

Wydział Transportu

Politechnika Warszawska

**XIII MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA
NAUKOWO – TECHNICZNA**

**SYSTEMY
LOGISTYCZNE
TEORIA i PRAKTYKA**

Warszawa, 1 – 3 września 2024

Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne

**XIII International Scientific and Technical Conference
LOGISTICS SYSTEMS
THEORY AND PRACTICE**

Warsaw, September 1 – 3, 2024

Security of Critical Infrastructure and Logistics Systems

SYSTEMY LOGISTYCZNE TEORIA i PRAKTYKA

LOGISTICS SYSTEMS THEORY & PRACTICE



Konferencja zorganizowana pod patronatem

Rektor
Politechniki Warszawskiej

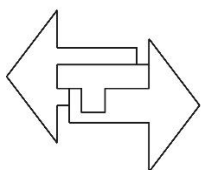


Komitet Transportu
Polskiej Akademii Nauk



Polskie Towarzystwo
Logistyczne





Organizator:

Wydział Transportu

Politechnika Warszawska

Redakcja

prof. dr hab. inż. Mirosław Siergiejczyk,

prof. dr hab. inż. Konrad Lewczuk

Teksty wydrukowanych materiałów zamieszczono w postaci edytorskiej nadesłanej przez Autorów

© Copyright by Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2024

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w Internecie bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Druk i oprawa:

Agencja Wydawniczo-Poligraficzna GIMPO, ul. Transportowców 11, 02-858, Warszawa.

ISBN: 978-83-944813-9-1

KOMITET NAUKOWY KONFERENCJI

Przewodnicząca:

Jacyna Marianna – Politechnika Warszawska

Członkowie:

Bazaras Darius – Vilnius Gediminas Technical University

Borucka Anna – Wojskowa Akademia Techniczna

Bolzhelarskyi Yaroslav – Lviv Polytechnic National University

Bujak Andrzej – Wyższa Szkoła Bankowa we Wrocławiu

Bukowski Lech – Wyższa Szkoła Biznesu w Dąbrowie Górniczej

Bulgakova Iuliia – National Aviation University

Burciu Zbigniew – Akademia Morska w Gdyni

Chrzan Marcin – UTH im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu

Filina-Dawidowicz Ludmiła – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Gołda Paweł – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Grabarek Iwona – Politechnika Warszawska

Idzior Marek – Politechnika Poznańska

Izdebski Mariusz – Politechnika Warszawska

Jachimowski Roland – Politechnika Warszawska

Jacyna-Gołda Ilona – Politechnika Warszawska

Jałowicz Tomasz – Akademia Sztuki Wojennej

Kardas-Cinal Ewa – Politechnika Warszawska

Kisperska-Moroń Danuta – Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach

Kłodawski Michał – Politechnika Warszawska

Korzeb Jarosław – Politechnika Warszawska

Kowalski Mirosław – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Kukulski Jacek – Politechnika Warszawska

Kuznetsov Valeriy – Railway Research Institute

Kwaśnikowski Jerzy – Wyższa Szkoła Bankowa we Wrocławiu

Lozia Zbigniew – Politechnika Warszawska

Łukasik Zbigniew – UTH im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu

Mazurkiewicz Dariusz – Politechnika Lubelska

Merkisz Jerzy – Politechnika Poznańska

Merkisz-Guranowska Agnieszka – Politechnika Poznańska

Michlowicz Edward – Akademia Górniczo-Hutnicza

Mironiuk Waldemar – Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte w Gdyni

Mitkow Szymon – Wojskowa Akademia Techniczna

Nader Mirosław – Politechnika Warszawska

Nowakowski Tomasz – Politechnika Wrocławska

Pyza Dariusz – Politechnika Warszawska

Rosiński Adam – Politechnika Warszawska

Santarek Krzysztof – Politechnika Warszawska

Semenov Iouri – WSB w Poznaniu

Skorupski Jacek – Politechnika Warszawska

Szarata Andrzej – Politechnika Krakowska

Szczepański Emilian – Politechnika Warszawska
Ślęzak Marcin – Instytut Transportu Samochodowego
Świdorski Andrzej – Instytut Transportu Samochodowego
Toruń Andrzej – Instytut Kolejnictwa
Tubis Agnieszka – Politechnika Wrocławska
Wasiak Mariusz – Politechnika Warszawska
Wawrzyński Wojciech – Politechnika Warszawska
Zboiński Krzysztof – Politechnika Warszawska
Zieja Mariusz – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
Żak Jolanta – Politechnika Warszawska
Żochowska Renata – Politechnika Śląska
Siergiejczyk Mirosław – Politechnika Warszawska

KOMITET ORGANIZACYJNY KONFERENCJI

Przewodniczący:

Lewczuk Konrad

Wiceprzewodniczący:

Siergiejczyk Mirosław

Sekretarz:

Nehring Karol

Członkowie:

Gołębiowski Piotr
Zabielska Aleksandra
Lasota Michał

International Technical and Scientific Conference
Logistics Systems – Theory and Practice

SPIS ARTYKUŁÓW/ CONTENTS

Teresa Abramowicz-Gerigk, Zbigniew Burciu <i>Czynnik ludzki w eksploatacji i zarządzaniu statkiem autonomicznym</i> The human factor in operation of an autonomous ship	11
Maciej Bieńczak, Paweł Zmuda-Trzebiatowski, Jacek Wilczkowiak, Wojciech Miechowicz <i>Referencyjna baza przystanków autobusowych</i> Reference database of bus stops	23
Marcin Chrzan, Tomasz Ciszewski, Waldemar Nowakowski, Mieczysław Kornaszewski <i>Zastosowanie protokołu SNMP dla zdalnego audytu komputerów wykorzystywanych w zadaniach transportowych</i> Application of SNMP protocol for remote audit of computers used in transport tasks	41
Ewelina Sendek-Matysiak <i>Zastosowanie punktowej metody wielokryterialnej oceny w optymalizacji flot carsharingowych</i> Application of the multi-criteria scoring method in the optimization of carsharing fleets	65
Michał Grzybowski, Jakub Młyńczak, Lucyna Sokółowska <i>Opis zależności przebiegów dla komputerowych systemów srk</i> Description of route dependencies for computer-based railway signalling systems	81
Marek Idzior <i>Implikacje rozwoju infrastruktury elektroenergetycznej na elektromobilność rynku pojazdów samochodowych w Polsce</i> Implications of the development of electricity infrastructure on the electromobility of the motor vehicle market in Poland	93
Karol Nehring <i>Optymalizacja aerodynamiki pociągu kontenerowego, jako czynnik poprawy bezpieczeństwa i efektywności w transporcie intermodalnym</i> Optimization of aerodynamics in container trains as a factor in improving safety and efficiency in intermodal transport	109
Weronika Pęgielska, Szkoła Maciej <i>Koszt cyklu istnienia w ocenie efektywności środków transportu komunikacji zbiorowej</i> Life cycle cost in assessing the effectiveness of public means of transport	125
Janusz Szopiński <i>Problematyka prowadzenia ruchu pociągów w czasie rzeczywistym</i> Problems of running train traffic in real time	141

Czynnik ludzki w eksploatacji i zarządzaniu statkiem autonomicznym

Teresa Abramowicz-Gerigk¹, Zbigniew Burciu¹

¹ Uniwersytet Morski w Gdyni

Streszczenie. Eksploatacja statków autonomicznych MASS (Maritime Autonomous Surface Ship), wprowadza nową jakość w transporcie morskim. Pojęcie MASS definiuje statki o różnym poziomie autonomii, poczynając od statków z częściowo zautomatyzowanymi systemami, wspierającymi działania załogi, do statków z autonomicznymi systemami, umożliwiającymi eksploatację statku bez potrzeby ingerencji człowieka. Na forum Międzynarodowej Organizacji Morskiej i Unii Europejskiej trwają prace zmierzające do opracowania i wdrożenia kodeksu MASS. Prace te nie nadążają za rozwojem technologii, brakuje ogólnie akceptowanych metod oceny bezpieczeństwa, w szczególności dotyczy to zależności pomiędzy bezpośrednią odpowiedzialnością człowieka i niezawodnością systemów autonomicznych. Jednostki autonomiczne i brzegowe centra zdalnej eksploatacji MASS, będące w fazie testów, podlegają obecnie przepisom wprowadzanym przez towarzystwa klasyfikacyjne. W artykule przedstawiono analizę wpływu czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo eksploatacji jednostki MASS, bez załogi na pokładzie, zdalnie sterowanej z centrum operacyjnego oraz wykorzystanie metody HRA (Human Reliability Analysis) i sieci bayesowskiej do analizy pracy operatora. Uwzględniono czynniki wpływające na świadomość sytuacyjną systemu autonomicznego i świadomość sytuacyjną operatora.

Słowa kluczowe: żegluga autonomiczna, Maritime Autonomous Surface Ship MASS, operator

1. Wprowadzenie

W lutym 2017 r. dziewięć państw (Dania, Estonia, Finlandia, Holandia, Japonia, Korea, Norwegia, UK, USA) przedłożyło Komitetowi Bezpieczeństwa Morskiego (MSC) Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) wniosek w sprawie opracowania przepisów dotyczących morskich autonomicznych statków nawodnych. Powody wprowadzenia żegluga autonomicznej oprócz zwiększenia bezpieczeństwa transportu morskiego dotyczyły globalnej redukcji emisji zanieczyszczeń, redukcji kosztów transportu, przewidywanego niedoboru marynarzy z wykształceniem na poziomie

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Abramowicz-Gerigk T., Burciu Z. (2025). Czynniki ludzkie w eksploatacji i zarządzaniu statkiem autonomicznym, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 9–20, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

*Autor do korespondencji

E-mail adres: t.gerigk@wn.umg.edu.pl, (T. Abramowicz-Gerigk)

ORCID iD: 0000-0002-0477-3161 (T. Abramowicz-Gerigk), 0000-0001-5171-1943 (Z. Burciu)

operacyjnym i wyeliminowania zagrożeń związanych ze środowiskiem pracy na pokładzie statku.

Aby ułatwić proces tworzenia nowego kodeksu jednostek autonomicznych wprowadzono cztery stopnie autonomii jednostek MASS [8].

Stopień pierwszy (MASS I): statek ze zautomatyzowanymi procesami i wspomaganie decyzji: załoga znajduje się na statku w celu obsługi i kontrolowania systemów i funkcji pokładowych. Niektóre operacje mogą być zautomatyzowane i przebiegać bez nadzoru, jednak załoga na pokładzie pozostaje w gotowości do przejścia kontroli.

Stopień drugi (MASS II) - statek zdalnie sterowany, z załogą szkieletową na pokładzie: statek jest zdalnie sterowany i obsługiwany ze zdalnego centrum operacyjnego ROC (Remote Operations Centre). Załoga na pokładzie jest przygotowana do przejścia kontroli i obsługi systemów statku.

Stopień trzeci (MASS III) - statek zdalnie sterowany bez załogi na pokładzie: statek jest kontrolowany i obsługiwany ze zdalnego centrum operacyjnego.

Stopień czwarty (MASS IV) – statek w pełni autonomiczny: system autonomiczny statku podejmuje decyzje i realizuje zadania związane z eksploatacją statku, statek jest nadzorowany ze zdalnego centrum operacyjnego.

Zdalne sterowanie jednostkami MASS II i MASS III wnosi nowe wyzwania w transporcie morskim i nową filozofię nawigowania statkiem. Jednostki w pełni autonomiczne MASS IV, monitorowane ze zdalnego centrum operacyjnego, muszą być przygotowane do zmiany planu podróży, przejścia częściowej lub całkowitej kontroli przez operatora, przejścia w stan MASS III, w przypadku awarii lub wystąpienia niespodziewanych zagrożeń.

Wprowadzenie statków autonomicznych powoduje pojawienie się zagrożeń związanych z zależnością pomiędzy świadomością sytuacyjną systemu autonomicznego i świadomością sytuacyjną operatora zdalnego centrum zarządzania, wynikające z niedoskonałości systemów wspomaganie decyzji operatora ROC i błędów operatora podczas nadzoru nad systemami autonomicznymi.

Trudno w obecnej sytuacji jednoznacznie ocenić wpływ czynnika ludzkiego na zagrożenia występujące w autonomicznym transporcie morskim [5]. Jedne z pierwszych, opublikowanych badań, dotyczących MASS III, przeprowadzonych z udziałem operatorów centrum nadzoru ruchu statków VTS (Vessel Traffic Services) na symulatorze VTS, w centrum symulacji morskich [2] wykazały potrzebę zatrudnienia na stanowisku operatora ROC kapitana statku, posiadającego kompetencje zgodne z STCW. Analiza niezawodności operatora przeprowadzona z wykorzystaniem wirtualnej wersji autonomicznego promu milliAmpere2 (mA2), opracowanego przez Norweski Uniwersytet Naukowo-Technologiczny [4] wykazała, że złożoność zadania i wstępne ostrzeżenie miały najbardziej istotny wpływ na właściwe przejście jednostki. Istotnymi czynnikami wpływającymi na niezawodność operatora przy wykonywaniu operacji były nuda i wcześniejsze ostrzeżenie o zagrożeniach. Największe znaczenie przy przejmowaniu kontroli nad statkiem i wykonywaniu zadania miał dostępny czas. Wykazano przy tym niewielką zależność niezawodności operatora od jego doświadczenia przy przejmowaniu sterowania i realizowaniu awaryjnych scenariuszy unikania kolizji MASS.

Badania te, przeprowadzone dla niewielkiej jednostki autonomicznej, w różnym stopniu mogą się przekładać na statki o nietypowych właściwościach manewrowych,

w szczególności na duże statki o małym stosunku mocy do wyporności, dla których wpływ doświadczenia morskiego na niezawodność operatora ROC może się okazać bardzo istotny. IMO skłania się do wprowadzenia zaleceń w zakresie kompetencji kandydatów do szkolenia na operatorów ROC, zgodnie z którymi będą w nich mogły uczestniczyć tylko osoby posiadające dyplomy morskie kapitanów żeglugi wielkiej i starszych oficerów pokładowych.

Rozwój narzędzi wspomagających postrzeganie i podejmowanie decyzji ułatwiają pracę i zwiększa niezawodność operatora, jednak nadal pozostaje nierozwiązana kwestia zaufania człowieka do systemów, z którymi on współpracuje, algorytmów przetwarzających informacje i opóźnień w transmisji danych, gdy operacje są prowadzone w czasie rzeczywistym.

2. Działania w obszarze MASS na forum IMO

Na 105. sesji MSC, w kwietniu 2022 r., rozpoczęto prace dotyczące przepisów bezpieczeństwa w zakresie budowy i eksploatacji statków autonomicznych. W maju 2024 roku została opublikowana nowa mapa drogowa wprowadzenia kodeksu MASS, zgodnie, z którą zostanie on włączony do Międzynarodowej konwencji o bezpieczeństwie życia na morzu SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea) w 2028 roku i wejdzie w życie w 2032 roku. Będzie on obejmował zagadnienia techniczne i prawne, w tym zagadnienia dotyczące:

- nawigacji – w eksploatacji MASS nastąpi przejście od systemów informacyjnych do systemów decyzyjnych, w tym systemów zapobiegania zderzeniom i wyznaczania bezpiecznych stanów eksploatacyjnych, w zależności od etapu podróży (morze otwarte, wody ograniczone, port, manewrowanie w sytuacjach awaryjnych),
- organizacji zdalnych centrów operacyjnych oraz odpowiedzialności i współpracy statku autonomicznego z ROC, określenia wymaganych kompetencji operatora ROC i zasad monitoringu jednostki MASS,
- zagrożeń na pokładzie MASS – w tym zagrożeń pożarowych,
- ratownictwa życia i mienia,
- oceny ryzyka awarii MASS z uwzględnieniem łączności i cyberbezpieczeństwa.

Przepisy, które zostaną uwzględnione i uaktualnione przy opracowaniu kodeksu MASS obejmują następujące dokumenty:

- Międzynarodowa konwencja SOLAS,
- Konwencja w sprawie międzynarodowych przepisów o zapobieganiu zderzeniom na morzu (COLREG),
- Międzynarodowa konwencja o liniach ładunkowych (Load Lines),
- Międzynarodowa konwencja o wymaganiach w zakresie wyszkolenia marynarzy, wydawania świadectw oraz pełnienia wacht STCW i STCW-F (International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping),
- Międzynarodowa Konwencja o poszukiwaniu i ratownictwie morskim SAR (International Convention on Maritime Search and Rescue),
- Międzynarodowa konwencja o bezpiecznych kontenerach CSC (Container Safety Convention).

Nowe wyzwania, które pojawią się przy wprowadzaniu statków autonomicznych na szlaki żeglugowe, a które nie występowały dotychczas stanowią:

- brak bezpośredniego nadzoru nad eksploatacją MASS III i MASS IV w morzu,
- zapewnienie bezpiecznej, minimalnej obsady statku,
- określenie zakresu odpowiedzialności formalno-prawnej za statek i ładunek,
- określenie zakresu odpowiedzialności kapitana MASS i operatora ROC,
- dostosowanie nowych przepisów do istniejących uregulowań w zakresie zapobiegania wypadkom na morzu,
- zapobieganie i reagowanie na zagrożenia cybernetyczne,
- współdziałanie jednostki autonomicznej ze służbami ratownictwa morskiego SAR w razie uczestniczenia w akcji ratowniczej lub bezpośredniego zagrożenia jednostki MASS III i MASS IV.

Na obecnym etapie wprowadzania nowych technologii związanych z MASS, przepisy dotyczące testów, zawierające tymczasowe wytyczne dotyczące prób MASS (MSC.1-Circ.1604) wymagają, zachowania podczas prób, co najmniej tego samego poziomu bezpieczeństwa, jakiego wymaga obecnie SOLAS dla statków załogowych. Odnoszą się one do konieczności oceny ryzyka związanego z prowadzeniem prób, środków zmniejszających ryzyko, kompetencji, kwalifikacji i doświadczenia operatora ROC, jednak bez wskazania konkretnych procedur. Stwierdzono przy tym, że wybór metodologii oceny ryzyka pozostaje w kompetencjach administracji państwa, projektantów i operatorów statków, a struktura i procedury oceny ryzyka powinny być zgodne z okólnikiem MSC.1/Circ.1455 [9].

Związek pomiędzy odpowiedzialnością operatora ROC a automatyzacją procesów związanych z bezpieczeństwem statku, ładunku i środowiska jest trudny do sformalizowania. Dotyczy odpowiedzialności prawnej za statek i ładunek, zdalnej nawigacji, pilotażu w warunkach ograniczonej widzialności, współpracy ze służbami VTS, SAR, monitorowania bezpieczeństwa i ochrony MASS, zapobiegania i reagowania na zagrożenia cybernetyczne [3]. Wyzwanie dotychczas nie spotykane, stanowi zarządzanie MASS III i MASS IV (w przypadku awarii) przez operatora ROC, w przeciwieństwie do kapitana przebywającego na mostku nawigacyjnym, na jednostce obsadzonej załogą, przy niepełnej i niepewnej informacji. Pojawia się więc pytanie, w jakim zakresie wsparcie cyfrowe może zmniejszyć wpływ czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo w żegludze autonomicznej i w jakim zakresie czynnik ludzki należy uwzględnić na etapie projektowania systemów wspomagania decyzji operatora ROC.

3. Szkolenie w zakresie eksploatacji i zarządzania statkami autonomicznymi

Na pytanie czy operator ROC to nowy zawód czy rozszerzenie dotychczasowych kompetencji kapitana można będzie odpowiedzieć po zapewnieniu akceptowalnej niezawodności wszystkich systemów. Na obecnym etapie rozwoju technologii, doświadczenie morskie operatora jest niezbędne i podobnie do statków załogowych, powinno obejmować praktykę na statkach tego samego typu co statki MASS.

Charakterystyki techniczno-eksploatacyjne statku autonomicznego w zdalnym centrum operacyjnym podaje cyfrowy bliźniak MASS, który zapisuje, przetwarza i analizuje, na podstawie procedur operacyjnych i awaryjnych, dane pochodzące z urządzeń, czujników, systemów zarządzania energią, systemu bezprzewodowego monitorowania, inteligentnego

systemu świadomości sytuacyjnej MASS, serwisów pogodowych, systemów planowania podróży a następnie przekazuje je operatorowi.

Operator ROC interpretuje otrzymane informacje i podejmuje odpowiednie działania, opracowuje i realizuje plan podróży dla MASS III, awaryjny plan podróży dla MASS IV, odpowiada za komunikację centrum brzegowego z MASS, innymi statkami, biurem operatora, służbami nadzoru ruchu statków VTS (Vessel Traffic Services), służbami kontroli portowej Inspektoratu Państwa Portu PSC (Port State Control), służbami ratowniczymi SAR i centrum szybkiego reagowania.

Istniejące wymagania dotyczące kompetencji i zakres szkolenia operatorów ROC, opracowane na podstawie dostępnych ofert kursów w wybranych ośrodkach szkoleniowych obejmują następujące zagadnienia:

- stosowanie prawa drogi w żegludze autonomicznej COLREG,
- opracowanie planu podróży i nawigacja statku autonomicznego MASS,
- komunikacja satelitarna,
- systemy wymiany danych,
- zaawansowane systemy pozycjonowania statku,
- morskie systemy autonomiczne,
- pilotaż w warunkach ograniczonej widzialności,
- procedury awaryjne dla statków zdalnie sterowanych MASS III,
- zarządzanie ryzykiem MASS III i MASS IV,
- prawo morskie z uwzględnieniem statków autonomicznych.

Przykłady wymagań w zakresie wstępnych kompetencji kandydatów na szkolenia w zakresie eksploatacji i zarządzania statkami autonomicznymi na kursach szkoleniowych i studiach magisterskich, w zakresie morskich operacji autonomicznych, przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wymagania w zakresie wstępnych kompetencji kandydatów na szkolenia operatorów ROC i studentów studiów magisterskich w zakresie morskich operacji autonomicznych

Instytucja	Kurs	Wymagany dyplom
Australian Maritime College (Australia) [14]	Certificate in Marine Autonomous Surface Ship (MASS) Operator Training	Oficer wachtowy
X Marine (Grecja) [16]	Master of Maritime Autonomous Surface Ship Awareness	Kapitan żeglugi wielkiej (Captain class A)
	Maritime Autonomous Surface Ships Operator Awareness	Oficer wachtowy
Novia University of Applied Sciences (Finlandia) [15]	Master of Engineering, Autonomous Maritime Operations (60 ECTS)	Licencjat, 2 lata praktyki

Jednym z ważniejszych punktów szkolenia jest zarządzanie ryzykiem, uwzględniające komunikację operatora ze statkiem autonomicznym i systemami wspomagania decyzji w zdalnym centrum operacyjnym.

4. Funkcje systemu wspomagającego pracę operatora ROC

Czynnik ludzki w eksploatacji MASS III odnosi się przede wszystkim do świadomości sytuacyjnej SA (situational awareness) operatora ROC nadzorującego realizację podróży statku autonomicznego [7]. Wysoki poziom SA umożliwia przeciwdziałanie zagrożeniom w eksploatacji technicznej i handlowej statku, właściwe przewidywanie stanu jednostki w najbliższej przyszłości i podczas kolejnych etapów rejsu.

W ostatnich badaniach nad czynnikiem ludzkim, związanych z oceną ryzyka MASS III, sterowanego zdalnie z brzegu, bez załogi na pokładzie [2, 4], zaproponowano do oceny świadomości sytuacyjnej technikę predykcji wskaźnika błędu ludzkiego (THERP), sieci bayesowskie i teorię rozmytą, oparte na ocenie ekspertów.

Analiza niezawodności człowieka HRA (Human Reliability Analysis), szeroko stosowana w analizie bezpieczeństwa złożonych systemów antropotechnicznych może być zastosowana do identyfikacji i ilościowego określenia błędów popełnianych podczas przejmowania kontroli i obsługi MASS w scenariuszach awaryjnych. Cheng i inni, [4] przedstawili metodę interakcji człowieka z systemem autonomii, w której określone są czynniki kształtujące wydajność, takie jak: doświadczenie, złożoność zadań, dostępny czas na podjęcie działań, wstępne ostrzeganie, nuda i zaproponowali miary dotyczące błędów ludzkich. W celu przedstawienia związków przyczynowych i probabilistycznych pomiędzy zmiennymi opisującymi system autonomii i błędami ludzkimi zaproponowali sieć bayesowską.

Bezpieczna i wydajna współpraca pomiędzy operatorem ROC i systemem autonomicznym powinna być oparta na ocenie ryzyka uwzględniającej jednocześnie działanie autonomicznego systemu kontroli i operatora nadzorującego system. System kontroli ostrzega operatora o uszkodzeniach i przekroczeniu limitów eksploatacyjnych, zapewniając czas na reakcję i sporządzenie alternatywnych planów, przejście w tryb minimalnego ryzyka, gdy ryzyko staje się zbyt duże. Wsparcie procesu decyzyjnego operatora ROC w oparciu o ryzyko powinno uwzględniać, szczegółową analizę czasów reakcji i niezawodność człowieka podczas interakcji człowiek-maszyna [6].

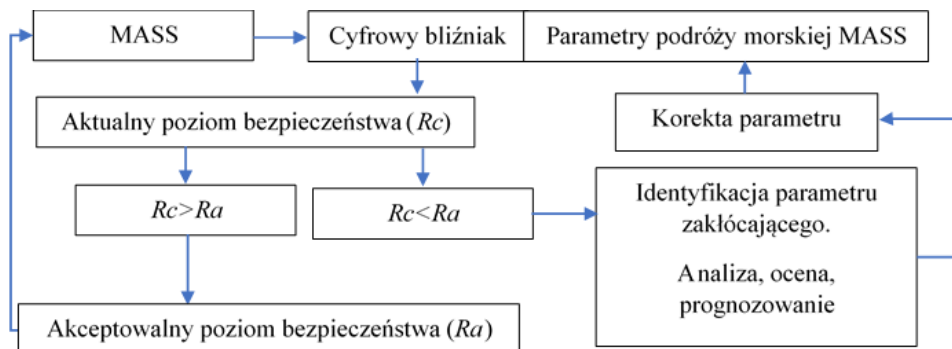
Większość problemów, związanych z eksploatacją MASS, wymagających obecnie rozwiązania, dotyczy czynnika ludzkiego [10]. W szczególności zapewnienia właściwego poziomu świadomości sytuacyjnej operatora, powiadomień i alarmów generowanych przez system, umożliwiających szybką reakcję operatora i wejście w pętlę zdalnego sterowania statkiem, a także przejrzystości automatyzacji – operator powinien wiedzieć, jak działa sztuczna inteligencja w systemie monitorowania i zdalnego sterowania MASS.

Przykład rozwiązania systemu alarmów i powiadomień stanowi koncepcja poziomów gotowości operatora zaproponowana w [10], na podstawie obserwacji przeprowadzonych na statkach załogowych. Najniższy poziom uwagi załogi na mostku zanotowano na oceanie przy domenie statku o promieniu 60 mil morskich i dla tej wartości przyjęto najniższy poziom gotowości operatora. Poziom ten oznacza powiadomienia generowane przez system co godzinę lub co 30 minut. Wyższe poziomy gotowości, z krótszymi czasami pomiędzy powiadomieniami, przyjęto dla akwenów ograniczonych i większego zagęszczenia ruchu statków.

Projektowanie systemu interakcji człowiek-maszyna powinno uwzględniać funkcje poznawcze człowieka, jego efektywność na różnych poziomach współpracy człowiek-

maszyna, procesy wspierające podejmowanie decyzji i kontrolujące reakcje operatorów [3, 11, 12]. Aby rozwiązać ten problem, ważne jest zrozumienie zachowania operatora w zintegrowanym systemie zdalnego zarządzania MASS, wykorzystanie systemu sztucznej inteligencji, skoncentrowanego na człowieku, uwzględnianie czynnika ludzkiego w metodach oceny ryzyka i uczeniu maszynowym [4].

Na Rysunku 1 przedstawiono uproszczony moduł sterowania poziomem bezpieczeństwa MASS przez operatora podczas realizowanej podróży morskiej.



Rys. 2. Moduł sterowania poziomem bezpieczeństwa MASS przez operatora podczas realizowanej podróży morskiej

W Tabeli 2 przedstawiono czynniki psychologiczne, wpływające na świadomość sytuacyjną operatora ROC i jego reakcje, które należy uwzględnić przy projektowaniu systemu wspomagania decyzji operatora.

W Tabeli 3 przedstawiono wymagane funkcje systemu wspomagającego pracę operatora w centrum operacyjnym, wspierające podejmowanie decyzji i kontrolujące reakcje operatora, w zależności od jego charakterystyk psychologicznych i świadomości sytuacyjnej.

Tabela 2. Czynniki psychologiczne, wpływające na świadomość sytuacyjną i reakcje operatora ROC

Czynniki wpływające na reakcje operatora ROC		Świadomość sytuacyjna	Decyzja	Działanie	Reakcja operatora
Czynniki poznawcze i psychologiczne	Stres		x		Brak czujności
	Słaba pamięć	x			
	Znudzenie	x			
	Zmęczenie	x			
	Rozproszenie	x			
	Przeciążenie informacyjne	x			
	Dystans psychologiczny			x	Opóźnienie działania
Czynniki operacyjne	Brak reakcji na alarm	x			Brak reakcji, brak odczytu lub niewłaściwy odczyt informacji
	Zbyt rzadkie sprawdzanie informacji	x			
	Niezrozumienie informacji	x			
	Niewłaściwa interpretacja informacji	x			
	Błędna strategia podejmowania decyzji		x		Błędne podejmowanie decyzji
	Niewłaściwa ocena czasu na podjęcie decyzji		x		
	Nieprzestrzeganie procedur		x		
	Błędny czas podejmowania decyzji			x	Błędne wykonanie zadania
	Nieznajomość procedur			x	
	Błędne przesłanie informacji do niewłaściwego obiektu			x	
	Błąd informacyjny wynikający z błędów komunikacji		x		
Doświadczenie i wykształcenie	Nieprzestrzeganie przepisów		x		Błąd wynikający z braku wykształcenia lub doświadczenia
	Brak kompetencji		x		
	Nieznajomość przepisów			x	

Tabela 3. Wymagane funkcje systemu wspomagania decyzji w centrum operacyjnym wspierające podejmowanie decyzji i kontrolujące reakcje operatora w zależności od jego świadomości sytuacyjnej

Czynniki wpływające na reakcje operatora	Reakcja operatora	Funkcje systemu wspomagania decyzji
Czynniki poznawcze i psychologiczne	Brak czujności	- Informacja sygnalizowana w określonych odstępach czasu w zależności od parametrów operacyjnych - Zakres informacji dostosowany do percepcji operatora - Zakres informacji dostosowany do percepcji operatora - Podanie możliwych rozwiązań - Zróżnicowanie alarmów w zależności od sytuacji
	Opóźnienie działania	- Zróżnicowanie inteligentnych alarmów w zależności od sytuacji - Dostosowanie formatu informacji do możliwości operatora
Czynniki operacyjne	Brak reakcji na informacje podawane przez system, brak odczytu lub niewłaściwy odczyt informacji	- Zróżnicowanie inteligentnych alarmów w zależności od sytuacji - Dostosowanie formatu informacji do możliwości operatora - Dostosowanie formatu informacji do możliwości operatora - Realizacja procedur awaryjnych przez system, - monitorowanie decyzji operatora przez system i informowanie o możliwych rozwiązaniach i zagrożeniach
		- Dostosowanie formatu informacji do możliwości operatora - Realizacja procedur awaryjnych przez system, - monitorowanie decyzji operatora przez system i informowanie o możliwych rozwiązaniach i zagrożeniach - Błędny czas podejmowania decyzji
	Błędne podejmowanie decyzji	Informacja o przewidywanych skutkach podjętej decyzji w porównaniu do przyjętych procedur awaryjnych
	Błędne wykonanie zadania	Informacja o przepisach i niezgodności podjętej decyzji z przepisami
		- Test poprawności komunikacji, monitorowanie przekazywanej informacji - Potwierdzenie odbioru przesłanej informacji weryfikacja obiektu, do którego została przesłana informacja

Czynniki wpływające na reakcje operatora	Reakcja operatora	Funkcje systemu wspomagania decyzji
		Informacja o obowiązujących procedurach i niezgodności podjętej decyzji z procedurami
Doświadczenie i wyszkolenie	Błędy wynikające z braku wyszkolenia lub doświadczenia	Informacja o przepisach i niezgodności podjętej decyzji z przepisami
		Wprowadzenie do systemu wiedzy i zasad postępowania ekspertów, doświadczonych kapitanów statku
		Alarmy, wymaganie potwierdzenia kontrowersyjnej decyzji przez kierownika zmiany w centrum operacyjnym.

5. Wnioski

Metody oparte na ocenie eksperckiej, proponowane do oceny bezpieczeństwa eksploatacji statków autonomicznych nie różnią się od metod stosowanych w przypadku statków z załogą na pokładzie. Większego znaczenia nabiera jednak zależność pomiędzy systemami nadzorującymi parametry eksploatacyjne statku i czynnikiem ludzkim [13]. Dotyczy to w szczególności przedstawionego w artykule wpływu interakcji operatora i systemu wspomagania decyzji w zdalnym centrum operacyjnym.

Dzięki implementacji kosztów eksploatacyjnych do funkcji opisującej ryzyko awarii MASS [4], operator ROC może podejmować decyzje, podobnie jak kapitan na pokładzie statku załogowego, koncentrując się na najbardziej istotnych informacjach, nie przekraczając ograniczeń eksploatacyjnych ustalonych przez armatora i ograniczeń wynikających z obowiązujących przepisów.

MASS IV, jeśli ryzyko jest zbyt wysokie lub jeśli statek nie jest w stanie realizować zaplanowanej podróży, przechodzi on w stan MASS III lub minimalnego ryzyka, zdefiniowany na przykład jako zatrzymanie statku i automatyczne zaalarmowanie operatora.

System wspomagania i kontroli pracy operatora, i analizy jego zaangażowania przy wykonywaniu obowiązków powinien być oparty na ocenie ryzyka i sztucznej inteligencji. Umożliwi to indywidualne, dynamiczne dostosowanie parametrów systemu do zmieniającej się charakterystyki operatora, w szczególności jego postawy w stosunku do ryzyka i stanu eksploatacyjnego jednostki MASS [1]. Określenie wszystkich funkcji takiego systemu, z uwzględnieniem zakresu jego uczenia się, pozostaje wciąż jako ważny problem do rozwiązania

Bibliografia:

- Burciu, Z., Abramowicz-Gerigk, T. (2023). Autonomous shipping – a stochastic model of the process describing safety of MASS operation. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 76 (148), 57–64.
- Baldauf, M., Rostek, D. (2024). Identify training requirements for remote control operators of maritime autonomous ships. *Proceedings of 18th International Technology, Education and Development Conference 2024*.

3. Chae, Ch.-J., Kim, M., Kim, H.-J. (2020). A study on identification of development status of MASS technologies and directions of improvement. *Applied Sciences*, 10, 4564.
4. Cheng, T., Veitch, E.A., Utne, I.B., Ramos, M.A, Mosleh, A., Alsos, O.A., Wu, B. (2024). Analysis of human errors in human-autonomy collaboration in autonomous ships operations through shore control experimental data, *Reliability Engineering and System Safety*, 246(2024), 110080, 1-19.
5. Dhillon, B. S. (2007). *Human Reliability and Error in Transportation Systems*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer.
6. Johansen, T., Utne, I. B. (2024). Human-autonomy collaboration in supervisory risk control of autonomous ships, *Journal of Marine Engineering Technology*, 23:2, 135-153.
7. Lynch, K. M., Banks, V. A., Roberts, A. P. J., Radcliffe, S., Plant, K. L. (2024). What factors may influence decision-making in the operation of Maritime autonomous surface ships? A systematic review. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 25:1, 98-142.
8. MSC.1/Circ.1638 (2021). Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS). Źródło online: [<https://wwwcdn.imo.org>] [ostatni dostęp: 29.06.2024].
9. MSC.1/Circ.1455 (2013). Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments
10. Porathe, T. (2022). *Autonomous Ships: A Research Strategy for Human Factors Research in Autonomous. Shipping*. Nature Switzerland AG 2021, N. Stanton (Ed.): AHFE 2021, LNNS 270, 479–486.
11. Ramos, M. A., Utne, I. B., Mosleha, A. (2019). Collision avoidance on maritime autonomous surface ships: Operators' tasks and human failure events. *Safety Science*, 116, 33-44.
12. Xue, L., Yuen, K.F. (2024). A human-centred review on maritime autonomous surfaces ships: impacts, responses, and future directions, *Transport Reviews*, 44:4, 791-810.
13. Zhu, T., Haugen, S., Liu, Y. (2018). Human factor challenges and possible solutions for the operation of highly autonomous ships. *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference*. Beer, M. and Zio, E. (Ed.), ESREL2019/2019, 1-8.
14. <https://www.amcsearch.com.au/course/mass-training>.
15. <https://www.novia.fi/en/study/study/technology-and-seafaring/master-of-engineering-autonomous-maritime-operations/>.
16. <https://www.xmarine.gr/training-courses/>.

Human factor in operation of an autonomous ship

Abstract. The operation of autonomous ships MASS (Maritime Autonomous Surface Ship) introduces a new quality in maritime transport. The concept of MASS defines ships with various levels of autonomy, ranging from ships with partially automated systems that support the crew's activities, to ships with autonomous systems that enable the operation of the ship without the need for human intervention. The works at the International Maritime Organization and the European Union to develop and implement the MASS Code are in progress. These works do not keep pace with the development of technology, there are no generally accepted methods for assessing safety, in particular the relationship between direct human responsibility and the reliability of autonomous systems. MASS autonomous units and edge remote operation centers, which are in the testing phase, are currently subject to regulations introduced by classification societies. The article presents an analysis of the impact of the human factor on the operational safety of the MASS unit, without a crew on board, remotely controlled from a remote operations center and the use of the HRA (Human Reliability Analysis) method and Bayesian network to analyze the operator's work. Factors affecting the situational awareness of the autonomous system and the operator's situational awareness were taken into account.

Keywords: autonomous shipping, Maritime Autonomous Surface Ship MASS, operator

Referencyjna baza przystanków autobusowych

**Maciej Bieńczak^{1,*}, Paweł Zmuda-Trzebiatowski¹,
Jacek Wilczkowiak², Wojciech Miechowicz¹**

¹ Politechnika Poznańska

² Wielkopolskie Biuro Planowania Przestrzennego w Poznaniu

Streszczenie. Referat koncentruje się na zagadnieniu cyfryzacji danych o przystankach autobusowych w publicznym transporcie zbiorowym (ptz). Autorzy przedstawili istotę dostarczania informacji w systemach ptz ze wskazaniem podstawowej roli informacji o przystankach. Przeanalizowali polskie i zagraniczne zbiory danych przystankowych. Następnie dokonali przeglądu polskich uregulowań prawnych oraz dostępnych danych o przystankach na terenie Powiatu Poznańskiego i Miasta Poznania, tj. uchwał jednostek samorządów terytorialnych oraz zasobów udostępnianych przez inne podmioty w formie cyfrowej. W dalszej kolejności przeprowadzone zostały wywiady z interesariuszami. Wykonane prace umożliwiły zaproponowanie rozwiązania opartego na spójnej bazie przystanków dla obszaru Powiatu Poznańskiego i Miasta Poznania w formie cyfrowej, zgodnej z przyjętymi standardami, wraz z procedurami jej użytkowania.

Słowa kluczowe: publiczny transport zbiorowy, IT, infrastruktura przystankowa

1. Wprowadzenie

Informacja pełni ważną rolę w systemach publicznego transportu zbiorowego (ptz). Z perspektywy pasażerów dostępność i jakość informacji determinują atrakcyjność systemów ptz, także względem innych gałęzi transportu (np. [5, 14, 25, 26]). Zbyt niska dostępność lub jakość informacji jest wskazywana jako jeden z czynników prowadzących do defaworyzacji transportowej co zwiększa zagrożenie wykluczeniem transportowym [15].

Jednak informacja jest ważna nie tylko z punktu widzenia pasażerów, ale też innych podmiotów uczestniczących w systemie ptz, jak: organizatorzy transportu, operatorzy i przewoźnicy, zarządcy infrastruktury ptz, dostawcy rozwiązań IT (np. planery podróży, planery, systemy MaaS, narzędzia dla organizatorów i operatorów ptz). Ponadto zainteresowanie informacją tego typu mogą przejawiać też inne podmioty, np. do celów strategicznego planowania transportu czy gospodarki przestrzennej (np. [2, 4, 19]).

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Bieńczak M., Zmuda-Trzebiatowski P., Wilczkowiak J., Miechowicz W. (2025). Referencyjna baza przystanków autobusowych, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 21–38, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

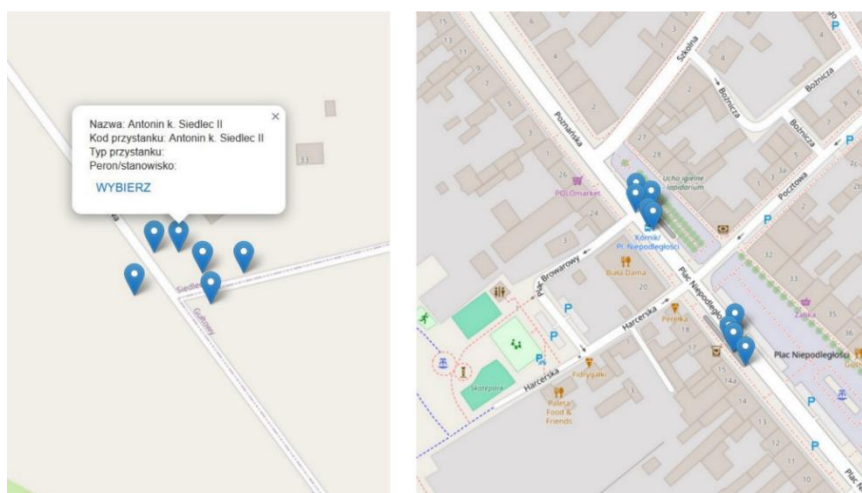
*Autor do korespondencji

E-mail adres: maciej.bieniczak@put.poznan.pl, (M. Bieńczak)

ORCID iD: 0000-0001-8030-946X (M. Bieńczak), 0000-0003-3428-792X (P. Zmuda-Trzebiatowski), 0009-0002-6304-2913 (J. Wilczkowiak), 0000-0002-5243-9643 (W. Miechowicz)



Rys. 2. Przykład nieprawidłowej lokalizacji przystanku Radziszewo dla przebiegu ZKA PolRegio relacji Zielona Góra-Szczecin w dniu 23.12.2024. Źródło danych [10]



Rys. 3. Przykłady rozbieżności lokalizacji przystanków po wczytaniu wielu źródeł danych. Źródło podkładu mapowego [13]

2. Analiza regulacji prawnych dot. przystanków w Polsce

Z prawnego punktu widzenia, przystanek komunikacyjny to miejsce przeznaczone do wsiadania lub wysiadania pasażerów na danej linii komunikacyjnej, w którym umieszcza się informacje dotyczące w szczególności godzin odjazdów środków transportu [23]. Przystanek w transporcie drogowym to miejsce zatrzymywania się pojazdów transportu publicznego, oznaczone odpowiednimi znakami drogowymi [24], jest to również peron w transporcie kolejowym oraz przystań usytuowana na wodach śródlądowych [18]. W transporcie kolejowym pod pojęciem przystanku osobowego funkcjonuje miejsce wskazane w rozkładzie jazdy pociągów, w którym zaplanowane jest zatrzymanie pociągu, na ogół w celu wykonania konkretnych działań, takich jak np. umożliwienie pasażerom wsiadania do pociągu i wysiadania z niego [3].

W wielu aktach prawnych [18, 23] ilekroć jest mowa o przystanku komunikacyjnym należy przez to rozumieć również peron w transporcie kolejowym oraz przystań usytuowaną na wodach śródlądowych. W polskim systemie prawnym przystanki nie są obiektami budowlanymi, a miejscami wyznaczonymi przez organizację ruchu drogowego i oznakowanie [21]:

- pionowe znaki informacyjne D-15, D-16 i D-17 oznaczają miejsce zatrzymywania się wskazanych na znaku pojazdów (odpowiednio: autobusów, trolejbusów i tramwajów) wykonujących odpłatny przewóz osób na regularnych liniach,
- oznakowanie poziome – P-17 „linia przystankowa” wyznacza na jezdni miejsce przystanku pojazdów wykonujących odpłatny przewóz osób na regularnych liniach i oznacza, że zakaz zatrzymywania się innych pojazdów na przystanku obowiązuje na całej długości linii,
- znak P-14 „linia warunkowego zatrzymania złożona z prostokątów” wskazuje miejsce zatrzymania pojazdu i stosowana jest m.in. przed przystankami tramwajowymi bez wysepek.

W transporcie drogowym nazwa przystanku komunikacyjnego, na którym będzie się zatrzymywał środek transportowy na danej linii komunikacyjnej, zawiera [18]:

1. nazwę miejscowości według rejestru terytorialnego,
2. określenie miejsca usytuowania przystanku komunikacyjnego, poprzez wskazanie w szczególności nazwy ulicy albo obiektu użyteczności publicznej – o ile dotyczy,
3. numer przystanku komunikacyjnego (dwucyfrowy, parzysty – dla ciągu dróg publicznych według kilometrażu narastającego lub dwucyfrowy, nieparzysty – dla ciągu dróg publicznych według kilometrażu malejącego; w przypadku braku kilometrażu drogi określany jest stosownie do wzrastającej numeracji porządkowej nieruchomości dla danej miejscowości).

Dworzec to z kolei miejsce przeznaczone do odprawy pasażerów, w którym znajdują się w szczególności: przystanki komunikacyjne, punkt sprzedaży biletów oraz punkt informacji dla podróżnych [17].

Zintegrowany węzeł przesiadkowy to miejsce umożliwiające dogodną zmianę środka transportu wyposażone w niezbędną dla obsługi podróżnych infrastrukturę, w szczególności: miejsca postojowe, przystanki komunikacyjne, punkty sprzedaży biletów, systemy informacyjne umożliwiające zapoznanie się zwłaszcza z rozkładem jazdy, linią komunikacyjną lub siecią komunikacyjną [23].

Do zadań własnych gminy w zakresie publicznego transportu zbiorowego należą budowa, przebudowa i remont:

1. przystanków komunikacyjnych oraz dworców, których właścicielem lub zarządzającym jest gmina,
2. wiat przystankowych lub innych budynków służących pasażerom, posadowionych na miejscu przeznaczonym do wsiadania i wysiadania pasażerów lub przylegających do tego miejsca, usytuowanych w pasie drogowym dróg publicznych bez względu na kategorię tych dróg.

W transporcie drogowym w rozkładzie jazdy mogą być uwzględnione wyłącznie przystanki komunikacyjne i dworce określone przez organizatora. Określenie przystanków komunikacyjnych i dworców oraz warunków i zasad korzystania, następuje w drodze uchwały podjętej przez właściwy organ danej jednostki samorządu terytorialnego.

Wsiadanie i wysiadanie pasażerów odbywają się tylko na przystankach komunikacyjnych lub dworcach określonych w rozkładzie jazdy [22]. Opisana sytuacja sprawia, że niemożliwe jest uznanie za przystanek obiektu bez organizacji ruchu lub obiektu nieoznakowanego prawidłowo (w Polsce występują przystanki jednostronne). Biorąc pod uwagę powyższe należy stwierdzić, że organizator określa przystanki wg swojego własnego pomysłu, niekoniecznie zgodnie z logiką standardów cyfrowych. Ponadto w wielu dokumentach nie są definiowane przystanki, krawędzie peronowe, itp. na dworcach czy też węzłach przesiadkowych.

Biorąc pod uwagę opisane powyżej regulacje prawne można stwierdzić, że nie są one dostosowane do zbierania, przechowywania i wykorzystywania danych o przystankach w formie cyfrowej. Podstawowe powody takiego stanu leżą w braku prawnego wymogu wskazywania współrzędnych geograficznych przystanków w uchwałach, braku zunifikowanego systemu numeracji zapewniającego unikalne numery przystanków na obszarze całego kraju, braku jasnych zasad i koordynacji nadawania nazw przystankom przez różnych zarządców dróg, a także braku wytycznych co do częstotliwości aktualizacji uchwał. Ponadto uregulowania prawne pochodzą z okresu, kiedy sposób wyszukiwania informacji o ptz nie mógł opierać się na takich technologiach jak GPS czy aplikacje mobilne.

3. Bazy danych przystankowych w Polsce i na świecie

3.1. Źródła danych

3.1.1. Ogólnopolskie bazy przystankowe

W ramach analizy ogólnopolskich baz przystankowych, odnaleziono i poddano analizie dwa otwarte zbiory OpenStreetMap (OSM) [13] oraz Bazę Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k) [12]. OSM jest ogólnosiwiatowym projektem typu VGI (Volunteered Geographic Information) zarządzanym przez fundację OpenStreetMap. BDOT10k jest z kolei publiczną bazą, której zakres i sposób udostępniania reguluje rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii [20]. Obie bazy danych są bazami ogólnego przeznaczenia. Zawierają informacje o różnego rodzaju obiektach – nie tylko przystankowych, ale też np. o sieci drogowej, itd.

Analiza przeprowadzona w grudniu 2022 pozwoliła określić, że OSM na obszarze Polski zawierał informacje o ponad 108 tys. obiektach przystankowych, a BDOT10k o ponad 172 tys. Na rys. 4 przedstawiono pokrycie danymi poszczególnych regionów

Polski. Pokrycie danymi BDOT10k jest bardziej równomierne, niż w przypadku OSM. Nierównomierna dostępność informacji w projekcie OSM, w szczególności potencjalnie mniejsza dostępność danych poza największymi aglomeracjami, jest cechą charakterystyczną tego projektu, dostrzeganą także w innych krajach, np. [27].

Z drugiej strony należy zauważyć, że dane w projekcie OSM są aktualizowane w trybie ciągłym w oparciu o różne źródła, także związane z przewoźnikami. W przypadku BDOT10k opóźnienia w aktualizacji mogą być większe. Większy jest też formalizm związany z pozyskiwaniem danych. Stąd, pomimo mniejszej ilości danych, mogą lokalnie występować miejsca, w których informacja o przystankach jest w zbiorze OSM bardziej aktualna oraz szersza.

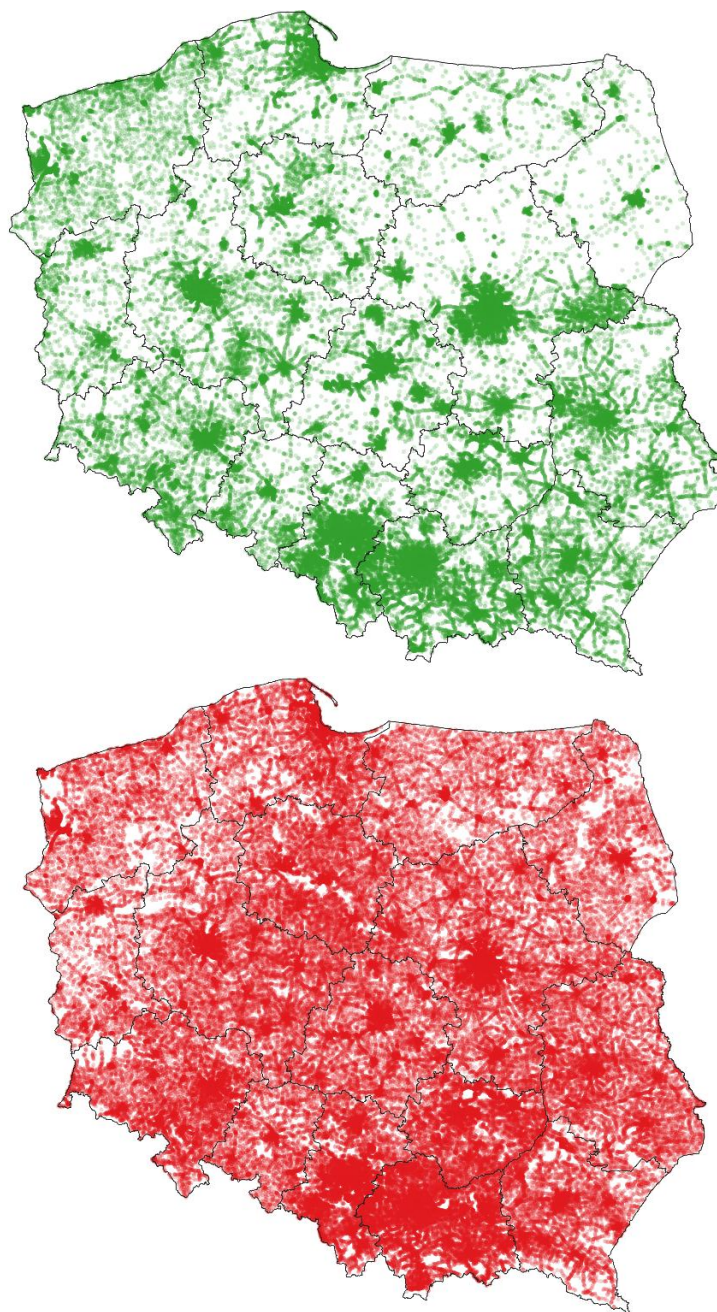
3.1.2. Regionalne bazy przystankowe

Regionalne bazy przystankowe zostały pozyskane do analizy z województw: Wielkopolskiego (wykonywana w ramach wstępnego podejścia do bazy przystankowej, udostępniona na życzenie), Świętokrzyskiego (udostępniona na życzenie), Dolnośląskiego (pobrana z regionalnego geoportalu [8]) oraz Małopolskiego (pobrana z serwisu Mapy Małopolski [9]). Dane pozyskiwano sukcesywnie od maja 2023 roku do maja 2024. Zbiory te są dedykowane informacjom o przystankach, jednak w małopolskim i dolnośląskim geoportalu są też zamieszczone inne zbiory danych o charakterze geograficznym.

W przypadku Województwa Małopolskiego zidentyfikowano jeszcze dwie inne bazy danych: 1) portal Małopolskiej Infrastruktury Informacji Przestrzennej, który stanowił wcześniejszą wersję Map Małopolski, a także 2) portal Otwarte Dane [11], który zawierał m.in. dane rozkładowe części organizatorów ptz w formacie zgodnym ze standardem GTFS. Dokładniejsze porównanie drugiej bazy z Mapami Małopolski wskazało, że:

- portal Mapy Małopolski zawierał szerszą bazę przystanków, tj. Województwo Małopolskie z wyjątkiem miasta Kraków, względem wybranych organizatorów,
- numery ID przystanków były niezgodne,
- zgodność nazw przystanków dla analizowanych poligonów doświadczalnych (Bochnia, Nowy Targ) wahała się między 16 a 60%,
- minimalna odległość między najbliższymi sobie przystankami wynosiła 20 cm, a maksymalna 1,3 km.

Analiza sugeruje, że bazy są różne. Jakkolwiek rozbieżności dla większości przystanków były niewielkie (75–97% przystanków znajdowało się we wzajemnej odległości mniejszej niż 50 metrów), to zdarzały się sytuacje braku przystanków, które oznaczono w drugiej bazie. Dla 2–17% lokalizacji wzajemne odległości były większe niż 100 metrów, co może być już wystarczająco dużą wartością, by zaskoczyć pasażera lokalizującego przystanek z wykorzystaniem takich danych. Przedstawiona sytuacja sugeruje ponadto, że jednym z istotnych elementów budowy referencyjnej bazy przystanków jest zapewnienie, by była ona wspólna dla wszystkich uczestników systemu ptz, co niekoniecznie jest prostym zadaniem – autorzy nie znaleźli w Polsce innych przykładów budowy cyfrowej bazy rozkładów integrującej wielu organizatorów na szczeblu wojewódzkim.



Rys. 4. Lokalizacje przystanków w Polsce w bazach OSM (góra) oraz BDOT10k (dół) - stan na 1 grudnia 2022. Większa intensywność wskazuje na większą liczbę obiektów w danym obszarze.

3.1.3. Bazy przystankowe w innych krajach

W ramach analizy baz przystankowych dostępnych w innych krajach odnaleziono i poddano analizie dwie bazy – brytyjski NaPTan [6] oraz norweski National Stop Register (NSR) [7]. W obydwu przypadkach bazami zarządzają podmioty na poziomie krajowym (ministerialnym), odpowiednio Departament for Transport oraz Entur. Dane są jednak uzupełniane i aktualizowane przez lokalnych zarządców infrastruktury. Obie bazy stanowią źródło dla danych rozkładowych. Stąd np. NSR jest dodatkowo udostępniany w formatach zgodnych z GTFS oraz NeTEx.

3.2. Bazy przystankowe – analiza

Zidentyfikowane bazy przystankowe poddano analizie pod kątem 21 cech (por. tab.1), związanych z takimi aspektami, jak: możliwości w zakresie formułowania nazw przystanków, ich wyposażenia, informacji o podmiotach odpowiedzialnych czy obecności danych pomocniczych, takich jak data ostatniej modyfikacji wpisu.

Wszystkie bazy identyfikowały lokalizację przystanków wg współrzędnych geograficznych, czasem w kilku różnych układach odniesienia i współrzędnych. Spośród analizowanych baz najmniejszy zakres informacji przenosiła BDOT10k, która nie jest dedykowaną bazą przystankową. Baza ta zawiera tylko podstawowe informacje dotyczące przystanków, tj. nazwę i lokalizację, a także kod TERYT powiatu, w którym jest zlokalizowany. Umożliwia też podstawowe odróżnienie przystanków kolejowych od autobusowych lub tramwajowych. Ponadto w polu uwag czasem były wprowadzane alternatywne nazwy lub informacja o tym, że przystanek był w momencie inwentaryzacji nieczynny. Ponadto baza zawiera dużo informacji pomocniczych dotyczących np. daty aktualizacji. Pozostałe analizowane zbiory, w szczególności NSR oraz OSM, przenosiły szerszy zakres informacji. Cechą polskich regionalnych baz przystankowych było wskazywanie informacji o uchwale przystankowej, zarządcy i/lub właścicielu przystanku oraz stawce za dostęp do przystanku. W przypadku OSM występował zbliżony podział na operatora (firmę obsługującą miejsce) oraz sieć, do której należy miejsce.

Bazy OSM i NSR pozwalają na opisywanie struktury przystanków w sposób zaawansowany. W przypadku OSM można oznaczać wiele punktów zatrzymania (informacja punktowa) i peronów (informacja poligonowa) dla danego przystanku. Możliwe jest także łączenie różnych rodzajów transportu zbiorowego przy pomocy relacji stop_area. NSR pozwala strukturyzować przystanki na czterech poziomach: 1) węzła multimodalnego, 2) grupy przystankowej, która zawiera 3) przystanki (słupki), które z kolei mogą być podzielone na 4) sektory.

Możliwość stosowania zaawansowanej struktury przystankowej jest szczególnie istotna z perspektywy przenoszenia informacji o dostępności dla osób ze szczególnymi potrzebami, gdyż pozwala na szczegółowe informowanie o ścieżkach przejścia pomiędzy różnymi miejscami zatrzymań, które również są dokładnie zlokalizowane w przestrzeni [1, 28]. Ponadto analizowane bazy zawierały też inne, dedykowane dostępności pola. W przypadku NSR była to deklaracja dostępności dla osób poruszających się na wózkach, informacja o dostępie bezschodowym, dostępie bez konieczności korzystania z windy i schodów ruchomych czy wyposażenie w system informacji dźwiękowej. Z kolei OSM pozwala m.in. na wskazanie obecności ścieżek dotykowych, a także przy pomocy klucza kerb na zgrubne określanie czy wsiadanie odbywa się z poziomu jezdni czy też peronu.

Warto zauważyć też, że w sierpniu 2024 roku podjęto także projekt udostępnienia informacji o dostępności w bazie NaPTan o nazwie A-NaPTan. W projekcie założono analizę dostępności z perspektywy kilku modeli pasażera ze szczególnymi potrzebami.

Tabela 1. Zawartość analizowanych baz danych przystankowych. Opis oznaczeń:

✓ - występuje, X - nie występuje, ± - występuje w formie zintegrowanej z innymi danymi w jednym polu, ∓ - występuje w polu o szerokim znaczeniu, np. w uwagach, * - występują w formie niezależnych obiektów (z własnymi lokalizacjami), ** - występuje podział na operatora (firmę obsługującą miejsce) oraz sieć, do której należy miejsce.

Cecha	Zaawansowany opis struktury przystanków	Obsługa wielojęzyczności	Dodatkowe nazwy przystanków	Nazwa miejscowości lub jednostki adm.	Nazwa skrócona	Punkt charakterystyczny, np. szkoła	ID (kod) przystanku	Numer uchwały	Właściciel	Zarządzający	Stawka za dostęp	Przynależność do stref biletowych operatorów	Obecność tabliczki przystankowej lub znaku D15	Obecność wiaty	Obecność biletomatów, poczekalni, toalet	Obecność zatoki	Deklaracja dostępności dla osób ze szczególnymi potrzebami	Obsługiwane typy pojazdów, np. mikrobus, autobus	Dopuszczalność przesiadek	Status, np. aktywny, w remoncie	Dane pomocnicze, np. daty modyfikacji danych
																					✓
Cecha	×	×	+	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	+	✓
	×	×	✓	✓	×	×	✓	×	**	×	×	×	✓	✓	*	*	✓	×	×	✓	✓
	×	×	×	✓	×	×	✓	×	✓	×	×	×	+	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	±	±	×	±	×	±	×	×	×
	×	×	✓	✓	×	×	✓	×	±	×	✓	×	✓	✓	×	✓	×	×	×	×	×
	×	×	✓	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	✓	✓	×	✓	×	×	×	×	×
	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Baza	BDOT10k	OSM	DŚL	MŁP	ŚWI	WLP	NaPTan	NSR													

Większość baz danych zawierała informację o wyposażeniu przystanku (tabliczka przystankowa, wiaty) czy obecności zatoki autobusowej. Najbardziej rozwinięte pod tym

względem były NSR i OSM. W przypadku NSR oprócz wiaty przenoszona była informacja o toalecie oraz poczekalni (wraz z informacją czy jest ogrzewana), a także liczbie biletomatów. W OSM można było różnicować poziom ochrony przed warunkami atmosferycznymi. W przypadku peronów w całości osłoniętych fakt ochrony oznacza się przy pomocy dedykowanego pola, przy jednoczesnej możliwości niezależnego oznaczania lokalizacji wiat przystankowych (występują wtedy jako oddzielne obiekty). Analogicznie istnieje możliwość oznaczenia wyposażenia w ławki, kosze na odpady, tabliczki rozkładowe, system dynamicznej informacji pasażerskiej, oświetlenie oraz miejsca reklamowe. Możliwe jest także niezależne określenie czy dany przystanek jest oznaczony tabliczką przystankową, a także tabliczką z nazwą. Niezależnie jako oddzielne obiekty można oznaczyć też lokalizacje ławek, toalet, koszy na śmieci, automatów czy zegarów. Warto zauważyć, że informację o obecności zatoki autobusowej przypisuje się w tej bazie do informacji o drodze, a nie przystanku. Można także oznaczyć czy dany przystanek dla danej linii jest przystankiem tylko dla wsiadających lub wysiadających oraz że jest to przystanek na żądanie.

Analizowane bazy są zróżnicowane pod względem liczby zastosowanych pól określających nazwę przystanku. Oprócz podstawowej wersji nazwy, w bazach znajdowały się pola umożliwiające wprowadzenie tłumaczeń, nazw skróconych czy nazw alternatywnych. Czasami możliwość identyfikacji była rozszerzana o występujące w otoczeniu przystanku charakterystyczne obiekty. Występowały także pola z nazwą miejscowości lub oznaczenia jednostki samorządu terytorialnego. W niektórych bazach istniała też możliwość wprowadzenia kodu przystanku. W przypadku bazy OSM oraz przystanków kolejowych można było wskazać także kod UIC. Warto zauważyć, że w przypadku bazy dolnośląskiej przyjęto założenie, że kody przystanków są kopiowane z uchwał. W efekcie w pozyskanych danych 368 przystanków miało przypisany kod „01”.

Najbardziej występującymi cechami były: wysokość stawki za dostęp, która występowała w bazie Województwa Świętokrzyskiego, a także informacja o możliwościach dokonywania przesiadek czy przynależności do stref taryfowych różnych operatorów w przypadku NSR. Do innych, nie przedstawionych w tab.1, typowych pól można zaliczyć np. uwagi, czy numer, klasę i pikietaż drogi, a także występowanie dokumentacji zdjęciowej.

Należy przy tym zauważyć, że występowanie określonego pola w bazie nie oznacza jeszcze, że było ono wypełnione. Ponadto w przypadku analizowanych baz zdarzają się sytuacje, w których wiele cech jest zapisywanych w jednym polu. Może utrudniać to przetwarzanie danych. Szczególnie widoczne jest to w przypadku baz przystankowych zapisywanych w formacie kml, w przypadku których większość atrybutów jest zapisywanych w nieustandaryzowany sposób w polu description. Format ten jest stosowany w niektórych lokalnych bazach przystankowych, które nie zostały szerzej opisane w niniejszej pracy. Podobnie problematyczne mogą być sytuacje, w których w polach właściciel i zarządca stosowano nazwy lub skróty nazw podmiotów, zamiast ich unikalnych numerów identyfikacyjnych. Utrudnia to jednoznaczną identyfikację. W niektórych przypadkach zauważono także niewłaściwe podejście, w którym w polu nazwy przystanku powtarzano nazwę miejscowości. Lepszą praktyką wydaje się pozostawienie w dyspozycji konsumenta danych możliwości łączenia pól w razie wystąpienia takiej potrzeby. Kwestia ta jest jednak jedynie jednym z wielu problemów

związanych z wypracowaniem dobrych praktyk w zakresie nazewnictwa. Kolejne zostaną przedstawione w dalszych rozdziałach.

Ponadto należy zauważyć, że analizowane bazy różniły się pod względem przyjętych standardów określania lokalizacji przystanków. Mogą być one związane z lokalizacją wiaty, słupka, zatoki lub oznaczeń drogowych. Ciekawe rozwiązanie zostało przyjęte w NSR. Lokalizacje na mapie wskazują krawędź jezdni i peronu na wysokości środka ścieżki dotykowej prowadzącej do drzwi pojazdu lub w miejscu, w którym powinna być ścieżka w przypadku ich braku. Podejście to pozwala zachować zgodność ze standardami, takimi jak GTFS, a jednocześnie umożliwia prowadzenie pasażera wprost do drzwi pojazdu (w granicach dokładności działania systemu nawigacji).

Kolejną kwestią są różnice w zasadach dostępu do zbiorów danych. Bazy ogólnokrajowe i zagraniczne (lub ich eksporty w standardzie GTFS lub NeTEx) były możliwe do pobrania bez konieczności logowania czy pozyskania zgody. Były one też dostępne przez API lub jako usługi OGC. Otwarty dostęp powoduje, że dane mogą być wymieniane pomiędzy projektami, np. do projektu OSM regularnie importowane są dane z NSR. W przypadku baz regionalnych, część była udostępniana na prośbę lub wymagane było założenie konta i uzyskanie potwierdzenia ze strony pracownika dostawcy. Skutkowało to opóźnieniami w dostępie, co utrudniało korzystanie z danych. Pozytywnie na tym tle odróżniała się baza Mapy Małopolski.

4. Analiza uchwał przystankowych

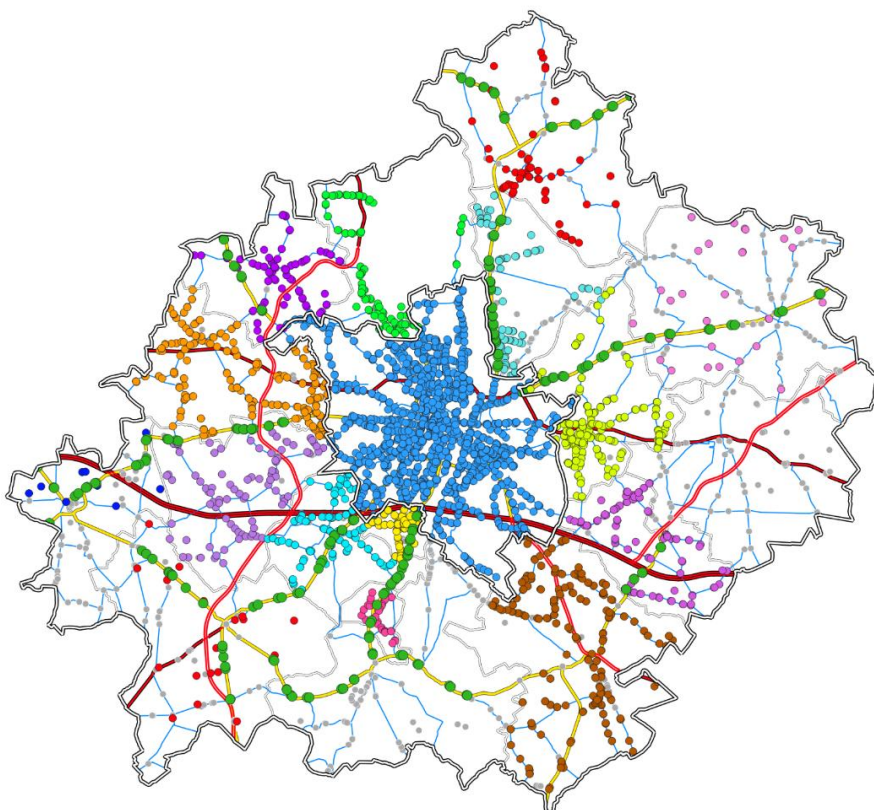
Analiza uchwał przystankowych obejmowała obszar Powiatu Poznańskiego oraz Miasta Poznań. W okresie marzec-lipiec 2024 roku w biuletynach informacji publicznej Miasta Poznania, Województwa Wielkopolskiego, Powiatu Poznańskiego oraz 17 gmin go tworzących wyszukano wszystkie dostępne uchwały przystankowe. Łącznie zidentyfikowano 17 uchwał. Pozyskano także stosowne informacje o przystankach z innych źródeł takich jak: Zarząd Transportu Miejskiego w Poznaniu, Wielkopolski Zarząd Dróg Wojewódzkich w Poznaniu czy przewoźnicy (np. PKS Poznań S.A.), a także z BDOT 10k. W trakcie prac zdiagnozowano szereg problemów różnego rodzaju:

- Niektóre JST nie opublikowały uchwał przystankowych w Biuletynie Informacji Publicznej.
- Listy przystanków w uchwałach przygotowywane są według różnych wzorców/schematów.
- Sposoby postrzegania czym jest przystanek, a także zespół/grupa przystanków są różne.
- Ten sam przystanek występuje w więcej niż jednej uchwale – pojawia się u wielu zarządców.
- Alternatywne źródła informacji (np. rozkłady jazdy) sugerują istnienie przystanków, które nie występują w uchwałach.
- Lokalizacja przystanku jest wskazywana w niejednoznaczny i różny sposób, w niektórych uchwałach nie ma informacji o lokalizacji przystanku.
- Stosowane nazewnictwo jest niekonsekwentne i niespójne.
- Ta sama nazwa przypisywana jest do dwóch różnych przystanków w jednej uchwale.
- Numery nadawane przystankom powielają się w jednej uchwale.

- Nie są publicznie dostępne zbiory danych cyfrowych o przystankach, które odpowiadałyby stanowi prawnemu.
- Sposoby nadawania numeracji przystankom są różne w poszczególnych jednostkach. Ostatecznie zidentyfikowano 2571 przystanków na terenie powiatu poznańskiego i 1455 w mieście Poznań. 855 przystankom nie można było przypisać żadnego zarządcy.

W efekcie przeglądu przygotowano wektorową bazę danych zawierających przystanki oraz przebiegi dróg krajowych, wojewódzkich i powiatowych, przy których się one znajdują (por. rys. 5). Lokalizacje przystanków ustalano porównując informacje z uchwał z pakietami danych z innych wskazanych wcześniej źródeł. Każdemu przystankowi przypisano atrybuty dotyczące m.in.:

- uchwały lub uchwał, w których się znajduje,
- porozumienia o przekazaniu zarządzania przystankiem,
- nazwy lub nazw pochodzących z wszystkich analizowanych źródeł,
- kategorii i numeru drogi przy której znajduje się przystanek,
- podstawowego wyposażenia technicznego (wiata, zatoka, znaki D15 i P17).



Rys. 5. Lokalizacja przystanków w Powiecie Poznańskim na podstawie uchwał i danych pozyskanych z ogólnodostępnych źródeł. Kolorami odróżniono zarządców.

5. Wywiady i konsultacje z interesariuszami

W latach 2023 i 2024 zespół projektowy przeprowadził spotkania konsultacyjne z reprezentantami siedmiu podmiotów zainteresowanych powstaniem referencyjnej bazy przystankowej na obszarze Miasta Poznań oraz Powiatu Poznańskiego. Interesariusze reprezentowali różne grupy podmiotów. Były to np. jednostki samorządu terytorialnego, planiści, osoby modelujące ptz, przewoźnicy czy przedsiębiorcy dostarczający aplikacje dla pasażerów ptz. Ponadto odbyły się spotkania z przedstawicielami samorządu Województwa Małopolskiego oraz dostawcami usług związanych z realizacją regionalnej bazy przystanków, gdyż uznano ją za najbardziej rozwiniętą w skali kraju.

Kluczowe wnioski ze spotkań przedstawiają się następująco:

- Różni interesariusze mają różne potrzeby względem nazewnictwa przystanków – organizator regionalny, oprócz nazwy przystanku może potrzebować nazwy miejscowości (występuje zauważalna powtarzalność nazw przystanków już w obrębie aglomeracji), z kolei na potrzeby biletetek i tablic informacji pasażerskiej wymagane mogą być nazwy skrócone.
- Powyższe wskazuje potrzebę wypracowania procedur zmiany nazwy w przypadku, gdyby zarządca infrastruktury zaproponował nazwę nieadekwatną do potrzeb lub możliwości innych uczestników systemu ptz (ew. wymóg tworzenia dodatkowych nazw skróconych w przypadku propozycji o zbyt długim ciągu znaków). Wymagana może być też koordynacja nazw pomiędzy zarządcami (np. w przypadku skrzyżowania dróg zarządzanych przez różne podmioty) czy procedury konsultacyjne w celu minimalizowania sytuacji, w których w powszechnym obiegu funkcjonują nazwy zwyczajowe, które są niezgodne z nazwami oficjalnymi.
- Systemy informatyczne interesariuszy mogą być niewystarczające do utworzenia referencyjnej bazy przystanków. Część interesariuszy posiada własne systemy oraz własne zbiory danych przystankowych, jednak wymagane jest opracowanie standardów wymiany danych między systemami i ich implementacja w tych systemach.
- W przypadku inwentaryzacji przez podmiot zewnętrzny względem zarządcy przystanku występują opóźnienia. W efekcie zbiorów danych może być nieaktualny w momencie publikacji. Metodą zaradczą jest tu bezpośrednie angażowanie zarządców. Jednak niektórzy, szczególnie mniejsi, mogą mieć niewystarczające zasoby do samodzielnego przygotowania i aktualizacji bazy. Zniechęcający do działań może być też formalny brak wymogu prawnego prowadzenia takiej bazy danych.
- Opóźnienia mogą występować także w zakresie aktualizacji innych danych, np. o przebiegu dróg, w efekcie czego prawidłowe lokalizacje przystanków mogą wydawać się nieprawidłowymi w związku z prezentacją danych z wykorzystaniem zdezaktualizowanych podkładów mapowych.
- Informacja o tym czy przystanek jest aktywny powinna przyjąć formę kalendarza, tak aby można było np. planować wyłączenia z użytkowania i przystanki tymczasowe.
- Występuje obawa o koszty dostępu do bazy z perspektywy wszystkich potencjalnych interesariuszy. Proponuje się, by baza była udostępniana nieodpłatnie i zarządzana przez podmiot publiczny.
- Występuje wątpliwość co do zamieszczania w bazie miejsc zatrzymań, które nie są formalnie przystankami (brak uchwały przystankowej) lub występują inne problemy, jak np. brak wykonanych analiz BRD.

- Dużym problemem są przystanki jednostronne (znak D-15 tylko po jednej stronie drogi), które w rozkładach jazdy występują dla obu kierunków. Z formalnego punktu widzenia autobus nie powinien zatrzymywać się w miejscu, gdzie nie ma znaku D-15, ale usunięcie tych przystanków z rozkładów jazdy spowoduje ograniczenie dostępności transportu publicznego – podróż z danego miejsca możliwa tylko w jedną stronę.

6. Proponowane rozwiązanie

Przeprowadzone prace umożliwiły sformułowanie podstawowych wymagań i zakresów dla działań, które doprowadzą do rozwiązania opisanych problemów. Reasumując należy wskazać, że referencyjna baza przystanków:

- ma być jednym wspólnym źródłem danych dla wszystkich zainteresowanych podmiotów,
- dane w niej zawarte powinny być wiarygodne (zgodne z rzeczywistością, aktualne),
- ma być aktualizowana, zarządzana oraz dostępna w jak najłatwiejszy sposób,
- będzie dostępna publicznie i nieodpłatnie,
- umożliwi wykorzystanie danych w niej zawartych do przygotowania ustandaryzowanych załączników do uchwał z wykazem przystanków jednostek samorządu terytorialnego.

Dla powyżej przedstawionych założeń zaproponowano, że:

- wskazany zostanie jeden koordynator dla całego województwa,
- zarządcy przystanków zobowiążą się do przekazywania aktualnych informacji o nowych przystankach, zmianach lokalizacji istniejących, wyposażeniu przystanków do koordynatora wojewódzkiego – nastąpi określenie procedury przepływu informacji,
- nazwy przystanków będą ustalane przez koordynatora wojewódzkiego, przy czym nazwy dla obszarów funkcjonowania komunikacji miejskiej powinny zostać przejęte od organizatorów,
- koordynator wojewódzki nadaje zespołom przystankowym i przystankom unikalne numery identyfikacyjne (z perspektywy szybkości działania bazy powinny być to raczej wartości liczbowe, a nie tekstowe),
- koordynator wojewódzki publikuje wykaz przystanków wraz z informacjami o nich oraz prezentuje dane na mapie,
- przewoźnicy i operatorzy wykorzystują publikowany wykaz przystanków i ich prezentację na mapie w celu wyboru właściwych przystanków do budowy rozkładów jazdy,
- organy wydające zezwolenia i zaświadczenia zobowiązane są do weryfikacji poprawności numeru i nazwy przystanku we wniosku składanym przez przewoźnika lub operatora,
- zarządcy przystanków i organizatorzy publikują wykaz przystanków, który jest wyciągiem z wykazu publikowanego przez koordynatora wojewódzkiego,
- konieczne jest opracowanie minimalnego zakresu zbierania danych o infrastrukturze przystankowej z założeniem przynajmniej tych potrzebnych do stosowania w standardzie cyfrowym GTFS, aby umożliwić ich wykorzystanie pasażerom, w tym osobom ze szczególnymi potrzebami,

- baza danych może być rozszerzona o dowolne pola, które mogą wykorzystać zarządcy przystanków na swoje potrzeby, aby stworzyć własny system ewidencji przystanków i zdecydować, które z dodatkowych pozycji będą upublicznione.

13 stycznia 2025 podpisano list intencyjny w kwestii kontynuowania prac na regionalną bazą przystankową. Sygnatariuszami byli Politechnika Poznańska, Miasto Poznań, Województwo Wielkopolskie, Powiat Poznański oraz Związek Powiatowo-Gminny „Wielkopolski Transport Regionalny”.

7. Podsumowanie

Jedną z największych wątpliwości, które mogą pojawić się względem baz przystankowych, jest ta dotycząca szczelności, na którym bazy te powinny być zarządzane. Z perspektywy konsumentów baz danych najlepszym rozwiązaniem są bazy scentralizowane, obejmujące swoim zasięgiem cały świat. Z drugiej strony pojawia się problem ich aktualizacji. W tym przypadku powinna działać zasada, że zbiory danych powinny być kontrolowane przez podmioty, które te dane wytwarzają (por. [16]). W polskich warunkach podmiotów, które wytwarzają dane, jest kilka tysięcy. W istotny sposób utrudnia to standaryzację i przepływ informacji. Dodatkowo znaczenie mają tu też zagadnienia operacyjne związane z zasobami (ludzkimi i IT) niezbędnymi do utrzymania bazy czy chociażby możliwościami spotkań interesariuszy twarzą w twarz w celu rozwiązywania problemów i wyjaśniania niejasności. Autorzy niniejszego referatu stoją na stanowisku, że w celu osiągnięcia sukcesu we wdrażaniu baz przystankowych niezbędna jest współpraca wielu podmiotów, z których każdy może mieć różny zakres odpowiedzialności, a także stworzenie i udostępnienie wspólnego narzędzia do wprowadzania i aktualizowania bazy danych. Przykładowo podmioty na szczelności krajowym powinny być odpowiedzialne za standaryzację, aby konsumenci w prosty sposób mogli łączyć dane z różnych obszarów. Standardy te powinny też zapewniać zgodność bazy z międzynarodowymi standardami wymiany informacji pasażerskiej (np. GTFS, NeTEx) w celu umożliwienia bezproblemowego wykorzystania danych przez wszystkie podmioty mające styczność z systemem ptz, także te zagraniczne, w tym w projektach typu open-source, co zmniejsza wymagane budżety na budowę rozwiązań IT. W tym sensie ważne jest też zapewnienie otwartości danych w przynajmniej podstawowym zakresie. Dostęp powinien być możliwy najlepiej bez wymogu rejestracji oraz jej akceptacji. Podejście to zwiększy dostępność danych (a w efekcie atrakcyjność ptz) oraz zapewni zgodność z unijnymi politykami w zakresie otwartości danych. W oczywisty sposób do poziomu centralnego przypisane jest też kształtowanie regulacji prawnych. W obecnym stanie prawnym regionalna baza przystanków może służyć zarządom infrastruktury przystankowej jako źródło danych do uchwał przystankowych oraz wzór tabeli z wykazem przystanków do uchwały. Mogą być one wykorzystywane także przez organizatorów i przewoźników, jako referencyjne dane o lokalizacji i nazewnictwie. Jednak efekty te można wzmocnić z ostateczną korzyścią dla pasażerów i innych konsumentów danych przez wprowadzenie zmian tych uregulowań. Przykładowo można rozważyć sytuację, w której dane zamieszczone w bazie będą de facto stanowić załącznik do uchwały, tj. nie będzie potrzeby każdorazowej zmiany uchwały w przypadku jakiegokolwiek zmiany wprowadzonej w bazie. Na szczelności centralnym lub regionalnym można umieścić też częściowo odpowiedzialność za zapewnianie zgodności nazw przystanków z urządzeniami stosowanymi przez osoby z niepełnosprawnością wzroku (co

może odbywać się np. w formie zleceń przeglądu i aktualizacji danych dla stowarzyszeń osób z tym rodzajem niepełnosprawności lub w formule zaangażowania wewnętrznych działów równości samorządów województw). Na szczeblu regionalnym w odczuciu autorów powinna z kolei mieścić się odpowiedzialność koordynacyjna dla podmiotów lokalnych. Należy zauważyć, że zaproponowana przez autorów koncepcja bazy jest zgodna z takim podejściem. Przykładowo w przypadku nadawania numerów identyfikacyjnych wystarczy przyjąć prefiks będący kodem TERYT i/lub numerem sieci, by zapewnić ich unikalność w skali kraju. W przypadku standaryzacji także pozostałych pól oraz agregacji danych w geoportalu, bazy te z perspektywy użytkownika mogą wyglądać jak jedna baza centralna.

Doprecyzowania wymaga też ustalenie szczegółowego zakresu przedmiotowego bazy danych przystankowych względem innych baz. Przykładowo rozważenia wymaga czy informacje o obecności zatoki autobusowej powinny być przypisane do przystanku, czy też do drogi. Wyniki prowadzonych prac sugerują, że ważnym jest zachowanie wzajemnej spójności tych zbiorów danych, co jest łatwiejsze w przypadku, gdy ich zawartość jest nieredundantna. Ustaleń wymaga też jaki zakres danych pomocniczych powinien być utrzymywany w samej bazie i jej eksportach, a jaki może być utrzymywany w wewnętrznych logach.

Ostatecznie należy zauważyć, że wprowadzenie obowiązku zamieszczania danych w referencyjnej bazie przystankowej uwiódni różne problemy, wynikające np. z braków wymaganej dokumentacji związanej z organizacją ruchu lub z występowaniem przystanków jednostronnych. Należy rozważyć wprowadzenie niezbędnego okresu przejściowego, być może popartego dotacjami oraz przepisami umożliwiającymi uproszczone procedury uzupełniania przystanków jednostronnych, tak aby nie wyłączać z użytkowania przystanków wykorzystywanych przez przewoźników, a w efekcie zapewniających dostępność pasażerom.

Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują reprezentantom wszystkich podmiotów, które wzięły udział w procesie konsultacyjnym. Praca została sfinansowana z projektów: 1) 0416/SBAD/0006 "Wybrane zagadnienia projektowania i utrzymania środków transportu, innych środków mobilności i systemów transportowych w zakresie realizacji zadań przewozowych" oraz 2) GOSPOSTRATEG-V/0005/2021 „Analiza skali wykluczenia komunikacyjnego na obszarze Polski wraz z rekomendacjami zmian legislacyjnych w kontekście publicznego transportu zbiorowego”.

Bibliografia:

1. Bar, K., Bieńczak, M., Kiciński, M., Rychlewski, J., Walerjańczyk, W., Zmuda-Trzebiatowski, P. (2023). Analiza standardów informacji pasażerskiej w zakresie dostępności dla osób ze szczególnymi potrzebami. [w:] Rychlewski, J. *Annały inżynierii ruchu i planowania transportu*. SITKRP, Poznań, 99–112.
2. Batorski, M. (2021). Aplikacja wspomagające zarządzanie systemem transportowych. *Transport miejski i regionalny*, 2, 21–26
3. Decyzja Komisji z dnia 1 lutego 2008 r. dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu „Ruch kolejowy” transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości, o której mowa w art. 6 ust. 1 dyrektywy Rady 96/48/WE,

- i uchylająca decyzję Komisji 2002/734/WE z dnia 30 maja 2002 r. (2008/231/WE). Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, s. 129
4. Deloitte. (2017). Assessing the value of TfL's open data and digital partnerships, 28s
 5. Hansson, J., Pettersson, F., Svensson, H., & Wretstrand, A. (2019). Preferences in regional public transport: A literature review. *European Transport Research Review*, 11(1), 38
 6. <https://beta-naptan.dft.gov.uk/> (dostęp: 2025.1.26)
 7. <https://developer.entur.org/pages-nsr-nsr> (dostęp: 2025.1.26)
 8. <https://geoportal.dolnyslask.pl/> (dostęp: 2025.1.28)
 9. <https://mapymalopolski.pl/> (dostęp: 2025.1.28)
 10. <https://mkuran.pl/> (dostęp: 2025.1.28)
 11. <https://otwarte.dane.malopolska.pl/> (dostęp: 2025.1.28)
 12. <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/baza-danych-obiektow-topograficznych-bdot10k/> (dostęp: 2025.1.9)
 13. <https://www.openstreetmap.org/> (dostęp: 2025.1.28)
 14. Ibraeva, A., Sousa, J. F. D. (2014). Marketing of Public Transport and Public Transport Information Provision. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 162, 121–128
 15. Lucas, K. (2012). Transport and social exclusion: Where are we now?, *Transport Policy*, 20, 105–113
 16. Lyons, G., Harman, R., (2002). The UK public transport industry and provision of multi-modal traveller information. *International Journal of Transport Management* 1, 1–13
 17. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 23 grudnia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z 2016 r. poz. 124)
 18. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 29 grudnia 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie rozkładów jazdy (Dz.U. z 2018 r. poz. 202)
 19. PKN-CEN/TS 16614-1. (2020). Transport publiczny. Wymiana informacji dotyczących sieci i rozkładów jazdy (NeTEx). Część 1: Format wymiany topologii sieci transportu publicznego
 20. Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 27 lipca 2021 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych (Dz.U. 2021 poz. 1412)
 21. Rozporządzenie Ministrów Infrastruktury oraz Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 31 lipca 2002 r. w sprawie znaków i sygnałów drogowych (Dz.U. z 2019 r. poz. 2310)
 22. Szmít J.: Odpowiedź na interpelację nr 4494 posła Wojciecha Zubowskiego w sprawie umiejscawiania przystanków komunikacji zbiorowej przy drogach niepublicznych, 2016.08.04
 23. Ustawa z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym (Dz.U. z 2023 r. poz. 2778)

24. Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. – Prawo o ruchu drogowym (Dz.U. z 2022 r. poz. 988), art. 2 pkt 13
25. Van Lierop, D., Badami, M. G., & El-Geneidy, A. M. (2018). What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *Transport Reviews*, 38(1), 52–72
26. Yeboah, G., Cottrill, C. D., Nelson, J. D., Corsar, D., Markovic, M., & Edwards, P. (2019). Understanding factors influencing public transport passengers' pre-travel information-seeking behaviour. *Public Transport*, 11(1), 135–158
27. Zia A., Cakir Z., Seker D. (2019). Turkey OpenStreetMap Dataset - Spatial Analysis of Development and Growth Proxies. *Open Geosciences*, 11, 140-151
28. Zmuda-Trzebiatowski P, Bar K, Bieńczak M, Walerjańczyk W. (2023). Modeling the accessibility of public transport to people with disabilities in the GTFS standard. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 3-4, 47-53

Reference database of bus stops

Abstract. The paper focuses on the digitisation of bus stop data in public transport. The authors presented the nature of information provision in public transport systems, indicating the key role of bus stop information. They analysed Polish and foreign bus stop data sets. Then they reviewed Polish legal regulations and the available data on bus stops in the Powiat Poznański and the City of Poznań, in particular local government resolutions as well as resources made available by other entities in digital form. This was followed by interviews with stakeholders. The work enabled a solution to be proposed on a coherent database of bus stops in digital form (compliant with accepted standards) for the area of Powiat Poznański and the City of Poznań, together with procedures for its use.

Keywords: public transport, IT, stops infrastructure

Zastosowanie protokołu SNMP dla zdalnego audytu komputerów wykorzystywanych w zadaniach transportowych

Marcin Chrzan^{1,*}, Tomasz Ciszewski¹, Waldemar Nowakowski¹, Mieczysław Kornaszewski¹

¹ Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, Uniwersytet Radomski w Radomiu

Streszczenie. Rozwój technologii sieciowych i ich rosnące znaczenie w strukturach organizacyjnych współczesnego transportu wymaga zaawansowanych metod zarządzania i monitorowania, zapewniających niezawodność, bezpieczeństwo oraz efektywność operacyjną. W tym kontekście, Simple Network Management Protocol (SNMP) wyłania się jako kluczowy standard, który umożliwia administratorom sieci transportowych przeprowadzanie kompleksowej kontroli nad różnorodnymi urządzeniami komputerowymi. Niniejszy artykuł ma na celu zbadanie roli, jaką SNMP odgrywa w zarządzaniu sieciowymi systemami w transporcie kolejowym, skupiając się na jego ewolucji, funkcjonalnościach oraz praktycznym zastosowaniu do nadzoru urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Zwrócić należy również uwagę na wyzwania i ograniczenia związane z jego stosowaniem, podkreślając znaczenie odpowiedniego podejścia do bezpieczeństwa i konfiguracji. Zaproponowana w artykule metoda diagnozowania systemów automatyki kolejowej pozwala na formułowanie hipotezy dotyczącej uszkodzenia w wyniku analizy stanów przeszłych, czyli wcześniejszych uszkodzeń i związanych z nimi symptomów. W artykule zaproponowano wykorzystanie w tym celu technologii SNMP, która jest powszechnie wykorzystywana do zarządzania systemami sieciowymi. Wynika to z faktu, że systemy diagnostyczne, w które wyposażane są CUiD (Centra Utrzymania i Diagnostyki), pobierają dane z różnych systemów automatyki kolejowej, przy wykorzystaniu technologii teleinformatycznych, a tym samym tworzą rozległą sieć komputerową.

Słowa kluczowe: Simple Network Management Protocol, zarządzanie, bezpieczeństwo

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Chrzan, M., Ciszewski, T., Nowakowski, W., Kornaszewski, M. (2025). Zastosowanie protokołu SNMP dla zdalnego audytu komputerów wykorzystywanych w zadaniach transportowych, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 39–61, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

*Autor do korespondencji

E-mail adres: m.chrzan@urad.edu.pl, (M.Chrzan)

ORCID iD: 0000-0003-4181-4847 (M.Chrzan), 0000-0002-5493-2116 (T.Ciszewski), 0000-0003-0592-9065 (W.Nowakowski), 0000-0002-0548-8688 (M.Kornaszewski)

1. Aktualny stan badań

Podstawową funkcjonalnością systemów automatyki kolejowej jest zapewnienie sprawnego i bezpiecznego ruchu kolejowego. Wraz z postępem technicznym systemy przechodziły stopniową ewolucję, od rozwiązań mechanicznych i elektromechanicznych poprzez przekątnikowe, aż do komputerowych [1, 3, 9, 10, 14, 23]. Niezależnie jednak od technologii w jakiej są wykonane, systemy te muszą spełniać określone wymagania dotyczące niezawodności i bezpieczeństwa, co powoduje zaliczanie ich do grupy systemów krytycznych (safety-critical systems). Przekłada się to na konieczność odpowiedniej certyfikacji i przeprowadzania procesu dopuszczania ich do eksploatacji [1, 13, 21].

Troska o bezpieczeństwo staje się coraz ważniejszym aspektem działania człowieka. W miarę wzrostu świadomości i stawiania wysokich wymagań w odniesieniu do bezpieczeństwa rozwijana jest także wiedza w tym zakresie. Rozważania dotyczące bezpieczeństwa systemów stały się początkiem nauki o bezpieczeństwie (Safety Science), którego działem jest inżynieria bezpieczeństwa (Safety Engineering) [12, 15, 18, 22, 26, 29]. Pod tym pojęciem rozumiemy działania polegające na projektowaniu, konstruowaniu, modyfikacji i utrzymaniu rozwiązań technicznych z uwzględnieniem analizy bezpieczeństwa, czyli procesu mającego na celu między innymi określenie poziomu ich bezpieczeństwa. W skład analizy bezpieczeństwa wchodzi:

- analiza zagrożeń (hazard analysis) - obejmująca identyfikację sytuacji niebezpiecznych i ich przyczyn,
- analiza ryzyka (risk analysis) - obejmująca identyfikację częstości i skutków zdarzeń niebezpiecznych.

Metody analizy bezpieczeństwa można podzielić na deterministyczne i probabilistyczne [29]. Analizę deterministyczną wykorzystuje się do identyfikacji przyczyn zagrożenia przez poszukiwanie związków przyczynowo-skutkowych mających wpływ na występowanie zagrożenia. Natomiast celem analizy probabilistycznej jest określenie szansy wystąpienia zagrożenia na podstawie danych określających częstości wystąpienia awarii poszczególnych elementów systemu. Techniki analizy bezpieczeństwa można sklasyfikować jako indukcyjne oraz dedukcyjne [19, 22]. Metody indukcyjne polegają na określeniu zagrożenia w kontekście całego systemu, a następnie analizie przyczyn zagrożeń na poziomie poszczególnych elementów systemu. Metody dedukcyjne najpierw identyfikują cechy elementów systemu i wynikające stąd zagrożenia, aby na tej podstawie określić cechy systemu jako całości.

Kolejnym istotnym aspektem wiarygodności systemów, czyli pewności ich działania jest niezawodność. Dotyczy to również zagadnień niezawodności systemów automatyki kolejowej [7, 16, 17, 24, 25]. Przedstawiono w nich problematykę wymagań w zakresie niezawodności dla poszczególnych etapów istnienia systemów, badania niezawodności, praktyczne metody prognozowania niezawodności oraz wpływu czynnika ludzkiego.

Bezpieczeństwo i niezawodność systemów automatyki kolejowej wiąże się z szeroko rozumianą problematyką eksploatacji, dla której można wskazać następujące pozycje literaturowe [22, 34]. Charakterystyczną cechą systemów jest możliwość przebywania w różnych stanach eksploatacyjnych. Po zakończeniu wytwarzania obiekt techniczny znajduje się w stanie pełnej gotowości eksploatacyjnej, gdzie wartości parametrów (cech stanu) mieszczą się w dopuszczalnych (wymaganych) przedziałach zmienności. Procesy zachodzące w czasie użytkowania powodują zmiany stanu

technicznego obiektu. Oddziaływania zewnętrzne i wewnętrzne uruchamiają procesy starzenia i zużywania się elementów składowych, co ostatecznie prowadzi do przejścia obiektu technicznego w stan niezdatności. Występowanie uszkodzeń wymaga przeprowadzania odnowy obiektu technicznego, czyli przywrócenia go do stanu zdatności (stanu użytkowania). Proces ten związany jest z badaniem stanu systemu, który należy do zadań diagnostyki technicznej będącej nieodzownym elementem procesu eksploatacji. Identyfikacja stanu obiektów technicznych jest realizowana między innymi przy wykorzystaniu metod bayesowskich, które należą do grupy metod statystycznych i pełnią istotną rolę we wnioskowaniu statystycznym [19].

Oddzielnego omówienia wymaga problematyka diagnostyki urządzeń i systemów automatyki kolejowej, która stanowi główny wątek artykułu. Aktualnie największą uwagę, ze względu na istotny wpływ na bezpieczeństwo kolei dużych prędkości, poświęca się diagnostyce napędów zwrotnicowych. Zwraca się w publikacjach także uwagę na potrzebę standaryzacji interfejsów umożliwiającą współpracę systemów oraz pozyskiwanie danych diagnostycznych [6, 8, 29, 32, 33, 35].

W celu poprawy bezpieczeństwa systemów automatyki kolejowej autorzy zaproponowali metodę, którą można zaliczyć do diagnostyki logicznej i metod bayesowskich [19]. Metody te nie były dotychczas uwzględniane w diagnostyce systemów automatyki kolejowej. Dodatkowo autorzy przedstawili propozycję unifikacji sposobu gromadzenia danych diagnostycznych przy wykorzystaniu technologii SNMP (ang.: Simple Network Management Protocol) [5, 30]. Zaproponowana w artykule metoda umożliwia ciągłą obserwację stanu systemu automatyki kolejowej, a także szybkie i trafne stawianie diagnozy w przypadku wystąpienia uszkodzenia, co może skrócić czas odnowy, a tym samym przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa systemu.

1.1. Bezpieczeństwo i niezawodność systemów automatyki kolejowej

Współczesne systemy sterowania budowane są jako systemy elektroniczne. W celu zapewnienia przez te systemy niezbędnego poziomu bezpieczeństwa w 1998 roku Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna IEC (International Electrotechnical Commission) opublikowała dokument IEC 61508, pt.: "Bezpieczeństwo funkcjonalne elektrycznych/elektronicznych/programowalnych systemów elektronicznych związanych z bezpieczeństwem". Normy te określają standardy w zakresie bezpieczeństwa funkcjonalnego dla sprzętu i oprogramowania, stanowiąc warunki ramowe dla różnych sektorów gospodarki.

Systemy automatyki kolejowej są systemami związanymi z bezpieczeństwem. Dlatego też, na bazie norm IEC 61508, Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki CENELEC (fr. Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) opracował normy dla branży kolejowej. W ich skład wchodzi następujące dokumenty, które zostały zatwierdzone przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) [4, 15, 16, 17]:

- PN-EN 50126. Zastosowania kolejowe - Specyfikacja niezawodności, dostępności, podatności utrzymaniowej i bezpieczeństwa.
- PN-EN 50128. Zastosowania kolejowe - Systemy łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem - Oprogramowanie kolejowych systemów sterowania i zabezpieczenia.

- EN 50129. Zastosowania kolejowe - Systemy łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem - Elektroniczne systemy sterowania ruchem związane z bezpieczeństwem.
- EN 50159. Zastosowania kolejowe - Systemy łączności, sterowania ruchem i przetwarzania danych - Łączność bezpieczna w systemach transmisyjnych.

Zalecenia zawarte w normach CENELEC posłużyły do opracowania przez Europejską Agencję Kolejową wspólnych wymagań bezpieczeństwa dla branży kolejowej CST (Common Safety Targets) oraz wspólnej metody oceny bezpieczeństwa CSM (Common Safety Method). Metody i techniki zawarte w normach CENELEC są również przywołane w standardzie IRIS (International Railway Industry Standard), który został opracowany pod patronatem UNIFE (Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Zaopatrzenia Kolejowego) i przy współudziale największych producentów przemysłu kolejowego (m.in. Bombardier Transportation, Alstom Transport, Siemens Transportation). IRIS upraszcza proces weryfikacji poziomu jakości świadczonych usług oraz standaryzuje wymagania jakościowe stawiane firmom związanym z rynkiem kolejowym. Oprócz wymagań wynikających

z normy ISO 9001:2015 dotyczących systemu zarządzania jakością w organizacji, które w pełni obowiązują w standardzie IRIS, zawiera on również wytyczne wynikające z norm CENELEC [4].

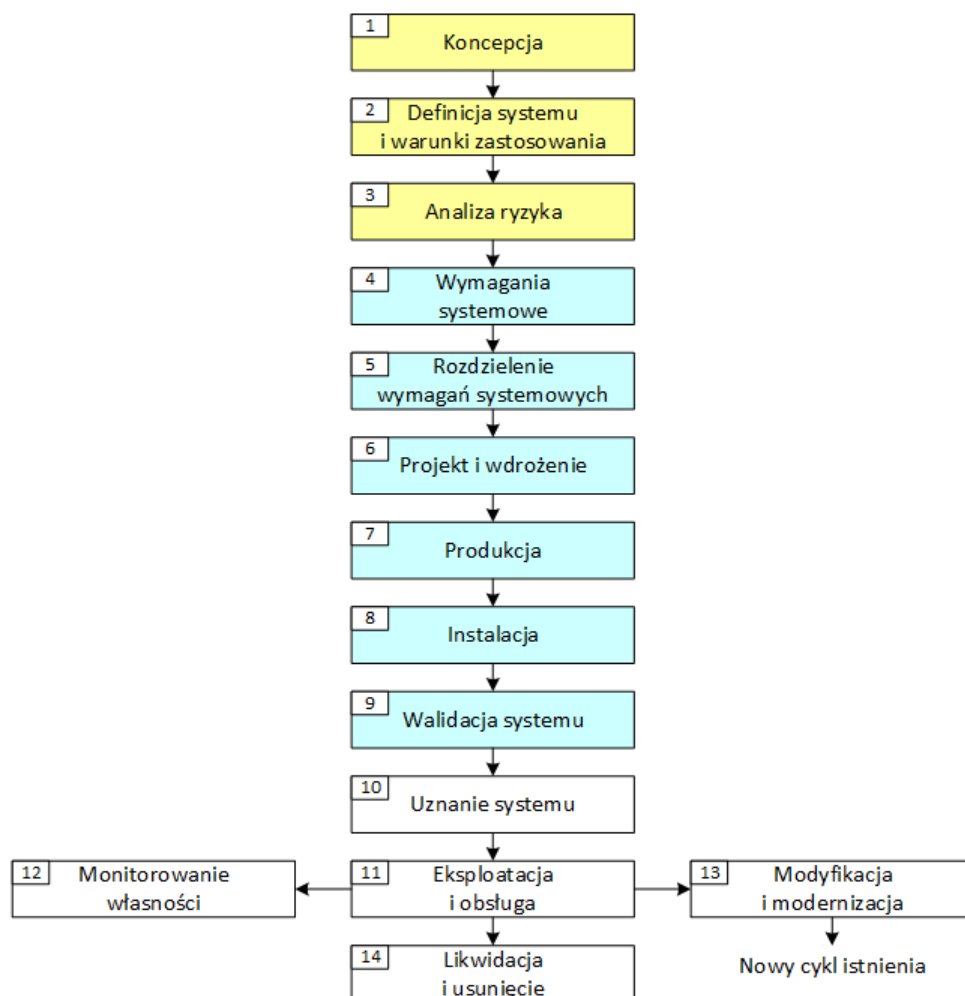
PN-EN 50126 jest ogólną normą dotyczącą wszystkich zastosowań kolejowych, podczas gdy pozostałe normy CENELEC dotyczą głównie systemów automatyki kolejowej. Zawarto w niej opis analizy RAMS (akronim od słów: Reliability, Availability, Maintainability, Safety). Dotyczy ona również aspektów ogólnych cyklu istnienia systemu (system life cycle) i związanych z nim zadań (rys. 1).

Z cyklu istnienia systemu automatyki kolejowej wynikają następujące działania, mające na celu uzyskanie przez ten system wymaganego poziomu bezpieczeństwa [22]:

- zdefiniowanie systemu i jego funkcjonalności (przyjęcie celów dotyczących budowy systemu, opracowanie specyfikacji systemu, stworzenie strategii obsługi, zidentyfikowanie wszelkich ograniczeń spowodowanych otoczeniem, w którym system ma funkcjonować),
- przeprowadzenie analizy ryzyka,
- określenie wymagań systemowych (przeanalizowanie wymagań wynikających z dokumentów normatywnych, określenie kryteriów akceptacji systemu),
- zdefiniowanie wymagań dla elementów systemu (określenie wymagań dla podsystemów i elementów systemu, zdefiniowanie kryteriów ich oceny i akceptacji),
- przeprowadzenie procesu projektowania i wdrażania (wykonanie projektu, zbudowanie prototypu systemu oraz wykonanie niezbędnych kontroli i walidacji).

Norma PN-EN 50126 przedstawia zarządzanie RAMS jako proces systematyczny, dostosowany do typu systemu, przeprowadzany w celu określenia wymagań dla RAMS i wykazania, że wymagania te zostały spełnione. Nie określa jednak: celów szczegółowych, kryteriów ilościowych, wymagań lub rozwiązań dla specyficznych zastosowań kolejowych. Nie definiuje również zasad dotyczących certyfikacji wyrobów kolejowych na zgodność z wymaganiami niniejszej normy oraz nie określa procesu

zatwierdzenia i dopuszczania do eksploatacji systemów przez właściwy organ ds. bezpieczeństwa [16, 17].



Rys.1. Przykładowy cykl istnienia systemu (opracowanie własne na podstawie [16])

2. Zastosowanie standardu SNMP w diagnostyce systemów automatyki kolejowej

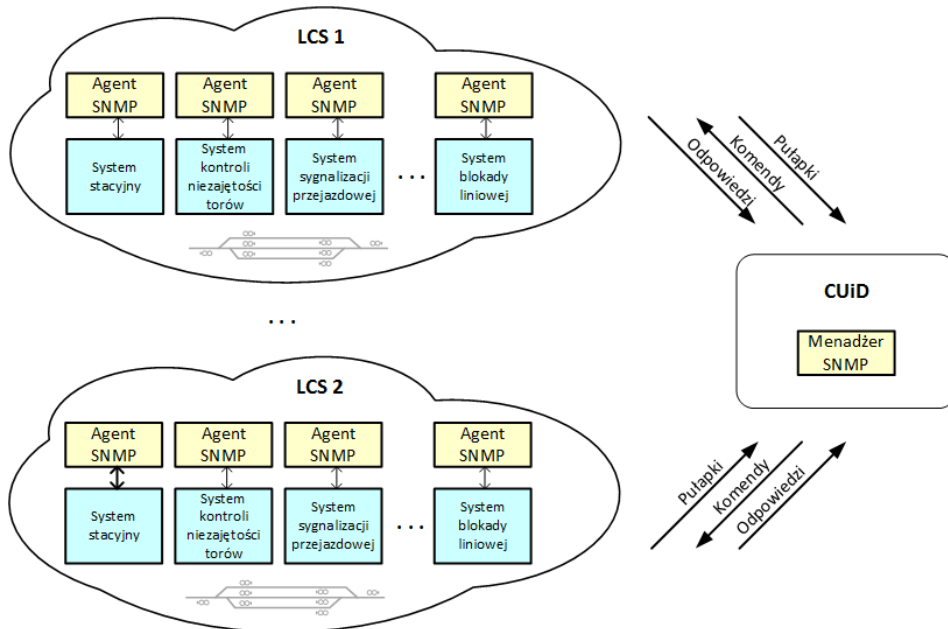
Zaproponowana w artykule metoda diagnozowania systemów automatyki kolejowej pozwala na formułowanie hipotezy dotyczącej uszkodzenia w wyniku analizy stanów przeszłych, czyli wcześniejszych uszkodzeń i związanych z nimi symptomów. Decyzje dotyczące zakresu naprawy mogą być podejmowane w CUiD pod warunkiem wyposażenia

ich w systemy informatyczne realizujące taką funkcjonalność. Tak więc budowanie nowoczesnych CUiD w oparciu o zaproponowaną metodę diagnostyczną będzie możliwe pod warunkiem opracowania odpowiednich narzędzi software'owych. Mimo ciągłego postępu technicznego aktualnie brak jest standardu dotyczącego metod pozyskiwania i gromadzenia danych diagnostycznych. Powoduje to stosowanie przez poszczególnych producentów systemów automatyki kolejowej różnorodnych rozwiązań. W artykule zaproponowano wykorzystanie w tym celu technologii SNMP, która jest powszechnie wykorzystywana do zarządzania systemami sieciowymi. Wynika to z faktu, że systemy diagnostyczne, w które wyposażane są CUiD, pobierają dane z różnych systemów automatyki kolejowej, przy wykorzystaniu technologii teleinformatycznych, a tym samym tworzą rozległą sieć komputerową.

SNMP jest standardem służącym do zdalnego monitorowania i zarządzania sieciami TCP/IP [27, 28]. W protokole tym wyróżnia się dwie kategorie urządzeń: zarządzane, na których uruchomiony jest agent SNMP i zarządzające, tak zwane NMS (ang. Network Management System), na których działa menedżer SNMP. Agent zbiera i udostępnia informacje o bieżącym stanie urządzenia, które mogą być odczytywane lub modyfikowane przez menedżera. Komunikacja odbywa się na zasadzie żądanie-odpowiedź i jest inicjowana przez menedżera. Dodatkowo istnieje możliwość przekazania informacji do systemu zarządzającego bez uprzedniego żądania. Tego typu komunikaty nazywane pułapkami (traps) wysyłane są przez agenta po wystąpieniu określonych sytuacji wyjątkowych, na przykład awarii. Do transmisji wiadomości SNMP wykorzystywany jest protokół UDP (User Datagram Protocol). Aktualnie protokół SNMP występuje w trzech wersjach, przy czym w wersji 1 i 2c bezpieczeństwo oparte jest na tak zwanych „communities”, czyli nieszyfrowanych hasłach, natomiast w wersji 3 wspiera uwierzytelnianie oraz szyfrowaną komunikację [29, 30].

Na potrzeby artykułu założono, że z każdym diagnozowanym systemem automatyki kolejowej współpracuje oddzielny agent SNMP. Przyjęto również, że agent pobiera dane diagnostyczne z systemu przy uwzględnieniu zdefiniowanego w tym celu protokołu komunikacyjnego lub analizy logów systemu. Na tej podstawie, zgodnie z zaproponowaną w artykule metodą, na bieżąco oblicza on wartość prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia pod warunkiem zaobserwowania danej kombinacji symptomów, dla każdego z uszkodzeń wchodzących w skład funkcji niesprawności. Dane te są przez agenta SNMP przechowywane i udostępniane w na żądanie skierowane przez menadżera SNMP. Dodatkowo wystąpienie kombinacji symptomów zgodnych z sygnaturą uszkodzenia powoduje wysłanie pułapki do stacji zarządzającej NMS, co pozwala na poinformowanie personelu obsługi o wystąpieniu uszkodzenia. Przed podjęciem czynności serwisowych należy wysłać do agenta SNMP zapytanie i odczytać aktualne wartości prawdopodobieństw wystąpienia uszkodzeń opisanych funkcją niesprawności. Umożliwi to skrócenie czasu postawienia właściwej diagnozy przez wskazanie uszkodzenia o największym prawdopodobieństwie wystąpienia. Dodatkowo personel obsługujący system diagnostyczny otrzyma pełną informację o symptomach (sygnaturze uszkodzenia) oraz wszystkich możliwych uszkodzeniach.

Przykładowa architektura systemu diagnostycznego, wykorzystująca do diagnozowania systemów automatyki kolejowej technologię SNMP oraz zaprezentowaną w artykule metodę, została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Architektura systemu diagnostycznego dedykowanego dla systemów automatyki kolejowej (opracowanie własne)

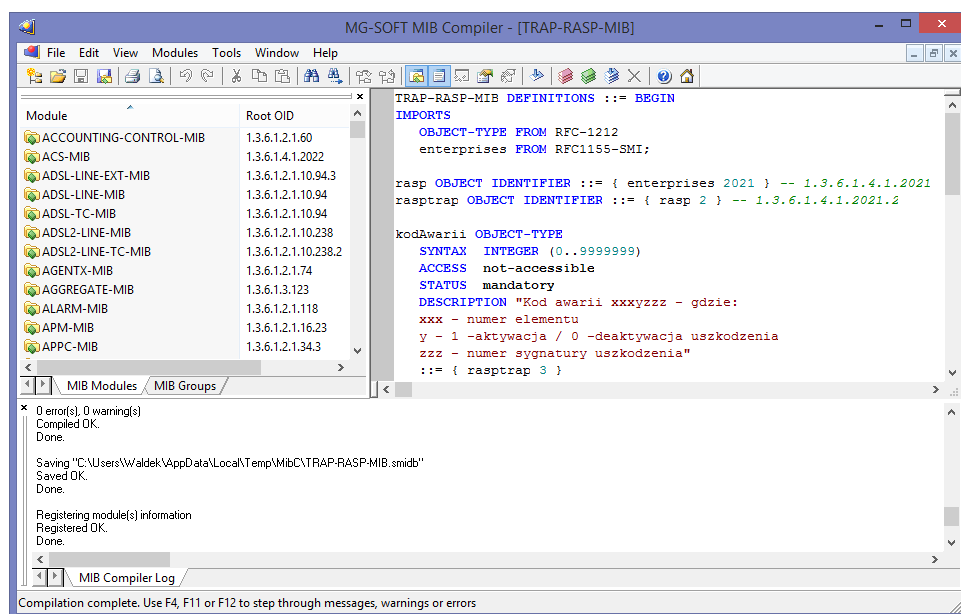
2.1. Bazy MIB

Dane o stanie diagnozowanego systemu przechowywane i udostępniane są przez agenta SNMP z wykorzystaniem bazy MIB (Management Information Base). Do definiowania struktury bazy MIB używana jest notacja ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) [26]. Każdy obiekt zapisany w bazie posiada przyporządkowaną nazwę (OBJECT IDENTIFIER), składnię (SYNTAX) oraz regułę kodowania (ENCODING RULES). Obiekty przechowywane są w strukturze hierarchicznej, określanej również jako drzewiasta. Aby uzyskać dostęp do obiektu, który reprezentuje pewien zasób (dane diagnostyczne), należy podać oddzielone kropkami wszystkie nazwy, od korzenia aż do liścia. Nazwy mogą mieć postać opisową lub numeryczną np. *iso.org.dod.internet.private.enterprise* lub 1.3.6.1.4.1. Za przydzielanie węzłom nazw i numerów odpowiada ISO (International Organization for Standardization), co zapewnia unikatowe nazewnictwo obiektów. Zaletą standardu SNMP jest możliwość definiowania nowych baz MIB. Dlatego też standard SNMP może być stosowany w innych obszarach niż tylko zarządzanie sieciami komputerowymi. Własne rozszerzenia mogą być dodawane do poddrzewa *private*. Pozwala to producentom urządzeń na tworzenie obiektów obsługujących specyficzne parametry ich produktów oraz zapewnia, że obiekty te są widoczne przez stacje zarządzające. Cecha ta została wykorzystana do opracowania koncepcji użycia technologii SNMP w diagnostyce systemów automatyki kolejowej, z uwzględnieniem zaproponowanej w artykule metody diagnostycznej.

W celu zdefiniowania zakresu danych dotyczących diagnozowanego systemu RASP, które mogą być udostępniane stacji zarządzającej przez agenta SNMP, opracowano dwa prywatne pliki MIB. W pierwszym pliku nazwanym „TRAP-RASP-MIB.mib” zdefiniowano pułapki SNMP. W tym przypadku mamy do czynienia z następującymi parametrami:

- *sysName*, *sysLocation*, które są obiektami "System" zdefiniowanymi w dokumencie RFC 1213,
- *kodAwarii* typu INTEGER, kod awarii,
- *opisAwarii* typu OCTET STRING, krótki opis awarii.

Zawartość pliku „TRAP-RASP-MIB.mib”, zawierającego specyfikację pułapek SNMP, przedstawiono w załączniku 1. Poprawność bazy MIB została sprawdzona w wyniku kompilacji w środowisku „MG-SOFT MIB Browser” (rys. 3).



Rys.3. Kompilacja modułu „TRAP-RASP-MIB.mib” w środowisku „MG-SOFT MIB Browser” (opracowanie własne)

W drugim pliku, noszącym nazwę „RASP-MIB.mib”, zdefiniowano zmienne opisujące system RASP, o które może pytać stacja zarządzająca. Wśród nich są:

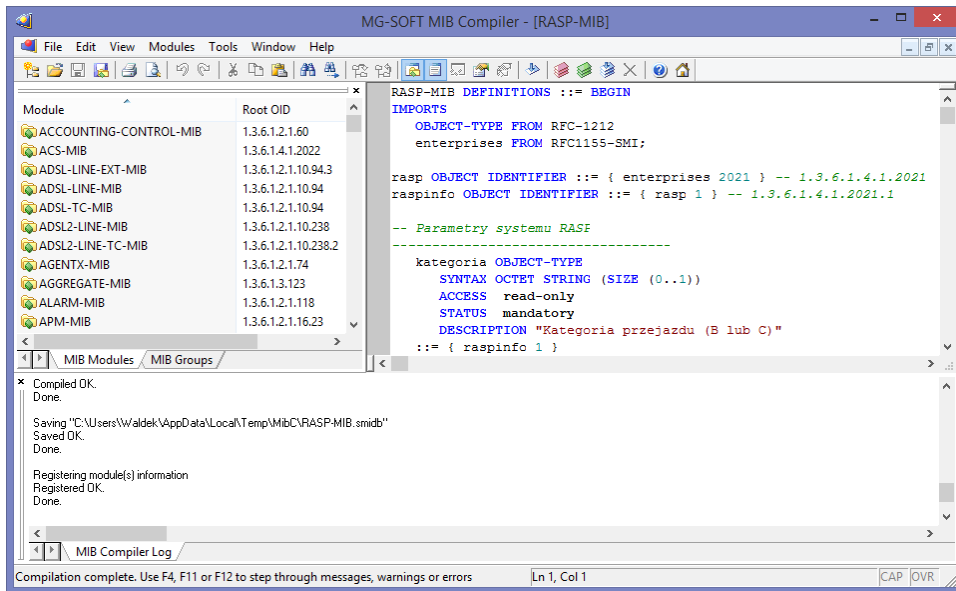
- *kategoria* typu OCTET STRING, kategoria przejazdu,
- *liczbarogatek* typu INTEGER, liczba półrogatek,
- *liczbatorow* typu INTEGER, liczba torów,
- *uzk* typu INTEGER, obsługa UZK,

oraz tablica stanu dla każdego diagnozowanego elementu systemu. Na przykład dla czujnika C1 zawiera ona następujące obiekty:

- *c1Index* typu INTEGER, znacznik czasu,

- *clAkt* typu INTEGER, występowanie uszkodzenia,
- *clSyg* typu OCTET STRING, sygnatura uszkodzenia,
- *clf1*, *clf2*, *clf3*, *clf4*, *clf5*, *clf6*, *clf7*, *clf8*, *clf9* typu OCTET STRING, odpowiednio prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia: $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9$.

Wybrany fragment modułu „*RASP-MIB*” przedstawiono w formie listingu. Podobnie jak w poprzednim przypadku, sprawdzono poprawność bazy MIB wykonując jej kompilację w środowisku „*MG-SOFT MIB Browser*” (rys. 4).



Rys.4. Kompilacja modułu „*RASP-MIB.mib*” w środowisku „*MG-SOFT MIB Browser*” (opracowanie własne)

2.2. Agent SNMP

Zgodnie z przyjętą koncepcją, dla każdego rodzaju diagnozowanego systemu automatyki kolejowej, niezbędne jest opracowanie oprogramowania będącego agentem SNMP. Uwzględni się w ten sposób specyfikę systemu oraz zaimplementowana zostanie przyjęta w artykule metoda diagnostyczna. Pierwszą funkcjonalnością agenta SNMP, którą należy uwzględnić jest współpraca z diagnozowanym systemem automatyki kolejowej. Następnie należy wykorzystać wyniki analizy przeprowadzonej dla systemu zgodnie przyjętą metodą diagnostyczną. Dla każdego diagnozowanego elementu systemu musimy więc zapewnić wykrywanie kombinacji symptomów odpowiadających uszkodzeniom, natomiast dla każdej takiej sygnatury, możliwość obliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia wszystkich uszkodzeń wchodzących w skład funkcji niesprawności. Dane te muszą być przez agenta przechowywane i udostępniane na żądanie menadżera SNMP. Kolejną funkcjonalnością agenta SNMP jest powiadamianie menadżera SNMP o każdym

wystąpieniu kombinacji symptomów odpowiadającej uszkodzeniu, w postaci pułapki SNMP. W celu sprawdzenia przyjętych w pracy założeń opracowano symulator agenta SNMP dla systemu typu RASP, którego ekran główny przedstawiono na rysunku 5.

The screenshot shows the 'Agent - RASP' application window. It features a tabbed interface with 'Dane RASP', 'Stan systemu', and 'Pułapki'. The 'Dane RASP' tab is selected, displaying two columns of data entry fields. The left column, 'Podstawowe dane', contains text boxes for 'Nazwa' (filled with 'RASP-4Ft'), 'ID systemu' (filled with '1.3.6.1.4.1.2021'), 'Opis' (filled with 'SSP typu RASP-4Ft'), 'Lokalizacja' (filled with 'Linia 1, km 50.038'), and 'Kontakt' (filled with 'Serwis tel. (048) 316-34-68'). The right column, 'Dodatkowe dane', contains dropdown menus for 'Kategoria' (selected 'B'), 'Liczba półrogatek' (selected '2'), 'Liczba torów' (selected '1'), and 'UZK' (selected 'nie'). At the bottom, a 'Status' section shows a green button 'Agent aktywny (port 161)' and a grey button 'Dezaktywuj agenta'.

Rys.6. Ekran główny symulatora agenta SNMP systemu RASP (opracowanie własne)

Różnica w działaniu symulatora i rzeczywistego agenta polega na konieczności ręcznej aktualizacji tablicy „Stan systemu”, w której przechowywane są informacje dotyczące sygnatur uszkodzeń i prawdopodobieństwa wystąpienia każdej z usterek wchodzących w skład funkcji niesprawności dla wszystkich diagnozowanych elementów systemu (rys. 7). Wynika to z faktu, że aktualnie symulator nie ma zaimplementowanej funkcji pobierania danych z rzeczywistego systemu RASP.

Dane przechowywane w tablicy „Stan systemu” udostępniane są na żądanie menadżera SNMP zlokalizowanego w CUiD. Na przykład, przed podjęciem czynności serwisowych można wysłać do agenta SNMP zapytanie i odczytać aktualne wartości prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń przypisanych do aktywnej sygnatury. Automatyk srk (diagnosta) otrzymuje w ten sposób nie tylko pełną informację o symptomach dla każdej sygnatury uszkodzeń i możliwych uszkodzeniach, ale również odpowiedź, które uszkodzenie jest najbardziej prawdopodobne, co pozwoli to na skrócenie czasu naprawy. Symulator agenta systemu RASP umożliwia również przekazywanie w formie pułapek SNMP informacji o wystąpieniu uszkodzenia (rys. 8).

W pułapce jaką otrzymuje menadżer SNMP zawarte są następujące informacje: nazwa i lokalizacja systemu, kod awarii oraz krótki opis awarii. Kod awarii składa się z numeru elementu, informacji o aktywności lub braku aktywności uszkodzenia oraz numeru sygnatury. Całość komunikacji pomiędzy symulatorem agenta a menadżerem SNMP

realizowana jest zgodnie z protokołem SNMP, przy uwzględnieniu zdefiniowanych w tym celu obiektów w bazach MIB.

The screenshot shows the 'Agent - RASP' window with the 'Stan systemu' tab selected. The table below represents the data shown in the window:

Indeks	Akt.	Sygnatura	f1	f2	f3	f4	f5	f6
1	1	00010000	0,0030	0,9439	0,0531	0	0	0
2	0	00000100	0,0022	0,9587	0,0391	0	0	0
3	0	00010100	0,0024	0,9132	0,0844	0	0	0

Below the table are buttons: 'Edycja danych', 'Sygnatury', and 'Uszkodzenia'. At the bottom, the 'Status' section shows 'Agent aktywny (port 161)' and a 'Dezaktywuj agenta' button.

Rys.7. Przykładowa tablica „Stan systemu” symulatora agenta SNMP systemu RASP (opracowanie własne)

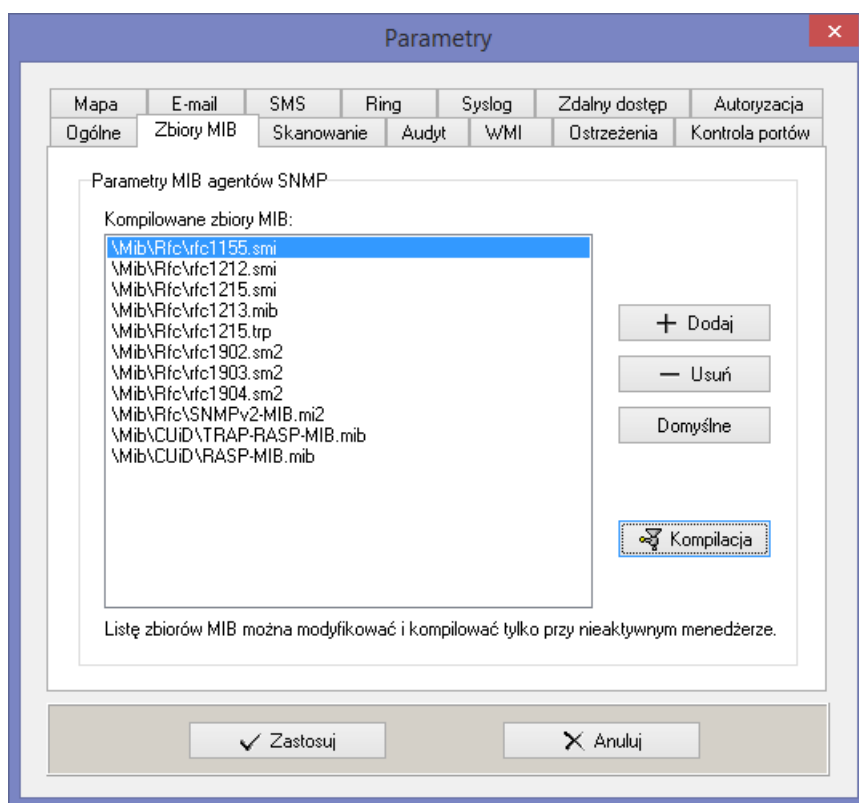
The screenshot shows the 'Agent - RASP' window with the 'Pułapki' tab selected. The form includes the following elements:

- Kod awarii:** 0011008
- xxx-yy-zz:** xxx - element, y - aktywacja, zz - sygnatura
- Usterki kategorii I:** Czujniki C1, C4, C11, C14
- Usterki kategorii II:** Sygnalizatory S1, S2, S3, S4; Napędy N1, N2, N3, N4
- Element:** Czujnik C1
- Aktywacja:** Tak
- Sygnatura:** 00010000
- Legenda:**
 - s1 - Błąd karty wartościującej
 - s2 - Postój koła pojazdu nad czujnikiem
 - s3 - Brak ciągłości kabla czujnika
 - s4 - Zajęcie strefy środkowej przejazdu (przy wolnej strefie)
- Adres IP menadżera:** 10 . 100 . 118 . 201
- Buttons:** 'Wyślij pułapkę', 'Agent aktywny (port 161)', 'Dezaktywuj agenta'

Rys.8. Okno do wysyłania pułapek SNMP programu symulatora agenta (opracowanie własne)

2.3. Menadżer SNMP

Stacja zarządzająca NMS dysponuje menadżerem SNMP, który jest rozbudowanym oprogramowaniem umożliwiającym przeprowadzanie zdalnej diagnostyki systemów automatyki kolejowej i urządzeń sieciowych. Przyjęta koncepcja polega na pozyskiwaniu danych diagnostycznych i ich analizie przez agenta SNMP, a następnie udostępnianiu uzyskanych w ten sposób wyników menadżerowi SNMP. Współpraca menadżera i agenta wymaga opracowania baz MIB, które następnie są kompilowane. Każdy typ systemu automatyki kolejowej posiada własne bazy MIB, dlatego też menadżer SNMP musi mieć możliwość edycji listy kompilowanych baz. Przykładowy ekran kompilatora przedstawiono na rysunku 9.



Rys.9. Kompilator MIB menadżera SNMP (opracowanie własne)

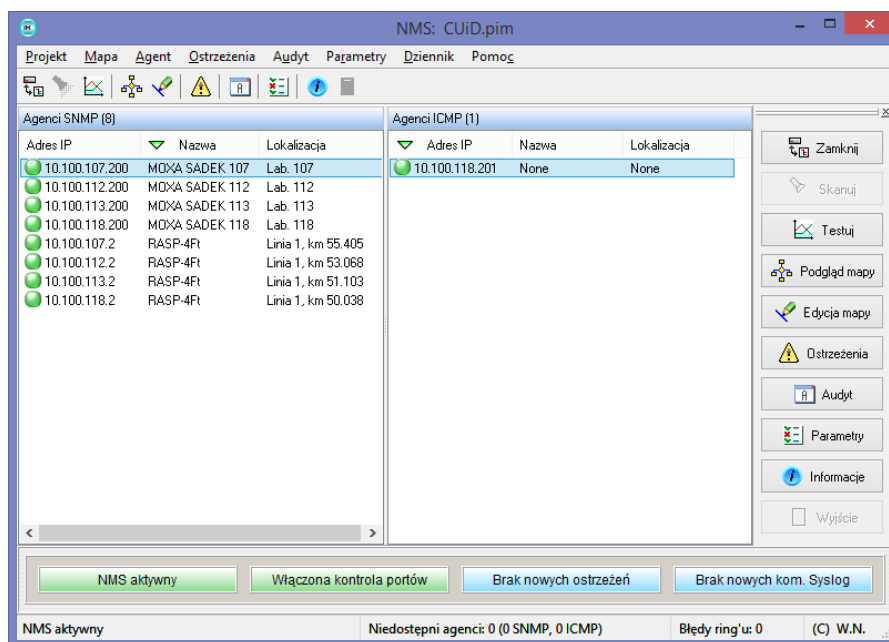
Po skompilowaniu plików MIB można przystąpić do parametryzacji menadżera SNMP. Pierwszą czynnością jest skanowanie sieci w celu wykrycia wszystkich agentów SNMP. Skanowanie można przeprowadzić w trybie rozgłoszeniowym (broadcast) lub wybranych zakresach adresów IP. W wyniku skanowania otrzymujemy listę aktywnych agentów SNMP.

Listę, na której znajdują się systemy automatyki kolejowej oraz zarządzane urządzenia sieciowe, można edytować poprzez usuwanie lub dodawanie nowych agentów. Po wykonaniu skanowania należy przystąpić do budowania mapy sieci. Dla każdego z urządzeń użytkownik musi wskazać typ (rodzaj), aby program użył właściwych symboli graficznych. W oprogramowaniu przewidziano pewną grupę symboli, przy czym użytkownik może ją zmienić (rys. 11).

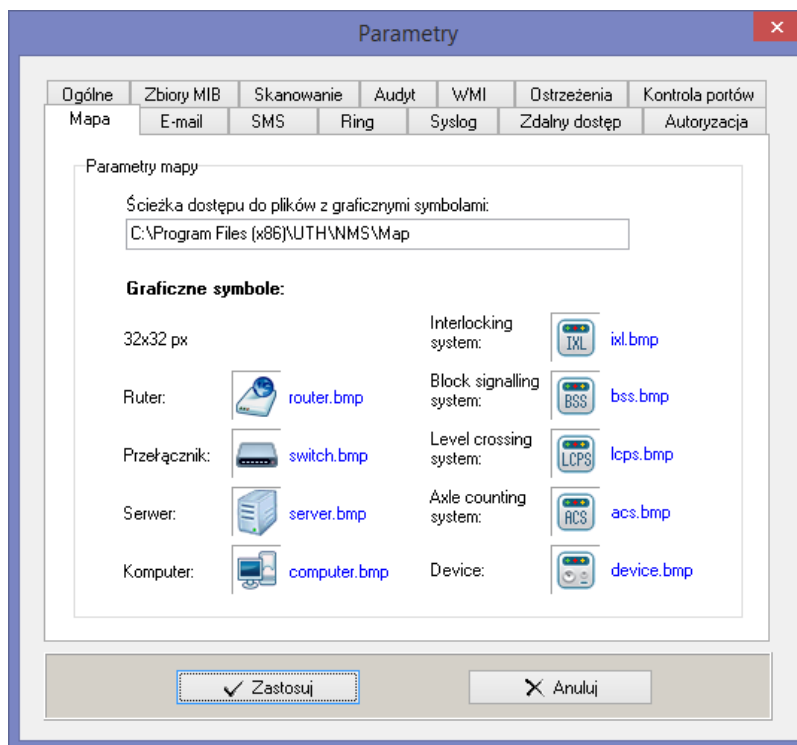
Gdy symbole urządzeń zostaną umieszczone na mapie użytkownik powinien je połączyć odwzorowując w ten sposób topologię sieci, przy czym w oprogramowaniu przewidziano również możliwość monitorowania sieci o topologii pierścienia. Ekran edytora mapy z przykładową wizualizacją sieci przedstawiono na rysunku 12.

Po zapisaniu mapy sieci i wykonaniu parametryzacji w zakresie kontroli stanu pierścienia (jeśli zastosowano taką topologię) program jest gotowy do automatycznego monitorowania agentów SNMP. W przypadku wystąpienia uszkodzenia w kontrolowanym przez agenta SNMP systemie automatyki kolejowej, zgłasza on ten fakt menadżerowi w postaci pułapki SNMP. Powoduje to zarejestrowanie uszkodzenia przez menadżera SNMP jako nowego ostrzeżenia (rys. 13).

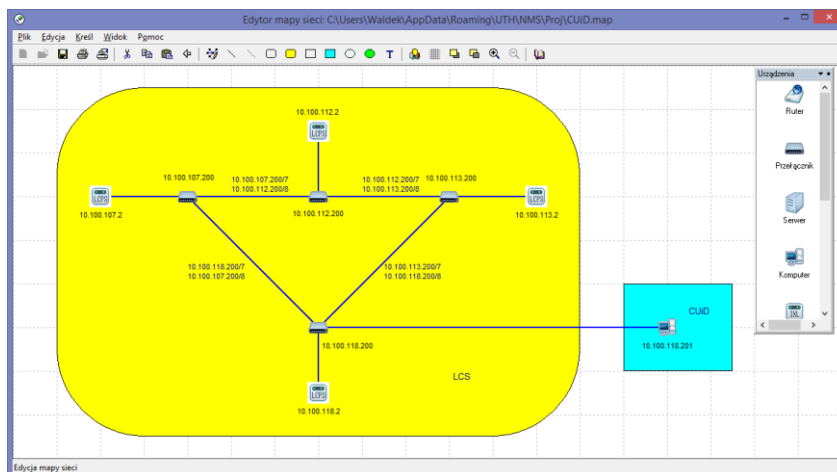
Oprócz pułapek SNMP menadżer generuje własne ostrzeżenia wynikające na przykład z braku dostępności agenta SNMP lub zmiany stanu portu w przypadku kontroli pierścienia (rys. 14).



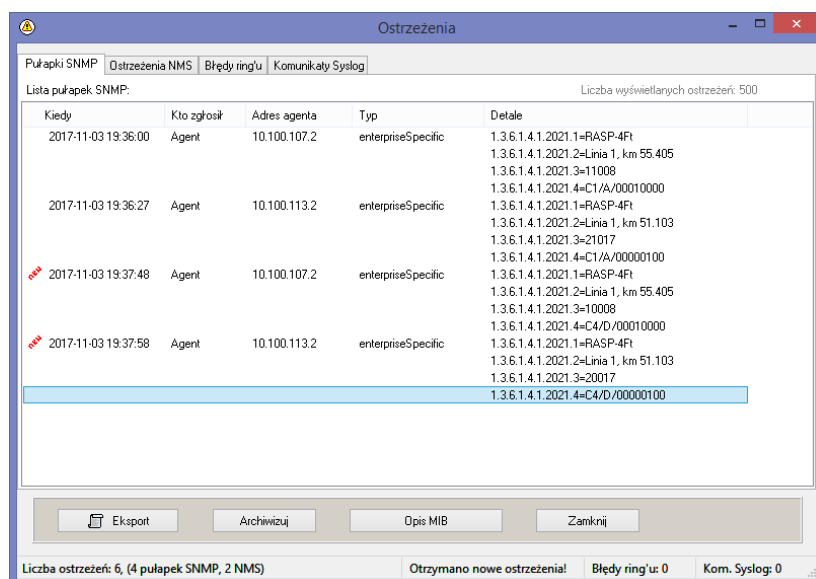
Rys.10. Ekran główny menadżera SNMP z listą agentów SNMP (opracowanie własne)



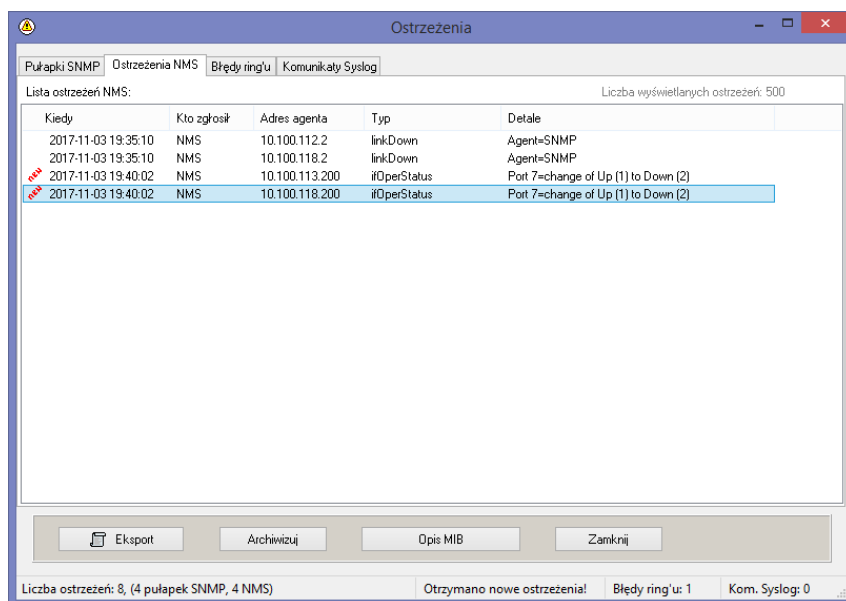
Rys. 11. Graficzne symbole urządzeń (agentów SNMP) (opracowanie własne)



Rys. 12. Edytor mapy sieci menadżera SNMP (opracowanie własne)



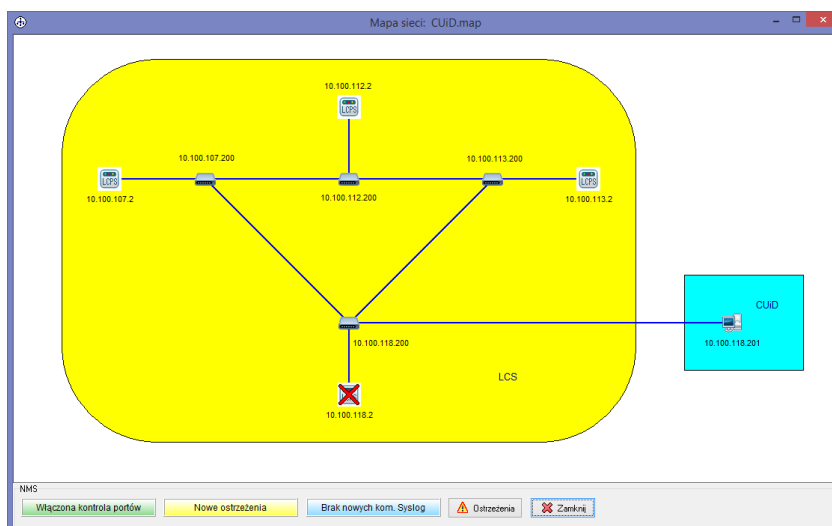
Rys. 13. Pułapki SNMP rejestrowane przez menadżera (opracowanie własne)



Rys. 14. Ostrzeżenia generowane przez menadżera SNMP (opracowanie własne)

Występowanie uszkodzeń związanych z danym systemem automatyki kolejowej lub urządzeniem sieciowym wizualizowane jest na mapie sieci w postaci znaku „X” w kolorze czerwonym na jego symbolu graficznym, co zostało przedstawione na rysunku 15.

Użytkownik może wówczas wskazać na mapie sieci symbol graficzny urządzenia i wybierając podręczne menu uzyskać listę aktywnych sygnatur uszkodzeń (rys. 16).



Rys. 15. Wizualizacja uszkodzenia na mapie sieci przez menadżera SNMP (opracowanie własne)

Indeks	Adres IP	Nazwa	Element	Sygnatura
1	10.100.118.2	RASP-4Ft	C1	00010000

Sygnatura - opis symptomów
s1 - Niezgodność zmian sygnałów „sys” (RSR123) lub liczników „sys” i kierunku „Ri” (RSR180)
s2 - Jednoczesność wystąpienia zboczy sygnałów sysA oraz sysB
s3 - Nieprawidłowa sekwencja sygnałów „sys” - brak zachodzenia (pokrycia) sygnałów sysA i sysB
s4 - Zbyt długo trwający sygnał sysB
s5 - Wykrycie obecności pojazdu przez czujnik strefy przejazdowej przy braku pojazdu
s6 - Zbyt długo trwający sygnał sysA
s7 - Impulsowanie sygnałów „sys”
s8 - Brak zbilansowania liczby osi dla kontrolowanej strefy

Historia

Funkcja niesprawności

Zamknij

Rys. 16. Przykładowa lista aktywnych sygnatur uszkodzeń (opracowanie własne)

Wskazując na liście odpowiednią pozycję i wybierając opcję „Funkcja niesprawności” uzyskujemy aktualną listę wszystkich możliwych uszkodzeń wraz z prawdopodobieństwami ich wystąpienia, co zostało przedstawione na rysunku 17. Zgodnie z przyjętą w artykule metodą wartości tych prawdopodobieństw powinny być na bieżąco uaktualniane przy wykorzystaniu reguły Bayesa.

Niezależnie od przedstawionego sposobu kontroli funkcji niesprawności, dla każdego z aktywnych uszkodzeń istnieje możliwość odczytania w dowolnej chwili różnych obiektów z bazy MIB, w tym również tabeli z informacją o stanie diagnozowanego elementu systemu, a więc także w sytuacji nie występowania uszkodzeń. W tym celu wybieramy przeglądarkę MIB, a następnie wskazujemy interesujący nas obiekt na przykład „*cTable*” (rys. 18).

2.4. Monitorowanie stanu sieci komputerowej

Zastosowanie technologii SNMP w diagnostyce systemów automatyki kolejowej umożliwia zarządzanie urządzeniami sieciowymi oraz monitorowanie ich stanu [2, 11]. Systemy diagnostyczne w jakie wyposażane są CUiD, ze względu na konieczność pozyskiwania danych z wielu diagnozowanych urządzeń i systemów automatyki kolejowej, powszechnie wykorzystują technologie sieciowe. W celu uzyskania dużej niezawodności sieci zaleca się stosowanie topologii nadmiarowych. Zabezpiecza się w ten sposób sieć przed wystąpieniem przerw w działaniu spowodowanych awarią pojedynczego łącza, portu lub urządzenia sieciowego. W przyjętej koncepcji systemu diagnostycznego, każde LCS wraz z systemami automatyki kolejowej tworzy oddzielną sieć lokalną LAN (Local Area Network). Najpopularniejszą technologią sieci lokalnych jest Ethernet, w tym jego wersje Fast i Gigabit. W celu zapewnienia dużej niezawodności sieci komputerowej systemu diagnostycznego można zastosować topologię pierścienia (ring). Początkowo Ethernet nie pozwalał na budowanie sieci o topologii pierścienia. Dopiero opracowanie protokołu drzewa rozpinającego STP (Spanning Tree Protocol) (IEEE 802.1d) umożliwiło stosowanie tej topologii w sieciach Ethernet. Na bazie protokołu STP powstały nowe protokoły, w tym na przykład RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) (IEEE 802.1w), MSTP (Multiple Spanning Tree Protocol) (IEEE 802.1s) i SPB (Shortest Path Bridging) (IEEE 802.1aq). Dodatkowo, producenci urządzeń sieciowych proponują własne (autorskie) rozwiązania tj. Turbo Ring, Hiper Ring, Super Ring, itp. Zastosowanie protokołu rozpinającego nie rozwiązuje jednak problemu zdalnej diagnostyki i monitorowania sieci pracującej w topologii pierścienia [187]. Dlatego też oprogramowanie stacji NMS, opracowane dla potrzeb diagnostyki systemów automatyki kolejowej, wyposażono w funkcjonalność polegającą na kontroli stanu pierścienia.

Podobnie jak w przypadku parametryzacji menadżera, dla potrzeb współpracy z agentami SNMP przechowującymi dane dotyczące systemów automatyki kolejowej, pierwszą czynnością jest wykonanie skanowania sieci. Skanowanie automatycznie wykrywa urządzenia sieciowe (agentów SNMP) i na tej podstawie tworzona jest ich lista. Po wykonaniu skanowania można przystąpić do budowania mapy sieci. W celu użycia poprawnych symboli graficznych użytkownik musi wskazać właściwy rodzaj urządzenia sieciowego. Gdy symbole urządzeń zostaną umieszczone na mapie należy je połączyć odwzorowując w ten sposób topologię sieci. Jeśli na mapie ma być przedstawiany w formie graficznej stan pierścienia należy, podczas łączenia węzłów sieci, dodatkowo zdefiniować (wybrać) numery wykorzystywanych w tym celu portów.

Funkcja niesprawności - element C1, sygnatura 00010000		
Indeks	Praw. uszkodzenia	Opis uszkodzenia
1	0,0030	f1 -Uszkodzenie karty wartościującej
2	0,9439	f2 -Postój koła pojazdu nad czujnikiem
3	0,0531	f3 -Brak ciągłości kabla czujnika
4	0	f4 -Zajęcie strefy środkowej przejazdu (przy wolnej strefie najazdowej)
5	0	f5 -Źle wyregulowany czujnik
6	0	f6 -Niepewne połączenia czujnika
Sygnatura - opis symptomów		
s1 - Niezgodność zmian sygnałów „sys” (RSR123) lub liczników „sys” i kierunku „Ri” (RSR180) s2 - Jednoczesność wystąpienia zboczy sygnałów sysA oraz sysB s3 - Nieprawidłowa sekwencja sygnałów „sys” - brak zachodzenia (pokrycia) sygnałów sysA i sysB s4 - Zbyt długo trwający sygnał sysB s5 - Wykrycie obecności pojazdu przez czujnik strefy przejazdowej przy braku pojazdu s6 - Zbyt długo trwający sygnał sysA s7 - Impulsowanie sygnałów „sys” s8 - Błąd zbilansowania liczby osi dla kontrolowanej strefy		
Zamknij		

Rys. 17. Przykładowa funkcja niesprawności dla danego elementu i sygnatury (opracowanie własne)

Baza MIB agenta: 10.100.118.2

Odczyt wartości obiektu lub tabeli obiektów:

Nazwa obiektu lub tabeli:

- rasp
 - raspinfo
 - kategoria
 - liczbarogatek
 - liczbatorow
 - uzk
 - c1Table
 - c1Entry
 - c1Index
 - c1Akt

Odczyt dozwolony

Odczytaj wartość obiektu

Odczytaj wartości tabeli obiektów

Odczytaj wartości wszystkich obiektów

Wyświetl listę plików MIB i nazw parametrów

OID obiektu: 1.3.6.1.4.1.2021.1.5

Opis: Tabela (koncepcja) z informacją o stanie czujnika C1

Dostęp: NotAccessible

Składnia: SEQUENCE OF C1Entry

Status: Mandatory

Przegląd lub zmiana odczytanych wartości obiektów:

Nazwa obiektu:

Odczytane wartości:

OID instancji obiektu:

Nowa wartość:

Nowa wartość powinna być zgodna z opisem Składnia

Zapis zabroniony

Zmień wartość obiektu

Zamknij

Liczba wczytanych obiektów MIB: 264

Rys. 18. Wybór obiektu MIB w przeglądarce (opracowanie własne)

3. Podsumowanie i wnioski

Systemy automatyki kolejowej pełnią istotną rolę w zagwarantowaniu bezpieczeństwa przemieszczania się osób i przewozu ładunków. Dlatego też niezbędne jest zapewnienie przez nie wysokiego poziomu niezawodności, czyli zdolności do zachowania stanu zdadności, oraz bezpieczeństwa rozumianego jako brak niedopuszczalnego ryzyka. Niestety, mimo ciągłego postępu technicznego urządzenia i systemy automatyki kolejowej ulegają uszkodzeniom. Ważny staje się wówczas problem ich odnowy, w którym przyjęte metody diagnostyczne mogą w znaczący sposób wpływać na zmniejszenie czasu odnowienia. Dodatkowo, ze względu na przeznaczenie systemów automatyki kolejowej, przekłada się to również na uzyskanie przez nie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa.

Punktem wyjścia do podjętych w artykule rozważań był aktualny stan badań naukowych oraz proponowanych rozwiązań technicznych dotyczących diagnostyki systemów automatyki kolejowej. Ze względu na znaczną liczbę eksploatowanych urządzeń oraz fakt proponowania przez każdego z producentów systemów diagnostycznych dostosowanych do własnych wyrobów należy stwierdzić, że obecnie proces diagnostyczny jest utrudniony i kosztowny.

Celem głównym artykułu było sformułowanie i opracowanie metody diagnostycznej, która pozwoliłaby na unifikację sposobu gromadzenia danych diagnostycznych, ich zakresu oraz metody ich analizy. Docelowo założono również poprawę bezpieczeństwa systemów automatyki kolejowej wynikającą ze zmniejszenia czasu postawienia właściwej diagnozy w przypadku wystąpienia uszkodzenia.

Zaproponowaną w artykule metodę można zaliczyć do diagnostyki logicznej i metod bayesowskich, które nie były dotychczas uwzględniane w systemach automatyki kolejowej. Polega ona na wyborze diagnozowanych elementów systemu, następnie opracowaniu sygnatur uszkodzeń i funkcji niesprawności, które to etapy należy przeprowadzić indywidualnie dla każdego diagnozowanego systemu automatyki kolejowej. Metoda zakłada szacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia każdego z uszkodzeń będących elementem funkcji niesprawności na podstawie danych pobranych z systemów automatyki kolejowej. Niezbędne jest więc określenie metody pozyskiwania tych danych.

W artykule zaproponowano wykorzystanie technologii SNMP jako platformy umożliwiającej budowanie systemów diagnostycznych urządzeń automatyki kolejowej. Aktualnie standard SNMP jest powszechnie stosowany do zdalnego monitorowania i zarządzania sieciami komputerowymi. W metodzie tej wyróżnia się warstwę zarządzaną, której elementami byłyby w analizowanym przypadku urządzenia i systemy automatyki kolejowej oraz warstwę zarządzającą, czyli systemy informatyczne zlokalizowane w CUiD. Komunikacja pomiędzy tymi warstwami wymaga opracowania baz MIB, które zgodnie z zaproponowaną w artykule metodą przechowywałyby dane z wartościami szacowanych prawdopodobieństw dla każdego z uszkodzeń. Ze względu na rozproszoną strukturę systemu diagnostycznego bardzo istotna może być również diagnostyka sieci komputerowej wykorzystywanej przez systemy diagnostyczne oraz przez systemy automatyki kolejowej. W tym przypadku możliwe jest użycie podstawowej funkcjonalności protokołu SNMP jaką jest monitorowanie stanu sieci.

Weryfikacja zaproponowanej w artykule metody diagnostycznej systemów automatyki kolejowej, a także przyjętej technologii SNMP, wymagała opracowania metody specyfikacji bazy MIB oraz zbudowania specjalistycznego oprogramowania. Należy

podkreślić, że oprogramowanie należące do warstwy zarządzającej, czyli przeznaczone dla CUiD, ma charakter uniwersalny. To znaczy, że nie wymaga ono żadnych zmian w zakresie funkcjonalności w celu zapewnienia współpracy z dowolnym systemem automatyki kolejowej. Aby uwzględnić nowy system należy wyłącznie dodać odpowiedni plik z bazą MIB do zasobów tego oprogramowania. Natomiast w przypadku oprogramowania dla warstwy zarządzanej wymagane jest opracowanie indywidualnego oprogramowania dla każdego diagnozowanego systemu. W tym celu można wykorzystać kody źródłowe oprogramowania klienta SNMP przygotowane przez autorów dla systemu samoczynnej sygnalizacji przejazdowej.

Zaproponowane w artykule rozwiązania mogą pozwolić na:

- ujednolicenie metod i zakresu gromadzenia danych diagnostycznych,
- przyjęcie jednolitych algorytmów analizy danych diagnostycznych, które w wyniku zastosowania nowej metody diagnostycznej pozwolą precyzyjnie wskazać rodzaj uszkodzenia,
- wdrożenie uniwersalnego oprogramowania diagnostycznego, zarówno w warstwie nadrzędnej jaką są CUiD, jak również w warstwie zarządzanej, która bezpośrednio współpracuje z systemami automatyki kolejowej,
- wzrost bezpieczeństwa oraz zmniejszenie kosztów eksploatacji urządzeń automatyki kolejowej w wyniku skrócenia czasu odnowy,
- zmniejszenie kosztów eksploatacji systemów.

Bibliografia:

1. Białek, M.: (2017) Eksploatacja urządzeń sterowania ruchem kolejowym i telekomunikacji kolejowej. Konferencja Naukowo-Techniczna SITK RP, pt. Technologie w budowie, utrzymaniu, eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym i łączności w kolejnictwie polskim, Cedzyna 13-15/09, 2017
2. Bojarczak, P., Nowakowski, W., Łukasik Z. (2017). Visual diagnostics of rail fastening system as a method to improve safety. Proceedings of the 23th International Conference - Engineering Mechanics (EM 2017), Svratka, Czech Republic, 2017, 182-185, 2017
3. Bojarczak, P., Nowakowski, W. (2017). Squat detection in railway rails using Gabor filter bank, SVM classifier and Genetic Algorithms. Proceedings of the 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2017), Warsaw, Poland, 2017, IEEE Xplore, 2017
4. Boulanger, J. L.: CENELEC 50128 and IEC 62279 Standards. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2015
5. Ciszewski, T., Nowakowski, W., Chrzan, M. (2017). RailTopoModel and RailML - data exchange standards in railway sector. Archives of Transport System Telematics, 10(4), 10-15, 2017
6. Ciszewski, T., Nowakowski, W. (2016). Interoperability of IT systems in the international railways. Proceedings of the 16th International Scientific Conference Globalization and Its Socio-Economic Consequences, Rajecké Teplice, Slovakia, Part I, 312-320, 2016
7. Ciszewski, T., Nowakowski, W. (2017). Life-Cycle Cost Analysis for Rail Control Systems. Proceedings of the 17th International Scientific Conference Globalization and Its Socio-Economic Consequences, Rajecké Teplice, Slovakia, Part I, 284-291, 2017

8. Chrzan, M. J., Ciszewski, T. P., Nowakowski, W. (2023). Selected aspects of the diagnostic process in rail transport. *Pojazdy Szynowe*, 3–12. <https://doi.org/10.53502/rail-175048>
9. Chrzan, M. J., Pirosh, P., & Paś, J. (2023). Transmission system model in the track-vehicle relationship based on Long Term Evolution technology. *Archives of Transport*, 66, 89–108. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.3237>
10. Chrzan, M. J. (2021). Study of the possibility of using transmission in the lte system on a selected railway line for the purpose of running railway traffic. *Archives of Transport*, 57, 91–101. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.7486>
11. Daszczuk, W.B. (2020): Non-exhaustive verification algorithm. In *Integrated Model of Distributed Systems (Studies in Computational Intelligence)*; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2020; 817, p. 256.
12. de Almeida Pereira, D.I.; Deharbe, D.; Perin, M.; Bon, P.(2019) B-Specification of Relay-Based Railway Interlocking Systems Based on the Propositional Logic of the System State Evolution. In *RSSRail 2019: Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification*; Collart-Dutilleul, S., Lecomte, T., Romanovsky, A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2019; 242–258.
13. Dyduch, J., & Paś, J. (2023). HIGH-SPEED TURNOUT AS PART OF THE TRACK. *Journal of Civil Engineering and Transport*, 5, 45–53. <https://doi.org/10.24136/tren.2023.012>
14. Dyduch, J., & Kornaszewski, M. M. (2016). Komputerowe systemy sterowania ruchem kolejowym (Nr 197). Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.
15. EN50129:2018; Railway Applications—Communication, Signalling and Processing Systems—Safety-Related Electronic Systems for Signalling. The European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2018. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/f6548cc3-5885-43aa-8654-9e71383b892e/en-50129-2018> (accessed on 28 September 2024).
16. EN50126-1:2017; Railway Applications—The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)—Part 1: Generic RAMS Process. The European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2017. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/e5456892-eb2c-437e-8c4b-91c08007f0b4/en-50126-1-2017> (accessed on 28 September 2024).
17. EN50126-2:2017; Railway Applications—The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)—Part 2: Systems Approach to Safety. The European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2017. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/67bf2fa9-46a2-4460-a907-91b2ac91d7fc/en-50126-2-2017> (accessed on 28 September 2024).
18. Fidali, M., Wojciechowski, P.(2018) Fault Detection of Railway Point Machine Using Diagnostic Models. *Proceedings of the 6th International Congress on Technical Diagnostic, ICDT2016*, Timofiejczuk A., Łazarz B. E., Chaari F., Burdzik R. (eds.), 275–285, Springer International Publishing, 2018
19. Foulliaron, J., Bouillaut, L., Aknin, P. et al.(2017). A dynamic Bayesian network approach for prognosis computations on discrete state systems. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers Part O-Journal of Risk and Reliability, Volume 231, Issue 5, 516-533, 2017
20. Iliasov, A.; Laibinis, L.; Taylor, D.; Lopatkin, I.(2022). Romanovsky, A. Safety Invariant Verification that Meets Engineers' Expectations. In RSSRail 2022: Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification; Collart-Dutilleul, S., Haxthausen, A.E., Lecomte, T., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 13294, 20–31.
 21. Karolak, J., Daszczuk, W. B., Grabski, W., & Kochan, A. (2022). Temporal Verification of Relay-Based Railway Traffic Control Systems Using the Integrated Model of Distributed Systems. *Energies*, 15, 1–23. <https://doi.org/10.3390/en15239041>
 22. Kornaszewski, M. M., & Dyduch, J. (2019). Wpływ stanu technicznego urządzeń srk na bezpieczeństwo ruchu kolejowego. W T. M. Perzyński (red.), Wybrane problemy inżynierii transportu, 9–27.
 23. Kornaszewski, M., Bojarczak, P., Pniewski, R.(2016). Introduction of world innovative technologies to railway transport in Poland. Proceedings of the 16th International Scientific Conference Globalization and its Socio-Economic Consequences, Part II, 962-969, 2016
 24. Kornaszewski, M. M., Pniewski, R. G., & Chrzan, M. J. (2022). Support Making Decisions in th Exploitation Issues Of Railway Signalling Devices. *Transport Means*, 1, 128–133.
 25. Kornaszewski, M., Chrzan, M., Olczykowski, Z.(2017). Implementation of New Solutions of Intelligent Transport Systems in Railway Transport in Poland. Mikulski J. (ed.), TST 2017, Communications in Computer and Information Science, 715, 282-292, Springer, Berlin Heidelberg 2017
 26. Łukasik, Z., Ciszewski, T., Młyńczak, J., Nowakowski, W., Wojciechowski, J.(2023).Assessment of the safety of microprocessor-based semi-automatic block signalling system. Contemporary Challenges of Transport Systems and Traffic Engineering, Macioszek E. & Sierpiński G. (Eds.), Book Series: Lecture Notes in Network and Systems, Volume 2, 137-144, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
 27. Nowakowski, W., & Ciszewski, T. P. (2023). The development of software solutions for diagnosis railway control systems. *Transport Means*, 435–439.
 28. Nowakowski, W., & Ciszewski, T. P. (2021). The use of COTS technology in building reliable and safe railway traffic control systems. *Transport Means*, 1, 140–144.
 29. Nowakowski, W. (2018). *Diagnostyka systemów automatyki kolejowej jako metoda poprawy bezpieczeństwa*. Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu
 30. Nowakowski, W., & Chrzan, M. J. (2024). Zastosowanie protokołu snmp do audytu sprzętu i oprogramowania komputerowego. W J. K. Wojciechowski & T. P. Ciszewski (red.), WSPÓŁCZESNE WYZWANIA TRANSPORTU I ELEKTROTECHNIKI., 318(5), 183–192.
 31. Nowakowski, W., Ciszewski, T., Łukasik, Z.(2017). The Concept of Railway Traffic Control Systems Remote Diagnostic. Mikulski, J. (ed.), TST 2017, Communications in Computer and Information Science, 715, 471-481, Springer, Berlin Heidelberg 2017
 32. Nowakowski, W., Ciszewski, T., Młyńczak, J., Łukasik, Z.(2018). Failure Evaluation of the Level Crossing Protection System Based on Fault Tree Analysis. Recent Advances in Traffic Engineering for Transport Networks and Systems, Macioszek E.

- & Sierpiński G. (Eds.), Book Series: Lecture Notes in Network and Systems, Volume 21, 107-115, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2018
33. Nowakowski, W. (2017). Network management software for redundant Ethernet ring. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 48(4), 24-29, 2017
34. Mielnik, R., Sulowicz, M., Ludwinek, K., Jaskiewicz, M. (2018). The Reliability of Critical Systems in Railway Transport Based on the Track Rail Circuit. In: Mazur, D., Gołębiowski, M., Korkosz, M. (eds) *Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 452. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63949-9_25
35. Parillaud, C.; Fonteneau, Y.; Belmonte, F. (2019). Interlocking Formal Verification at Alstom Signalling. In *RSSRail 2019: Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification*; Collart-Dutilleul, S., Lecomte, T., Romanovsky, A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 11495, 215–225.

Application of SNMP protocol for remote audit of computers used in transport tasks

Abstract. The development of network technologies and their growing importance in the organizational structures of modern transportation requires advanced management and monitoring methods to ensure reliability, security and operational efficiency. In this context, the Simple Network Management Protocol (SNMP) is emerging as a key standard that enables transportation network administrators to perform comprehensive control over a variety of network devices. This article is designed to explore the role SNMP plays in managing networked systems in transportation, focusing on its evolution, functionalities and practical application. Attention will also be given to the challenges and limitations of its use, emphasizing the importance of an appropriate approach to security and configuration. The method of diagnosing railroad automation systems proposed in the article allows for the formulation of a fault hypothesis as a result of analysis of past states, i.e. previous faults and their associated symptoms. The article proposes using SNMP (Simple Network Management Protocol) technology for this purpose, which is commonly used to manage network systems. This is due to the fact that the diagnostic systems with which CUiD is equipped take data from various railroad automation systems, using ICT, and thus form a wide-area computer network. Implementing SNMP, especially in large and diverse network environments, can face challenges related to device compatibility and system scalability. Understanding these limitations and planning ahead can help overcome potential performance and management issues with transport systems.

Keywords: Simple Network Management Protocol, management, security

Zastosowanie punktowej metody wielokryterialnej oceny w kształtowaniu systemów carsharingowych

Ewelina Sendek-Matysiak^{1,*}

¹Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego

Streszczenie. Ograniczenie transportu indywidualnego w strukturze przewozów stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej polityki transportowej, szczególnie na obszarach miejskich, gdzie zjawisko kongestii generuje znaczne koszty ekonomiczne oraz wywiera negatywny wpływ na środowisko i zdrowie mieszkańców. Jednym z rozwiązań wspierających redukcję natężenia ruchu samochodowego jest carsharing, którego popularność systematycznie rośnie. Pomimo licznych badań analizujących aspekty społeczne, środowiskowe i ekonomiczne systemów carsharingowych, kwestia optymalnego doboru pojazdów do flot wciąż pozostaje niedostatecznie zgłębiona. Celem niniejszych badań jest określenie optymalnego doboru pojazdów z różnym typem napędu w flotach carsharingowych, z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych, technicznych i środowiskowych. Badania obejmowały analizę danych wtórnych dotyczących flot carsharingowych w Polsce, badania eksperckie oraz zastosowanie wielokryterialnej metody wspomaganie decyzji. Analiza została przeprowadzona dla pięciu pojazdów segmentu C z napędami: konwencjonalnym, hybrydowym, hybrydowym typu Plug-in oraz elektrycznym. Wyniki wskazują, że uwzględniając jednocześnie wszystkie kryteria, pojazdy elektryczne stanowią najbardziej optymalne rozwiązanie w obecnych warunkach systemów carsharingowych. Zaproponowana metoda może być praktycznym narzędziem wykorzystywanym przez operatorów carsharingu oraz władze miejskie w podejmowaniu decyzji dotyczących wyboru i modernizacji flot pojazdów.

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój, carsharing, wielokryterialna metoda punktowa

1. Wprowadzenie

Zrównoważony rozwój stał się jednym z kluczowych wyzwań współczesnego świata, szczególnie w kontekście miast, które są ośrodkami intensywnej działalności społeczno-gospodarczej. Jest on ściśle związany z koniecznością optymalizacji wykorzystania zasobów naturalnych, minimalizowania negatywnego wpływu na środowisko i zapewnienia wysokiej jakości życia mieszkańcom.

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

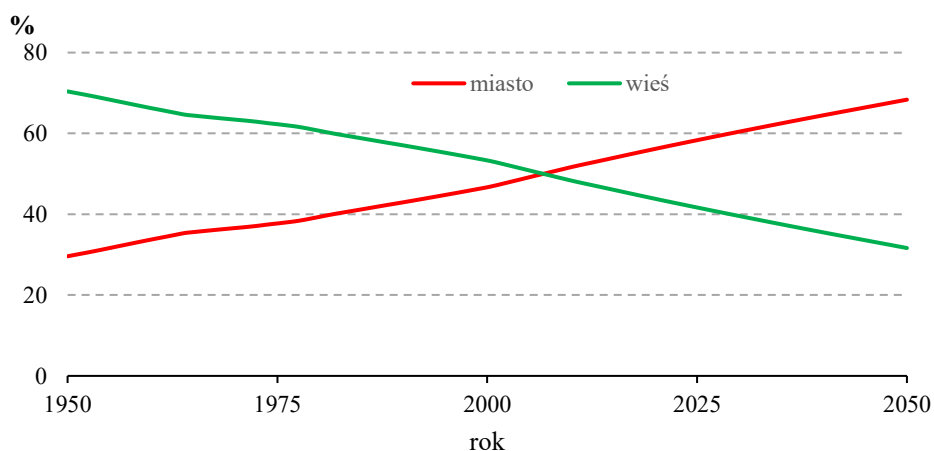
Sendek-Matysiak, E., (2025). Zastosowanie punktowej metody wielokryterialnej oceny w kształtowaniu systemów carsharingowych, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 63–77, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

*Autor do korespondencji

E-mail adres: esendek@tu.kielce.pl

ORCID iD: 0000-0003-3088-3177

Jednym z obszarów, który w szczególnie sposób wymaga uwagi, jest transport miejski. Wzrost liczby pojazdów na drogach, szczególnie samochodów prywatnych, prowadzi tam do poważnych problemów, tj. kongestia, zanieczyszczenie powietrza, hałas, zwiększone zużycie przestrzeni publicznej (obecnie nawet 35-50% powierzchni miast jest przeznaczona do obsługi ruchu drogowego [9]). W obliczu gwałtownego zwiększania się liczby ludności miejskiej (Rys. 1) oraz nasilającej się presji na systemy transportowe, poszukuje się nowych rozwiązań, które pozwolą na zrównoważony rozwój i efektywne zarządzanie mobilnością. Konieczne staje się wprowadzenie alternatywnych form transportu, które będą bardziej ekologiczne, efektywne oraz dostosowane do potrzeb współczesnych miast.



Rys. 1. Procent ludności na obszarach miejskich i wiejskich świata, 1940-2050 (źródło: [84])

Wśród innowacyjnych rozwiązań transportowych, które zyskują na znaczeniu, szczególną uwagę zwraca system wypożyczania samochodów carsharing [46], czyli współdzielenie samochodów. Umożliwia on wynajem pojazdów użytkownikom indywidualnym przez całą dobę, 7 dni w tygodniu [62].

Użytkownik takiej formy transportu nie ponosi kosztów związanych z utrzymaniem pojazdu, a jedynie niewielką część kosztów stałych (tj. amortyzacja i ubezpieczenie), które są dzielone na grupę osób korzystających z pojazdu i doliczane do ceny usługi oraz koszty naliczane na podstawie przejechanych kilometrów lub czasu korzystania z usługi [46] lub przebytej pojazdem odległości [58]. W odróżnieniu od klasycznego wynajmu samochodów, usługi carsharingu charakteryzują się pełną automatyzacją procesu rezerwacji i odbioru pojazdu, co znacząco zwiększa wygodę użytkownika [62].

Różnice między klasycznym wynajmem samochodu a systemem carsharingu podano w tabeli 1.

Systemy carsharingu różnią się między sobą pod względem organizacyjnym, terytorialnym oraz zasad funkcjonowania, co pozwala na ich dostosowanie do lokalnych uwarunkowań i potrzeb użytkowników.

Tabela. 1. Porównanie carsharingu i tradycyjnego wynajmu samochodów (źródło: [81])

Cechy	Carsharing	Tradycyjny wynajem samochodów
Czas wynajmu	dowolny	dzienny, miesięczny, roczny itp.
Dostępność	całodobowa	w godzinach pracy biura obsługi klienta
Proces wynajmu pojazdu	w pełni zautomatyzowany	wymaga kontaktu, np. w celu odebrania kluczy
Różnorodność pojazdów	mała – zazwyczaj jeden lub maksymalnie kilka modeli	duża – zazwyczaj pełny zakres klas pojazdów
Komfort parkowania	dedykowane miejsca parkingowe w centrach miast	dedykowane miejsca, zwykle przy lotniskach, stacjach lub punktach obsługi wynajmu samochodów

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną formą carsharingu jest współdzielenie pojazdów typu free-floating, która umożliwia wynajem i zwrot pojazdu w dowolnym miejscu na terenie całego obszaru działania systemu [57, 82].

Ponadto carsharing jest identyfikowany z licznymi korzyściami dla środowiska, tj. redukcja emisji gazów cieplarnianych i hałasu [27].

Z uwagi na rosnące zainteresowanie usługami carsharingu oraz ich dynamiczny rozwój, zagadnienie to stało się przedmiotem licznych publikacji naukowych, które dotyczą przede wszystkim:

- historii i ewolucji systemów carsharingu [29, 52, 69, 71],
- analizy funkcjonowania rynku oraz jego struktury [2, 24, 36, 45, 66, 68, 70, 72, 73, 75, 76, 82],
- modeli biznesowych stosowanych w usługach carsharingowych [1, 7, 28, 31, 37, 44, 53, 56, 57, 62, 69, 85],
- zachowań i motywacji użytkowników systemów carsharingu [3, 6, 8, 10, 16, 19, 20, 36, 37, 40, 43, 55, 64, 65, 67, 89, 90],
- zarządzania flotą pojazdów systemach wspólnego korzystania z samochodów, optymalizacji lokalizacji stacji oraz relokacji samochodów [6, 10, 14, 32, 33, 36, 38, 39, 47, 48, 54, 61, 92, 93],
- integracji elektromobilności w systemach współdzielenia pojazdów [12, 13, 17, 21, 26, 42, 45, 66, 109, 75, 77, 87, 88, 92],
- czynników sprzyjających i barier rozwoju carsharingu z perspektywy klientów i operatorów usług [11, 22, 23, 30, 49, 51, 59].

Ponadto, podejmowane badania obejmują modelowanie systemów carsharingowych z wykorzystaniem metod wielokryterialnego podejmowania decyzji. Na przykład w [41] zastosowano metodę AHP (Analytic Network Process) do wskazania optymalnego posadowienia stacji carsharingowych, natomiast w [5, 91] zastosowano ją do analizy opłacalności ich budowy i funkcjonowania.

Inna metoda wspomagania decyzji wielokryterialnych, tj. ELECTRE III, w pracy [83] została użyta do identyfikacji kryteriów, które są ważne przy wyborze floty pojazdów do współdzielenia samochodów oraz wskazania najbardziej odpowiedniego do jej potrzeb. Z kolei w [80] metoda ta zastosowana została do optymalizacji doboru modeli samochodów z perspektywy użytkowników regularnie korzystających z usług carsharingu.

Kompleksową ocenę wykorzystania pojazdów z napędem konwencjonalnym oraz typu Plug-in w systemach carsharingu przeprowadzono w [35] wykorzystując optymalizację programowania mieszanego całkowitoliczbowego (mixed integer programming).

Z analizy literatury wynika, że floty pojazdów w systemach carsharingu są przedmiotem intensywnych badań na całym świecie. Należy jednak zauważyć, że koncentrują się one głównie na optymalizacji wielkości floty oraz lokalizacji stacji, natomiast rzadziej dotyczą wykorzystania w takich systemach konkretnych typów pojazdów. Często ograniczają się do ogólnych sugestii, wskazujących, że floty powinny obejmować pojazdy osobowe lub dostawcze, bez szczegółowych zaleceń dotyczących konfiguracji floty w kontekście rodzaju napędu.

2. Racjonalizacja wyboru pojazdu pod względem typu napędu

2.1. Cel i zakres badań

Wybór pojazdów do usług carsharingu, uwzględniający rodzaju napędu, jest złożonym problemem. Wynika to z różnorodności parametrów technicznych, ekonomicznych i ekologicznych poszczególnych typów pojazdów, a także z niepewności związanej z kosztami ich eksploatacji. Decyzje tego rodzaju wymagają przeprowadzenia wielokryterialnej analizy, która uwzględnia zarówno korzyści, jak i ograniczenia każdego rozważanego rozwiązania.

W ramach niniejszych badań porównano zatem samochody z napędem konwencjonalnym, hybrydowym i elektrycznym, aby określić, który z nich jest najbardziej odpowiedni do wdrożenia we flotach carsharingowych. Ze względu na wieloaspektowy charakter problemu zastosowano metodę wspomagania decyzji, tj. metodę punktową, opartą na zintegrowanym kryterium uwzględniającym aspekty ekonomiczne, techniczne oraz środowiskowe.

2.2. Wybór i ocena pojazdów z różnym typem napędu

2.2.1. Identyfikacja zbioru wariantów decyzyjnych

W celu wyboru pojazdów do analizy, w 2023 roku przeprowadzono badania wtórne wśród operatorów carsharingu działających na terenie Polski. Wykazano, że dominującą część flot carsharingowych stanowią samochody miejskie (segment A i B) oraz kompaktowe (segment C), które łącznie odpowiadają za 91,4% floty (Rys. 3).

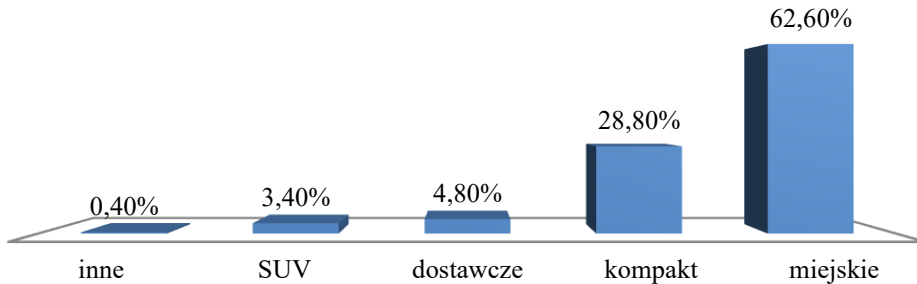
Do dalszych badań wybrano jeden model pojazdu z segmentu C dostępny w pięciu wariantach, różniących się układami napędowymi (Tabela 2). Rozważane warianty decyzyjne przedstawiono jako zbiór:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \quad (1)$$

gdzie:

- ✓ a_1 - samochód z silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym (ZI), wariant 1;
- ✓ a_2 - samochód z silnikiem Diesla o zapłonie samoczynnym (ZS), wariant 2;
- ✓ a_3 - pojazd hybrydowy typu Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV), wariant 3;
- ✓ a_4 - pojazd hybrydowy typu Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), wariant 4;

✓ a_5 - pojazd z napędem elektrycznym typu Battery Electric Vehicle (BEV), wariant 5.



Rys. 7. Udział segmentów pojazdów w systemach carsharingu w Polsce

Tabela 2. Charakterystyka wariantów decyzyjnych pojazdów uwzględnionych w analizie

Parametr	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Rodzaj „paliwa”	benzyna	olej napędowy	benzyna/prąd	benzyna/prąd	prąd elektryczny
Długość całkowita [m]	4,367	4,367	4,367	4,365	4,365
Szerokość całkowita [m]	1,850	1,850	1,850	1,850	1,850
Masa całkowita [kg]	1,288	1,361	1,375	1,603	1,684
Liczba drzwi	5	5	5	5	5
Skrzynia biegów	automatyczna				
Zużycie paliwa na 100 km	5,6	4,9	4,7	1,3	14,9

2.2.2. Określenie zbioru kryteriów oceny

Każdy z analizowanych pojazdów został oceniony z perspektywy trzech kluczowych celów strategicznych istotnych dla firm carsharingowych: technicznego, ekonomicznego i środowiskowego. Następnie dla każdego z nich określono odpowiednie kryteria cząstkowe, które przedstawiono w tabeli 3.

Wybór kryteriów oparto na analizie literatury [79, 80, 81] oraz na wskazaniach autora. Kryteria te zostały dobrane z uwzględnieniem takich wymagań jak: kompletność oceny, spójność z głównymi celami decydenta oraz unikanie redundancji kryteriów [25, 63, 86].

Zgodnie z powyższym, zbiór kryteriów oceny G obejmuje 17 elementów:

$$G = \{g_k; k = 1 \dots, 17\} \quad (2)$$

W przypadku zastosowania metody punktowej, w której wyróżnia się cele: techniczny, ekonomiczny oraz środowiskowy, zdefiniowano zbiór celów CE :

$$CE = \{c: c = 1, 2, 3\} \quad (3)$$

Kryteria cząstkowe zostały przypisane do każdego celu i oznaczone jako g_{ck} .

Zbiór F_c kryteriów oceny dla wybranych wariantów rozwiązań decyzyjnych, w odniesieniu do c -tego celu, stanowi zbiór elementów postaci:

$$F_c = \{g_{ck}: k = 1 \dots, K(c)\}, c = 1, 2, 3 \quad (4)$$

Tabela 3. Wartości kryteriów oceny dla poszczególnych wariantów decyzyjnych [4, 15, 18, 34, 50, 100, 60, 78]

Cel strategiczny	Kryterium oceny	Oznaczenie kryterium	Peugeot 308 Allure				
			a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Techniczny	Maksymalna ładowność [kg]	g_1	517	517	589	517	351
	Moc maksymalna [kW]	g_2	96	96	100	133	115
	Maksymalny moment obrotowy [Nm]	g_3	231	300	230	320	270
	Średnie zużycie benzyny [l]/oleju napędowego [l]/energii elektrycznej [kWh] na pokonanie 100 km	g_4	5,6	4,9	5,6	1,3	14,9
	Prędkość maksymalna [km/h]	g_5	210	207	210	170	170
	Przyspieszenie do 100 km/h [s]	g_6	9,7	10,6	9,7	7,6	9,8
	Całkowity zasięg (cykl mieszany) [km]	g_7	945	1155	978	3333	416
	Liczba stacji tankowania/ładowania (stan na 03.2024)	g_8	7919	7919	7919	10020	2101
	Czas potrzebny na pobranie benzyny/oleju napędowego/energii elektrycznej (ładowanie na stacji ładowania prądem przemiennym) [min]	g_9	3	3	3	121	330
	Koszt zakupu pojazdu [PLN]	g_{10}	133 800	141 600	141 100	178 300	185 500
Ekonomiczny	Koszt przejazdu 100 km (tryb mieszany) [PLN]	g_{11}	37,46	33,04	37,66	8,62	28,31
	Dodatkowe przywileje, np. korzystanie z bus-pasów, dopłaty do zakupu, zwolnienie z akcyzy itp. [0-2]	g_{12}	0	0	1	1	2
	Emisja CO ₂ [g/km]	g_{13}	123	124	109	26	49,93
Środowiskowy	Emisja NO _x *	g_{14}	41	50,8	12,6	3,5	0
	Emisja CO*	g_{15}	301,6	43	730	229,1	0
	Emisja PM _x [mg/km]*	g_{16}	0,66	0,04	0,35	0,42	0
	Emisja hałasu przy prędkości 100 km/h [dB]	g_{17}	76	76	68	74	66

* miejsce eksploatacji

Wagi dla poszczególnych kryteriów w ramach danego celu ustalono na podstawie badań podstawowych przeprowadzonych z wykorzystaniem metody eksperckiej. Przyjęto zasadę, porównywalności, zgodnie z którą wagi kryteriów zawierają się w przedziale $[0;1]$, a suma wag dla kryteriów w obrębie każdego celu wynosi 1.

Wyznaczając znormalizowane wartości ocen poszczególnych wariantów decyzyjnych, obliczono następnie zagregowane wartości wskaźników oceny ZW (5) dla każdego z wariantów decyzyjnych. W ramach tego procesu dokonano sumowania ocen w obrębie poszczególnych celów dla każdego wariantu, a uzyskane wartości pomnożono przez odpowiadające im wagi celów (Tabela 4).

$$ZW_i = \sum_{c=1}^C \left(w_c \sum_{k=1}^{K(c)} f_i^{ck} \cdot w_{ck} \right) \quad (5)$$

Tabela 4. Wartości wskaźników oceny wariantów pomnożone przez wagi kryteriów

Cel	Warianty decyzyjne				
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
cel środowiskowy	0,09	0,11	0,10	0,15	0,36
cel ekonomiczny	0,16	0,16	0,15	0,27	0,14
cel techniczny	0,22	0,22	0,25	0,23	0,15
ZW_i	0,47	0,49	0,50	0,65	0,66

2.2.3. Ranking wariantów decyzyjnych

Wybór optymalnego wariantu został dokonany zgodnie ze (6).

$$a_{i*}: ZW_{i*} = \max_{i=1, \dots, N} \{ZW_i\} \quad (6)$$

Wariant a_{i*} , charakteryzujący się najwyższą wartością syntetycznego wskaźnika oceny, został uznany za najbardziej korzystny (Tabela 5).

Tabela 5. Ranking wariantów

Numer wariantu	Wartość syntetycznego wskaźnika oceny	Ranking
a_1	0,47	5
a_2	0,49	4
a_3	0,50	3
a_4	0,65	2
a_5	0,66	1

Analiza wyników przedstawionych w Tabeli 5 wskazuje, że najwyższą wartość syntetycznego wskaźnika oceny uzyskano dla wariant a_5 (0,66), co plasuje go na pierwszym miejscu rankingu. Kolejne pozycje zajęły warianty a_4 (0,65) oraz a_3 (0,50), natomiast najniżej oceniono warianty a_1 i a_2 . Wyniki wskazują, że pojazd elektryczny (a_5)

jest najbardziej optymalnym rozwiązaniem przy uwzględnieniu wszystkich kryteriów oceny.

3. Podsumowanie

Jednym z najistotniejszych wyzwań współczesnych systemów transportowych pozostaje ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko, w szczególności poprzez redukcję emisji spalin, wynikających z dużej liczby pojazdów poruszających się po drogach. Rozwiązaniem tego problemu może być nie tylko popularyzacja ekologicznych pojazdów, ale również maksymalne wykorzystanie dostępnych zasobów transportowych, zarówno prywatnych, jak i publicznych, co wpisuje się w ideę carsharingu.

Usługi carsharingowe odgrywają coraz większą rolę w kreowaniu zrównoważonych systemów transportu miejskiego, szczególnie w dużych aglomeracjach. Ich rosnąca popularność wiąże się jednak z wyzwaniami dotyczącymi logistyki, relokacji pojazdów, utrzymania infrastruktury oraz optymalnego doboru floty. W obliczu tych problemów, decydenci muszą podejmować decyzje oparte na analizie wielu, często sprzecznych kryteriów. W takich przypadkach zastosowanie znajdują metody wielokryterialnej analizy wspomagania decyzji, które pozwalają na porównanie różnych wariantów i wybór najlepszego rozwiązania.

W niniejszej pracy zaproponowano punktową metodę wielokryterialnej oceny, umożliwiającą ocenę różnych typów pojazdów pod względem zastosowanego w nich napędu, z uwzględnieniem aspektów środowiskowych, ekonomicznych i technicznych. Przeprowadzone badania umożliwiły opracowanie rankingu pojazdów, który odzwierciedla kluczowe potrzeby operatorów usług carsharingowych.

Uwzględniając wszystkie zdefiniowane kryteria oceny, wykazano, że najbardziej optymalnym rozwiązaniem dla systemów carsharingowych są pojazdy elektryczne BEV, a następnie pojazdy hybrydowe typu Plug-in. Najmniej korzystnym wyborem okazały się samochody z silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym (ZI)

Podsumowując, wyniki analizy wskazują, że operatorzy usług carsharingowych, planując modernizację lub rozwój floty, powinni w pierwszej kolejności wziąć pod uwagę pojazdy z napędem alternatywnym, w tym elektrycznym i hybrydowym. Samochody konwencjonalne mogą pełnić jedynie rolę uzupełniającą, a ich udział powinien być stopniowo ograniczany. Carsharing, poprzez integrację pojazdów ekologicznych oraz ograniczenie liczby samochodów w ruchu miejskim, może znacząco przyczynić się do redukcji emisji spalin i hałasu, wspierając rozwój zrównoważonego transportu.

Przeprowadzona analiza oraz zaproponowana punktowa metoda wielokryterialnej oceny wyboru pojazdów mogą stanowić cenne narzędzie wspomagające proces podejmowania decyzji przez operatorów carsharingowych, dostarczając precyzyjnych i obiektywnych wyników zgodnych z oczekiwaniami ekspertów i interesariuszy tego sektora.

Bibliografia:

1. Alencar, V. A., Rooke, F., Cocca, M., Vassio, L., Almeida, J., Vieira, A. B. (2019). Characterizing client usage patterns and service demand for car-sharing systems. *Information Systems*, 98, 101448. <https://doi.org/10.1016/j.is.2019.101448>.

2. Alonso-Almeida, M.d.M. (2022). To Use or Not Use Car Sharing Mobility in the Ongoing COVID-19 Pandemic? Identifying Sharing Mobility Behaviour in Times of Crisis. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19(5), 3127. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19053127>.
3. Ampudia-Renuncio, M., Guirao, B., Molina-Sánchez, R., de Alvarez, C. E. (2020). Understanding the spatial distribution of free-floating carsharing in cities: analysis of the new Madrid experience through a web-based platform. *Cities*, 98, 102593. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102593>.
4. AUTOCENTRUM, (2024). Independent automotive portal. Available online: <https://www.autocentrum.pl/dane-techniczne/peugeot/308/iii/hatchback-plug-in/silnik-hybrydowy-1.6-hybrid-180km-od-2021/>.
5. Awasthi, A., Breuil, D., Singh Chauhan, S., Parent, M., Reveillere, T. (2007). A Multicriteria Decision Making Approach for Carsharing Stations Selection. *J. Decis. Syst.*, 16, 57–78. <https://doi.org/10.3166/jds.16.57-78>.
6. Balac, M., Becker, H., Ciari, F., Axhausen, K.W. (2019). Modeling competing free-floating carsharing operators—A case study for Zurich, Switzerland. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 98, 101–117. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.11.011>.
7. Barbour, N., Zhang, Y., Mannering, F. (2020). Individuals' willingness to rent their personal vehicle to others: An exploratory assessment of peer-to-peer carsharing. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 5, 100138. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100138>.
8. Bardhi, F., Eckhardt, G. M. (2012). Access-based consumption: the case of car sharing. *Journal of Consumer Research*, 39(4), 881–898. <https://doi.org/10.1086/666376>.
9. Basiago, A. D. (1996). The search for the sustainable city in 20th century urban planning. *Environmentalist*, 16, 135–155. <https://doi.org/10.1007/BF01325104>.
10. Becker, H., Ciari, F., Axhausen, K. (2017). Comparing car-sharing schemes in Switzerland: User groups and usage patterns. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 97, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.004>.
11. Boldrini, C., Bruno, R., Laarabi, M. H. (2019). Weak signals in the mobility landscape: car sharing in ten European cities. *EPJ Data Science*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-019-0193-6>.
12. Brendel, A. B., Lichtenberg, S., Brauer, B., Nastjuk, I., & Kolbe, L. M. (2018). Improving electric vehicle utilization in carsharing: A framework and simulation of an e-carsharing vehicle utilization management system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.08.007>.
13. Bruglieri, M., Colomi, A., Luè, A. (2014). The relocation problem for the one-way electric vehicle sharing. *Networks*, 64(4), 292–305. <https://doi.org/10.1002/net.21569>.
14. Caggiani, L., Prencipe, L. P., Ottomanelli, M. (2020). A static relocation strategy for electric car-sharing systems in a vehicle-to-grid framework. *Transportation Letters*, Article in press, 1–10. <https://doi.org/10.1080/21680566.2020.1778456>.
15. Car Labelling, (2024). Recherche multicritères. Available online: [https://carlabelling.ademe.fr/recherche?searchString=&co2=&brand=peugeot&model=308&category=&range=&carbu%5B%5D=EL&transmission=&price=0%2C500000&maxconso=&energy=0%2C7&RechercherL=Rechercher&offset=0&orderby\[\]=particules%20desc&searchString=](https://carlabelling.ademe.fr/recherche?searchString=&co2=&brand=peugeot&model=308&category=&range=&carbu%5B%5D=EL&transmission=&price=0%2C500000&maxconso=&energy=0%2C7&RechercherL=Rechercher&offset=0&orderby[]=particules%20desc&searchString=)

16. Carrone, A. P., Hoening, V. M., Jensen, A. F., Mabit, S. E., Rich, J. (2020). Understanding car sharing preferences and mode substitution patterns: a stated preference experiment. *Transport Policy*, 98, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.010>.
17. Carteni, A., Cascetta, E., de Luca, S. (2016). A random utility model for park & carsharing services and the pure preference for electric vehicles. *Transport Policy*, 48, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.02.011>.
18. Chargemap, (2024). Statistics. Available online: <https://chargemap.com/about/stats/poland>.
19. Charoniti, E., Kim, J., Rasouli, S., Timmermans, H. J. (2020). Intrapersonal heterogeneity in car-sharing decision-making processes by activity-travel contexts: a context-dependent latent class random utility–random regret model. *International Journal of Sustainable Transportation*, 15(7), 501–511. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1768719>.
20. Clark, M., Gifford, K., Anable, J., Le Vine, S. (2015). Business-to-business carsharing: evidence from Britain of factors associated with employer-based carsharing membership and its impacts. *Transportation*, 42(3), 471–495. <https://doi.org/10.1007/s11116-014-9531-4>.
21. Deza, A., Huang, K., Metel, M. R. (2020). Charging station optimization for balanced electric car sharing. *Discrete Applied Mathematics*, 308, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2020.05.017>.
22. European Commission, (2017). MOMO Car-Sharing Project—Business Plan for Car-Sharing. Available online: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/momo_car-sharing_a_business_plan_for_car_sharing_en_en.pdf.
23. European Environment Agency, (2009). Ensuring quality of life in Europe's cities and towns. Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/quality-of-life-in-Europes-cities-and-towns>.
24. Ferrero, F., Perboli, G., Rosano, M., Vesco, A. (2018). Car-sharing services: An annotated review. *Sustainable Cities and Society*, 37, 501–518. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.020>.
25. Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (Eds.). (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5>.
26. Firnkorn, J., Müller, M. (2015). Free-floating electric car-sharing fleets in smart cities: The dawning of a post-private car era in urban environments? *Environmental Science & Policy*, 45, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.09.005>.
27. Fleury, S., Tom, A., Jamet, E., Colas-Maheux, E. (2017). What drives corporate carsharing acceptance? A French case study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 45, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.12.010>.
28. Hahn, R., Ostertag, F., Lehr, A., Büttgen, M., Benoit, S. (2020). I like it, but I don't use it: Impact of carsharing business models on usage intentions in the sharing economy. *Business Strategy and the Environment*, 29(3), 1404–1418. <https://doi.org/10.1002/bse.2430>.
29. Harms, S., & Truffer, B. (1998). *The Emergence of a Nationwide Carsharing Co-Operative in Switzerland*. Research Report; EAWAG: Dübendorf, Germany.

30. Hjortset, M. A., Böcker, L. (2020). Car sharing in Norwegian urban areas: Examining interest, intention and the decision to enrol. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 84, 102322. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102322>.
31. Hofmann, E., Hartl, B., Penz, E. (2017). Power versus trust – what matters more in collaborative consumption? *Journal of Services Marketing*, 31(6), 589–603. <https://doi.org/10.1108/JSM-03-2016-0118>.
32. Hu, S., Chen, P., Lin, H., Xie, C., Chen, X. (2018). Promoting carsharing attractiveness and efficiency: An exploratory analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 229–243. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.08.014>.
33. Hua, Y., Zhao, D., Wang, X., Li, X. (2019). Joint infrastructure planning and fleet management for one-way electric car sharing under time-varying uncertain demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 128, 185–206. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.012>.
34. inwestycje.pl, (2024). Available online: <https://inwestycje.pl/>.
35. Jacquillat, A., & Zoepf, S. (2018). Deployment and utilization of plug-in electric vehicles in round-trip car-sharing systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(2), 75–91. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1362417>.
36. Kim, D., Park, Y., Ko, J. (2019). Factors underlying vehicle ownership reduction among carsharing users: A repeated cross-sectional analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, 123–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2019.09.018>.
37. Ko, J., Ki, H., Lee, S. (2019). Factors affecting carsharing program participants' car ownership changes. *Transportation Letters*, 11(4), 208–218. <https://doi.org/10.1080/19427867.2017.1329891>.
38. Kubik, A. (2022). Impact of the Use of Electric Scooters from Shared Mobility Systems on the Users. *Smart Cities*, 5(3), 1079–1091. <https://doi.org/10.3390/smartcities5030054>.
39. Kypriadis, D., Pantziou, G., Konstantopoulos, C., Gavalas, D. (2020). Optimizing relocation cost in free-floating car-sharing systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(9), 4017–4030. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2020.2995197>.
40. Lagadic, M., Verloes, A., Louvet, N. (2019). Can carsharing services be profitable? A critical review of established and developing business models. *Transport Policy*, 77(3), 68–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.02.006>.
41. Li, W., Li, Y., Fan, J., Deng, H. (2017). Siting of Carsharing Stations Based on Spatial Multi-Criteria Evaluation: A Case Study of Shanghai EVCARD. *Sustainability*, 9, 152. <https://doi.org/10.3390/su11205627>.
42. Lu, X., Zhang, Q., Peng, Z., Shao, Z., Song, H., Wang, W. (2020). Charging and Relocation Optimization for Electric Vehicle Car-Sharing: An Event-Based Strategy Improvement Approach. *Energy*, 207, 118285. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118285>.
43. Ma, F., Guo, D., Yuen, K. F., Sun, Q., Ren, F., Xu, X., Zhao, C. (2020). The Influence of Continuous Improvement of Public Car-Sharing Platforms on Passenger Loyalty: A Mediation and Moderation Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2756. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082756>.

44. Meelen, T., Frenken, K., Hobrink, S. (2019). Weak Spots for Car-Sharing in The Netherlands? The Geography of Socio-Technical Regimes and the Adoption of Niche Innovations. *Energy Research & Social Science*, 52, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.023>.
45. Migliore, M., D'Orso, G., Caminiti, D. (2020). The Environmental Benefits of Carsharing: The Case Study of Palermo. *Transportation Research Procedia*, 48, 2127–2139. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.271>.
46. Millard-Ball, A., Murray, G., Schure, J. T., Fox, C., Burkhardt, J. (2005). TCRP Report 108. Car Sharing: Where and How It Succeeds. Transportation Research Board of the National Academies. <https://doi.org/10.17226/13559>.
47. Millard-Ball, A., Murray, G., ter Schure, J. (2005). Carsharing as Parking Management Strategy. In *Proceedings of the Transportation Research Board 85th Annual Meeting*, Washington DC, USA, 1 August 2005, 1–17.
48. Moein, E., Awasthi, A. (2020). Carsharing Customer Demand Forecasting Using Causal, Time Series and Neural Network Methods: A Case Study. *International Journal of Services and Operations Management*, 35(1), 36-57. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2020.10026105>.
49. Moeller, S., Wittkowski, K. (2010). The Burdens of Ownership: Reasons for Preferring Renting. *Managing Service Quality*, 20(2), 176–191. <https://doi.org/10.1108/09604521011027598>.
50. Motonews.pl (2024). Available online: <https://www.motonews.pl/auta-nowe/auto-14867-peugeot-308.html>.
51. Mugion, R. G., Toni, M., Di Pietro, L., Pasca, M. G., Renzi, M. F. (2019). Understanding the Antecedents of Car Sharing Usage: An Empirical Study in Italy. *International Journal of Quality and Service Sciences*, 11(4), 523-541. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-02-2019-0029>.
52. Muheim, P., Reinhardt, E. (1998). Car-Sharing: The Key to Combined Mobility Energy 2000. BFE Swiss Federal Office of Energy (Bern), 58–71.
53. Münzel, K., Boon, W., Frenken, K., Blomme, J., van der Linden, D. (2020). Explaining Carsharing Supply Across Western European Cities. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(4), 243–254. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1542756>.
54. Nair, R., Miller-Hooks, E. (2011). Fleet Management for Vehicle Sharing Operations. *Transportation Science*, 45(4), 524-540. <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0347>.
55. Namazu, M., Mackenzie, D., Zerriffi, H., Dowlatabadi, H. (2018). Is Carsharing for Everyone? Understanding the Diffusion of Carsharing Services. *Transport Policy*, 63(1), 189-199. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.12.012>.
56. Nitschke, L. (2020). Reconstituting Automobility: The Influence of Non-Commercial Carsharing on the Meanings of Automobility and the Car. *Sustainability*, 12(17), 7062. <https://doi.org/10.3390/su12177062>.
57. Nourinejad, M., Roorda, M. (2015). Carsharing Operations Policies: A Comparison Between One-Way and Two-Way Systems. *Transportation*, 42(3), 97–118. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9604-3>.
58. Panek. (2024). CAR SHARING. How Does Carsharing Work? Available online: <https://panekcs.pl/krok-po-kroku>.

59. Peterson, M., Simkins, T. (2019). Consumers' Processing of Mindful Commercial Car Sharing. *Business Strategy and the Environment*, 28(2), 457–465. <https://doi.org/10.1002/bse.2221>.
60. PEUGEOT. (2024). Available online: <https://www.peugeot.pl/>.
61. Repoux, M., Kaspi, M., Boyacı, B., Geroliminis, N. (2019). Dynamic Prediction-Based Relocation Policies in One-Way Station-Based Car-Sharing Systems with Complete Journey Reservations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 130, 82–104. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.10.004>.
62. Rodenbach, J., Jeffrey, M., Chicco, A., Diana, M. (2018). Car Sharing in Europe: A Multidimensional Classification and Inventory. Deliverable D2.1. Available online: <http://stars-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/06/STARS-D2.1.pdf>.
63. Roy, B. (1993). Decision Science or Decision-Aid Science? *European Journal of Operational Research*, 66(2), 184–203. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90312-B](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90312-B).
64. Ruhrort, L., Steiner, J., Graff, A., Hinkeldein, D., Hoffmann, C. (2014). Carsharing with electric vehicles in the context of users' mobility needs - Results from user-centred research from the BeMobility field trial (Berlin). *International Journal of Automotive Technology and Management*, 14(3/4), 286–305. <http://dx.doi.org/10.1504/IJATM.2014.065294>.
65. Schmöller, S., Weikl, S., Müller, J., Bogenberger, K. (2015). Empirical analysis of free-floating carsharing usage: The Munich and Berlin case. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.008>.
66. Schwabe, J. (2020). The evolution of cooperative electric carsharing in Germany and the role of intermediaries. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 37, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.08.007>.
67. Seo, J., Sheok, C. (2017). A Study on Optimizing Depot Location in Carsharing Considering the Neighborhood Environmental Factors. *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport*, 16(5), 49–59. <http://dx.doi.org/10.12815/kits.2017.16.5.49>.
68. Shaheen, S., Cohen, A. (2016). Innovative Mobility Carsharing Outlook Winter 2016: Carsharing Market Overview, Analysis, and Trends. *Innovative Mobility*. Available online: <http://innovativemobility.org/?project=innovative-mobility-carsharing-outlook-winter-2016>.
69. Shaheen, S., Chan, N., Micheaux, H. (2015). One-way carsharing's evolution and operator perspectives from the Americas. *Transportation*, 42, 519–536. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9607-0>.
70. Shaheen, S., Cohen, A. (2020). Innovative Mobility: Carsharing Outlook; Carsharing Market Overview, Analysis and Trends. Available online: <https://escholarship.org/uc/item/61q03282>.
71. Shaheen, S., Sperling, D., Wagner, C. (1999). A Short History of Carsharing in the 90's. *The Journal of World Transport Policy & Practice*, 5(3), 18–30.
72. Smart Rural Portal. Car-Sharing for Rural Areas. Available online: <https://www.smartrural21.eu/smart-solution/electric-car-sharing/>.
73. Statista Portal, (2024). Car-Sharing. Available online: <https://www.statista.com/outlook/mmo/shared-mobility/shared-rides/car-sharing/worldwide#users>.

-
74. Switch2Zero, (2024). Available online: <https://www.switch2zero.com/carbon-vehicle/identify84>.
75. Tennøy, A., Usterud Hanssen, J., Visnes Øksenholt, K. (2020). Developing a tool for assessing park-and-ride facilities in a sustainable mobility perspective. *Urban, Planning and Transport Research*, 8, 1–23. <https://doi.org/10.1080/21650020.2019.1690571>.
76. Terama, E., Peltomaa, J., Rolim, C., Baptista, P. (2018). The Contribution of Car Sharing to the Sustainable Mobility Transition. *Transfers*, 8(2), 113–121. <http://dx.doi.org/10.3167/TRANS.2018.080207>.
77. Tran, V., Zhao, S., Diop, E. B., Song, W. (2019). Travelers' Acceptance of Electric Carsharing Systems in Developing Countries: The Case of China. *Sustainability*, 11(19), 5348. <https://doi.org/10.3390/su11195348>.
78. Transport & Environment, (2023). CO2 and emissions performance of PHEV vehicles. Available online: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/02/2023_02_TE_PHEV_Testing_2022_TU_Graz_report_final.pdf.
79. Turoń, K. (2022). Carsharing Vehicle Fleet Selection from the Frequent User's Point of View. *Energies*, 15(17), 6166. <https://doi.org/10.3390/en15176166>.
80. Turoń, K. (2022). Multi-Criteria Decision Analysis during Selection of Vehicles for Car-Sharing Services—Regular Users' Expectations. *Energies*, 15(19), 7277. <https://doi.org/10.3390/en15197277>.
81. Turoń, K. (2022). Selection of Car Models with a Classic and Alternative Drive to the Car-Sharing Services from the System's Rare Users Perspective. *Energies*, 15(19), 6876. <https://doi.org/10.3390/en15196876>.
82. Turoń, K., Kubik, A. (2021). Business Innovations in the New Mobility Market during the COVID-19 with the Possibility of Open Business Model Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(3), 195. <https://doi.org/10.3390/joitmc7030195>.
83. Turoń, K., Kubik, A., Chen, F. (2022). What Car for Car-Sharing? Conventional, Electric, Hybrid or Hydrogen Fleet? Analysis of the Vehicle Selection Criteria for Car-Sharing Systems. *Energies*, 15(12), 4344. <https://doi.org/10.3390/en15124344>.
84. United Nations, (2024). Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics. Available online: <https://population.un.org/wup/Download/>.
85. Valor, C. (2020). Anticipated emotions and resistance to innovations: the case of p2p car sharing. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 37, 50–65.
86. Vincke, P. (1992). *Multicriteria Decision - Aid*. Chichester: John Wiley & Sons.
87. Wang, N., Guo, J., Liu, X., Liang, Y. (2021). Electric vehicle car-sharing optimization relocation model combining user relocation and staff relocation. *Transportation Letters*, 13(4), 315–326. <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1728843>.
88. Weikl, S., Bogenberger, K. (2015). A practice-ready relocation model for free-floating carsharing systems with electric vehicles – Mesoscopic approach and field trial results. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 57, 206–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.06.024>.
89. Wielński, G., Trepanier, M., Morency, C. (2017). Electric and hybrid car use in a free-floating carsharing system. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11, 161–169. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1220653>.

90. Wilhelms, M. P., Henkel, S., Falk, T. (2017). To earn is not enough: a means-end analysis to uncover peer-providers' participation motives in peer-to-peer carsharing. *Technological Forecasting and Social Change*, 125, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.03.030>.
91. World Health Organization, (2006). Health effects and risks of transport systems: the HEARTS project. Available online: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0013/91102/E88772.pdf, [Accessed on: 24.05.2024].
92. Xue, Y., Zhang, Y., Chen, Y. (2019). An Evaluation Framework for the Planning of Electric Car-Sharing Systems: A Combination Model of AHP-CBA-VD. *Sustainability*, 11(20), 5627. <https://doi.org/10.3390/su11205627>.
93. Zhang, Y., Li, L. (2020). Intention of Chinese college students to use carsharing: An application of the theory of planned behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 75, 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.09.021>.

Application of the multi-criteria scoring method in the optimization of carsharing fleets

Abstract. The limitation of individual transport within the structure of passenger traffic is one of the main challenges of contemporary transport policy, particularly in urban areas, where congestion generates significant economic costs and adversely impacts the environment and public health. One solution supporting the reduction of traffic intensity is carsharing, whose popularity has been steadily increasing. Despite numerous studies analyzing the social, environmental, and economic aspects of such systems, the issue of optimal vehicle selection for carsharing fleets remains insufficiently explored.

The aim of this study is to determine the optimal selection of vehicles with different propulsion types for carsharing fleets, taking into account economic, technical, and environmental criteria. The research involved an analysis of secondary data related to carsharing fleets in Poland, expert surveys, and the application of a multi-criteria decision support method. The analysis was conducted for five segment C vehicles with the following propulsion types: conventional, hybrid, plug-in hybrid, and electric.

The results indicated that, considering all criteria simultaneously, electric vehicles represent the most optimal solution under current conditions of carsharing systems. The proposed method can serve as a practical tool for carsharing operators and municipal authorities in decision-making regarding the selection and modernization of vehicle fleets.

Keywords: sustainable development, carsharing, multi-criteria scoring method

Opis zależności przebiegowych dla komputerowych systemów srk

Michał Grzybowski^{1,*}, Jakub Młyńczak¹,
Lucyna Sokołowska²

¹ Politechnika Śląska

² Instytut Kolejnictwa

Streszczenie. Bezpieczny i sprawny ruch pociągów na liniach kolejowych zapewniają systemy sterowania ruchem kolejowym (srk), które realizują kontrolę zależności między elementami infrastruktury. W systemach stacyjnych kluczowe są zależności przebiegowe, związane z umożliwieniem przejazdu pociągów po określonych drogach jazdy. Współczesne komputerowe systemy srk, dzięki większej funkcjonalności i mniejszym gabarytom, umożliwiają bardziej złożone układy torowe oraz obsługę tysięcy przebiegów w ramach jednej instalacji. Praca koncentruje się na opisie i realizacji zależności przebiegowych w aplikacjach srk oraz na weryfikacji poprawności tych rozwiązań. Na podstawie analizy istniejących systemów oraz wymagań PKP PLK zaproponowano uniwersalny formalizm opisu przebiegów, niezależny od konkretnego układu torowego. Opracowano także algorytmy i narzędzia do automatycznej weryfikacji wykluczania przebiegów sprzecznych, co znacznie ogranicza pracochłonność oraz skraca czas testowania aplikacji. Proponowane rozwiązania upraszczają konstrukcję nastawnicy, umożliwiają automatyzację przygotowania danych aplikacyjnych i wspierają utrzymanie wysokiego poziomu jakości systemu srk.

Słowa kluczowe: sterowanie ruchem kolejowym, zależności, sygnalizacja kolejowa

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie do tematyki pracy

Sprawny i bezpieczny ruch pociągów na linii kolejowej jest zapewniany przez systemy sterowania ruchem kolejowym. Systemy te zapewniają bezpieczeństwo w transporcie kolejowym przede wszystkim przez kontrolę zależności. Zależności są podstawowym pojęciem sterowania ruchem kolejowym i są definiowane przez [1] jako środki techniczne

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Grzybowski, M., Młyńczak, J., Sokołowska, L. (2025). Opis zależności przebiegowych dla komputerowych systemów srk, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 79–90, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

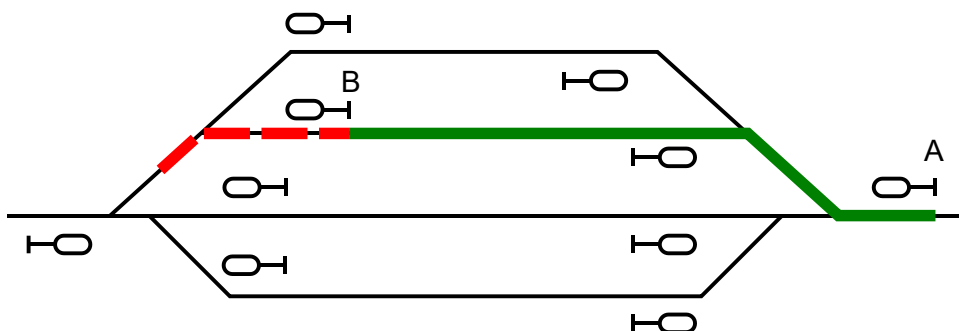
*Autor do korespondencji

E-mail adres: michal.grzybowski@polsl.pl, (M. Grzybowski)

ORCID iD: 0000-0002-4841-147X (M. Grzybowski), 0000-0003-2947-7980 (J. Młyńczak), 0000-0002-0699-4312 (L. Sokołowska)

zapewniające, że dana czynność może zostać wykonana wyłącznie po spełnieniu określonych warunków.

W systemach stacyjnych znaczna część zależności jest związana z realizacją przebiegów, tj. z zapewnieniem warunków do przejazdu pociągu po określonych drogach jazdy (Rysunek 1). Na etapie projektowania instalacji systemu srk (sterowania ruchem kolejowym), projektant określa wszystkie możliwe jazdy taboru (przebiegi), jakie mają się odbywać pod nadzorem systemu srk. Następnie na etapie budowy systemu, w systemie wprowadzane są funkcjonalności umożliwiające realizację wszystkich zależności wskazanych w projekcie.



Rys. 1. Przykład przebiegu (źródło: opracowanie własne)

Obecnie szeroko stosowane są komputerowe systemy srk, w których zależności są realizowane przez oprogramowanie. Taka technika realizacji umożliwia zwiększenie funkcjonalności systemu oraz ogranicza jego gabaryty. Pozwala to na zwiększenie skomplikowania układu torowego oraz wzrost liczby przebiegów obsługiwanych przez system. Obecnie coraz częściej spotyka się złożone instalacje, w których może być zaimplementowanych nawet kilka tysięcy przebiegów. Wzrost ilości przebiegów sprawia, że wzrasta czasochłonność zaprojektowania i wykonania części zależnościowej systemu srk. Sprawia to, że uzasadnione staje się poszukiwanie metod implementacji zależności przebiegowych w sposób, który ograniczy czasochłonność implementacji.

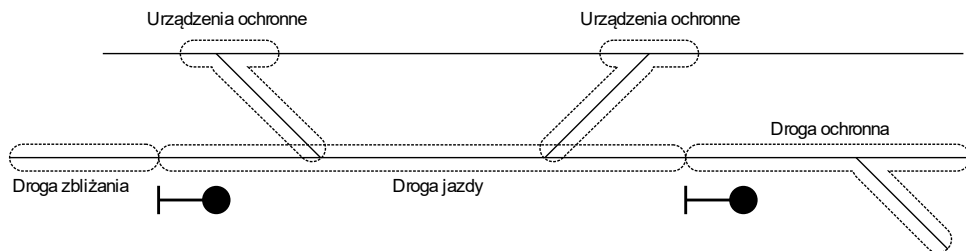
Niniejsza praca przedstawia propozycję opisu zależności przebiegowych w komputerowych systemach srk. Zaprezentowana metoda charakteryzuje się uproszczeniem opisu w stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań, co ułatwia opracowanie konfiguracji systemu oraz weryfikację jej poprawności.

1.2. Przebiegi

Jak nakreślono w sekcji 1.1, stacyjne systemy srk zabezpieczają ruch pociągów odbywających się w określonych przebiegach. Według podręcznika [2] przebieg składa się z następujących części:

- Drogi jazdy – fragmentu toru, przez który ma przejechać pojazd kolejowy,
- Drogi ochronnej – fragmentu toru następującego po drodze jazdy, na który mógłby wjechać pojazd kolejowy w przypadku niezatrzymania się przed punktem

- końcowym drogi jazdy, np. na skutek zmniejszenia siły hamowania pojazdu z powodu niekorzystnych warunków atmosferycznych,
- Urządzeń ochronnych (inaczej ochrony bocznej) – urządzeń, które chronią pojazd jadący w drodze jazdy i drodze ochronnej przed najechaniem przez inny pojazd kolejowy,
 - Drogi zbliżania – fragmentu toru poprzedzającego drogę jazdy.
- Elementy przebiegu przedstawia Rysunek 2.



Rys. 2. Elementy przebiegu (źródło: opracowanie własne)

System srk wspomaga dyżurnego ruchu w procesie nastawiania przebiegu przez kontrolę możliwości nastawienia przebiegu oraz automatyzację nastawiania przebiegu. Po otrzymaniu żądania nastawienia przebiegu, system:

1. Sprawdza, czy są spełnione wszystkie zależności,
2. (w przypadku systemów automatyzujących proces nastawiania przebiegu) Nastawia do wymaganych położenia elementy przebiegu (przede wszystkim zwrótnice),
3. Utwierdza przebieg (unieruchamia elementy przebiegu i uniemożliwia nastawienie przebiegów sprzecznych) i wyświetla sygnał zezwalający na sygnalizatorze początkowym przebiegu.

System srk powinien samoczynnie zwalniać przebiegi po wykryciu przejazdu taboru. W prostszych systemach przebieg był zwalniany w całości po wykryciu przejazdu. W nowoczesnych systemach srk dla zwiększenia przepustowości posterunku stosowane jest zwalnianie sekcyjne przebiegu. Rozwiązanie to polega na zwalnianiu fragmentów przebiegu (sekcji przebiegu) po wykryciu przejazdu pociągu przez określony punkt przebiegu. Rozwiązanie to pozwala na zwiększenie przepustowości posterunku, ponieważ do zwolnienia elementów drogi przebiegu na potrzeby innej jazdy nie jest wymagany przejazd przez całą drogę jazdy przebiegu.

Przebieg jest fundamentalnym pojęciem teorii sterowania ruchem kolejowym. Z rangi na znaczenie przebiegu w procesie zabezpieczania ruchu pociągów, praktyka kolejowa wypracowała standardowe metody opisu przebiegów w projekcie wykonawczym systemu srk. Standardową metodą opisu przebiegów jest tablica zależności (Rysunek 3). Tablica ta dla każdego przebiegu, jaki powinien być możliwy do nastawienia, opisuje:

- przebiegi, które nie mogą być realizowane jednocześnie (przebiegi sprzeczne),
- wymagane położenia zwrótnic,

- odcinki torowe i zwrótnicowe biorące udział w przebiegu (odcinki, które muszą być niezajęte w celu umożliwienia nastawienia przebiegu i wyświetlenia sygnału zezwalającego),
- inne elementy biorące udział w przebiegu (np. samoczynne sygnalizacje przejazdowe w przypadku tablicy zależności przedstawionej na Rysunku 3).

L.P.	Przebieg	OPIS PRZEBIEGU		WARIANTY										ZWROTNICE										LICZNIKOWA KONTROLA NIEZAJĘTOŚCI TORÓW I ROZJAZDÓW					SSP km 2,151	
				Z					W																					
		Skład		Dokład		Z		W		Z		W		Z		W		Z		W		Z		W		Z		W		
		A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀	A ² ₁₀₀	A ¹ ₁₀₀		A ² ₁₀₀
1	A ¹ ₁₀₀	Poznań Główny, tor 2PG	Poznań Wola, tor 2PW	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	A ² ₁₀₀	Poznań Główny, tor 2PG	Poznań Wola, tor 1PW	z	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	A ³ ₁₀₀	Poznań Główny, tor 2PG	Poznań Wola, tor 1PW	w	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	A ⁴ ₁₀₀	Poznań Główny, tor 2PG	Suchy Las, 2S	z	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	A ⁵ ₁₀₀	Poznań Główny, tor 2PG	Suchy Las, 2S	w	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	A ⁶ ₁₀₀	Poznań Główny, tor 2PG	Suchy Las, 1S	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	A ⁷ ₁₀₀	Poznań Wola, tor 2PW	Poznań Główny, tor 1PG	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	K ¹ ₁₀₀	Poznań Wola, tor 2PW	Poznań Główny, tor 2PG	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9	K ² ₁₀₀	Poznań Wola, tor 2PW	Poznań Główny, tor 2PG	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Rys. 3. Fragment tablicy zależności posterunku odgałęźnego Poznań PoD (źródło: [3])

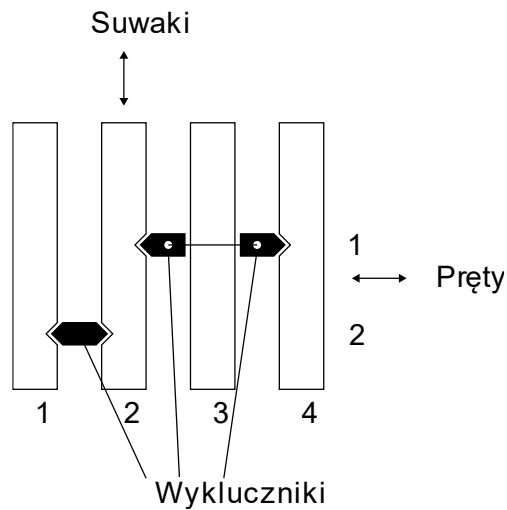
Należy podkreślić, że tablica zależności nie wskazuje jednoznacznie sposobu realizacji zależności przebiegowych w systemie. Tablica przede wszystkim nie określa podziału przebiegu na sekcje przebiegu i nie opisuje zasad kontroli przejazdu pociągu przez przebieg. W praktyce kwestie te są rozstrzygane na etapie projektowania obwodów zależnościowych (w przypadku systemów przekąźnikowych) lub na etapie opracowania konfiguracji komputerowego systemu srk w oparciu o tablicę zależności oraz plan schematyczny posterunku.

2. Istniejące rozwiązania

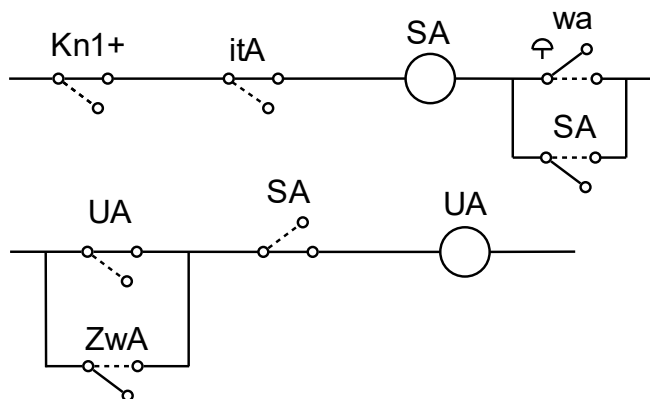
Systemy sterowania ruchem kolejowym mają długą historię. Historycznie pierwsze były urządzenia mechaniczne, w których wszystkie zależności były realizowane na drodze mechanicznej, w skrzyniach zależności ([4]). Konstrukcja skrzyni zależności była tak dobrana, aby przełożenie drążków inicjujących konkretne czynności nastawcze było możliwe tylko przy określonym stanie urządzeń. Efekt ten osiągnano na rozmaite sposoby, np. w angielskich skrzyniach zależności czynności nastawcze były realizowane przez ruchy suwaków, natomiast zależności były realizowane przez zestawy wykluczników uniemożliwiających pewne układy położeń suwaków (Rysunek 4).

Systemy mechaniczne charakteryzowały się w prostotą konstrukcji, ale były ograniczone pod kątem ilości zależności, jakie mogły realizować. W praktyce skrzynie zależności pozwalały na realizację od kilkunastu do kilkudziesięciu przebiegów. Większe skrzynie zależności były problematyczne w realizacji ze względu na rozmiar urządzeń oraz ich masę.

Wraz z rozwojem techniki sterowania ruchem kolejowym opracowano doskonalsze systemy srk. Znaczącym krokiem naprzód w stosunku do urządzeń mechanicznych były urządzenia przekąźnikowe, w których zależności były realizowane przez odpowiednie układy przekąźnikowe (Rysunek 4). W przykładzie na Rysunku 4 przedstawiona jest zależność między utwierdzeniem przebiegu od semafora A (wzbudzenie przekąźnika SA) od niezajętości obwodu torowego itA (kontrola zestyku czynnego przekąźnika itA) oraz od znajdowania się zwrótnicy 1 w położeniu plus (kontrola zestyku czynnego przekąźnika Kn1+).



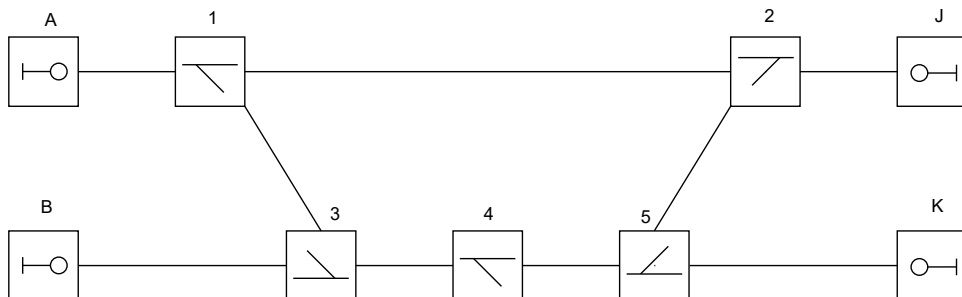
Rys. 3. Realizacja zależności w angielskiej skrzyni zależności (źródło: opracowanie własne na podstawie [5])



Rys. 4. Fragment przekąźnikowych obwodów zależnościowych (źródło: opracowanie własne)

W kolejnictwie polskim szeroko stosowany był system E (opisany albumem schematów [6]), w którym projektowano dedykowane obwody zależnościowe dla każdego przebiegu. Systemy tego typu są nazywane systemami przebiegowymi. Przekąźnikowe systemy przebiegowe dobrze nadawały się do nieskomplikowanych posterunków, ale były problematyczne w przypadku dużych instalacji – wymagały zaprojektowania i wykonania dużej liczby obwodów przekąźnikowych. Problem ten starano się wyeliminować. Jednym z rozwiązań były systemy blokowe, takie jak np. system IZH-111. W urządzeniach tego typu wyróżniano standardowe moduły (bloki), dedykowane do obsługi konkretnego

urządzenia – semafora wjazdowego, semafora wyjazdowego, rozjazdu itp. Bloki charakteryzowały się tym, że miały jednolity interfejs, co umożliwiało swobodne łączenie bloków kablami zależnościowymi. Takie rozwiązanie upraszczało zarówno projektowanie jak i wykonanie systemu. Projektant odwzorowywał układ torowy posterunku połączeniami między blokami (Rysunek 5) oraz dobierał nastawy poszczególnych bloków. Wykonawca systemu mógł natomiast wyprodukować i zweryfikować poprawność działania bloków w warunkach laboratoryjnych, a działania instalacyjne ograniczyć do wykonania połączeń zależnościowych między blokami oraz do podłączenia urządzeń zewnętrznych i pulpitu kostkowego.



Rys. 5. Powiązania bloków w systemie blokowym (źródło: opracowanie własne)

W systemie blokowym zależności były realizowane na podstawie połączeń blokowych między blokami odwzorowującymi układ torowy posterunku, w związku z czym urządzenia tego typu są nazywane systemami geograficznymi. Projektowanie urządzeń geograficznych było uproszczone w stosunku do urządzeń przebiegowych, ale same urządzenia były bardziej skomplikowane. Bloki z założenia były uniwersalne, co wymuszało przygotowanie ich do obsługi różnych sytuacji ruchowych. Obsługa konkretnych sytuacji ruchowych była włączana przez odpowiednie zwory i nastawy, co sprawiało, że urządzenia blokowe mogły zawierać sumarycznie w blokach więcej przekaźników / połączeń niż równoważny system przebiegowy.

Długi czas rozwoju i eksploatacji urządzeń przekaźnikowych (od końca lat czterdziestych do lat dziewięćdziesiątych) sprawił, że są one nadal często spotykane, a zarządcy infrastruktury dorobili się standardowych rozwiązań na swoich sieciach, jak np. system E na sieci PKP PLK. Dostępność opisu standardowych rozwiązań (takich jak np. [6]) wpłynął na kształt systemów komputerowych. Powszechnie stosowaną techniką realizacji zależności w systemach komputerowych są równania logiczne, będące adaptacją języków drabinkowych ze sterowników PLC do specyfiki systemów srk. Przykładami tego typu systemów są np. systemy EBILock ([7]) czy VPI ([8]). W systemach opartych na formalizmie równań logicznych stan systemu jest opisywany przez ciąg zmiennych stanu. Zachowanie zmiennych stanu jest opisane przez wyrażenia logiczne (równania logiczne), które określają w jakich warunkach (przy jakich układach zmiennych systemu) dana zmienna stanu ma przyjąć określoną wartość. W istocie systemy tego typu zastępują przekaźnik zmienną stanu – projektowi obwodu cewki przekaźnika (obwodu określającego warunki załączenia przekaźnika) odpowiada równanie logiczne zmiennej, które określa,

w jakich sytuacjach zmienna ma przyjąć zadaną wartość. Sprawia to, że producenci systemów komputerowych mogą angażować do rozwoju systemów komputerowych specjalistów z doświadczeniem w pracy z systemami przekąźnikowymi. Umożliwia to również wykorzystanie standardowych albumów schematów, którymi dysponuje część zarządców infrastruktury. Konsekwencją takiego rozwiązania jest również to, że systemy komputerowe można klasyfikować podobnie jak system przekąźnikowe jako system przebiegowe (w których opisano wprost zależności danego przebiegu) lub systemy geograficzne (w których zależności wynikają z układu torowego posterunku).

Zarówno systemy przebiegowe jak i systemy geograficzne realizowane w technice przekąźnikowej lub w technice komputerowej opartej o równania logiczne mają pewne wady. Systemy przebiegowe wymagają opracowania znacznej liczby obwodów / równań logicznych, a forma obwodów / równań logicznych niejednokrotnie komplikuje rozwiązanie. Ponadto względy praktyczne (skomplikowanie obwodów i chęć ograniczenia liczby stosowanych przekąźników) sprawiają, że obwody zależnościowe różnych przebiegów mogą być ze sobą powiązane (np. zależności mogą być realizowane w przekąźnikach odpowiadających semaforom początkowym przebiegu – obwód cewki takiego przekąźnika obejmuje warunki kontrolowane dla każdego przebiegu realizowanego spod semafora).

Systemy geograficzne charakteryzują się natomiast znacznym skomplikowaniem bloków oraz trudnością w analizie – zależności realizowane przez tego typu urządzenia nie są zapisane wprost, a wynikają z połączeń między blokami i ich nastaw. Wspólną wadą obu typów systemów jest trudność w automatyzacji procesu projektowego. W przypadku systemów przebiegowych automatyzacja wymaga zakodowania reguł tworzenia poszczególnych obwodów i zasad ich grupowania, natomiast w przypadku systemów geograficznych głównym problemem jest automatyzacja doboru nastaw poszczególnych bloków.

3. Opis zależności przebiegowych

Technika komputerowa pozwala na zbliżenie opisu zależności przebiegowych do formy projektu. Przebieg może być opisany jako struktura składająca się z następujących atrybutów:

- Sygnalizatora początkowego przebiegu (sygnalizatora),
- Punktu końcowego przebiegu (sygnalizatora lub toru),
- Drogi zbliżania (ciągu obwodów torowych),
- Ciągu sekcji przebiegu, z których każda składa się z:
 - Elementów drogi jazdy (ciągu obwodów torowych i rozjazdów wraz z położeniem),
 - Elementów ochronnych (ciągu obwodów torowych, rozjazdów wraz z położeniem i sygnalizatorów),
- Drogi ochronnej przebiegu (obwodów torowych, rozjazdów wraz z położeniem i sygnalizatorów).

Powyższa struktura jest na tyle prosta, że może w łatwy sposób zostać sformalizowana w postaci gramatyki formalnej, a następnie stanowić dane wejściowe programu komputerowego. Autorzy w trakcie prac opracowali prototyp modułu zależnościowego

komputerowego systemu srk, w którym opis przebiegu ma następującą postać, wiernie odwzorowującą powyższą strukturę:

```
route <identyfikator przebiegu>
  start_signal <sygnalizator początkowy>
  end_signal <sygnalizator końcowy>
  berth <droga zbliżania>
  part (sekcja przebiegu)
    route_elements (elementy drogi jazdy)
    flank_elements (elementy ochrony bocznej)
  ...
overlap_elements (elementy drogi ochronnej)
end
```

Przykładowy opis przebiegu wygląda następująco:

```
route POC_SEM_A_FICT_2PW_ppp
  start_signal SEM_A
  end_signal FICT_2PW
  berth IT2PG
  part
    route_elements
      track ITA
  part
    route_elements
      plus ZW2
      plus ZW3
      track IZ23
    flank_elements
      plus ZW1
      minus ZW4
  overlap_elements
    track IT2PW
end
```

Przykład ten określa przebieg POC_SEM_A_FICT_2PW_ppp między sygnalizatorem SEM_A a punktem końcowym FICT_2PW (reprezentującym tor szlakowy 2PW). Drogą zbliżania jest obwód torowy IT2PG. Przebieg składa się z dwóch sekcji przebiegu:

1. Sekcji składającej się z obwodu torowego ITA,
2. Sekcji składającej się z obwodu zwrotnicowego IZ23, rozjazdów 2, 3 w położeniu plus oraz rozjazdów 1 i 4 jako urządzeń ochronnych w położeniach odpowiednio plus i minus.

Przebieg ten definiuje również drogę ochronną składającą się z obwodu torowego IT2PW (odcinka szlakowego). Jak pokazuje powyższy przykład, przyjęta forma opisu jest czytelna i naturalna. Opis ten jest również prosty w obsłudze przez oprogramowanie:

1. Przebieg może być nastawiony, jeżeli:

- a. Żaden z elementów nie jest elementem innego realizowanego przebiegu, realizację tej funkcji przedstawia praca [9],
- b. Elementy drogi jazdy, urządzeń ochronnych i drogi ochronnej są w stanie umożliwiającym nastawienie przebiegu (zgodnie z zasadami przyjętymi w oprogramowaniu modułu zależnościowego),
2. Sygnał zezwalający na sygnalizatorze początkowym przebiegu może być wyświetlony, jeżeli elementy drogi jazdy, urządzeń ochronnych i drogi ochronnej są w stanie umożliwiającym wyświetlenie sygnału zezwalającego (zgodnie z zasadami przyjętymi w oprogramowaniu modułu zależnościowego),
3. Opis definiuje obwody torowe drogi jazdy przebiegu w kolejności przejazdu, oprogramowanie musi kontrolować zgodność zajmowania i zwalniania obwodów torowych zgodnie z własnymi regułami i zadaniem porządkiem obwodów,
4. Opis jawnie wskazuje ilość sekcji przebiegów, elementy wchodzące w ich skład. Oprogramowanie musi śledzić sekwencje zajmowania i zwalniania obwodów torowych, a po wykryciu zwolnienia ostatniego obwodu torowego danej sekcji zwolnić z potwierdzenia elementy drogi jazdy i urządzeń ochronnych przynależnych do danej sekcji przebiegu.

Powyższy opis stanowi szkic sposobu obsługi struktur opisujących przebiegi, ale pokazuje, że algorytmy przetwarzania są zasadniczo nieskomplikowane i naturalne.

4. Automatyzacja przygotowania i weryfikacji opisu

Przygotowanie opisu w zaproponowanym formalizmie wymaga większego nakładu prac niż przygotowanie opisu dla systemu geograficznego (w którym opis składa się zasadniczo z listy bloków, ich nastaw oraz połączeń między blokami). W trakcie badań autorów stwierdzono jednak, że przygotowanie opisu w zaproponowanym formalizmie można w łatwy sposób zautomatyzować. Opis przebiegu składa się z dwóch zasadniczych części – listy obwodów torowych, uporządkowanych w kolejności przejazdu oraz elementów ochronnych. Elementy ochronne są powiązane z:

- Rozjazdami w drodze jazdy (elementy ochrony bocznej są wyznaczane przez postać drogi jazdy oraz położenie rozjazdu w przebiegu),
- Punktem końcowym przebiegu (droga ochronna).

Podział przebiegu na sekcje leży w kwestii projektanta, ale naturalnym podziałem jest podział według obwodów torowych drogi jazdy – jedna sekcja przebiegu na wszystkie elementy znajdujące się na danym obwodzie torowym i związane z nimi elementy ochronne. Powyższe obserwacje pozwalają na zaproponowanie prostego algorytmu generowania opisu przebiegu. Danymi wejściowymi algorytmu są:

- Opis układu torowego posterunku, wraz z przyporządkowaniem urządzeń sterowania ruchem (sygnalizatorów, zwrotnic i obwodów torowych) do elementów układu torowego,
- Opis dróg ochronnych dla każdego sygnalizatora / punktu końca przebiegu,
- Opis ochrony bocznej każdego położenia rozjazdu, który może być elementem drogi jazdy.

Sam algorytm generowania opisu przebiegów jest następujący:

1. Dla każdego sygnalizatora X :
 - a. Określ obwód torowy OTZ poprzedzający sygnalizator X ,

- b. Znajdź wszystkie ciągi S kolejnych obwodów torowych prowadzących do sygnalizatorów w kierunku jazdy lub punktów końcowych przebiegu,
- c. Dla każdego ciągu S utwórz opis przebiegu w następujący sposób:
 - i. Przyjmij X jako sygnalizator początkowy,
 - ii. Przyjmij OTZ jako drogę zbliżania,
 - iii. Przyjmij sygnalizator Y , do którego prowadzi ciąg S jako punkt końcowy,
 - iv. Dla każdego kolejnego obwodu torowego OT w ciągu S utwórz sekcję przebiegu:
 1. Uwzględnij OT jako element drogi jazdy utworzonej sekcji,
 2. Uwzględnij urządzenia srk (rozjazdy, przejazdy kolejowo-drogowe) leżące na obwodzie OT jako elementy drogi jazdy,
 3. Uwzględnij urządzenia ochronne związane z rozjazdami w drodze jazdy utworzonej sekcji jako elementy ochronne,
 - v. Przyjmij drogę ochronną przyporządkowaną do punktu końcowego przebiegu jako drogę ochronną przebiegu.

Algorytm ten redukuje nakład prac potrzebnych na przygotowanie opisu wszystkich przebiegów do przygotowania opisu układu torowego posterunku, urządzeń ochronnych i dróg ochronnych powiązanych z danymi elementami układu torowego.

Innym problemem zaproponowanego formalizmu (współdzielonym z systemami geograficznymi) jest brak jawnego wskazania przebiegów sprzecznych. Problemu tego teoretycznie unikają systemy w strukturze przebiegowej, w przypadku których projektant wprost definiuje wyrażenia logiczne / obwody przekątnikowe kontrolujące brak utwierdzonych przebiegów sprzecznych. Należy jednak zauważyć, że nawet systemy w strukturze przebiegowej stają się nieporęczne w przypadku dużych instalacji, które mogą udostępniać do kilku tysięcy przebiegów. Zaproponowany formalizm ma jedną taką zaletę, że opisy przebiegów kompletne i niezależne od siebie. Pozwala to (przy odpowiedniej konstrukcji modułu zależnościowego lub dokładnej specyfikacji funkcji wykluczania przebiegów sprzecznych) na automatyzację weryfikacji sprzeczności przebiegów. Algorytm jest prosty w przypadku modułu zależnościowego umożliwiającego utwierdzenie przebiegu z pominięciem zależności od stanu urządzeń:

1. Dla każdego przebiegu P_1 :
 - a. Utwierdź przebieg P_1 z pominięciem zależności od stanu urządzeń,
 - b. Dla każdego przebiegu P_2 :
 - i. Sprawdź, czy moduł zależnościowy pozwala na utwierdzenie przebiegu P_2 z pominięciem zależności od stanu urządzeń – jeżeli tak, to oznacz przebiegi P_1 i P_2 jako niesprzeczne, w przeciwnym przypadku jako sprzeczne,
 - c. Zwolnij przebieg P_1 .

W celu potwierdzenia poprawności proponowanych rozwiązań opracowano prototyp modułu zależnościowego oraz prototypy narzędzi realizujących wyżej opisane algorytmy. Prototyp generatora opisu przebiegów opracowano w 1116 wierszach języka Haskell, natomiast weryfikator sprzeczności przebiegów w 124 wierszach języka C.

5. Podsumowanie

W pracy nakreślono problematykę opisu zależności przebiegowych w systemach srk. Przedstawiono przegląd rozwiązań stosowanych w systemach różnych typów

i zwyczajową klasyfikację. Dla systemów komputerowych zaproponowano autorskie rozwiązanie opisu zależności przebiegowych, które charakteryzuje się:

1. Prostotą opisu,
2. Kompletnością opisu przebiegu,
3. Łatwością przetwarzania w oprogramowaniu.

Wskazano również na praktyczne zalety formalizmu – możliwość automatyzacji tworzenia opisu przebiegów oraz weryfikacji sprzeczności przebiegów.

Bibliografia:

1. PKP Polskie Linie Kolejowe (2019). Ie-4 - Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Polskie Linie Kolejowe S.A.
2. Dąbrowa-Bajon, M. (2014). Podstawy Sterowania Ruchem Kolejowym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
3. Stránský, M. (2020). Plan schematyczny posterunku odgałęźnego Poznań PoD (Poznań Jeżyce). AŽD Praha.
4. Huang, L. (2020). The Past, Present and Future of Railway Interlocking System, in: IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering, 170–174, Pekin.
5. Such, WH. (1956). Mechanical and Electrical Interlocking (British Practice), The Institution of Railway Signal Engineers.
6. Szeniański, Z., Makala, J. (1989). Album schematów przekaźnikowych urządzeń zabezpieczenia ruchu kolejowego typu E, Centralne Biuro Projektowo-Badawcze Budownictwa Kolejowego.
7. Hagelin, G. (1998). ERICSSON Safety System for Railway Control, in: Software Diversity in Computerized Control Systems, Springer.
8. van Vlijmen, SFM., Groote, JF., Koorn, JWC. (1999). The Vital Processor Interlocking, Electronic Notes in Theoretical Computer Science 21, 1–56.
9. Grzybowski, M., Młyńczak, J. (2021). Reprezentacja wykluczeń w komputerowych systemach srk, in: Perzyński, T. (ed), Zagadnienia Inżynierii Transportu i Mechaniki, 47–54, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.

Description of route dependencies for computer-based railway signalling systems

Abstract. Efficient and safe movement of trains on railway line is assured by railway signalling systems. These systems assure safety of railway transport by preservation of dependencies. A significant fraction of dependencies is related to route setting, i.e. preparation of train travel through the specified running paths. The use of computer technology in modern systems allows for greater functionality and smaller physical devices dimension than older types of systems. This results in increased complexity of track layout and increased area of a single interlocking.

Systems with large number of routes, over a thousand, are becoming increasingly common.

The research is concerned with the problem of describing route dependencies in computer based interlocking configuration. During the research existing solutions were analyzed and a method of describing route dependencies based on requirements of PKP PLK was proposed. The proposed solution was verified by functional testing of prototype interlocking.

A formalism for describing the route was devised, which allows for dependency realization by track layout independent computer program. In addition, algorithms for automatic verification of conflicting route exclusion correctness have been designed, which allow for reduction of effort required for verification of conflicting route exclusion function.

The proposed method of describing route dependencies allows for simplification of interlocking design and for automation of application data preparation. The method of implementing dependencies also allows for automation of conflicting route exclusion function verification, which decreases the effort required for verification activities while maintaining the high-quality standards.

Keywords: railway signalling, route dependencies, interlocking

Implikacje rozwoju infrastruktury elektroenergetycznej na elektromobilność rynku pojazdów samochodowych w Polsce

Marek Idzior^{1,*}

¹ Politechnika Poznańska

Streszczenie. W artykule przedstawiono metody ładowania pojazdów elektrycznych ze szczególnym uwzględnieniem łatwości obsługi, ich zalety i wady oraz stawiane im wymogi. Do 2025 roku po polskich drogach mała jeździć po Polsce liczba miliona samochodów elektrycznych. Aby tak duża liczba pojazdów elektrycznych mogła się poruszać, niezbędna będzie rozbudowa infrastruktury ładującej. Rozwój elektromobilności na szeroką skalę może doprowadzać do konieczności rozbudowy mocy wytwórczych lub zwiększenia ich wykorzystania. Rozwój elektromobilności na szeroką skalę może doprowadzać do konieczności rozbudowy mocy wytwórczych lub zwiększenia ich wykorzystania. Zwiększenie obciążeń sieci ładowania, szczególnie w obszarach miejskich, może skutkować całkowitą zmianą potrzeb i sposobu zarządzania sieciami elektroenergetycznymi przez operatorów sieci. Rozwój infrastruktury ładowania będzie stanowić jedno z największych wyzwań i inwestycji dla wdrożenia w życie elektromobilności na większą skalę. W pracy przedstawiono też czynniki decydujące o wyborze samochodu, w tym samochodu elektrycznego oraz wpływ działań o charakterze politycznym i innych zachęt na wpływających na rozwój rynku samochodów elektrycznych. W celu określenia stopnia akceptacji rozwoju elektromobilności przez konsumentów, w szczególności na temat pojazdów elektrycznych, przeprowadzono badanie rynku za pośrednictwem ankiety online.

Słowa kluczowe: elektromobilność, samochody elektryczne, ładowanie

1. Wstęp

Tuż przed wybuchem II wojny światowej na ziemiach polskich zarejestrowanych było jedynie 41,9 tys. samochodów: 31,8 tys. osobowych oraz 8,6 tys. ciężarówek. Park maszyn uzupełniało 12 tys. motocykli. Zdecydowana większość z nich została zniszczona, a działania wojenne przetrwało, według różnych szacunków, od 3 do 7 tys. pojazdów. Tak więc pierwsze powojenne pięciolecie upłynęło na mozolnym uzupełnianiu przetrzebitego parku samochodowego. W tym celu, w dość ograniczonym z powodu szczupłych finansów

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Idzior, M. (2025). Implikacje rozwoju infrastruktury elektroenergetycznej na elektromobilność rynku pojazdów samochodowych w Polsce, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 91–105, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

*Autor do korespondencji

E-mail adres: marek.idzior@put.poznan.pl

ORCID iD: 0000-0003-3398-7625

zakresie, importowano nowe samochody z krajów Europy Zachodniej (Francja, Włochy, Dania, Anglia) i USA, kupowano używane pojazdy pochodzące z demobilu oraz sprowadzano w ramach reparacji wojennych z terenów niemieckich. Spore liczby pojazdów, głównie ciężarowych, trafiły do Polski w ramach dostaw UNRRA. Działania te bardzo szybko przyniosły pozytywny skutek. Już pod koniec 1945 r. dane zebrane przez Ministerstwo Administracji Publicznej mówiły o 19 tys., zaś w połowie 1948 r. już o ponad 93 tys. samochodów (w tym: 29 tys. ciężarowych i 26 tys. osobowych oraz 32 tys. motocykli). W dużej mierze był to jednak sprzęt wysłużony, w kiepskim stanie technicznym.

Ile jest samochodów osobowych w Polsce? Na dzień 24 marca 2024 roku 26 457 659 *samochodów* - 703 aut na 1000 osób. A ile w tym osobowych i użytkowych samochodów całkowicie elektrycznych. Według danych z 16 lipca 2024 r., w Polsce było zarejestrowane łącznie 70 579 osobowych i użytkowych samochodów całkowicie elektrycznych. Liczba punktów ładowania pojazdów elektrycznych w Polsce wynosi 7563 (4163 stacje). Stan na koniec lipca 2024 r. Na jeden punkt ładowania przypada 9,3 osobowych i użytkowych samochodów całkowicie elektrycznych. 23 sierpnia 2024.

Obecnie dużo mówi się o przyszłości aut elektrycznych w kontekście ich słabnącej sprzedaży. Pomimo nie najlepszego początku w 2024 roku, Międzynarodowa Agencja Energetyczna oczekuje, że elektryki na świecie do końca roku osiągną 20% udziału w rynku. W liczbach oznacza to 17 mln sztuk. W 2023 roku było to 14 mln (26.04.2024).

Według IEA obecnie obserwujemy wzrost zainteresowania elektrykami na niektórych rynkach wschodzących. To m.in. Wietnam i Tajlandia, gdzie auta na prąd obecnie stanowią, odpowiednio, 15 i 10% sprzedaży.

Tempo przechodzenia na pojazdy elektryczne może nie być spójne i zależeć od ich dostępności. Liczba publicznych stacji ładowania zainstalowanych na całym świecie wzrosła o 40% w 2023 roku w porównaniu z 2022 rokiem, a rozwój szybkich stacji ładowania przewyższył wzrost liczby wolniejszych stacji ładowania” – podaje IEA.

Do 2035 roku według IEA liczba punktów ładowania powinna wzrosnąć sześciokrotnie. Jednak, aby móc myśleć o powszechnym wykorzystywaniu samochodów elektrycznych, do 2035 roku należy zwiększyć sieć ładowania aż sześciokrotnie. Jeśli auta bateryjne nadal będą się rozwijać w takim tempie, jak obecnie, według IEA już w najbliższym dziesięcioleciu ich udział w światowym rynku powinien wynieść 50%. Jeśli zaś zobowiązania zapowiedziane przez kraje w zakresie energii i klimatu zostaną w pełni zrealizowane, do 2035 roku dwa z trzech samochodów sprzedawanych na świecie będą w pełni elektryczne” – kończy IEA.

Rynek samochodów elektrycznych w Polsce obecnie znajduje się w fazie tworzenia o czym świadczy ciągły brak dostępności do stacji ładowania, jednak ich ilość rośnie. Pod koniec 2021 Komisja Europejska wydała pozytywną decyzję w zakresie notyfikacji pomocy publicznej, dzięki której Narodowy Fundusz ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej może przekazać swoje środki finansowe na rozbudowę punktów ładowania samochodów elektrycznych oraz stacji tankowania wodoru w Polsce [7]. Do 2025 roku w Polsce ma powstać prawie 50 tys. ogólnodostępnych punktów ładowania.

Znaczenie elektromobilności jest znacznie szerszym pojęciem, które również obejmuje zdrowie. Według Europejskiej Agencji Środowiska zanieczyszczenie powietrza jest w Europie jednym z największych zagrożeń środowiskowych dla zdrowia człowieka.

Zanieczyszczenie powietrza powoduje raka jak i również choroby serca lub astmę, zatem warto inwestować kapitał, czas i energię w rynek samochodów elektrycznych.

Celem podjętej w pracy tematyki elektromobilności jest omówienie jej pod względem infrastruktury ładowania, kosztów i następstw. Aktualnie jest to dziedzina, która prężnie się rozwija zarówno na świecie jak i w Polsce. W najbliższych latach będziemy mogli obserwować wzrost popularności samochodów elektrycznych i hybrydowych, będzie się to działo również przez nakładane restrykcje. Programy dotacyjne również będą wpływać na wzrost zainteresowania elektromobilnością. Zaplanowana ankieta miała przybliżyć jakie istnieje zainteresowanie samochodami elektrycznymi, ale aktualnie jest zbyt dużo przeszkód, aby zdecydować się na taki pojazd. Należy jednak zauważyć, że w ostatnim okresie czasu w Polsce dynamicznie rozwija się sieć ładowania samochodów elektrycznych.

2. Infrastruktura ładowania baterii w pojazdach elektrycznych

2.1. Koszty infrastruktury ładowania

Koszt infrastruktury ładowarki AC może wynosić około 500 euro, kiedy to będzie umieszczona na terenie prywatnym i będzie przeznaczona jedynie dla określonych użytkowników. Przy pojedynczej ładowarce ogólnodostępnej koszt ten wynosi około 1500 euro. Jest to spowodowane koniecznością zbudowania mocniejszej konstrukcji i podłączenia do oprogramowania. Ceny nie obejmują kosztów instalacji [14].

Koszt szybkiej ładowarki prądu stałego to około 25 000 euro, a razem z instalacją opłata może wynieść nawet 40 000 euro. Do kosztów należy również doliczyć koszty energii i koszty utrzymania i serwisu ładowarek.

2.2. Wymogi stawiane stacjom ładowania pojazdów elektrycznych

W Ustawie z dnia 9 grudnia 2021 roku o elektromobilności i paliwach alternatywnych stacja ładowania została określona jako urządzenie budowlane z co najmniej jednym punktem ładowania o normalnej mocy lub punkt ładowania o dużej mocy, związane z obiektem budowlanym.

Na stacje ładowania pojazdów elektrycznych są nałożone pewne wymogi tj.:

- spełnienie wymagań technicznych i eksploatacyjnych które są ustalone w Polskich Normach,
- zapewnienie bezpiecznego użytkowania,
- przekazywanie informacji o dostępności urządzenia do ogólnego systemu ewidencji,
- wyposażenie w oprogramowanie, pozwalające na podłączenie oraz ładowanie aut elektrycznych i hybrydowych,
- wyposażenie punktu ładowania w osprzęt do monitorowania procesu ładowania i poboru energii [13].

Szybkość i rodzaj ładowarek	Moc znamionowa	Przybliżony czas ładowania*
Wolne (prąd przemienny jednofazowy)	3–7 kW	7–16 godzin
Standardowe (prąd przemienny trójfazowy)	11–22 kW	2–4 godzin
Szybkie (prąd stały)	50–100 kW	30–40 minut
Bardzo szybkie (prąd stały)	> 100 kW	< 20 minut

Rys.1. Dostępne technologie [10]

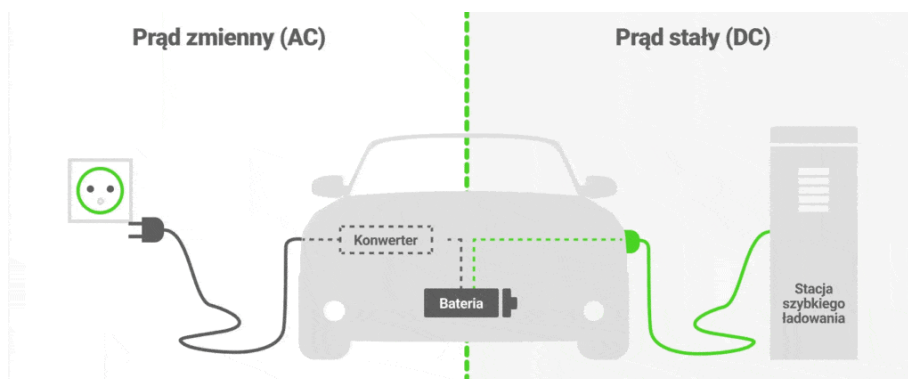
Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad informuje, że do końca tego roku przy autostradach i drogach ekspresowych stanie 45 nowych stacji ładowania. W miejscach obsługi podróżnych stanie 40. Zlokalizowane będą na autostradach A1, A2 i A4 oraz na drogach ekspresowych S3, S7 i S8. W planach jest też pięć ładowarek przy MOP-ach kat. II i kat III, na których obecnie funkcjonuje 47 stacji. Zgodnie z projektem stacje ładowania w Transeuropejskiej Sieci Transportowej TEN-T powinny być rozmieszczone w odległości nie większej niż co 60 km. Do końca 2025 r. każda powinna mieć łączną moc 300 kW, z czego minimum jeden punkt co najmniej 150 kW. Do końca 2030 r. łączna moc stacji ma wzrosnąć dwukrotnie (do 600 kW), podobnie jak liczba punktów z mocą co najmniej 150 kW. Osiągnięcie tych celów może być sporym wyzwaniem. Istniejące stacje na MOP-ach są wyposażone w punkty ładowania o mocy 50 kW, 100 kW i 150 kW. Najwyższa Izba Kontroli twierdzi, że tempo rozbudowy infrastruktury nie nadąża za popytem na auta elektryczne. Nie jest tajemnicą że sieć elektroenergetyczna w Polsce wymaga doinwestowania i rozbudowy. NIK zwraca uwagę, że 90 % linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia ma ponad 10 lat (z czego 43 % ponad 40 lat). Najkrócej eksploatowane były linie niskiego napięcia, choć wciąż 32 % z nich działało od ponad 40 lat.

2.3. Ładowanie Plug-In

Jedną z metod ładowania jest ładowanie Plug-In które jest najbardziej powszechnym rozwiązaniem do ładowania baterii samochodów elektrycznych. Należy ręcznie podłączyć przewody ładujące do pojazdu co jest wadą tego sposobu ładowania. Kolejnymi minusami tego rozwiązania jest fakt, że podczas każdorazowego podłączania i odłączania przewodu istnieje możliwość porażenia użytkownika, a w czasie, gdy występują niższe temperatury mogą wystąpić problemy z podłączeniem do gniazda ładowania.

Złącze wtykowe może być używane przy prądzie stałym lub zmiennym. Dla obu metod stosuje się inne wtyki ładowania. Niezbędne jest stosowanie prądu zmiennego (AC) na prąd stały (DC) za pomocą konwertera, ponieważ ogniwa zasilane są jedynie prądem stałym. Zasilanie baterii za pomocą zewnętrznej stacji ładowania umożliwia szybsze ładowanie i możliwość wykorzystania większej mocy niż podczas używania ładowarki pokładowej. Stacje ładowania wykrywają jaką jest dopuszczalna moc, którą można przesłać oraz czas

ładowania samochodu elektrycznego zależy od jej pojemności, poziomu naładowania jak i również mocy danej stacji ładowania i zastosowanego kabla.

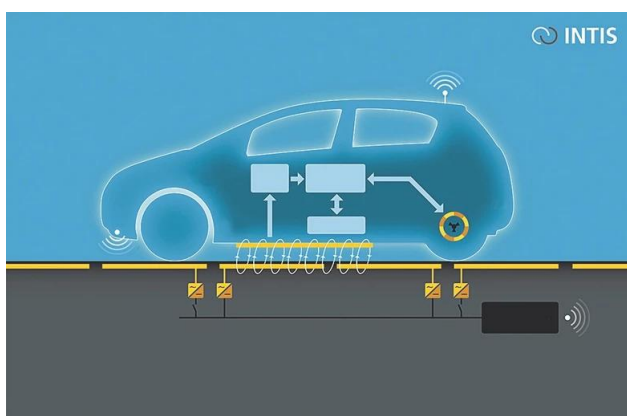


Rys. 2. Schemat ładowania Plug-In [11]

2.4. Ładowanie bezprzewodowe

Ładowanie bezprzewodowe, czyli tzw. indukcyjne charakteryzuje się brakiem konieczności bezpośredniego połączenia stacji ładowania z pojazdem. Brak punktów styku które ulegają zużyciu jest zaletą tego rozwiązania. Ładowanie bezprzewodowe, czyli tzw. indukcyjne charakteryzuje się brakiem konieczności bezpośredniego połączenia stacji ładowania z pojazdem. Brak punktów styku które ulegają zużyciu jest zaletą tego rozwiązania.

Ładowanie bezprzewodowe, czyli tzw. indukcyjne charakteryzuje się brakiem konieczności bezpośredniego połączenia stacji ładowania z pojazdem. Brak punktów styku które ulegają zużyciu jest zaletą tego rozwiązania. Cewka elektryczna jest umieszczony na spodzie pojazdu, a kilka cewek pełniących funkcję nadajników jest osadzonych w nawierzchni drogi, które wytwarza pole magnetyczne za pomocą prądu. Kiedy wprowadzi się cewkę odbiornika w to pole, wytworzy ona napięcie, które w prostowniku zostanie zmieniony na prąd stały. Wytworzona energia jest wykorzystywana do ładowania akumulatora napędzającego silnik.



Rys. 3. Ładowanie indukcyjne - bezprzewodowe

2.5. Ładowanie pantografowe

Ładowanie za pomocą pantografu spotykane jest głównie w elektrycznych autobusach miejskich. Odbywa się ono automatycznie poprzez połączenie instalacji na dachu pojazdu ze stacją ładującą. Takie ładowanie odbywać się może w zajezdniach, jak i również w innych wybranych punktach w mieście [11]. Zaletą tego rozwiązania jest brak konieczności dodatkowych interakcji ze strony kierowcy. Występują dwa rozwiązania konstrukcyjne dla tego typu ładowania. Jednym z nich jest umieszczenie pantografu na dachu autobusu, a drugim na infrastrukturze stacji ładowania i opuszczany na dach pojazdu.



Rys.4. Ładowanie pantografowe

2.6. Ładowanie przez wymianę baterii

Kolejną z istniejących rozwiązań ładowania jest wymiana akumulatorów znajdujących się w pojeździe. Zaletą jest niesamowicie szybki czas wymiany baterii który wynosi około 2 minuty. Dzięki profesjonalnej obsłudze można wydłużyć czas żywotności baterii. Taką metodę ładowania wprowadziła Tesla, odbywa się ona automatycznie, a kierowca nie musi wychodzić z pojazdu. Minusem jest konieczność posiadania dodatkowej baterii, której koszt wynosi około 20 tysięcy dolarów. Wymiana baterii w specjalnym punkcie to koszt to około 70 dolarów [10]. Kolejną rzeczą działającą na niekorzyść tej metody jest konieczna infrastruktura i przestrzeń umożliwiająca wymianę baterii.



Rys. 5. Wymiana baterii w pojeździe [14]

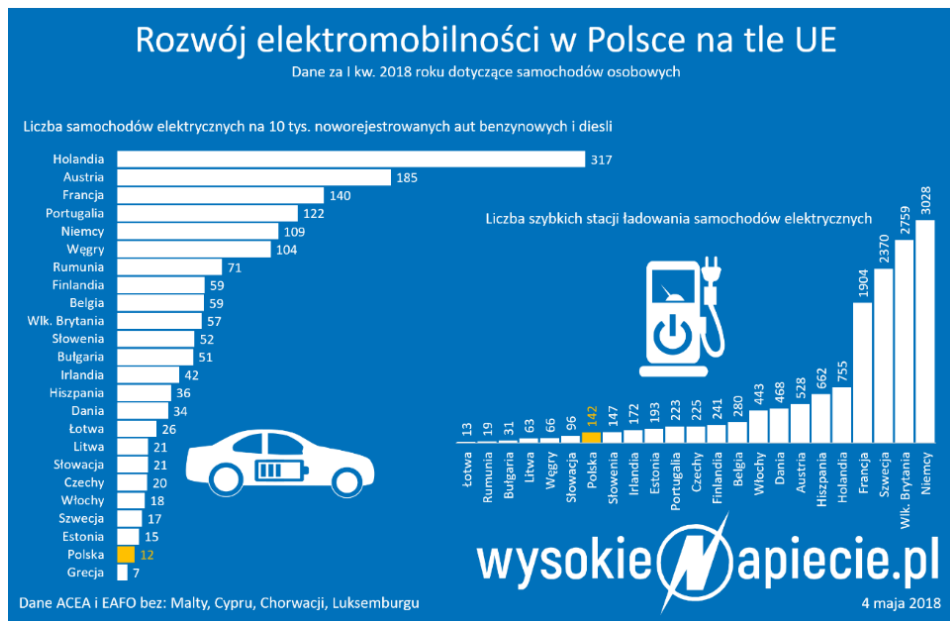
3. Infrastruktura ładowania pojazdów elektrycznych w Polsce

Elektromobilność w Polsce rozwija się bardzo wolno, do europejskich liderów wciąż jest bardzo daleko. W przeciągu ostatnich trzech lat sprzedaż nowych pojazdów elektrycznych wzrosła o 110% [2]. W Polsce jak i w innych krajach Unii Europejskiej mniej prężnie rozwijała się infrastruktura stacji ładowania pojazdów elektrycznych. W tym samym czasie liczba punktów ładowania wzrosła o 58%, oznacza to, że inwestycje w infrastrukturę nie nadążają za rosnącą ilością samochodów elektrycznych.

W Polsce w ciągu ostatnich 12 miesięcy rejestracje tylko nowych samochodów elektrycznych zwiększyły się o 150%, podczas gdy liczba punktów ładowania o 40%. Wskazuje to wyraźnie na możliwość niedostosowania istniejącej infrastruktury do liczby użytkowników. Potencjalnie wydłużające się kolejki do szybkich ładowarek mogą stanowić czynnik ograniczający chęć zakupu takiego samochodu [10].

W Polsce w przeciwieństwie do wielu krajów europejskich udogodnienia dla posiadaczy samochodów elektrycznych i hybrydowych są jeszcze niewielkie. Obecnie większość z nich to inicjatywy samorządowe takie jak np. wprowadzone w Gdańsku ogólnodostępne

i bezpłatne ładowarki czy zwolnienia z opłat w strefach płatnego parkowania. Dlatego też, z uwagi na wysoki koszt zakupu i niski dostęp do infrastruktury, obecnie samochody elektryczne wybierane są głównie ze względu na niskie koszty eksploatacji, przez osoby świadome ekologicznie czy pasjonatów nowych technologii. Pierwszy program dofinansowania do pojazdów elektrycznych w Polsce zakończył się kompletnym niepowodzeniem. Dotacje rządu były skromne, wdrożony za późno o wiele miesięcy i obwarowany wieloma obostrzeniami, że postanowiło z niej skorzystać jedynie 261 Polaków [1]. W trzech programach złożono niewiele więcej niż 300 wniosków, a kwota dofinansowania wynosiła ponad 11 mln złotych, budżet programu wyniósł aż 150 mln złotych. Kwoty dopłat były niskie, występował limit ceny pojazdu elektrycznego oraz brak programu dla przedsiębiorców co skutkowało tak małym zainteresowaniem.



Rys. 6. Rozwój elektromobilności w Polsce na tle Unii Europejskiej [2]

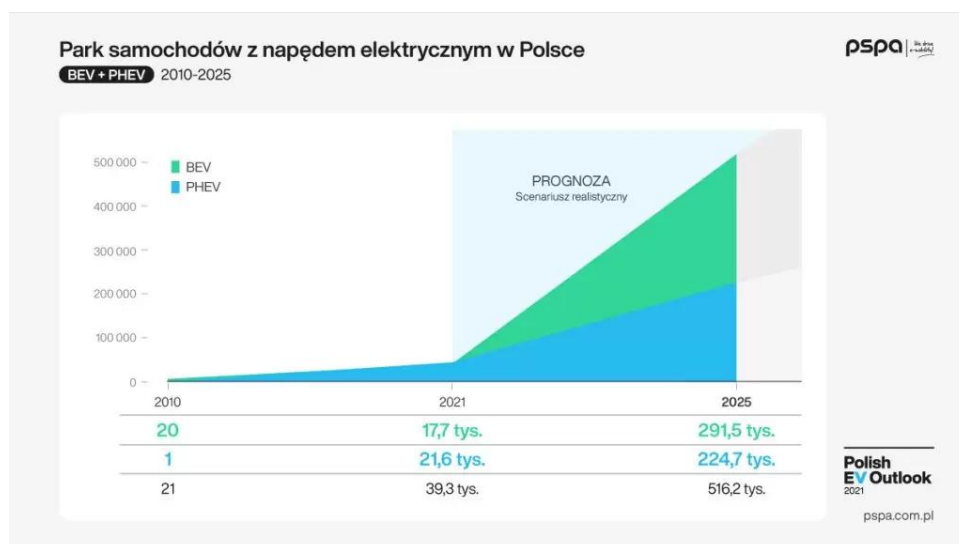
Do 2025 roku po polskich drogach ma jeździć milion samochodów elektrycznych, aby tak duża liczba pojazdów elektrycznych mogła poruszać niezbędna będzie rozbudowa infrastruktury ładującej. Rozwój elektromobilności na szeroką skalę może doprowadzać do konieczności rozbudowy mocy wytwórczych lub zwiększenia ich wykorzystania. Zwiększenie obciążeń sieci ładowania, szczególnie w obszarach miejskich, może skutkować

całkowitą zmianą potrzeb i sposobu zarządzania sieciami elektroenergetycznymi przez operatorów sieci. Rozwój infrastruktury ładowania będzie stanowić jedno z największych wyzwań i inwestycji dla wdrożenia w życie elektromobilności na większą skalę. Rozwój rynku elektromobilności w Polsce będzie umożliwiał liczne perspektywy biznesowe które będą obejmować powiększenie i utrzymanie infrastruktury stacji ładujących, sprzedaż

energii elektrycznej, dystrybucję energii, produkcję i sprzedaż lub dzierżawę ładowarek, wynajmem powierzchni lub nieruchomości pod stacje ładowania, sprzedaż pojazdów i części do samochodów elektrycznych, rozwój aplikacji mobilnych lokalizujących punkty ładowania.

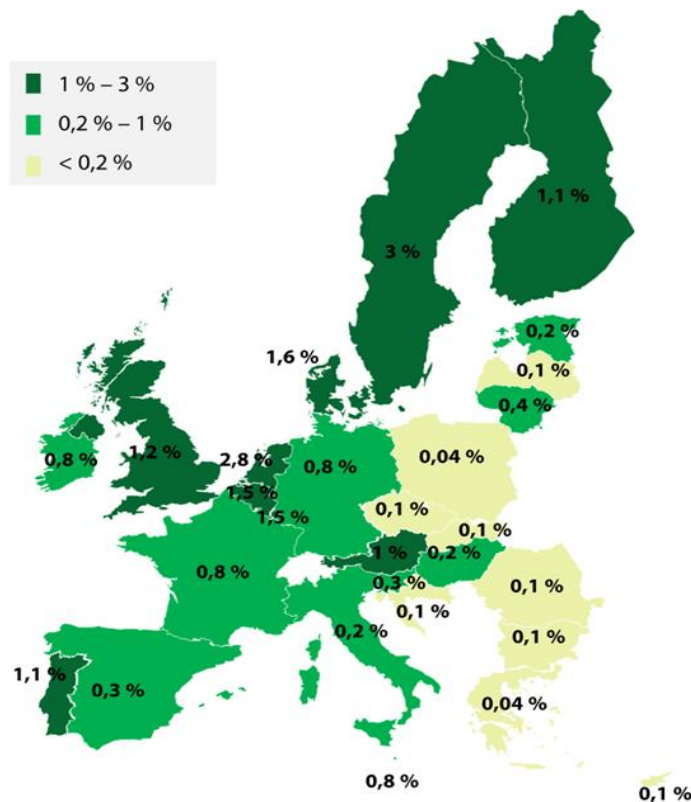
Przyłączenie do sieci wystarczającej ilości punktów ładowania, pozwalających na swobodne przemieszczanie się po państwie pojazdami elektrycznymi, wymagać będzie znacznych inwestycji, przede wszystkim w przyłącza. Bez stabilizacji środowiska inwestycyjnego dla operatorów systemów dystrybucyjnych oraz operatora systemu przesyłowego cel ten może zostać zniweczony. Szczególnie istotną kwestią będzie wprowadzenie transparentnych regulacji w zakresie zwrotu z kapitału, pozwalających tym operatorom na modernizację i rozbudowę sieci, przyłączy, instalacji oraz dedykowanych

systemów łączności na potrzeby przyłączenia do niej punktów ładowania wykorzystywanych powszechnie przez użytkowników pojazdów elektrycznych.



Rys. 7. Samochody z napędem elektrycznym w Polsce[2]

Rozwój rynku pojazdów elektrycznych będzie wymagał wieloletnich inwestycji, w związku z czym kluczowe będzie wdrożenie nowych rozwiązań prawnych, zapewniających równy dostęp do całego rynku dla wszystkich oraz stabilność i klarowność aktualnych zasad, szczególnie w zakresie obszaru ładowania pojazdów elektrycznych. Ładowanie samochodu elektrycznego nie będzie sprzedażą energii elektrycznej, lecz sprzedażą usługi, do której wykorzystywana jest energia elektryczna. Jest to więc nowy rodzaj nowej usługi, której nie można było spotkać do tej pory na polskim rynku. Te zmiany wymuszają stworzenie nowych zasad regulujących jej sprzedaż. Dla rynku sprzedaży usług ładowania pojazdów elektrycznych kluczowymi podmiotami będzie dystrybutor energii elektrycznej, operator stacji (punktu) ładowania, sprzedawca energii elektrycznej, i sprzedawcy usług ładowania. Nowe przepisy prawne powinny określać m.in. relacje i zachodzące między nimi stosunki. Regulacje powinny być również przejrzyste i zachęcające dla konsumentów, tak, aby jak najwięcej z nich chciała korzystać z pojazdów elektrycznych [10].



Rys. 8. Udział pojazdów elektrycznych w łącznej liczbie samochodów osobowych [2]

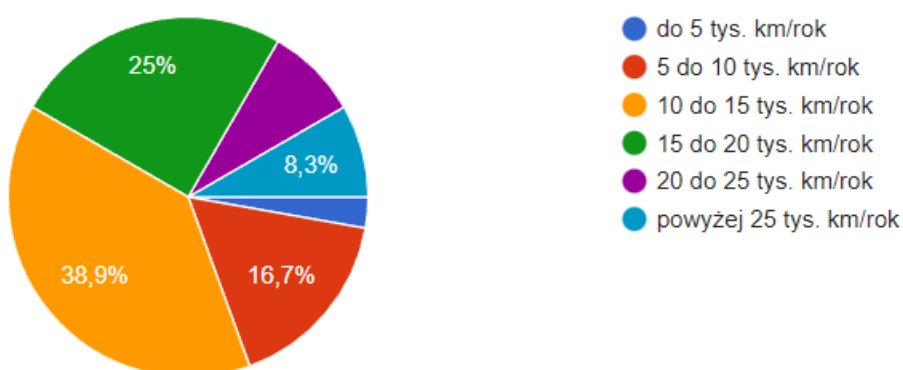
4. Badania statystyczne

4.1. Dane wyjściowe

Udział w ankiecie wzięły udział 148 osoby, przewagę stanowili mężczyźni, których było 56%. Najwięcej osób plasowało się w przedziale wiekowym od 18 do 28 lat, było to ponad 80% zapytanych. Ponad 32% podało, że mieszka w mieście, gdzie jest od 100 do 500 tysięcy mieszkańców, natomiast 35% podało, że mieszka w miejscowości, gdzie znajduje się poniżej 50 tysięcy mieszkańców. Blisko 63% ankietowanych osób podało, że ma wykształcenie średnie pełne, a 16% z nich posiada wykształcenie wyższe. 1/3 respondentów posiada 3 pojazdy osobowe w swoim gospodarstwie domowym, a po 1/4 posiada ankietowanych 1 lub 2 samochody. Prawie 3/4 ankietowanych w najbliższych latach planuje zakup pojazdu osobowego i ponad połowa odpowiedziała, że ma to nastąpić w przeciągu pięciu lat. 90% respondentów ma zamiar kupić samochód używany. Zapytano, dlaczego wybrali tę odpowiedź i większość odpowiedziała, że takie pojazdy są tańsze, niektórzy zwrócili uwagę, że to bardziej ekologiczne i że nowy pojazd po wyjechaniu z salonu od razu traci na wartości. Połowa ankietowanych zamierza kupić średni samochód jak VW Golf. 1/3 deklaruje zakup dużego samochodu, a 1/5 mały samochód. Nikt z ankietowanych nie zamierza kupić samochodu elektrycznego lub hybrydowego. 70%

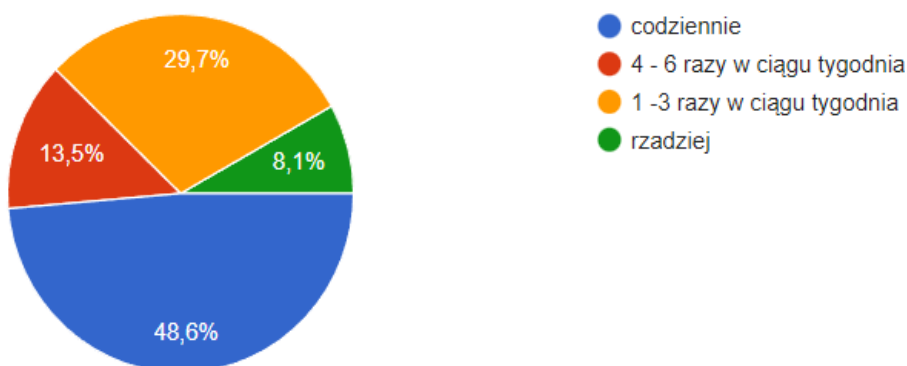
ankietowanych zastąpi stary pojazd nowym, a reszta ma zamiar kupić je jako dodatkowe auto. 112 osób jako czynnik decydujący przy zakupie pojazdu wybrało jakoś zważywszy na wyższą cenę, 85 osób zwraca uwagę na cenę, 10% ankietowanych ma na uwadze prestiż pojazdu, jedynie 7 osób jako czynnik decydujący zakup wybraliby emisję zanieczyszczeń. Na pytanie o to czy respondenci byłiby w stanie zaakceptować wyższą cenę pojazdu, jeśli skutkiem tego byłoby zmniejszenie masy emitowanego dwutlenku węgla głosy były podzielone dosyć równomiernie, jednak większość z nich zaznaczyła, że mogliby zapłacić więcej.

4.2. Średni roczny przebieg pojazdu osobowego



Rys. 9. Odpowiedzi na pytanie o średni roczny przebieg pojazdu osobowego

4.3. Średni dzienny przebieg pojazdu osobowego



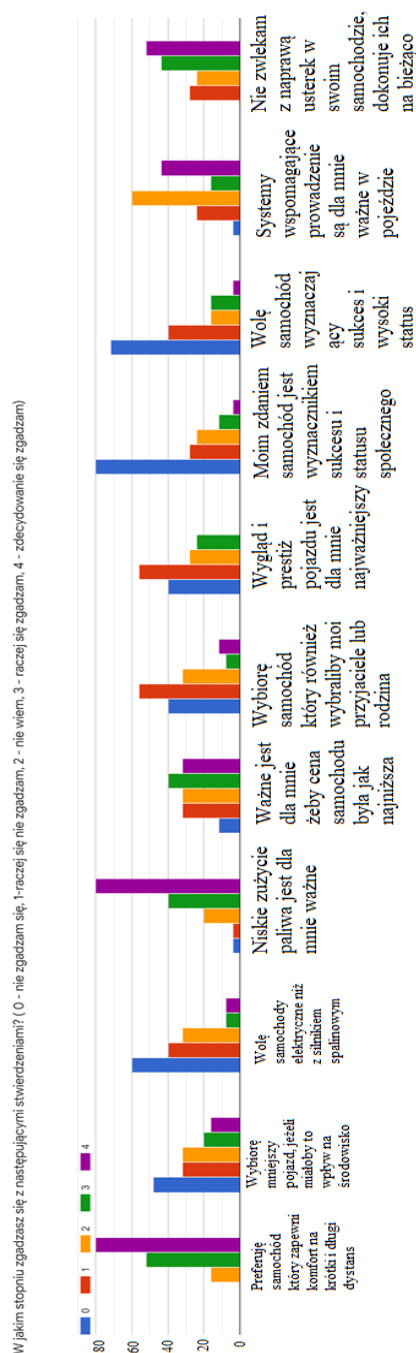
Rys. 10. Średni dzienny przebieg samochodu

Na pytanie jaki jest przewidywany średni roczny przebieg pojazdu osobowego ankietowani w większości podali, że będzie to przedział od 10 do 15 tysięcy km/rok. Na pytanie o średni dzienny przebieg samochodu większość podało, że wynosi on do 20 km, niecałe 30% podało przedział od 20 do 40 km. Prawie połowa ankietowanych codziennie korzysta z samochodu osobowego, a blisko 30% respondentów używa samochodu raz do trzech razy w tygodniu. Na pytanie o to czy w miejscach parkingowych samochodów respondenci mają dostęp do gniazdka elektrycznego, prawie 2/3 stwierdziło, że nie ma takiego dostępu.

4.4. Czynniki decydujące o wyborze samochodu, w tym samochodu elektrycznego

Prawie połowa ankietowanych codziennie korzysta z samochodu osobowego, a blisko 30% respondentów używa samochodu raz do trzech razy w tygodniu. Ponad 70% respondentów bierze pod uwagę korzystanie z samochodów elektrycznych w przyszłości. Na pytanie, dlaczego nie są zainteresowani tego typu pojazdami ankietowani odpowiedzieli, że: takie pojazdy mają za mały zasięg, długo się ładują i koszty takiego ładowania są wysokie, wykorzystane baterie są odpadem, którym ciężko gospodarować, brak stacji ładowania, pojazdy elektryczne mogą być bardziej wadliwe, wysokie koszty wymiany baterii, niektórzy odpowiedzieli, że lubią dźwięk silnika i wolą samochody z silnikiem spalinowym. Na zakup samochodu elektrycznego większość podała zakres od 30 000 do 40 000 złotych.

Zdecydowana większość ankietowanych preferuje pojazdy zapewniające komfort na krótki i długi dystans. Prawie 50 ankietowanych nie wybierze mniejszego samochodu ze względu na środowisko. Większość respondentów nie zgadza się lub raczej się nie zgadza ze stwierdzeniem, że popiera samochody elektryczne. Niskie zużycie paliwa jest ważne dla ankietowanych. Respondenci w zdecydowanej większości zanegowali naśladowanie swoich przyjaciół i rodziny. Również przecząco odpowiedzieli, że pojazd jest wyznacznikiem sukcesu i statusu społecznego. Większość ankietowanych osób nie zwleka z naprawami swojego pojazdu.

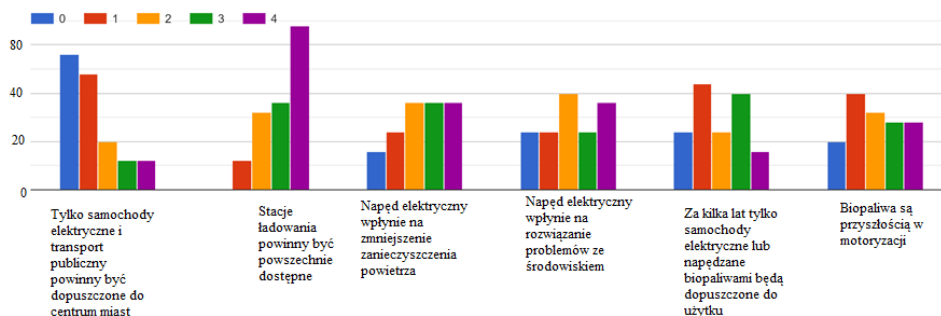


Rys. 11. Preferencje dotyczące wyboru przyszłego samochodu

4.5. Postawy ankietowanych wobec elektromobilności

Na stwierdzenia dotyczące elektromobilności wyniki zostały przedstawione na rysunku poniżej.

W jakim stopniu zgadzasz się z następującymi stwierdzeniami? (0 - nie zgadzam się, 1- raczej się nie zgadzam, 2 - nie wiem, 3 - raczej się zgadzam ,4 - zdecydowanie się zgadzam)



Rys. 12. Stanowiska ankietowanych wobec elektromobilności

4.6. Wpływ działań o charakterze politycznym i innych zachęt na rozwój rynku samochodów elektrycznych

Na pytanie o to co stanowiłoby największą zachętę do kupna pojazdu elektrycznego ankietarzy podali obniżenie ceny tych samochodów, ale również podali następujące odpowiedzi:

- zwiększenie dostępności stacji ładowania,
- zmiana sposobu pozyskiwania energii elektrycznej w Polsce na odnawialne źródła,
- większy zasięg tego typu samochodów i lepsze osiągi,
- zwiększenie zasięgu pojazdu na jednym ładowaniu baterii,
- świadomość dbania o środowisko,
- niższe ceny napraw,
- mniejsze stawki ubezpieczeń dla tego typu pojazdów,
- mniejsza cena energii elektrycznej
- stworzenie atrakcyjnej oferty kredytowej na zakup pojazdów elektrycznych
- powstanie odpowiednich kampanii promujących zalety takich pojazdów,
- producenci samochodów powinni szerzej udostępniać możliwość jazdy próbnej pojazdem elektrycznym.

Niektórzy zwrócili uwagę na to, że paliwo jest ograniczone albo niedługo będzie zbyt drogie dla większości użytkowników.

Zachętą również mogłoby okazać się stworzenie atrakcyjnej oferty kredytowej na zakup pojazdów elektrycznych jak i również powstanie odpowiednich kampanii promujących zalety takich pojazdów. Producenci samochodów powinni udostępnić możliwość jazdy próbnej pojazdem elektrycznym.

5. Podsumowanie

Podjęta w pracy tematyka elektromobilności została omówiona pod względem infrastruktury ładowania, kosztów i następstw. Aktualnie jest to dziedzina, która prężnie się rozwija zarówno na świecie jak i w Polsce. W najbliższych latach będziemy mogli obserwować wzrost popularności samochodów elektrycznych i hybrydowych, będzie się to działo również przez nakładane restrykcje. Programy dotacyjne również będą wpływać na wzrost zainteresowania elektromobilnością. Przeprowadzona ankieta potwierdziła, że istnieje zainteresowanie samochodami elektrycznymi, ale aktualnie jest zbyt dużo przeszkód, aby zdecydować się na taki pojazd. Należy jednak zauważyć, że w ostatnim okresie czasu w Polsce dynamicznie rozwija się sieć ładowania samochodów elektrycznych. Na koniec maja bieżącego roku funkcjonowało 6910 ogólnodostępnych punktów (+37% w stosunku do liczby z maja 2023 r.). W tym 4898 to AC, czyli umożliwiające ładowanie prądem zmiennym (+28% rok do roku), zaś 2012 to urządzenia prądu stałego DC (+64%). Największy udział w naszej infrastrukturze ładowania mają ładowarki o mocy do 22 kW (61%), ale liczba szybkich stacji DC o mocy przekraczającej 50 kW dynamicznie rośnie. Pod koniec maja 2024 r. do dyspozycji było już z 1468 takich urządzeń. Warto przy okazji zaznaczyć, że park aut elektrycznych (osobowych, dostawczych i ciężarowych) liczył wówczas 66 312 szt.

Bibliografia

1. EAFO (European Alternative Fuels Observatory), "European Commission initiative to provide alternative fuels statistics and information", www.eafo.eu, 2022
2. Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce, Warszawa 2023
3. Krajowe ramy polityki rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, Warszawa 2023
4. <https://e.autokult.pl/40512,niemcy-coraz-blizej-miliona-aut-elektrycznych-na-drogach-daja-polsce-przyklad-jak-tego-dokonac>
5. <https://icpt.pl/metody-ladowania-autobusow-elektrycznych-pantograf/>
6. <https://orpa.pl/wysyp-punktow-ladowania-aut-elektrycznych-po-2020-roku/>
7. <https://pspa.com.pl/2021/raport/przelom-na-polskim-rynku-elektromobilnosci-coraz-blizej/>
8. <https://swiatoze.pl/dwukierunkowe-ladowarki-niezbednik-domow-przyszlosci>
9. <https://theicct.org/publication/regional-charging-infrastructure-requirements-in-germany-through-2030/>
10. <https://www.autocentrum.pl/newsy/tesla-pracuje-nad-systemem-szybkiej-wymiany-baterii/>
11. <https://www.auto-swiat.pl/wiadomosci/aktualnosci/ladowanie-indukcyjne-aut-elektrycznych-droga-ktora-laduje-samochody/59xyv7c>
12. <https://www.brewa.pl/strefa-wiedzy/ladowanie-pojazdow-elektrycznych-podstawowe-informacje.html>
13. <https://www.motofakty.pl/artykul/ile-aut-elektrycznych-mamy-w-polsce-sprawdzamy.html>
14. <https://www.rynekelektryczny.pl/infrastruktura-ladowania-pojazdow-elektrycznych/>
15. <https://www.udt.gov.pl/elektromobilnosc-w-polsce>
16. <https://www.wyborkierowcow.pl/ile-samochodow-elektrycznych-jedzi-po-swiecie-gdzie-jest-najwiecej-elektrykow/>

17. <https://wysokienapiecie.pl/22902-szybkie-stacje-ladowania-samochodow-elektrycznych-w-polsce-paczkuja-gorzej-z-reszta/>

Implications of the development of electricity infrastructure on the electromobility of the motor vehicle market in Poland

Abstract. The article presents methods of charging electric vehicles with particular emphasis on ease of use, their advantages and disadvantages and the requirements they are subject to. By 2025, there will be a million electric cars on Polish roads. In order for such a large number of electric vehicles to be able to move, the expansion of the charging infrastructure will be necessary. The development of electromobility on a large scale may lead to the need to expand generating capacity or increase its use. The development of electromobility on a large scale may lead to the need to expand generating capacity or increase its use. The increase in the load on charging networks, especially in urban areas, may result in a complete change in the needs and management of power grids by network operators. The development of charging infrastructure will be one of the greatest challenges and investments for the implementation of electromobility on a larger scale. The paper also presents the factors determining the choice of a car, including an electric car, and the impact of political actions and other incentives on the development of the electric car market. In order to determine the degree of acceptance of the development of electromobility by consumers, in particular regarding electric vehicles, a market study was conducted via an online survey.

Keywords: electromobility, electric cars, charging

Poprawa parametrów aerodynamicznych jako czynnik bezpieczeństwa i efektywności w kolejowym transporcie intermodalnym

Karol Nehring^{1,*}

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Streszczenie. Optymalizacja parametrów aerodynamicznych składu pociągu w kolejowym transporcie intermodalnym stanowi istotny element w dążeniu do zwiększenia bezpieczeństwa oraz redukcji kosztów transportu. Poprzez redukcję oporu powietrza, możliwe jest zmniejszenie zużycia energii. Lepsza aerodynamika przyczynia się do stabilności składu pociągu, minimalizując ryzyko wypadków i poprawiając ogólne bezpieczeństwo. Artykuł omawia kluczowe zagadnienia związane z aerodynamiką składu pociągu oraz zasady poprawy aerodynamiki. Problem badawczy koncentruje się na identyfikacji i ocenie wpływu aerodynamiki na bezpieczeństwo oraz efektywność energetyczną w kolejowym transporcie intermodalnym. Główne pytanie badawcze dotyczy tego, jakie konkretne zmiany aerodynamiczne przyniosą największe korzyści. Wykonano przegląd literatury, zidentyfikowano kluczowe czynniki oraz zależności matematyczne, proponując model algorytm optymalizacji uwzględniający dobre praktyki. Zastosowanie proponowanych zmian może mieć długotrwały wpływ na rozwój branży transportowej, a w szczególności transportu intermodalnego. Stosowanie zaoferowanych dobrych praktyk oraz metod optymalizacji może przyczynić się do zwiększenia efektywności realizowanych kolejowych przewozów intermodalnych.

Słowa kluczowe: transport intermodalny, optymalizacja, aerodynamika

1. Wstęp

Obecnie coraz częściej zaczyna dostrzegać się korzyści wynikające z holistycznego podejścia do optymalizacji przewozów towarowych. Skutkiem tego jest m.in. zwiększenie popularności transportu intermodalnego, który przy odpowiedniej organizacji pozwala na szybki i efektywny ekonomicznie przewóz towarów. Analizowane są także poszczególne zagadnienia optymalizacyjne związane z przewozami intermodalnymi. Mogą one dotyczyć zarówno elementów takich jak racjonalizacja tras i organizacji przewozu, jak i bardziej szczegółowych aspektów (np. optymalizacja procesu załadunku i rozładunku). Coraz częściej tematem stają się także zagadnienia związane z aerodynamiką. Okazuje się, że

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Nehring, K., (2025). Poprawa parametrów aerodynamicznych jako czynnik bezpieczeństwa i efektywności w kolejowym transporcie intermodalnym, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 107–122, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

*Autor do korespondencji

E-mail adres: karol.nehring@pw.edu.pl

ORCID iD: 0000-0002-0682-8795

aerodynamika odgrywa znaczącą rolę z punktu widzenia efektywności energetycznej czy też bezpieczeństwa transportu.

Znaczenie aspektu aerodynamiki pociągów intermodalnych rośnie w obliczu zwiększonej świadomości ekologicznej oraz poszukiwań sposobów na redukcję zużycia energii. Kształt i rozmieszczenie kontenerów na platformach oraz konstrukcja wagonów i lokomotyw mają istotny wpływ na opór powietrza oraz efektywność ruchu pociągu w aspekcie aerodynamiki. Poprawa tych elementów może prowadzić m.in.:

- z punktu widzenia ekologii – do redukcji emisji gazów cieplarnianych,
- z punktu widzenia ekonomicznego – do zmniejszenia kosztów energetycznych.

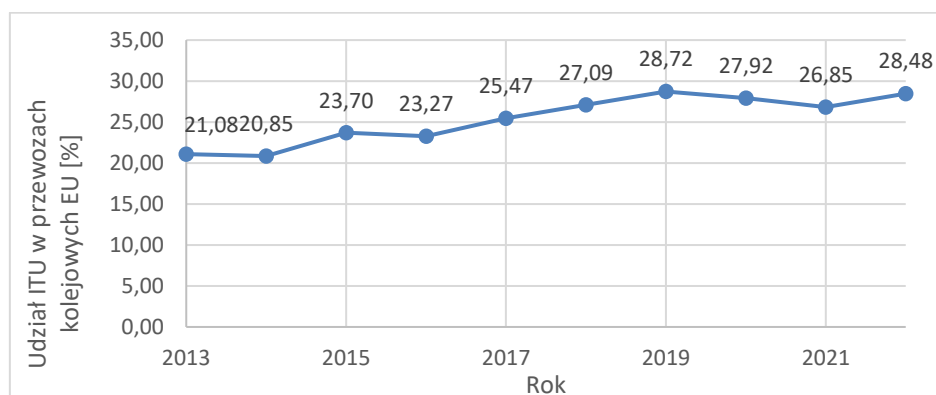
Pominięty nie może zostać także aspekt bezpieczeństwa przewozów. Racjonalizacja układu kontenerów, która uwzględnia poprawę parametrów aerodynamicznych może prowadzić do zmniejszenia podatności składu pociągu na działanie np. wiatrów bocznych w czasie ruchu. Dodatkowe siły generowane przez oddziaływanie mas powietrza na wagony, mogą wpływać na stabilność pociągu – szczególnie podczas ruchu w łukach oraz przy większych prędkościach. Odpowiedni rozkład masy składu pociągu oraz aerodynamiczny układ kontenerów mogą więc zmniejszyć ryzyko wypadków i niebezpiecznych sytuacji w czasie przewozów.

Analizując dostępne publikacje naukowe, skupiono się na różnych aspektach aerodynamiki, takich jak opór powietrza, przepływ powietrza wokół kontenerów i całego składu pociągu, a także możliwe rozwiązania w zakresie optymalizacji rozmieszczenia kontenerów na wagonach, aby zmniejszyć negatywne skutki nieoptymalnej aerodynamiki. Badania nad aerodynamiką składów pociągów intermodalnych rozwijają się dynamicznie - głównie ze względu na rosnące zainteresowanie optymalizacją energetyczną oraz zmniejszeniem wpływu na środowisko.

W dalszej części niniejszego opracowania zidentyfikowano kluczowe publikacje naukowe, które rzucają światło na problemy związane z aerodynamiką pociągów intermodalnych. Szczegółowo omówione zostały zasady konstruowania składów pociągów intermodalnych, uwzględniające aerodynamikę. Omówiono też kilka praktycznych przykładów i analizy oparte na kalkulacjach matematycznych.

2. Analiza literatury

Tak jak zostało to zauważone na samym wstępie – udział transportu intermodalnego w przewozach towarowych ciągle rośnie. Zaobserwować można to zarówno na terenie Polski jak i całej Europy. Według danych Urzędu Transportu Kolejowego tylko pomiędzy rokiem liczba przewiezionych TEU (ang. *twenty-foot equivalent unit*, ekwiwalent objętości standardowego kontenera o długości 20 stóp) od 2012 do 2021 roku wzrosła z 1 313 849 TEU do 3 670 789 TEU (279,39%) [22]. Zgodnie z danymi Eurostat udział masy jednostek intermodalnych (ITU, ang. *Intermodal Transport Unit*) w przewozach kolejowych wzrósł od 2013 do 2021 roku z 21,09% do 28,48% (dane uśrednione dla 31 państw EU) [23].



Rys. 1. Udział masy jednostek intermodalnych w goście przewozów kolejowych 31 państw EU w latach 2013-2022. Źródło: [23]

Dostępnych jest wiele publikacji, które odnoszą się do optymalizacji wybranych aspektów przewozów intermodalnych. Najpopularniejsze tematy to m.in. optymalizacja załadunku oraz rozładunku pociągu intermodalnego przy różnych warunkach brzegowych [2, 15, 16], optymalizacja harmonogramu pracy terminalu [9], układ terminali intermodalnych [19] czy też wykorzystywane technologie [13]. Autorzy też coraz częściej dostrzegają, że zagadnienie aerodynamiki zdaje się być istotnym tematem. Efektywność aerodynamiczna pociągu może mieć zarówno wymiar ekonomiczny, ekologiczny (optymalizacja zużycia paliwa i załadunku pociągu), jak i wymiar bezpieczeństwa (stabilność składu pociągu w ruchu) [10, 20]. Siły aerodynamiczne stanowią znaczną część oporów ruchu. Do tego należy wspomnieć, że pociągi intermodalne są jednymi z najszybciej poruszających się pociągów towarowych a siła aerodynamiczna rośnie kwadratowo wraz ze wzrostem prędkości [2].

Dostępnych jest kilka publikacji, które odnoszą się do zagadnienia aerodynamiki pociągów towarowych oraz bardziej szczegółowo - pociągów intermodalnych. Jedną z nich jest artykuł [21], który odnosi się do optymalizacji aerodynamiki pociągu a także istotnego procesu załadunku, który często warunkuje to „jak opływowy” będzie skład pociągu.

Według innego badania, optymalizacja układu ładunków intermodalnych w składzie pociągu pozwala na redukcję zużycia paliwa nawet o ponad 1/4 [21]. Badanie oparte zostało na pomiarach dokonanych na pociągach intermodalnych kursujących na wybranej linii w Stanach Zjednoczonych. Autorzy zastosowali model programowania liniowego pozwalający na przyporządkowanie ładunków do miejsc na pociągu z uwzględnieniem jego parametrów aerodynamicznych.

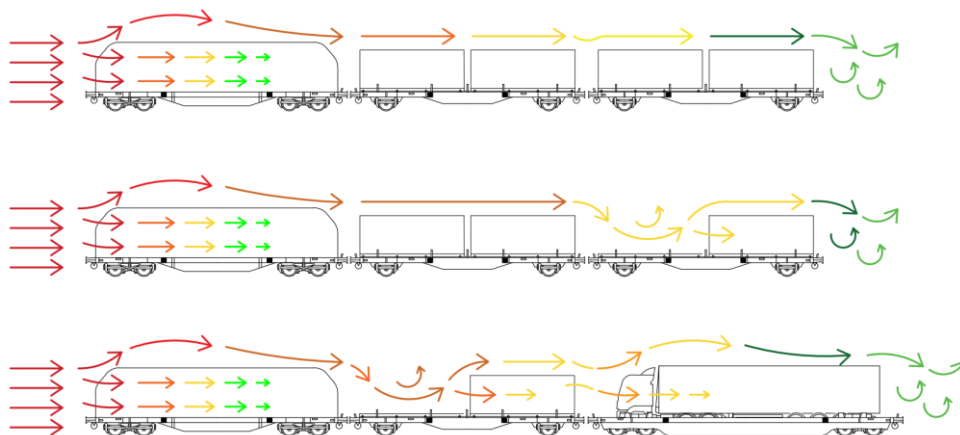
Często podstawowym wskaźnikiem służącym do oceny efektywności aerodynamicznej składu pociągu intermodalnego jest określenie stopnia użycia dostępnej przestrzeni ładunkowej – im mniej wolnych miejsc oraz odstępów między kontenerami, tym mniej zaburzeń przepływu powietrza wokół wagonów a co za tym idzie – lepsza efektywność aerodynamiczna [10].

Słuszność takiego podejścia potwierdzają badania ukazane m.in. w publikacjach [10] czy też [14]. Założenie takie nie daje jednak pełnego obrazu problemu. Okazuje się, że dwa pociągi o identycznym poziomie użycia przestrzeni ładunkowej mogą cechować się

różnym oporem aerodynamicznym. Zgodnie z badaniami, im dłuższy jest odstęp występujący pomiędzy dwoma wybranymi jednostkami intermodalnymi, tym większy jest ponoszony „karny” koszt z tytułu strat energetycznych. Nie jest to także zależność, która wykazuje cechy funkcji liniowej.

Ładunki ustawione w sposób zwarty zachowują się jak ciało spójne aerodynamicznie – nie występują strefy niskiego ciśnienia oraz niestabilnego układu mas powietrza (ang. *dirty airflow*), czyli mas powietrza o nieuporządkowanym układzie, które powodują zaburzenia w aerodynamice. W przypadku wystąpienia przerw między kontenerami zaobserwować można zaburzenie przepływu powietrza. Wraz z wydłużeniem przerw między ładunkami zaobserwować można powstawanie stref niskiego ciśnienia, które są szczególnie niebezpieczne w kontekście stabilności składu pociągu [10, 18]. Ładunki, które znajdują się w odstępie 22 metry i więcej zachowują się jak osobne ciała. Niektóre obiekty, takie jak ITU w postaci pojazdów drogowych na wagonach mogą generować także efekt „wymywania” (ścianania) strumienia powietrza przez np. owiewki znajdujące się na pojazdach (tzw. efekt Coandy) [1.]

Bardzo istotne jest także miejsca ulokowania wolnych slotów. Szczególnie odstępy między ładunkami znajdującymi się w czole pociągu silnie wpływają na aerodynamikę [21]. Wagony znajdujące się w dalszej części pociągu mają mniejsze znaczenie dla oporu aerodynamicznego generowanego przez skład pociągu. Większość oporów przyjmuje na siebie lokomotywa oraz wagony znajdujące się bezpośrednio za nią. Schematycznie zaprezentowano to na Rys. 1. Bardziej szczegółowe analizy przedstawiono w kolejnych rozdziałach.



Rys. 1. Schematyczna wizualizacja przepływu mas powietrza wokół pociągu kontenerowego. Źródło: opracowanie własne.

Podobny wniosek do wcześniej omówionych sformułować można na podstawie innych dostępnych badań. Niektóre z nich skupiły się na bardziej szczegółowych zagadnieniach jak np. analiza porównawcza sytuacji takich jak załadunek kontenera 40ft lub też dwóch 20ft na jeden wagon [11]. Ponownie wykorzystano model w skali oraz tunel aerodynamiczny. Badania potwierdziły znaczący wpływ występowania pustych wagonów

w czole pociągu na współczynnik oporu. Puste wagony w końcu składu pociągu miały mniejsze oddziaływania na zużycie energii.

Czynnikiem wpływającym na zużycie energii przez pociąg pozostaje także kąt natarcia wiatru, jednak ze względu na zmienność kierunku jazdy oraz samego wiatru jest to czynnik, który stanowi trudny element do analizy w realnych warunkach realizacji przewozów [10].

Niektóre publikacje przedstawiają inne podejście do omawianego problemu. Autorzy [14] zajęli się problemem nie dla całego składu pociągu a dla lokalnych konfiguracji kontenerów i ich wpływu na aerodynamikę. Przeanalizowana została zależność pomiędzy długością odstępu między kontenerami na wagonach oraz współczynnikiem oporu. Pod uwagę brane były lokalne konfiguracje a kluczowe dla wyników były dwie zmienne:

- Wielkość odstępu na froncie jednostki (ang. *Front Gap Size*),
- Wielkość odstępu z tyłu jednostki (ang. *Rear Gap Size*).

Autorzy odległości pomiędzy kontenerami określali poprzez przyrównanie długości odstępu do szerokości wagonu. Analizując zapisy pracy stwierdzić można, że jest to słuszne i uniwersalne podejście - szerokość wagonu także ma znaczny wpływ na to jak zachowuje się powietrze go opływające.

Ze względu na trudności występujące w rzeczywistych warunkach, wiele badań opartych zostało na pomiarach wykonanych z użyciem modeli pociągów [6, 8] wykonanego w skali oraz tunelu aerodynamicznego. Innym podejściem jest wykonanie symulacji komputerowej z użyciem odpowiedniego oprogramowania i wirtualnego modelu pociągu [14, 17] (czy też samych kontenerów [17]).

Przegląd badań na temat aerodynamiki można uzupełnić informacjami zawartymi w badaniu [10]. Jego autorzy skupili swoją uwagę na wpływie wiatrów bocznych. Uwzględnić należy fakt, że w rzeczywistych warunkach realizacji transportu pociąg może być poddawany działaniu podmuchów uderzających pod kątem w jego skład. Wpływa to nie tylko na efektywność aerodynamiczną, ale także na bezpieczeństwo przewozu. Badania wykazały, że od strony zawietrznej pociągu wystąpić mogą silne zaburzenia wiatru (strefy o różnej prędkości wiatru oraz ciśnieniu). Wartość maksymalnych obserwowanych sił jest silnie zależna nie tylko od względnej prędkości wiatru, ale też od jego kąta natarcia.

Pociągi towarowe wykazują większe wzmocnienie strumienia powietrza niż np. szybkie pociągi pasażerskie [6, 10, 11]. Jest to spowodowane zarówno kształtem ładunków jak i odstępami między nimi. To kolejny argument wskazujący na to, że aspekt aerodynamiki może mieć duże znaczenie dla przewozów towarowych.

Warto nadmienić także, że aby w pełni zrozumieć zagadnienia związane z aerodynamiką, które przekładają się na dowolną analizę w tym obszarze tematycznym, warto zapoznać się także z innymi publikacjami odnoszącymi się do branży m.in. motoryzacyjnej [12] czy też sportowej [7].

3. Zasady optymalizacji aerodynamiki składu pociągu intermodalnego

3.1. Współczynnik oporu aerodynamicznego

Przed przystąpieniem do dalszych analiz należy zdefiniować jedną z podstawowych wartości wykorzystywanych przy pomiarach związanych z aerodynamiką. Współczynnik oporu aerodynamicznego $C_d A$, jest to iloczyn współczynnika oporu C_d (ang. *drag*

coefficient) i powierzchni czołowej A (ang. *frontal area*). Ten wskaźnik znajduje swoje zastosowanie m.in. w analizie aerodynamiki pojazdów drogowych, rowerów, samolotów oraz innych obiektów. Z jego użyciem można określić to „jak bardzo aerodynamiczny” jest dowolny obiekt poddany działaniom sił powietrza [5, 7, 24].

Dwie składowe tworzące współczynnik C_dA to [7, 24]:

1. **Współczynnik oporu (C_d):** Bezwymiarowy współczynnik, który odzwierciedla, jak aerodynamiczny jest dany obiekt. Niższa wartość C_d oznacza mniejszy opór powietrza.
2. **Powierzchnia czołowa (A):** Efektywna powierzchnia obiektu, która jest wystawiona na przepływ powietrza.

Wskaźnik C_dA w najprostszy sposób może być obliczony z równania [24]:

$$C_dA = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot C_d \cdot A \quad (1)$$

gdzie:

C_dA – współczynnik oporu aerodynamicznego [N],

ρ – gęstość powietrza [kg/m^3],

v – prędkość obiektu [m/s],

C_d – współczynnik oporu [-],

A – powierzchnia czołowa [m^2].

Szczególne uwagę warto poświęcić współczynnikowi oporu C_d . Dzięki temu, że C_d jest bezwymiarowy, można go łatwo porównywać między różnymi obiektami, niezależnie od ich rozmiaru czy prędkości. Wyraża stosunek siły oporu aerodynamicznego działającej na obiekt do siły wynikającej z ciśnienia dynamicznego (ciśnienia wywieranego przez przepływające powietrze). W tunelach aerodynamicznych może być zmierzony poprzez umieszczenie pod badanym przedmiotem w kluczowych miejscach (np. przednia oś i tylna oś, pod kołami) dokładnych czujników wagi. Wraz z działaniem powietrza na front obiektu odczyty na wagach będą się zmieniały i odzwierciedlały to jak duży opór stawia obiekt. W warunkach poza tunelem do pomiaru tej wartości wykorzystuje się specjalne czujniki (tzw. *aerosensory*) oparte np. na rurce Pitota (Rys. 2).

A)



B)



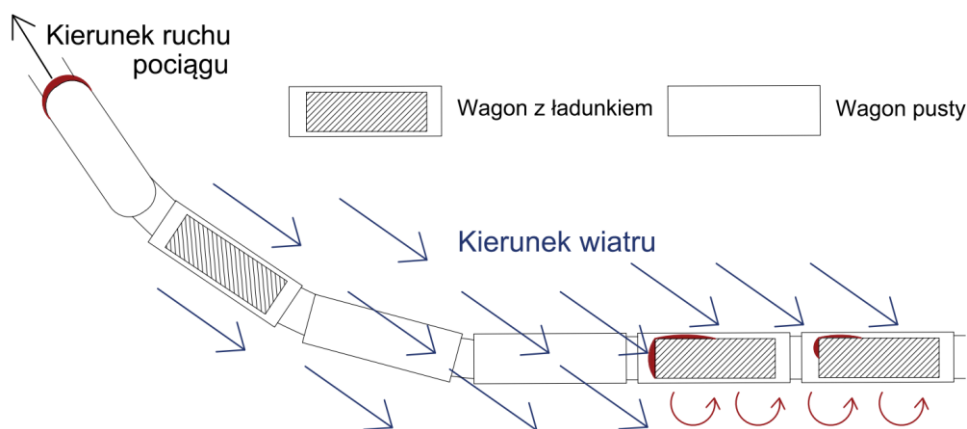
Rys. 3. Aerosensory wykorzystywane do pomiaru współczynnika oporu C_d

Źródło: A) <https://aerosensor.tech/>; B) <https://notio.ai/>.

3.2. Wpływ aerodynamiki na skład pociągu intermodalnego

Pierwszym czynnikiem w przypadku pociągów intermodalnych, na który znaczący ma wpływ ma aerodynamika to wspomniana już wcześniej efektywność energetyczna. Jest znacząco determinowana przez opór powietrza, który stanowi siłę przeciwdziałającą ruchowi pociągu przez powietrze [6, 8]. Redukcja wartości C_dA może prowadzić do znacznych oszczędności paliwa, ponieważ mniejsza energia jest potrzebna do pokonania oporu powietrza. Badania wykazały, że oszczędność energii może sięgać nawet 27% [21]. Zużycie paliwa oraz energii stanowi istotny koszt operacyjny w transporcie kolejowym.

Drugi znaczący aspekt powiązany z aerodynamiką to stabilność składu pociągu kontenerowego w ruchu - zwłaszcza przy większych prędkościach. Wpływ na ten element ma także m.in. rozkład masy ładunków na wagonach. Nie można jednak pominąć sił generowanych przez opór aerodynamiczny. Może on wpływać na stabilność pociągu, co ma znaczenie dla bezpieczeństwa i niezawodności operacyjnej. Szczególnie niebezpieczne są sytuacje, w których obserwowane jest oddziaływanie wiatrów bocznych na nieoptymalizowane składy kontenerowe. Niebezpieczne są także sytuacje, gdy pociąg znajduje się w łuku – działają na niego wtedy nie tylko siły aerodynamiczne, ale także siła odśrodkowa. Warto zauważyć także, że pociąg poruszający się po łuku narażony jest na zmianę kierunku oddziaływania wiatru [10]. Schematycznie zostało zilustrowane to na Rys. 3. gdzie niebieskim kolorem oznaczono kierunek przepływu wiatru a czerwonym obszary składu pociągu wyjątkowo narażone na działanie sił powietrza oraz zaburzenia przepływu powietrza wokół wagonów.



Rys. 3. Schematyczna wizualizacja oddziaływania wiatru na skład pociągu w ruchu.

Źródło: opracowanie własne

Siły aerodynamiczne mogą powodować ruchy boczne, nachylenie i kołysanie wagonów, szczególnie w warunkach silnych bocznych wiatrów. Ta niestabilność może prowadzić do nie tylko wzrostu zużycia paliwa, ale też zwiększonego zużycia komponentów pociągu, wyższych kosztów utrzymania, a w skrajnych przypadkach, do wykolejeni [3, 10].

Istnieje także szereg innych skutków braku optymalizacji w kontekście aerodynamiki składu pociągu intermodalnego. Mowa tutaj o aspektach takich jak:

- **Hałas:** Aerodynamika wpływa na poziom hałasu generowanego przez pociągi, zwłaszcza przy większych prędkościach. Jest istotne w kontekście wpływu na obszary miejskie oraz oddziaływanie na środowisko naturalne.
- **Zanieczyszczenie powietrza:** Zmniejszenie zużycia paliwa redukuje emisję spalin. Jest to szczególnie istotne dla pociągów napędzanych silnikami spalinowymi, które mogą emitować znaczne ilości zanieczyszczeń.
- **Optymalizacja trasy i czas przejazdu:** Lepsza aerodynamika umożliwia bezpieczne osiąganie wyższych prędkości co przekłada się na szybszy czas przejazdu. Jest to istotne z punktu widzenia konkurencyjności transportu kolejowego.
- **Bezpieczeństwo operacyjne:** Oprócz stabilności całego składu, aerodynamika wpływa na inne aspekty bezpieczeństwa, takie jak np. ryzyko oderwania części ładunków lub ich przemieszczania się na platformach.
- **Konserwacja i trwałość infrastruktury:** Mniejsze opory mogą zmniejszać obciążenia mechaniczne na infrastrukturze kolejowej, takie jak mosty czy tory.

3.3. Zasady poprawy parametrów aerodynamiki składu pociągu intermodalnego

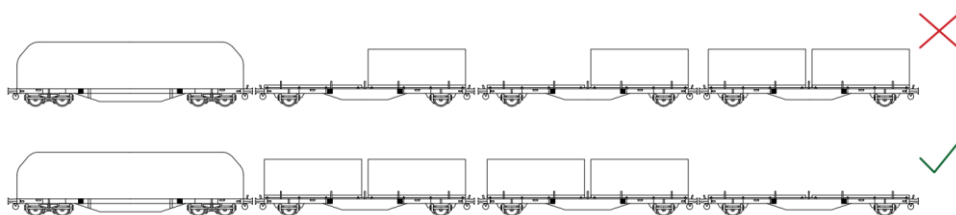
W celu optymalizacji aerodynamiki składu pociągu intermodalnego powinno dążyć się do redukcji wskaźnika C_dA co jest możliwe poprzez:

- zmniejszenie powierzchni czołowej pociągu,
- odpowiedni kształt elementów, na które oddziałują największe siły powietrza,
- optymalne ustawienie kontenerów na wagonach,
- optymalizację przepływu powietrza na całej długości pojazdu.

Pierwsze dwa postulaty mogą być osiągnięte m.in. poprzez poprawę kształtu lokomotyw czy też stosowanie osłon aerodynamicznych w kluczowych punktach. W przypadku składu pociągu intermodalnego (punkt 3 oraz 4) ogromne znaczenie ma jego konfiguracja. Minimalizacja oporów może nastąpić np. poprzez zmniejszenie ekspozycji nieaerodynamicznych kształtów na przepływ powietrza. Efekt ten może być zaobserwowany w przypadku pociągów pasażerskich wysokich prędkości, które cechują się niskimi oporami aerodynamicznymi. Jest to osiągnięte m.in. dzięki gładkim powierzchniom wagonów i braku elementów znajdujących się poza głównym obrysem pociągu [3, 8].

W rzeczywistych warunkach realizacji przewozów intermodalnych kluczowe będzie stosowanie się do kilku podstawowych zasad kształtowania składów pociągów:

1. minimalizowanie liczby pustych slotów (miejsz ładunkowych) na wagonach – szczególnie w jego czołowej części,
2. zadbanie o to, aby odstęp między kontenerami były możliwie najmniejsze,
3. nieprzekraczanie długości odstępu między ładunkami 22m,
4. w przypadku wystąpienia pustego slotu na wagonie zalecane jest umieszczenie takiego wagonu w dalszej części składu pociągu,
5. jeżeli w pociągu występuje więcej niż jeden pusty slot, zalecana jest ich konsolidacja oraz przesunięcie na tył składu pociągu,
6. nieumieszczanie pustych kontenerów w strefach narażonych na silne działanie siły.



Rys. 3. Zalecane miejsce położenia pustych miejsc ładunkowych w składzie pociągu intermodalnego. Źródło: opracowanie własne.

W szczególnych przypadkach stosuje się także specjalistyczne osłony na kontenery (takie jak np. kontener typu *ArroWedge*¹). Pomocne mogą być także specjalizowane wagony niskopodwoziowe, które powodują, że profil całego składu pociągu jest niższy. Teoretycznie możliwe byłoby monitorowanie sił oporu działających na pociąg w czasie rzeczywistym, ale obecnie jest to tylko przyszłościowa koncepcja. Na podobnym poziomie obecnie znajduje się koncepcja stosowania w konstrukcji wybranych elementów niskooporowych materiałów (specjalne powłoki, które zmniejszają tarcie powietrza).

Najprostszym sposobem wydaje się być optymalizacja załadunku kontenerów i ich odpowiedni układ na wagonach. Wymienione wyżej zalecenia powinny być uwzględniane na etapie załadunku składu pociągu, który niestety stanowi bardzo złożony problem, które omawiany były szeroko w dedykowanych temu zagadnieniu publikacjach ([4,16]).

4. Poprawa aerodynamiki w praktyce

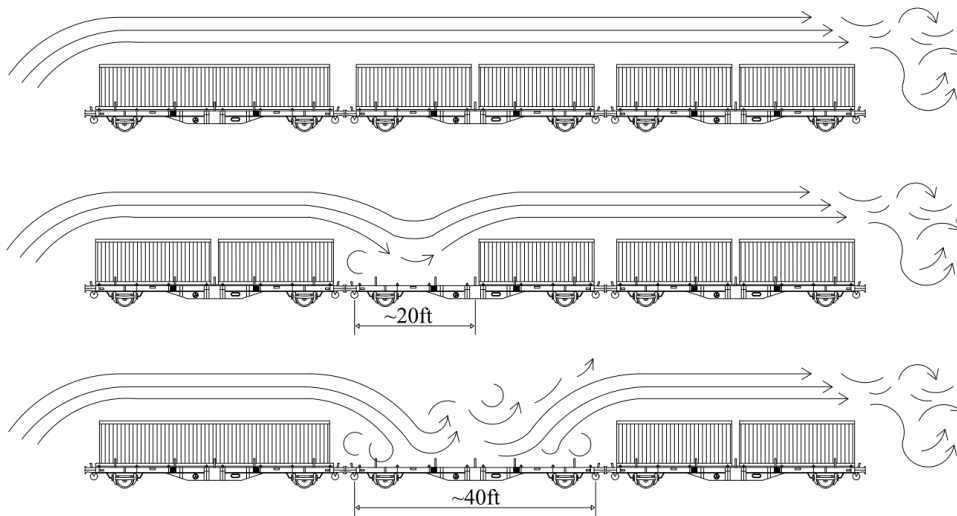
4.1. Problematyka obliczania oporu ruchu składu pociągu

W tej części opracowania odniesiono się głównie do publikacji autorstwa Yung, Cheng oraz Onal z 2008 roku [21]. Zgodnie z wynikami badań autorów:

- ładunki, które znajdują się w odstępnie 72ft (ok. 22 metry) i więcej zachowują się jak osobne jednostki ładunkowe (Rys. 4),
- największy opór musi zostać pokonany przez lokomotywę,
- dalej opór maleje stopniowo do około dziesiątego wagonu,
- dla ładunków znajdujących się za dziesiątym wagonem, przy ich regularnym ułożeniu, opór utrzymuje się na stałym poziomie².

¹ UP launches aerodynamic container for double-stack trains: <https://www.railjournal.com/regions/north-america/up-launches-aerodynamic-container-for-double-stack-trains/> (ostatni dostęp 26.07.2024).

² Opór stopniowo maleje dla każdego następującego wagonu, ale są to nieznaczne różnice.



Rys. 4. Przepływ powietrza wokół wagonów w zależności od układu kontenerów
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [21]

Autorzy opisali wartość wskaźnika oporu aerodynamicznego dla składu pociągu intermodalnego następującą zależnością [21]:

$$C_{DA} = 14,85824e^{-0,29308k} + 9,86549e^{-0,00007k} + 10.66914 \quad (2)$$

Gdzie:

C_{DA} – współczynnik oporu aerodynamicznego [ft^2],

k – położenie ładunku w składzie pociągu (numer jednostki licząc od początku składu pociągu)..

Dalej właściwą wartość (skorygowaną) wskaźnika C_{DA} dla dowolnej jednostki składu pociągu można obliczyć poprzez podzielenie otrzymanego wyniku z równania (2) przez wynik uzyskany dla setnego kontenera w pociągu. Metoda ta oparta jest na badaniach jeszcze z lat 80-tych XX wieku przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym.

Autorzy omawianej publikacji zastosowali algorytm oparty na modelu matematycznym ALAM (*aerodynamic loading assignment model*). Algorytm rozpoczyna się od analizy sekcji pociągu z ładunkami. Po identyfikacji całej sekcji załadowywanej stosowany jest algorytm wykorzystujący programowanie liniowe w celu optymalizacji układu ładunków. Do zbudowania modelu przyjęto szereg założeń, takich jak:

- w obsłudze znajdują się zarówno kontenery jak i naczepy,
- do każdej jednostki przypisany jest rozmiar (długość) oraz typ,
- każda jednostka posiada przypisaną pozycję w składzie pociągu,
- sloty posiadają przypisany rozmiar i typ,
- do wagonów przypisane są także ograniczenia (długość wagonu, restrykcje wagowe),
- oraz inne...

Warto zaznaczyć, że może wystąpić sytuacja, gdy liczba slotów będzie równa liczbie ładunków, a niektóre ładunki mogą nadal nie być przypisane ze względu na swoją wagę lub długość. Po ustaleniu wstępnego załadunku i sprawdzeniu ograniczeń możliwe jest przeprowadzenie iteracji w obrębie algorytmu w celu uzyskania lepszego rozwiązania. Dalej w opracowaniu autorzy podjęli także zagadnienie ułożenia ładunków na wagonach w taki sposób, aby przy częściowym rozładunku w terminalu pośrednim możliwe było bezproblemowe odłączenie wymaganych wagonów od reszty składu.

Opisane w skrócie powyższe podejście jest tylko jednym z możliwych opisanych w literaturze. Może ono jednak posłużyć do zobrazowania tego jak bardzo złożonym jest zagadnienie określania oraz optymalizacji aerodynamiki składu pociągu intermodalnego.

4.2. Przykład poprawy parametrów aerodynamicznych podczas załadunku składu pociągu

Poniżej zaoferowano prostą i uniwersalną metodę oceny punktowej rozwiązania załadunku składu pociągu pod kątem jego aerodynamiki. W ocenie uwzględniane jest położenie pustego slotu w składzie pociągu oraz jego długość. Metoda ta może zostać zastosowana na etapie załadunku składu pociągu w terminalu intermodalnym. Pozwala ona na ocenę jakości wstępnego załadunku pociągu a z użyciem odpowiedniego algorytmu prowadzi do zmniejszenia oporów aerodynamicznych składu pociągu.

Dla slotu s_n wartość współczynnika dodatkowego oporu aerodynamicznego, określającego „koszt karny” $D_A^{s_n}$ z tytułu występowania pustych slotów w składzie pociągu wyniesie:

$$D_A^{s_n} = \begin{cases} \left(\frac{(\sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2})^{-1} + \frac{L_{s_n}}{22}}{\sqrt{(x_N - x_0)^2 + (y_N - y_0)^2}} \right), & \text{jeżeli do slotu } s_n \text{ nie jest przypisany kontener} \\ 0, & \text{jeżeli do slotu } s_n \text{ jest przypisany kontener} \end{cases} \quad (3)$$

Gdzie:

(x_n, y_n) – współrzędne slotu w składzie pociągu,

(x_0, y_0) – współrzędne początku składu pociągu,

(x_N, y_N) – współrzędne ostatniego slotu w składzie pociągu,

L_{s_n} – długość slotu s_n .

Współczynnik dodatkowego oporu aerodynamicznego dla całego składu pociągu wyniesie:

$$D_A = \sum_{s_n \in R} D_A^{s_n} \quad (4)$$

Oraz funkcja powinna dążyć do minimum:

$$D_A \rightarrow \min \quad (5)$$

Modelową wartością wskaźnika D_A jest oczywiście 0, które jest równoznaczne z tym, że w składzie pociągu nie występują sloty bez kontenerów. Wtedy nie będą ponoszone dodatkowe karne koszty. W rzeczywistych warunkach pracy nie zawsze jest to możliwe.

We wzorze (3) uwzględniono tę krytyczną wartość 22m i przyrównano do niej długość występującego slotu baz kontenera ($\frac{Ls_n}{22}$). W celu zapewnienia uniwersalności wzoru, obliczona wartość jest także przyrównywana do długości całego składu pociągu. Uwzględniono oczywiście położenie bezwzględne pustego slotu od czoła składu pociągu.

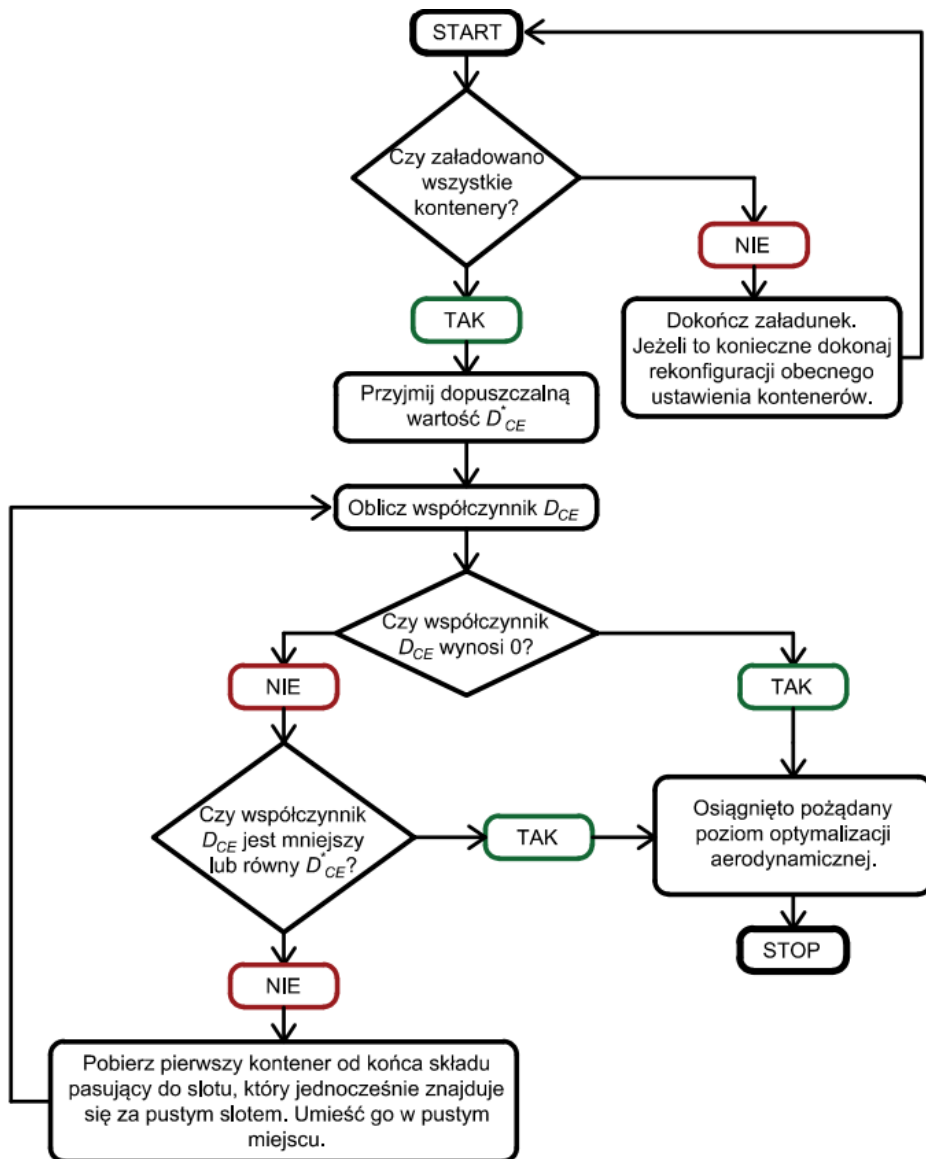
Ze względu na znaczący wpływ aerodynamiki składu pociągu na bezpieczeństwo transportu oraz zużycie energii przez pociąg w ruchu konieczność optymalizacji w kontekście aerodynamiki została uznana za istotny element realizacji procesu. W związku z tym po przejściu mrówek i ułożeniu kontenerów w sposób optymalny lub bliski optymalnemu (tj. po znalezieniu rozwiązania problemu) obliczony może zostać parametr D_{CE} dla otrzymanego rozwiązania.

Poprawa parametrów aerodynamicznych nie jest potrzebna jeżeli D_{CE} wynosi 0. W innym wypadku oznacza to, że w składzie pociągu występuje choć jeden wolny slot na wagonie. Na rysunkach Rys. 4.– Rys. 6. zaprezentowano trzy przykładowe możliwe algorytmy postępowania podczas sprawdzania aerodynamiki składu pociągu. Dalej posłużono się algorytmem II, który jednocześnie uwzględnia realne warunki pracy, w których nie zawsze możliwe jest dokonanie kompleksowej optymalizacji w wielu aspektach, ze względu na np. ograniczenia czasowe.

Warto zaznaczyć także, że dane takie jak współrzędne ładunków (i_n, j_n) oraz (e_n) pozwolą na późniejszym etapie opracowania na określenie drogi niezbędnej do pokonania przez układnicę do wybranego kontenera z dowolnego punktu terminalu.

Analizując funkcję zauważyć można, że uwzględnione zostały następujące czynniki wpływające na obsługę pociągu intermodalnego w terminalu:

- Położenie kontenera (pole składowe lub pasmo załadowcze, warstwa składowania),
- Dodatkowe operacje niezbędne do pobrania kontenera (przemieszczanie innych ładunków),
- Dodatkowe operacje niezbędne do załadunku kontenera (rekonfiguracja ustawienia pinów),
- Waga i rozmiar kontenerów,
- Rozmiar wagonu i restrykcje wagowe dla wagonu,
- Restrykcje wagowe dla pociągu,
- Parametry pracy urządzeń przeładunkowych (suwnicy).



Rys. 5. Przykład algorytmu optymalizacyjnego aerodynamiki pociągu intermodalnego podczas załadunku. Źródło: opracowanie własne

5. Wnioski oraz podsumowanie

Na podstawie publikacji opisanych w poprzedzającej części opracowania sformułować można następujące stwierdzenia:

1. Aerodynamika składu pociągu intermodalnego także odgrywa istotną rolę w efektywności transportu, zarówno pod kątem ekonomicznym, jak i ekologicznym;
2. Organizacja załadunku kontenerów na wagonach może przyczynić się do znacznych oszczędności paliwa, które mogą sięgać nawet 27%. Odpowiednie rozmieszczenie ładunków ma duże znaczenie;
3. Siły oporu ruchu nie rosną liniowo wraz z prędkością pociągu, co sprawia, że zagadnienie efektywności aerodynamicznej jest istotnym wyzwaniem w szczególności w przypadku zwiększania dopuszczalnych prędkości pociągów;
4. Lokalne badania dotyczące oddziaływania wiatrów bocznych na pojedynczy wagon lub jednostkę ładunkową wykazują, że rozmieszczenie ładunków oraz odstępy między nimi mają znaczny wpływ na opór aerodynamiczny;
5. Szczególnie jednostki ITU znajdujące się w czole składu pociągu mają duże znaczenie dla aerodynamiki i stabilności;
6. Badania nad aerodynamiką składu pociągu intermodalnego są istotne także z perspektywy optymalizacji i minimalizacji wpływu na środowisko naturalne. Kontynuacja badań w tym obszarze może prowadzić do efektywniejszego i bardziej zrównoważonego transportu towarowego.

Aerodynamika pociągu intermodalnego jest dodatkowym aspektem, który należy uwzględnić w procesie załadunku pociągu. Nie jest ona bezpośrednio związana z natychmiastowymi oszczędnościami (np. czasu) podczas załadunku w terminalu, ale w szerszym ujęciu przyczynia się do możliwości realizacji przewozu zachowaniem większego bezpieczeństwa (stabilność pociągu) a także przyczynić się do oszczędności na etapie przewozu (oszczędność paliwa). Aspekt aerodynamiki powinien zostać uwzględniony w modelu optymalizacyjnym.

Bibliografia:

1. Ahmed, N.A. (2019). Coanda Effect: Flow Phenomenon and Applications (1st ed.). CRC Press., 336 p. DOI: 10.1201/9780429441240
2. Baker, Ch., Johnson, T., Flynn, D., Hemida, H., Quinn, A., Soper, D., Sterling, M. (2019). Train Aerodynamics: Fundamentals and Applications. Butterworth-Heinemann, 402 p.
3. Baker CJ, Dalley SJ, Johnson T, Quinn A, Wright NG. (2001). The slipstream and wake of a high-speed train. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 215(2), 83-99. DOI:10.1243/0954409011531422
4. Bruns, F. Knust, S., (2012). Optimized load planning of trains in intermodal transportation. OR Spectrum, 34(3), 511–533.
5. Chattot, J.J., Hafez, M.M. (2015). Theoretical and Applied Aerodynamics and Related Numerical Methods. Springer, 625 p. ISBN 978-94-017-9824-2.
6. Cheli, F., Corradi, R., Rocchi, D., Tomasini, G., Maestrini, E. (2010). Wind tunnel tests on train scale models to investigate the effect of infrastructure scenario. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98(6–7), 353-362. DOI: 10.1016/j.jweia.2010.01.001.
7. Debraux, P., Grappe, F., Manolova, A. V., Bertucci, W. (2011). Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment. Sports Biomechanics, 10(3), 197–218. DOI: 10.1080/14763141.2011.592209.

8. Ding, SS., Li, Q., Tian, AQ. et al. (2016). Aerodynamic design on high-speed trains. *Acta Mechanica Sinica*, 32, 215–232. DOI: 10.1007/s10409-015-0546-y
9. Fey Wang, W., Young Yun, W., (2013). Scheduling for inland container truck and train transportation. *International journal of production economics*, 143, 349-356.
10. Flynn, D., Hemida, H., Baker. C., (2016). On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train and associated effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 156, 2016, 14-28. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.07.001.
11. Giappino, S., Melzi, S., Tomasini, G., (2018). High-speed freight trains for intermodal transportation: Wind tunnel study on the aerodynamic coefficients of container wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 111-119. DOI:10.1016/j.jweia.2018.01.047.
12. Janson, T. , Piechna, J., (2015). Numerical analysis of aerodynamic characteristics of a of high-speed car with movable bodywork elements. *Archive of Mechanical Engineering*, 62(4), 451-476. DOI: 10.1515/meceng-2015-0026.
13. Krstić, M.D., Tadić, S.R., Brnjac, N., Zečević, S., (2019). Intermodal Terminal Handling Equipment Selection Using a Fuzzy Multi-criteria Decision-making Model. *Promet - Traffic&Transportation*, 31 (1), 89-100. DOI: 10.7307/ptt.v31i1.2949.
14. Li, C. Burton, D. Kost, M. Sheridan, J. Thompson, M.C., (2017). Flow topology of a container train wagon subjected to varying local loading configuration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 169, 13-29.
15. Li, C., Otto, A., Pesch, E., (2018). Solving the single crane scheduling problem at rail transshipment yards. *Discrete Applied Mathematics*, 264, 134-147. DOI: 10.1016/j.dam.2018.07.021.
16. Nehring, K., Kłodawski, M., Jachimowski, R., Klimek, P., Vašek, R., (2021). Simulation analysis of the impact of container wagon pin configuration on the train loading time in the intermodal terminal. *Archives of Transport*, 60(4), 155-169. DOI: 10.5604/01.3001.0015.6928.
17. Östh, J., Krajnović, S., (2014). A study of the aerodynamics of a generic container freight wagon using Large-Eddy Simulation, *Journal of Fluids and Structures*, 44, 31-51, DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2013.09.017.
18. Rickett, T.G., Hart, J.M., Edwards, J.R., Kumar, A., Barkan C.P.L., Ahuja, N., (2011). Monitoring the Aerodynamic Efficiency of Intermodal Train Loading Using Machine Vision. *proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, 1-15.
19. Tadić, S., Krstić, M., Roso, V., Brnjac, N., (2019). Planning an Intermodal Terminal for the Sustainable Transport Networks. *Sustainability*, 11, 4102. DOI: 10.3390/sul1154102.
20. Yung-Cheng, Barkan, Ch.P.L., (2005). Options for Improving the Energy Efficiency of Intermodal Freight Trains, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1916, 47-55. DOI: <https://doi.org/10.3141/1916-08>.
21. Yung-Cheng, L. Barkan, Ch.P.L. Önal, H., (2008). Optimizing the aerodynamic efficiency of intermodal freight trains, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 820-834.
22. UTK, 2022. Urząd Transportu Kolejowego, 2022. Przewozy intermodalne 2021. Online: <https://utk.gov.pl/download/1/69937/Przewozyintermodalne2021.pdf> (ostatni dostęp 26.07.2024)

23. Eurostat, 2024. Unitisation in rail freight transport- tonne-kilometre for gross-gross weight of goods. Online: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tran_im_urail__custom_12147220/default/line?lang=en (ostatni dostęp 26.07.2024)
24. Aerodynamic Drag Equation and Calculator. https://www.engineersedge.com/fluid_flow/aerodynamic_drag_13632.htm (ostatni dostęp 26.07.2024).

Improvement of aerodynamic parameters as a factor of safety and efficiency in intermodal rail transport

Abstract. The optimization of aerodynamic parameters of train sets in intermodal rail transport is a significant factor in the pursuit of increased safety and reduced transportation costs. By reducing air resistance, it is possible to decrease energy consumption. Improved aerodynamics contribute to the stability of the train set, minimizing the risk of accidents and enhancing overall safety. This article discusses key issues related to the aerodynamics of train sets and the principles of improving aerodynamic performance. The research problem focuses on identifying and assessing the impact of aerodynamics on safety and energy efficiency in intermodal rail transport. The main research question concerns which specific aerodynamic modifications will yield the greatest benefits. A literature review was conducted, key factors and mathematical dependencies were identified, and an optimization algorithm model was proposed, incorporating best practices. The implementation of the proposed changes may have a long-term impact on the development of the transportation industry, particularly intermodal transport. Applying the suggested best practices and optimization methods may contribute to increasing the efficiency of intermodal rail freight operations.

Keywords: intermodal transport, optimization, aerodynamics

Koszt cyklu istnienia w ocenie efektywności środków transportu komunikacji zbiorowej

Weronika Pęgielska^{1,*}, Szkoda Maciej²

¹ Szkoła Doktorska Politechniki Krakowskiej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, MPK S.A. w Krakowie, ul. Św. Wawrzyńca 13, 31-060 Kraków

² Politechnika Krakowska, Katedra Pojazdów Szynowych i Transportu

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawy metodyczne kosztów cyklu istnienia (Life Cycle Cost, LCC) w zastosowaniu do oceny efektywności przedsięwzięć związanych ze środkami transportu komunikacji zbiorowej. Analiza LCC, jako narzędzie służące do oceny alternatywnych rozwiązań, jest w wielu państwach instrumentem wymaganym prawnie przy realizacji nowych inwestycji, rozpisywaniu przetargów na wykonanie usług lub budowę obiektów technicznych – najczęściej o dużej wartości początkowej i długim okresie trwałości. Do tego grona należą środki transportu komunikacji zbiorowej: autobusy, trolejbusy, tramwaje oraz pojazdy metra. Są to złożone obiekty techniczne, charakteryzujące się wysokimi kosztami zakupu, eksploatacji oraz długim okresem użytkowania (zwłaszcza tramwaje), dla których zbiór parametrów opisujących cykl istnienia jest bardzo obszerny i zróżnicowany. W pracy opisano podstawy metodyczne zastosowania LCC w eksploatacji środków transportu miejskiego, jak również scharakteryzowano wpływ niezawodności pojazdów w analizie LCC. Pracę zakończono podsumowaniem z przeprowadzonych rozważań.

Słowa kluczowe: analiza LCC, transport miejski, wskaźniki niezawodności

1. Wprowadzenie

Life Cycle Cost to termin będący w użyciu od ponad 60 lat, a mimo tego w literaturze polskiej trudno jest znaleźć jednoznaczny odpowiednik tego wyrażenia. Life Cycle Cost rozpowszechniło się w dosłownym tłumaczeniu na język polski jako „koszt cyklu życia”. W literaturze przedmiotu stosuje się zamiennie i inne określenia tego angielskiego terminu jak: koszt cyklu trwałości, koszt cyklu eksploatacji czy koszt okresu używalności [1, 2, 3]. W pracy [4] Z. Chłopek przedstawił przekonujące uzasadnienie i propozycję tłumaczenia terminu „life” w odniesieniu do obiektów innych niż organizmów jako „istnienie”. Stąd w celu ujednolicenia i standaryzacji polskiego określenia, w niniejszym artykule jako tłumaczenie Life Cycle Cost przyjęto koszt cyklu istnienia.

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Pęgielska, W., Szkoda, M. (2025). Koszt cyklu istnienia w ocenie efektywności środków transportu komunikacji zbiorowej, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 123–137, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

*Autor do korespondencji

E-mail adres: weronika.pegielekska@doktorant.pk.edu.pl, (W. Pęgielska)

ORCID iD: 0009-0001-1097-3282 (W. Pęgielska), 0000-0002-9511-2253 (M. Szkoda)

Analiza kosztów cyklu istnienia (LCC) jest narzędziem, które zyskało na znaczeniu w różnych gałęziach przemysłu dzięki swojej zdolności do kompleksowej oceny kosztów związanych z całym okresem funkcjonowania obiektów technicznych. Znajduje zastosowanie w wielu sektorach gospodarki, wspierając podejmowanie świadomych decyzji inwestycyjnych i operacyjnych. W budownictwie pozwala uwzględniać koszty eksploatacji już na etapie projektowania, co sprzyja wyborowi efektywnych i proekologicznych technologii [5]. W przemyśle kosmicznym umożliwia optymalizację konfiguracji rakiet wielokrotnego użytku, jak w przypadku Falcon 9 [6]. W transporcie morskim służy porównaniu napędów, uwzględniając ceny paliw i regulacje środowiskowe – silniki dual-fuel okazują się korzystniejsze od diesla [7]. W energetyce ocenia opłacalność nowych technologii, np. zgazowania węgla z wychwytem CO₂ [8]. W zarządzaniu infrastrukturą techniczną pozwala lepiej planować inspekcje i naprawy, zmniejszając ryzyko awarii – jak pokazuje przykład rurociągów narażonych na korozję [9]. Specjalistyczna literatura wskazuje na potencjał wykorzystania LCC w ocenie środków transportu zbiorowego.

Koncepcja ta wywodzi się z programów Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych z lat 60. ubiegłego wieku [10], gdzie była stosowana do zarządzania kosztami eksploatacji sprzętu wojskowego. W tamtym czasie kluczowym problemem było uwzględnienie nie tylko początkowych nakładów inwestycyjnych, ale również wydatków związanych z użytkowaniem, utrzymaniem i późniejszą utylizacją. W kolejnych latach metodologia ta została rozwinięta i zaczęła być stosowana w obszarach cywilnych, takich jak budownictwo, energetyka czy transport. Obecnie analiza LCC jest nieodłącznym elementem oceny opłacalności inwestycji w wielu państwach. W Stanach Zjednoczonych od 1999 roku publiczne instytucje są zobowiązane do jej stosowania przy zamówieniach publicznych dekretem prezydenckim [11]. Takie podejście umożliwia minimalizowanie kosztów ponoszonych przez państwo na różne przedsięwzięcia. W Polsce LCC zaczyna odgrywać coraz większą rolę dzięki stopniowemu odejściu od stosowania wyłącznie ceny zakupu jako głównego kryterium wyboru dostawcy w przetargach publicznych. W sektorze transportu miejskiego zauważalne są zmiany w kierunku bardziej złożonych kryteriów oceny ofert, obejmujących nie tylko koszty początkowe, ale również koszty utrzymania i niezawodność. Przykładem są przetargi na dostawę taboru miejskiego w Warszawie, w których brano pod uwagę m.in. koszty naprawy poszycia tramwajów w zależności od rodzaju uszkodzeń. Znaczącą rolę w upowszechnieniu tego podejścia odegrały zmiany legislacyjne. W szczególności nowelizacje ustawy Prawa Zamówień Publicznych (PZP) które uwzględniają możliwość zastosowania rachunku kosztów cyklu istnienia jako jednego z kryteriów oceny ofert. Zmiana z 2024 roku [12] podkreśla konieczność wyboru najkorzystniejszej oferty na podstawie ceny i kryteriów jakościowych lub kosztowych, co stanowi wyraźny krok w kierunku pełniejszego wykorzystania analizy LCC w polskim systemie zamówień publicznych. Mimo to, w sektorze transportu miejskiego wciąż dominuje podejście oparte w dużej mierze na cenie zakupu, co wskazuje na potrzebę dalszego promowania korzyści wynikających z bardziej kompleksowego podejścia.

Norma PN-EN 60300-3-3 opublikowana w 2017 roku [13], dostarcza szczegółowych wytycznych dotyczących analizy LCC w odniesieniu do obiektów technicznych. W przypadku transportu miejskiego norma ta ma szczególne znaczenie, ponieważ obejmuje cały cykl istnienia pojazdu, począwszy od fazy projektowania, wytwarzania,

przez eksploatację, aż po likwidację. Aktualizacja normy uwzględniła także fazę ulepszania (modernizacji), która jest istotna w kontekście pojazdów komunikacji miejskiej. W praktyce transportu miejskiego oznacza to, że po zakończeniu podstawowego okresu eksploatacji podejmowane są działania mające na celu dostosowanie pojazdu do zmieniających się wymagań użytkowników. Przykładem mogą być modernizacje wagonów tramwajowych, mające na celu wydłużenie ich trwałości, poprawę efektywności energetycznej czy dostosowanie do aktualnych wymagań. Jako przykład takich działań, podać można ulepszenie używanych wagonów E6 z Wiednia w roku 2008 przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Krakowie. Po modernizacji obejmującej między innymi dodanie członu niskopodłogowego wyprodukowanego przez firmę Autosan S.A. z Sanoka, powstały tramwaje o oznaczeniu EU8N które zasilily tabor przewoźnika, zwiększając udział pojazdów z udziałem niskiej podłogi we flocie przewoźnika. Pojazdy przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Wagon typu E6, stanowiący bazę dla zmodernizowanych tramwajów EU8N



Rys. 2. Modernizowany wagon tramwajowy typu EU8N (źródło: [17])

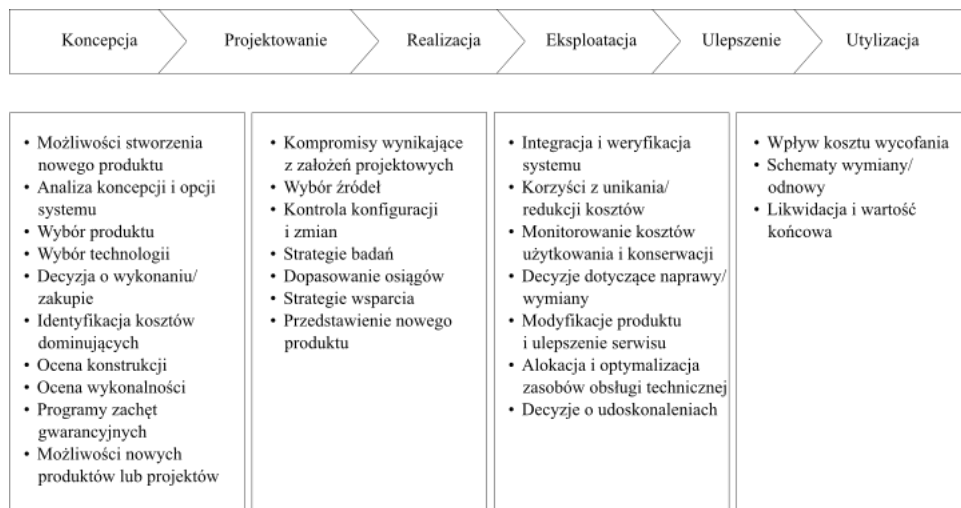
W ostatnich latach w Polsce przeprowadzono wiele prac analitycznych analiz dotyczących efektywności w transporcie szynowym z wykorzystaniem norm LCC. Przykładem mogą być liczne prace przedstawione w [1, 14, 15, 16]. Przeprowadzone

analizy wykazały, że analiza LCC jako narzędzie służące do oceny alternatywnych wariantów, powinna być wymagana przy realizacji nowych inwestycji, organizacji przetargów na dostawę obiektów technicznych o dużej wartości początkowej i długim okresie trwałości do jakich należą środki transportu komunikacji zbiorowej. Wprowadzenie tych zmian jest jednak procesem powolnym, co wynika z konieczności zmiany dotychczasowego podejścia do oceny inwestycji oraz potrzeby edukacji w zakresie korzyści wynikających z kompleksowej analizy kosztów.

Celem pracy jest opis podstaw teoretycznych wynikających głównie z wymogów normy PN-EN 60300-3-3 związanych z aplikacją kosztu cyklu istnienia (LCC) jako kryterium decyzyjnego w ocenie efektywności przedsięwzięć związanych ze środkami transportu komunikacji zbiorowej.

2. Cykl istnienia środków transportu miejskiego

Cykl istnienia obiektu technicznego stanowi kluczowy obszar analizy kosztów, obejmujący wszystkie fazy funkcjonowania – od jego koncepcji, poprzez projektowanie, produkcję i eksploatację, aż po wycofanie z użytkowania i likwidację. Każdy etap charakteryzuje się odmiennymi wyzwaniami i decyzjami, które mają fundamentalne znaczenie dla efektywności ekonomicznej oraz zrównoważonego rozwoju. Etapy cyklu istnienia obiektów technicznych z typowymi decyzjami podejmowanymi na poszczególnych etapach zgodnie z normą PN-EN 60300-3-3 przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Etapy cyklu istnienia obiektów technicznych zgodnie z normą PN-EN 60300-3-3 (na podstawie: [13])

Fazę koncepcji w przypadku pojazdów komunikacji miejskiej odnieść można do analizy potrzeb miasta oraz użytkowników w kontekście rozwijania infrastruktury transportowej. Kluczowe decyzje podejmowane na tym etapie dotyczą wyboru rodzaju pojazdu (np. autobus spalinowy, elektryczny, gazowy czy wodorowy), oceny możliwych technologii napędowych oraz analizy kosztów cyklu istnienia w odniesieniu do zakupu,

eksploatacji i utylizacji. W tym kontekście analizuje się również możliwości dostosowania floty do wymogów środowiskowych, takich jak normy emisji spalin czy polityki ograniczania hałasu w miastach. Ważnym elementem jest określenie oczekiwań dotyczących pojemności pojazdów, komfortu pasażerów, dostępności dla osób ze specjalnymi potrzebami oraz zasięgu pojazdu, co determinuje wybór technologii i konfiguracji technicznej.

W fazie projektowania konkretne założenia techniczne przekształcane są w szczegółowe specyfikacje techniczne pojazdów. Na tym etapie decyduje się o wyborze technologii, które pozwolą osiągnąć zamierzone cele funkcjonalne i środowiskowe. W przypadku pojazdów elektrycznych, kluczowe znaczenie ma analiza możliwości integracji systemów ładowania z miejską infrastrukturą, podczas gdy dla pojazdów gazowych czy wodorowych ważne jest zapewnienie odpowiednich punktów tankowania. W tej fazie operatorzy transportu publicznego opracowują specyfikacje przetargowe w celu określenia wymagań dotyczących pojazdów odpowiadających na specyficzne potrzeby danego miasta, uwzględniając takie kwestie jak warunki klimatyczne, topografia terenu czy natężenie ruchu. Decyzje projektowe uwzględniają również możliwość późniejszej modernizacji pojazdów, co umożliwia wydłużenie ich trwałości.

Faza realizacji, czyli produkcji pojazdów, wiąże się z kontrolą konfiguracji technicznej i jakości dostarczanych jednostek. Operatorzy transportu miejskiego współpracują z producentami, aby zapewnić zgodność z wymaganiami technicznymi oraz z warunkami przetargowymi. Na tym etapie kluczowe decyzje dotyczą strategii odbioru nowych pojazdów oraz ich integracji z istniejącą flotą. Wprowadzenie nowych pojazdów wymaga także opracowania strategii szkoleniowej dla kierowców oraz personelu technicznego, co wpływa na efektywność operacyjną oraz bezpieczeństwo użytkowania. Istotnym elementem tej fazy jest przeprowadzenie testów eksploatacyjnych w warunkach rzeczywistych, które pozwalają na weryfikację założeń projektowych i identyfikację ewentualnych problemów.

Najbardziej znaczącym etapem w cyklu istnienia pojazdów komunikacji miejskiej jest faza eksploatacji, która obejmuje użytkowanie pojazdów w realizacji pracy przewozowej. Kluczowe decyzje na tym etapie koncentrują się na zarządzaniu kosztami operacyjnymi, w tym zużyciem paliwa lub energii, planowaniem harmonogramów konserwacji oraz optymalizacją dostępności pojazdów w ruchu. W przypadku autobusów elektrycznych istotna jest efektywna organizacja ładowania baterii, natomiast dla pojazdów spalinowych – kontrola emisji. Istotnym aspektem jest także zarządzanie flotą w sposób umożliwiający minimalizację kosztów przestojów wynikających z awarii. W eksploatacji dużą rolę odgrywa analiza danych zbieranych w czasie rzeczywistym przez systemy diagnostyczne, co pozwala na poznanie charakterystyki eksploatacji danego typu pojazdu, przewidywanie i zapobieganie problemom technicznym.

Faza ulepszania (modernizacji) w przypadku pojazdów komunikacji miejskiej staje się coraz bardziej istotna w świetle rosnących wymagań środowiskowych i ekonomicznych. Operatorzy decydują o modernizacji starszych pojazdów, aby spełniały aktualne normy emisji lub poprawiały efektywność energetyczną. Przykładem mogą być modyfikacje starszych autobusów spalinowych na pojazdy elektryczne lub hybrydowe, co pozwala na przedłużenie ich użytkowania i obniżenie kosztów zakupu nowych jednostek. Ulepszanie może obejmować także instalację nowych systemów informacyjnych lub innych

udogodnień dla pasażerów, poprawę ergonomii wnętrza czy zastosowanie bardziej zaawansowanych systemów bezpieczeństwa.

Ostatnim etapem cyklu istnienia pojazdów komunikacji miejskiej jest utylizacja, w której kluczowe decyzje dotyczą sposobu wycofania pojazdów z eksploatacji. Proces ten obejmuje analizę kosztów demontażu oraz możliwości recyklingu poszczególnych komponentów, takich jak baterie litowo-jonowe w autobusach elektrycznych czy układy napędowe w pojazdach spalinowych. Ważnym elementem jest zgodność procesu utylizacji z wymogami prawnymi dotyczącymi ochrony środowiska, co obejmuje zarówno odzysk surowców, jak i odpowiednią neutralizację materiałów niebezpiecznych. W niektórych przypadkach podejmowane są decyzje o odsprzedaży starszych pojazdów na rynki o mniej restrykcyjnych wymaganiach.

3. Procedura kalkulacji LCC według normy PN-EN 60300-3-3

Koszt cyklu istnienia LCC według normy PN-EN 60300-3-3 jest to łączny koszt ponoszony w cyklu „istnienia” obiektu technicznego, czyli od powstania koncepcji, poprzez wytworzenie i eksploatację, do jego likwidacji:

$$LCC = K_N + K_P + K_L \quad (1)$$

gdzie:

K_N – koszty nabycia,

K_P – koszty posiadania,

K_L – koszty likwidacji.

Koszty nabycia ponoszone są głównie w pierwszych fazach cyklu istnienia i związane są z nakładami inwestycyjnymi niezbędnymi do pozyskania i wprowadzenia pojazdu do eksploatacji. Koszty nabycia są jedynym elementem, który można łatwo obliczyć w kalkulacji LCC, ale jak dowodzą prace badawcze bardzo często stanowią tylko przysłowiowy wierzchołek góry lodowej. Koszty posiadania związane są z fazą eksploatacji, która dla środków transportu miejskiej stanowi ponad 90% czasu trwania całego cyklu istnienia. Koszty posiadania są bardzo często głównym składnikiem LCC i w wielu przypadkach zdecydowanie przewyższają koszty nabycia. Koszty likwidacji związane są z wycofaniem pojazdu z eksploatacji i obejmują w szczególności koszty rozbiórki i recyklingu. W przypadku starych pojazdów, których likwidacja jest uciążliwa w sensie technologicznym ze względu na występowanie materiałów niebezpiecznych (np.: azbest), koszty te mogą stanowić znaczącą część całkowitych LCC.

W normie opisano uniwersalną procedurę kalkulacji LCC, którą zaleca się przeprowadzić w kilku etapach przedstawionych schematycznie na rysunku 4. Opisana w normie procedura może stanowić podstawę kalkulacji LCC dla taboru komunikacji zbiorowej z uwzględnieniem charakterystyk niezawodności.

Analiza kosztów cyklu istnienia w kontekście pojazdów komunikacji miejskiej jest złożonym procesem, który pozwala na ocenę całkowitych kosztów związanych z zakupem, eksploatacją, utrzymaniem i utylizacją tych pojazdów w określonym czasie. Pierwszym krokiem jest sformułowanie założeń analizy, które obejmuje identyfikację podstawowych

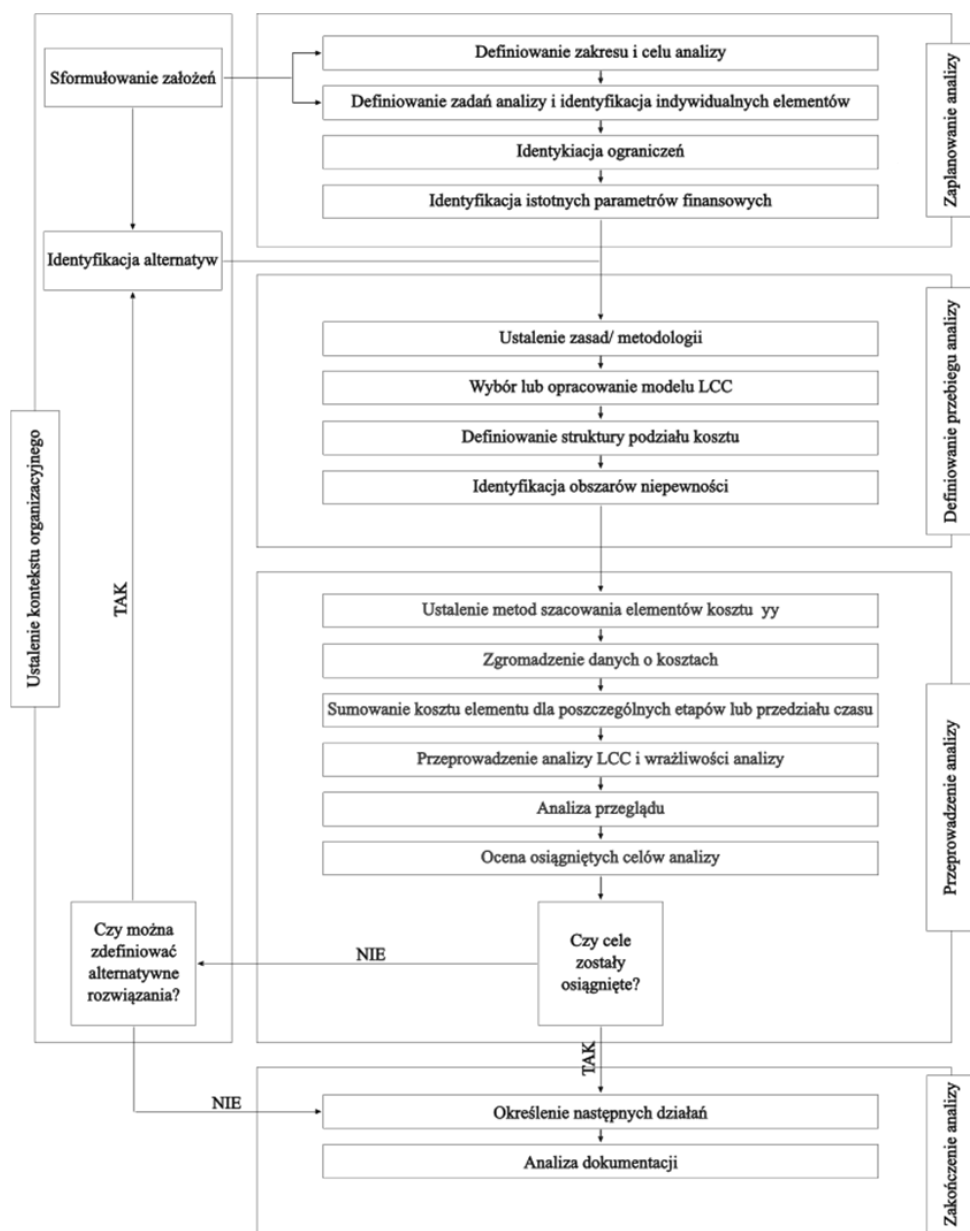
wymagań oraz określenie możliwych alternatywnych rozwiązań. Na tym etapie kluczowe jest zdefiniowanie kontekstu organizacyjnego oraz celów, jakie analiza ma osiągnąć, co wymaga dogłębnego zrozumienia specyficznych potrzeb projektu. W przypadku pojazdów komunikacji miejskiej może to obejmować wybór między różnymi typami napędów lub innych układów istotnych w kontekście eksploatacji danego typu pojazdu. Wskazać można również istotę określenia potrzeb przewozowych i specyfiki infrastruktury miejskiej, takich jak dostępność stacji ładowania w kontekście np. autobusów elektrycznych czy charakterystykę sieci trakcyjne w odniesieniu do wyposażania tramwajów w system jazdy bez sieci.

Kolejną fazą jest zaplanowanie analizy, podczas którego wyznaczany jest jej zakres oraz cele szczegółowe. Obejmuje to także identyfikację elementów podlegających analizie, uwzględniając przy tym ograniczenia, które mogą wynikać zarówno z kontekstu technicznego, jak i ekonomicznego. Na tym etapie niezwykle istotne jest również określenie parametrów finansowych, które będą podstawą dalszych obliczeń. Dla pojazdów komunikacji miejskiej oznaczać to może określenie, jakie koszty zostaną uwzględnione – od zakupu pojazdów, przez koszty paliwa lub energii elektrycznej, aż po koszty serwisowania i ewentualnej utylizacji. W tym etapie identyfikuje się także ograniczenia, takie jak budżet, regulacje środowiskowe czy warunki techniczne wynikające z charakterystyki floty. Ponadto należy zdefiniować parametry finansowe, na przykład stopy dyskontowe, które pozwolą na oceny kosztów w długim horyzoncie czasowym.

Następnie przechodzi się do definiowania przebiegu analizy, gdzie ustala się zasady metodologiczne i wybiera odpowiedni model analizy kosztów cyklu istnienia. Wybór ten zależy od specyfiki projektu i dostępnych danych, dlatego kluczowym zadaniem jest zidentyfikowanie struktury podziału kosztów oraz obszarów niepewności, które mogą wpłynąć na wyniki analizy. Etap ten służy stworzeniu podstaw analitycznych, które umożliwią dokładne przeprowadzenie obliczeń. Przykładem może być podział kosztów na etapy cyklu istnienia, takie jak zakup pojazdu, użytkowanie, konserwacja i utylizacja. Istotne jest także uwzględnienie obszarów niepewności, takich jak zmienne ceny paliwa lub energii elektrycznej, tempo rozwoju technologii czy możliwe zmiany w polityce transportowej. Modelowanie tych czynników pozwala na uzyskanie bardziej realistycznych wyników.

Przeprowadzenie analizy właściwej obejmuje gromadzenie danych kosztowych, które są następnie sumowane dla poszczególnych etapów cyklu istnienia. Zastosowanie wybranych metod szacowania pozwala na uwzględnienie wszystkich istotnych kosztów, takich jak koszty zakupu, użytkowania, konserwacji czy utylizacji. Dodatkowo, analiza wrażliwości umożliwia ocenę wpływu zmiennych parametrów na końcowe wyniki, co zwiększa wiarygodność przeprowadzonych obliczeń. Istotnym elementem tego etapu jest również przegląd wyników, który pozwala na ocenę, czy założone cele zostały osiągnięte. Dla pojazdów komunikacji miejskiej dane te mogą dotyczyć cen zakupu pojazdów, kosztów instalacji lub dostosowania infrastruktury, zużycia paliwa lub energii elektrycznej, a także kosztów serwisowania, w tym napraw układów napędowych czy wymiany akumulatorów. Następnie dokonuje się sumowania kosztów dla całego okresu eksploatacji pojazdów oraz przeprowadza analizę wrażliwości, która pozwala ocenić wpływ zmian poszczególnych czynników na wyniki. Przykładowo, analiza taka może

wskazać, jak wzrost cen energii elektrycznej wpłynie na opłacalność floty autobusów elektrycznych w porównaniu do pojazdów spalinowych.



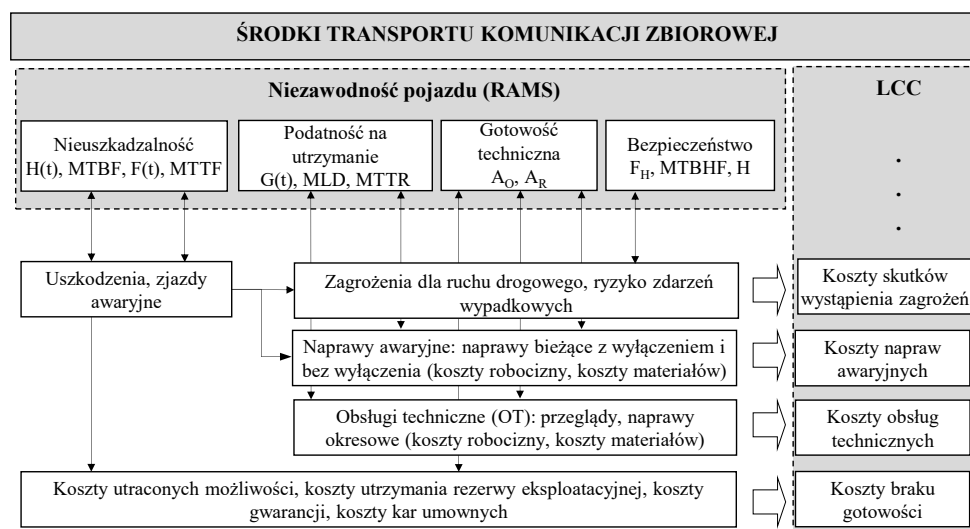
Rys. 4. Schemat przeprowadzenia analizy LCC według normy PN-EN 60300-3-3 (na podstawie: [13])

Zakończenie analizy polega na kompleksowej ocenie uzyskanych rezultatów i dokumentacji wyników. W sytuacji, gdy cele analizy nie zostały spełnione, konieczne jest zidentyfikowanie przyczyn oraz podjęcie działań korygujących, które mogą wymagać powrotu do wcześniejszych etapów procesu. Natomiast w przypadku osiągnięcia zakładanych celów, rekomendowane rozwiązanie jest szczegółowo dokumentowane i przedstawiane jako podstawa do podjęcia finalnych decyzji. W przypadku pojazdów komunikacji miejskiej może to oznaczać, że flota spełnia wymagania ekologiczne przy jednoczesnym zachowaniu kosztów w ramach dostępnego budżetu. Jeśli cele analizy nie zostaną osiągnięte, konieczne jest dokonanie korekt, takich jak zmiana parametrów technicznych pojazdów, weryfikacja strategii eksploatacji czy analiza innych technologii.

Cały proces analizy kosztów cyklu istnienia pojazdów komunikacji miejskiej pozwala na podejmowanie racjonalnych decyzji inwestycyjnych i operacyjnych. Dzięki uwzględnieniu pełnego zakresu kosztów, od zakupu po utylizację, możliwe jest wybieranie rozwiązań optymalnych zarówno pod względem ekonomicznym, jak i ekologicznym. W miastach dążących do zrównoważonego rozwoju analiza LCC stanowi więc podstawowe narzędzie wspierające racjonalną politykę transportową.

3.1. Wpływ niezawodności środków transportu komunikacji zbiorowej na LCC

Według wymagań normy PN-EN 60300-3-3 ocena niezawodności powinna być integralną częścią procesu kalkulacji LCC każdego obiektu technicznego. Podstawowe zależności pomiędzy niezawodnością pojazdu charakteryzowaną wskaźnikami RAMS, a modelem LCC przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Związek pomiędzy niezawodnością i LCC środków transportu komunikacji zbiorowej (źródło: [1])

Wyniki przeprowadzonych analiz dowodzą, że charakterystyki niezawodnościowe środków transportu mają istotny wpływ na koszty użytkowania i utrzymania [1, 20]. W większości opracowań dotyczących tego zagadnienia straty wywołane zawodnością pojazdu traktuje się jako wielkość zdeterminowaną, określoną kosztami wyłączenia pojazdu lub kosztami napraw. W rzeczywistości powstają również straty związane z bezpośrednim skutkiem niezdatności, wynikłe na przykład z utraty korzyści powstających w okresie niezdatności pojazdu, koszty związane z utratą renomy i prestiżu firmy lub utraty klientów.

Jako przykładowe kategorie kosztów zależne od charakterystyk niezawodności można wymienić:

- koszty napraw awaryjnych,
- koszty obsługi technicznych,
- koszty braku gotowości,
- koszty utrzymywania rezerwy eksploatacyjnej,
- koszty części wymiennych,
- koszty strat społecznych i następstw nieszczęśliwych wypadków,
- koszty przestoju i utraty renomy firmy.

W profesjonalnej literaturze z zakresu aplikacji LCC do oceny efektywności systemów technicznych, autorzy przedstawiają różne metody obliczeniowe dla wyżej wymienionych kategorii kosztów. W prezentowanych formułach stosowane są różne wskaźniki niezawodnościowe, w zależności od obiektu będącego przedmiotem badań, celu badań i przede wszystkim od dostępności bazy danych niezawodnościowych. Wybór wskaźników niezawodnościowych zależy również od stopnia szczegółowości i celu analizy.

Analiza niezawodności wykonywana w ramach kalkulacji LCC sprowadza się do wyznaczenia grupy wybranych wskaźników niezawodnościowych, które stanowią podstawę do obliczenia elementów kosztów. Na podstawie przeglądu specjalistycznej literatury i norm dotyczącej oceny nieuszkodzalności, gotowości, podatności na utrzymanie i bezpieczeństwa [17 ÷ 21], stwierdzono, że jako podstawowy zestaw wskaźników niezawodnościowych mających zastosowanie w analizie LCC pojazdów komunikacji zbiorowej można wymienić:

- wskaźnik zjazdów awaryjnych W_A [li. zjazdów / 10000 wkm],
- średnia liczba uszkodzeń pojazdu w danym okresie eksploatacji MNF [li. uszk./czas],
- średni czas między uszkodzeniami $MTBF$ [godz.],
- wskaźnik gotowości technicznej A ,
- średni czas odnowy $MTTR$ [godz.].

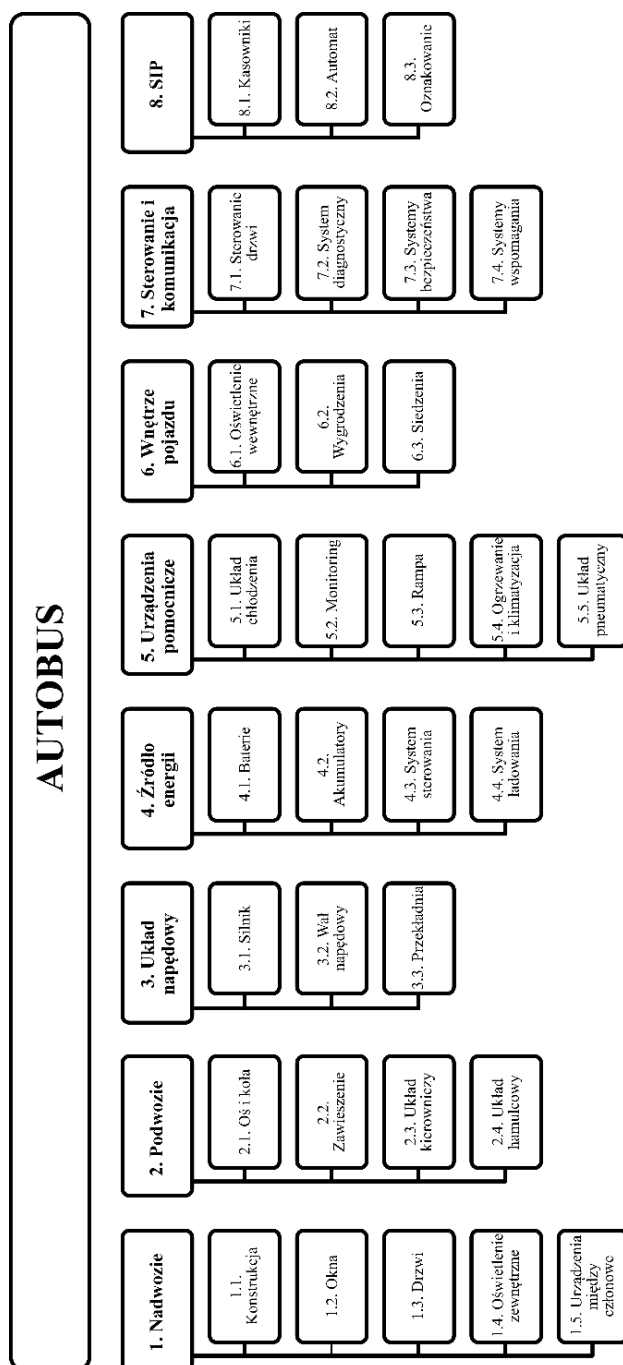
3.2. Struktura podziału systemu i koncepcja elementu kosztu

Norma PN-EN60300-3-3 do szczegółowej analizy LCC zaleca opracowanie i wykorzystanie koncepcji SBS (System Breakdown Structure). SBS w kontekście pojazdów komunikacji miejskiej odgrywa kluczową rolę w efektywnym zarządzaniu ich cyklem istnienia oraz optymalizacji kosztów. SBS jest hierarchicznym narzędziem analitycznym, które umożliwia szczegółowe zdefiniowanie i uporządkowanie wszystkich elementów składających się na system, jakim jest pojazd komunikacji miejskiej. Dzięki

temu możliwe jest rozbicie złożonego systemu na mniejsze, łatwiejsze do zarządzania komponenty, co ułatwia identyfikację kosztów, analizę technologiczną oraz organizację prac związanych z projektowaniem, eksploatacją i utrzymaniem pojazdów. Wymienić można tu następujące korzyści zastosowania SBS:

- szczegółowe przypisanie kosztów do poszczególnych komponentów i etapów, np. koszty związane z bateriami w autobusach elektrycznych mogą być analizowane oddzielnie od kosztów układu hamulcowego, co pozwala lepiej zrozumieć, które elementy generują największe wydatki w czasie użytkowania pojazdu,
- podział systemu na główne moduły, tak, aby każdy z tych elementów mógł być następnie szczegółowo rozpatrywany pod kątem swojej roli w systemie, wymagań technicznych, kosztów oraz potencjalnego ryzyka,
- wspiera proces decyzyjny w zakresie projektowania i modernizacji pojazdów, dzięki szczegółowemu podziałowi systemu możliwe jest łatwiejsze porównanie różnych technologii i rozwiązań, np. w przypadku decyzji dotyczącej wyboru między autobusami elektrycznymi a spalinowymi, SBS umożliwia analizę szczegółową nie tylko kosztów zakupu, ale także kosztów operacyjnych, takich jak zużycie energii, konserwacja czy wpływ na środowisko w całym okresie eksploatacji,
- zastosowanie w zarządzaniu eksploatacją pojazdów komunikacji miejskiej, gdzie ułatwia planowanie prac konserwacyjnych i serwisowych, ponieważ pozwala na dokładne określenie, które komponenty wymagają uwagi i w jakim zakresie, np. w autobusach elektrycznych kluczowym elementem będzie układ baterii, który wymaga regularnych kontroli i ewentualnych wymian, podczas gdy w pojazdach spalinowych szczególna uwaga może być poświęcona układom spalinowym,
- zarządzanie ryzykiem i optymalizacji wydajności systemu, gdzie dzięki szczegółowemu podziałowi możliwe jest szybkie zidentyfikowanie potencjalnych słabych punktów lub elementów generujących problemy, co pozwala na ich wcześniejsze wyeliminowanie lub ograniczenie negatywnego wpływu na funkcjonowanie pojazdu.

Przykładowa struktura SBS dla autobusu została przedstawiona na rysunku 6.



Rys. 6. Hierarchiczna struktura SBS dla przegubowego autobusu miejskiego z silnikiem spalinowym

4. Podsumowanie

Zastosowanie analizy kosztów cyklu istnienia (LCC) w oparciu o wymagania międzynarodowej normy stanowi skuteczne narzędzie oceny efektywności eksploatacji co można wykorzystać w kontekście oceny taboru komunikacji miejskiej. Podejście to pozwala na kompleksowe uwzględnienie wszystkich kluczowych czynników kosztowych, od fazy projektowania aż po wycofanie z eksploatacji. Ujęcie w modelu takich aspektów jak koszty zakupu, utrzymania, napraw czy likwidacji zapewnia precyzyjne określenie podzespołów pojazdu generujących najwyższe koszty i ich optymalizację.

Na podstawie analizy literatury w zakresie podstaw metodycznych LCC i dotychczas wykonanych prac naukowych związanych z zastosowaniem LCC stwierdzono, że niezawodność pojazdów odgrywa kluczową rolę w efektywności ich użytkowania, a szczegółowe wskaźniki określające niezawodność, powinny być uwzględniane w ocenie ekonomicznej. Ponadto, integracja normatywnego podejścia z praktyczną analizą umożliwia lepsze prognozowanie kosztów, identyfikację krytycznych punktów w cyklu istnienia oraz wspiera proces podejmowania decyzji na poziomie strategicznym. Zastosowanie takiego modelu w komunikacji miejskiej pozwoli zarządom i decydentom skuteczniej alokować środki oraz realizować cele związane z efektywnością kosztową i środowiskową.

LCC stanowi ważne narzędzie wspierające decyzje inwestycyjne w sektorze transportu miejskiego. Jego pełne wdrożenie pozwala na bardziej zrównoważone zarządzanie środkami publicznymi oraz minimalizację kosztów związanych z eksploatacją i utrzymaniem infrastruktury. Jednakże, aby w pełni wykorzystać potencjał tej metody, konieczne są dalsze działania mające na celu promowanie jej zastosowań, szczególnie w kontekście polskiego transportu publicznego, gdzie dominuje jeszcze podejście oparte na cenie zakupu. Rozwój tego podejścia może przyczynić się do lepszego zarządzania zasobami i poprawy jakości usług świadczonych użytkownikom.

Cykl istnienia pojazdów komunikacji miejskiej wymaga strategicznego zarządzania na każdym etapie, aby zminimalizować koszty oraz zmaksymalizować efektywność i zrównoważony rozwój systemów transportowych. Decyzje podejmowane przez operatorów i producentów mają wpływ nie tylko na ekonomię działania floty, ale także na jakość życia społeczeństwa i ochronę środowiska naturalnego. Zastosowanie podejścia LCC pozwala na długoterminowe planowanie oraz podejmowanie świadomych decyzji w oparciu o analizę kosztów i korzyści dla całego systemu transportowego.

Bibliografia:

1. Szkoda, M. (2017). Kształtowanie potencjału przewozowego przedsiębiorstw transportu kolejowego, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2017, ISBN: 978-83-7242-925-4.
2. Dziaduch, I. (2011). Analiza kosztów okresu istnienia (LCC) obiektu technicznego w aspekcie jego niezawodności, Logistyka nr 2, (nośnik CD)
3. Szkoda, M., Tułeczki, A. (2016). Ecology, energy efficiency and resource efficiency as the objectives of rail vehicles renewal, World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai, 10-15 July 2016.
4. Chłopek, Z. (2013). Badania zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach symulujących jazdę w mieście, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability nr 1, 75-82.

5. Gopangoni, V., Velpula, S.L. (2020). An analytical approach on life cycle cost analysis of a green building, *Materials Today: Proceedings* Vol. 33, Part 1, s. 387-390.
6. Jo, B., Ahn, J. (2022). Optimal staging of reusable launch vehicles for minimum life cycle cost, *Aerospace Science and Technology* Vol. 127.
7. Bui, K.Q., Perera, L.P., Emblemssvåg, J. (2022). Life-cycle cost analysis of an innovative marine dual-fuel engine under uncertainties, *Journal of Cleaner Production* Vol. 380, Part 2.
8. Feng, Y., Chen, J., Luo, J. (2024). Life cycle cost analysis of power generation from underground coal gasification with carbon capture and storage (CCS) to measure the economic feasibility, *Resources Policy* Vol. 92.
9. Kere, K.J., Huang, Q. (2024). An analytical approach to evaluate life-cycle cost of deteriorating pipelines, *Reliability Engineering & System Safety* Vol. 250.
10. Department of Defence, Life cycle costing in equipment procurement, Washington, 1965
11. Executive Order 13123: Greening the Government Through Efficient Energy Management, Federal Register Vol. 64, No. 109, USA, 1999.
12. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 19 sierpnia 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo zamówień publicznych, Dz.U. 2024 poz. 1320.
13. PN-EN 60300-3-3:2017 Dependability management - Part 3-3: Application guide - Life cycle costing.
14. Studium wykonalności szybkiego, bezkolizyjnego transportu szynowego w Krakowie Etap IV: Analiza techniczna w zakresie możliwości realizacyjnych wskazanych wariantów inwestycyjnych, Wydanie 6, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, lipiec 2020.
15. Studium możliwości zastosowania kosztów cyklu istnienia (LCC) do oceny efektywności zakupu taboru komunikacji zbiorowej, Politechnika Krakowska Katedra Pojazdów Szynowych i Transportu, Kraków, marzec 2023 r.
16. Correa, L., Razi, F., Sadiq, R., Hewage, K. (2024). Life cycle costing analysis of aretrofitted hydrogen-powered locomotive: Canadian context, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* Vol. 133.
17. Strona internetowa: <https://www.mpk.krakow.pl/>, dostępna w dn. 30.11.2024 r.
18. PN-EN 61703:2005 Wyrażenia matematyczne dotyczące nieuszkodzalności, gotowości, obsługiwalności i zapewnienia środków obsługi.
19. PN-EN 50126-1:2018-02 Zastosowania kolejowe – Specyfikacja niezawodności, dostępności, podatności utrzymaniowej i bezpieczeństwa.
20. Szkoda, M. (2015). Niepewność i ryzyko w analizie LCC kolejowych środków transportu, *Logistyka* nr 4, 8373-8379.
21. Stapelberg R. F. (2009). Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design, Springer Science & Business Media

Life cycle cost in assessing the effectiveness of public means of transport

Abstract. The paper presents the methodological foundations of the Life Cycle Cost (LCC) in the application of the assessment of the effectiveness of undertakings related to public transport means. LCC analysis, as a tool for assessing alternative solutions, is in many countries an instrument required by law when implementing new investments, announcing tenders for the provision of services or the construction of technical objects - most often with a high initial value and long durability period. Such means of public transport include buses, trolleybuses, trams and metro vehicles. They belong to complex technical objects, characterized by high purchase and operation costs and a long period of use (especially trams), for which the set of parameters describing the life cycle is very extensive and diverse. The paper describes the methodological foundations of the use of LCC in the operation of public transport means, as well as characterizes the impact of vehicle reliability in the LCC analysis. The paper ends with a summary of the considerations carried out.

Keywords: LCC analysis, public transport, reliability indicators

Problematyka prowadzenia ruchu pociągów w czasie rzeczywistym

Janusz Szkopiński^{1,*}

¹ Politechnika Warszawska, Ośrodek Certyfikacji Transportu na Wydziale Transportu

Streszczenie. Planowane przez Centralny Port Komunikacyjny wdrożenie systemu prowadzenia ruchu kolejowego w oparciu o systemem TMS (ang. Train Management System) ma na celu wspomaganie procesu prowadzenia ruchu pociągów w czasie rzeczywistym. System TMS umożliwia prognozowanie ruchu pociągów, wykrywanie konfliktów ruchowych oraz ich rozwiązywanie, dzięki zastosowaniu modelu symulacyjnego i algorytmów obliczeniowych optymalizacji rozwiązań. Celem pracy jest analiza problematyki ustaleniem maksymalnego dostępnego czasu na wykonanie symulacji w systemie TMS, biorąc pod uwagę dynamikę ruchu pociągów oraz scenariusze ruchowe dla wybranych konfliktów ruchowych. Założony cel zrealizowano został przy wykorzystaniu programu MATLAB/Simulink, w którym stworzono model ruch dwóch kolejnych pociągów ETR610 typu ED250, poruszających się w określonym następstwie czasu na linii kolejowej wyposażonej w system ETCS poziomu 2. Uzyskane wyniki pozwalają na ocenę dostępnego czasu na symulację w zależności od rodzaju konfliktu ruchowego (sposobu zastosowania jego rozwiązania), jak i również wielkość utraty energii mechanicznej pociągu –w aspekcie zużycia energii trakcyjnej na przywrócenie prędkości maksymalnej pociągu. Poruszane zagadnienia są istotne w kontekście projektowania architektury systemu TMS oraz założeń ruchowych dla koncepcji prowadzenia ruchu pociągów w czasie rzeczywistym..

Słowa kluczowe: TMS, pociągi, czas następstwa, symulacja

1. Wprowadzenie

Prowadzenie ruchu kolejowego zmienia się w wyniku dwóch ważnych trendów 15: po pierwsze, dokonano połączenia ośrodków sterowania ruchem z ośrodkami zarządzania ruchem, aby przyspieszyć przepływ sterowania z poziomu kierowania na poziom operacyjny, po drugie, nowe kanały komunikacji między dyspozytorami w centrach zarządzania ruchem a maszynistami są w stanie zapewnić ciągłą i bezpośrednią kontrolę pociągów.

Warunkiem wykonania zaplanowanego rozkładu jazdy pociągów, w przypadku linii kolejowych o dużym natężeniu ruchem pociągów, w szczególności ruchu pociągów

Informacje dotyczące cytowania artykułu:

Szkopiński, J. (2025). Problematyka prowadzenia pociągów w czasie rzeczywistym, w: Siergiejczyk, M., Lewczuk, K. (red.), Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej a systemy logistyczne - wybrane problemy, 139–163, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-944813-9-1

*Autor do korespondencji

E-mail adres: janusz.szkopinski@pw.edu.pl

ORCID iD: 0000-0001-6654-2089

wysokich prędkości (powyżej 200 km/h), jest prowadzenie ruchu w czasie rzeczywistym, co umożliwia m.in. system TMS (ang. Train Management System).

System TMS pozwala na wspomaganie decyzji dyspozytorskich w zakresie wykrywania i rozwiązywania konfliktów ruchowych, gdzie kluczowe jest przeprowadzenie symulacji możliwych do wprowadzenia zmian w biegu pociągów m.in. tj.: zmiana trasy biegu pociągów, zmiana kolejności biegu pociągów oraz zmiana profilu prędkości pociągu.

Wdrożenie przedmiotowego systemu poprzedziły liczne analizy i prace naukowe dotyczące modeli symulacyjnych oraz zastosowania algorytmów optymalizacyjnych m.in. prace: D'Ariano A. (2008) 10, Corman F. (2010) 7, Fuchsberger M. (2012) 15.

Rezultatem badań jest m.in. zastosowanie systemu RCS (Rail Control System) w prowadzeniu ruchu pociągów na sieci kolejowej w Szwajcarii 34. Potwierdzonym efektem wdrożenia RCS jest znaczące zwiększenie skuteczności dyspozytorów w zakresie rozwiązywania konfliktów ruchowych.

Planowane przez Centralny Port Komunikacyjny wdrożenie systemu prowadzenia ruchu kolejowego oparte będzie na architekturze RCA-CPK, gdzie kluczowym modulem jest również system TMS 45.

Powstają w związku z tym pytania o architekturę systemu, zdefiniowania funkcjonalności i ram czasowych jego działania, w tym graniczne wartości czasu na rozwiązywanie konfliktów ruchowych oraz optymalizację jazdy pociągów według kryteriów: minimalizacji opóźnień pociągów, uzyskanie wysokiej przepustowości linii kolejowej i płynności ruchu pociągów oraz minimalizowanie zużycia energii trakcyjnej przez pociągi.

Celem badawczym w pracy jest przeprowadzenie analizy w zakresie identyfikacji problemów związanych z ustaleniem maksymalnego dostępnego czasu na wykonanie symulacji przez system TMS, w aspekcie dynamiki ruchu pociągów i wybranych konfliktów ruchowych.

W pracy zastosowana została metoda badawcza z wykorzystaniem, utworzonego w programie MATLAB/Simulink, modelu ruchu kolejnych pociągów ETR610 typu ED250, na linii kolejowej wyposażonej w system ETCS poziomu 2.

Uzyskane wyniki mogą posłużyć do ewentualnych analiz i prac projektowych związanych z tworzeniem architektury systemu TMS, umożliwiającego prowadzenie ruchu w czasie rzeczywistym.

2. Przegląd literatury

Pierwsze publikacje dotyczące problemu tworzenia modeli symulacji i optymalizacji prowadzenia ruchu pociągów w czasie rzeczywistym pojawiły się pod koniec XX wieku: Assad A. (1980) 4, Sauder R. & Westerman, W. (1983) 33, Vernazza G., & Zunino R. (1990) 43, Cai X. & Goh C. (1994) 5, Schaefer, H. (1995) 38, Kraay D. R., & Harker P. T. (1995) 24, Higgins A. (1997) 18, Kawakami T. (1997) 20, Shoji S., & Igarashi A. (1997) 39, Gorman, M. F. (1998) 17, Adenso-Díaz i in. (1999) 3.

Zagadnienia utworzenia systemu symulacyjnego dla rzeczywistego ruchu pociągów były podejmowane również na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, co zostało przedstawione w publikacji Kochan A. (2012) 21. W artykule tym rozważa się różne podejście do budowy modelu symulacyjnego, w zależności od jego przeznaczenia

(szkoleniowe, projektowanie linii, tworzenie rozkładu jazdy) oraz procesu przepływu danych w strukturze systemu kierowania i sterowania ruchem kolejowym.

Analiza wdrożenia zautomatyzowanego systemu wykrywania i rozwiązywania konfliktów ruchowych (m.in. za pomocą zastosowania regulacji prędkości pociągów) zostało przedstawione w publikacji Mazzarello i Ottaviani (2007) 27. Zagadnienie było przedmiotem badań w ramach europejskiego projektu COMBINE i COMBINE 2, z pilotażowym wdrożeniem w Holandii. Szczegóły projektu przedstawione są w literaturze: Mascis i in. (2002) 25, Mascis i in. (2004) 26, Giannettoni i Savio (2004) 16, Pacciarelli i Pranzo (2006) 28.

W publikacji Schaafsma (2001) 35 autor proponuje nową koncepcję dynamicznego zarządzania ruchem kolejowym (RDTM), mającą na celu poprawę odporności systemu kolejowego (tj. odporności na zakłócenia w eksploatacji), bez zmniejszania przepustowości linii. Podstawową ideą jest utrzymanie płynności ruchu pociągów w wąskim gardle poprzez unikanie niepotrzebnego czasu oczekiwania, co można osiągnąć poprzez złagodzenie niektórych ograniczeń rozkładu jazdy tj.: stała trasa pociągu, stałe godziny przyjazdu/odjazdu oraz stała kolejność ich odjazdu na stacji.

Koncepcja ta została rozwinięta na kolejach holenderskich (np. publikacja Schaafsma i Bartholomeus (2007) 36) poprzez mniejsze planowanie w fazie przygotowania rozkładu jazdy, a zwiększenie kontroli nad ewentualnym rozwiązywaniem konfliktów ruchowych w czasie rzeczywistym (realizacji rozkładu jazdy). Zasady RDTM składają się zasadniczo z następujących strategii dynamicznych:

- zastąpienie ustalonych godzin przyjazdów/odjazdów m.in. na każdy peron przez okna czasowe (czas minimalny/czas maksymalny) przyjazdów/odjazdów. W tym przypadku rozkład jazdy eksploatacyjny, którym posługują się zarządcy kolei, uwzględnia zarówno minimalne, jak i maksymalne godziny przyjazdu i odjazdu, natomiast publiczny rozkład jazdy, dostępny dla pasażerów, uwzględnia jedynie maksymalny czas przyjazdu i minimalny czas odjazdu;
- umożliwienie zmiany kolejności wyjazdu pociągów ze stacji;
- zastąpienie przyporządkowania pociągu do peronu/toru na stacji zestawem możliwych peronów/torów przejazdowych, pozostawiając ostateczny wybór dyspozytorowi. Rozkład jazdy mógłby również określać zestaw opcji tras dla każdego pociągu, które umożliwiłyby lepsze wykorzystanie przepustowości infrastruktury.

Zaawansowane eksperymenty obliczeniowe oparte na kombinacjach elastycznych godzin odjazdu, dynamicznego przeorganizowywania i przekierowywania jadących pociągów oraz działań koordynacji prędkości pociągów są przedstawione w publikacjach: D'Ariano, Pacciarelli, Pranzo i Hemelrijk (2007) 8 oraz D'Ariano, Corman i Hansen (2007) 9.

W pracy Albrecht (2005) 1 i Albrecht (2007) 2 autor przedstawia możliwości regulacji profilu prędkości pociągu, jako sposób rozwiązania konfliktu ruchowego.

Analiza zastosowania regulacji profilu prędkości pociągu w aspekcie zachowania płynności ruchu pociągów i uzyskania oszczędności energii trakcyjnej przedstawiona jest również w publikacji Szkopiński J. i Kochan A. (2021) 41 - dotyczącej zachowania płynności ruchu na linii kolejowej wyposażonej w blokadę samoczynną, oraz publikacji Szkopiński J. i Kochan A. (2023) 42 - dotyczącej optymalizacji zużycia energii trakcyjnej

na linii kolejowej, umożliwiającej na jazdę pociągów w tzw. ruchomym odstępie między pociągami.

Kluczowy opis problematyki tworzenia systemu zarządzania ruchem pociągów w czasie rzeczywistym przedstawiony jest natomiast w pracach naukowych: D'Ariano A. (2008) 10, Corman F. (2010) 7, Fuchsberger M. (2012) 15.

W pracy D'Ariano A. (2008) autor skoncentrował się na następujących celach badawczych:

- zaprojektowanie, wdrożenie i ocena zaawansowanego narzędzia laboratoryjnego do wspierania dyspozytorów w zakresie prowadzenia ruchu pociągów w sytuacjach zakłócenia rozkładu jazdy;
- utworzenie innowacyjnego modelu optymalizacji ruchu kolejowego w celu zarządzania ruchem pociągów na całej sieci kolejowej;
- opracowanie i wdrożenie szybkich algorytmów zarządzania w czasie rzeczywistym w oparciu o predykcję zmian względem rozkładowego ruchu pociągów;
- opracowanie i wdrożenie algorytmów dynamicznej modyfikacji czasu jazdy pociągów, uwzględniających zmiany trasy pociągu lub profilu prędkości (jako alternatywa do zmian rozkładu jazdy pociągów), w celu ograniczenia propagacji opóźnień.

W pracy Corman F. (2010) autor rozważa podejście optymalizacyjne dla dużych, złożonych i o dużym nasyceniu pociągami sieci kolejowych. Corman analizuje połączenie modelowania matematycznego i symulacji zgodnie z następującymi celami badawczymi:

- wewnętrzna złożoność operacji w powiązaniu z zasadami dynamicznego zarządzania ruchem, wymagającym zaawansowanej kontroli w czasie rzeczywistym;
- powiększona przestrzeń rozwiązań problemu dyspozytorskiego dla gęstych sieci i dużych stacji, o częstym i silnie oddziałującym ruchu;
- wykładniczy wzrost rozmiaru struktury modelu w przypadku dużych sieci, z dużym ruchem mieszanym i wydłużonym horyzontem czasowym, przy jednoczesnym zachowaniu mikroskopijnych szczegółów (tj. m.in. systemy sterowania ruchem pociągów);
- problem koordynacji dyspozytorskiej, w rozproszonej dystrybucji wieloobszarowej, w celu dostarczenia rozwiązań konfliktów ruchowych na poziomie lokalnym i na poziomie globalnym.

W pracy Fuchsberger M. (2012) autor podejmuje zagadnienia sposobu modelowania systemu kolejowego w warstwie informacji eksploatacyjnej z uwzględnieniem prognozowania ruchu pociągów oraz podaje studium przypadku dla proponowanego rozwiązania.

Zaproponowane matematyczne modele optymalizacyjne mają na celu ograniczenie propagacji konfliktów ruchowych w dynamicznym kontekście prowadzenia ruchu pociągów w czasie rzeczywistym, z wykorzystaniem iteracyjnego algorytmu symulacji.

Studium przypadku pokazuje wykonalność modelowego podejścia do kontroli predykcyjnej kierowania ruchem pociągów w rejonie głównego dworca kolejowego w Bernie w Szwajcarii.

Wnioskami z przeprowadzonych testów i badań jest wskazanie strategii opartej na zapewnieniu większej elastyczności rozkładów jazdy. W efekcie zwiększenia liczby tras podróży do średnio 130 tras, dla każdego pociągu występuje znacznie mniej

niewykonalnych sytuacji, a liczba rozważanych tras biegu pociągu, jako reprezentatywna dla elastyczności tras pociągów w rozkładzie jazdy, jest ważnym parametrem projektowym systemu.

Wdrożenie przedmiotowych rozwiązań (prowadzenia ruchu pociągów w czasie rzeczywistym) zastało zapoczątkowane przez kolej szwajcarskie, poprzez zaimplementowanie ich w systemie Rail Control System (RCS) 34. Dział infrastruktury SBB rozpoczął rozwój RCS od 2005 roku, natomiast system został wprowadzony do eksploatacji od 2009 roku.

3. Problematyka zagadnienia

3.1. Prowadzenie ruchu pociągów w czasie rzeczywistym

Dyspozytorzy ruchu pociągów nie mogą precyzyjnie przewidzieć dokładnego rozprzestrzeniania się opóźnień pociągów szczególnie, w przypadku złożonych i dużych sieci kolejowych, na których poruszają się pociągi o dużym zróżnicowaniu prędkości jazdy 7, 10, 15. W praktyce w centrach sterowania ruchem znane są tylko sumaryczne i końcowe wartości opóźnienia pociągów, a dyspozytorzy muszą przewidywać czasy przyjazdu pociągów wyłącznie na podstawie doświadczenia, bez odpowiedniego wsparcia komputerowego. Często prowadzi to do prostej ekstrapolacji bieżących opóźnień na oczekiwane opóźnienia przyjazdów. Niektóre koleje wykorzystują liniowe przesunięcie rozkładu jazdy, aby ekstrapolować obecne opóźnienia na przyszłość. W metodzie tej pomija się fakt, że niektóre pociągi mogą (częściowo) nadrobić zaległości za pomocą skrócenia czasu jazdy, podczas gdy inne mogą być (bardziej) opóźnione z powodu konfliktów tras.

W takich sytuacjach rozkład jazdy nie zapewnia już optymalnego wykorzystania przepustowości infrastruktury, a krótkoterminowe korekty stosuje się do zminimalizowania negatywnych skutków zakłóceń tj. opóźnień pociągów.

Opóźnienie pierwotne jest spowodowane awariami urządzeń lub innymi zdarzeniami powodującymi konieczność ograniczenia prędkości pociągu lub nawet jego zatrzymanie. Opóźnienia takie nie są możliwe do przewidzenia, a ich negatywny skutek na ustalony rozkład jazdy pociągów, neutralizowany jest poprzez wykorzystanie dostępnych rezerw czasu jazdy (przyjętych na etapie układania rozkładu jazdy). Konsekwencją jednak opóźnienia pierwotnego są opóźnienia wtórne (tzw. efekt domina), które są przenoszone na kolejne pociągi, po części, z powodu opóźnionych działań dyspozytorskich.

Zastosowanie nowoczesnych, komputerowych systemów obliczeniowych otwiera nowe możliwości w rozwiązaniu problemu braku lub opóźnionych działaniach podejmowanych przez dyspozytorów prowadzących ruch pociągów. W oparciu o dane rzeczywistej lokalizacji i prędkości pociągów, znajomość ich charakterystyk trakcyjnych, sił oporu ruchu pociągu oraz skuteczność systemów hamowania, model symulacyjny umożliwia na realizację dokładnego prognozowania czasu jazdy pociągów, w tym oszacowanie dystansu do punktów konfliktów ruchowych. Dzięki temu, potencjalne trasy kolizyjne możliwe są do przewidzenia i zaplanowania zmiany w rozkładowym czasie jazdy pociągów. Skorygowane cele (lokalizacja czas-prędkość) przekazywane są przez dyspozytorów do odpowiednich pociągów, dzięki czemu, poinformowani maszyniści mogą dostosować ruch pociągu do zmienionych warunków ruchowych. Taki system zarządzania ruchem nazywa się zarządzaniem ruchem w czasie rzeczywistym i polega

na modyfikowaniu rozkładu jazdy tak, aby był zgodny z rzeczywistą sytuacją następowało koordynowanie prędkości kolejnych pociągów i synchronizowaniu przyjazdu pociągów na stacje.

W szwajcarskim systemie sterowania ruchem (RCS-DISPO) 34 zostało zaimplementowane narzędzie predykcyjne „on-line”. Główną częścią tego narzędzia jest model mikroskopowy oparty na skierowanym grafie acyklicznym z wagami łuków, obliczanymi za pomocą równań ruchu pociągu przy uwzględnieniu opisu infrastruktury oraz charakterystyk dynamiki jazdy pociągu. Narzędzie jest stosowane w przypadku dużej liczby pociągów (między 900 a 2000) z dokładnością predykcji na poziomie błędu mniejszego niż 1 minuta, dla zdarzeń w 20-minutowym horyzoncie czasu.

3.2. Automatyczne rozwiązywanie konfliktów ruchowych

Zaawansowane narzędzia wspomagające podejmowanie decyzji dla dyspozycji pociągów w czasie rzeczywistym zawiera odpowiednie modele i algorytmy do zmiany czasu, zmiany kolejności i zmiany trasy pociągów poruszających się po sieci kolejowej w danym okresie przewidywania ruchu 10.

W oparciu o dokumentację RCA 32 tworzony system zarządzania ruchem TMS 45 posiada funkcjonalność automatycznego rozwiązywania konfliktów ruchowych. Funkcja ta wspomaga dyspozytora w zależności od zidentyfikowanego rodzaju konfliktu ruchowego, uruchamiając odpowiedni algorytm generujący propozycje zmiany realizowanego rozkładu jazdy pociągów.

Rodzaj konfliktów ruchowych, które mogą być automatycznie rozwiązane dotyczy:

- opóźnienia zdarzenia ruchowego,
- braku dostępności elementów układu torowego lub krawędzi peronowej,
- braku skomunikowania pociągów,
- braku realizacji obiegu taboru lub dostępności taboru,
- braku zapewnienia obiegu drużyny pociągowej,
- braku kompatybilności pociągu z trasą,
- ograniczenia w dostępie do zasilania trakcyjnego.

Wykonanie automatycznego rozwiązania konfliktu ruchowego może być realizowane na podstawie ustalonych celów/priorytetów tj.:

- minimalizowanie liczby pociągów z przekroczonym konfigurowalnym progiem opóźnienia w miejscu docelowym,
- minimalizacja średniej wielkości opóźnienia pociągów najbardziej wypełnionych (dane z systemu biletowego),
- uniknięcie konieczności odwołania pociągów i pociągów o znacznym opóźnieniu tj. przyjeżdżających z przekroczonym konfigurowalnym progiem opóźnienia,
- ogólne minimalizowanie minut opóźnienia pociągów.

Warunkiem wstępnym do rozwiązania konfliktów ruchowych jest wiarygodne i dokładne przewidywanie czasu jazdy pociągu, w tym sekwencji zajmowania kolejnych odstępów blokowych. W oparciu o rzeczywiste dane dotyczące pociągu tj.: masa brutto, długość, przyspieszenia, krzywe hamowania, siła oporów ruchu oraz aspektów środowiskowych tj.: silny wiatr, opady deszczu, lód itd., oblicza się akceptowalny profil prędkości dla każdego pociągu z przeszkodami w punkcie konfliktu 10. Oznacza to, że należy znać lub oszacować specyficzne parametry techniczne taboru przypisanego do

każdej trasy pociągu, masę ładunku oraz dostępne współczynniki tarcia koło - szyna, aby umożliwić dokładne wyznaczenie minimalnego czasu jazdy pociągu.

Iteracyjny proces wykrywania, symulacji, optymalizacji, wyboru i wdrażania środków kontroli musi być szybszy niż dynamika systemu, co prowadzi do maksymalnego czasu rzędu kilkudziesięciu sekund na stworzenie zupełnie nowego rozkładu jazdy 7.

Procedura optymalizacji w czasie rzeczywistym ma za zadanie wyliczenie pierwszego wykonalnego rozkładu jazdy, a następnie poszukiwanie lepszych rozwiązań pod względem minimalizacji opóźnień.

Po znalezieniu wykonalnego rozkładu jazdy w ramach procedury zmiany trasy pociągu sprawdza się, czy lokalne opcje zmiany trasy mogą prowadzić do lepszych rozwiązań. Dla każdej zmienionej trasy czasy przejazdu i czas wprowadzenia są odpowiednio modyfikowane. Za każdym razem, gdy jakaś trasa zostaje zastąpiona, procedura planowania pociągów oblicza nowy, wolny od nie planowanych zatrzymań rozkład jazdy.

Jeśli w określonym czasie obliczeniowym nie zostanie znaleziony wykonalny rozkład jazdy, dyspozytor jest odpowiedzialny za uniknięcie impasu poprzez podejmowanie decyzji zabronionych zautomatyzowanemu systemowi, takich jak np. skrócenie trasy biegu pociągu lub całkowite jego anulowanie 7.

3.3. Ograniczenia wynikające ze złożoności i dynamiki systemu

Pomimo zastosowania aplikacji komputerowych, dedykowanych do obliczeń i symulacji ruchu pociągów, poważnym ograniczeniem pozostaje minimalny i maksymalny czas dostępny na uzyskanie optymalnego rozwiązania według kryterium ustalonych celów i priorytetów 7.

Jak podaje Corman (2010) 7 cały proces wprowadzanej zmiany może składać się z następujących czasów składowych:

- t_0 : czas, w którym aktualna pozycja i prędkość każdego pociągu są aktualizowane;
- t_1 : czas, w którym system rozpoczyna obliczanie rozwiązania dyspozytorskiego;
- t_2 : czas, w którym system zwraca rozwiązanie dyspozytorskie;
- t_3 : czas, w którym rozwiązanie jest akceptowane przez dyspozytora;
- t_4 : czas, w którym są wdrażane działania dyspozytorskie;

Powyższe czasy mogą być ze sobą powiązane w następujący sposób. Czas między t_0 i t_1 jest potrzebny do zarejestrowania rzeczywistych pozycji i prędkości pociągów oraz przekazania ich do centrum kontroli ruchu. W czasie t_0 , na podstawie zebranych informacji, wykonuje się prognozę wszystkich pozycji i prędkości pociągów. Może być ona przesyłana za pośrednictwem pokładowego GSM-R pociągów lub poprzez interpolację danych wykrywania i sygnalizacji pociągów w czasie rzeczywistym. Krok czasowy między t_1 i t_2 jest potrzebny systemowi do odtworzenia bieżących warunków ruchu, symulacji przyszłej ewolucji, wykrywania możliwych konfliktów i dostarczania rozwiązań. Czas między t_2 i t_3 jest używany przez dyspozytora do sprawdzenia rozwiązań dyspozytorskich podanych przez system i ostatecznie, do porównania ich z innymi opcjami dyspozytorskimi. Czas między t_3 i t_4 uwzględnia opóźnienie spowodowane transmisją działań kontrolnych, a także czas potrzebny do wdrożenia działań dyspozytorskich w praktyce, takich jak ułożenie dróg przebiegu i podanie sygnałów zezwalających.

W przypadku minimalnego czasu na wykonanie symulacji istotne jest prowadzenie ruchu pociągów w oparciu o ściśle i bez zwłoki przekazane dane dotyczące rejestracji zdarzeń ruchowych, a ich ilość jest proporcjonalna do liczby obsługiwanych w danej chwili pociągów. Natomiast sam czas potrzebny na wykonanie symulacji wzrasta nieliniowo wraz ze wzrostem danych obliczeniowych (np. większej liczby pociągów, torów i stacji) 10.

Dla dużych struktur(sieć kolejowa) w literaturze podane są różne przykłady zastosowania algorytmów i metod obliczeniowych np. jak podaje Corman F. (2010): *„W rzeczywistości podczas dekompozycji (sieci kolejowej) koncepcja scentralizowanego maksimum zostaje utracona na rzecz słabszych koncepcji, takich jak równowaga Nasha pomiędzy rozłożonymi rozwiązaniami (dla części sieci kolejowej). Nie wiadomo jeszcze, jak optymalnie koordynować wiele niezależnych procesów rozwiązywania problemów, aby osiągnąć lepsze rozwiązania lub szybko dostarczyć wykonalne rozwiązania. Z praktycznego punktu widzenia można rozważyć zaawansowane algorytmy koordynacji, oparte na przykład na heurystyce ad hoc, metaheurystyce ogólnej, procedurach wyszukiwania, algorytmach optymalizacyjnych, podejściach iteracyjnych opartych na teorii relaksacji i kontroli Lagrange’a, rozproszonych składowych satysfakcji, metod sztucznej inteligencji, czy systemach wieloagentowych. Wynik można dalej badać teoretycznie, wykorzystując perspektywę badań operacyjnych lub teorii gier.”*

Przedstawione metody stosowane są w celu optymalizacji rozwiązania pod względem procesu decyzyjnego. O złożoności zagadnienia (w tym przypadku w aspekcie inżynierii kolejowej) można zapoznać się w publikacji Jacyna (2022) 19.

W przypadku maksymalnego czasu na wykonania symulacji istotne jest, iż musi być zrealizowane przed czasem jego rozkładowego rozpoczęcia. Wyklucza się bowiem sytuację ograniczenia płynności ruchu pociągów lub pogorszenia przepustowości linii kolejowej z powodu oczekiwania na optymalne rozwiązanie. Proces obliczeń musi więc być zdecydowanie krótszy niż ustalony czas następstwa pociągów.

W przywołanej literaturze opartej na badaniach symulacyjnych i przeprowadzonych testach na kolejach holenderskich i szwajcarskich, wskazano ograniczenia czasowe w granicach $12 \div 60$ sekund 15 oraz 15 sekund 7.

W dalszej części artykułu autor koncentruje się na ograniczeniu maksymalnym (maksymalny czas na wykonanie procesu zmiany rozkładowego biegu pociągu), w aspekcie trzech przypadków nieprzewidzianego zakłócenia pierwotnego, wymagającego rozwiązania konfliktu ruchowego za pomocą: zmiany trasy biegu pociągu, zmiany kolejności biegu pociągów lub zmiany profilu prędkości pociągu.

4. Model symulacyjny

4.1. Model linii kolejowej

Jako model linii kolejowej przyjmuje się szlak kolejowy wyposażony w system ERTMS/ETCS poziomu 2, na którym możliwe jest prowadzenie ruchu ze stałymi odstępami blokowymi, natomiast separacja pociągów polega na zachowaniu „odstępu drogi” w taki sposób, aby możliwe było zahamowanie pociągu przed końcem pociągu poprzedzającego.

W przypadku systemu ERTMS/ETCS 23 stałe punkty odniesienia realizowane są przez balisy (komunikujący się z pociągiem pasywny transponder torowy instalowany

w torze) lub poprzez informację z RBC (ang. Radio Block Centre - radiowe centrum sterowania, które odbiera drogą radiową informacje o położeniu pojazdów ETCS i przesyła do pojazdów ETCS zezwolenia na jazdę), co pozwala na weryfikację położenia pociągu w funkcji czasu, natomiast pomiar przejechanej drogi w czasie ustalany jest na podstawie wyliczeń odometru na pokładzie pojazdu trakcyjnego.

W modelu symulowany jest ruch dwóch kolejnych pociągów, poruszających się na linii kolejowej wyposażonej w system ERTMS/ETCS poziomu 2, w określonym następstwie czasu z zastosowaniem bezpiecznej odległości (drogi hamowania). Droga hamowania wyznaczana jest na podstawie algorytmu obliczeniowego udostępnionego przez Europejską Agencję Kolejową 13 dla trzech profili prędkości:

- PER (ang. Permitted speed) – krzywa prędkości pociągu, w przypadku przekroczenia której maszynista ma określony czas reakcji na zastosowanie hamowania służbowego, nieprzekraczający punktu, w którym nastąpi interwencja pokładowego systemu ETCS;
- SBI (ang. Service Brake Intervention) – krzywa prędkości pociągu, po przekroczeniu której pokładowy system ETCS rozpocznie hamowanie służbowe, jeżeli maszynista nie zareaguje na ostrzeżenia o konieczności rozpoczęcia hamowania. Profil ten uwzględnia czas narastania siły hamowania służbowego. W modelu przyjęto stopniowe wdrożenie siły hamowania wywołujące opóźnienie pociągu kolejno: $0,5 \text{ m/s}^2$; $0,8 \text{ m/s}^2$; $1,0 \text{ m/s}^2$.
- EBD (ang. Emergency Brake Declaration) – krzywa prędkości pociągu po przekroczeniu której, system pokładowy wdraża hamowanie awaryjne. W modelu przyjęto wdrożenie siły hamowania wywołującą opóźnienie pociągu równe $1,5 \text{ m/s}^2$.

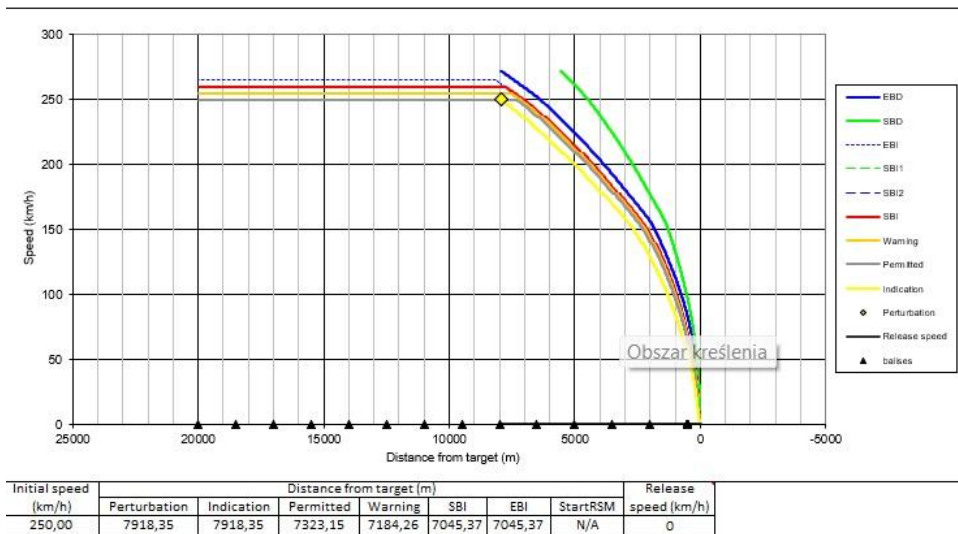
Na poniższym rysunku 1 przedstawiono wyniki przeprowadzonych obliczeń dla różnych profili prędkości pociągu ED250.

Czas następstwa pociągów jest zazwyczaj wyrażany jako czas między dwoma kolejnymi pociągami, która pozwala im bezpiecznie jechać z żadaną prędkością liniową, bez zakłóceń (zmniejszenia prędkości) 14.

Ze szczegółowym opisem wyznaczania czasu następstwa pociągów można zapoznać się w publikacji 11 i 29 oraz instrukcji Ir-11 30.

Przykładowe czasy następstwa pociągów podane są w pracy Pachl (2024) 29 gdzie, zależnie od typu pociągów, czas następstwa wynosi: $3,2 \div 8,2$ minut. W publikacji Corman, F. (2010) 7 dla stacji Utrecht podaje odstęp czasowy między pociągami w granicach 5 minut. Fuchsberger, M. (2012) 15 dla ruchu pasażerskiego sugeruje przyjęcie czasu ustalenia trasy przebiegu na 6 minut przed wjazdem pociągu.

W pracy pt.: „Ekspertyza dotycząca układu zasilania sieci trakcyjnej linii CMK” zrealizowanej na zlecenie PKP Energetyka S.A. 31 przedstawiono możliwe do uzyskania czasy następstwa pociągów (w tym pociągi ED250) po podniesieniu prędkości pociągów do 220 km/h . W aspekcie wydolności systemu zasilania 3 kV prądu stałego wartości te wyniosły, zależnie od odległości między podstacjami trakcyjnymi, ok $7 \div 15$ minut.



Rys.1. Wyznaczenie dopuszczalnego dystansu implikującego wdrożenie hamowania pociągu w zależności od różnych profili prędkości pociągu (źródło: na podstawie algorytmu ERA 13)

Dla rozważanych scenariuszy ruchowych, przyjęty został odpowiedni czas następstwa pociągów pasażerskich poruszające się z maksymalną prędkością 250 km/h. Na wielkość tą składa się czas zachowania bezpiecznej drogi hamowania pociągu - według algorytmu obliczeniowego ERA 13 – wyznaczony dla profilu prędkości PER dla pociągu ED250. Dla danego profilu prędkości droga hamowania wynosi $S_h = 7323$ m, co uwzględniając prędkość maksymalną wymaga czasu: $T_{PER} = 105$ s. Czas ten wydłużamy o wielkość czasu potrzebnego na przekazanie informacji do pociągu: $T_I = 1$ s (według wytycznych SUBSET 041 przywołanego w 23) oraz czas potrzebny na wdrożenie hamowania pociągu: $T_Z = 5$ s (według normy EN 14531-1:2015 opóźnienie w reakcji systemu hamowania). Sumaryczny czas następstwa pociągu wynosi:

$$T_n = T_{PER} + T_I + T_Z = 111[s] \quad (1)$$

Dodatkowo, zależnie od scenariusza ruchu, doliczony został czas (T_K) konieczny na dodatkowe, ale planowe, czynności związane z ograniczeń prędkości tj. przejazd pociągu po rozjazdach na tor zwrotny, oraz wykonania czynności handlowych tj. zatrzymanie pociągu przy peronie.

Dla wyliczenia dostępnego maksymalnego czasu na wykonanie symulacji przyjęto następujące równanie:

$$\tau = T_{PER} + T_Z - T_S - T_p \quad (2)$$

gdzie:

$T_s = 10\text{ s}$ – czas potrzebny na wdrożenie czynności przez maszynistę (5 s i 11) oraz czas potrzebny na wdrożenie hamowania pociągu $T_z = 5\text{ s}$ (według normy EN 14531-1:2015), T_p – czas potrzebny na płynne dostosowanie prędkości pociągu z wartości maksymalnej do wartości ograniczenia, obliczany na podstawie symulacji w MATLAB/Simulink.

Rozwiązanie konfliktu ruchowego, w poniższych scenariuszach, rozumne jest umożliwienie płynnej zmiany prędkości jazdy pociągu, bez konieczności zastosowania hamowania nagłego i, w konsekwencji, zatrzymania pociągu.

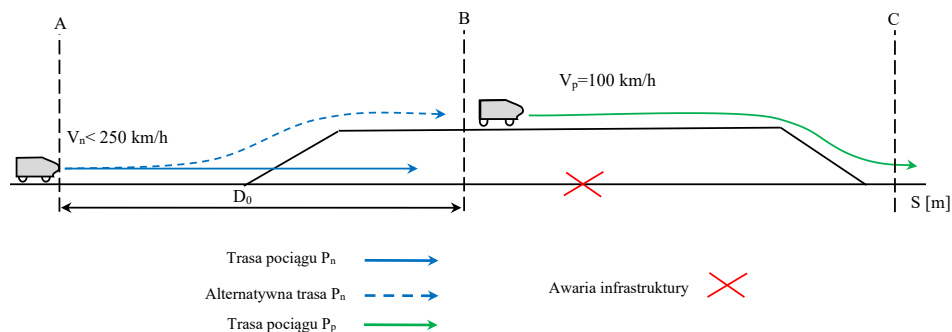
4.2. Wybrane scenariusze ruchowe

4.2.1. Scenariusz 1

W scenariuszu 1 przewidywana jest sytuacja awarii na torze głównym zasadniczym stacji, w wyniku czego, ruch pociągów prowadzony jest po torze głównym dodatkowym (na długości 1000 m).

Prędkość przejazdu po torze głównym dodatkowym jest ograniczona do 100 km/h, co wynika z jazdy pociągu na kierunku zwrotny po rozjeździe typu Rz-1200-18,5 (ograniczenie prędkości przyjęto na podstawie standardów technicznych dla CPK, załączniki: 4c i 5 6).

Schemat sytuacji ruchowej zmiany trasy przebiegu pociągów przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat sytuacji ruchowej dla scenariusza 1 (źródło: opracowanie własne)

Brak możliwości przejazdu pociągu Pp po torze głównym zasadniczym stanowi zakłócenie pierwotne, którego skutkiem jest ograniczenie prędkości oraz wydłużenie czasu jazdy pociągu Pp. W związku z czym, występuje konflikt ruchowy z kolejnym pociągiem Pn poruszającym się w określonym czasie następstwa za pociągiem Pp, a który w wyniku zbliżenia się do pociągu Pp wdroży hamowanie aż do jego zatrzymania.

W analizowanej sytuacji ruchowej, w celu rozwiązania konfliktu ruchowego, system TMS może dokonać symulacji danej sytuacji ruchowej i przekazać do pociągu Pn zmieniony profil prędkości pociągu w celu dostosowania prędkości do zmniejszonej prędkości pociągu Pp. Przedmiotem analizy w scenariuszu 1 jest więc określenie maksymalnego czasu dostępnego dla TMS w celu wykonania symulacji i wdrożenia jej wyników (zmiany profilu prędkości) w pociągu Pn.

W rozważanym przypadku rozważamy również utratę energii mechanicznej między sytuacją zatrzymania pociągu Pn a jego przejazdem bez zatrzymania w wyniku zmodyfikowanego profilu prędkości.

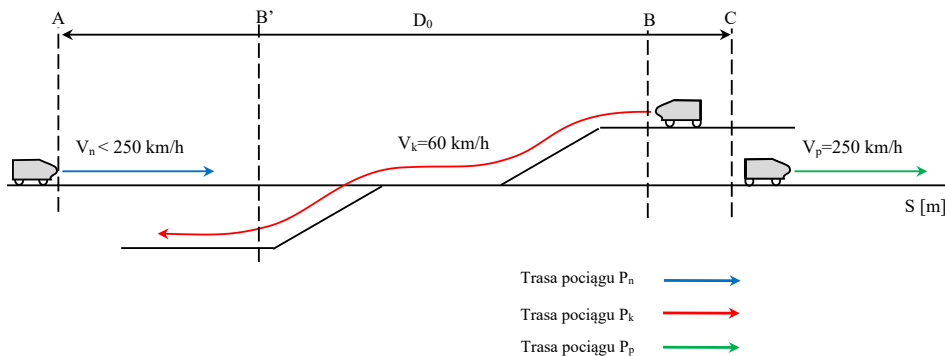
Dla scenariusza 1 czas następstwa między pociągami dużych prędkości został przyjęty na podstawie literatury 29 na poziomie 3,2 minuty.

4.2.2. Scenariusz 2

W scenariuszu 2 rozważamy przypadek opóźnienia pociągu Pk kierunku przeciwnego (do rozpatrywanego kierunku ruchu), który zgodnie z rozkładem jazdy ma przebieg krzyżujący się na stacji z pociągami kierunku rozważanego.

Na czas zajętości drogi przebiegu (przebieg krzyżujący na długości 1200 m) składa się rozruch i przejazd pociągu Pk po torach głównych stacji (od prędkości 0 km/h do prędkości 60 km/h) oraz rozjazdach typu Rz-500-12 (ograniczenie prędkości przyjęto na podstawie standardów technicznych dla CPK, załączniki: 4b i 5 6).

Schemat sytuacji ruchowej zmiany kolejności przebiegu pociągów przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat sytuacji ruchowej dla scenariusza 2 (źródło: opracowanie własne)

W momencie potwierdzenia zwolnienia przebiegu przez pociąg Pk system TMS dokonuje symulacji i wyznaczenia dla pociągu Pn nowego profilu prędkości, umożliwiające na zachowanie płynności jazdy pociągu ze zmniejszoną prędkością.

Dla danego scenariusza zakładamy, iż dyspozycyjny czas na wykonanie symulacji wynosi: $\tau = 12$ sekund lub $\tau = 60$ sekund - według literatury 15.

Rozwiązanie konfliktu ruchowego polega na dostosowanie profilu prędkości pociągu Pn w celu uniknięcia zatrzymania pociągu Pn przed stacją (uzyskanie płynnego przejazdu pociągu po torach głównych zasadniczych stacji).

Na podstawie scenariusza 2 analizujemy zależność wyznaczenia i wdrożenia optymalnego profilu prędkości pociągu Pn w odniesieniu do różnych czasów dostępnym na wykonanie symulacji. Dodatkowo, dla każdego czasu na symulację i uzyskanego profilu jazdy pociągu sprawdzane jest wielkość utraty energii mechanicznej pociągu w wyniku konieczności przywrócenia prędkości maksymalnej po przejechaniu miejsca ograniczenia prędkości. Obliczenie utraty energii mechanicznej wyliczona jest na podstawie różnicy

wydatkowanej energii kinetycznej i sił na pokonanie oporów ruchu między profilem jazdy pociągu z prędkością maksymalną a profilem jazdy pociągu ze zmienionym profilem prędkości.

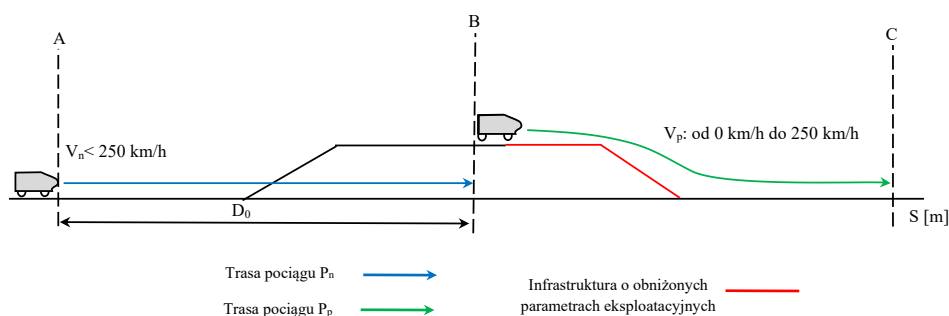
Czas następstwa pociągów zdefiniowany w punkcie 4.1 ($T_n = 111$ s) wydłużony jest o czas konieczny na przejazd pociągu kierunku przeciwnego po torach stacyjnych na długości 1200 m (ruszanie pociągu i jazda z prędkością 60 km/h), co daje czas przejazdu: $T_k = 115$ sekund, i ostatecznie czas następstwa pociągów wynosi: $T_n' = T_n + T_k = 226$ s.

4.2.3. Scenariusz 3

W scenariuszu 3 rozważamy przypadek ruszania pociągu P_p po torze na którym występują ograniczenie mocy trakcyjnej (ze 100% do 75%) w wyniku pogorszenie przyczepności koło-szyna (np. oszronienie szyn) lub zmniejszenia napięcia elektrycznego w sieci trakcyjnej (jak rozważane w dokumencie 31).

Zakłócenie powyższe powoduje konflikt ruchowy zachowania czasu następstwa pociągów oraz konieczność zastosowania hamowania i, w konsekwencji, zatrzymania pociągu.

Schemat sytuacji ruchowej zmiany profilu prędkości pociągów w wyniku pogorszenia warunków ruchowych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat sytuacji ruchowej dla scenariusza 3 (źródło: opracowanie własne)

W celu rozwiązania konfliktu ruchowego, w momencie zarejestrowania (zgłoszenia) problemów trakcyjnych pociągu P_p , system TMS dokonuje symulacji i wyznaczenia dla pociągu P_n nowego profilu prędkości, umożliwiającego na zachowanie płynności jazdy pociągu ze zmniejszoną prędkością.

Tak jak w scenariuszu 2 - dyspozycyjny czas na wykonanie symulacji przyjmujemy maksymalne ograniczenie czasu tzn.: $\tau = 12$ sekund i $\tau = 60$ sekund - według literatury 15.

Na podstawie scenariusza 3 możliwe jest rozważenie zależności wyznaczenia i wdrożenia optymalnego profilu prędkości pociągu P_n w odniesieniu do różnych czasów dostępnych na wykonanie symulacji. Dodatkowo, dla każdego czasu na symulację i uzyskanego profilu jazdy pociągu sprawdzane jest wielkość utraty energii mechanicznej pociągu w wyniku konieczności przywrócenia prędkości maksymalnej po przejechaniu miejsca ograniczenia prędkości. Obliczenie utraty energii mechanicznej wyliczona jest na

podstawie różnicy wydatkowanej energii kinetycznej i sił na pokonanie oporów ruchu między profilem jazdy pociągu z prędkością maksymalną a profilem jazdy pociągu ze zmienionym profilem prędkości.

Czas następstwa pociągów zdefiniowany w punkcie 4.1 ($T_n = 111$ s) zwiększamy o czas konieczny na ruszanie pociągu (przy dostępnych 100% mocy) do prędkości 250 km/h: $T_k = 82$ s, co daje czas następstwa pociągów równy: $T_n' = T_n + T_k = 193$ s.

4.3. Model ruchu pociągu

Za model pociągu przyjęto charakterystyki dla pociągu ETR610 serii ED250, który posiada długość 187,4 m i masę 427 ton 44. Uwzględniając energię mas wirujących (masa bezwładności pociągu) masa skorygowana wynosi 452 tony - sposób wyznaczania współczynnika podany jest w publikacji Szeląg (2019) 40.

Odwzorowanie kinematyki ruchu pociągu zastosowano w programie MATLAB/Simulink, gdzie na podstawie równań ruchu:

$$S = \int v \, dt \quad (3)$$

$$v = \int a \, dt \quad (4)$$

oraz działania sił: trakcji, oporów ruchu oraz hamowania, dokonano badania ruchu pociągów.

Przedmiotowe siły wyznaczone są na podstawie charakterystyk dla pociągu ETR610 serii ED250 w oparciu o publikację 44, zweryfikowane w oparciu o dane z dokumentacji technicznej 31 oraz zwalidowane (w zakresie do prędkości 200 km/h) na podstawie informacji od maszynisty prowadzącego pociągi ED250 na linii kolejowej nr 9 Warszawa – Gdańsk i na linii CMK nr 4 Warszawa – Kraków.

Charakterystyki funkcji siły trakcyjnej oraz funkcja siły oporów ruchu zależne są podstawowo od prędkości pociągu, i można je w dużym uproszczeniu przedstawić za pomocą funkcji kwadratowej (szerzej opisane w literaturze: 29 40):

$$F = k_1 v^2 + k_2 v + k_3 \quad (5)$$

gdzie:

k_1 – współczynnik zależny od kwadratu prędkości,

k_2 – współczynnik zależny od prędkości,

k_3 – współczynnik stały, niezależny od prędkości,

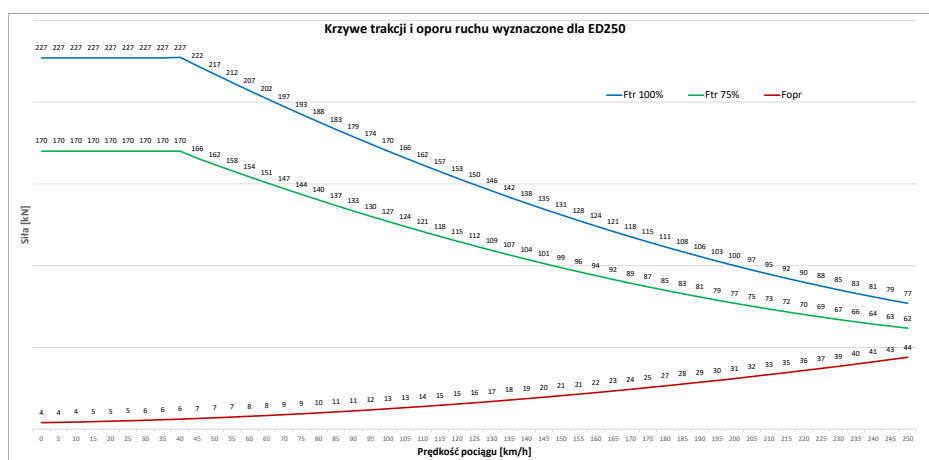
v – prędkość pociągu w [km/h].

Przedmiotowe charakterystyki przedstawiono na rysunku nr 5.

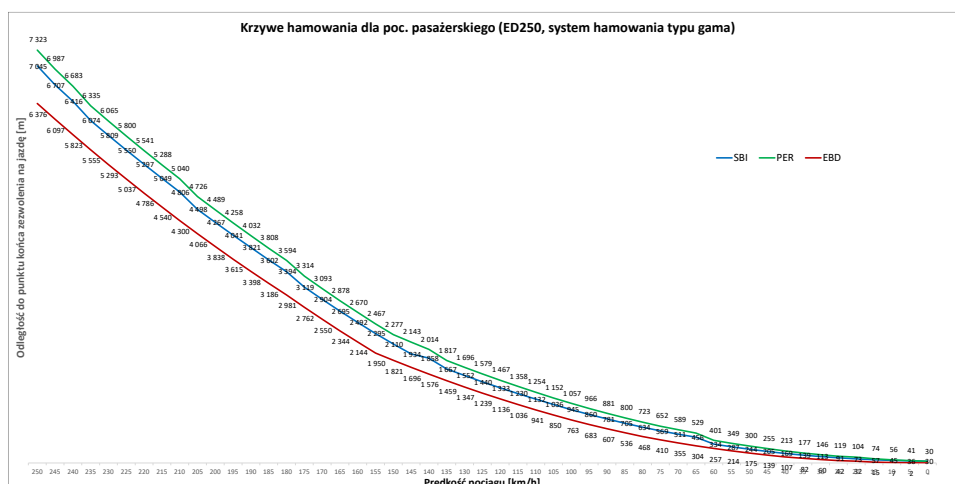
Siłę hamowania, w zależności od profilu prędkości pociągu, określona jest na podstawie algorytmu obliczeniowego udostępnionego przez Europejską Agencję Kolejową 13 (jak przedstawiono w punkcie 4.1) dla trzech zastosowanych opóźnień hamowania:

$$F_h: a_h \in \{-0.5, -0.8, -1.0\} \quad (6)$$

Profile prędkości przedstawiono na rysunku nr 6.



Rys. 5. Funkcje siły trakcji (dla 100% i 75% mocy) oraz siła oporów ruchu na zerowym pochyleniu (źródło: opracowanie własne na podstawie 44 i 31)



Rys. 6. Profile prędkości dla określonych reakcji systemu hamowania pociągu w zależności od prędkości pociągu i długości bezpiecznej drogi hamowania (źródło: opracowanie własne na podstawie 13)

Zmiennymi decyzyjnymi w badanym modelu jest dystans początkowy między pociągami (pozwala na określenie czasu potrzebnego na płynne wdrożenie zmiany prędkości pociągu P_n) oraz zużycie energii mechanicznej w przypadku zastosowania zmiany profilu prędkości pociągu.

W przypadku obliczenia bezpiecznego dystansu między pociągami, wielkość ustalana jest na podstawie wartości początkowej $D(0)$ oraz, w kolejnych chwilach czasu, różnicy przebytej drogi przez oba pociągi. Do oznaczenia zmiennego dystansu zastosowano zapis: $D(t)$, który zmienia się w czasie symulacji w zakresie $t: 0 < t < T$.

$$D(t) = D(0) + S_p(t) - S_N(t) \quad (7)$$

gdzie:

$D(0)$ – odległość między kolejnymi pociągami w momencie rozpoczęcia obliczeń,

$S_p(t)$ – przebyta droga przez pociąg poprzedzający w chwili t ,

$S_N(t)$ – przebyta droga przez pociąg następujący w chwili t .

Zużycie energii mechanicznej liczone jest jako cząstkowe sumy energii potrzebnej na pokonanie oporów ruchu, natomiast w przypadku zwiększenia prędkości pociągu, dodatkowo różnicy energii kinetycznej w granicach zmiany prędkości.

W przypadku energii potrzebnej na pokonanie oporów ruchu 40 określono siłę oporu dla średniej prędkości w sekundowym przedziale czasu, i pokonanego w tym czasie dystansu:

$$Z_{opr} = \sum_{i=1}^{T_m} F_{opr} \Delta S_i \quad (8)$$

gdzie:

i – stanowi numer kolejnych 1 sekundowych odcinków czasu takich że, $i: \{i = 1, \dots, T_m\}$, a T_m jest czasem trwania dla wszystkich odcinków całej drogi ΔS_i ,

F_{opr} – siła oporu ruchu określona dla prędkości danego pociągu na odcinku drogi ΔS_i .

Dla ruchu przyspieszonego zużycie energii kinetycznej w czasie T zależy od zmiany prędkości pociągu z V_1 do prędkości V_2 oraz masy (uwzględniającej energię części wirujących), co można przedstawić następującą zależnością:

$$Z_{\Delta V} = \int_{V_1}^{V_2} m_f V dV \quad (9)$$

Sumaryczne zużycie energii mechanicznej dla ruchu przyspieszonego wynosi:

$$Z_m = Z_{opr} + Z_{\Delta V} \quad (10)$$

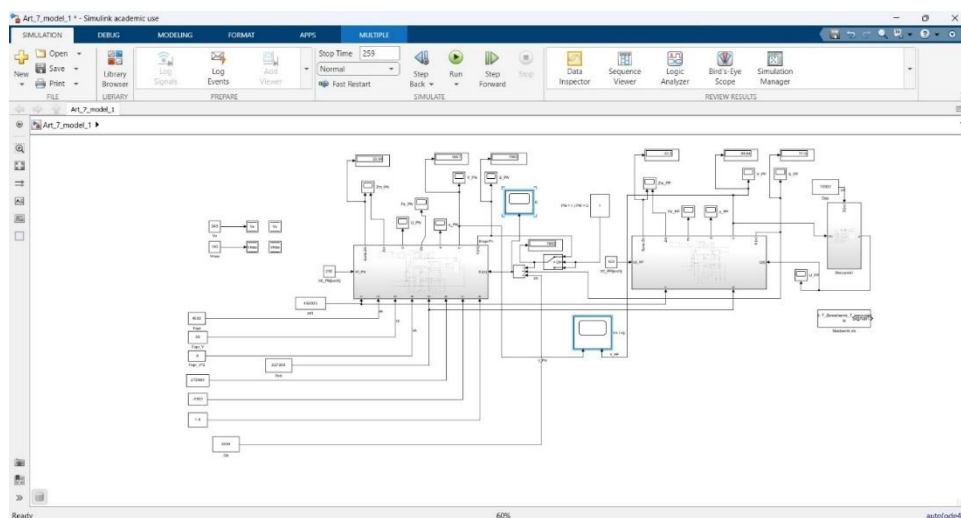
Model zastosowany do badań został utworzony w programie MATLAB/Simulink. Ogólny schemat bloków przedstawiony jest na poniższym rysunku nr 7.

Przedstawiony model zawiera dwa segmenty w których obliczana jest w funkcji czasu: prędkość, przebyta droga oraz zużycie energii mechanicznej przez pociągi (prawy segment pociąg poprzedzający P_p , lewy segment pociąg następujący P_n).

Segmenty połączone są blokiem obliczającym dystans między pociągami, co jest wielkością wejściową do bloku sterowania pociągiem P_n (wyznaczenie profilu prędkości pociągu w zależności od zachowania odpowiedniej drogi hamowania pociągu P_n).

5. Uzyskane wyniki

Dla poszczególnych scenariuszy uzyskane następujące wyniki przedstawione w tabeli 1.



Rys. 7. Schemat modelu utworzony w programie MATLAB/Simulink (źródło: opracowanie własne)

Tabela 1. Wyniki dla poszczególnych scenariuszy ruchowych

Scenariusz	Czas następstwa T_n [s]	Czas na wykonanie symulacji τ [s]	Minimalna prędkość pociągu P_n [km/h]	Minimalny dystans między pociągami $D(t)$ [m]	Utrata energii mechanicznej Z_m [kWh]
1.	2.	3.	4.	5.	6.
1	192	137	100	1350	163
2	226	12	209	5838	72
2	226	60	157	3240	152
3	193	12	184	4707	318
3	193	60	156	3437	403

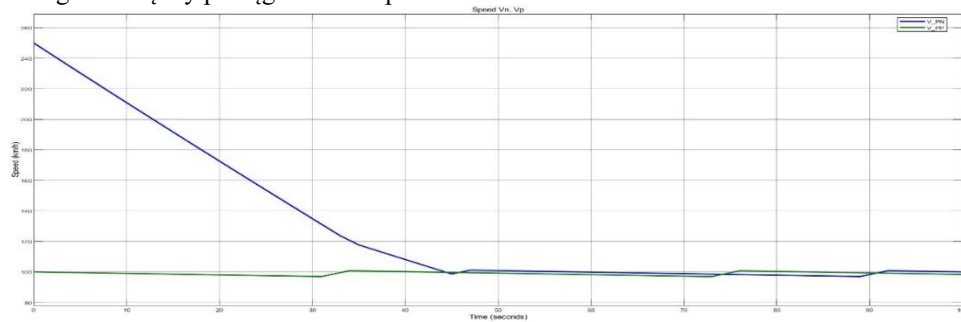
5.1. Wyniki dla scenariusza 1

Badanie sytuacji ruchowej dla scenariusza 1 umożliwiło na wyliczenie czasu na wykonanie symulacji – według zależności (2) – i wynosi: $\tau = 137$ [s] gdzie: $T_n = 192$ s – minimalny czas następstwa pociągów wysokich prędkości (na podstawie literatury 29), a $T_p = 44$ s – czas potrzebny na płynne dostosowanie prędkości pociągu z 250 km/h do prędkości ograniczenia wynoszącej 100 km/h.

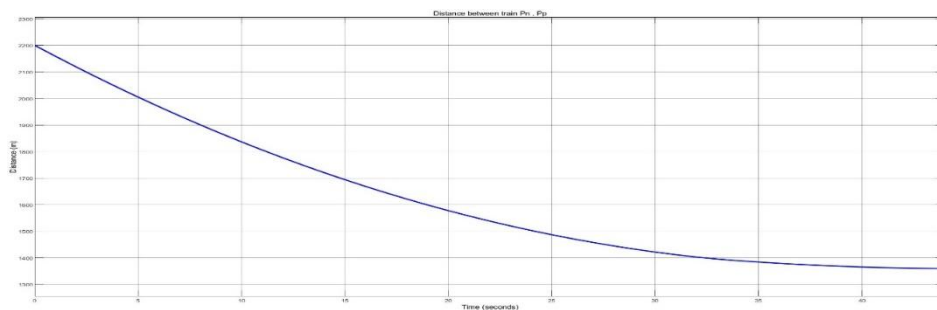
Wielkość dostępnego czasu dla symulacji (137 sekund) jest znacznie większa niż wskazane wielkości w literaturze: 60 sekund 15 oraz 15 sekund 7. Potwierdza

to słuszność przyjęcia wielkości czasu następstwa pociągów dla rozważanego przypadku rozwiązania konfliktu ruchowego jak przedstawiono w scenariuszu 1.

Na rysunku 8 przedstawiona jest krzywa prędkości pociągu Pn w wyniku wprowadzenia zmiany profilu prędkości pociągu. Na rysunku 9 przedstawiona jest odległość między pociągami Pn i Pp.



Rys. 8. Prędkość pociągu Pn i Pp dla scenariusza 1 (źródło: opracowanie własne)



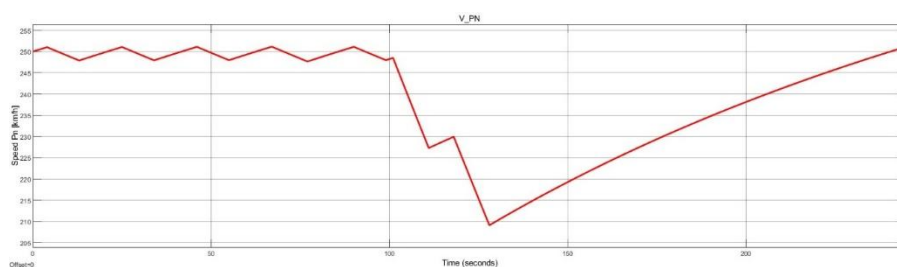
Rys. 9. Dystans między pociągiem Pn i Pp dla scenariusza 1 (źródło: opracowanie własne)

Zużycie energii mechanicznej dla przypadku zastosowania modyfikacji profilu prędkości pociągu w celu uniknięcia zatrzymania pociągu wynosi 375,7 kWh, co w odniesieniu do zużycia energii pociągu poruszającego się z prędkością maksymalną (bez wystąpienia konfliktu ruchowego) wynosi 212,6 kWh. Różnica wartości: $Z_m = 375,7 - 212,6 = 163,1$ kWh (tabela 1, wiersz 1, kolumna 6) pokazuje jaka nastąpiła utrata energii mechanicznej pociągu, kosztem uniknięcia zatrzymania pociągu Pn. Warto zaznaczyć, iż zatrzymanie pociągu implikuje dalsze opóźnienie pociągu (pogarsza sytuację ruchową), a ponowny rozruch pociągu do prędkości 250 km/h (na porównywalnej drodze co jazda pociągu bez zatrzymania) wymagać będzie wydatkowania dodatkowo 448 kWh energii mechanicznej.

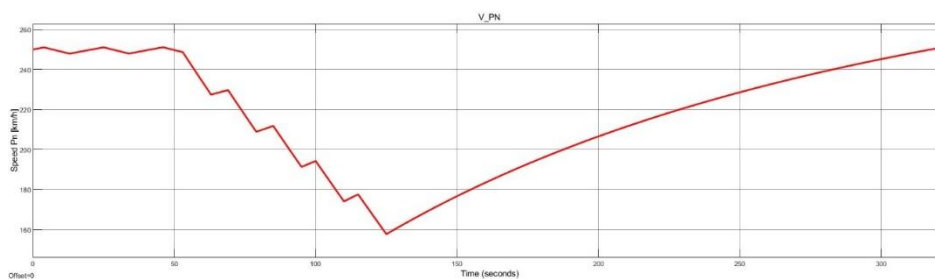
5.2. Wyniki dla scenariusz 2

Przeprowadzone badania dla scenariusza 2 umożliwiły na identyfikację do jakiej prędkości następuje zmniejszenie prędkości pociągu Pn, zależnie od zastosowanego czasu symulacji na rozwiązanie konfliktu ruchowego. Jak przedstawiono w tabeli 1, kolumna 4, skrócony czas na symulację umożliwił na ograniczenie prędkości do 209 km/h, co powoduje wytracenie energii mechanicznej o 72 kWh. W przypadku czasu w granicach 60 sekund, pociąg PN musi zwolnić do 157 km/h, co implikuje utratę energii mechanicznej już o 152 kWh, czyli dwukrotnie więcej niż w przypadku poprzednim.

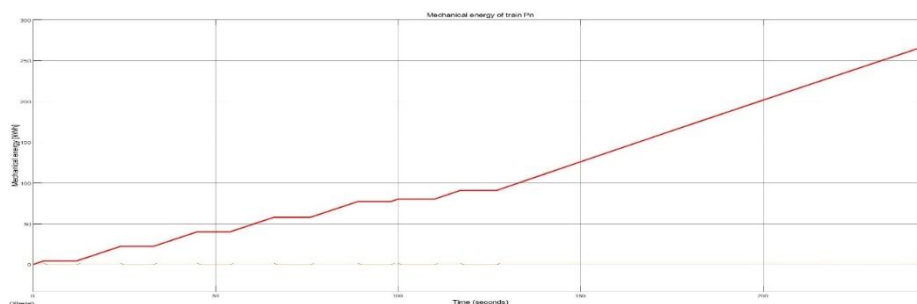
Dla różnych wartości τ , na rysunkach 10 i 11 przedstawione zostały profile prędkości pociągu Pn oraz na rysunkach 12 i 13 wynikające ze zmian prędkości pociągu Pn zużycie energii mechanicznej.



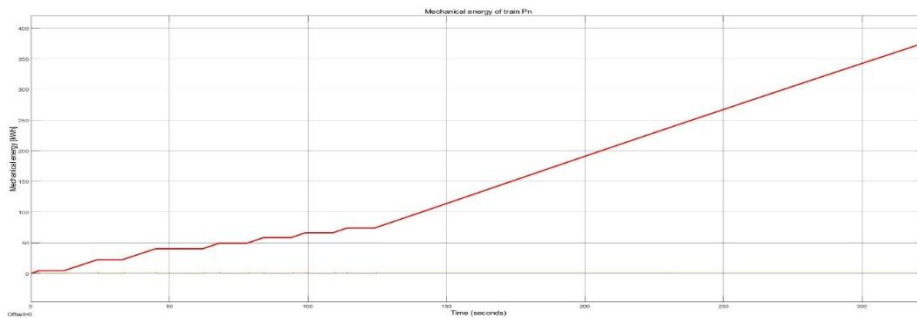
Rys. 10. Profil prędkości Pn dla $\tau = 12$ s (źródło: opracowanie własne)



Rys. 11. Profil prędkości Pn dla $\tau = 60$ s (źródło: opracowanie własne)



Rys. 12. Zużycie energii mechanicznej Pn dla $\tau = 12$ s (źródło: opracowanie własne)



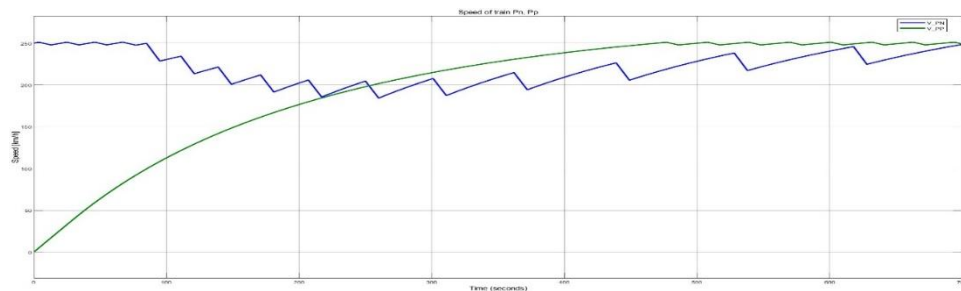
Rys. 13. Zużycie energii mechanicznej Pn dla $\tau = 60$ s (źródło: opracowanie własne)

5.3. Wyniki dla scenariusza 3

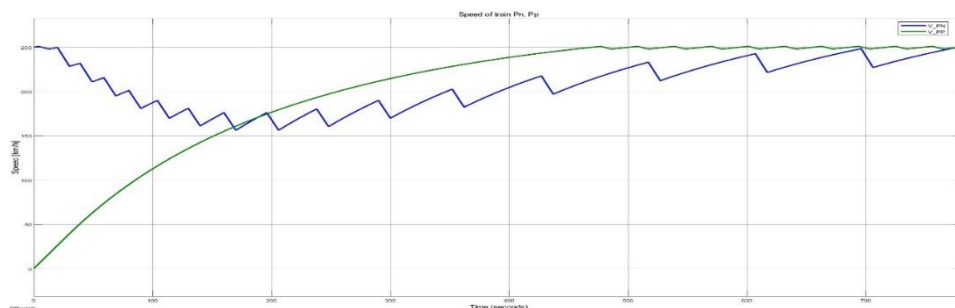
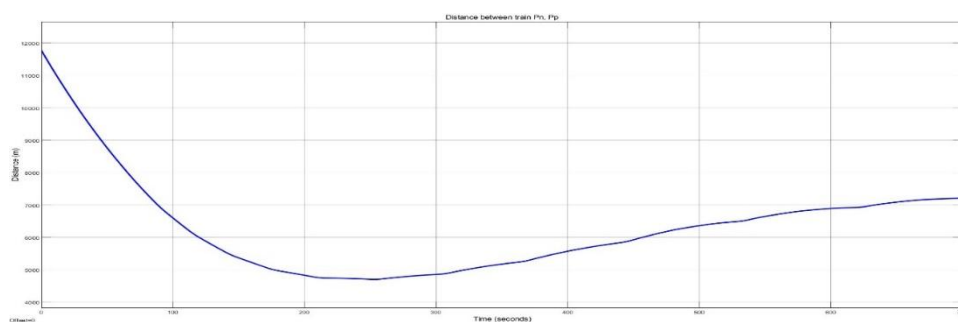
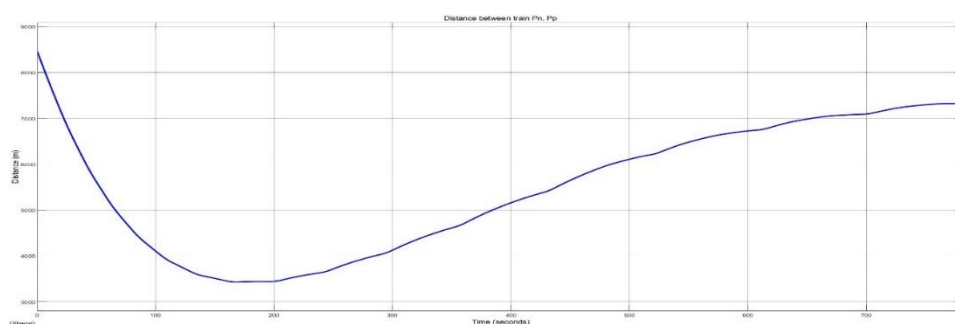
Przeprowadzone badania dla scenariusza 3 wskazały na znaczący (ponad 2-krotny) wzrost utraty energii mechanicznej w porównaniu do scenariusza 1 i 2. Taki stan rzeczy wynika z skróconego dystansu do pociągu Pp (zależność dystansu między pociągami w funkcji czasu pokazano na rysunku 14 i 15), który z powodu obniżenia siły trakcyjnej ma ograniczoną możliwość rozpędzenia się do prędkości maksymalnej. Skutkiem tego jest częste przełączanie w pociągu Pn trybu trakcyjnego na jazdę wybiegiem lub nawet przyhamowanie (krzywa łamana na rysunku 12 i 13), a to w efekcie zwiększa utratę energii kinetycznej pociągu.

Podobnie jak w scenariuszu 2 zmniejszenie prędkości pociągu Pn, zależy od zastosowanego czasu symulacji na rozwiązanie konfliktu ruchowego. Jak przedstawiono w tabeli 1, kolumna 4, skrócony czas na symulację umożliwił na ograniczenie prędkości do 184 km/h, co powoduje wytracenie energii mechanicznej o 318 kWh. W przypadku zaś symulacji w granicach 60 sekund, pociąg PN musiał zwolnić do 156 km/h, co implikuje utratę energii mechanicznej już o 403 kWh.

Dla różnych wartości τ , na rysunkach 14 i 15 przedstawione zostały profile prędkości pociągu Pn i Pp oraz na rysunkach 16 i 17 dystans między tymi pociągami.



Rys. 14. Profil prędkości Pn i Pp dla $\tau = 12$ s (źródło: opracowanie własne)

Rys. 15. Profil prędkości Pn i Pp dla $\tau = 60$ s (źródło: opracowanie własne)Rys. 16. Dystans pomiędzy Pn i Pp dla $\tau = 12$ s (źródło: opracowanie własne)Rys. 17. Dystans pomiędzy Pn i Pp dla $\tau = 60$ s (źródło: opracowanie własne)

6. Wnioski

Analiza na wybranych przypadkach rozwiązania konfliktów ruchowych pokazuje wagę ustalenia czasu na przeprowadzenie symulacji ruchu przez system TMS.

Oprócz rozważanych wielkości czasowych istotny jest również wpływ na utratę energii mechanicznej pociągu, co powiązane jest z efektywnością wykorzystania energii trakcyjnej pociągu.

W przeprowadzonym badaniu dla scenariusza 1 oszacowano czas maksymalny dostępny do wykonania symulacji ruchu (τ) w celu rozwiązania konfliktu ruchowego przy

ustalonym ograniczeniu prędkości pociągu ($V = 100$ km/h) oraz minimalnym czasie następstwa pociągów $T_n = 192$ sekund (na podstawie literatury 29). Uzyskana wartość $\tau = 137$ sekund stanowi zdecydowanie większy czas na symulację niż wskazane wartości w literaturze np. $15 \tau = 60$ sekund.

W przeprowadzonym badaniu według scenariusza 2 i 3, dla różnych wariantów czasu potrzebnego na symulację ($\tau = 12$ s i 60 s) oraz wymaganego czasu następstwa pociągów ($T_n = 226$ s i 193 s), oszacowano wielkość minimalnej prędkości pociągu następującego, i w konsekwencji, utracenie energii mechanicznej przez ten pociąg. Warto zwrócenia uwagi jest znaczący, ponad dwukrotny, wzrost utraty energii mechanicznej w scenariuszu 3 względem scenariusza 2, biorąc pod uwagę zbliżone prędkości minimalne w obu scenariuszach. Wyjaśnieniem tego faktu jest dążenie pociągu następującego do zachowania odpowiedniego dystansu do pociągu poprzedzającego, który ma zmniejszoną siłę trakcyjną wynikającą z pogorszenia warunków eksploatacyjnych.

Biorąc powyższe pod uwagę, można sformułować wniosek, iż w przypadku projektowania i „wymiarowania” systemu TMS konieczne jest rozważenie pełnego spektrum konfliktów ruchowych, rozszerzając scenariusze ruchowe np. o przypadki awarii pojazdu trakcyjnego lub awarii urządzeń kierowania i sterowania ruchem pociągów.

Dobór odpowiedniego potrzebnego czasu na wykonanie symulacji i wdrożenie zmian powinien również uwzględnić czas potrzebny na zdiagnozowanie przyczyn zakłócenia ruchu m.in. rodzaj awarii urządzeń (zakres braku dostępności toru lub peronu, brak możliwości przestawienia zwrotnicy w rozjeździe), czy też sytuacji wykrycia (zgłoszenia przez maszynistę) pogorszonych warunków eksploatacyjnych, których skutkiem jest obniżenie mocy trakcyjnej pociągu.

Bibliografia:

1. Albrecht, T. (2005). Energiesparende und verspatungsminimierende Zugsteuerung in Konfliktsituationen. *Signal und Draht*, 97 (12), 18–22. (in German).
2. Albrecht, T. (2007). The influence of anticipating train driving on the dispatching proces in railway conflict situations. In I. A. Hansen, A. Radtke, J. Pacht, & E. Wendler (Eds.), *CD-ROM Proceedings of the 2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Hannover, Germany.
3. Adenso-Díaz B., Oliva Gonzalez M. & González-Torre P. (1999). On-line timetable re-scheduling in regional train services. *Transportation Research, Part B*, 33, 378–398.
4. Assad A. A. (1980). Models for rail transportation. *Transportation Research, Part A*, 14, 205–220.
5. Cai, X., & Goh, C. J. (1994). A Fast Heuristic for the Train Scheduling Problem. *Computers and Operations Research*, 21, 499–510.
6. Centralny Port Komunikacyjny. “Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla budowy infrastruktury kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego – wytyczne projektowania. Tom I.1. Droga szynowa – układy geometryczne”, Warszawa. 2021 r.
7. Corman, F. (2010). *Real-time Railway Traffic Management: dispatching in complex, large and busy railway networks*. ISBN 978-90-5584-133-2. Netherlands/2010.
8. D’Ariano, A., Pacciarelli, D., Pranzo, M., & Hemelrijk, R. (2007). Evaluating the performance of railway dynamic traffic management. In *DVD-ROM Proceedings of the 11th World Conference on Transport Research*. Berkeley, U.S.A.

9. D'Ariano, A., Pranzo, M., & Hansen, I. A. (2007). Conflict resolution and train speed co-ordination for solving real-time timetable perturbations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8 (2), 208–222.
10. D'Ariano A. (2008). Improving real-time train dispatching: models, algorithms and applications. [<https://www.academia.edu/26039666>][dostęp 17.07.2024].
11. Dąbrowa-Bajon M. (2007). „Podstawy sterowania ruchem kolejowym. Funkcje, wymagania, zarys techniki”, OWPW.
12. Durzyński Z., Łastowski M., „Energochłonność pociągów zespołowych na duże prędkości” (Energy consumption of high-speed trains), *Pojazdy szynowe* nr 3/2010.
13. European Railway Agency. “ERA braking curves tool handbook”, ERA-GUI-05, version 4.2., date: 07/08/18. [<https://www.era.europa.eu/content/braking-curves>][dostęp 17.07.2024].
14. European Railway Agency, “Introduction to ETCS braking curves”. ERA_ERTMS_040026, version 1.5, date: 12/08/20.
15. Fuchsberger, M. (2012). Algorithms for railway traffic management in complex central station areas, doctoral thesis, ETH Zurich. Online source: [<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007583671>][dostęp 17.07.2024].
16. Giannettoni, M., & Savio, S. (2004). The European Project COMBINE 2 to Improve Knowledge on Future Rail Traffic Management Systems. In J. Allan, C. A. Brebbia, R. J. Hill, G. Sciotto, & S. Sone (Eds.), *Computers in Railways IX* (pp. 695–704). Southampton, UK: WIT Press.
17. Gorman M. F. (1998). An application of Genetic and Tabu Searches to the Freight Railroad Operating Plan Problem. *Annals of Operations Research*, 78, 51–69.
18. Higgins A. (1997). Optimisation of Train Schedules to Minimise Transit Time and Maximise Reliability. PhD thesis, Queensland University of Technology.
19. Jacyna M. (2022). Wspomaganie decyzji w praktyce inżynierskiej. Metody, algorytmy, przykłady. PWN SA. ISBN 978-83-01-22255-0. Warszawa 2022 r.
20. Kawakami T. (1997). Future Framework for Maglev Train Traffic Control System Utilizing Autonomous Decentralized Architecture. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Autonomous Decentralized Systems* (pp. 327–334).
21. Kochan A. (2012). Poziomy symulacji rzeczywistego ruchu pociągów, 239 – 248, *Zeszyty naukowo-techniczne SITK RP nr3(99)*, Oddział w Krakowie.
22. Koper E., Kochan A, Gruba Ł. Simulation of the Effect of Selected National Values on the Braking Curves of an ETCS Vehicle. *Development of Transport by Telematics*, J. Mikulski, Red. 2019, ss. 17–31.
23. Komisja Europejska. Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2023/1695 z dnia 10 sierpnia 2023 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemu „Sterowanie” systemu kolei w Unii Europejskiej i uchylające rozporządzenie (UE) 2016/919. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 222 z dnia 8.9.2023, s. 380.
24. Kraay D. R., & Harker P. T. (1995). Real-time Scheduling of Freight Railroads. *Transportation Research, Part B*, 29, 213–229.
25. Mascis, A., Pacciarelli, D., & Pranzo, M. (2002). Models and algorithms for traffic management of rail networks (Tech. Rep. No. 74). Dipartimento di Informatica e Automazione, Università Roma Tre.

26. Mascis A., Pacciarelli D., & Pranzo M. (2004). Scheduling Models for Short-term Railway Traffic Optimisation. In CD-ROM Proceedings of the 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport. San Diego, CA, U.S.A.
27. Mazzarello, M., & Ottaviani, E. (2007). A traffic management system for real-time traffic optimisation in railways. *Transportation Research, Part B*, 41 (2), 246–274.
28. Pacciarelli, D., & Pranzo, M. (2006). Speed regulation in rail networks. In H. J. V. Zuylen & F. Middelham (Eds.), CD-ROM Proceedings of the 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. Delft, the Netherlands.
29. Pachl J.(2024). Railway Timetabling and Capacity. Edition 1.0. Published under a CC BY-NC-ND 4.0 Licence. Braunschweig, June 2024.
30. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Instrukcja o rozkładzie jazdy pociągów Ir-11. Warszawa, 2021 r.
31. Praca pod kierownictwem Szela A. (2012). “Ekspertyza dotycząca układu zasilania sieci trakcyjnej linii CMK”, Materiał na podstawie umowy E/228/2011-PW, Zakład Trakcji Elektrycznej Instytut Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej.
32. RCA. Źródło online: [RCA Published Releases (basecamp.com)] [dostęp: 2024.06.28].
33. Sauder, R., & Westerman, W. (1983). Computer aided train dispatching: Decision suport throught optimization. *Interfaces*, 13, 24–37.
34. SBB CFF FFS, “The swiss way to capacity optimization for Traffic Management”, White Paper. 23 August 2017.
35. Schaafsma, A. A. M. (2001). Dynamisch Railverkeersmanagement; besturingsconcept voor railverkeer op basis van het Lagenmodel Verkeer en Vervoer. PhD thesis, Delft University of Technology. (In Dutch, English summary).
36. Schaafsma, A. A. M., & Bartholomeus, M. M. G. P. (2007). Dynamic Traffic Management in the Schiphol bottleneck. In I. A. Hansen, A. Radtke, J. Pachl, & E. Wendler (Eds.), CD-ROM Proceedings of the 2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Hannover, Germany.
37. Sauder, R., & Westerman, W. (1983). Computer aided train dispatching: Decision suport throught optimization. *Interfaces*, 13, 24–37.
38. Schaefer, H. (1995). Computer-aided train dispatching with expert systems. In *Proceedings of the International Conference on Electric Railways in a United Europe* (pp. 28–32).
39. Shoji S., & Igarashi A. (1997). New Trends of Train Control and Management Systems with Real-Time and Non-Real-Time Properties. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Autonomous Decentralized Systems* (pp. 319–326).
40. Szela A. (2019): „Trakcja elektryczna – podstawy”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019 r.
41. Szkopiński J.; Kochan A. (2021). Energy Efficiency and Smooth Running of a Train on the Route While Approaching Another Train. *Energies* 2021, 14, 7593. <https://doi.org/10.3390/en14227593>.
42. Szkopiński J.; Kochan A. (2023). Maximization of Energy Efficiency by Synchronizing the Speed of Trains on a Moving Block System. *Energies* 2023, 16, 1764. <https://doi.org/10.3390/en16041764>.
43. Vernazza G., & Zunino R. (1990). A distributed intelligence methodology for railway traffic control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 39 (3), 263–270.

44. Wawrzyniak A. „Elektryczne pociągi zespołowe ETR610 serii ED250 dla PKP Intercity S.A.”, Technika Transportu Szynowego nr 9/2013.
45. Wontorski P., Kochan A.: „Plan wdrażania systemu kierowania i sterowania ruchem kolejowym w architekturze RCA-CPK...”, CPK, Warszawa /2022 r.
46. X2RAIL-2. Advanced Traffic Management And Control Systems”. Źródło online: [X2RAIL-2 (shift2rail.org)] [dostęp: 2024.06.28].

Problems of running train traffic in real time

Abstract. The implementation of the Train Management System (TMS) planned by the Central Transport Port is intended to support the process of running train traffic in real time. The TMS system makes it possible to forecast train traffic, detect traffic conflicts and resolve them by using a simulation model and computational algorithms for optimizing solutions. The purpose of the study is to analyse the problem of determining the maximum available time to perform simulations in the TMS system, taking into account the dynamics of train traffic and traffic scenarios for selected traffic conflicts. The established goal was realized using MATLAB/Simulink program, in which a model was created for the movement of two consecutive ETR610 trains of ED250 type, moving in a certain succession of time on a railroad line equipped with ETCS level 2 system. The obtained results allow to evaluate the available time for simulation depending on the type of traffic conflict (the way of applying its solution), as well as the magnitude of the loss of mechanical energy of the train - in terms of traction energy consumption for restoring the maximum speed of the train. The issues raised are relevant to the design of the TMS system architecture and traffic assumptions for the concept of real-time train operation.

Keywords: TMS, trains, headway time, simulation

