów, będzie mieć kluczowe znaczenie dla sukcesu nadchodzącej ery automatyzacji magazynowej.

PODSUMOWANIE

Sztuczna inteligencja staje się najważniejszym narzędziem w nowoczesnym zarządzaniu łańcuchem dostaw oraz gospodarką magazynową. W niniejszym artykule omówiono różne aspekty wdrożenia AI – od prognozowania popytu, przez strategiczne podejmowanie decyzji, po wpływ systemów AI na logistykę. Wskazano na poprawę efektywności, precyzji i elastyczności operacji magazynowych oraz transportowych przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa, co przekłada się na skracanie czasu realizacji zamówień, a także na optymalizację procesów za pośrednictwem nowoczesnych technologii. Dodatkowo uwidoczniono przebieg wprowadzania rozwiązań do przedsiębiorstw przy wykorzystaniu analizy SWOT. Na podstawie przeprowadzonej ankiety przedstawiono punkt widzenia odbiorców dotyczący zastosowania AI i jej potencjalnego wpływu na rozwój technologii w przyszłości.

Wniosek z niniejszego opracowania jest następujący: połączenie AI z istniejącymi rozwiązaniami stanowi nieodłączny element w zarządzaniu łańcuchem dostaw i gospodarką magazynową. Staje się to czynnikiem konkurencyjności w dzisiejszej globalnej gospodarce. Nowoczesne technologie pozwalają na przewagę operacyjną, dynamiczną adaptację do zmieniających się warunków rynkowych oraz poprawę wydajności procesów logistycznych. Zastosowanie AI wiąże się także z prowadzeniem ciągłych innowacji w firmie oraz inwestycjami, które pozwalają maksymalizować zyski płynące z jej wykorzystania.

LITERATURA

1. Jacyna M., Bobiński A., Lewczuk K., *Modelowanie i symulacja 3D obiektów magazynowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.

Źródła internetowe

16. <https://azure.microsoft.com/pl-pl/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-artificial-intelligence#types-of-ai>
17. <https://firmove.pl/aktualnosci/biznes/ai-w-biznesie/zastosowanie-sztucznej-inteligencji-w-sektorze-produkcyjnym>

18. <https://implemo.pl/baza-wiedzy/optimalizacja-procesow-narzedzia/#optimalizacja-procesow-4-produkcyjnych>
19. <https://landmarkglobal.com/eu/pl/blog/sztuczna-inteligencja-w-logistyce/>
20. <https://xpert.digital/pl/optimalizacja-lancucha-dostaw-za-pomoca-sztucznej-inteligencji/>
21. <https://www.3dbinpacking.com/pl/blog/rola-sztucznej-inteligencji-ai-w-lancuchu-dostaw/>
22. <https://www.mecalux.pl/blog/sztuczna-inteligencja-w-magazynie>
23. <https://www.oracle.com/pl/scm/ai-supply-chain/#benefits>
24. <https://www.penskelogistics.com/technology/keep-supply-chain-moving/ai-in-supply-chain-management/>

THE IMPACT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON SUPPLY CHAIN OPTIMIZATION AND WAREHOUSE MANAGEMENT

In the study authors presented the latest technological achievements in the context of the supply chain and warehouse management. In the following chapters, detailed explanations are provided on how Artificial Intelligence will impact warehouse and transportation processes. The aspects related to the perception of this topic in society have also been presented. The aim of the article is to highlight the enormous potential of Artificial Intelligence in the transformation of warehouse logistics and the supply chain, emphasizing the benefits, challenges and future directions of development in this area.

Keywords: process automation, effectiveness, warehouse management, supply chain, warehouse, optimization, Artificial Intelligence.

SZTUCZNA INTELIGENCJA W PREDYKCJI POPYTU I OPTYMALIZACJI TRAS LOGISTYCZNYCH

W artykule przedstawiono krótką historię początku logistyki i jej stan w aktualnych czasach. Wytłumaczono podstawowe zagadnienia związane z logistyką oraz ze sztuczną inteligencją. W szczególności zwrócono uwagę na popyt oraz trasy logistyczne w przypadku logistyki. Algorytmy głębokiego uczenia oraz modele językowe to główne zagadnienia w przypadku sztucznej inteligencji. Przedstawiono wiele czynników, które wpływają na popyt oraz trasy logistyczne. Przedstawiono istniejące już rozwiązania dla optymalizacji tras oraz predykcji popytu. Ponadto ukazano rozwiązania, które będą z wysokim prawdopodobieństwem opracowane i używane w przyszłości. Celem opracowania jest pokazanie, jak istotnym elementem jest sztuczna inteligencja w rozwoju logistyki.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, logistyka, popyt, głębokie uczenie, LLM.

WSTĘP

Współczesna logistyka stoi przed poważnymi problemami związanymi z dynamicznie zmieniającym się rynkiem, rosnącymi wymaganiami konsumentów oraz koniecznością minimalizacji kosztów operacyjnych. Globalizacja, rozwój *e-commerce* oraz nieprzewidywalne zdarzenia, takie jak kryzysy gospodarcze czy zakłócenia w łańcuchach dostaw, sprawiają, że tradycyjne metody zarządzania logistyką często okazują się niewystarczające. W celu efektywniejszego planowania i zarządzania przedsiębiorcy coraz częściej korzystają z nowoczesnych narzędzi, w tym z rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji (AI – *Artificial Intelligence*). Użycie takich technologii pozwala znacząco wyprzedzić konkurencję, która trzyma się przestarzałych rozwiązań. W dobie dynamicznych zmian rynkowych i postępującej cyfryzacji przedsiębiorstwa muszą rozwijać się wraz z nowymi technologiami, aby utrzymać swoją pozycję na rynku i efektywnie reagować na zmieniające się warunki. Integracja nowoczesnych narzędzi z procesami logistycznymi staje się koniecznością dla firm dążących do optymalizacji kosztów i maksymalizacji wydajności. Niniejszy artykuł ma na celu podkreślenie roli sztucznej inteligencji w działaniach logistycznych oraz przedstawienie kilku nowoczesnych rozwiązań, które z powodzeniem zostały wdrożone przez największe przedsiębiorstwa na rynku.

1. LOGISTYKA NA PRZESTRZENI LAT

Logistyka to dziedzina zajmująca się planowaniem, organizacją oraz kontrolą przepływu towarów. Jej załączki sięgają starożytności, gdy ludzie zaczęli organizować transport i przechowywanie dóbr, głównie zbóż. Miało to kluczowe znaczenie dla postępu każdego rozwijającego się państwa. Wraz z rozwojem cywilizacji logistyka stawiała się coraz bardziej złożona. Zaczęto budować szlaki handlowe łączące coraz dalsze lokalizacje, finalnie tworząc połączenia między państwami. Umożliwiało to wymianę egzotycznych towarów i technologii [4]. Termin logistyka miał swój rzeczywisty początek w IX wieku, kiedy to cesarz bizantyjski Leon VI zdefiniował ją jako organizację zaopatrzenia, rozpoznania terenu i przemieszczania wojsk. W XIII-wiecznej Francji pojęcie to odnosiło się do planowania zaopatrzenia armii i budowy fortyfikacji. Dopiero w XIX wieku amerykański admirał A.T. Mahan rozszerzył definicję logistyki, odnosząc ją również do wsparcia wojsk poprzez ekonomiczną i przemysłową mobilizację państwa. Z biegiem czasu zagadnienie to coraz bardziej przenosiło się na strefę gospodarczą. Koniec lat 80. i 90. XX wieku był momentem przełomowym dla obecnie znanej nam logistyki. Był to okres bardzo dynamicznego rozwoju na całym świecie, głównie za sprawą postępu technologicznego oraz globalizacji. W tym okresie zaczęto wdrażać nowoczesne metody zarządzania łańcuchem dostaw, co znacząco zwiększyło efektywność transportu i dystrybucji towarów. Kluczową rolę odegrało wprowadzenie konteneryzacji, która zrewolucjonizowała międzynarodowy handel, umożliwiając szybki i tani transport dużych ilości towarów. Przełom wieków XX i XXI to dalsza ekspansja logistyki, napędzana dynamicznym rozwojem *e-commerce* i rosnącymi oczekiwaniami konsumentów. Firmy zaczęły się koncentrować na szybkości dostaw, optymalizacji kosztów i ekspansji na kolejne państwa. Współcześnie, wraz z rozwojem sztucznej inteligencji, zmiany te nabierają jeszcze większego tempa, a firmy wdrażają w swoje struktury coraz nowsze narzędzia.



Rys. 1. Kontenerowiec „Eleonora Mærsk” w Baltic Hub w Gdańsku

Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Kontenerowiec#/media/Plik:Eleonora_Maersk_DCT_4.JPG
(dostęp 06.04.2025).

1.1. Predykcja popytu

Popyt to jedno z kluczowych pojęć w ekonomii, które ma istotne znaczenie w logistyce oraz zarządzaniu łańcuchem dostaw. Najprościej mówiąc, jest to zapotrzebowanie na konkretny produkt lub usługę w danym czasie i miejscu. Dokładna analiza oraz prognozowanie popytu pozwalają przedsiębiorcom na dostosowywanie produkcji, zarządzanie zapasami oraz opracowywanie skutecznych strategii dystrybucji. Jednak wraz z rozwojem technologii przewidywanie popytu staje się coraz trudniejszym zadaniem. Dynamiczne zmiany rynkowe, sezonowość oraz nieprzewidywalne zdarzenia, takie jak wypadki oraz kryzysy gospodarcze, sprawiają, że tradycyjne metody prognozowania często okazują się niewystarczające. W takich wypadkach firmy chętnie sięgają po coraz bardziej zaawansowane narzędzia. Dzięki wykorzystaniu wielu technologii opartych na AI powstają bardziej szczegółowe analizy, wykrywane są nowe, nieznane wcześniej zależności, możliwe są porównania gigantycznych ilości informacji. Badanie w ten sposób wielu scenariuszy byłoby niemożliwe do interpretacji przy użyciu standardowych narzędzi. Dzięki zastosowaniu AI możliwe jest także uwzględnienie trendów konsumenckich czy nawet warunków atmosferycznych w odniesieniu do przyszłego zapotrzebowania. Ponadto inteligentne systemy uczą się na podstawie wcześniejszych wyników, stale doskonaląc swoje prognozy. W efekcie zastosowanie sztucznej inteligencji w prognozowaniu popytu nie tylko poprawia efektywność przedsiębiorstwa, ale także przyczynia się do zwiększenia konkurencyjności firm na rynku.

1.2. Optymalizowanie tras logicznych

Optymalizacja tras logistycznych jest bezpośrednio związana z analizą popytu. Zależnie od zapotrzebowania i spodziewanych zmian w strukturze zamówień, sezonowych wzrostów sprzedaży oraz preferencji klientów firmy muszą dynamicznie dostosowywać swoje trasy transportowe. Optymalizacja tras polega na znalezieniu najbardziej efektywnej drogi, która pozwoli dostarczyć dobra z punktu do punktu. Cele tego procesu to minimalizacja kosztów transportu, skrócenie czasu dostawy oraz maksymalizacja wykorzystanych zasobów, takich jak pojazdy i kierowcy. Efektywne zarządzanie trasami transportowymi wiąże się z licznymi korzyściami, jednak aby skutecznie zarządzać dostępnymi środkami, potrzebnych jest wiele specjalistycznych narzędzi. Skrócenie czasu dostawy sprawi, że klienci będą chętniej wybierali daną firmę logistyczną. Budowanie renomy w branży ma kluczowe znaczenie, zwłaszcza w sektorze, w którym obraca się ogromnymi kwotami, a czas odgrywa decydującą rolę. W logistyce każda minuta opóźnienia niesie za sobą ryzyko wysokich strat finansowych zarówno dla dostawców, jak i dla odbiorców. W kontekście dynamicznych zmian na rynku wdrażanie innowacyjnych rozwiązań w planowaniu tras staje się koniecznością dla firm logistycznych.

2. SZTUCZNA INTELIGENCJA

Termin sztuczna inteligencja został użyty po raz pierwszy przez Johna McCarthy'ego w 1955 roku [7]. AI to algorytm, który posiada znamiona inteligencji. Przez zbiór instrukcji w kodzie źródłowym AI jest przystosowana do zapisywania nowych, zmiennych warunków, ich analizowania i w rezultacie podejmowania skomplikowanych decyzji. Podstawą działania AI są algorytmy i modele matematyczne, które umożliwiają analizowanie danych oraz wykrywanie zależności. Sztuczna inteligencja dzieli się na kilka głównych kategorii, w tym tzw. wąską AI (ANI – *Artificial Narrow Intelligence*), która specjalizuje się w jednym, ściśle określonym zadaniu, jak np. rozpoznawanie twarzy czy tłumaczenie języków. Bardziej zaawansowany poziom stanowi ogólna AI (AGI – *Artificial General Intelligence*), która jest w stanie dorównywać ludzkim zdolnościom poznawczym w wielu dziedzinach jednocześnie. Do najpopularniejszych technik należą uczenie maszynowe (*Machine Learning*) oraz uczenie głębokie (*Deep Learning*). Ta druga opcja jest rozwinięciem uczenia maszynowego. Z roku na rok korporacje inwestują coraz więcej zasobów pieniężnych w AI ze względu na jej rewolucyjność i diametralne zmiany, które wprowadziła w wielu sektorach gospodarki.

2.1. Głębokie uczenie

Warto na początku wytłumaczyć, na czym polega algorytm głębokiego uczenia. Cytując artykuł ze strony Microsoftu [10]: „Uczenie głębokie to podzbiór uczenia maszynowego oparty na sztucznych sieciach neuronowych. Proces uczenia jest głęboki, ponieważ struktura sztucznych sieci neuronowych składa się z wielu warstw wejściowych, wyjściowych i ukrytych. Każda warstwa zawiera jednostki, które przekształcają dane wejściowe w informacje, których następne warstwy mogą używać do wykonania pewnego zadania predykcyjnego. Dzięki tej strukturze maszyna może uczyć się za pomocą własnego przetwarzania danych”. Inaczej mówiąc, jest to model uczenia maszynowego, który analizuje bardziej zróżnicowane i skomplikowane dane, które mogą być nieustrukturyzowane, np. obrazy bądź dźwięki. Ta zdolność jest wyjątkowo cenna w działaniach logistycznych. Warto również zaznaczyć, że głębokie uczenie wymaga ogromnych ilości danych i znacznych zasobów obliczeniowych. Przedsiębiorstwo inwestujące w tę technologię musi opracować dobrą strategię, by nie stracić czasu i zasobów pieniężnych.

2.2. Modele językowe

Od długiego czasu popularność zyskują modele językowe (LLM – *Large Language Models*), będące sztuczną inteligencją, która przetwarza nasze zapytania i odpowiada językiem naturalnym. Wykorzystują one algorytmy głębokiego uczenia [6]. Na tle konkurencji wyróżnia się ChatGPT. Nie bez powodu, jest to bowiem prawdopodobnie najpopularniejszy chatbot. Potrafi on w wersji darmowej odpo-

wiadać na pytania z wielu dziedzin, udzielać porad, tworzyć teksty, a także wykonywać skomplikowane analizy matematyczne oraz łączyć w schematy wiele faktów. Przy tych możliwościach znajduje on też zastosowanie w logistyce, gdzie może wspierać procesy planowania, optymalizacji tras, zarządzania łańcuchem dostaw czy analizy danych operacyjnych. Dzięki prostej obsłudze, zdolności do szybkiego przetwarzania informacji oraz generowania czytelnych odpowiedzi może służyć jako narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji, prognozowanie popytu, a także optymalizowanie tras logistycznych. Modele poddawane są testom, które mają na celu sprawdzanie ich umiejętności. Na rys. 2 zestawiono ze sobą kilka modeli językowych i oceniono je na podstawie kilku wskaźników. Dla przykładu GPQA (*Graduate-Level Google-Proof Q&A Benchmark*) to wymagający zestaw danych, który został stworzony do oceny możliwości AI. Wynik w postaci procentów to dokładność, z jaką model językowy odpowiadał na pytania. W tym miejscu należy podkreślić, że eksperci z doktoratem osiągają około 65% dokładności.

Model	AIME 2024	GPQA	SWE Bench	MATH 500	BFDL	Alder Polyglot
Grok 3 [Beta]	93.3%	84.6%	n/a	n/a	n/a	n/a
Gemini 2.5 Pro	92%	84%	63.8%	n/a	n/a	72.9%
OpenAI o3-mini	87.3%	79.7%	61%	97.9%	65.12%	60.4%
DeepSeek-R1	79.8%	71.5%	49.2%	97.3%	57.53%	64%
OpenAI o1	79.2%	75.7%	48.9%	96.4%	67.87%	61.7%

Rys. 2. Ranking modeli językowych na podstawie wielu testów, które sprawdzają ich zdolności

Źródło: <https://www.vellum.ai/llm-leaderboard> (dostęp 06.04.2025).

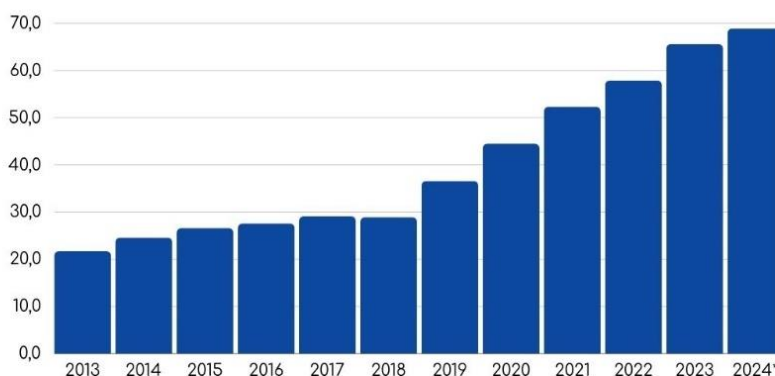
3. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA POPYT I TRASY LOGISTYCZNE

Prognozowanie popytu w logistyce jest procesem złożonym, w którym należy uwzględnić wiele zmiennych. Jeden z najważniejszych czynników to sezonowość, która może powodować okresowe wzrosty lub spadki zapotrzebowania na określone produkty. Przykładem są pory roku bądź święta, takie jak Boże Narodzenie. W branżach odzieżowej, turystycznej bądź spożywczej sezonowość ma ogromne znaczenie. Obrót produktów, szczególnie w przypadku pierwszej wymienionej branży, drastycznie się zmienia. Ponadto sezonowość nie ogranicza się tylko do jednego rynku lokalnego. Dynamika globalnych rynków powoduje, że zmiany w popycie na poszczególne produkty mogą występować na wielu kontynentach jednocześnie. To z kolei przekłada się na konieczność uwzględniania popytu w skali międzynarodowej. Dzięki rozwojowi *e-commerce* klienci mogą zamawiać produkty

z dowolnego miejsca na świecie, co wymusza na firmach logistycznych optymalizację procesów dostaw oraz skracanie czasu realizacji zamówień [2]. Trendy pokazują, że liczba sklepów internetowych w Polsce progresywnie rośnie, a konsumenci są coraz bardziej skłonni robić zakupy przez Internet (rys. 3).

Liczba sklepów internetowych na polskim rynku 2013-2024

Coolshop.®



dun&bradstreet

*dane za 1. i 2. kwartał 2024 r.
Źródło danych: Dun & Bradstreet Poland

Rys. 3. Wykres wskazujący liczbę sklepów internetowych na polskim rynku.
Oś pozioma – lata, oś pionowa – liczba sklepów wyrażona w tysiącach

Źródło: <https://pap-mediaroom.pl/biznes-i-finance/w-polsce-rejestrowanych-jest-srednio-20-nowych-sklepow-internetowych-dziennie> (dostęp 06.04.2025).

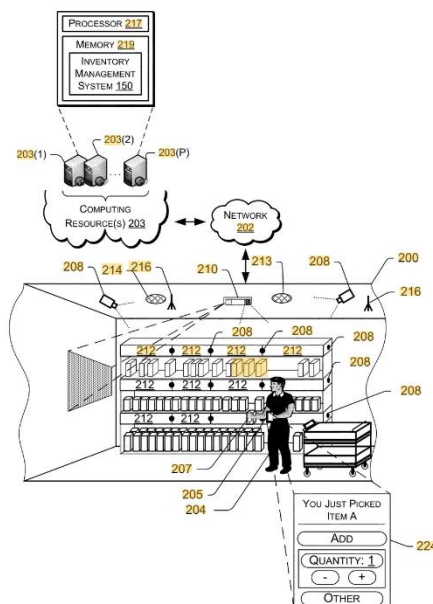
Dynamicznym zmianom podlegają również zachowania konsumenckie, które wynikają z czynników zarówno ekonomicznych, jak i społeczno-kulturowych [3]. Za sprawą panującego trendu zwiększania świadomości ekologicznej klienci coraz chętniej wybierają metody transportu dóbr o niskim śladzie węglowym, co może prowadzić do zmian struktur popytu i wymuszać na firmach logistycznych optymalizację tras transportowych. Inflacja oraz zmiany stóp procentowych mogą znacząco kształtować popyt. Rosnące ceny powodują, że konsumenci ograniczają wydatki, szukając tańszych zamienników lub rezygnując z niektórych zakupów [1]. Z kolei poprawa sytuacji gospodarczej będzie skłaniała klientów do śmielszych i częstszych zakupów.

4. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W LOGISTYCE

Aby dostosować się do sytuacji na rynku i poradzić sobie z występującymi przeciwnościami, przedsiębiorcy sięgają po narzędzia korzystające z AI. Algorytmy AI umożliwiają analizę ogromnych zbiorów danych w czasie rzeczywistym, identyfikację wzorców oraz prognozowanie przyszłych trendów rynkowych. Podstawową i najbardziej zauważalną zaletą stosowania takiego rozwiązania w przedsiębiorstwie jest wzrost efektywności i produktywności. Żmudne i długotrwałe zadania zostają zautomatyzowane, a godziny robocze pracowników mogą zostać przeznaczone na ważniejsze zadania [11]. Jak zauważono w artykule, sztuczna inteligencja ma potencjał, by zautomatyzować czynności, które zabierają 60–70% czasu pracownika. Ponadto stosowanie modeli językowych znacząco ułatwia wykonywanie codziennych zadań. AI, tak jak już zostało to wcześniej wspomniane, analizuje i wykrywa wzorce, które byłyby wyjątkowo trudne do zaobserwowania przez człowieka.

4.1. Wykorzystanie głębokiego uczenia w predykcji popytu

Technologię głębokiego nauczania wykorzystuje Amazon, czyli trzecie pod względem przychodu największe przedsiębiorstwo na świecie. Specjalizuje się ono w dystrybucji i sprzedaży produktów online [8]. *Just Walk Out* to technologia opracowana przez firmę Amazon, którą wykorzystuje się w sklepach stacjonarnych. Pozwala ona na analizę obrazu z kamer identyfikujących klientów i monitorowanie ich aktywności podczas robienia zakupów. Sklepy używające tej technologii są powiązane z aplikacją Amazon GO i kartą ID, która uprawnia do wejścia na teren sklepu. Klient następnie jest analizowany pod kątem preferencji w wyborze produktów. Podobnie dzieje się podczas zakupów online. Informacje te pozwalają firmie na wyliczenie poziomu zapasów, a co za tym idzie – predykcję popytu na podstawie bazy danych, która zawiera dane o wielu milionach klientów (rys. 4).



Rys. 4. Mechanizm przenoszenia produktów z obszarów przeładunkowych

Źródło: <https://patents.google.com/patent/US20150012396> (dostęp 06.04.2025).

4.2. Optymalizacja tras logistycznych za pomocą autonomicznych ciężarówek

Przełomem w optymalizacji tras logicznych mogłyby się okazać w pełni autonomiczne ciężarówki. Rozwiązanie takie zaproponował F. Mroczko [5]. Miałyby one poruszać się po specjalnym pasie przeznaczonym tylko dla nich. Przedsiębiorca wybierający takie rozwiązanie nie musiałby uwzględniać ograniczeń wynikających z pracy kierowców, takich jak: zmęczenie, czas pracy, przerwy czy urlopy. Ponadto rozwiązanie takie znacznie skróciłoby czas transportu (autonomiczny pojazd nie będzie musiał robić żadnych przerw). Rozwinięcie autostrad dla ruchu takich pojazdów zminimalizowałoby również ryzyko wypadków. Pojazdy w pełni sterowane przez AI cechowałyby się niewyobrażalnie małym ryzykiem wypadków, natomiast kierowcy mogący powodować niebezpieczne sytuacje znajdowaliby się na innych pasach ruchu. Na rynku zaczynają się pojawiać pierwsze prototypy oraz częściowo autonomiczne pojazdy ciężarowe (rys. 5), więc floty bezzałogowych ciężarówek to prawdopodobnie kwestia czasu i jeden z głównych elementów Przemysłu 5.0.

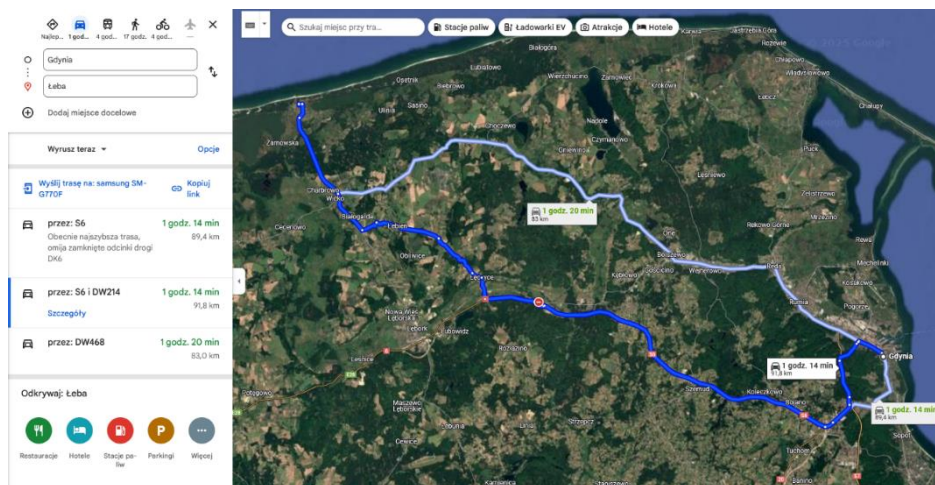


Rys. 5. Elektryczny pojazd ciężarowy produkcji Tesli z wieloma autonomicznymi systemami

Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Tesla_Semi#/media/Plik:Tesla_Semi_3.jpg (dostęp 06.04.2025).

4.3. Inteligentne poszukiwanie dróg

Sztuczna inteligencja w znacznym stopniu wspomaga też wyszukiwanie dróg [9]. Przy jej użyciu pracownik nie musi w żaden sposób próbować samodzielnie wyznaczać trasy. Inteligentne systemy wyszukują wszystkie dostępne trasy i proponują je użytkownikowi, biorąc pod uwagę czynniki takie jak: roboty drogowe, zagęszczenie ruchu, maksymalne ograniczenia prędkości, pogodę oraz wypadki. Zmiennych jest o wiele więcej, a system o odpowiednim skomplikowaniu jest w stanie uwzględnić wszystkie warunki panujące na drodze. Przykładem może tu być Google Maps. System ten pobiera informację o punkcie docelowym i analizuje wszystkie dostępne trasy, po czym wybiera optymalną. W obecnych czasach asystent drogowy bywa niedokładny i może pokazywać błędną datę dotarcia do celu, lecz z czasem będzie się stawał coraz dokładniejszy. W przyszłości możliwe będzie analizowanie drogi na podstawie statystyk, które wygeneruje AI. Czas potrzebny na dotarcie do miejsca docelowego będzie możliwy do sprawdzenia z kilkudniowym wyprzedzeniem. W połączeniu z automatyzacją ciężarówek wiele operacji logistycznych będzie mogło zostać zaplanowanych z dokładnymi szczegółami na długi czas przed ich zrealizowaniem. Na rys. 6 przedstawiono wygenerowane połączenie między Gdynią a Łebą. Warto zauważyć, że algorytm oznaczył ciemnoniebieską drogę jako szybszą pomimo większego dystansu do celu. Wynika to z dogłębnego przeanalizowania warunków panujących na tych odcinkach oraz ograniczeń związanych z drogami.



Rys. 6. Mapa przedstawiająca połączenie między Gdynią a Łebą z dodatkowymi statystykami

Źródło: <https://www.google.com/maps> (dostęp 06.04.2025).

4.4. Użycie modeli językowych w logistyce

Aktualne modele językowe mogą zostać w bardzo efektywny sposób wykorzystane w branży logistycznej. Jednym z praktycznych atutów jest zdolność do przetwarzania i analizowania danych pochodzących z arkuszy kalkulacyjnych oraz innych źródeł. Sztuczna inteligencja może bardzo szybko znaleźć wiele zależności między różnymi parametrami. Jest to ułatwienie w dalszej pracy biurowej i początek do formułowania coraz dalej idących wniosków. Na przykład analizując dane dotyczące zamówień, czasu dostawy, lokalizacji klientów, model wskaże, co warto poprawić w przedsiębiorstwie i zaproponuje kolejne, bardziej efektywne trasy transportowe lub przewidzi, na co może wzrosnąć popyt.

5. PODSUMOWANIE

Logistyka, choć ma swoje korzenie w działaniach wojskowych i starożytności, z biegiem czasu ewoluowała w nieodłączny element funkcjonowania współczesnej gospodarki, poczynając od magazynowania prostych surowców oraz transportu między lokalnymi osadami, aż po rozwój nowoczesnych systemów logistycznych i gigantyczny wpływ na postęp obecnej cywilizacji. Stan zaawansowania logistyki jest permanentnie związany z zaawansowaniem technologii. Aktualnie przedsiębiorcy są zmuszeni do integracji systemów logistycznych z AI ze względu na rosnące wymagania konsumentów oraz modernizującą się konkurencję. Przykłady

zastosowania AI w logistyce już dziś pokazują, jak ogromny potencjał drzemie w tej technologii. Firmy, które wdrażają rozwiązania oparte na tym narzędziu, nie tylko zyskują na efektywności operacyjnej, ale również pozwala im to zachować pozycję na rynku. W przyszłości będzie to fundament wielu branż, w tym logistyki, a ludzie będą coraz częściej współpracować z inteligentnymi systemami, które odciążą ich w wykonywaniu rutynowych zadań, umożliwiając skupienie się na bardziej strategicznych aspektach pracy.

LITERATURA

1. Byłok F., *Meandry konsumpcji we współczesnym społeczeństwie: konsumpcjonizm versus dekonsumpcja*, Annales. Etyka w Życiu Gospodarczym 2016, 19(1), s. 55–69.
2. Kaźmierczak M., Szymczyk J., *Rozwój e-commerce w Polsce i jego wpływ na logistykę. Cz. 1*, Gospodarka Materiałowa i Logistyka 2021, 3, s. 2–13.
3. Kłós L., *Świadomość ekologiczna Polaków – przegląd badań*, Studia i Prace WNEiZ US 2015, 2(42), s. 35–44.
4. Maśloch P., *Logistyka i jej rozwój na przestrzeni lat – od koncepcji cesarza Leontosa VI do wsparcia logistycznego operacji „Pustynna Burza”*, Zeszyty Naukowe. Logistyka i Transport / Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu 2005, 1(1), s. 35–45.
5. Mroczko F., *Sztuczna inteligencja i jej wykorzystanie w logistyce*, Prace Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania i Przedsiębiorczości z siedzibą w Wałbrzychu 2023, 53(1) Pedagogika, zarządzanie, psychologia i inżynieria zarządzania wobec wyzwań współczesności: relacje i interdyscyplinarność wyzwaniem współczesności, s. 41–60.
6. Nowicka J., *Rola i znaczenie sztucznej inteligencji w edukacji inżynierskiej – przypadek ChatGPT*, Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska 2024, s. 39–58.
7. Różanowski K., *Sztuczna inteligencja – rozwój, szanse i zagrożenia*, Zeszyty Naukowe Warszawskiej Wyższej Szkoły Informatyki 2007, 2, s. 109–135.
8. Tuora M., Koper K., *Możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w logistyce*, Ekonomia i Organizacja Logistyki 2017, 2(1), s. 91–102.
9. Wróbel M., Wojda P., *Możliwości optymalizacji procesu transportowego z wykorzystaniem sztucznej inteligencji*, Journal of TransLogistics 2018, 4(1), s. 197–204.

Źródła internetowe

10. <https://learn.microsoft.com/pl-pl/azure/machine-learning/concept-deep-learning-vs-machine-learning?view=azureml-api-2> (dostęp 06.04.2025). 10
11. <https://online.hbs.edu/blog/post/benefits-of-ai-in-business> (dostęp 06.04.2025). 11

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DEMAND PREDICTION AND OPTIMIZATION OF LOGISTICS ROUTES

The article presents a short history of the beginnings of logistics and its current state. Basic issues related to logistics and Artificial Intelligence are explained. In particular, attention is paid to demand and logistics routes in the case of logistics. Deep learning algorithms and language models are the main issues in the case of Artificial Intelligence. Many factors that affect demand and logistics routes are presented. Existing solutions for route optimization and demand prediction are presented. Furthermore, solutions that are highly likely to be developed and used in the future are shown. The aim of the article is to show how crucial Artificial Intelligence is in the development of logistics.

Keywords: Artificial Intelligence, logistic, demand, deep learning, LLM.