POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Maciej Frankowski

WDROŻENIE NARZĘDZIA DOBORU PARAMETRÓW POJAZDU SZYNOWEGO ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM INNOWACYJNYCH ŹRÓDEŁ ZASILANIA

Promotor:

dr hab. inż. Łukasz Rymaniak prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr inż. Natalia Szymlet

Poznań 2026

Spis treści

Streszczenie **3**
Abstract **5**
Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli **7**
1. Wprowadzenie **8**
2. Kierunki rozwoju wymagań dotyczących transportu szynowego **12**
2.1. Obszar Unii Europejskiej 12
2.2. Rynek krajowy 17
3. Aktualny stan postępowań przetargowych dotyczących taboru szynowego **21**
3.1. Kontekst prawny 21
3.2. Analiza postępowań przetargowych dla wybranych kategorii taboru 22
3.3. Obecne procedury przygotowania ofert przetargowych w przedsiębiorstwie 27
4. Cel i zakres pracy **31**
5. Możliwości wdrażania nowoczesnych napędów pojazdów szynowych **35**
5.1. Nowoczesne napędy w kolejnictwie 35
5.2. Wdrażanie nowoczesnych układów napędowych w pojazdach szynowych w Polsce 38
6. Metodyka badawcza **45**
7. Narzędzie doboru parametrów pojazdu do potrzeb ofertowania **48**
7.1. Charakterystyka narzędzia 48
7.2. Źródła danych wejściowych 50
7.3. Karta konfiguracyjna 53
7.4. Parametry konfiguracyjne 56
7.5. Moduł konfiguracji 62
7.6. Nakłady dodatkowe, ryzyka, zagrożenia 74
7.7. Zintegrowany wskaźnik eksploatacji pojazdu 77
7.8. Obliczenia ofertowe dla różnych wariantów układu napędowego 77
7.9. Konfigurator jako cyfrowa reprezentacja pojazdu szynowego w kontekście koncepcji bliźniaka cyfrowego 79
8. Ocena zależności rodzaju układu napędowego, prędkości jazdy i nakładów finansowych **82**
8.1. Konfiguracja pojazdu w zależności od prędkości maksymalnej 82
8.2. Ocena wskaźnikowa uzyskanych rozwiązań 86
9. Weryfikacja narzędzia doboru parametrów **90**
10. Podsumowanie i wnioski **93**
10.1. Ogólna charakterystyka wyników pracy 93
10.2. Wnioski ogólne 94
10.3. Wnioski szczegółowe 96
10.4. Proponowane kierunki dalszych prac 97
Bibliografia **100**

Streszczenie

Współczesny transport szynowy jest obecnie intensywnie rozwijany i modernizowany ze względu m.in. na zwiększenie zapotrzebowania na przewozy, wprowadzanie coraz bardziej rygorystycznych wymagań dotyczących ograniczania oddziaływania transportu na środowisko oraz rozwój nowych technologii. Szczególnego znaczenia nabierają alternatywne źródła zasilania, umożliwiające np. eksploatację pojazdów na liniach niezelektryfikowanych, czy też redukujące emisję zanieczyszczeń w miejscu eksploatacji. Pojazd szynowy stanowi złożony system techniczny, w którym zmiana jednego z podstawowych parametrów może wpływać na jego konstrukcję, osiągi, wyposażenie oraz nakłady związane z wytworzeniem. Powoduje to potrzebę systemowego podejścia do procesu konfiguracji pojazdu. Jednocześnie rosnąca liczba wymagań technicznych, eksploatacyjnych i ekonomicznych zwiększa złożoność procesu przygotowania ofert na dostawę taboru.

Przedstawione uwarunkowania stanowiły podstawę realizacji rozprawy doktorskiej, której głównym celem było opracowanie i weryfikacja narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego wspomagającego proces jego konfiguracji na etapie przygotowania oferty, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości zastosowania różnych technologii napędowych oraz ich wpływu na konstrukcję pojazdu i związane z nią koszty. Istotę realizacji celu pracy stanowi opracowanie autorskiej metodyki umożliwiającej integrację wymagań zamawiającego, danych technicznych i produkcyjnych oraz zależności pomiędzy parametrami pojazdu w ramach spójnego, powtarzalnego i weryfikowalnego procesu.

W pierwszej części rozprawy przedstawiono kierunki rozwoju transportu szynowego w Unii Europejskiej i Polsce, a następnie przeprowadzono analizę postępowań przetargowych dotyczących wagonów pasażerskich, lokomotyw oraz elektrycznych zespołów trakcyjnych. Pozwoliło to na identyfikację wymagań zamawiających oraz kryteriów stosowanych przy wyborze ofert. W analizowanych postępowaniach największą wagę miało kryterium ceny, jednak stosowano również kryteria odnoszące się do właściwości technicznych i eksploatacyjnych pojazdów. To było podstawą do sformułowania celu pracy i jej struktury. W dalszej części omówiono możliwości wdrażania nowoczesnych źródeł zasilania, ze szczególnym uwzględnieniem pojazdów elektrycznych z akumulatorami i wykorzystujących w napędzie ogniwa paliwowe.

Obiektem badań zasadniczych było rzeczywiste postępowanie przetargowe dotyczące zakupu ośmiu fabrycznie nowych elektrycznych zespołów trakcyjnych do obsługi regionalnych przewozów pasażerskich w województwie wielkopolskim. Dokumentacja tego postępowania stanowiła podstawę do określenia wymagań wejściowych wykorzystywanych następnie w procesie konfiguracji pojazdu.

W ramach badań opracowano autorską metodykę konfiguracji oraz stanowiące jej praktyczną implementację narzędzie doboru parametrów pojazdu szynowego. Podstawowymi elementami rozwiązania są: karta konfiguracyjna, otwarta baza danych, lista kontrolna grup konstrukcyjnych oraz moduł konfiguracji, uzupełnione o reguły decyzyjne i procedurę weryfikacji. Narzędzie wykorzystuje dane pochodzące z dokumentacji przetargowej, systemów informatycznych przedsiębiorstwa, dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej oraz informacji dotyczących stosowanych podzespołów. Podział pojazdu na grupy konstrukcyjne umożliwił analizę wpływu poszczególnych parametrów na jego konstrukcję

oraz przypisanie rozwiązaniom technicznym odpowiednich nakładów. Uwzględniono również nakłady dodatkowe i czynniki ryzyka mające znaczenie dla przygotowania i realizacji oferty.

Szczególnym obszarem badań była analiza wpływu technologii napędowej na konfigurację pojazdu. Rozpatrzono cztery warianty: elektryczny zespół trakcyjny zasilany z sieci trakcyjnej – EMU, zespół trakcyjny z napędem spalinowo-elektrycznym, elektryczny zespół trakcyjny wyposażony w akumulatory – BEMU oraz elektryczny zespół trakcyjny wykorzystujący ogniwa paliwowe – FCEMU. W przypadku braku jednoznacznego określenia technologii napędowej przez zamawiającego zastosowano podejście iteracyjne, w którym w pierwszym etapie definiowane są wymagania funkcjonalne wobec napędu, a następnie konstrukcja pojazdu jest dostosowywana do wybranego rozwiązania.

Dla podstawowej konfiguracji o prędkości konstrukcyjnej 160 km/h całkowite nakłady wyniosły 35,5 mln zł dla EMU, 41,5 mln zł dla wariantu spalinowo-elektrycznego, 43,7 mln zł dla BEMU oraz 47,6 mln zł dla FCEMU. Analizę rozszerzono następnie na prędkości 140 i 180 km/h. W badanym zakresie zwiększenie prędkości ze 140 do 180 km/h powodowało zwiększenie całkowitych nakładów o 6,5% dla EMU, 14,6% dla wariantu spalinowo-elektrycznego, 19,3% dla BEMU oraz 30,9% dla FCEMU. Wykazano tym samym, że wraz ze wzrostem prędkości konstrukcyjnej zwiększa się wrażliwość całkowitych nakładów na zastosowaną technologię napędową. Do ilościowej oceny uzyskanych zależności zastosowano wskaźniki umożliwiające analizę poziomu, struktury i dynamiki zmian nakładów.

Opracowane narzędzie poddano weryfikacji strukturalnej, funkcjonalnej, algorytmicznej i procesowej. Sprawdzono między innymi kompletność i jednoznaczność parametrów, poprawność zależności pomiędzy nimi, spójność danych wejściowych, działanie reguł decyzyjnych oraz zgodność procesu konfiguracji z rzeczywistym procesem ofertowania. Zastosowanie kryteriów weryfikacyjnych, bramek decyzyjnych i pętli korekcyjnych umożliwiło identyfikację konfiguracji niespójnych technicznie lub formalnie oraz potwierdziło poprawność przyjętej struktury i logiki działania opracowanego narzędzia.

Rezultatem przeprowadzonych prac jest opracowana, zweryfikowana i wdrożona w przedsiębiorstwie autorska metoda doboru parametrów pojazdu szynowego wspomagająca proces przygotowania konfiguracji ofertowej. Otwarta struktura rozwiązania umożliwia dalsze uzupełnianie bazy danych wraz z realizacją kolejnych projektów i pozyskiwaniem nowych informacji. Wkład naukowy rozprawy obejmuje sformalizowanie procesu konfiguracji pojazdu na etapie ofertowania, opracowanie sposobu integracji danych i zależności pomiędzy parametrami, agregowania nakładów w strukturze grup konstrukcyjnych oraz wykorzystanie wskaźników umożliwiających ilościową ocenę wpływu parametrów technicznych i technologii napędowej na konfigurację pojazdu. Przeprowadzone badania wykazały, że opracowana metodyka umożliwia prowadzenie konfiguracji w sposób spójny, powtarzalny i weryfikowalny oraz ocenę wpływu wybranych decyzji konfiguracyjnych na konstrukcję pojazdu i związane z nią nakłady.

Abstract

Implementation of a tool for selecting parameters of a rail vehicle with particular emphasis on innovative power sources

Contemporary rail transport is undergoing intensive development and modernization, driven, among other factors, by the growing demand for transport services, increasingly stringent requirements concerning the reduction of the environmental impact of transport, and the development of new technologies. Alternative power sources are becoming particularly important, as they enable, for example, the operation of vehicles on non-electrified lines and contribute to reducing pollutant emissions during operation. A rail vehicle is a complex technical system in which a change in one of its fundamental parameters may affect its design, performance, equipment, and the costs associated with its manufacture. This creates a need for a systematic approach to the vehicle configuration process. At the same time, the increasing number of technical, operational, and economic requirements adds to the complexity of preparing bids for the supply of rolling stock.

These considerations provided the basis for the doctoral dissertation, whose main objective was to develop and verify a rail vehicle parameter selection tool supporting the vehicle configuration process at the bid preparation stage, with particular emphasis on the use of innovative power sources and different propulsion technologies and their impact on vehicle design and the associated costs. A key element in achieving this objective was the development of an original methodology integrating the contracting authority's requirements, technical and production data, and the interrelationships between vehicle parameters within a coherent, repeatable, and verifiable process.

The first part of the dissertation presents the main development trends in rail transport in the European Union and Poland, followed by an analysis of tender procedures concerning passenger coaches, locomotives, and electric multiple units. This made it possible to identify the requirements specified by contracting authorities and the criteria applied in the evaluation of bids. In the analysed procedures, price was the criterion with the highest weighting; however, criteria relating to the technical and operational characteristics of vehicles were also applied. These findings provided the basis for defining the objective and structure of the dissertation. The subsequent part discusses the possibilities for implementing innovative power sources, with particular emphasis on battery electric vehicles and vehicles using fuel cells for propulsion.

The principal research was based on an actual tender procedure for the purchase of eight new electric multiple units intended for regional passenger services in the Greater Poland Voivodeship. The tender documentation provided the basis for defining the input requirements subsequently used in the vehicle configuration process.

As part of the research, an original configuration methodology and a rail vehicle parameter selection tool constituting its practical implementation were developed. The principal elements of the proposed solution comprise a configuration card, an open database, a construction group checklist, and a configuration module, supplemented by decision rules and a verification procedure. The tool uses data derived from tender documentation, the company's IT systems, design and manufacturing documentation, and information concerning

the components used. Dividing the vehicle into construction groups made it possible to analyse the impact of individual parameters on its design and to assign the corresponding costs to specific technical solutions. Additional costs and risk factors relevant to bid preparation and execution were also taken into account.

A particular focus of the research was the analysis of the influence of propulsion technology on vehicle configuration. Four variants were considered: an electric multiple unit supplied from the overhead traction network (EMU), a multiple unit with diesel-electric propulsion, a battery electric multiple unit (BEMU), and a fuel cell electric multiple unit (FCEMU). Where the propulsion technology is not explicitly specified by the contracting authority, an iterative approach was applied in which the functional requirements for the propulsion system are defined in the first stage, followed by adaptation of the vehicle design to the selected solution.

For the baseline configuration with a design speed of 160 km/h, the total costs amounted to PLN 35.5 million for the EMU, PLN 41.5 million for the diesel-electric variant, PLN 43.7 million for the BEMU, and PLN 47.6 million for the FCEMU. The analysis was subsequently extended to design speeds of 140 and 180 km/h. Within the analysed range, increasing the design speed from 140 to 180 km/h resulted in an increase in total costs of 6.5% for the EMU, 14.6% for the diesel-electric variant, 19.3% for the BEMU, and 30.9% for the FCEMU. The results therefore demonstrated that, as design speed increases, the sensitivity of total costs to the propulsion technology applied also increases. Quantitative indicators were used to assess the identified relationships in terms of the level, structure, and dynamics of cost changes.

The developed tool was subjected to structural, functional, algorithmic, and process verification. The verification covered, among other aspects, the completeness and unambiguous definition of parameters, the correctness of the relationships between them, the consistency of input data, the operation of decision rules, and the alignment of the configuration process with the actual bid preparation process. The application of verification criteria, decision gates, and corrective loops enabled technically or formally inconsistent configurations to be identified and confirmed the correctness of the adopted structure and operating logic of the developed tool.

The outcome of the research is an original rail vehicle parameter selection method that has been developed, verified, and implemented in an industrial enterprise to support vehicle configuration at the bidding stage. The open structure of the solution allows the database to be further expanded as subsequent projects are implemented and new information becomes available. The scientific contribution of the dissertation includes the formalisation of the rail vehicle configuration process at the bidding stage, the development of a method for integrating data and interrelationships between parameters, the aggregation of costs within the structure of construction groups, and the use of indicators enabling a quantitative assessment of the influence of technical parameters and propulsion technology on vehicle configuration. The research demonstrated that the developed methodology enables the configuration process to be carried out in a coherent, repeatable, and verifiable manner and makes it possible to assess the impact of selected configuration decisions on vehicle design and the associated costs.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli

BEMU	—	*battery electric multiple unit* – elektryczny zespół trakcyjny wyposażony w akumulatory
CUPT	—	Centrum Unijnych Projektów Transportowych
DEMU	—	*diesel-electric multiple unit* – zespół trakcyjny z napędem hybrydowym (spalinowo-elektrycznym)
EMU	—	*electric multiple unit* – elektryczny zespół trakcyjny
ETCS	—	*European Train Control System* – Europejski System Sterowania Pociągiem
ERP	—	*Enterprise Resource Planning* – zintegrowany system planowania zasobów
EU	—	*European Union* – Unia Europejska (UE)
FCEMU	—	*fuel cell electric multiple units* – elektryczny zespół trakcyjny wyposażony w ogniwa paliwowe
GHG	—	*Greenhouse Gases* – gazy cieplarniane
KPO	—	Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększenia Odporności
LCC	—	*life cycle cost* – koszty cyklu życia
MCDM	—	*multi criteria decision making* – metoda wielokryterialnego podejmowania decyzji
OPZ	—	opis przedmiotu zamówienia
PZP	—	Prawo Zamówień Publicznych
SIP	—	system informacji pasażerskiej
SWZ	—	specyfikacja warunków zamówienia
RAMS	—	*reliability, availability, maintainability, safety* – analiza niezawodności, dostępności, obsługiwalności i bezpieczeństwa
TSI CCS	—	*technical specification for interoperability – control-command and signalling* – techniczne specyfikacje interoperacyjności dotyczące sterowania i sygnalizacji
TSI LOC&PAS	—	*technical specification for interoperability – locomotives and passenger rolling stock* – techniczne specyfikacje interoperacyjności dotyczące lokomotyw i wagonów pasażerskich w transporcie kolejowym
TSI NOI	—	*technical specification for interoperability – noise* – techniczne specyfikacje interoperacyjności dotyczące hałasu kolejowego
TSI PRM	—	*technical specification for interoperability – persons with reduced mobility* – techniczne specyfikacje interoperacyjności dotyczące osób o ograniczonej możliwości poruszania się
UIC	—	*Union Internationale des Chemins de fer* (fr.) – Międzynarodowy Związek Kolei
UTK	—	Urząd Transportu Kolejowego
UZP	—	Urząd Zamówień Publicznych

1. Wprowadzenie

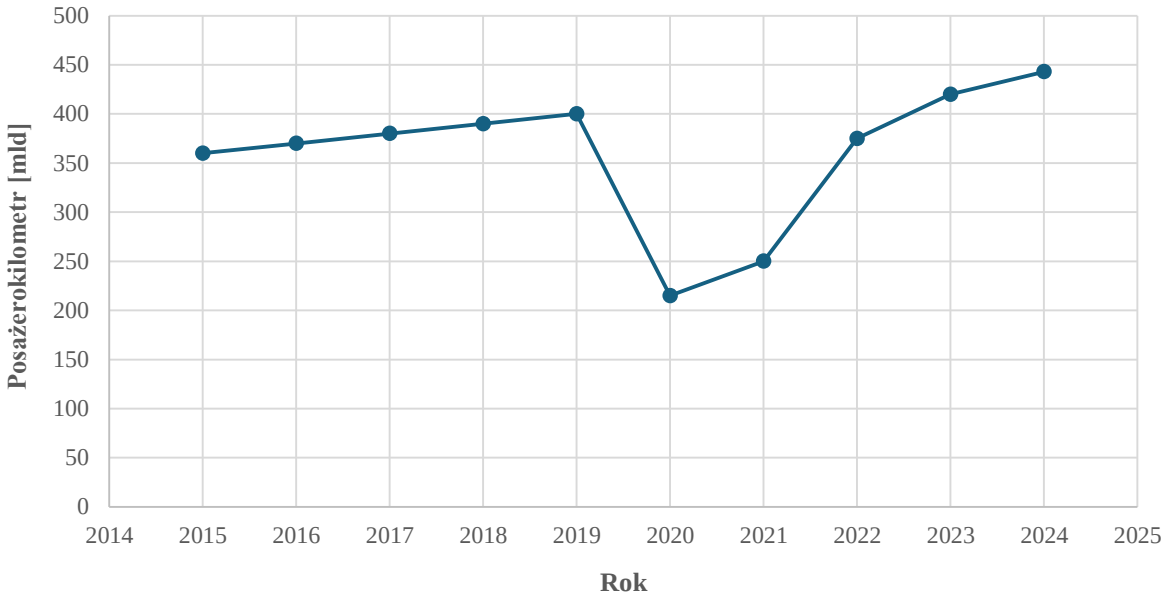
Transport jest jednym z kluczowych sektorów gospodarki Unii Europejskiej, stanowiący istotny udział w tworzeniu produktu krajowego brutto (PKB) oraz stymulowaniu rynku pracy. Według Komisji Europejskiej odpowiada on za około 5% PKB UE, a zatrudnienie wynosi ponad 10 mln osób w krajach członkowskich [1, 2]. Jednocześnie sektor ten jest jednym z głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych, wytwarzający około jednej czwartej całkowitej emisji tych gazów w UE [3]. Pomimo rosnącego znaczenia gospodarki cyfrowej i automatyzacji, transport wciąż jest fundamentem integracji rynku wewnętrznego, spójności terytorialnej oraz mobilności obywateli, co sprawia, że jego zrównoważony rozwój stał się priorytetem europejskiej polityki publicznej. W realizacji założeń zrównoważonej mobilności istotną rolę odgrywa transport kolejowy, stanowiący ważny element systemu przewozów pasażerskich i towarowych. Jego znaczenie wynika zarówno z możliwości obsługi znacznych potoków pasażerskich, jak i z potencjału ograniczania negatywnego oddziaływania transportu na środowisko. W konsekwencji rozwój kolei stanowi jeden z istotnych kierunków transformacji współczesnych systemów transportowych.

W Polsce rynek kolejowych przewozów pasażerskich jest zdominowany przez kilka kluczowych podmiotów, które razem obsługują dziesiątki milionów pasażerów rocznie, przyczyniając się do rekordowych wyników w 2025 r. Największe z nich to państwowe spółki z Grupy PKP, Polregio oraz liczni przewoźnicy samorządowi działający na zlecenie województw. PKP Intercity jest największym krajowym przewoźnikiem dalekobieżnym w Polsce, obsługującym długodystansowe połączenia z udziałem ok. 35–36% w pracy eksploatacyjnej i dominującym w pracy przewozowej (ponad 63%) [4]. W pierwszym półroczu 2025 r. operator przewiózł rekordowe 40,4 mln pasażerów, co oznacza wzrost o 9% rok do roku. Polregio pełni rolę lidera w przewozach regionalnych, z ok. 28% udziałem w pracy eksploatacyjnej i największą liczbą pasażerów (ok. 24% rynku). Samorządowi przewoźnicy kolejowi, finansowani przez województwa, obsługują głównie połączenia regionalne i aglomeracyjne. Do największych należą Koleje Mazowieckie (ok. 10% pracy eksploatacyjnej i 16% pasażerów), Koleje Dolnośląskie, Koleje Śląskie, Koleje Wielkopolskie lub Arriva RP [5]. W okresie styczeń–wrzesień 2025 r. znacząco przyczyniły się one do zwiększenia ogólnych przewozów pasażerskich, osiągając łącznie ponad 37 mln pasażerów miesięcznie w szczytowych okresach.

Najwięksi operatorzy kolejowi w Polsce (PKP Intercity, Polregio oraz przewoźnicy samorządowi) planują intensywne zakupy nowoczesnego taboru w celu poprawy konkurencyjności, ekologii i komfortu podróży. Przykładowo, PKP Intercity rozwija ofertę pociągów kategorii Express InterCity Premium (EIP), Express InterCity (EIC) i InterCity (IC), Polregio inwestuje w elektryczne i nowoczesne Elektryczne Zespoły Trakcyjne (EZT), równocześnie przewoźnicy regionalni pozyskują tabor dostosowany do potrzeb lokalnych przewozów. Zakupy te są często finansowane ze źródeł UE oraz z udziałem środków Funduszu Kolejowego.

W 2024 r. w UE koleją wykonano 443 mld pasażerokilometrów, w porównaniu do 419 mld w 2023 r. (+5,8%) (rys. 1.1) [6]. Jest to największa liczba zgłoszona przez główne przedsiębiorstwa kolejowe od początku zbierania danych w 2004 r. Zwiększenie pracy przewozowej w europejskim transporcie kolejowym odzwierciedla rozwój znaczenia kolei

w realizacji potrzeb transportowych społeczeństwa. Wskaźnik pracy przewozowej, wyrażany w pasażerokilometrach, łączy liczbę przewiezionych pasażerów z odległością odbywanych przez nich podróży, dzięki czemu pozwala określić rzeczywistą skalę realizowanego popytu na przewozy kolejowe. Zgodnie z danymi Urzędu Transportu Kolejowego (UTK) – 2025 r. był rekordowy dla kolejowych przewozów pasażerskich w Polsce [6]. Z usług kolei skorzystało 438,97 mln pasażerów, natomiast wykonana praca przewozowa osiągnęła prawie 30,7 mld pasażerokilometrów. W stosunku do 2024 r. oznaczało to zwiększenie pracy przewozowej o 7,8%. Jednocześnie statystyczny mieszkaniec Polski korzystał z kolei średnio 11,7 razy w ciągu roku, co stanowiło największą wartość tego wskaźnika od 1995 r.



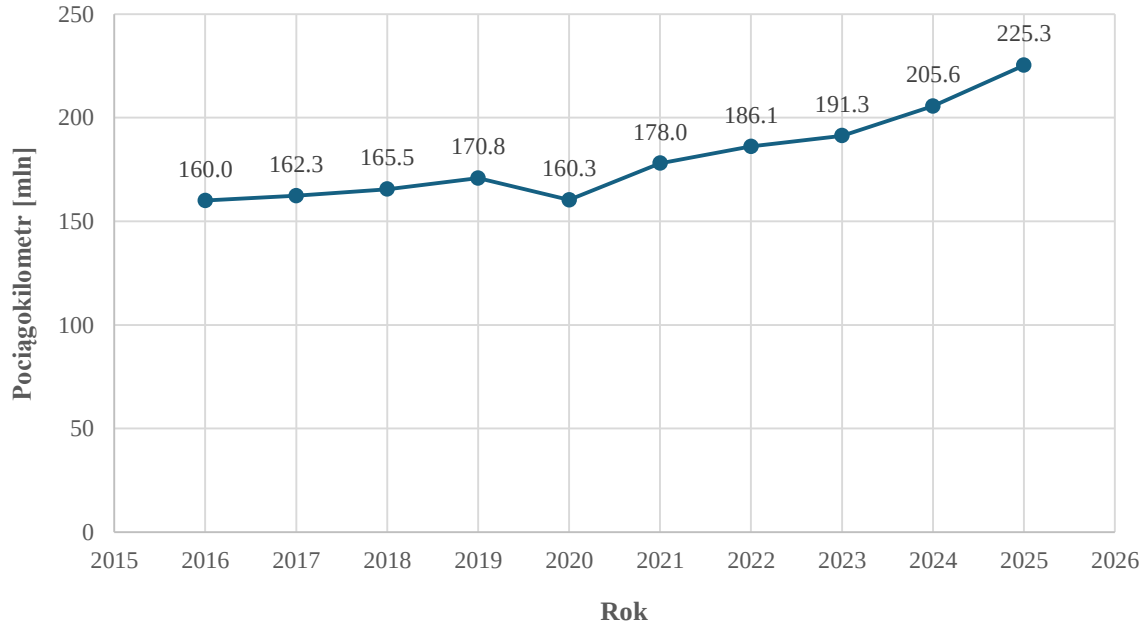
Rys. 1.1. Praca przewozowa w UE – transport pasażerski [6]

Popyt na usługi transportowe powinien być także rozpatrywany w aspekcie zasobów technicznych koniecznych do ich wykonania. W tym celu istotnym uzupełnieniem pracy przewozowej jest praca eksploatacyjna, wyrażana w pociągokilometrach. O ile praca przewozowa charakteryzuje skalę zrealizowanego popytu pasażerskiego, o tyle praca eksploatacyjna określa skalę pracy rzeczywiście wykonanej przez tabor kolejowy w celu realizacji oferty przewozowej. Oba wskaźniki opisują więc odmienne, ale wzajemnie powiązane aspekty funkcjonowania transportu kolejowego: pierwszy odnosi się przede wszystkim do wykorzystania kolei przez pasażerów, drugi natomiast do intensywności eksploatacji pojazdów.

W 2025 r. praca eksploatacyjna pociągów pasażerskich w Polsce przekroczyła 225,3 mln pociągokilometrów i była o 9,6% większa niż w roku poprzednim (rys. 1.2) [5]. Była to jednocześnie największa zarejestrowana wartość. W perspektywie lat 2016–2025 widoczne jest wyraźne zwiększenie tego wskaźnika – ze 160,0 mln pociągokilometrów w 2016 r. do 225,3 mln pociągokilometrów w 2025 r. Oznacza to zmianę o około 41% w ciągu dziewięciu lat, pomimo czasowego ograniczenia przewozów w okresie pandemii COVID-19.

Zwiększenie pracy eksploatacyjnej oznacza coraz intensywniejsze wykorzystanie taboru, ale także potrzebę zapewnienia odpowiedniej liczby pojazdów, ich wysokiej dostępności

technicznej oraz dostosowania właściwości eksploatacyjnych do realizowanych zadań przewozowych. Rosnąca skala przewozów nie pozostaje zatem bez wpływu na proces planowania inwestycji taborowych oraz wymagania stawiane nowym pojazdom szynowym. Istotne jest przy tym, że zainteresowanie koleją nie wynika wyłącznie ze zwiększania liczby dostępnych połączeń. UTK wskazuje, że do czynników wpływających na zwiększenie atrakcyjności kolei należy również poprawa jakości oferowanych usług [5]. Znaczenie mają inwestycje w nowoczesny tabor dalekobieżny i regionalny, poprawa komfortu podróży, stosowanie klimatyzacji, ergonomicznego wyposażenia wnętrz i systemów Wi-Fi, a także zapewnienie udogodnień dla osób o ograniczonej możliwości poruszania się. UTK wskazuje ponadto na skracanie czasów przejazdu, zwiększanie bezpieczeństwa poprzez wdrażanie zaawansowanych systemów, takich jak ETCS (*European Train Control System* – Europejski System Sterowania Pociągiem), oraz środowiskowe korzyści wynikające z wykorzystywania transportu kolejowego.



Rys. 1.2. Praca eksploatacyjna w kolejowych przewozach pasażerskich w Polsce w latach 2016–2025 [5]

Wspomniane cechy współczesnego taboru nie stanowią zbioru całkowicie niezależnych od siebie właściwości. Wymagają one odpowiedniego doboru parametrów technicznych oraz rozwiązań konstrukcyjnych pojazdu. Na przykład zwiększenie prędkości maksymalnej pojazdu powoduje zmianę wymagań dotyczących mocy układu napędowego, układu biegowego, hamulcowego czy też konstrukcji nośnej, natomiast zwiększenie liczby urządzeń wyposażenia pasażerskiego może wpływać na masę, zużycie energii oraz wymagania dotyczące instalacji pomocniczych. Konieczne staje się zatem uwzględnienie nie tylko poszczególnych parametrów, lecz również zależności występujących pomiędzy nimi. Szczególnego znaczenia problem ten nabiera w związku z rozwojem alternatywnych technologii zasilania pojazdów szynowych. Obok klasycznych elektrycznych zespołów trakcyjnych zasilanych z sieci trakcyjnej możliwe jest wykorzystanie układów spalinowo-elektrycznych, akumulatorów oraz ogniw paliwowych. Poszczególne rozwiązania

umożliwiają realizację podobnych zadań przewozowych, lecz wymagają zastosowania odmiennej architektury układu zasilania i napędu oraz odpowiedniego dostosowania pozostałych elementów pojazdu.

Wybór rodzaju źródła zasilania nie może być zatem rozpatrywany wyłącznie jako wybór pojedynczego zespołu lub podzespołu. Technologie te różnią się między innymi sposobem wytwarzania, magazynowania i przetwarzania energii, masą i rozmieszczeniem urządzeń, wymaganiami dotyczącymi chłodzenia, sterowania, diagnostyki i bezpieczeństwa oraz wpływem na parametry eksploatacyjne pojazdu. Zastosowanie określonego rozwiązania napędowego może więc powodować zmiany również w innych obszarach konstrukcyjnych. W konsekwencji wybór technologii zasilania powinien być analizowany w odniesieniu do konfiguracji całego pojazdu.

Pojęcie konfiguracji nabiera szczególnego znaczenia już na etapie przygotowania oferty na dostawę taboru szynowego. Punktem wyjścia tego procesu są wymagania zamawiającego określone w dokumentacji postępowania, w szczególności w Specyfikacji Warunków Zamówienia. Wymagania funkcjonalne i eksploatacyjne muszą zostać przełożone przez producenta na konkretny zbiór parametrów oraz rozwiązań konstrukcyjnych. Jednocześnie przygotowana konfiguracja powinna być zgodna z obowiązującymi przepisami, normami i wymaganiami technicznymi, odpowiadać rzeczywistym możliwościom konstrukcyjnym i produkcyjnym przedsiębiorstwa oraz pozostawać uzasadniona ekonomicznie. Proces przygotowania konfiguracji ofertowej nie sprowadza się zatem do niezależnego doboru kolejnych parametrów. Poszczególne decyzje konstrukcyjne i eksploatacyjne pozostają ze sobą powiązane, a zmiana jednego z parametrów może powodować konieczność modyfikacji innych elementów pojazdu. Wraz ze zwiększeniem liczby wymagań oraz dostępnych rozwiązań technologicznych, zwiększa się liczba możliwych wariantów konfiguracji, które należy ocenić pod względem technicznym i ekonomicznym.

Problem konfiguracji jest tym samym bezpośrednio związany z procesem ofertowania. Opracowanie konkurencyjnej oferty wymaga znalezienia rozwiązania spełniającego wymagania obligatoryjne zamawiającego, a równocześnie umożliwiającego osiągnięcie korzystnej oceny według przyjętych kryteriów przy racjonalnym poziomie nakładów. Poprawa określonych właściwości technicznych lub eksploatacyjnych może bowiem zwiększać wartość użytkową oferowanego pojazdu, lecz jednocześnie powodować zwiększenie nakładów związanych z jego wykonaniem. Powstaje zatem wielowymiarowy problem decyzyjny, w którym rozwiązanie powinno stanowić racjonalny kompromis pomiędzy wymaganiami technicznymi, właściwościami eksploatacyjnymi, możliwościami przedsiębiorstwa oraz uwarunkowaniami ekonomicznymi.

Przedstawione rozważania wskazują, że współczesny proces przygotowania oferty na dostawę pojazdu szynowego wymaga systemowego podejścia do doboru jego parametrów. Rosnąca intensywność eksploatacji taboru kolejowego, zwiększające się oczekiwania pasażerów, rozwój nowych technologii oraz mnogość wzajemnie zależnych wymagań powodują, że właściwe skonfigurowanie pojazdu już na etapie ofertowym nabiera coraz większego znaczenia. Zagadnienie to stanowi bezpośrednie tło problematyki podjętej w rozprawie doktorskiej.

2. Kierunki rozwoju wymagań dotyczących transportu szynowego

2.1. Obszar Unii Europejskiej

Ze względu na narastające wyzwania klimatyczne i środowiskowe, a także w ramach dążenia do neutralności klimatycznej do 2050 r., Komisja Europejska w grudniu 2020 r. przyjęła „Strategię na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności" (*Sustainable and Smart Mobility Strategy*) [4]. Dokument ten, będący filarem Europejskiego Zielonego Ładu (*European Green Deal*), zawiera plan działań obejmujący 82 inicjatywy legislacyjne i inwestycyjne [7], których realizacja ma doprowadzić do głębokiej transformacji sektora transportowego w kierunku zeroemisyjności i cyfryzacji do 2050 r. (tab. 2.1).

Tabela 2.1. Strategia Zrównoważonej i Inteligentnej Mobilności definiująca kluczowe cele ilościowe [7]

Cel strategiczny	Horyzont czasowy	Wskaźnik
Redukcja emisji gazów cieplarnianych (GHG) w transporcie	2050	–90%
Podwojenie pasażerskiego ruchu kolejowego *	2030	×2 vs. 2015
Potrojenie pasażerskiego ruchu kolejowego *	2050	×3 vs. 2015
Zwiększenie transportu towarowego koleją	2030	+ 50% vs. 2015
Podwojenie transportu towarowego koleją	2050	×2 vs. 2015

* w zakresie kolei dużych prędkości

Głównym elementem tej strategii jest założenie, że emisja gazów cieplarnianych z transportu musi zostać zredukowana o 90% do 2050 r. w stosunku do poziomu z 1990 r. [1], przy jednoczesnym zachowaniu dostępności, bezpieczeństwa i efektywności systemów transportowych. Osiągnięcie tego celu wymaga jednoczesnych działań na wielu płaszczyznach: dekarbonizacji napędów, optymalizacji wykorzystania infrastruktury, modernizacji taboru oraz integracji technologicznej w ramach jednolitego europejskiego obszaru kolejowego. Transport kolejowy jest uznawany za najbardziej efektywną energetycznie i ekologiczną gałąź transportu. W 2020 r. sektor ten odpowiadał jedynie za 0,4% emisji gazów cieplarnianych z transportu w Unii Europejskiej [8], co potwierdza jego przewagę środowiskową nad transportem drogowym i lotniczym (tab. 2.2) [9, 10]. Jednocześnie wskazuje to na potencjał zwiększania udziału kolei w podziale zadań przewozowych [11].

Tabela 2.2. Emisja CO_2 dla różnych środków transportu w EU [9, 10]

Środek transportu	Emisja CO_2 (g CO_2/pasażerokilometr)
Samolot (loty krótkodystansowe)	~250
Samolot (loty średniodystansowe)	~195
Samochód z napędem spalinowym	170–250
Samochód z napędem elektrycznym (użytkowanie, bez produkcji)	~60
Pociąg z napędem elektrycznym	24–35
Autobus dalekobieżny	68–158

Według danych Eurostatu i UTK w 2023 r. kolej zrealizowała niespełna 17% pracy przewozowej w lądowym transporcie towarowym, podczas gdy transport drogowy odpowiadał za ponad 75% tej pracy [12, 13]. Dysproporcje te świadczą o utrzymującej się dominacji transportu drogowego i niewystarczającym tempie *modal shift* – przenoszenia przewozów z dróg na tory. W wielu państwach członkowskich kolej nadal nie jest w pełni konkurencyjna finansowo, mimo zwiększających się kosztów zewnętrznych transportu drogowego i zaostrzanych wymagań klimatycznych [14].

Transformacja środków transportu (*modal shift*) w kierunku zrównoważonego transportu kolejowego nie przebiega w tempie zakładanym przez decydentów i planistów UE [15]. Najistotniejsze bariery obejmują:

- dominację transportu drogowego, którego małe koszty jednostkowe i elastyczność wciąż determinują wybory przewoźników i klientów,
- niedostateczny poziom inwestycji w infrastrukturę kolejową, szczególnie w zakresie elektryfikacji linii i utrzymania parametrów technicznych sieci,
- ograniczoną interoperacyjność technologiczną między systemami krajowymi, co utrudnia integrację europejskiego rynku przewozów,
- niedobory cyfryzacji i automatyzacji, ograniczające efektywność zarządzania ruchem oraz optymalizację energetyczną eksploatacji.

Zidentyfikowane bariery są zarówno techniczne, jak i instytucjonalne, co wymaga zintegrowanego podejścia opartego na synergii innowacji technologicznych, regulacyjnych i inwestycyjnych. Współczesna kolej stoi przed koniecznością transformacji energetycznej, której podstawą jest rozwój nowoczesnych układów napędowych. Rozwój tych technologii jest wspierany przez programy badawcze UE, takie jak: „Shift2Rail" oraz „Horizon Europe" [16, 17], a także krajowe inicjatywy innowacyjne, m.in. Fundusz Kolejowy [18]. W 2025 r. na obszarze UE planowano eksploatację ponad 150 jednostek kolejowych wykorzystujących ogniwa paliwowe oraz kilkuset pojazdów elektrycznych z akumulatorami klasy BEMU (*Battery Electric Multiple Unit*), co potwierdza dynamiczny postęp w tej dziedzinie [19]. Zastosowanie alternatywnych źródeł zasilania przyczynia się nie tylko do redukcji emisji zanieczyszczeń, ale także do poprawy efektywności ekonomicznej przez obniżenie kosztów utrzymania i eksploatacji taboru kolejowego.

Wspólna polityka transportowa Unii Europejskiej wynika z potrzeby integracji rynków transportowych i usuwania barier funkcjonujących w krajowych systemach transportowych państw członkowskich. Już Traktat Rzymski z 1957 r. przewidywał zharmonizowane działania w zakresie transportu lądowego, a kolejne inicjatywy integrowały rynek transportowy z koncepcją jednolitego rynku europejskiego, opartego na zasadach swobody przepływu towarów, usług, kapitału oraz osób [20, 21].

Początek konkretnych ram ustawodawczych dla sektora kolejowego przypada na lata 90. XX wieku wraz z Dyrektywą 91/440/EEC, która zapoczątkowała proces reorganizacji sektora i liberalizacji rynku kolejowego w UE [22]. Proces ten kontynuowany był poprzez kolejne pakiety legislacyjne, aż do zakończenia procesu otwierania rynku przewozów pasażerskich i towarowych w czwartej generacji przepisów – tzw. Czwarty Pakiet Kolejowy [23]. Głównym elementem polityki kolejowej UE jest dążenie do utworzenia Jednolitego Europejskiego Obszaru Kolejowego (*Single European Railway Area*) – systemu

interoperacyjnego, konkurencyjnego i w pełni zintegrowanego funkcjonalnie ponad granicami państw. Proces ten obejmuje:

- liberalizację rynku przewozów kolejowych, w tym dostęp dla przewoźników do infrastruktury i możliwość prowadzenia działalności bez ograniczeń narodowych,
- ustanowienie wspólnych zasad technicznych i operacyjnych (interoperacyjność),
- wzmocnienie niezależności zarządców infrastruktury kolejowej.

Celem tych działań jest zwiększenie efektywności kolei, a także poprawa konkurencyjności w odniesieniu do transportu drogowego i lotniczego [24]. Białe Księgi Komisji Europejskiej z 2001 r. i 2011 r. określiły strategiczne cele polityki transportowej UE. W szczególności Biała Księga z 2011 r. przyjęła ambitne cele w perspektywie 2030–2050 [25]:

- przesunięcie co najmniej 30% transportu drogowego towarów na dystansie ponad 300 km na inne sektory (kolej i transport wodny) do 2030 r. oraz ponad 50% do 2050 r.,
- większość średniodystansowego przewozu pasażerskiego ma być realizowana koleją do 2050 r.,
- potrojenie długości sieci kolei dużych prędkości do 2030 r. (w stosunku do 2010 r.).

Ponadto przywołany dokument wpisuje politykę transportową w szerszy kontekst działań na rzecz konkurencyjnego i oszczędnego energetycznie systemu transportowego, co ma istotny wpływ na decyzje inwestycyjne i priorytety finansowe w kolejnych perspektywach budżetowych UE. Strategiczne cele UE mają również wymiar środowiskowy i klimatyczny, wpisując się w Europejski Zielony Ład [26]. Polityka ta zakłada redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz promowanie zrównoważonych form transportu, takich jak kolej, która w wielu krajach osiąga znacznie mniejszą emisję zanieczyszczeń na pasażerokilometr lub tonokilometr niż transport drogowy [27]. W kontekście kolei, środowiskowe cele UE stanowią kluczowy argument przemawiający za wsparciem dla innowacyjnych źródeł zasilania pojazdów szynowych [28, 29].

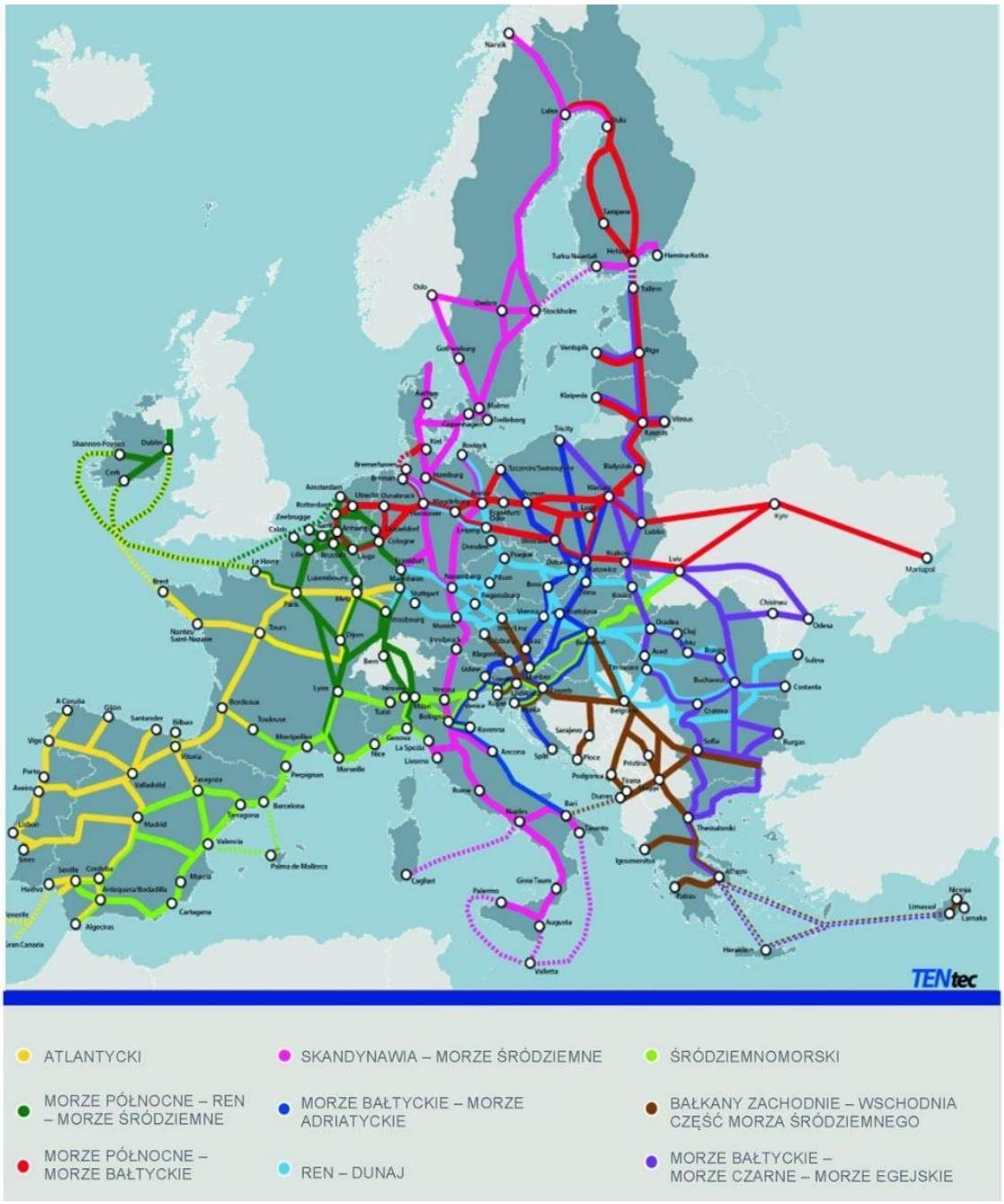
Proces liberalizacji i regulacji sektora kolejowego opisuje się zwykle przez cztery pakiety kolejowe UE [22, 23]:

- Pierwszy Pakiet – rozpoczął proces otwierania rynku przewozów towarowych,
- Drugi i Trzeci Pakiet – kontynuowały otwieranie rynku przewozów pasażerskich i wzmacniały ramy prawne interoperacyjności,
- Czwarty Pakiet – zakończył proces pełnej liberalizacji rynku przewozów w UE i wprowadził nowe zasady niezależności zarządów infrastruktury oraz bezpieczeństwa oraz interoperacyjności.

Czwarty Pakiet Kolejowy stanowi kamień milowy w polityce kolejowej UE – ustanawia zbiór aktów prawnych ukierunkowanych na zwiększenie konkurencyjności sektora, poprawę efektywności i usunięcie barier wejścia dla nowych podmiotów na rynku kolejowym. Bezpieczeństwo i interoperacyjność są kluczowymi filarami polityki UE w sektorze kolejowym. Interoperacyjność – rozumiana jako zdolność systemu kolejowego do działania bez barier technicznych i proceduralnych pomiędzy różnymi krajami członkowskimi – jest realizowana m.in. przez wspólne normy techniczne, certyfikację taboru i systemów sterowania ruchem. Regulacje te są częścią ram prawnych pakietów kolejowych i stanowią

podstawę działań Europejskiej Agencji Kolejowej (ERA – *European Union Agency for Railways*), która nadzoruje wdrażanie zasad bezpieczeństwa i interoperacyjności [30].

Jednym z najważniejszych instrumentów polityki transportowej jest Trans-European Transport Network (TEN-T) – sieć transportowa mająca na celu połączenie wszystkich regionów UE z wykorzystaniem standardów i skoordynowanych priorytetów inwestycyjnych [31, 32]. TEN-T obejmuje zarówno tradycyjne linie kolejowe, jak i korytarze przewidziane do przewozów dużych prędkości (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Schemat korytarzy transportowych TEN-T [32]

Poprzez TEN-T realizowane są inwestycje w rozbudowę infrastruktury, eliminację „wąskich gardeł” oraz integrację systemów zarządzania ruchem. Duża w tym rola organizacji wspierających politykę kolejową UE:

- *European Union Agency for Railways* (ERA) – agencja UE odpowiedzialna za rozwój i wdrażanie standardów interoperacyjności, certyfikację taboru i nadzór nad systemami bezpieczeństwa w całej UE [30],
- *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC) – międzynarodowa organizacja zrzeszająca narodowe koleje i przemysł kolejowy, publikująca statystyki, standardy i raporty (np. na temat transportu intermodalnego) [33],
- *Union des Industries Ferroviaires Européennes* (UNIFE) – stowarzyszenie reprezentujące europejski przemysł kolejowy, aktywnie uczestniczy w dialogu politycznym UE, szczególnie w kontekście inwestycji, innowacji i standaryzacji [34].

Mimo licznych regulacji i ambitnych celów, wdrażanie europejskiej polityki transportowej napotyka szereg wyzwań:

- różnorodność systemów prawnych i infrastrukturalnych w różnych krajach członkowskich,
- bariery proceduralne w uznawaniu homologacji taboru pomiędzy państwami członkowskimi,
- nierównomierne tempo liberalizacji rynku i różnice w poziomie konkurencji w poszczególnych krajach.

Problemy te nadal wymagają dalszego dopracowania ram regulacyjnych oraz narzędzi wspierających koordynację transgraniczną tym bardziej, że zainteresowanie pasażerskim transportem kolejowym w UE systematycznie wzrasta. Należy podkreślić, że polityka transportowa UE stanowi ważne odniesienie dla krajów członkowskich, w tym Polski. Polska, będąca członkiem UE od 2004 r., stopniowo adaptuje swoje regulacje i strategie transportowe do unijnych standardów – zarówno w kontekście liberalizacji rynku, interoperacyjności, jak i uczestnictwa w sieci TEN-T.

W odpowiedzi na dynamicznie wzrastające oczekiwania rynku oraz w celu ograniczenia kosztów ponoszonych przez producentów taboru kolejowego, w związku z koniecznością indywidualnego audytowania dostawców, w 1991 r. powołano organizację branżową UNIFE. Jej nadrzędnym celem było inicjowanie i koordynowanie działań mających na celu promocję sektora kolejowego w Europie. W strukturze UNIFE utworzono specjalistyczną grupę roboczą, której zadaniem było opracowanie norm technicznych odzwierciedlających specyfikę i potrzeby przemysłu kolejowego. Potrzeba ta wynikała z ograniczonej użyteczności ogólnych wytycznych normy ISO 9001 w kontekście wymagań sektora kolejowego. Wzorując się na podejściu zastosowanym wcześniej w innych branżach – takich jak sektor spożywczy (ISO 22001), lotniczy (AS 9001) oraz motoryzacyjny (IATF 16949) – w marcu 2006 r. UNIFE opublikowało pierwszą wersję normy IRIS (*International Railway Industry Standard*, rewizja 00). Dokument ten adresowano do podmiotów zaangażowanych w projektowanie, produkcję oraz utrzymanie pojazdów szynowych i infrastruktury kolejowej. Od momentu wprowadzenia standard IRIS był sukcesywnie rozwijany, poprzez systematyczne podnoszenie wymagań jakościowych wobec certyfikowanych organizacji [35]. Kulminacją tego procesu było zatwierdzenie w 2014 r. przez kierownictwo UNIFE decyzji o przekształceniu IRIS w normę międzynarodową ISO/TS 22163, która została oficjalnie opublikowana w maju 2017 r., zyskując status uznawanego standardu branżowego [36]. Obecnie certyfikat IRIS posiada ponad 2400 organizacji z 50 krajów, z czego ponad 60%

stanowią producenci i integratorzy taboru szynowego w Europie. Zgodnie z wymogami normy ISO/TS 22163, fundamentem skutecznego zarządzania jakością w przedsiębiorstwie kolejowym jest podejście procesowe [37]. Oznacza ono systematyczną identyfikację i zarządzanie wzajemnie powiązanymi procesami, których łączny wynik decyduje o skuteczności i efektywności organizacji. Główne cele normy:

- zharmonizowanie i zwiększenie jakości w całym łańcuchu dostaw przemysłu kolejowego,
- ułatwienie globalnej współpracy między producentami, dostawcami i operatorami kolejowymi,
- redukcja liczby audytów przez wdrożenie jednego standardu uznawanego międzynarodowo.

Zgodnie z przyjętą przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną strukturą, norma ISO/TS 22163 złożona jest z 10 rozdziałów [38]. W całości oparta została na wymaganiach normy ISO 9001:2015 z rozszerzeniem o specyficzne wymagania dedykowane dla branży kolejowej. Kluczowym filarem normy ISO/TS 22163 jest podejście procesowe, rozumiane jako zintegrowane i systematyczne zarządzanie wszystkimi procesami organizacji z uwzględnieniem ich wzajemnych powiązań, efektywności oraz wpływu na jakość produktów i usług [39]. Dzięki temu uzyskuje się zwiększenie przejrzystości organizacyjnej, odpowiedzialności za wyniki procesów, identyfikowalności działań oraz skuteczniejsze zarządzanie jakością, bezpieczeństwem i niezawodnością produktów kolejowych.

Mapowanie zrealizowane na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej pozwoliło określić mapę procesów. Obejmuje ona – zgodnie z wymaganiami normy ISO/TS 22163 – trzy kluczowe kategorie: procesy zarządzania, główne oraz wsparcia. Wskazują one, że procesy powinny być kategoryzowane w sposób umożliwiający ich efektywne zarządzanie, przy czym model trójpoziomowy (tzn. podział na procesy zarządzania, procesy główne i procesy wsparcia) jest modelem zalecanym i powszechnie stosowanym.

2.2. Rynek krajowy

Działalność przewozowa i infrastrukturalna w Polsce podlega kompleksowej regulacji prawnej, której centralnym aktem jest Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym [40]. Dokument ten określa zasady: zarządzania infrastrukturą kolejową, wykonywania przewozów, bezpieczeństwa ruchu, interoperacyjności oraz prawa i obowiązki uczestników rynku kolejowego (PKP PLK, przewoźników, organizatorów usług). Akt ten wdraża również do krajowego porządku prawnego szereg dyrektyw unijnych, m.in. dotyczących bezpieczeństwa kolejowego oraz zasad korzystania z infrastruktury kolejowej. Ustawa reguluje także zasady udostępniania infrastruktury kolejowej, niezależność i bezstronność zarządcy infrastruktury, warunki świadczenia usług transportu kolejowego, elementy interoperacyjności i techniczne warunki eksploatacji pojazdów kolejowych, prawa pasażerów oraz standardy bezpieczeństwa ruchu [41].

W Polsce funkcjonuje również szereg innych aktów prawnych wpływających na sektor kolejowy, takich jak: Ustawa o Funduszu Kolejowym – określająca zasady gromadzenia i wydatkowania środków publicznych na inwestycje/modernizację infrastruktury kolejowej

oraz taboru, a także przepisy odnoszące się do zamówień publicznych, ochrony konkurencji, transportu zbiorowego i przedsięwzięć inwestycyjnych [42]. Ramy te wynikają z konieczności dostosowania polskiego systemu prawnego do standardów wspólnotowych, w szczególności dyrektyw kolejowych UE dotyczących liberalizacji rynku, interoperacyjności i bezpieczeństwa [43].

Ważnym organem regulacyjnym w polskim systemie kolejowym jest UTK, który odpowiada za: nadawanie uprawnień przewoźnikom kolejowym, nadzór nad bezpieczeństwem i przestrzeganiem przepisów kolejnictwa, kontrolę rynku w aspekcie konkurencji i dostępu do infrastruktury, prowadzenie Zintegrowanego Systemu Gromadzenia i Analizy Danych, reprezentowanie Polski w europejskich instytucjach regulacyjnych [44]. Funkcjonowanie UTK przyczynia się do zapewnienia równych szans dla operatorów kolejowych oraz przestrzegania zasad konkurencyjności i bezpieczeństwa na rynku [45].

Od przystąpienia Polski do UE w 2004 r., sektor kolejowy przeszedł znaczące przemiany. Integracja z unijnym rynkiem transportowym oznaczała: wdrożenie jednolitych zasad statystyki kolejowej i raportowania, co umożliwia porównywalność danych na poziomie UE, dostęp do środków unijnych na modernizację infrastruktury oraz zakup taboru, liberalizację rynku przewozów towarowych oraz stopniową liberalizację przewozów pasażerskich, zwiększenie konkurencji i nowe modele biznesowe (np. leasing taboru). Na przestrzeni ostatnich dwóch dekad sieć kolejowa w Polsce została poddana intensywnym programom modernizacyjnym. W 2024 r. polskie koleje przewiozły ponad 407 mln pasażerów, co stanowi wzrost rzędu ok. 8,8% rok do roku oraz obsłużyły ponad 223,5 mln ton ładunków, co podkreśla znaczenie kolei w logistyce krajowej i międzynarodowej [5].

Polska polityka transportowa odwołuje się do strategicznych dokumentów unijnych i krajowych, które wskazują kierunki rozwoju sektora kolejowego w kontekście zrównoważonego transportu (wymienione wcześniej):

- Biała Księga UE – dokument wyznaczający cele unijnej polityki transportowej, w tym zwiększenie udziału kolei w przewozach pasażerskich i towarowych, redukcję emisji oraz rozwój interoperacyjności,
- Europejski Zielony Ład – definiujący ambitne cele neutralności klimatycznej do 2050 r. oraz transformacji transportu w kierunku nisko- i zeroemisyjnego.

W tych ramach kolej traktowana jest jako kluczowy element strategii redukcji negatywnego wpływu na środowisko sektorów transportu oraz wspierania efektywnej i ekologicznej mobilności. Jednym z najważniejszych projektów infrastrukturalnych w Polsce jest Centralny Port Komunikacyjny (CPK) – obecnie funkcjonujący w ramach przedsięwzięcia Port Polska [46]. Projekt zakłada budowę dużego węzła transportowego, integrującego międzynarodowe lotnictwo z krajową i międzynarodową siecią kolejową oraz Kolej Dużych Prędkości (KDP). Planowana KDP ma umożliwić osiąganie prędkości operacyjnych 300 – 320 km/h na głównych korytarzach, skracając czas podróży między największymi ośrodkami kraju (np. Warszawa – Poznań do ok. 100 min) [47, 48]. Całość inwestycji CPK i KDP szacowana jest na ponad 130 mld złotych (ok. 31 mld EUR) do 2032 r. Program przewiduje również zakup nowoczesnego taboru – ponad 100 pojazdów elektrycznych, które mają być eksploatowane w systemie leasingu i udostępniane różnym przewoźnikom [49].

Dla wszelkich inwestycji kolejowych, takich jak modernizacja torów, zakup nowego taboru czy rozwój infrastruktury pasażerskiej i towarowej, istotne i niezbędne jest zapewnienie stabilnego wsparcia finansowego z funduszy publicznych i unijnych. Dlatego też kluczowe znaczenie ma Centrum Unijnych Projektów Transportowych (CUPT), które jako centralna instytucja w Polsce koordynuje pozyskiwanie i rozliczanie środków z programów takich jak Fundusze Europejskie na Infrastrukturę, Transport i Rozwój Gospodarczy czy Krajowy Program Kolejowy [2]. CUPT nie tylko wspiera beneficjentów w przygotowaniu wniosków i realizacji projektów, ale także monitoruje ich zgodność z wymogami UE, co minimalizuje ryzyko opóźnień i zwrotów dotacji. W efekcie, dzięki tej roli, Polska może efektywnie modernizować sieć kolejową, poprawiając konkurencyjność transportu szynowego oraz przyczyniając się do celów klimatycznych Unii Europejskiej. CUPT działa od 2007 r. i wspiera realizację przedsięwzięć w ramach projektów takich jak [50]:

- FEnIKS (Fundusze Europejskie na Infrastruktura, Klimat i Środowisko) – finansowanie modernizacji infrastruktury i zakupu taboru,
- FEPW (Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej) – projekty rozwojowe i regionalne,
- CEF2 (*Connecting Europe Facility 2*) – instrument UE wspierający kluczowe projekty transportowe i transeuropejskie,
- KPO (Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności) – komponenty infrastrukturalne i innowacyjne.

W 2025 r. CUPT ogłosił nabór wniosków na dofinansowanie zakupu nowoczesnego taboru kolejowego o wartości 1,5 mld PLN, co stanowi przykład intensywnego wsparcia inwestycyjnego dla przewoźników i organizatorów transportu kolejowego [51]. Kolejnym narzędziem wspierającym finansowanie jest Fundusz Kolejowy, który jest instrumentem krajowym, gromadzącym środki na inwestycje strategiczne dla kolei (modernizacja linii, budowa, utrzymanie i zakup taboru). Fundusz finansuje również zadania wykonywane przez PKP PLK oraz projekty modernizacyjne. Finansowanie działalności Funduszu zależy jednak od środków krajowych i unijnych, co powoduje cykliczną niestabilność – dlatego planuje się jego reformę, by uczynić go bardziej elastycznym narzędziem finansowania.

W oparciu o zasady UE, Polska stopniowo liberalizuje rynek kolejowy. Obecnie sektor przewozów towarowych jest w pełni otwarty, co oznacza, że przewoźnicy niezależni mogą konkurować na warunkach rynkowych. Liberalizacja przewozów pasażerskich ma na celu otwarcie rynku dla operatorów prywatnych i regionalnych, co z kolei prowadzi do wzrostu konkurencji, poprawy jakości usług i obniżenia kosztów dla użytkowników. Mechanizmy takie są zgodne ze strategią UE dotyczącą konkurencyjności i efektywnej alokacji zasobów rynkowych. Polska kolej stale się rozwija, a polityka infrastrukturalna zakłada:

- modernizację głównych linii kolejowych i skrócenie czasu przejazdu,
- wdrożenie systemów zarządzania ruchem i interoperacyjnych rozwiązań technologicznych (np. ETCS),
- rozbudowę sieci KDP i integrację z CPK,
- rozwój infrastruktury regionalnej i lokalnej,
- zwiększenie udziału transportu kolejowego w ogólnym rynku przewozów pasażerskich i towarowych.

Szacuje się, że w perspektywie do 2030 r. krajowy rynek taboru szynowego wzrośnie o ponad 25%, przy czym większość zamówień będzie obejmować jednostki elektryczne i niskoemisyjne [52, 53]. Takie tendencje rynkowe dowodzą, że dalsza modernizacja kolei wymaga nie tylko inwestycji kapitałowych, lecz także nowych narzędzi wspierających proces racjonalnego doboru parametrów technicznych pojazdów szynowych. W tym kontekście podejmowana w pracy doktorskiej tematyka opracowania i wdrożenia narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego – ze szczególnym uwzględnieniem innowacyjnych źródeł zasilania – jest w pełni adekwatna do aktualnych potrzeb rynku. Wpisuje się ona zarówno w krajowe, jak i unijne kierunki transformacji transportu kolejowego, sprzyjając integracji wymogów technicznych, ekonomicznych oraz środowiskowych w procesie projektowania i zamówień taborowych. Opracowanie takiego narzędzia może stanowić istotne wsparcie decyzyjne dla jednostek zakupowych, producentów i organizatorów transportu publicznego, przyczyniając się do podniesienia efektywności inwestycji taborowych, ograniczenia kosztów cyklu życia oraz realizacji celów neutralności klimatycznej transportu do 2050 r.

3. Aktualny stan postępowań przetargowych dotyczących taboru szynowego

3.1. Kontekst prawny

Postępowania przetargowe stanowią sformalizowane procedury administracyjno-gospodarcze, których zasadniczym celem jest wyłonienie wykonawcy dostawy, usługi lub robót budowlanych w sposób gwarantujący przejrzystość, brak dyskryminacji oraz efektywne gospodarowanie środkami publicznymi. System zamówień publicznych w Polsce funkcjonuje w oparciu o ustawę z dnia 11 września 2019 r. – Prawo Zamówień Publicznych (Dz.U. 2019 poz. 2019 z późn. zm.), dalej określaną jako „PZP" [54]. Zgodnie z art. 2 PZP, przepisy ustawy stosuje się do zamówień udzielanych przez jednostki sektora finansów publicznych, jak również inne podmioty, które wykorzystują środki publiczne lub są zobowiązane do stosowania procedur przetargowych z tytułu odrębnych regulacji (np. instytucje użyteczności publicznej). Reżim PZP obejmuje zatem szeroki zakres działań inwestycyjnych o znaczeniu społecznym i gospodarczym, w tym zamówienia dotyczące infrastruktury transportowej oraz taboru szynowego [55].

Integralnym elementem każdego postępowania przetargowego jest określenie kryteriów oceny ofert, stanowiących podstawę wyboru oferty najkorzystniejszej ekonomicznie [56, 57]. Kryteria te, zgodnie z art. 239–243 PZP, muszą być:

- jednoznaczne, mierzalne oraz obiektywnie weryfikowalne (np. cena, okres gwarancji, zużycie energii, czas dostawy),
- zgodne z zasadami uczciwej konkurencji i proporcjonalności,
- podane do publicznej wiadomości przed upływem terminu składania ofert i niepodlegające zmianie w toku postępowania.

W przetargach dotyczących dostaw taboru kolejowego lub pojazdów szynowych kryteria te mają zazwyczaj charakter techniczno-eksploatacyjny i obejmują m.in.:

- zużycie energii trakcyjnej (weryfikowane zgodnie z normą EN 50591:2019),
- pojemność pasażerską,
- poziom emisji hałasu,
- niezawodność i dostępność operacyjną,
- okresy gwarancyjne.

Kryteria oceny ofert pełnią funkcję parametrycznego narzędzia porównawczego, umożliwiającego zrównoważenie aspektów kosztowych i jakościowych oferty [58]. W kontekście projektowania konfiguracji pojazdu, ich uwzględnienie stanowi element procesu jakościowego, w którym dąży się do maksymalizacji liczby uzyskanych punktów przy zachowaniu racjonalności ekonomicznej przedsięwzięcia – np. przez dobór bardziej efektywnego napędu w celu zwiększenia oceny w zakresie efektywności energetycznej [59]. Nieuwzględnienie kryteriów oceny określonych w Specyfikacji Warunków Zamówienia może skutkować: utratą punktów w ocenie oferty, odrzuceniem oferty jako niezgodnej z wymaganiami formalnymi lub ryzykiem konsekwencji prawnych związanych z naruszeniem procedur przetargowych.

Zgodnie z art. 16 PZP, postępowanie o udzielenie zamówienia publicznego prowadzone jest w oparciu o zasady: uczciwej konkurencji, równego traktowania wykonawców,

przejrzystości oraz efektywności wydatkowania środków publicznych. Uwzględnienie kryteriów oceny w systemach wspomagania decyzji, takich jak konfiguratory taboru szynowego, stanowi przejaw implementacji zasady efektywności i transparentności. Narzędzia te umożliwiają:

- obiektywną weryfikację parametrów technicznych przez zamawiającego,
- pełną możliwość prowadzenia audytu procesu ofertowego,
- ograniczenie subiektywności interpretacyjnej po stronie wykonawcy,
- redukcję ryzyka sporów i odwołań przetargowych.

Z perspektywy strategii przetargowej, integracja konfiguratora pojazdu z kryteriami oceny SWZ (Specyfikacja Warunków Zamówienia) nie ma charakteru wyłącznie technicznego. Stanowi ona element systemowego zarządzania zgodnością, umożliwiającego:

- zapewnienie spójności formalnoprawnej oferty z wymaganiami zamawiającego,
- racjonalne dopasowanie parametrów technicznych do oczekiwanych efektów eksploatacyjnych,
- zwiększenie konkurencyjności oferty,
- wzmocnienie wiarygodności wykonawcy na rynku zamówień publicznych.

Tym samym, integracja modułów konfiguracyjnych z mechanizmami oceny ofert określonymi w dokumentacji przetargowej stanowi jeden z kluczowych elementów profesjonalnego uczestnictwa w systemie zamówień publicznych oraz fundament metodologiczny badań rozpoznawczych niniejszej rozprawy.

3.2. Analiza postępowań przetargowych dla wybranych kategorii taboru

Specyfika postępowań przetargowych dotyczących taboru szynowego wynika z dużego stopnia złożoności technicznej zamawianych pojazdów, ich długiego okresu eksploatacji oraz istotnego wpływu parametrów technicznych na koszty utrzymania, niezawodność i oddziaływanie środowiskowe [60]. W konsekwencji, w postępowaniach tych coraz częściej odchodzi się od dominującej roli ceny jako jedynego kryterium wyboru oferty na rzecz wielokryterialnej oceny ofert, obejmującej aspekty techniczne, eksploatacyjne i środowiskowe [61]. Szczególne znaczenie w tym kontekście zyskują kryteria związane z układem napędowym pojazdu szynowego, takie jak: zużycie energii, możliwość eksploatacji w trybie bezsieciowym, poziom emisji zanieczyszczeń, hałas, elastyczność zastosowania różnych źródeł zasilania czy koszty cyklu życia napędu. Należy jednak zaznaczyć, że rola tych kryteriów w dalszym ciągu odgrywa bardzo małe znaczenie. Analiza kryteriów oceny ofert pozwala zatem na identyfikację rzeczywistych oczekiwań zamawiających wobec parametrów pojazdów szynowych, a także na określenie, w jakim stopniu aspekty związane z układem napędowym wpływają na wynik postępowań przetargowych [62]. W aspekcie niniejszej rozprawy stanowi to kluczowe uzasadnienie dla prowadzenia badań rozpoznawczych opartych na analizie dokumentacji przetargowej.

W ramach badań rozpoznawczych przyjęto założenie, że analiza postępowań przetargowych powinna obejmować reprezentatywne kategorie pojazdów szynowych, różniące się zarówno funkcją eksploatacyjną, jak i zakresem stosowanych rozwiązań napędowych. Z tego względu do badań wybrano trzy podstawowe grupy taboru:

- wagony pasażerskie,
- lokomotywy,
- elektryczne zespoły trakcyjne.

Wagony pasażerskie, mimo że nie są wyposażone w autonomiczny układ napędowy, pozostają istotnym elementem systemu transportowego, a ich wymagania techniczne i eksploatacyjne pośrednio determinują parametry lokomotyw, w szczególności w zakresie mocy, efektywności energetycznej oraz kompatybilności systemowej. Analiza postępowań dotyczących tej kategorii pozwala na identyfikację oczekiwań zamawiających w zakresie komfortu, masy pojazdu, energochłonności całego składu oraz kosztów eksploatacji.

Lokomotywy stanowią natomiast kategorię pojazdów, w której układ napędowy pełni rolę dominującą i bezpośrednio wpływa na parametry użytkowe oraz środowiskowe. W ostatnich latach obserwuje się wyraźne zwiększenie zainteresowania lokomotywami wielosystemowymi, hybrydowymi oraz wyposażonymi w dodatkowe źródła energii, co znajduje odzwierciedlenie w kryteriach oceny ofert stosowanych przez zamawiających.

Elektryczne zespoły trakcyjne stanowią najbardziej złożoną kategorię taboru z punktu widzenia konfiguracji pojazdu, integrując w jednym rozwiązaniu układ napędowy, systemy zasilania, magazynowania energii oraz układy sterowania. W tej grupie szczególnie widoczne jest rosnące znaczenie innowacyjnych układów napędowych, takich jak napędy z akumulatorami czy rozwiązania hybrydowe, umożliwiające eksploatację pojazdów na liniach niezelektryfikowanych. Z tego względu analiza postępowań przetargowych dotyczących elektrycznych zespołów trakcyjnych ma kluczowe znaczenie dla identyfikacji trendów rynkowych oraz preferencji zamawiających.

Przyjęcie trzech wskazanych kategorii pojazdów umożliwia kompleksową analizę wymagań rynku zamówień publicznych oraz stanowi solidną podstawę do dalszych rozważań, których wyniki zostaną przedstawione w kolejnych częściach rozprawy.

Wagony pasażerskie

Dla wagonów pasażerskich przeprowadzono analizę kryteriów wyboru ofert i ich wag z wykorzystaniem trzech postępowań na zakup nowych wagonów osobowych. Pierwsze z nich to postępowanie (nr 22/01/TUT/2017) o udzielenie zamówienia na dostawę 55 wagonów osobowych wraz z wykonaniem przeglądu na 3. poziomie utrzymania [63]. Kolejnym było postępowanie (nr 15/10/TUT/2017) o udzielenie zamówienia na dostawę 8 specjalnych wagonów osobowych do przewozu osób na potrzeby Sił Zbrojnych RP [64]. Trzecim z analizowanych przetargów było postępowanie (nr 21/WNP-010356/TUT) o udzielenie zamówienia na dostawę 300 wagonów osobowych wraz z wykonaniem przeglądu na 3. poziomie utrzymania [65]. Szczegółowe dane dotyczące kryteriów ofert zestawiono w tab. 3.1.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że we wszystkich postępowaniach cena stanowiła najistotniejsze kryterium oceny ofert i charakteryzowała się wagą co najmniej 70%. Oprócz ceny w każdym z analizowanych postępowań pojawiło się kryterium oferowanej długości gwarancji na zamawiane wagony. We wszystkich przypadkach kryterium to miało wagę 10%. W jednym z przetargów pojawiło się również kryterium maksymalnej masy wagonów i charakteryzowało się ono wagą 2%.

Tabela 3.1. Kryteria oceny i ich wagi w przetargach na wagony pasażerskie [63–65]

Kryterium	Wagony pasażerskie – udział kryterium [%]		
	Postępowanie 22/01/TUT/2017	**Postępowanie 15/10/TUT/2017**	**Postępowanie 21/WNP-010356/TUT**
Cena jednostkowa dostawy wagonu osobowego	70	90	80
Cena jednostkowa wykonania przeglądu na 3-cim poziomie utrzymania	10	–	10
Gwarancja	10	10	10
Całkowita masa wagonu osobowego 1 klasy przedziałowego	2	–	–
Całkowita masa wagonu osobowego 2 klasy bezprzedziałowego	2	–	–
Całkowita masa wagonu osobowego 2 klasy przedziałowego	2	–	–
Całkowita masa wagonu osobowego 2 klasy bezprzedziałowego wyposażonego w osiem wieszaków na rowery	2	–	–
Całkowita masa wagonu osobowego 2 klasy przedziałowego przystosowanego do przewozu osób niepełnosprawnych	2	–	–

Lokomotywy

Analizie poddano również trzy postępowania o udzielenie zamówienia na zakup lokomotyw. Pierwsze z nich dotyczyło udzielenia zamówienia na dostawę 18 lekkich manewrowych lokomotyw spalinowych (nr postępowania 23/WNP-018177/TUT) [66]. Drugim było postępowanie o udzielenie zamówienia pod nazwą „Dostawa 63 lokomotyw elektrycznych wielosystemowych o prędkości nie mniejszej niż 200 km/h wraz ze świadczeniem usług utrzymania" (nr postępowania 20/WNP-006234/TUT) [67]. Trzecie z analizowanych postępowań dotyczyło udzielenia zamówienia pod nazwą „Dostawa 38 siedmiowagonowych składów piętrowych typu *push-pull* wraz z 45 lokomotywami wielosystemowymi oraz świadczeniem usług utrzymania lokomotyw wielosystemowych" (nr postępowania 23/WNP-018007/TUT) [68]. Kryteria oceny i ich wagi w przetargach na lokomotywy podsumowano w tab. 3.2.

Z przeprowadzonej analizy kryteriów wyboru ofert w postępowaniach na zakup lokomotyw wynika, że zamawiający skupiają się głównie na cenie pojazdu, która charakteryzuje się wagą min. 45%. W przypadku lokomotyw zamawiający zwracają również

uwagę na kwestię zaoferowanego okresu gwarancji oraz utrzymania taboru. W analizowanych postępowaniach pojawiło się również kryterium zapewnienia wymaganego współczynnika dostępności lokomotyw.

Tabela 3.2. Kryteria oceny i ich wagi w przetargach na lokomotywy [66–68]

Kryterium	**Lokomotywy – udział kryterium [%]**		
	Postępowanie 23/WNP-018177/TUT	**Postępowanie 20/WNP-006234/TUT**	**Postępowanie 23/WNP-018007/TUT**
Cena jednostkowa	80	45	60
Gwarancja i rękojmia	15	7	5
Współczynnik dostępności pojazdów	5	–	–
Stawka za świadczenie usług utrzymania	–	35	13
Maksymalna liczba zdarzeń powodujących utratę zasadniczych cech eksploatacyjnych	–	6	5
Współczynnik gotowości technicznej	–	4	5
Współczynnik niezawodności technicznej taboru	–	3	5
Wskaźnik liczby stałych miejsc siedzących na metr bieżący całkowitej długości składu siedmiowagonowego	–	–	5
Prędkość maksymalna pojazdu	–	–	2

Elektryczne zespoły trakcyjne

W badaniach wstępnych wykonano również analizę kryteriów wyboru ofert w trzech postępowaniach o udzielenie zamówienia na zakup zespołów trakcyjnych. Pierwsze z nich to postępowanie o udzielenie zamówienia pod nazwą „Zawarcie umowy ramowej na dostawę fabrycznie nowych elektrycznych zespołów trakcyjnych do obsługi kolejowych przewozów pasażerskich” (nr postępowania PZP1.240.51.2022) [69]. Drugim z analizowanych postępowań było zamówienie pod nazwą „Poprawa mobilności przestrzennej mieszkańców Wielkopolski w publicznym transporcie zbiorowym poprzez zakup nowego taboru kolejowego”. Przedmiotem zamówienia jest dostawa 8 nowych, elektrycznych zespołów trakcyjnych do obsługi tras zelektryfikowanych w ramach wojewódzkich kolejowych przewozów regionalnych (wraz z udzieleniem instruktaży technicznych w zakresie obsługi i utrzymania pojazdów osobom wskazanym przez Zamawiającego; udzieleniem gwarancji i

rozszerzonej rękojmi na dostarczone pojazdy; opracowaniem i przekazaniem dokumentacji technicznej; udzieleniem licencji na dokumentację techniczną i oprogramowanie (nr postępowania DT II.272.2.2023)) [70]. Trzecim było postępowanie o udzielenie zamówienia na dostawę 10 czteroczłonowych nowych elektrycznych zespołów trakcyjnych wraz z dostawą sprzętu przeznaczonego do unowocześnienia zaplecza utrzymania taboru (nr postępowania SKMMU.086.26.22) [71]. Kryteria oceny i ich wagi w przetargach na Elektryczne Zespoły Trakcyjne podsumowano w tab. 3.3.

Tabela 3.3. Kryteria oceny i ich wagi w przetargach na Elektryczne Zespoły Trakcyjne [69–71]

Kryterium	**Elektryczne zespoły trakcyjne – udział kryterium [%]**		
	Postępowanie PZP1.240.51.2022	**Postępowanie DT II.272.2.2023**	**Postępowanie SKMMU.086.26.22**
Cena jednostkowa	90	60	95
Konstrukcja wózków	5	–	–
Materiał na konstrukcję nośną	5	–	–
Gwarancja i rękojmia	–	30	–
Masa eksploatacyjna	–	10	–
Współczynnik liczby osi napędnych do liczby wszystkich osi w pojeździe	–	–	2,5
Suma prześwitu pasażerskich drzwi zewnętrznych w pojeździe	–	–	2,5

Z przeprowadzonej analizy postępowań o udzielenie zamówienia na zakup zespołów trakcyjnych wynika, że podobnie jak dla zamówień na wagony, decydującym kryterium wyboru ofert jest cena (waga co najmniej 60%). Pozostałe kryteria definiowane przez zamawiających dotyczą kwestii technicznych oraz konstrukcji pojazdu i wynikają z ich indywidualnych potrzeb.

Z przeprowadzonej analizy kryteriów wyboru ofert w postępowaniach na zakup taboru kolejowego wynika, że dla trzech podstawowych grup (wagony pasażerskie, lokomotywy, elektryczne zespoły trakcyjne) we wszystkich badanych postępowaniach przetargowych najwyższą wagę ma kryterium ceny (od 45% do 95%, średnio: 74%). Kryterium ceny jest najbardziej istotne niezależnie od rodzaju taboru będącego przedmiotem postępowania.

Należy zwrócić uwagę, że kryteria ofert w badanych postępowaniach są zgodne z wytycznymi Urzędu Zamówień Publicznych (UZP), orzecznictwem Krajowej Izby Odwoławczej (KIO) i wymaganiami Prawa Zamówień Publicznych (PZP). Zamawiający dokonują wyboru najkorzystniejszej oferty nie tylko w oparciu o kryterium kosztu zakupu. Inne kryteria pozacenowe, takie jak, jakość, efektywność czy dostępność są również szeroko stosowane. Co istotne często bierze się pod uwagę elementy kosztowe cyklu życia taboru, a nie jedynie jednostkowe koszty zakupu.

W ramach badań rozpoznawczych przeprowadzono analizę postępowań przetargowych dotyczących zakupu taboru szynowego w trzech podstawowych segmentach: wagonów pasażerskich, lokomotyw oraz elektrycznych zespołów trakcyjnych. Dobór tych kategorii miał na celu objęcie badań pojazdów o zróżnicowanej funkcji eksploatacyjnej, stopniu złożoności technicznej oraz roli układu napędowego w strukturze pojazdu. Analiza postępowań pozwoliła na identyfikację kryteriów pośrednio związanych z efektywnością energetyczną całego składu, takich jak masa pojazdu czy wymagania utrzymaniowe.

3.3. Obecne procedury przygotowania ofert przetargowych w przedsiębiorstwie

Standardowa konfiguracja i dobór parametrów pojazdu szynowego odbywa się w oparciu o wymagania Normy Zakładowej ZN-02 PKP-3500-15 „Tabor kolejowy. Dokumentacja techniczna. Numery grup konstrukcyjnych". Norma ta została opracowana w strukturach organizacyjnych dawnego przedsiębiorstwa państwowego Polskie Koleje Państwowe w celu ujednolicenia i standaryzacji zasad klasyfikacji konstrukcyjnej taboru kolejowego w Polsce. Geneza jej powstania wiąże się z potrzebą systemowego uporządkowania dokumentacji technicznej, w tym m.in. dokumentacji projektowej, eksploatacyjnej oraz remontowej. W czasach, gdy PKP funkcjonowały jako zintegrowany podmiot monopolistyczny, istniała konieczność wdrożenia jednolitych kryteriów identyfikacji podzespołów i zespołów konstrukcyjnych taboru kolejowego, co miało istotne znaczenie dla racjonalizacji procesów utrzymania, modernizacji i gospodarki częściami zamiennymi [72]. Norma ta wpisywała się w szeroki nurt normalizacji zakładowej, który w latach 70. i 80. XX wieku stanowił kluczowy element systemu zarządzania jakością i niezawodnością w sektorze transportu szynowego [73]. Zakres przedmiotowy i wymagania normy ZN-02 PKP-3500-15 obejmuje:

- zasady podziału taboru kolejowego na grupy konstrukcyjne i ich numeracji w oparciu o specyfikę funkcjonalną, konstrukcyjną i technologiczną poszczególnych zespołów,
- strukturę numeracji grup konstrukcyjnych, w tym schematy oznaczeń literowo-cyfrowych, mające na celu jednoznaczną identyfikację elementów konstrukcji w dokumentacji technicznej,
- wymogi dotyczące sporządzania i obiegu dokumentacji technicznej, w tym dokumentacji rysunkowej, specyfikacji materiałowych i zestawień części,
- zasady aktualizacji i archiwizacji dokumentacji technicznej w ramach zakładowego systemu normalizacji.

Norma nakładała obowiązek stosowania jednolitego systemu numeracji w całym cyklu życia pojazdu szynowego: od etapu projektowania, przez produkcję, po eksploatację i modernizację.

Dokument ma charakter normy zakładowej, co oznacza, że jej postanowienia były obligatoryjne w obrębie organizacji PKP oraz w jednostkach zależnych (np. zakładach naprawczych, biurach konstrukcyjnych i ośrodkach dokumentacji technicznej), które współuczestniczyły w procesach wytwarzania, modernizacji i utrzymania taboru. W praktyce zakres obowiązywania rozciągał się także na podmioty kooperujące z PKP w zakresie dostaw taboru, części zamiennych oraz usług serwisowych – o ile wymogi kontraktowe przewidywały zgodność z normami zakładowymi PKP. Chociaż współcześnie, w warunkach

liberalizacji rynku kolejowego i restrukturyzacji PKP, normy zakładowe stopniowo tracą na znaczeniu, to historycznie ZN-02 PKP-3500-15 odgrywała istotną rolę w budowie jednolitego systemu utrzymania taboru i standaryzacji wymagań dokumentacyjnych. W wielu przedsiębiorstwach kolejowych, które powstały w wyniku przekształceń organizacyjnych PKP, zasady numeracji grup konstrukcyjnych są nadal stosowane jako tzw. dobre praktyki lub stanowią punkt odniesienia przy opracowywaniu wewnętrznych procedur zarządzania dokumentacją techniczną.

Norma zakładowa ZN-02 PKP-3500-15 pełni funkcję fundamentalnego narzędzia organizacyjnego i metodologicznego w procesie projektowania i konfiguracji pojazdów szynowych, zapewniając spójność, jednoznaczność oraz powtarzalność w zakresie identyfikacji zespołów, podzespołów oraz elementów konstrukcyjnych. Zastosowanie jednolitego systemu numeracji grup konstrukcyjnych, zgodnie z normą, umożliwia hierarchiczne uporządkowanie struktury technicznej pojazdu. Każdy zespół czy podzespół posiada przypisany, jednoznaczny identyfikator, co pozwala minimalizować ryzyko pomyłek przy zestawianiu specyfikacji technicznej, tworzyć konfigurowalne modele produktowe oparte na znormalizowanych modułach oraz usprawniać procesy inżynierskie, takie jak wariantowanie rozwiązań konstrukcyjnych czy projektowanie platform produktowych.

Norma, porządkując grupy konstrukcyjne, stanowi punkt odniesienia dla doboru parametrów eksploatacyjnych i funkcjonalnych. Systemowy podział na grupy (np. układ biegowy, układ zasilania, układ hamulcowy) umożliwia:

- precyzyjne określenie wymagań dla poszczególnych obszarów funkcjonalnych pojazdu,
- porównanie rozwiązań alternatywnych w ramach tej samej grupy,
- zapewnienie kompatybilności między elementami wchodzącymi w skład tej samej konfiguracji technicznej.

Dla taboru kolejowego, który często występuje w licznych wariantach (np. różne układy napędu, kabiny sterownicze, systemy klimatyzacji), jednolity system klasyfikacji grup konstrukcyjnych pozwala na modularne podejście do projektowania i zestawiania konfiguracji, śledzenie zmian w dokumentacji technicznej i historii modyfikacji oraz łatwiejsze zarządzanie wymaganiami klienta i procedurami zamówień publicznych.

Z perspektywy współczesnych systemów wspomagania decyzji, takich jak narzędzia doboru parametrów, norma zakładowa ZN-02 PKP-3500-15 pełni rolę systemu referencyjnego, dzięki zapewnieniu logicznych i spójnych reguł powiązań między modułami. Umożliwia także definiowanie reguł dopuszczalnych kombinacji pod kątem kosztów, wymagań technicznych, norm interoperacyjności oraz specyfikacji przetargowych [74].

Norma ta, choć formalnie może być uznana za archiwalną w kontekście restrukturyzacji PKP, zachowuje walor dobrych praktyk inżynierskich w procesach projektowania, budowy i eksploatacji taboru kolejowego. Jej stosowanie sprzyja integralności danych technicznych, ogranicza ryzyko błędów w konfiguracji i przyczynia się do zwiększenia niezawodności i bezpieczeństwa systemu kolejowego.

Dynamiczne zmiany zachodzące w sektorze transportu kolejowego, w tym liberalizacja rynku przewozów, wzrost liczby niezależnych przewoźników i zróżnicowanie portfela zamawianego taboru, wymuszają potrzebę stosowania bardziej zaawansowanych narzędzi inżynierskich, i wspomagają procesy projektowania i konfigurowania pojazdów szynowych. Norma zakładowa ZN-02 PKP-3500-15 stanowiła istotny fundament porządkujący wiedzę

inżynierską o strukturze technicznej taboru. Jednakże jej statyczny charakter nie uwzględnia współczesnych zjawisk, takich jak:

- konieczność elastycznego wariantowania rozwiązań konstrukcyjnych w odpowiedzi na specyfikacje techniczne zamawiających,
- uwzględnienie wymagań środowiskowo-energetycznych,
- fundamentalną rolę zamówień publicznych, w których wymogi formalne (m.in. kryteria oceny ofert i zasady równego traktowania wykonawców) determinują sposób definiowania wymagań technicznych i kosztowych.

Zgodnie z obowiązującym Prawem zamówień publicznych, proces przygotowania i oceny ofert na dostawy taboru kolejowego wymaga:

- przejrzystego powiązania wymagań technicznych z kryteriami oceny ofert,
- wykazania zgodności z normami interoperacyjności i standardami technicznymi,
- zapewnienia porównywalności parametrów technicznych i eksploatacyjnych deklarowanych przez producentów.

Tradycyjny system klasyfikacji grup konstrukcyjnych, jakkolwiek uporządkowany, nie zapewnia wystarczającego wsparcia w obszarze analizy wielokryterialnej, nie uwzględnia bowiem aspektów kosztowych, ekologicznych i cyklu życia, które stanowią dziś kluczowe determinanty decyzji zakupowych [75]. Współcześni producenci taboru działają w warunkach globalnych łańcuchów dostaw, w których integracja różnych technologii (np. alternatywne źródła zasilania, nowoczesne systemy sterowania) wymaga:

- zastosowania cyfrowych narzędzi konfiguracji, które pozwalają na szybką weryfikację wykonalności technicznej,
- dynamicznego zestawiania wariantów zgodnych z wymaganiami zamawiającego i możliwościami kooperantów,
- śledzenia pełnej struktury technicznej w modelu BIM/PLM (*Building Information Modeling*/*Product Lifecycle Management*).

Przywołana norma zakładowa w swojej pierwotnej formie nie jest kompatybilna z takimi nowoczesnymi systemami i z tych względów uzasadnione jest opracowanie nowoczesnego narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego.

Przegląd literatury krajowej i międzynarodowej wskazuje jednoznacznie na istnienie istotnej luki badawczej w zakresie zintegrowanych metod i narzędzi wspomagających proces doboru parametrów techniczno-eksploatacyjnych pojazdów szynowych [76, 77]. W dostępnych opracowaniach naukowych i raportach branżowych dominują analizy skupione na pojedynczych aspektach projektowania taboru, takich jak efektywność energetyczna układów napędowych, optymalizacja masy całkowitej, zużycie energii trakcyjnej czy koszty cyklu życia [3]. Brakuje natomiast kompleksowego podejścia integrującego te elementy w jednym środowisku decyzyjnym, umożliwiającym wielokryterialny dobór parametrów pojazdu już na etapie koncepcji technicznej lub przygotowania postępowania zakupowego [78].

Większość dotychczasowych metod oceny pojazdów opiera się na klasycznych kryteriach ekonomicznych lub eksploatacyjnych, nieuwzględniających w sposób wystarczający różnorodności współczesnych technologii napędowych. Dotyczy to w szczególności porównania i oceny systemów zasilania elektrycznego, hybrydowego, wykorzystującego

akumulatory do jazdy na liniach niezelektryfikowanych oraz bazującego na ogniwach paliwowych, których dobór wiąże się z odmiennymi wymaganiami infrastrukturalnymi, profilem eksploatacji i charakterystyką pracy pojazdu. Analiza literaturowa [79–81] wskazuje, że istniejące modele symulacyjne i narzędzia projektowe skupiają się głównie na parametrach energetycznych lub ekonomicznych, pomijając pełny kontekst techniczno-eksploatacyjny i środowiskowy.

W efekcie, procesy decyzyjne w zakresie zakupu i projektowania taboru kolejowego są często realizowane w sposób rozproszony, niezharmonizowany i zależny od subiektywnej oceny ekspertów technicznych [82, 83]. Brak jest narzędzia umożliwiającego kompleksową analizę wariantów pojazdu z uwzględnieniem:

- zintegrowanych parametrów technicznych (m.in. moc, masa, pojemność energetyczna akumulatorów, moment obrotowy silnika, charakterystyka układu napędowego),
- wskaźników ekonomicznych (m.in. koszt cyklu życia, koszt energii, nakłady inwestycyjne),
- oraz czynników środowiskowych (m.in. emisja jednostkowa CO_2, zużycie energii pierwotnej, ślad węglowy).

Identyfikacja tej luki badawczej stanowi podstawowe uzasadnienie naukowe i aplikacyjne dla podjęcia tematyki przedstawionej rozprawy. Opracowanie i wdrożenie narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego ze szczególnym uwzględnieniem innowacyjnych źródeł zasilania odpowiada bezpośrednio na aktualne potrzeby sektora kolejowego – zarówno z punktu widzenia producentów taboru, jak i organizatorów transportu publicznego. Tego rodzaju rozwiązanie wypełnia istniejącą lukę między teorią a praktyką projektowania pojazdów, tworząc platformę umożliwiającą racjonalne, oparte na danych podejmowanie decyzji inwestycyjnych i technicznych. Dzięki temu proponowane badania wdrożeniowe mają potencjał nie tylko naukowy, lecz także praktyczny i strategiczny. Mogą one przyczynić się do usprawnienia procesów zakupowych, zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych oraz wspierania celów dekarbonizacji transportu w Polsce i Unii Europejskiej. W dłuższej perspektywie opracowane narzędzie może stać się fundamentem dla rozwoju inteligentnych systemów wspomagania decyzji w branży kolejowej, umożliwiających automatyczną ocenę wariantów taborowych w kontekście dynamicznie zmieniających się uwarunkowań technicznych, energetycznych i ekonomicznych.

4. Cel i zakres pracy

Rozwój współczesnego transportu szynowego jest ukierunkowany na zwiększenie efektywności energetycznej, ograniczenie oddziaływania transportu na środowisko oraz wdrażanie nowych technologii w napędach. Tendencje te znajdują odzwierciedlenie zarówno w strategiach rozwoju transportu Unii Europejskiej, jak i coraz częściej w wymaganiach formułowanych przez zamawiających tabor kolejowy. Szczególnego znaczenia nabierają w tym kontekście alternatywne rozwiązania umożliwiające eksploatację pojazdów również na liniach niezelektryfikowanych, w tym napędy hybrydowe spalinowo-elektryczne, elektryczne z akumulatorami oraz wykorzystujące ogniwa paliwowe. Przedstawione rozważania wskazują, że aktualne postępowania przetargowe nadal opierają się przede wszystkim na kryterium ceny, choć krajowa i europejska polityka transportowa wymaga pilnego wdrażania pojazdów o zdecydowanie mniejszej energochłonności i wyższych wskaźnikach ekologicznych.

Pojazd szynowy stanowi złożony system techniczny, w którym zmiana jednego z podstawowych parametrów może wpływać na wiele innych elementów jego konstrukcji, osiągi, wyposażenie oraz nakłady związane z jego wytworzeniem. Dobór parametrów pojazdu nie może być zatem rozpatrywany wyłącznie jako wybór pojedynczych rozwiązań technicznych, lecz powinien stanowić uporządkowany proces konfiguracji uwzględniający wzajemne zależności między wymaganiami zamawiającego, możliwościami konstrukcyjnymi i produkcyjnymi przedsiębiorstwa, dostępnymi technologiami oraz uwarunkowaniami ekonomicznymi.

Praktyka przemysłowa wskazuje, że proces doboru parametrów technicznych pojazdu szynowego na etapie przygotowania oferty jest realizowany z udziałem wielu jednostek organizacyjnych przedsiębiorstwa oraz z wykorzystaniem danych pochodzących z różnych źródeł. Powoduje to potrzebę stworzenia rozwiązania pozwalającego na uporządkowanie danych wejściowych, określenie zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami oraz przeprowadzenie konfiguracji pojazdu w sposób spójny, powtarzalny i możliwy do zweryfikowania.

Przeprowadzona analiza pozwoliła zidentyfikować lukę badawczą dotyczącą niedostatku zintegrowanych metod wspomagających dobór parametrów techniczno-eksploatacyjnych pojazdów szynowych na etapie przygotowania koncepcji technicznej i oferty [84, 85]. Dostępne rozwiązania koncentrują się najczęściej na wybranych aspektach konstrukcji, energetyki, eksploatacji lub ekonomiki pojazdu, natomiast w ograniczonym stopniu integrują wymagania zamawiającego, strukturę konstrukcyjną pojazdu, różne technologie napędowe, uwarunkowania produkcyjne oraz nakłady związane z przyjętą konfiguracją [86, 87].

Biorąc pod uwagę kierunki rozwoju transportu szynowego, jego znaczenie dla gospodarki, bieżące metody konfiguracji pojazdów oraz aktualne wymagania przetargowe, sformułowano cel pracy:

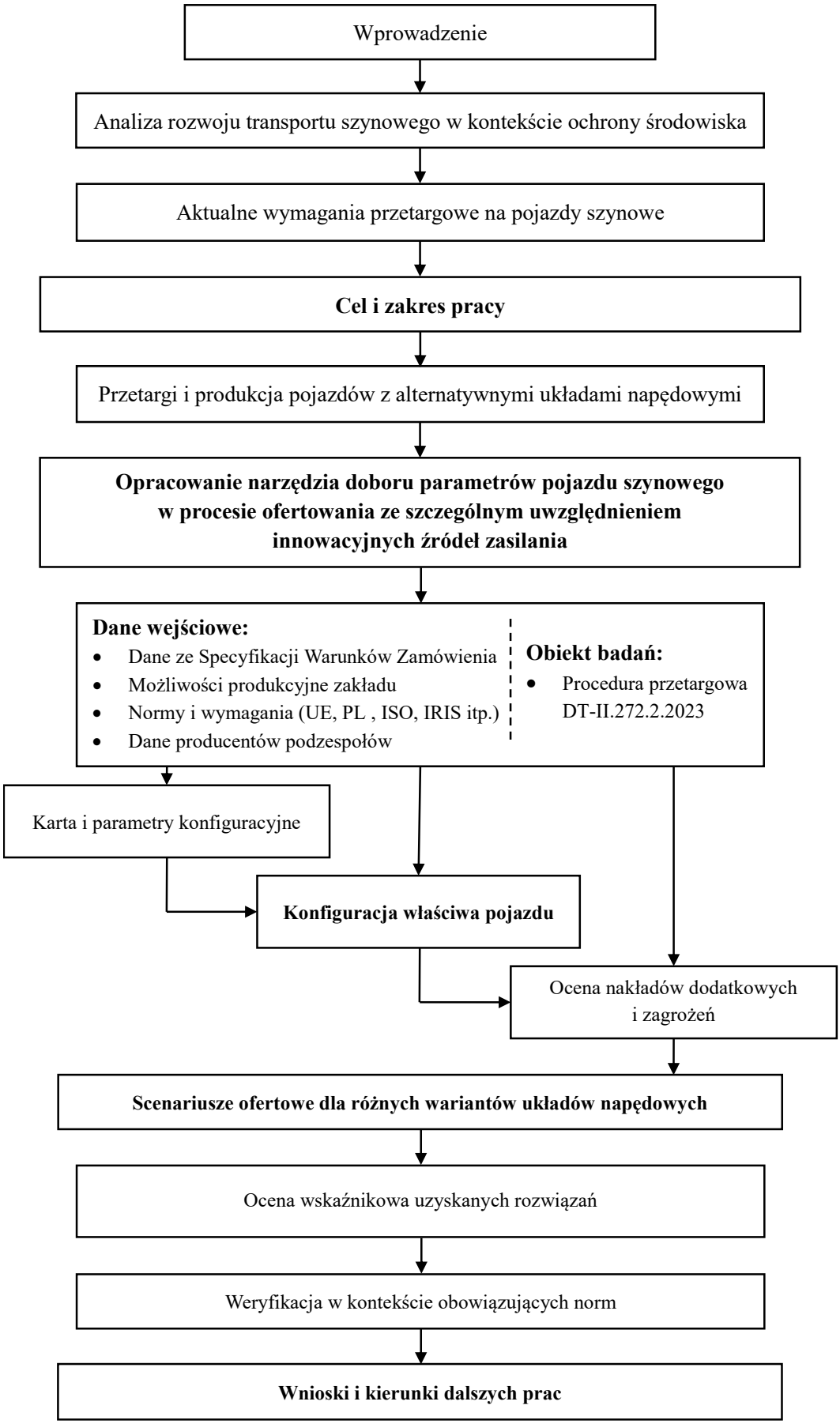
> **Głównym celem rozprawy jest opracowanie i weryfikacja narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego wspomagającego proces jego konfiguracji na etapie przygotowania oferty, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości zastosowania różnych technologii napędowych oraz ich wpływu na konstrukcję pojazdu i związane z nią koszty.**

Istotę celu pracy stanowi zatem autorska metodyka konfigurowania pojazdów szynowych na etapie ofertowania. Jego realizacja wymagała rozwiązania szeregu powiązanych ze sobą problemów badawczych oraz inżynierskich, do których należą m.in.:

- identyfikacja wymagań wynikających z dokumentacji postępowań przetargowych oraz określenie ich znaczenia w procesie konfiguracji pojazdu,
- określenie źródeł danych wejściowych niezbędnych do przeprowadzenia konfiguracji, obejmujących wymagania zamawiającego, dane konstrukcyjne i produkcyjne przedsiębiorstwa, wymagania normatywne oraz informacje o dostępnych podzespołach,
- opracowanie struktury parametrów pojazdu oraz określenie zależności występujących między nimi,
- opracowanie karty konfiguracyjnej stanowiącej uporządkowany zbiór podstawowych parametrów wejściowych konfiguracji,
- opracowanie otwartej bazy danych oraz modułu konfiguracji umożliwiającego przetwarzanie danych wejściowych i wyznaczanie wynikowej konfiguracji pojazdu,
- określenie wpływu zastosowanej technologii napędowej na strukturę konstrukcyjną pojazdu, ze szczególnym uwzględnieniem napędu elektrycznego trakcyjnego, hybrydowego spalinowo-elektrycznego, elektrycznego z akumulatorami oraz elektrycznego wykorzystującego ogniwa paliwowe,
- określenie nakładów związanych z poszczególnymi grupami konstrukcyjnymi oraz całkowitych kosztów finansowych (i/lub środowiskowych) dla analizowanych wariantów konfiguracji,
- przeprowadzenie analizy wariantowej pozwalającej na ocenę wpływu zmiany wybranych parametrów technicznych, w szczególności prędkości konstrukcyjnej, na całkowite nakłady finansowe (i/lub środowiskowe) oraz ich strukturę dla różnych technologii napędowych,
- opracowanie wskaźników ilościowych umożliwiających ocenę zależności pomiędzy prędkością konstrukcyjną, technologią napędu oraz poziomem, strukturą i dynamiką zmian nakładów finansowe (i/lub środowiskowe),
- uwzględnienie w procesie konfiguracji wymagań dodatkowych oraz ryzyka mogącego wpływać na końcową konfigurację i nakłady finansowe (i/lub środowiskowe),
- weryfikację poprawności opracowanego narzędzia w zakresie jego struktury, logiki działania, wzajemnych zależności pomiędzy parametrami oraz zgodności z rzeczywistym procesem ofertowania.

Biorąc pod uwagę zebrane dane oraz cel pracy, zdefiniowano główne pytanie badawcze, a także opracowano strukturę pracy (rys. 4.1):

> **W jaki sposób należy zintegrować wymagania zamawiającego, dane techniczne i produkcyjne oraz zależności pomiędzy parametrami pojazdu szynowego, aby możliwe było przeprowadzenie jego spójnej, powtarzalnej i weryfikowalnej konfiguracji oraz możliwa była ilościowa ocena wpływu wybranych parametrów technicznych i zastosowanej technologii napędowej na strukturę konstrukcji i całkowite nakłady finansowe (i/lub środowiskowe)?**



Rys. 4.1. Struktura pracy

Zakres pracy i jej struktura obejmuje w pierwszej kolejności analizę kierunków rozwoju transportu szynowego zarówno w kraju, jak i Europie. Następnie dokonano przeglądu uwarunkowań prawnych i postępowań przetargowych dla trzech grup taboru: wagonów pasażerskich, lokomotyw oraz elektrycznych zespołów trakcyjnych. Pozwoliły one na identyfikację charakterystycznych wymagań zamawiających oraz kryteriów wykorzystywanych w postępowaniach przetargowych. Następnie zdefiniowano cel pracy i pytanie badawcze.

W kolejnym rozdziale omówiono na przykładach możliwości wdrażania nowoczesnych napędów w pojazdach szynowych. Następnie zdefiniowano obiekt badawczy, którym jest postępowanie przetargowe na pasażerski zespół trakcyjny. W dalszej kolejności przedstawiono prace dotyczące opracowania narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego w procesie ofertowania ze szczególnym uwzględnieniem innowacyjnych źródeł zasilania. W tym celu zdefiniowano i omówiono: źródła danych wejściowych, kartę i parametry konfiguracyjne, moduł konfiguracji, ocenę ryzyka i aspekt nakładów dodatkowych. W wyniku tych działań możliwe było skonfigurowanie czterech wersji pojazdu szynowego wyposażonego w różne układy napędowe.

Podstawowe konfiguracje pojazdu przeprowadzono dla prędkości konstrukcyjnej 160 km/h, odpowiadającej wymaganiom przyjętym metodyce badawczej. W celu rozszerzenia zakresu poznawczego badań, przeprowadzono następnie analizę wariantową dla prędkości 140 i 180 km/h oraz dla wszystkich czterech analizowanych technologii napędowych. Pozwoliło to na określenie wpływu zmiany prędkości konstrukcyjnej i technologii napędu na całkowite nakłady finansowe (i/lub środowiskowe), ich strukturę w poszczególnych grupach konstrukcyjnych oraz dynamikę zachodzących zmian.

Końcowym etapem pracy była weryfikacja opracowanego narzędzia obejmująca ocenę poprawności jego struktury, logiki konfiguracji, spójności danych wejściowych i wyjściowych, zależności pomiędzy parametrami oraz zgodności z rzeczywistym przebiegiem procesu ofertowego. Weryfikacja ta umożliwia ocenę, czy opracowane narzędzie realizuje przyjęte założenia i może stanowić praktyczne wsparcie procesu przygotowania konfiguracji technicznej pojazdu szynowego na potrzeby postępowań ofertowych. W ostatnim etapie zdefiniowano wnioski i kierunki dalszych prac.

5. Możliwości wdrażania nowoczesnych napędów pojazdów szynowych

5.1. Nowoczesne napędy w kolejnictwie

Postępujące zmiany w sektorze transportu publicznego, wynikające z globalnych trendów dekarbonizacji, transformacji energetycznej oraz wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju, wymuszają na producentach taboru kolejowego poszukiwanie alternatywnych rozwiązań napędowych. W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój technologii, które mają na celu zastąpienie tradycyjnych układów spalinowych lub uzupełnienie napędów elektrycznych o nowe źródła energii, charakteryzujące się większą efektywnością i mniejszym śladem węglowym.

Kluczowym kierunkiem rozwoju jest zastąpienie napędów spalinowych technologiami bezemisyjnymi, które mogą funkcjonować na liniach niezelektryfikowanych bez konieczności kosztownej budowy sieci trakcyjnej. W dokumentach branżowych (np. *Shift2Rail Innovation Programme*) wskazuje się na dwie dominujące technologie: napędy elektryczne z akumulatorami lub ogniwami paliwowymi, jako najbardziej perspektywiczne rozwiązania w średnim i długim horyzoncie czasowym [88].

Wprowadzenie tego typu rozwiązań jest odpowiedzią na coraz bardziej restrykcyjne normy środowiskowe oraz konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych, szczególnie w krajach Unii Europejskiej, gdzie sektor transportu stanowi istotne źródło emisji CO_2. Dodatkowo, rozwój technologii magazynowania energii oraz systemów zarządzania nią stwarza realne możliwości eksploatacji pojazdów niezależnych od stałej infrastruktury sieci trakcyjnej.

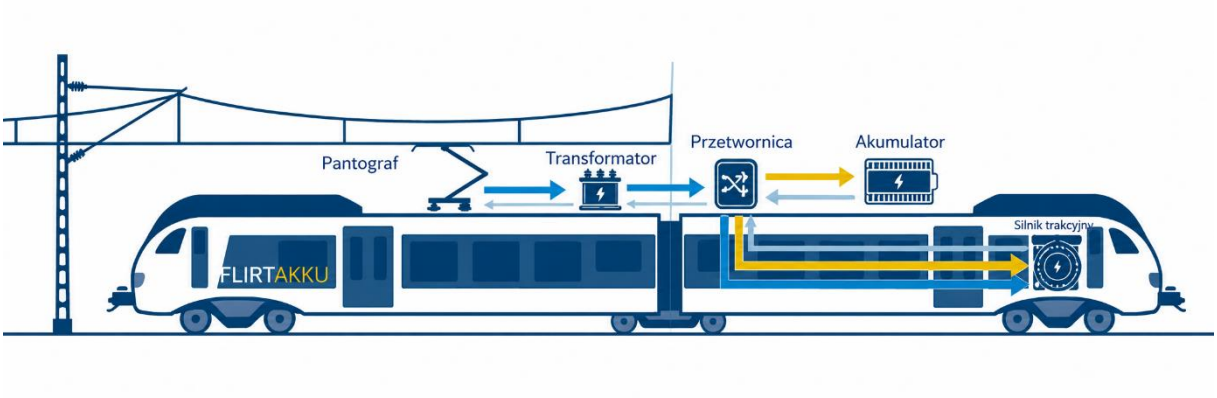
W kontekście przedstawionej dysertacji szczególną uwagę poświęcono dwóm kluczowym kierunkom rozwoju napędów alternatywnych w transporcie szynowym [88]:

- pojazdom elektrycznym wykorzystującym akumulatory (BEMU) o dużej pojemności energetycznej, pozwalające na samodzielną jazdę na liniach niezelektryfikowanych lub jako uzupełnienie zasilania z sieci trakcyjnej,
- pojazdom elektrycznym wykorzystującym w napędzie ogniwa paliwowe (FCEMU – *Fuel Cell Electric Multiple Units*), w których energia elektryczna wytwarzana jest w procesie elektrochemicznym w wyniku łączenia tlenu z wodorem magazynowanym w zbiornikach wysokociśnieniowych.

Obydwa wymienione rozwiązania otwierają nowe możliwości w zakresie eksploatacji taboru na liniach o ograniczonym dostępie do sieci energetycznej oraz w regionach, gdzie modernizacja infrastruktury trakcyjnej jest ekonomicznie nieuzasadniona. Napęd elektryczny wykorzystujący pakiety akumulatorów jest obecnie jednym z najczęściej wdrażanych rozwiązań w zakresie zrównoważonego transportu kolejowego. Pociągi tego typu wykorzystują zestawy akumulatorów litowo-jonowych, w których stosowane są różne technologie elektrochemiczne, m.in. litowo-żelazowo-fosforanowa (LFP) oraz litowo-tytanianowa (LTO). Zmagazynowana w nich energia elektryczna jest wykorzystywana do zasilania układu napędowego pojazdu, w tym silników trakcyjnych. (rys. 5.1) [89].

Zaletą takich pojazdów jest brak lokalnej emisji zanieczyszczeń oraz możliwość rekuperacji energii podczas hamowania. Nowoczesne pojazdy, takie jak Siemens Mireo Plus B lub Stadler FLIRT Akku, mogą pokonywać odcinki do 150 km bez zewnętrznego zasilania

(tab. 5.1), a dzięki szybkiemu ładowaniu – nawet w czasie krótszym niż 20 min – mogą obsługiwać linie niezelektryfikowane w sposób w pełni zrównoważony [90].



Rys. 5.1. Schemat pojazdu elektrycznego z akumulatorami (kolor żółty: jazda w trybie akumulatorowym, kolor niebieski: jazda w trybie trakcji) [89]

Tabela 5.1. Podstawowe parametry techniczne wybranych pojazdów BEMU [89, 90]

Model pojazdu	**Pojemność energetyczna akumulatorów* [kWh]**	**Zasięg** [km]**	**Prędkość maks. [km/h]**	**Możliwość ładowania z sieci trakcyjnej**	**Typ ogniw**
Stadler FLIRT Akku	ok. 520–600	80–150	140	Tak (pantograf)	Li-Ion
Siemens Mireo Plus B	260–300 na moduł, typowo ok. 600 łącznie	do 120	140	Tak	Li-Ion
Bombardier Talent 3 BEMU	ok. 300–450	40–100	140	Tak	Li-Ion
Alstom Coradia Continental BEMU	ok. 600 (konfiguracja dla DB Regio)	ok. 120	160	Tak	Li-Ion
Škoda RegioPanter BEMU	ok. 500–650	80–100	160	Tak	Li-Ion

* Wartości pojemności energetycznej podane jako zakres wynikają z różnic między konfiguracjami oferowanymi operatorom.
** Zasięg podany jako zakres wynika z profilu tras.

Mimo licznych zalet, napędy z akumulatorami nie są pozbawione wad. Wśród najważniejszych wyzwań wymienia się ograniczoną pojemność energetyczną, znaczną masę oraz degradację ogniw w dłuższym okresie eksploatacji [91]. Problemem pozostaje również recykling zużytych akumulatorów oraz koszty ich wymiany po kilku tysiącach cykli ładowania. Ponadto, efektywność ekologiczna rozważanych napędów jest silnie uzależniona od źródła energii elektrycznej – pełna neutralność klimatyczna jest możliwa wyłącznie przy wykorzystaniu energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii (OZE).

Równolegle do rozwoju pojazdów akumulatorowych, intensywnie rozwijane są systemy napędowe oparte na ogniwach paliwowych (rys. 5.2). W tego typu układach energia elektryczna powstaje w wyniku reakcji chemicznej między wodorem a tlenem, której produktem ubocznym jest jedynie para wodna.



Rys. 5.2. Schemat pojazdu elektryczne z ogniwami paliwowymi [89]

Tego rodzaju rozwiązania oferują znacznie większy zasięg operacyjny – od 600 km do nawet 1000 km (tab. 5.2) przy zachowaniu pełnej zeroemisyjności w trakcie eksploatacji [92]. Technologie wodorowe znajdują zastosowanie przede wszystkim na liniach, których elektryfikacja byłaby ekonomicznie nieuzasadniona. Przykładami przedsiębiorstw realizujących takie konstrukcje są Alstom Coradia iLint czy Siemens Mireo Plus H, które z powodzeniem wprowadzono do eksploatacji w Niemczech i Austrii. Wszyscy producenci stosują ogniwa paliwowe typu PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* – ogniwo paliwowe z membraną protonowymienną).

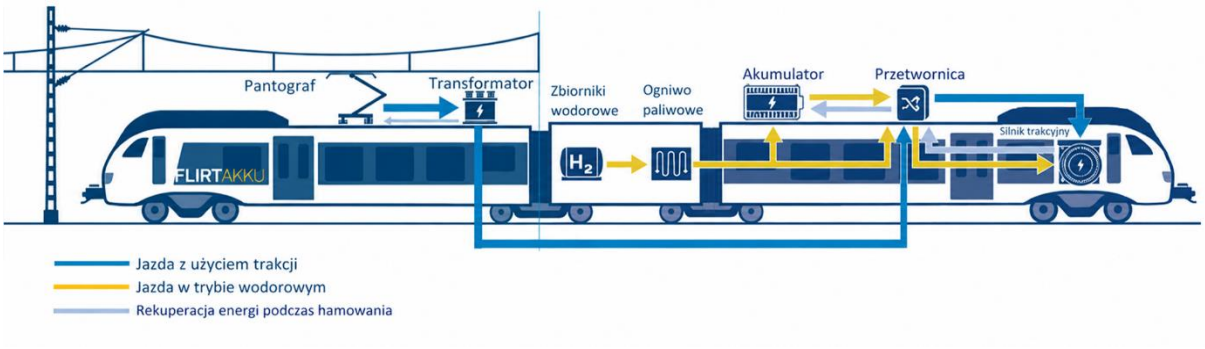
Tabela 5.2. Podstawowe parametry techniczne wybranych pojazdów z napędem wodorowym [89, 90]

Model pojazdu	**Moc ogniw paliwowych [kW]**	**Ciśnienie wodoru [bar]**	**Zasięg [km]**	**Prędkość maks. [km/h]**	**Typ ogniw**
Alstom Coradia iLint	2 × 200	350	600–1000	140	PEMFC
Siemens Mireo Plus H	2 × 200	350	600–800	160	PEMFC
CAF Hydrogen Train	ok. 200–250 (zależnie od konfiguracji)	350	350–550	120–140	PEMFC
Stadler FLIRT H_2	2 × 200	350	ok. 1000	130	PEMFC

Wodór wykorzystywany w tych systemach może pochodzić z różnych źródeł – najbardziej pożądanym kierunkiem rozwoju jest jednak tzw. wodór zielony, otrzymywany w procesie elektrolizy zasilanej energią odnawialną [93]. Pomimo znacznego potencjału, wdrożenie wodorowych systemów zasilania wiąże się z licznymi wyzwaniami. Do najpoważniejszych należą: istotny koszt produkcji czystego wodoru, brak rozwiniętej infrastruktury tankowania oraz problemy z magazynowaniem gazu pod wysokim ciśnieniem [94, 95]. Dodatkowo, łańcuch konwersji energii – od elektrolizy, przez sprężanie, po konwersję w ogniwie – cechuje się mniejszą ogólną sprawnością w porównaniu z klasycznymi systemami elektrycznymi. Kwestie te stanowią istotny obszar badań zarówno w aspekcie ekonomicznym, jak i technologicznym [96].

Rozwiązania bazujące na akumulatorach, jak i ogniwach paliwowych, reprezentują nowy paradygmat ekologicznej mobilności kolejowej. Łączy je wspólne dążenie do redukcji emisji gazów cieplarnianych, zwiększenia efektywności energetycznej oraz ograniczenia hałasu w terenie zurbanizowanym. Ich wdrażanie przyczynia się nie tylko do poprawy jakości

powietrza, lecz także do transformacji energetycznej całego sektora transportu. Innowacyjność tych rozwiązań nie ogranicza się wyłącznie do technologii napędowych. Obejmuje również integrację z inteligentnymi sieciami energetycznymi (*smart grids*), rozwój infrastruktury ładowania i tankowania, a także systemów zarządzania energią w czasie rzeczywistym. W takim ujęciu, w coraz większym stopniu pojazd szynowy nie jest już jedynie odbiorcą energii, ale staje się aktywnym elementem ekosystemu energetycznego, zdolnym do magazynowania, odzyskiwania i przekazywania energii w ramach zrównoważonego cyklu. W perspektywie średniookresowej można oczekiwać, że napędy hybrydowe (rys. 5.3), łączące zalety ogniw paliwowych i akumulatorów, staną się rozwiązaniem przejściowym umożliwiającym płynne przejście od paliw kopalnych do całkowicie zeroemisyjnego transportu kolejowego [97]. Tym samym rozpatrywane technologie nie tylko realizują aktualne cele ekologiczne, ale również wyznaczają kierunek rozwoju innowacji w mobilności szynowej w nadchodzących dekadach.



Rys. 5.3. Schemat pojazdu elektrycznego wielonapędowego: trakcja elektryczna, akumulatory i ogniwa paliwowe [89]

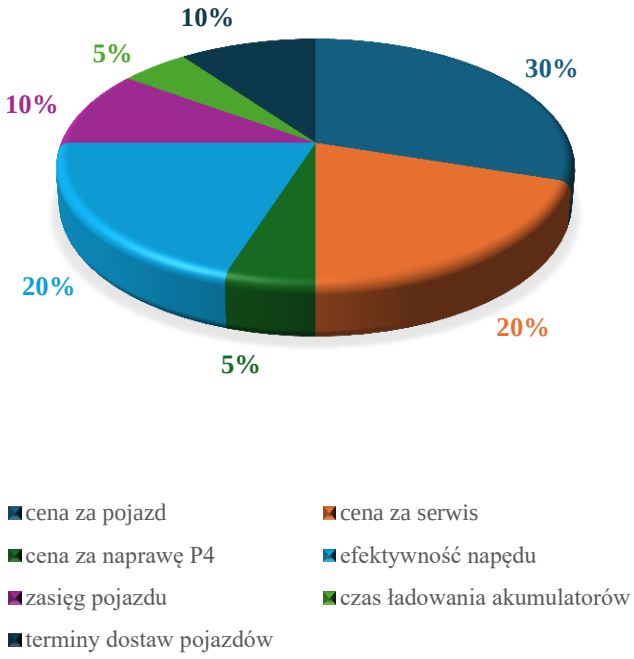
Należy zauważyć, że żadna z analizowanych technologii nie powinna być traktowana jako rozwiązanie uniwersalne. Napędy wykorzystujące akumulatory i ogniwa paliwowe trzeba postrzegać jako rozwiązania komplementarne, których zastosowanie powinno być uzależnione od charakterystyki linii kolejowej, profilu eksploatacyjnego oraz lokalnych uwarunkowań energetycznych.

5.2. Wdrażanie nowoczesnych układów napędowych w pojazdach szynowych w Polsce

Rozwój alternatywnych źródeł zasilania w transporcie kolejowym w Polsce jest procesem stopniowym, realizowanym równolegle z modernizacją infrastruktury oraz odnową taboru. Pierwszą instytucją, która podjęła próbę wprowadzenia pojazdów z napędem akumulatorowym do regularnej eksploatacji, były Koleje Mazowieckie (KM). W latach 2021–2024 spółka ta czterokrotnie ogłaszała przetargi na zakup pociągów elektrycznych z akumulatorami, przeznaczonych do obsługi tras niezelektryfikowanych, głównie na północno-wschodnim Mazowszu. Celem tych działań było stworzenie nowoczesnego, ekologicznego taboru, który mógłby funkcjonować w dwóch trybach – czerpiąc energię z sieci trakcyjnej na odcinkach zelektryfikowanych i wykorzystując akumulatory w rejonach pozbawionych trakcji. Był to kierunek zgodny z trendami europejskimi, w których pojazdy typu BEMU stanowią alternatywę dla drogich inwestycji w nowe linie zasilające [98].

KM będące zainteresowane wdrażaniem pojazdów akumulatorowych jako części swojej strategii rozwoju, zwłaszcza w kontekście modernizacji floty i zrównoważonego transportu publicznego, ogłosiło swoje pierwsze postępowanie przetargowe nr MWZ7.27.47.2023 w czerwcu 2023 r. [99]. Zostało ono szerzej przedstawione w tym rozdziale, aby zwrócić uwagę na wyzwania związane z konstrukcją układu napędowego. Przedmiotem zamówienia była dostawa 6 sztuk nowych, dwuczłonowych elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych wraz z pakietem naprawczym. W dokumentacji przetargowej oprócz standardowych informacji o charakterze prawnym, ekonomicznym i technicznym zdefiniowano również kryteria udzielenia zamówienia wraz z podaniem wag tych kryteriów oraz sposobem oceny ofert. Analiza specyfikacji warunków zamówienia wskazuje, że zamawiający zdefiniował następujące kryteria wyboru ofert (rys. 5.4):

1) C_d – cena za dostawę 6 szt. elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych wraz z pakietem naprawczym – pozderzeniowym oraz szkoleniem – waga 30%,
2) C_s – cena za świadczenie usług serwisowych elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych w poziomach utrzymania P1, P2, P3 – waga 20%,
3) C_u – cena za naprawę P4 elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 5%,
4) W_e – współczynnik efektywności elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 20%,
5) Z_{ta} – zasięg w trybie akumulatorowym elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 10%,
6) $C_{złszst}$ – czas ładowania stacjonarnego z sieci trakcyjnej od 20% do 90% pojemności akumulatorów elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 5%,
7) T_{dp} – termin dostawy pojazdów – waga 10%.



Rys. 5.4. Kryteria oceny ofert – 1 przetarg Kolei Mazowieckich

Oferty zostały ocenione w następujący sposób:

1) wg kryterium C_d – wykonawca, który zaproponował najmniejszą cenę otrzyma 100 punktów, natomiast pozostali wykonawcy odpowiednio mniej punktów, według wzoru:

$$C_d = \frac{C_d \text{ z oferty z najmnieszą ceną brutto}}{C_d \text{ z oferty badanej brutto}} \cdot 100 \text{ pkt}; \quad (5.1)$$

uzyskane w ten sposób punkty zostają pomnożone przez współczynnik 0,3 odpowiadający wadze tego kryterium;

2) wg kryterium C_s – wykonawca, który zaproponował najmniejszą cenę otrzymują 100 punktów, natomiast pozostali wykonawcy odpowiednio mniej punktów, według wzoru:

$$C_S = \frac{C_S \text{ z oferty z najmnieszą ceną brutto}}{C_S \text{ z oferty badanej brutto}} \cdot 100 \text{ pkt}; \quad (5.2)$$

uzyskane w ten sposób punkty zostają pomnożone przez współczynnik 0,2 odpowiadający wadze tego kryterium;

3) wg kryterium C_u – wykonawca, który zaproponował najmniejszą cenę otrzyma 100 punktów, natomiast pozostali wykonawcy odpowiednio mniej punktów, według wzoru:

$$C_u = \frac{C_u \text{ z oferty z najmnieszą ceną brutto}}{C_u \text{ z oferty badanej brutto}} \cdot 100 \text{ pkt}; \quad (5.3)$$

uzyskane w ten sposób punkty zostają pomnożone przez współczynnik 0,05 odpowiadający wadze tego kryterium;

4) wg kryterium W_e – wykonawca, który zaproponował najmniejszą wartość współczynnika otrzyma 100 punktów, natomiast pozostali wykonawcy odpowiednio mniej punktów, według wzoru:

$$W_e = \frac{W_e \text{ z najmnieszą wartością współczynnika}}{W_e \text{ z oferty badanej}} \cdot 100 \text{ pkt}; \quad (5.4)$$

uzyskane w ten sposób punkty zostały pomnożone przez współczynnik 0,2 odpowiadający wadze tego kryterium. Sposób wyznaczenia współczynnika efektywności elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – W_e został szczegółowo opisany w odpowiednim załączniku do SWZ (jest to stosunek zadeklarowanego zużycie energii do liczby stałych miejsc siedzących w pojeździe);

5) wg kryterium Z_{ta} – oferty były oceniane wg zasad określonych w tab. 5.3;
6) wg kryterium $C_{złszst}$ – oferty były oceniane wg zasad określonych w tab. 5.4;
7) wg kryterium T_{dp} – oferty były oceniane wg zasad określonych w tab. 5.5.

Tabela 1.3. Punktacja dla kryterium Z_{ta}

Zaoferowany zasięg w trybie akumulatorowym [km]	**Liczba punktów**
120	10
110	5
100	2
90	0

Tabela 2.4. Punktacja dla kryterium $C_{złszst}$

Czas ładowania z sieci trakcyjnej od 20% do 90% pojemności akumulatorów [min.]	**Liczba punktów**
30	5
40	4
50	3
60	0

Tabela 5.5. Punktacja dla kryterium T_{dp}

Termin dostawy pojazdów [miesiące]	**Liczba punktów**
do 29	10
do 30	9
do 31	8
do 36	0

Do wyboru najkorzystniejszej oferty zamawiający zastosował jeden z najbardziej rozpowszechnionych algorytmów – metodę sum ważonych wyliczonych wg wzoru (5.5):

$$O = 0{,}3\ PC_d + 0{,}2\ PC_s + 0{,}05\ PC_u + 0{,}25\ PW_e + PZ_{ta} + PC_{złszst} + PT_{dp} \qquad (5.5)$$

gdzie:

O – ogólna ocena oferty (liczba punktów),

PC_d – punkty przyznane za cenę za dostawę elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych wraz z pakietem naprawczym – pozderzeniowym oraz szkoleniem pracowników,

PC_s – punkty przyznane za cenę za świadczenie usług serwisowych elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych w poziomach utrzymania P1, P2, P3,

PC_u – punkty przyznane za cenę za naprawę P4 elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych,

PW_e – punkty przyznane za współczynnik efektywności elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych,

PZ_{ta} – punkty przyznane za zasięg w trybie akumulatorowym elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych,

$PC_{złszst}$ – punkty przyznane za czas ładowania stacjonarnego z sieci trakcyjnej od 20% do 90% pojemności akumulatorów elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych,

PT_{dp} – punkty przyznane za termin dostawy pojazdów.

W informacji opublikowanej przez KM w sierpniu 2023 r., podano, że w związku | z faktem niezłożenia żadnej oferty, postępowanie na „Zakup pojazdów kolejowych z usługą serwisową" zostało unieważnione [99]. Natomiast miesiąc później KM powtórzyły przetarg i ogłosiły drugie postępowanie (oznaczenie MWZ7.27.95.2023) na zakup 6 sztuk elektryczno-

akumulatorowych zespołów trakcyjnych wraz z pakietem naprawczym – pozderzeniowym oraz szkoleniem pracowników [100]. Ku zaskoczeniu ewentualnych uczestników przetargu postępowanie zostało unieważnione przez KM tego samego dnia, kiedy zostało ogłoszone w Suplemencie do Dziennika Urzędowego UE, czyli biuletynie informującym o przetargach na terenie UE. Zamawiający poinformował, że wystąpiły okoliczności powodujące zmianę potrzeb w zakresie dostawy pojazdów, co w istotny sposób zmienia charakter zamówienia i w świetle przepisów PZP jest okolicznością powodującą, że dalsze prowadzenie postępowania jest nieuzasadnione [100].

Z analizy dokumentacji przetargowej wynika, że KM zmodyfikowały zapisy SWZ w zakresie kryteriów wyboru ofert. W porównaniu do pierwszego przetargu, w drugim, zamawiający zrezygnował z jednego z kryteriów: termin dostawy pojazdów. W związku z tym kryteria te kształtowały się następująco:

1) C_d – cena za dostawę 6 szt. elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych wraz z pakietem naprawczym – pozderzeniowym oraz szkoleniem pracowników – waga 30%,
2) C_s – cena za świadczenie usług serwisowych elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych w poziomach utrzymania P1, P2, P3 – waga 20%,
3) C_u – cena za naprawę P4 elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 5%,
4) W_e – współczynnik efektywności elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 25%,
5) Z_{ta} – zasięg w trybie akumulatorowym elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 10%,
6) $C_{złszst}$ – czas ładowania stacjonarnego z sieci trakcyjnej od 20% do 90% pojemności akumulatorów elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 10%.

W związku z tymi zmianami wzór (5.5) przybrał postać:

$$O = 0{,}3\ PC_d + 0{,}2\ PC_s + 0{,}05\ PC_u + 0{,}25\ PW_e + PZ_{ta} + PC_{złszst} \tag{5.6}$$

Rezygnacja z kryterium termin dostaw pojazdów, spowodowała zmianę wag dla kryteriów: efektywności napędu oraz czasu ładowania akumulatorów. Ze względu na zmiany potrzeb zamawiającego w zakresie dostawy pojazdów postępowanie zostało unieważnione.

W kolejnym – trzecim przetargu (numer referencyjny: MWZ7.27.103.2023) zamawiający podtrzymał dotychczasowy zakres dostawy w postaci 6 pojazdów, ale zamówienie uzupełnił o możliwość skorzystania z opcji w zakresie dostawy dodatkowych maksymalnie 3 pojazdów tego samego typu [101]. Natomiast w zakresie kryteriów oceny ofert nie nastąpiły żadne zmiany w stosunku do kryteriów przedstawionych w drugim przetargu. W tym postępowaniu oferty złożyło dwóch wykonawców. Jednak w związku z faktem, że obie oferty przewyższały kwotę, którą zamawiający zamierzał przeznaczyć na sfinansowanie zamówienia, postępowanie zostało unieważnione.

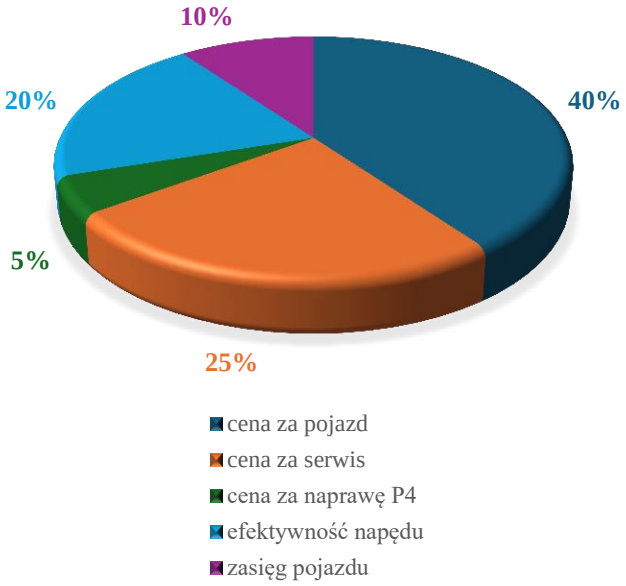
Determinacja KM w pozyskaniu pojazdów z innowacyjnymi źródłami zasilania była na tyle duża, że ogłoszono kolejny – czwarty przetarg (oznaczenie MWZ7.27.134.2023) o zbliżonym zakresie dostawy jak przetarg trzeci. Nastąpiła natomiast zmiana w zakresie kryteriów oceny [102]. Dla tego przetargu kryteria kształtowały się następująco (rys. 5.5):

1) C_d – cena za dostawę wszystkich elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych wraz z pakietem naprawczym – pozderzeniowym oraz szkoleniem pracowników – waga 40%,

2) C_s – cena łączna za świadczenie usług serwisowych wszystkich elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych w poziomach utrzymania P1, P2, P3 – waga 25%,
3) C_u – cena za naprawę P4 wszystkich elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 5%,
4) W_e – współczynnik efektywności elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 20%,
5) Z_{ta} – zasięg w trybie akumulatorowym elektryczno-akumulatorowych zespołów trakcyjnych – waga 10%.

W związku z tym wzór (5.5) przybrał postać:

$$O = 0{,}4\ PC_d + 0{,}25\ PC_s + 0{,}05\ PC_u + 0{,}2\ PW_e + PZ_{ta} \tag{5.7}$$



Rys. 5.5. Kryteria oceny ofert – 4 przetarg Kolei Mazowieckich

Oznacza to, że w porównaniu do przetargu trzeciego, zrezygnowano całkowicie z zastosowania kryterium dotyczącego czasu ładowania akumulatorów. Dodatkowo większy nacisk położono na wagę dla drugiego kryterium cena za pojazd (wzrost z 30% na 40%). Również zwiększono wagę dla kryterium cena za serwis (wzrost wagi z 20% do 25%). Zmniejszono natomiast wagę dla kryterium efektywność napędu z 25% do 20%. W tym postępowaniu oferty złożyło trzech wykonawców. Postępowanie zostało unieważnione, ponieważ wszystkie oferty przewyższały kwotę, którą zamawiający zamierzał przeznaczyć na sfinansowanie zamówienia, co w świetle przepisów PZP jest uzasadnieniem do unieważnienia postępowania.

Podsumowując, niestety mimo ambitnych planów KM, żadne z postępowań nie zakończyło się podpisaniem umowy. Jak wynika z analizy [103], głównymi przyczynami niepowodzeń były znaczne koszty jednostkowe pojazdów, brak krajowych doświadczeń w budowie i homologacji tego typu jednostek oraz trudności w pozyskaniu dostawców odpowiednich komponentów – przede wszystkim akumulatorów trakcyjnych o dużej pojemności energetycznej. Innym istotnym problemem okazał się brak infrastruktury

ładowania, która w Polsce nie jest jeszcze zintegrowana z systemem kolejowym. Stworzenie punktów szybkiego ładowania wymagałoby modernizacji stacji końcowych i wprowadzenia systemów zarządzania energią. Pomimo braku finalizacji przetargów, działania Kolei Mazowieckich można uznać za ważny krok w procesie przygotowania rynku – zarówno pod względem technicznym, jak i prawnym. Zainicjowały one potrzebę opracowania standardów dotyczących ładowania, serwisowania i certyfikacji taboru akumulatorowego.

W odróżnieniu od napędów akumulatorowych, rozwój technologii wodorowych w Polsce przyjął formę bardziej skoncentrowaną i przemysłowo ukierunkowaną. Najistotniejszym przykładem jest projekt lokomotywy wodorowej SM42-6Dn, opracowanej przez PESA Bydgoszcz (rys. 5.6) [104]. Jest to pierwsza polska lokomotywa napędzana wodorem, a zarazem jedna z pierwszych tego typu jednostek w Europie. Powstała na bazie modernizacji klasycznego modelu SM42 i została wyposażona w układ ogniw paliwowych zasilanych sprężonym wodorem, współpracującym z akumulatorem [105]. Całość sterowana jest przez inteligentny system zarządzania energią, którego działanie umożliwia m.in. rekuperację podczas hamowania [106]. Według danych producenta pojazd osiąga moc 700 kW i może pracować do 24 h bez tankowania [107, 108].



Rys. 5.6. Lokomotywa wodorowa SM42-6Dn 1 [104]

W 2023 r. lokomotywa uzyskała świadectwo dopuszczenia do prób eksploatacyjnych wydane przez UTK. Próby przeprowadzono na bocznicach przemysłowych CIECH Cargo, a następnie w regularnym ruchu pasażerskim na trasie Jelenia Góra-Karpacz, obsługiwanej przez Koleje Dolnośląskie [109]. Projekt ma charakter innowacyjny, gdyż po raz pierwszy w Polsce opracowano pojazd szynowy z ogniwami paliwowymi w pełni krajowej konstrukcji, z zastosowaniem komponentów spełniających europejskie normy bezpieczeństwa. Co istotne, przedsięwzięcie PESA wpisuje się w założenia programu „Kolej na Wodór” oraz krajowej „Strategii Wodorowej 2030”, która przewiduje stopniowe wdrażanie tego typu napędów również w przewozach pasażerskich. Produkcja seryjna zaprezentowanego typu lokomotyw ma rozpocząć się w latach 2026–2027. Równolegle prowadzone są prace nad stworzeniem sieci stacji tankowania wodoru w pobliżu kluczowych węzłów kolejowych, co ma umożliwić eksploatację pojazdów w skali ogólnokrajowej.

6. Metodyka badawcza

Obiektem badań było postępowanie przetargowe oznaczone jako: DT-II.272.2.2023 pt.: „Poprawa mobilności przestrzennej mieszkańców Wielkopolski w publicznym transporcie zbiorowym poprzez zakup nowego taboru kolejowego" [70]. Zamawiającym dla tego postępowania był Urząd Marszałkowski Województwa Wielkopolskiego a jego przedmiotem była dostawa ośmiu sztuk fabrycznie nowych, elektrycznych zespołów trakcyjnych do obsługi tras zelektryfikowanych w ramach wojewódzkich kolejowych przewozów regionalnych wraz z:

- udzieleniem instruktaży technicznych w zakresie obsługi i utrzymania pojazdów osobom wskazanym przez Zamawiającego,
- udzieleniem gwarancji i rozszerzonej rękojmi na dostarczone pojazdy,
- opracowaniem i przekazaniem dokumentacji technicznej,
- udzieleniem licencji na dokumentację techniczną i oprogramowanie.

Zamówienie dotyczyło przedsięwzięcia, na realizację którego Województwo Wielkopolskie wraz z Kolejami Wielkopolskimi Sp. z o.o. ubiegały się o wsparcie z KPO w ramach konkursu KPOD.09.08-IW.02-001/23 ogłoszonego przez Centrum Unijnych Projektów Transportowych (CUPT) [70]. W ramach Projektu założono, że tabor będzie przeznaczony do obsługi połączeń o charakterze regionalnym na terenie województwa wielkopolskiego na określonych trasach, m.in. Poznań–Nowy Tomyśl–Zbąszynek; Poznań–Gniezno–Mogilno oraz Poznań–Września–Konin–Kłodawa–Kutno.

Realizacja przetargu ma umożliwić zwiększenie liczby połączeń i pracy eksploatacyjnej m.in. na wyżej wymienionych relacjach, przy większym komforcie podróży. W dokumentacji przetargowej postępowania Zamawiający określił następujące wymagania [70]:

a) średnie przyspieszenie rozruchu (dla pojazdu o masie eksploatacyjnej w stanie gotowości do pracy i uwzględnieniu 240 pasażerów na miejscach siedzących – zakładana masa pasażera to 70 kg):
   - w zakresie prędkości od 0 do 30 km/h: $\geq 1{,}0$ m/s² lub
   - w zakresie prędkości od 0 do 50 km/h: $\geq 0{,}8$ m/s²;
b) nacisk na oś: ≤ 185 kN/oś;
c) skrajnia: zgodna z PN-EN 15273-2+A1:2017-03E; TSI LOC&PAS (techniczne specyfikacje interoperacyjności dotyczące lokomotyw i wagonów pasażerskich w transporcie kolejowym) i Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12.10.2005 r. w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych – G1 lub G2;
d) układ osi: układ wózkowy, wózki 2-osiowe;
e) wymagana prędkość eksploatacyjna: ≥ 160 km/h;
f) szerokość przejścia: szerokość minimalna w najwęższym miejscu we wnętrzu pojazdu: 600 mm, szerokość przejścia między fotelami: 580 mm;
g) drzwi zewnętrzne: wymaga się dwóch par drzwi na stronę każdego członu;
h) prześwit: minimum 1300 mm;
i) liczba miejsc siedzących: minimum 240 w tym maksymalnie 10 miejsc uchylnych;
j) liczba miejsc stojących: minimum 280 miejsc przy założeniu 4 osoby/m^2;

k) układ siedzeń: układ 2 + 2 w rzędzie uwzględniający ustawienie naprzeciwległe (min. 16 i maks. 25 układów naprzeciwległych w całym pojeździe) i szeregowe; w części wyznaczonej do przewozu rowerów dopuszcza się układ siedzeń jednorzędowy;
l) rozmieszczenie miejsc siedzących wg TSI PRM (*Technical Specifications for Interoperability Persons with Reduced Mobility)* i UIC 567 – załącznik C; podziałka siedzeń min. 1800 mm dla układu naprzeciwległego i min. 800 mm dla układu szeregowego; wymiar podziałki mierzony na wysokości zagłówka między tylnymi powierzchniami oparć foteli; szerokość przejścia między siedzeniami – min. 580 mm;
m) podłokietniki: dwa – stały od strony ściany i ruchomy od strony przejścia;
n) wysokość podłogi: 760–800 mm nad poziomem główki szyny;
o) udział niskiej podłogi: min. 80%;
p) przedział dla obsługi pokładowej pociągu: obu członach skrajnych, w obszarze czterech foteli naprzeciwległych należy wydzielić przedział służbowy dla obsługi pociągu;
q) liczba miejsc na rowery: co najmniej 8 rowerów (min. 4 stojaki w jednej strefie i min. 4 stojaki w drugiej strefie) w pozycji pionowej oraz poziomej; po jednej strefie w członach skrajnych; miejsca dla niepełnosprawnych nie mogą znajdować się w przestrzeni przeznaczonej do przewozu rowerów zgodnie z TSI PRM;
r) liczba kabin WC – dwie toalety, w tym jedna zgodna z TSI PRM;
s) minimalny promień łuku: 150 m w warunkach warsztatowych, 100 m przy prędkości pojazdu do 10 km/h;
t) drzwi boczne do kabiny maszynisty: dopuszczalne;
u) automaty biletowe: 3 automaty biletowe, nie dopuszcza się instalowania biletomatów w przedsionkach;
v) kurtyny powietrzne: zabudowane przy wszystkich drzwiach zewnętrznych wejściowych do przestrzeni pasażerskiej (umiejscowione nad drzwiami lub z boku drzwi).

W dokumentacji przetargowej [70] określono ponadto kryteria oceny ofert:

a) cena brutto: waga 60%, wg wzoru:

$$C = \frac{C_n}{C_o} \cdot 60 \tag{6.1}$$

gdzie:
C – liczba punktów w kryterium cena,
C_n – najmniejsza cena spośród ocenianych ofert,
C_o – cena oferty ocenianej.

b) długość okresu gwarancji i rozszerzonej rękojmi za wady: waga 30%, wg wzoru (6.2), z tym, że min. okres gwarancji to 60 miesięcy, maks. okres gwarancji to 96 miesięcy:

$$G = \frac{G_o}{G_{max}} \cdot 30 \tag{6.2}$$

gdzie:
G – liczba punktów w kryterium długość okresu gwarancji i rozszerzonej rękojmi za wady na cały pojazd oraz dokumentację techniczną,
G_o – długość okresu gwarancji i rozszerzonej rękojmi za wady na cały pojazd oraz dokumentację techniczną w ofercie ocenianej (w miesiącach),

G_{max} – maksymalna długość okresu gwarancji i rozszerzonej rękojmi za wady na cały pojazd oraz dokumentację techniczną spośród wszystkich ocenianych ofert (w miesiącach).

c) masa eksploatacyjna w stanie gotowości do pracy (bez pasażerów): waga 10%, wg wzoru (10). W przypadku przekroczenia zadeklarowanej w ofercie masy pojazdu, Zamawiający oświadczył, iż dostarczony do odbioru pojazd nie zostanie przez Zamawiającego odebrany.

$$M = \frac{M_n}{M_o} \cdot 10 \tag{6.3}$$

gdzie:

M – liczba punktów w kryterium masa eksploatacyjna w stanie gotowości do pracy (bez pasażerów),

M_o – masa eksploatacyjna w stanie gotowości do pracy (bez pasażerów) w ofercie ocenianej (w tonach z dokładnością do 1 tony),

M_n – najniższa masa eksploatacyjna w stanie gotowości do pracy (bez pasażerów) spośród wszystkich ocenianych ofert (w tonach z dokładnością do 1 tony).

Według procedury najlepsza oferta przedstawiać będzie najkorzystniejszy stosunek jakości do ceny tj. za najkorzystniejszą uznana zostanie oferta, która uzyska największą sumaryczną liczbę punktów w ramach kryteriów oceny ofert oraz spełni pozostałe postawione w SWZ warunki. Przedmiotowa wartość punktowa oferty jest wyliczana wg wzoru:

$$\text{Liczba punktów} = C + G + M \tag{6.4}$$

W dokumentacji przetargowej opublikowano ponadto inne, dodatkowe informacje, wymagane przepisami PZP, które są niezbędne do złożenia oferty spełniającej wymagania Zamawiającego. Najważniejsze z nich to: tryb udzielenia zamówienia, warunki udziału (techniczne i zawodowe), wymagania dotyczące sytuacji ekonomicznej i finansowej Wykonawcy, informacje dotyczące zabezpieczenia należytego wykonania umowy, wadium, kary, terminy dostaw, podstawy wykluczenia, wykaz środków dowodowych, sposób oraz termin składania ofert, projektowane postanowienia umowy oraz środki ochrony prawnej.

Ponadto przedmiot zamówienia realizowany jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności i musi być zgodny z zasadą DNSH (*do no significant harm* – nie czyń znaczącej szkody). Zastosowane rozwiązania powinny być zgodne z każdym z sześciu celów środowiskowych zasady DNSH:

- łagodzenie zmian klimatu,
- adaptacja do zmian klimatu,
- odpowiednie użytkowanie i ochrona zasobów wodnych i morskich,
- gospodarka o obiegu zamkniętym, w tym zapobieganie powstawaniu odpadów i recykling,
- zapobieganie i kontrola zanieczyszczeń powietrza, wody lub ziemi,
- ochrona i odtwarzanie bioróżnorodności i ekosystemów.

7. Narzędzie doboru parametrów pojazdu do potrzeb ofertowania

7.1. Charakterystyka narzędzia

Podczas realizacji rozprawy doktorskiej opracowano autorskie narzędzie konfiguracji pojazdu szynowego. Zostało ono przygotowane zgodnie z wymaganiami:

- terminologii inżynierii systemów,
- zarządzania wymaganiami i zarządzania jakością wg norm takich jak: IRIS ISO/TS 22163 (międzynarodowa norma zarządzania jakością dla przemysłu kolejowego, bazująca na ISO 9001),
- ISO 15288 (*System life cycle processes* – międzynarodowy standard definiujący procesy cyklu życia systemów, tworzący wspólne ramy dla inżynierii systemów i oprogramowania od koncepcji po wycofanie z eksploatacji),
- TSI – *Technical Specifications for Interoperability* oraz dyrektyw UE dotyczący zamówień publicznych (2014/24/EU) [110].

Procedura działania narzędzia została przygotowana z uwzględnieniem współczesnych wymagań dotyczących zrównoważonego rozwoju i zarządzania cyklem życia obiektu. Normy IRIS ISO/TS 22163 oraz ISO 15288, mimo że nie definiują bezpośrednio wymagań dotyczących wyznaczania śladu węglowego, umożliwiają integrację procesów związanych z analizą środowiskową oraz oceną LCA/LCC (*Life Cycle Assessment* – analiza cyklu życia/*Life Cycle Cost* – koszty cyklu życia). Uzupełnieniem tych wymagań są zapisy TSI dotyczące efektywności energetycznej pojazdów oraz dyrektywy 2014/24/EU, dopuszczającej uwzględnianie kosztów środowiskowych i emisji gazów cieplarnianych w analizie kosztu cyklu życia w postępowaniach przetargowych.

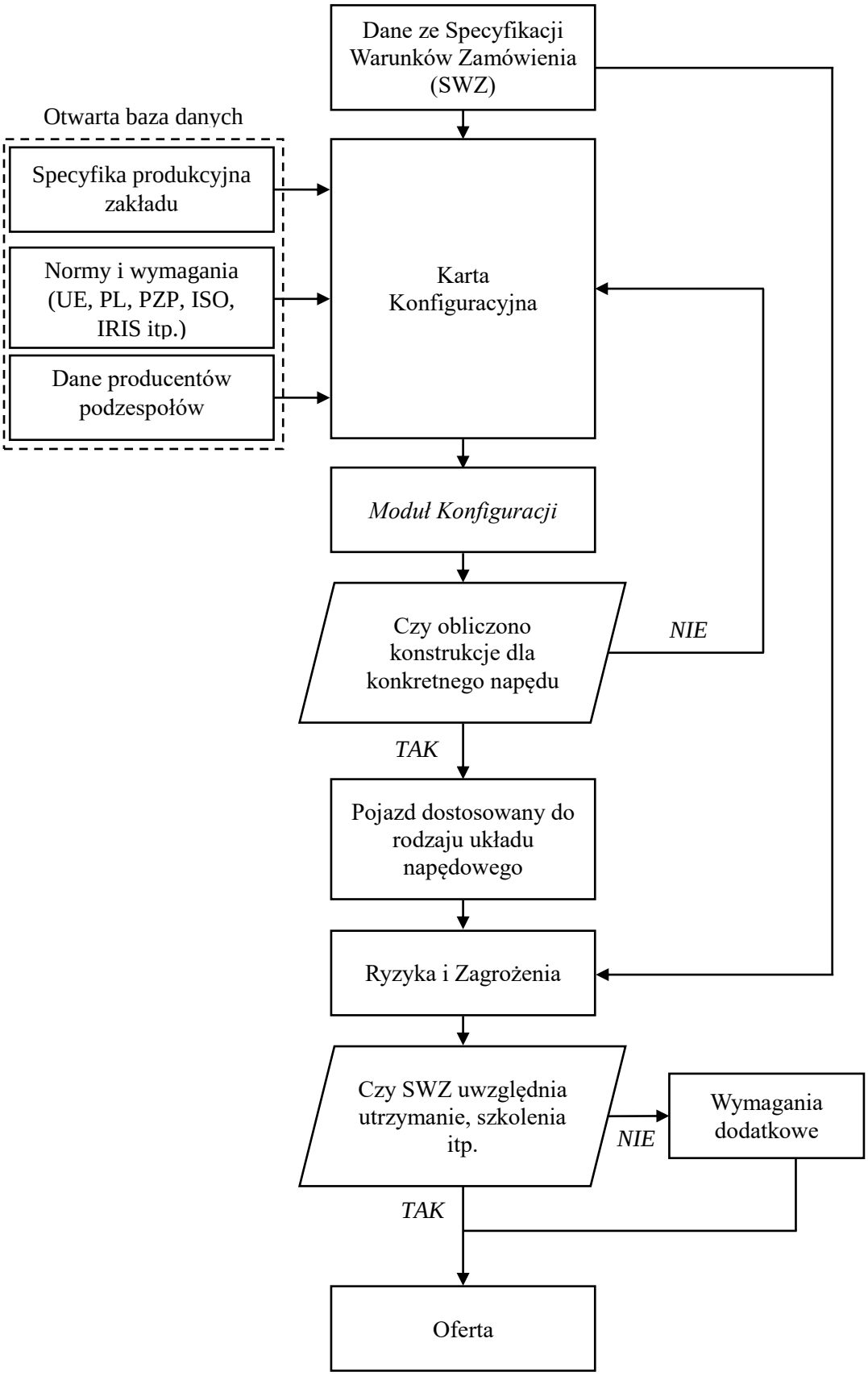
Opracowany konfigurator pojazdu odpowiada logice normy ISO/TS 22163, która z założenia musi zidentyfikować potrzeby i wymagania klienta, przeanalizować ich wykonalność techniczną, ekonomiczną i czasową oraz udokumentować konfigurację produktu i jej warianty (tab. 7.1).

Tabela 7.1. Powiązanie wymagań wg ISO/TS 22163 z konfiguracją pojazdu

Etap procesu wg ISO/TS 22163	Opis działań	Konfigurator pojazdu
Analiza wymagań klienta	Określenie potrzeb w zakresie parametrów pojazdu (np. moc, masa, zasięg, typ napędu)	Automatyczne odwzorowanie wymagań w bazie danych konfiguratora
Przygotowanie oferty	Opracowanie konfiguracji techniczno-ekonomicznej	Generowanie wariantów konfiguracji pojazdu spełniających kryteria
Walidacja oferty	Sprawdzenie zgodności z normami, możliwościami produkcyjnymi i wymaganiami ISO/TS 22163	Wbudowany moduł walidacji parametrów technicznych i logistycznych
Przegląd kontraktu	Ocena ryzyka projektowego, kosztów i terminów	Raportowanie wskaźników procesu

Pojazd szynowy, w zależności od konfiguracji i przeznaczenia, zbudowany jest z kilkunastu tysięcy elementów. Proponowane narzędzie uwzględnia szereg składowych

i powiązanych między nimi zależności. Schemat ideowy funkcjonowania narzędzia przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Schemat ideowy narzędzia doboru parametrów pojazdu do potrzeb ofertowania

Pierwszym elementem tworzonego narzędzia jest karta konfiguracyjna, w której zbierane są informacje z SWZ oraz otwartej bazy danych, uwzględniającej możliwości produkcyjne zakładu, aktualne wytyczne legislacyjne, a także dane producentów podzespołów. Baza danych jest bieżąco aktualizowana i rozwijana w zakresie nowoczesnych rozwiązań technologicznych. Zebrane dane przetwarzane są w module konfiguracji, który służy do wyznaczania parametrów użytkowych, ekonomicznych i ekologicznych. Stanowi on główny element instrumentu wspierającego proces wdrożeniowy w ramach projektowania pojazdów szynowych o zróżnicowanej specyfikacji.

Jeżeli specyfikacja SWZ nie definiuje rodzaju układu napędowego to konfiguracja pojazdu w pierwszej iteracji jest definiowana jako obiekt, w którym napęd stanowi czarna skrzynka. Wyznaczana jest jego moc i zasięg, ale nie definiuje się zmian konstrukcyjnych wymaganych w związku z jego użyciem. Definiuje się następujące rodzaje napędów:

- elektryczny (trakcyjny),
- hybrydowy – spalinowo-elektryczny,
- elektryczny (ogniwo paliwowe),
- elektryczny (akumulatory).

Dopiero druga iteracja dla kroku związanego z działaniami w Karcie Konfiguracyjnej, pozwala na dostosowanie konstrukcji do danego rodzaju napędu. Na podstawie tych danych i informacji zawartych w SWZ dokonuje się analizy w zakresie wymagań dodatkowych (obsługi serwisowej, utrzymania pojazdu itp.).

W kolejnym etapie definiuje się zagrożenia związane ze zmianami rynkowymi cen surowców, kursami walut i innymi zmiennymi mającymi wpływ na cenę i jakość końcowego produktu. W kolejnych podrozdziałach omówiono szczegółowo elementy składające się na nowoopracowane narzędzie doboru parametrów pojazdu do potrzeb ofertowania.

7.2. Źródła danych wejściowych

Do opracowanego narzędzia w pierwszej kolejności muszą zostać dostarczone dane pochodzące z dokumentacji postępowania przetargowego i związanego z nim SWZ (rozdz. 6). Następnie schemat postępowania wymaga uzyskania informacji z otwartej bazy danych. Składa się ona z wcześniej omówionych norm i standardów (UE, PL, ISO, IRIS itp.), informacji od poddostawców, a także uwzględnia specyfikę i możliwości produkcyjne zakładu. Dane wejściowe do otwartej macierzy danych dostarczane są za pomocą programu Industrial and Financial Systems (IFS Applications 9), który reprezentuje zaawansowany system klasy ERP (*Enterprise Resource Planning* – planowanie zasobów przedsiębiorstwa). Wykorzystana wersja to dziewiąta generacja zintegrowanego pakietu aplikacyjnego, który wspiera zarządzanie zasobami przedsiębiorstwa w ujęciu kompleksowym, wielomodułowym i zorientowanym procesowo. IFS Applications 9 stanowi narzędzie umożliwiające efektywne planowanie, monitorowanie i kontrolowanie działalności operacyjnej, finansowej oraz strategicznej przedsiębiorstwa [111, 112]. Ponadto program oferuje wielowarstwowy system raportowania, który umożliwia użytkownikom dostęp do rozbudowanych raportów operacyjnych i podręcznych. W kontekście opracowanego konfiguratora system IFS Applications 9 pełni rolę podstawowego źródła danych referencyjnych opisujących zarówno

konstrukcję pojazdów szynowych, jak i proces ich wytwarzania. Z systemu pozyskiwane są między innymi informacje dotyczące parametrów technicznych zespołów i podzespołów, zestawienie materiałowe (*Bill of Materials,* BOM), technologii wytwarzania, katalogów części, danych materiałowych, czasów operacji technologicznych, a także danych kosztowych i logistycznych związanych z realizacją projektu.

Istotnym źródłem informacji są również dane historyczne dotyczące wcześniej zrealizowanych konfiguracji oraz projektów, które umożliwiają identyfikację sprawdzonych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Dane te stanowią podstawę do budowy otwartej macierzy danych wykorzystywanej przez konfigurator oraz pozwalają na automatyczne ograniczenie przestrzeni rozwiązań wyłącznie do wariantów możliwych do realizacji z punktu widzenia możliwości technicznych przedsiębiorstwa. W praktyce oznacza to możliwość wykorzystania zgromadzonych w systemie ERP danych dotyczących m.in. liczby członów pojazdu, rodzaju napędu, parametrów układu trakcyjnego, wyposażenia wnętrza, systemów bezpieczeństwa, wyposażenia dodatkowego oraz pozostałych cech technicznych stanowiących zmienne wejściowe procesu konfiguracji. Dzięki wykorzystaniu danych zgromadzonych w systemie IFS Applications 9 konfigurator bazuje na zweryfikowanej wiedzy przedsiębiorstwa, obejmującej rzeczywiście stosowane rozwiązania konstrukcyjne, technologiczne i organizacyjne. Pozwala to na zapewnienie zgodności proponowanych konfiguracji z możliwościami produkcyjnymi przedsiębiorstwa oraz ogranicza ryzyko wygenerowania wariantów niemożliwych do wykonania.

Kolejna, szeroko zastosowana w otwartej bazie danych aplikacja to Nawigator Projektów (*Project Navigator*), będący interaktywnym narzędziem wizualizacji, które wspiera zarządzanie projektami złożonymi w ujęciu procesowym i wielowymiarowym. Stanowi centralny interfejs do: planowania, monitorowania, harmonogramowania i kontrolowania całego cyklu życia projektu. IFS Applications 9, dzięki modularnej architekturze i wszechstronnym narzędziom integracyjnym, umożliwia efektywny transfer danych do narzędzi analitycznych takich jak arkusze kalkulacyjne. Pozwala to na zaawansowaną analizę, eksplorację danych oraz przygotowywanie własnych raportów i wizualizacji, co wspiera procesy decyzyjne. Takie podejście wpisuje się we wspomaganie decyzji wielokryterialnych (MCDM – *Multi Criteria Decision Making*) oraz umożliwia optymalizację procesów planistycznych [113, 114].

Należy podkreślić, że system IFS Applications 9 nie stanowi jedynego źródła danych wykorzystywanych przez opracowany konfigurator. Ze względu na uwzględnienie w procesie konfiguracji kryteriów środowiskowych konieczne jest wykorzystanie również specjalistycznych narzędzi przeznaczonych do obliczania oraz raportowania śladu węglowego organizacji i wyrobów. Przykładami takich rozwiązań są programy NeoGage Carbon Footprint, OperatFB oraz Envirly, które wspierają przedsiębiorstwa w gromadzeniu, przetwarzaniu i analizie danych dotyczących emisji gazów cieplarnianych zgodnie z międzynarodowymi standardami raportowania, w szczególności GHG Protocol (*Greenhouse Gas Protocol*, czyli najbardziej rozpowszechniony na świecie standard służący do obliczania i raportowania emisji gazów cieplarnianych) oraz normą ISO 14067 dotyczącą śladu węglowego produktów. Narzędzia te umożliwiają wyznaczanie wskaźników emisji dla materiałów, procesów technologicznych, transportu oraz zużycia energii, dostarczając dane niezbędne do przeprowadzenia oceny środowiskowej różnych wariantów konfiguracji

pojazdu szynowego. Integracja danych pochodzących z systemu ERP oraz wyspecjalizowanych platform środowiskowych pozwala na rozszerzenie procesu konfiguracji o kryteria zrównoważonego rozwoju, dzięki czemu opracowane narzędzie wspiera podejmowanie decyzji nie tylko z punktu widzenia wymagań technicznych i ekonomicznych, lecz również środowiskowych. W rezultacie otwarta macierz danych wykorzystywana przez konfigurator stanowi zbiór informacji pochodzących z wielu wzajemnie uzupełniających się źródeł, obejmujących zarówno systemy klasy ERP, jak i dedykowane platformy środowiskowe, co zwiększa kompletność danych wejściowych oraz umożliwia prowadzenie wielokryterialnej analizy wariantów konfiguracji pojazdu szynowego.

Otwarta baza danych oparta jest na arkuszu kalkulacyjnym oferującym elastyczne środowisko do budowy modelu konfiguracyjnego, które może wspierać:

- dobór wariantów technicznych (m.in. liczba członów, typ napędu, układ drzwi, typ klimatyzacji),
- szczegółowy opis układu napędowego (m.in. typ, konfiguracja, cechy środowiskowe),
- wyliczanie wartości parametrów zbiorczych (masa całkowita, długość pojazdu, liczba miejsc siedzących i stojących),
- symulację wpływu zmian konfiguracji na ocenę w przetargu (zgodnie z kryteriami SWZ)
- porównanie alternatywnych wariantów w odniesieniu do wartości punktowej i kosztowej.

Zastosowanie arkusza kalkulacyjnego jako otwartej macierzy danych w konfiguratorze pojazdu szynowego jest bardzo praktyczne, co potwierdzają różne studia przypadków i analizy systemów transportowych. Na przykład w pracy [115] autorzy pokazali, że parametry konfiguracji pojazdów mogą być osadzane w arkuszu Excel w sposób, który umożliwia użytkownikom łatwe wprowadzanie zmian i dostosowywanie modeli obliczeniowych emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa. Podobnie autorzy pracy [116] podkreślili rolę programu Excel jako narzędzia do analizy danych transportowych, integrując je z systemami GIS (*Geographic Information System* – system informacji geograficznej) i bazami danych PostgreSQL (*Structured Query Language* – system komunikacji z bazami danych), co umożliwia analizę i wizualizację dużych macierzy danych, takich jak OD matrix (*origin-destination*) w transporcie szynowym. Dodatkowo w pracy [117] autor opisał wykorzystanie przywoływanego narzędzia w połączeniu z automatycznym gromadzeniem danych w celu tworzenia macierzy OD w systemach kolejowych.

Zbudowana otwarta macierz danych pełni rolę elastycznej, łatwo dostępnej platformy do zarządzania danymi w konfiguratorach pojazdów szynowych – zarówno do modelowania parametrów technicznych, jak i do analiz operacyjnych. Kluczową korzyścią jest możliwość integracji z innymi systemami (np. SQL, GIS) i łatwość edycji przez inżynierów lub operatorów. Ponadto zastosowanie tak przygotowanych danych jest uzasadnione funkcjonalnie i technicznie, szczególnie na etapie ofertowym, koncepcyjnym lub kosztorysowym. Umożliwia bezpośrednie uwzględnienie kryteriów oceny ofert z dokumentacji przetargowej, co przekłada się na lepszą zgodność ofert z oczekiwaniami zamawiającego oraz przyczynia się do transparentności i obiektywizmu w procesie przygotowania oferty i doboru parametrów pojazdu. Zbudowany na takich założeniach, zaawansowany arkusz kalkulacyjny jako otwarta baza danych stanowi wszechstronne narzędzie wspomagające analityczne prace inżynierskie, zarówno w kontekście obliczeń

numerycznych, jak i modelowania procesów decyzyjnych. Jego przydatność w środowisku inżynierskim wynika z kilku kluczowych właściwości:

- integracja z metodami badań operacyjnych – wspiera implementację klasycznych metod badań operacyjnych, takich jak: programowanie liniowe i nieliniowe, analiza kosztów i korzyści, optymalizacja zasobów, symulacje Monte Carlo. Dzięki temu możliwe jest wspomaganie procesów decyzyjnych w projektowaniu, produkcji, logistyce czy zarządzaniu systemami technicznymi;
- automatyzacja i skalowalność – dzięki językowi VBA (Visual Basic for Applications), program pozwala na automatyzację powtarzalnych procesów obliczeniowych, tworzenie interaktywnych modeli oraz integrację z innymi systemami informatycznymi. To czyni go narzędziem skalowalnym, które może być dostosowane do potrzeb zarówno małych projektów, jak i dużych systemów inżynierskich.

7.3. Karta konfiguracyjna

Współczesny sektor kolejowy charakteryzuje się rosnącą złożonością procesów projektowych, zróżnicowaniem wymagań zamawiających oraz dynamicznymi zmianami technologicznymi. Tradycyjne narzędzia oparte wyłącznie na klasyfikacji grup konstrukcyjnych nie umożliwiają zintegrowanego podejścia do tych zagadnień, gdyż nie uwzględniają aspektów ekonomicznych, ekologicznych i eksploatacyjnych, które obecnie stanowią istotny element opisu przedmiotu zamówienia i kryteriów wyboru oferty.

Dla producentów, rynek kolejowy charakteryzuje się dużą zmiennością technologii, modularnością konstrukcji oraz globalizacją łańcucha dostaw. Dlatego konieczne jest wykorzystanie narzędzi cyfrowych i parametrycznych, które umożliwiają szybkie zestawienie wariantów konstrukcyjnych w odpowiedzi na wymagania zamawiającego, pozwalają na automatyczną weryfikację zgodności z wymaganiami technicznymi i normatywnymi oraz wspierają procesy zarządzania cyklem życia produktu i modelowania informacji o pojeździe [118, 119].

W celu poprawnego działania narzędzia, będącego przedmiotem rozprawy doktorskiej, opracowano kartę konfiguracyjną pojazdu szynowego, która stanowi integralny element pracy wdrożeniowej. Celem jej opracowania było zapewnienie spójnego i usystematyzowanego sposobu gromadzenia, porządkowania oraz weryfikacji danych konfiguracyjnych, umożliwiającego prowadzenie analiz porównawczych oraz oceny poprawności procesu konfiguracji. Karta konfiguracyjna została podzielona na trzy zasadnicze części, odpowiadające kolejnym etapom procesu projektowo-analitycznego.

Część pierwsza zawiera zestawienie podstawowych parametrów identyfikacyjnych i eksploatacyjnych pojazdu (rys. 7.2). Zaprezentowane dane odnoszą się do przetargu omówionego w rozdziale 6.

Część druga obejmuje graficzną koncepcję przestrzennego rozplanowania wnętrza pojazdu, opracowaną z wykorzystaniem narzędzi wspomagających projektowanie komputerowe (rys. 7.3). Graficzna prezentacja obiektu umożliwia analizę ergonomii, funkcjonalności i bezpieczeństwa użytkowania, a także ocenę zgodności z obowiązującymi normami technicznymi i standardami projektowania pojazdów szynowych.

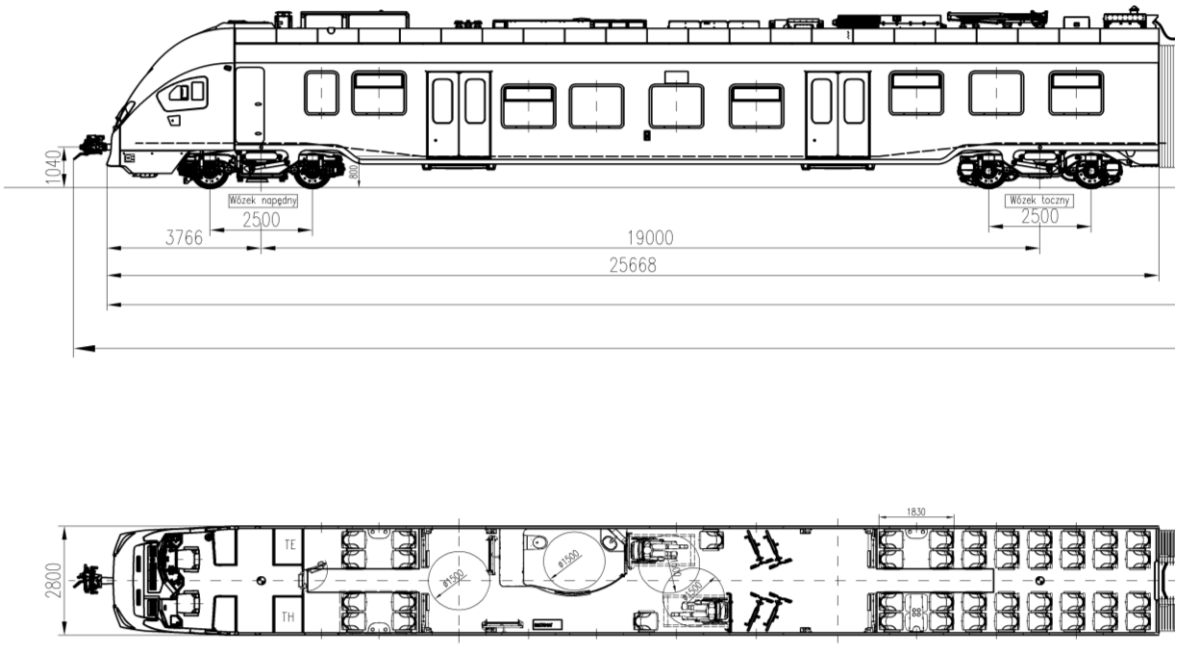
Karta konfiguracyjna pojazdu szynowego				
Zestawienie parametrów				
Typ pojazdu		**EZT**	**Opracował**	**M. Frankowski**
Liczba pojazdów		**8**	**Zatwierdził**	
Wymagania SWZ		**Człon**	**Opis**	
1	**Podstawowe parametry pojazdu**			
1.1	Liczba członów	Pojazd	4	
1.2	Całkowita długość pojazdu	Pojazd	96 850 mm	
1.3	Długość członu	Człon M1	25 668 mm	
1.4	Długość członu	Człon M2	25 668 mm	
1.5	Długość członu	Człon M3	20 904 mm	
1.6	Długość członu	Człon M4	20 904 mm	
1.7	Szerokość pudła	Pojazd	2 800 mm	
1.8	Masa służbowa	Pojazd	186 t (obliczeniowa)	
1.9	Nacisk na oś	Pojazd	≤ 185 kN/oś	
1.10	Układ osi	Pojazd	Bo'2' + 2'2' + 2'2' + 2'Bo'	
1.11	Całkowita pojemność pojazdu	Pojazd	ok 564 pasażerów	
1.12	Pojemność członu	Człon M1	144 pasażerów	
1.13	Pojemność członu	Człon M2	144 pasażerów	
1.14	Pojemność członu	Człon M3	138 pasażerów	
1.15	Pojemność członu	Człon M4	138 pasażerów	
1.16	Liczba miejsc siedzących	Pojazd	240	
1.17	Liczba miejsc stojących	Pojazd	ok 324	
1.18	Wysokość podłogi w strefie wejścia	Pojazd	800 mm	
1.19	Pochylenie podłogi	Pojazd	12% (zgodnie z TSI)	
1.20	Szerokość przejścia między fotelami	Pojazd	580 mm	
1.21	Skrajnia	Pojazd	PN-EN 15273 - G2	
1.22	Prędkość konstrukcyjna	Pojazd	160 km/h	
1.23	Prędkość eksploatacyjna	Pojazd	160 km/h	

Rys. 7.2. Widok karty konfiguracyjnej – część 1: zestawienie parametrów

Część trzecia obejmuje szczegółowy opis konfiguracji technicznej pojazdu, opracowany w formie rozbudowanej listy kontrolnej umożliwiającej ocenę kompletności i poprawności przeprowadzonego procesu (tab. 7.2). Zastosowanie listy kontrolnej pozwala na przeprowadzenie systematycznej weryfikacji, eliminację potencjalnych niezgodności oraz zapewnienie spójności pomiędzy konfiguracją techniczną a założeniami projektowymi. Lista kontrolna opracowywana jest zgodnie z grupami konstrukcyjnymi, szczegółowo omówionymi w kolejnym podrozdziale.

Opracowana karta konfiguracyjna pełni zatem funkcję zarówno narzędzia badawczego, jak i instrumentu wspierającego proces wdrożeniowy w ramach projektowania pojazdów szynowych o zróżnicowanej specyfikacji. Jej zastosowanie umożliwia nie tylko standaryzację sposobu dokumentowania konfiguracji, ale również usprawnienie komunikacji między

zespołami projektowymi, technologicznymi i produkcyjnymi, co stanowi istotny element praktycznej implementacji koncepcji konfiguratora pojazdów w środowisku przemysłowym.



Rys. 7.3. Fragment graficznej koncepcji rozplanowania wnętrza w karcie konfiguracyjnej (część 2)

Tabela 7.2. Widok fragmentu listy kontrolnej dla wybranej grupy konstrukcyjnej (część 3)

Nr grupy	Grupa konstrukcyjna	Podgrupa konstrukcyjna	Pole kontrolne
1	Konstrukcja nośna pojazdu		
		Konstrukcja stalowa	☑
		Poszycie dachu	☑
		Zgarniacz	☑
		Zderzaki crash	☑
		Absorbery crash	☑
		Szkielet kabiny maszynisty	☑
		Czoło pojazdu	☑
		Oświetlenie zewnętrzne dolne	☑
		Oświetlenie zewnętrzne górne	☑
		Przejście międzyczłonowe	☑
		Sprzęg czołowy automatyczny	☑
		Sprzęg międzyczłonowy	☑
		Owiewki górne	☑
		Sprzęg ratunkowy	☑

W dalszej części pracy przedstawiono rozważania oparte na koncepcji wykorzystania konfiguratora pojazdów szynowych jako narzędzia wspomagającego proces projektowania wariantowego oraz weryfikacji technicznej. Karta konfiguracyjna została opracowana w celu uporządkowania wymagań wejściowych oraz ich przekształcenia w jednoznaczny zestaw parametrów wykorzystywanych w dalszych etapach konfiguracji. Dzięki temu narzędzie to pozwala na szybkie generowanie i porównywanie wariantów konstrukcyjnych, przy jednoczesnym zachowaniu spójności danych i ograniczeniu ryzyka popełnienia błędów konfiguracyjnych. W procesie badawczym konfigurator pełnił funkcję platformy integrującej dane projektowe, technologiczne i eksploatacyjne, stanowiąc podstawę do opracowania modeli analitycznych oraz symulacyjnych. W pracy zastosowano podejście iteracyjne, obejmujące cykle: definiowania wymagań, parametryzacji elementów, generowania wariantów, weryfikacji technicznej oraz analizy wyników. Każdy z tych etapów został powiązany z odpowiednimi sekcjami karty konfiguracyjnej, co umożliwiło zachowanie ciągłości informacyjnej w całym procesie. Weryfikacja poprawności działania konfiguratora odbywała się poziomie testów funkcjonalnych obejmujących sprawdzenie logiki zależności między modułami.

7.4. Parametry konfiguracyjne

Kolejnym etapem prac było określenie zestawu parametrów konfiguracyjnych, które stanowią podstawowe zmienne wejściowe dla opracowywanego konfiguratora pojazdu szynowego. Etap ten miał na celu sklasyfikowanie i precyzyjne zdefiniowanie parametrów technicznych, funkcjonalnych i ekonomicznych, determinujących strukturę oraz logikę działania opracowanego narzędzia.

Zgodnie z przyjętą strukturą logiczną, w pierwszej kolejności dokonuje się mapowania parametrów ujętych w karcie konfiguracyjnej na strukturę danych konfiguratora. Analiza ta pozwala na wyodrębnienie grup parametrów o charakterze:

- techniczno-konstrukcyjnym, obejmującym m.in. wymiary gabarytowe, liczbę osi, typ napędu, układ drzwiowy, liczbę miejsc siedzących i stojących, systemy bezpieczeństwa oraz wyposażenie dodatkowe,
- eksploatacyjnym, dotyczącym takich aspektów jak prędkość maksymalna, zasięg operacyjny, zużycie energii, emisja zanieczyszczeń i hałasu czy ergonomia kabiny maszynisty,
- funkcjonalnym, odnoszącym się do możliwości adaptacji wnętrza, konfiguracji przestrzeni pasażerskiej i dostępności dla osób z ograniczoną mobilnością,
- ekonomicznym, związanym z kosztami wytworzenia, utrzymania,
- ekologicznym związanym z oceną cyklu życia pojazdu.

Równolegle przeprowadzana jest analiza wymagań formalnych i kryteriów przetargowych, które zgodnie z dokumentacją postępowania stanowią element oceny ofert. Parametry te, mimo że nie odnoszą się bezpośrednio do konstrukcji pojazdu, mają kluczowe znaczenie dla oceny konkurencyjności rozwiązań i zostały zintegrowane z modelem decyzyjnym konfiguratora. Do grupy tych parametrów zaliczono w szczególności:

- cenę jednostkową pojazdu, stanowiącą podstawowe kryterium ekonomiczne,

- długość okresu gwarancji i rozszerzonej rękojmi za wady, traktowaną jako wskaźnik jakości i niezawodności rozwiązania,
- masę eksploatacyjną pojazdu w stanie gotowości do pracy (bez pasażerów), będącą parametrem technicznym o istotnym wpływie na zużycie energii, dynamikę ruchu i oddziaływanie na infrastrukturę torową.

Każdy z wymienionych parametrów został następnie poddany procesowi definicji wymagań obejmującemu:

1. Określenie zakresu dopuszczalnych wartości (lub wariantów) danego parametru,
2. Wskazanie zależności pomiędzy parametrami, wpływających na logikę działania konfiguratora (np. relacja masa–napęd–liczba osi),
3. Powiązanie parametrów z odpowiednimi sekcjami karty konfiguracyjnej w celu zapewnienia spójności pomiędzy dokumentacją projektową a modelem systemowym konfiguratora.

Opracowany w ten sposób zestaw parametrów stanowił rdzeń logiczny konfiguratora pojazdu szynowego, umożliwiający jego dalsze rozbudowanie o funkcje analizy wariantowej, oceny kosztowo-jakościowej oraz automatycznej weryfikacji konfiguracji w odniesieniu do wymagań przetargowych.

Szczegółowe zestawienie parametrów technicznych dla badanego Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego (EZT) oraz opis wymagań ogólnych i szczegółowych przedstawiono w tab. 7.3.

Tabela 7.3. Zbiór parametrów konfiguracyjnych

L.p.	Opis	Parametr
1.	Wymagania ogólne	1. Szerokość toru 2. Skrajnia 3. Napięcie zasilania 4. Maksymalny nacisk osi na tor 5. Liczba kabin maszynisty 6. Układ biegowy 7. Wysokość podłogi nad główką szyny 8. Poziom hałasu emitowanego na zewnątrz przez pojazd 9. Maksymalna prędkość eksploatacyjna 10. Układ wnętrza 11. Liczba miejsc 12. Zasilanie w energię elektryczną 13. Układ sterowania pojazdu – wymagania ogólne 14. Toalety 15. Klimatyzacja, ogrzewanie, wentylacja 16. Usprężynowanie
2.	Układ jezdny i napędowy	1. Wózki 2. Napęd 3. Piasecznice 4. Monitorowanie stanu łożysk osi

Tabela 7.2cd. Zbiór parametrów konfiguracyjnych

2.	Układ jezdny i napędowy	5. Minimalny promień łuku 6. Bloki czyszczące
3.	Pudło	1. Oświetlenie zewnętrzne 2. Wycieraczki 3. Lusterka boczne zewnętrzne 4. Sprzęgi końcowe i wewnętrzne 5. Zgarniacze torowe 6. Malatura i oznakowanie 7. Inne wymagania 8. Wytrzymałość konstrukcji pojazdu 9. Bezpieczeństwo bierne 10. Stopnie wysuwane górne 11. Stopnie wysuwane dolne
4.	Przestrzeń pasażerska	1. Podłoga, ściany, sufit 2. Oświetlenie wewnętrzne 3. Ścianki i wiatrołapy 4. Klimatyzacja, ogrzewanie, wentylacja 5. Stoliki, śmietniczki i półki bagażowe 6. Układ siedzeń 7. Fotele pasażerskie 8. Rolety przeciwsłoneczne 9. Miejsca na rowery 10. Miejsca dla niepełnosprawnych na wózkach inwalidzkich 11. Pomosty dla niepełnosprawnych 12. Miejsce dla obsługi pokładowej pociągu 13. Automaty biletowe 14. Kasowniki/czytniki 15. Defibrylatory AED 16. Pętle indukcyjne 17. Tablice pamiątkowe projektu 18. Inne wymagania
5.	Przedziały WC	1. Wymagania ogólne 2. Wymagania szczegółowe wspólne dla toalet 3. Wymagania dodatkowe dla toalety wg TSI PRM
6.	Okna i drzwi	1. Okna przedziału pasażerskiego 2. Okna kabin maszynisty 3. Drzwi wejściowe automatyczne

Tabela 7.2cd. Zbiór parametrów konfiguracyjnych

7.	Kabina maszynisty	1. Wymagania ogólne 2. Podłoga, ściany, sufit. 3. Klimatyzacja, ogrzewanie i wentylacja 4. Drzwi wejściowe do kabiny 5. Szyby czołowe 6. Rolety przeciwsłoneczne 7. Prędkościomierz 8. Oświetlenie kabiny 9. Fotel maszynisty i pomocnika maszynisty 10. Pulpit maszynisty 11. Układ wnętrza kabiny 12. Narzędzia pokładowe i sprzęt przenośny 13. Skrytki do użytku personelu 14. Funkcja kontroli czujności maszynisty 15. System pomiaru i rejestracji parametrów jazdy 16. Pokładowe urządzenia kontroli jazdy 17. Radiostop i łączność radiowa 18. Zbiornik na płyn do spryskiwaczy
8.	Układ hamulcowy i pneumatyczny	1. Układ wytwarzania sprężonego powietrza 2. Układ hamulca 3. Główne wymagania funkcjonalne i wymagania bezpieczeństwa 4. Kontrola hamowania nagłego 5. Kontrola hamowania służbowego 6. Kontrola hamowania bezpośredniego 7. Kontrola hamowania dynamicznego 8. Kontrola hamowania postojowego 9. Hamowanie nagłe 10. Hamowanie służbowe 11. Obliczenia dotyczące pojemności cieplnej 12. Hamulec postojowy 13. Ograniczenie profilu przyczepności koła 14. System zabezpieczenia przed poślizgiem kół 15. Hamulec dynamiczny – układy hamulcowe połączone z trakcją 16. Wskazanie stanu hamowania i awarii 17. Wymagania dla hamulców do celów ratunkowych 18. Sygnał dźwiękowy
9.	Układ elektryczny	1. Pokładowa przetwornica napięcia (3000V/~3x400V) 2. Wyłącznik szybki

Tabela 7.2cd. Zbiór parametrów konfiguracyjnych

9.	Układ elektryczny	3. Pokładowa przetwornica napięcia (3000V/~3x400V) 4. Wyłącznik szybki 5. Bateria akumulatorów 6. Napięcie obwodu sterowania i ładowania akumulatorów 7. Licznik energii elektrycznej 8. Odbierak prądu 9. Instalacja elektryczna 10. Inne wymagania
10.	System pokładowej sieci Ethernet	1. System pokładowej sieci Ethernet 1. Łączność zewnętrzna (wspólny moduł do transmisji danych)
11.	System Informacji Pasażerskiej (SIP)	1. Wymagania ogólne 2. Urządzenia informacji pasażerskiej wizualnej zewnętrznej 3. Urządzenia informacji pasażerskiej wizualnej wewnętrznej 4. Emisja reklam 5. Instalacja rozgłoszeniowa
12.	System monitoringu	1. Wymagania ogólne 2. Kamery Rejestratory 3. Terminal 4. Oprogramowanie 5. Inne wymagania
13.	Inne wymagania	1. System zliczania pasażerów 2. System lokalizacji pojazdu 3. Diagnostyka 4. Dynamiczny rozkład jazdy 5. Środki do wykrywania / zwalczania pożarów 6. Sprzęg ratunkowy 7. Pozostałe wymagania
14.	Wymagania eksploatacyjne	1. Przebieg między przeglądami poziomu 1-3 2. Minimalny przebieg zespołu do naprawy P4 3. Minimalny przebieg zespołu do naprawy P5 4. Okres życia pojazdu

Po zdefiniowaniu zestawu parametrów konfiguracyjnych wdrażany jest etap konfigurowania właściwego, którego celem jest powiązanie danych konstrukcyjnych, technologicznych i ekonomicznych w zintegrowanym modelu konfiguratora pojazdu szynowego. Etap ten stanowi zasadniczy element wdrożeniowy, umożliwiający praktyczną weryfikację działania konfiguratora.

W ramach tego etapu wykorzystano strukturę konstrukcyjną pojazdu, zorganizowaną zgodnie z logiką hierarchiczną grup, podzespołów i komponentów, odpowiadającą układowi karty konfiguracyjnej (część 3: lista kontrolna) (tab. 7.4).

Dane zestawiono w kolumnach odpowiadających kluczowym aspektom techniczno-ekonomicznym, tj.:

- grupa / podgrupa / zespół / podzespół – klasyfikacja strukturalna elementów pojazdu,
- człon – odniesienie do konkretnego członu pojazdu (M1–M4), zgodnie z częścią 2: rozplanowanie wnętrza,
- opis, oznaczenie – identyfikacja elementu na podstawie wcześniejszych projektów referencyjnych,
- dostawca – wskazanie dostawcy lub producenta podzespołu, jeśli został określony,
- indeks – wewnętrzny symbol katalogowy,
- liczba sztuk na pojazd – liczba jednostek danego komponentu zastosowana w całym pojeździe,
- nakłady całkowite wytworzenia – łączny koszt danego komponentu,
- współczynnik środowiskowy – ekwiwalent CO_2 dla napędu/części w aspekcie wytworzenia, eksploatacji lub naprawy.

Tabela 7.4. Grupy Konstrukcyjne narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego w procesie ofertowania

GK – Grupa Konstrukcyjna		**Opis**
1		Konstrukcja nośna
2		Rodzaj układu napędowego (alternatywnie, do wyboru)
	2.1	Układy energoelektroniki – dla napędu elektrycznego (trakcyjnego), lub
	2.2	Agregat prądotwórczy z wyposażeniem – dla napędu spalinowo-elektrycznego, lub
	2.3	Moduł akumulatorów trakcyjnych z układami pomocniczymi – dla napędu akumulatorowego, lub
	2.4	Moduł ogniw paliwowych z układami pomocniczymi – dla napędu z ogniwami
3		Układ sterowania
4		Wózki
5		Systemy IT: informacji i monitoringu
6		Ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja
7		Przedział pasażerski – wyposażenie
8		Przedział WC dla osób z ograniczoną możliwością poruszania się
9		Przedział WC
10		Kabina maszynisty
11		Systemy bezpieczeństwa
12		Malatura
13		Wyprawka – wykaz części zapasowych

7.5. Moduł konfiguracji

Moduł konfiguracji stanowi najważniejszy element obliczeniowy narzędzia. Został on zaprojektowany w taki sposób, aby umożliwiać interaktywną parametryzację pojazdu w oparciu o zdefiniowane wcześniej moduły funkcjonalne, zgodne z wymaganiami technicznymi, normami branżowymi oraz specyfikacją użytkową odbiorcy. Dzięki temu moduł pozwala na szybkie generowanie i porównywanie wariantów konstrukcyjnych, przy jednoczesnym zachowaniu spójności danych i ograniczeniu ryzyka popełnienia błędów. Pełni on funkcję platformy integrującej dane projektowe, technologiczne i ekonomiczne.

Opracowane narzędzie konfiguracyjne ma charakter innowacyjny, gdyż pozwala wyznaczać zarówno koszty ekonomiczne, jak i środowiskowe. Definiowane są one jako nakłady N_i dla każdej wymienionej wcześniej grupy konstrukcyjnej oraz nakłady dodatkowe N_d. Zatem całkowite nakłady finansowe lub środowiskowe N_c [PLN lub kg CO_2] dla obiektu podczas konfiguracji definiuje się jako:

$$N_c = \sum_{i=1}^{13} N_i + \sum_{i=1}^{13} N_d \tag{7.1}$$

W poszczególnych grupach konstrukcyjnych uwzględnia się wszystkie składowe przewidziane dla danego zbioru:

$$N_i = \sum_j N_j = \sum_j N_{ez,j} + \sum_j N_{ew,j} + \sum_j N_{p,j} \tag{7.2}$$

gdzie:

N_j – nakłady dla j-tego elementu,

$N_{ez,j}$ – nakłady związane z zakupem i dostarczeniem j-tego elementu lub podzespołu z przedsiębiorstw zewnętrznych [PLN lub kg CO_2],

$N_{ew,}$ – nakłady ogólnozakładowe i wydziałowe związane wytworzeniem j-tego elementu lub podzespołu wewnątrz przedsiębiorstwa [PLN lub kg CO_2],

$N_{p,j}$ – nakłady związane z opracowaniem dokumentacji, nakłady inżynieryjne o charakterze jednorazowym, związane z weryfikacją konstrukcji lub adaptacją elementów dla nowego projektu dla j-tego elementu lub podzespołu [PLN lub kg CO_2].

W bazie danych konfiguratora zawarte są często podobne elementy do budowy pojazdu lub całe podzespoły, różniące się parametrami technicznymi, ceną i kosztami środowiskowymi, gwarantujące zbliżoną funkcjonalność. Jeżeli w karcie konfiguracji nie występują dane zawężające wybór rozpatrywanego elementu/podzespołu to moduł konfiguracji automatycznie przyjmuje najtańsze ekonomicznie rozwiązanie. Możliwe jest zdefiniowanie tego parametru na poszukiwanie rozwiązań najprzyjaźniejszych dla środowiska, czyli chrakteryzujących się najmniejszym ekwiwalentem emisji CO_2.

Konstrukcja nośna pojazdu (GK1)

Konstrukcja nośna pojazdu szynowego stanowi zintegrowany układ elementów strukturalnych, których zadaniem jest zapewnienie odpowiedniej sztywności, wytrzymałości oraz bezpieczeństwa eksploatacyjnego w warunkach dynamicznych obciążeń trakcyjnych i zderzeniowych (rys. 7.4). Do podstawowych elementów tej konstrukcji zalicza się m.in.:

- konstrukcję stalową wykonaną z profili zamkniętych i otwartych, stanowiącą główny szkielet nośny pudła pojazdu;

Grupa/podgrupa /zespół/podzespół		Człon	Opis	Oznaczenie	Dostawca	Indeks	Liczba sztuk	Nakłady całkowite
1.	**Konstrukcja pojazdu**							
1.1	Konstrukcja stalowa	Człon M1	228M2	-	FHU POLIMER; P.P.U.H. ROTAX	nowy projekt	1	414 392 zł
		Człon M2	228M2	-			1	382 807 zł
		Człon M3	228M3	-			1	327 301 zł
		Człon M4	228M3	-			1	327 301 zł
1.2	Poszycie dachu	Człon M1	228M1	-	ENVO	M-0300-310-1003	1	11 449 zł
		Człon M2	228M2	-		M-0300-310-1026	1	11 449 zł
		Człon M3	228M3	-		M-0300-310-1042	1	9 919 zł
		Człon M4	228M3	-		M-0300-310-1042	1	9 919 zł
1.3	Zgarniacz	Człon M1	227M / 228M	-	POZAMECH	M-1100-900-0003	1	25 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	-		M-1100-900-0003	1	25 000 zł
		Człon M3	brak	-		-	0	- zł
		Człon M4	brak	-		-	0	- zł
1.4	Zderzaki crash	Człon M1	227M / 228M	1106371	DELLNER	1019-150-0861	2	60 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	1106371		1019-150-0861	2	60 000 zł
		Człon M3	brak	-		-	0	- zł
		Człon M4	brak	-		-	0	- zł
1.5	Absorbery crash	Człon M1	227M / 228M	1121116	DELLNER	1019-150-0865	1	81 090 zł
		Człon M2	227M / 228M	1121116		1019-150-0865	1	81 090 zł
		Człon M3	brak	-		-	0	- zł
		Człon M4	brak	-		-	0	- zł
1.6	Szkielet kabiny maszynisty	Człon M1	227M / 228M	-	-	0656-790-1500	1	40 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	-		0656-790-1500	1	40 000 zł
		Człon M3	brak			-	0	- zł
		Człon M4	brak			-	0	- zł
1.7	Czoło pojazdu	Człon M1	227M / 228M	-	EBA	1362-503-2280	1	90 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	-		1362-503-2280	1	90 000 zł
		Człon M3	brak	-		-	0	- zł
		Człon M4	brak	-		-	0	- zł
1.8	Oświetlenie zewnętrzne DOLNE	Człon M1	227M / 228M	YSP2528	OEM AUTOMATIC	1133-132-0010	2	10 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	YSP2528		1133-132-0010	2	10 000 zł
		Człon M3	brak	-		-	0	- zł
		Człon M4	brak	-		-	0	- zł
1.9	Oświetlenie zewnętrzne GÓRNE	Człon M1	227M / 228M	YSP2529	OEM AUTOMATIC	1133-132-0011	1	4 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	YSP2529		1133-132-0011	1	4 000 zł
		Człon M3	brak	-		-	0	- zł
		Człon M4	brak	-		-	0	- zł
1.10	Przejście międzyczłonowe	Pojazd	227M / 228M	41255537	HÜBNER	1373-229-0052	3	459 312 zł
1.11	Sprzęg czołowy automatyczny	Człon M1	nowy projekt	nowy projekt	DELLNER	nowy projekt	1	190 000 zł
		Człon M2	nowy projekt	nowy projekt			1	190 000 zł
		Człon M3	nie dotyczy	nie dotyczy		nie dotyczy	0	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy		nie dotyczy	0	- zł
1.12	Sprzęg międzyczłonowy	Pojazd	227M / 228M	1107170	DELLNER	1019-150-0007	3	116 197 zł
1.13	Owiewki górne	Człon M1	228M2	FAMM1 120250-1-00	FAMOR	M-1200-227-0005	1	54 939 zł
		Człon M2	228M2	FAMM1 120250-1-00		M-1200-227-0005	1	54 939 zł
		Człon M3	228M3	FAMM1 120250-1-00		M-1200-227-0005	1	58 575 zł
		Człon M4	228M3	FAMM1 120250-1-00		M-1200-227-0005	1	58 575 zł
1.14	Sprzęg ratunkowy	Pojazd	227M / 228M	-	DELLNER	1019-150-0009	1	25 758 zł

Rys. 7.4. Widok konfiguratora dla Grupy Konstrukcyjnej 1 – konstrukcja nośna pojazdu

- szkielet kabiny maszynisty, będący integralną częścią czoła pojazdu, zaprojektowany z uwzględnieniem wymagań norm zderzeniowych (np. EN 15227), zapewniający ochronę życia i zdrowia obsługi w przypadku kolizji;
- czoło pojazdu, pełniące funkcję zarówno aerodynamiczną, jak i ochronną, wyposażone w systemy absorpcji energii zderzenia, które redukują przeciążenia działające na strukturę i pasażerów podczas kolizji;
- zgarniacz, umieszczony w dolnej części czoła, służący do usuwania przeszkód z toru, zapobiegając ich wtargnięciu pod wózki jezdne.

Dla Grupy Konstrukcyjnej 1 – konstrukcja nośna pojazdu szynowego, nakłady całkowite uwzględniają składowe j przedstawione na rys. 7.4 (pierwsza i druga kolumna), a zatem można je zdefiniować wzorem:

$$N_{GK1} = \sum_{j=1}^{14} N_j \tag{7.3}$$

Opracowany konfigurator umożliwia przeprowadzenie szczegółowej analizy nakładów finansowych (i/lub środowiskowych) związanych z poszczególnymi Grupami Konstrukcyjnymi i ocenę wpływu zmian każdego elementu składowego na całkowity koszt finansowy (i/lub środowiskowy) niezbędny do realizacji określonej konfiguracji. Analiza może być prowadzona zarówno dla elementów o największym udziale w nakładach całkowitych (rys. 7.5), jak i dla elementów o marginalnym znaczeniu kosztowym (rys. 7.6). Takie podejście umożliwia identyfikację elementów stanowiących główne źródło nakładów oraz ocenę wpływu nawet niewielkich zmian konstrukcyjnych na końcowy wynik procesu konfiguracji.

Lp	Indeks	Opis	Numer Rysunku	Jm	Ilosc	Wartosc
1	M-0300-310-1025	Szkielet kabiny maszynisty - 228M1 031100-1-00	228M1 031100-1-00	szt.	1	42 700 zł
2	M-0300-310-1003	Poszycie dachu - kpl. detali wg rys. 228M1 03030	228M1 030300-1-00	szt.	1	6 740 zł
3	M-0301-310-1030	Krokiew - 228M1 030200-1-04	228M1 030200-1-04	szt.	41	5 956 zł
4	M-0300-310-1008	Segment ściany - 228M1 030603-1-00 * SPEC	228M1 030603-1-00	szt.	2	4 688 zł
5	M-0300-310-1006	Segment ściany - 228M1 030601-1-00 * SPEC	228M1 030601-1-00	szt.	2	4 688 zł
6	M-0301-310-1046	Pas - 228M1 030200-1-20	228M1 030200-1-20	szt.	23	4 528 zł
7	M-0301-310-1352	Płytka uziomu- 228M1 032401-1-02 * SPEC	228M1 032401-1-02	szt.	76	4 180 zł
8	M-0201-310-1335	Podstawa (przygotówka) - 228M1 021201-1-10	228M1 021201-1-10	szt.	6	3 900 zł
9	M-0201-310-1332	Podstawa (przygotówka) - 228M1 021201-1-07	228M1 021201-1-07	szt.	6	3 900 zł
10	M-0201-310-1022	Wspornik lewy tłumika wężykowania - 228M1	228M1 020200-1-22	szt.	2	3 590 zł

Rys. 7.5. Konstrukcja nośna pojazdu – pozycje o największym udziale w nakładach

Lp	Indeks	Opis	Numer Rysunku	Jm	Ilosc	Wartosc
1081	M-0301-310-1356	Płytka- 228M1 034700-1-03	228M1 034700-1-03	szt.	1	3 zł
1082	M-0301-310-1637	Płytka - 228M1 035401-1-02	228M1 035401-1-02	szt.	1	3 zł
1083	M-0001-100-0301	Blacha 3x1000x2000 gat.X5CrNi18-10		kg	0,15	3 zł
1084	M-0301-310-1632	Płytka - 228M1 035400-1-18	228M1 035400-1-18	szt.	1	2 zł
1085	M-0001-355-0693	Blacha g/w 6x1500x3000 gat.S355J2C+N		kg	0,61	2 zł
1086	M-0001-350-0202	Blacha 2x1250x2500 gat. S355J2W+N		kg	0,302	2 zł
1087	M-0301-310-1630	Płytka - 228M1 035400-1-16	228M1 035400-1-16	szt.	1	2 zł
1088	M-0301-310-1184	Blaszka - 228M1 031800-1-05	228M1 031800-1-05	szt.	4	2 zł
1089	M-0301-310-1609	Żebro - 228M1 034500-1-04	228M1 034500-1-04	szt.	1	2 zł
1090	M-0301-310-1648	Płytka - 228M1 035405-1-01	228M1 035405-1-01	szt.	1	2 zł
1091	M-0301-310-1557	Wspornik ogranicznika - 228M1 036001	228M1 036001-1-04	szt.	4	1 zł

Rys. 7.6. Konstrukcja nośna pojazdu – pozycje o najmniejszym udziale w nakładach

Istotną cechą opracowanego konfiguratora jest możliwość prowadzenia analizy na poziomie pojedynczych pozycji konstrukcyjnych. Oznacza to, że każda z 1091 pozycji należących do grupy konstrukcyjnej GK1 może zostać indywidualnie zmodyfikowana, a system automatycznie wyznacza wpływ tej zmiany na całkowite nakłady związane z projektowaniem i wytworzeniem pojazdu. Dla każdej pozycji zdefiniowano zestaw parametrów technicznych oraz odpowiadające im wartości nakładów finansowych, co umożliwia precyzyjne odwzorowanie rzeczywistych procesów projektowych i produkcyjnych. Tak wysoki poziom szczegółowości sprawia, że konfigurator nie ogranicza się wyłącznie do wyznaczania łącznych kosztów dla całej konstrukcji, lecz pozwala na określenie udziału każdego elementu w ich kształtowaniu.

Uzyskana w ten sposób szczegółowość analizy stanowi podstawę do wiarygodnego porównywania różnych wariantów konstrukcyjnych już na etapie przygotowania oferty. Jednocześnie umożliwia identyfikację elementów o największym potencjale optymalizacyjnym oraz wspiera podejmowanie racjonalnych decyzji konstrukcyjnych z uwzględnieniem wymagań technicznych, technologicznych i ekonomicznych. Stanowi to jedną z kluczowych funkcjonalności opracowanego konfiguratora i odróżnia go od tradycyjnych narzędzi kosztorysowych, które najczęściej ograniczają się do określenia całkowitego kosztu lub nakładu dla gotowej konstrukcji, bez możliwości analizy wpływu poszczególnych elementów na wynik końcowy.

Układ napędowy (GK2)

W przypadku, gdy dokumentacja postępowania przetargowego nie określa wymaganego rodzaju układu napędowego, konfigurator w pierwszej iteracji procesu traktuje układ napędowy jako element o charakterze abstrakcyjnym (tzw. czarną skrzynkę). Na tym etapie wyznaczane są wyłącznie podstawowe parametry eksploatacyjne napędu, takie jak wymagana moc oraz zasięg pojazdu, bez uwzględniania zmian konstrukcyjnych wynikających z zastosowania konkretnej technologii napędowej. Takie podejście umożliwia przeprowadzenie wstępnej konfiguracji pojazdu niezależnie od docelowego rozwiązania technicznego.

W konfiguratorze zdefiniowano cztery podstawowe warianty układów napędowych:

1. napęd elektryczny zasilany z sieci trakcyjnej (EMU – *Electric Multiple Unit*);
2. napęd hybrydowy – spalinowo-elektryczny (DEMU – *Diesel-Electric Multiple Unit*);
3. napęd elektryczny zasilany z akumulatorów trakcyjnych (BEMU);
4. napęd elektryczny wykorzystujący ogniwa paliwowe (FCEMU).

Wybór konkretnego wariantu następuje w drugiej iteracji procesu konfiguracji, realizowanej na etapie działań opisanych w karcie konfiguracyjnej. Dopiero w tym kroku uwzględniane są wymagane modyfikacje konstrukcyjne pojazdu, wynikające z właściwości wybranego układu napędowego, takie jak rozmieszczenie i integracja jego głównych komponentów, zmiany masy pojazdu, wymagania dotyczące przestrzeni montażowej oraz systemów pomocniczych.

Układ energoelektroniki dla napędu elektrycznego zasilanego z sieci trakcyjnej (GK2.1)

Układ energoelektroniki w pojazdach szynowych stanowi kluczowy element odpowiedzialny za przetwarzanie, dystrybucję i kontrolę energii elektrycznej w zakresie zarówno zasilania

trakcyjnego, jak i pokładowego (rys. 7.7). Jego architektura opiera się na dwóch zasadniczych podzespołach funkcjonalnych: obwodzie wysokiego napięcia – systemie trakcyjnym oraz

Grupa/podgrupa /zespół/podzespół		Człon	Opis	Oznaczenie	Dostawca	Indeks	Liczba sztuk	Nakłady całkowite
2.	**Energoelektronika - Obwód WN - system trakcyjny**							
Kompletny zakres dostawy MEDCOM		Pojazd			MEDCOM	1113-430-0020	1	1 680 000 zł
2.1	Skrzynia przekształtnikowa	Człon M1	228M	falownik FT-780-3k-LQC przetwornica statyczna PSM-80LQC	MEDCOM		1	- zł
		Człon M2	228M	falownik FT-780-3k-LQC przetwornica statyczna PSM-80LQC			1	- zł
		Człon M3	228M	falownik FT-780-3k-LQC przetwornica statyczna PSM-80LQC			1	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy			0	- zł
2.2	Przetwornica statyczna	Człon M1	nie dotyczy	nie dotyczy	MEDCOM		0	- zł
		Człon M2	nie dotyczy	nie dotyczy			0	- zł
		Człon M3	nie dotyczy	nie dotyczy			0	- zł
		Człon M4	przetwornica statyczna 80 kW	przetwornica statyczna PSM-80LQC			1	- zł
2.3	Dławik wejściowy	Człon M1	228M	2xED1PH-17/240	MEDCOM	1113-430-0021 + 1113-430-0023	1	- zł
		Człon M2	228M	2xED1PH-17/240			1	- zł
		Człon M3	228M	2xED1PH-17/240			1	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy			0	- zł
2.4	Rezystor hamowania	Człon M1	228M	nowy projekt	MEDCOM		1	- zł
		Człon M2	228M	nowy projekt			1	- zł
		Człon M3	228M	nowy projekt			1	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	-			0	- zł
2.5	Uziemiacz	Człon M1	228M	nowy projekt	MEDCOM / SECHERON		1	- zł
		Człon M2	228M	nowy projekt			1	- zł
		Człon M3	228M	nowy projekt			1	- zł
		Człon M4	228M	nowy projekt			1	- zł
2.6	Zasilacz buforowy	Człon M1	228M	ZB24DC250	MEDCOM		2	- zł
		Człon M2	228M	ZB24DC250			2	- zł
		Człon M3	228M	ZB24DC250			2	- zł
		Człon M4	228M	ZB24DC250			2	- zł
2.7	Sterownik przeciwpoślizgu	Człon M1	228M	STG-3	MEDCOM		1	- zł
		Człon M2	nie dotyczy	nie dotyczy			0	- zł
		Człon M3	nie dotyczy	nie dotyczy			0	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy			0	- zł
2.8	Wyłącznik szybki	Człon M1	nie dotyczy	nie dotyczy	WOLTAN	nie dotyczy	0	- zł
		Człon M2	227M / 228M	DCU-800M NL-1		1115-230-0320	1	105 000 zł
		Człon M3	nie dotyczy	nie dotyczy		nie dotyczy	0	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy		nie dotyczy	0	- zł
2.9	Odłącznik odbieraka prądu	Człon M1	227M / 228M	RS 03 20 D S	SECHERON	1115-310-0025	1	28 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	RS 03 20 D S		1115-310-0025	1	28 000 zł
		Człon M3	nie dotyczy	nie dotyczy		-	0	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy		-	0	- zł
2.10	Licznik energii	Człon M1	nie dotyczy	nie dotyczy	SESTO	-	0	- zł
		Człon M2	227M / 228M	EM3000		1115-610-0360	1	40 000 zł
		Człon M3	nie dotyczy	nie dotyczy		-	0	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy		-	0	- zł
2.11	Pantograf	Człon M1	227M / 228M	200EC0200100-000-05	EC ENGINEERING	1019-290-0210	1	33 000 zł
		Człon M2	227M / 228M	200EC0200100-000-05		1019-290-0210	1	33 000 zł
		Człon M3	nie dotyczy	nie dotyczy		-	0	- zł
		Człon M4	nie dotyczy	nie dotyczy		-	0	- zł
Energoelektronika - Układ zasilania pokładowego								
2.12	Skrzynia akumulatorowa	Człon M1	228M1	Grupa 2402	FAMOR	M-2400-227-0742	1	19 736 zł
		Człon M2	228M2	Grupa 2402		M-2400-227-0742	1	19 736 zł
		Człon M3	228M3	Grupa 2402		M-2400-227-0742	1	19 736 zł
		Człon M4	228M3	Grupa 2402		M-2400-227-0742	1	19 736 zł
2.13	Akumulatory	Człon M1	228M	D221708 (Typ MRX 460x18)	SAFT	1134-163-0090	1	58 750 zł
		Człon M2	228M	D221708 (Typ MRX 460x18)		1134-163-0090	1	58 750 zł
		Człon M3	228M	D221708 (Typ MRX 460x18)		1134-163-0090	1	58 750 zł
		Człon M4	228M	D221708 (Typ MRX 460x18)		1134-163-0090	1	58 750 zł

Rys. 7.7. Widok konfiguratora dla Grupy Konstrukcyjnej 2.1 – układy energoelektroniki

układzie zasilania pokładowego. W każdej z wymienionych grup znajdują się kluczowe elementy tworzące cały system.

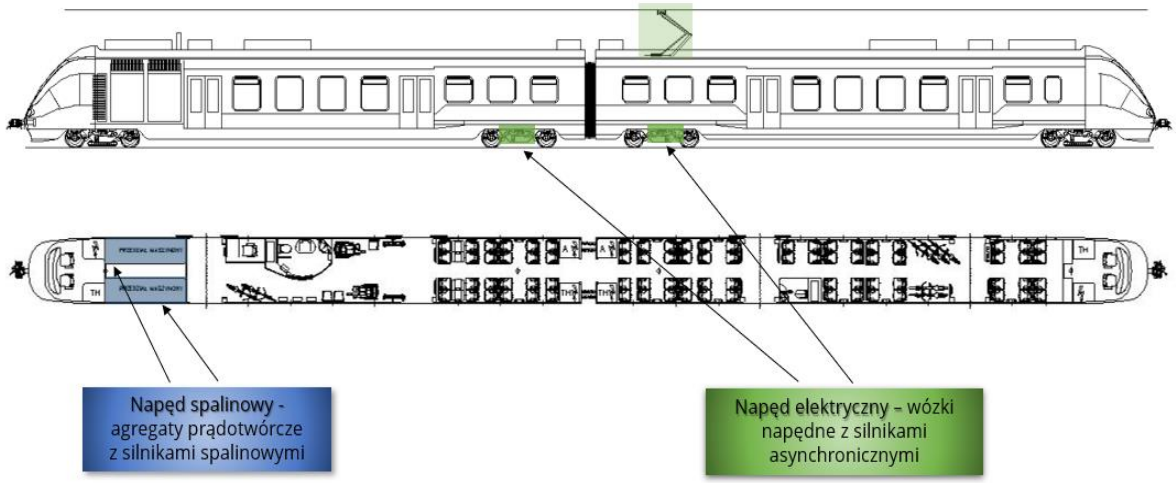
Podobnie jak dla Grupy Konstrukcyjnej GK1 (konstrukcja nośna pojazdu) wzór (7.2) dla Grupy Konstrukcyjnej GK2.1 (układ energoelektroniki dla napędu elektrycznego zasilanego z sieci trakcyjnej) przyjmuje postać:

$$N_{GK2.1} = \sum_{j=1}^{13} N_j \tag{7.4}$$

gdzie składowe j przedstawiono w pierwszej i drugiej kolumnie na rys. 7.7.

Agregat prądotwórczy z wyposażeniem dla napędu hybrydowego: spalinowo-elektrycznego (GK2.2)

Jednym z kluczowych założeń opracowanego narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego jest jego uniwersalność konfiguracyjna, rozumiana jako możliwość elastycznego kształtowania struktury technicznej pojazdu w zależności od założeń eksploatacyjnych i infrastrukturalnych. Uniwersalność ta obejmuje w szczególności swobodę doboru rodzaju układu napędowego, który w ramach konfiguracji pojazdu nie jest ograniczony wyłącznie do zasilania z sieci trakcyjnej. Narzędzie umożliwia również uwzględnienie rozwiązań hybrydowych, w których napęd realizowany jest poprzez połączenie trakcyjnego układu elektrycznego z autonomicznym źródłem energii w postaci zespołu spalinowo-elektrycznego. Przykład takiej konfiguracji, charakterystycznej dla elektryczno-spalinowego zespołu trakcyjnego, przedstawiono na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Koncepcja konfiguracji pojazdu szynowego z napędem spalinowo-elektrycznym

Grupa konstrukcyjna „Agregat prądotwórczy z wyposażeniem" stanowi autonomiczne źródło napędu w elektryczno-spalinowym zespole trakcyjnym, przeznaczone do zasilania układu napędowego oraz systemów pomocniczych pojazdu w warunkach braku lub ograniczonej dostępności sieci trakcyjnej. Z punktu widzenia konfiguracji pojazdu szynowego agregat prądotwórczy z wyposażeniem stanowi kluczowy moduł funkcjonalny, determinujący możliwości eksploatacyjne zespołu trakcyjnego w trybie pozasieciowym, a jego parametry znamionowe, masa, sprawność oraz integracja z układem energoelektroniki pojazdu mają

istotny wpływ na proces doboru i optymalizacji konfiguracji całego pojazdu. Konfigurację badanego pojazdu dla grupy konstrukcyjnej „Agregat prądotwórczy z wyposażeniem" przedstawiono na rys. 7.9. Nakłady dla j-tego elementu wyznacza się zgodnie z listą konfiguratora (rys. 7.9 – pierwsza i druga kolumna):

$$N_{GK2.2} = \sum_{j=1}^{15} N_j \tag{7.5}$$

Grupa/podgrupa /zespół/podzespół		Człon	Opis	Oznaczenie	Dostawca	Indeks	Liczba sztuk	Nakłady całkowite
2.	**Agregat prądotwórczy z wyposażeniem (PowerPack 3kV/400kW)**							
Kompletny zakres dostawy MEDCOM		Pojazd			MEDCOM	1113-430-0020	1	1 680 000 zł
2.1	Silnik spalinowy kompletny 400kW	Człon M1	228M	Projekt 8384AZ-04092019	Deutz	1113-430-0121	2	- zł
2.2	Rama agregatu	Człon M1	228M	nowy projekt	FPS	nowy projekt	2	- zł
2.3	Prądnica	Człon M1	228M	GTdS500S4	EMIT	1019-160-0632	2	- zł
2.4	Prostownik	Człon M1	228M	PD 450 T 600 TR	APS	1113-430-0024	2	- zł
2.5	Regulator wzbudzenia	Człon M1	228M	SAN-AVR-3	APS	1115-310-0025	2	- zł
2.6	Transformator	Człon M1	228M	3TTK-10 (TR EP-0050D)	APS	1158-131-9000	2	- zł
2.7	Falownik wentylatorów trakcyjnych	Człon M1	228M	HPI 15T 2500 400 TR	APS / MEDCOM	1159-135-8956	2	- zł
2.8	Elementy tablicy rozdzielczej agregatu	Człon M1	227M / 228M	DCU-800M NL-1	WOLTAN	1115-230-0320	2	- zł
2.9	Układ sterowania	Człon M1	227M / 228M	EM3000	WAGO	1259-155-8976	2	- zł
2.10	Superkondensator rozruchowy	Człon M1	227M / 228M	SkelStart24V	SkelStart	1019-290-0210	2	66 000 zł
2.11	Stycznik trakcyjny	Człon M1	228M1	2406	FAMOR	M-2400-227-0742	2	39 472 zł
2.12	Przekładniki prądowe	Człon M1	228M	LEM HAL 200-S	LEM	1134-163-0090	2	
2.13	Układ chłodzenia	Człon M1	228M	OEI.AC.L.0059.2019	OE INDUSTRY	nowy projekt	2	
2.14	Podgrzewacz elektryczno - spalinowy	Człon M1	228M	nowy projekt	SAFT	nowy projekt	2	117 500 zł
2.15	Orurowania układów silnika	Człon M1	228M	nowy projekt	SAFT	nowy projekt	2	117 500 zł

Rys. 7.9. Widok konfiguratora dla Grupy Konstrukcyjnej 2.2 – agregat prądotwórczy z wyposażeniem dla napędu hybrydowego: spalinowo-elektrycznego

Innowacyjne źródła zasilania. Napęd elektryczny zasilany z akumulatorów trakcyjnych, napęd elektryczny wykorzystujący ogniwa paliwowe (GK2.3 i GK2.4)

W przeciwieństwie do klasycznych elektrycznych zespołów trakcyjnych, pojazdy wyposażone w zestawy akumulatorów BEMU i pojazdy wyposażone w ogniwa paliwowe FCEMU charakteryzują się znacznie bardziej złożoną strukturą układów zasilania i zarządzania energią. Oprócz standardowych elementów napędu elektrycznego obejmują one dodatkowo m.in. układy magazynowania energii, zaawansowaną energoelektronikę, systemy zarządzania przepływem energii oraz rozbudowane układy chłodzenia i diagnostyki. Z tego względu szczegółowa analiza budowy oraz parametrów technicznych tych napędów stanowi istotny element procesu opracowania narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego, umożliwiającego ocenę i konfigurację nowoczesnych jednostek trakcyjnych z uwzględnieniem wymagań eksploatacyjnych, środowiskowych oraz ekonomicznych. W kontekście wdrożenia narzędzia doboru parametrów oba rozwiązania są szczególnie istotne, ponieważ wymagają uwzględnienia znacznie większej liczby parametrów technicznych, eksploatacyjnych i środowiskowych niż klasyczne pojazdy elektryczne lub

spalinowe. Biorąc powyższe pod uwagę oraz mając na względzie istniejące opracowania [120–122] wytypowano kluczowe elementy układu napędowego BEMU (tab. 7.5) oraz układu napędowego FCEMU (tab. 7.6), które są uwzględniane podczas konfiguracji.

Tabela 7.5. Kluczowe elementy układu napędowego pojazdów BEMU

Kluczowe elementy układu napędowego pojazdów BEMU		
Lp.	**Grupa**	**Elementy składowe**
1	Magazyn energii	Baterie trakcyjne, moduły bateryjne, BMS (*Battery Management System*) – system zarządzania baterią
2	Układ poboru i ładowania energii	Pantograf, aparatura wysokiego napięcia, układ ładowania
3	Układ konwersji energii	Przekształtniki trakcyjne, falowniki trakcyjne
4	Układ trakcyjny	Silniki trakcyjne, przekładnie, zestawy kołowe
5	Układ odzysku energii	Hamowanie rekuperacyjne
6	Układ sterowania napędem	EMS (*Energy Management System*) – system zarządzania energią, TCMS (*Train Control and Monitoring System*) – system sterowania i monitorowania pojazdu

Dla Grupy Konstrukcyjnej GK2.3 (napęd elektryczny zasilany z akumulatorów trakcyjnych) nakłady finansowe (i/lub środowiskowe) wyznacza się z sumą, gdzie j odnosi się do poszczególnych kluczowych elementów napędu:

$$N_{GK2.3} = \sum_{j=1}^{6} N_j \tag{7.6}$$

Tabela 7.6. Kluczowe elementy układu napędowego pojazdów FCEMU

Kluczowe elementy układu napędowego pojazdów FCEMU		
Lp.	**Grupa**	**Elementy składowe**
1	Magazyn wodoru	Zbiorniki wodoru, zawory bezpieczeństwa, reduktory ciśnienia, czujniki wycieku
2	Źródło energii	Stos ogniw paliwowych PEMFC
3	Układy pomocnicze ogniwa paliwowego	Sprężarki powietrza, układ chłodzenia, układ nawilżania, filtracja powietrza
4	Magazyn energii pomocniczej	Bateria trakcyjna, BMS – system zarządzania baterią
5	Konwersja energii	Przekształtniki, magistrala prądu stałego, falowniki trakcyjne
6	Układ napędowy	Silniki trakcyjne, przekładnie, zestawy kołowe
7	Odzysk energii	Układ hamowania rekuperacyjnego
8	Sterowanie i diagnostyka	EMS – system zarządzania energią, TCMS – system sterowania i monitorowania pojazdu, systemy bezpieczeństwa wodoru

Układ sterowania i diagnostyki pokładowej (GK3)

Układ sterowania pojazdu szynowego, w szczególności elektrycznego zespołu trakcyjnego, stanowi nadrzędny system zarządzający pracą wszystkich podzespołów funkcjonalnych pojazdu. Jego zadaniem jest realizacja algorytmów sterowania ruchem, nadzór nad parametrami eksploatacyjnymi oraz integracja z systemami bezpieczeństwa i diagnostyki. Współczesne układy sterowania bazują na architekturze rozproszonej, opartej na magistralach komunikacyjnych umożliwiających wymianę danych pomiędzy sterownikami lokalnymi a jednostką centralną. Diagnostyka pokładowa stanowi integralną część układu sterowania, umożliwiając bieżący nadzór nad stanem technicznym pojazdu oraz wspomagając procesy utrzymania i serwisowania. Układ sterowania wraz z diagnostyką pokładową spełnia zatem kluczową rolę w zapewnieniu niezawodności, bezpieczeństwa oraz efektywności eksploatacyjnej pojazdu.

Analogicznie jak dla wcześniejszych grup konstrukcyjnych wzór (7.2) dla Grupy Konstrukcyjnej GK3 (układ sterowania i diagnostyki pokładowej) przyjmuje postać:

$$\mathrm{N_{GK3}} = \sum_{\mathrm{j=1}}^{2} \mathrm{N_j} \tag{7.7}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – układu sterowania, 2 – układu diagnostyki.

Wózki (GK4)

Wózki stanowią jedną z kluczowych grup konstrukcyjnych w konfiguracji zespołu trakcyjnego, pełniąc fundamentalną rolę w zapewnieniu właściwości jezdnych, trakcyjnych oraz bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu szynowego. Ich konstrukcja, złożona z szeregu współpracujących ze sobą zespołów, umożliwia przenoszenie sił pociągowych i hamujących, tłumienie drgań oraz zapewnienie odpowiedniego prowadzenia zestawów kołowych po torze. W zależności od funkcji, wózki dzielą się na napędne i toczne.

Wózek napędny wyposażony jest w zespół napędowy, który obejmuje silnik trakcyjny oraz przekładnię, umożliwiające generowanie i przekazywanie momentu obrotowego na zestawy kołowe natomiast wózek toczny, pozbawiony zespołu napędowego, pełni funkcję prowadzącą i stabilizującą. Złożoność konstrukcyjna wózków wynika z konieczności spełnienia wysokich wymagań eksploatacyjnych, w tym zapewnienia komfortu jazdy, bezpieczeństwa pasażerów oraz efektywności energetycznej. Integracja licznych podzespołów wymaga precyzyjnego projektowania, uwzględniającego zarówno aspekty mechaniczne, jak i dynamiczne oddziaływania pomiędzy pojazdem a torem. Dla Grupy Konstrukcyjnej GK4 (wózki) suma nakładów przyjmuje postać:

$$\mathrm{N_{GK4}} = \sum_{\mathrm{j=1}}^{6} \mathrm{N_j} \tag{7.8}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – kompletnego wózka napędnego, 2 – kompletnego wózka tocznego, 3 – układu chłodzenia silników trakcyjnych, 4 – kompletnego układu hamulcowego, 5 – układu piaskowania kół, 6 – układu smarowania obrzeży kół.

Systemy informacyjne i monitoringu (GK5)

Systemy informacyjne i monitoringu stanowią integralną część współczesnych elektrycznych zespołów trakcyjnych, pełniąc funkcje wspierające zarówno operacyjne aspekty eksploatacji

pojazdu, jak i komfort oraz bezpieczeństwo pasażerów. Grupa ta obejmuje szereg podsystemów teleinformatycznych, które są ze sobą zintegrowane w ramach nadrzędnej architektury systemowej pojazdu. Zintegrowanie powyższych systemów w ramach jednej platformy informatycznej umożliwia efektywne zarządzanie informacją, poprawę bezpieczeństwa oraz zwiększenie atrakcyjności transportu szynowego dla pasażerów. W kontekście projektowania i konfiguracji EZT, dobór odpowiednich komponentów IT powinien uwzględniać zarówno wymagania eksploatacyjne, jak i oczekiwania użytkowników końcowych. Dla Grupy Konstrukcyjnej GK5 (Systemy IT informacyjne i monitoringu) składowe nakładów definiuje się jako:

$$N_{GK5} = \sum_{j=1}^{15} N_j \tag{7.9}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – systemu informacji pasażerskiej, 2 – systemu łączności (interkomu), 3 – systemu zliczania pasażerów, 4 – systemu rozgłoszeniowego, 5 – układu wewnętrznych tablic reklamowych, 6 – układu wewnętrznych tablic informacyjnych, 7 – bocznych tablice informacyjnych zewnętrznych, 8 – czołowych tablic informacyjnych zewnętrznych, 9 – systemu reklam, 10 – instalacji dla kasowników, 11 – układu kasowników, 12 – monitoringu wewnętrznego i zewnętrznego, 13 – automatów do sprzedaży biletów, 14 – Europejskiego Systemu Sterowania Pociągiem (ETCS), 15 – systemu Wi-Fi.

Systemy ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja (GK6)

Systemy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji stanowią integralny element konfiguracji pojazdu szynowego, wpływający bezpośrednio na komfort pasażerów oraz warunki pracy maszynisty. W elektrycznych zespołach trakcyjnych ich rola wykracza poza funkcje klimatyzacyjne – są one częścią złożonego układu zarządzania mikroklimatem, który musi spełniać wymagania eksploatacyjne, ergonomiczne oraz energetyczne. System klimatyzacji przestrzeni pasażerskiej projektowany jest z uwzględnieniem zmiennych warunków klimatycznych oraz obciążenia cieplnego wynikającego z liczby pasażerów. Systemy te są zintegrowane z układami sterowania pojazdu, co umożliwia automatyczne dostosowanie parametrów mikroklimatu do warunków eksploatacyjnych. Dla Grupy Konstrukcyjnej GK6 (systemy ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja) w nakładach uwzględnia się:

$$N_{GK6} = \sum_{j=1}^{5} N_j \tag{7.10}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – układu klimatyzacji części pasażerskiej, 2 – ogrzewania ogólnego (nagrzewnic), 3 – układu kanałów klimatyzacji, 4 – układu klimatyzacji kabiny maszynisty, 5 – układu ogrzewania kabiny maszynisty.

Przedział pasażerski – wyposażenie (GK7)

Przedział pasażerski stanowi kluczowy obszar użytkowy elektrycznego zespołu trakcyjnego, którego konfiguracja wpływa bezpośrednio na komfort podróży, dostępność dla różnych grup pasażerów oraz zgodność z wymaganiami normatywnymi. Grupa konstrukcyjna „Przedział pasażerski – wyposażenie" obejmuje szereg elementów i systemów, które można sklasyfikować według funkcji: dostępność i bezpieczeństwo, komfort i ergonomia,

funkcjonalność obsługi oraz zgodność z wymaganiami technicznymi. Dla tej Grupy Konstrukcyjnej definiuje się 14 składowych dla nakładów:

$$N_{GK7} = \sum_{j=1}^{14} N_j \tag{7.11}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – układu drzwi wejściowych i stopni wysuwanych, 2 – oświetlenia wejścia, 3 – okien bocznych, 4 – foteli pasażerski stałych i uchylnych, 5 – układu sufitów i ścian bocznych, 6 – podłogi i izolacji pudła, 7 – wykładzin, 8 – ramp dla osób niepełnosprawnych, 9 – stolików i śmietników, 10 – zabudowy przedsionka (wiatrołapy), 11 – półek bagażowych i uchwytów na rowery, 12 – oświetlenia części pasażerskiej, 13 – gaśnic, szaf elektrycznych, defibrylatora AED itp., 14 – systemu pętli indukcyjnych.

Przedział WC dla osób z ograniczoną możliwością poruszania się (GK8)

Grupa konstrukcyjna „Przedział WC dla osób z ograniczoną możliwością poruszania się" w elektrycznym zespole trakcyjnym stanowi specjalnie zaprojektowaną przestrzeń sanitarną, dostosowaną do potrzeb osób o ograniczonej mobilności. Jej konfiguracja uwzględnia zarówno ergonomiczne, jak i funkcjonalne aspekty użytkowania, zgodnie z obowiązującymi normami dostępności i komfortu podróży. Ze względu na uwzględnienie szeregu aspektów funkcjonalnych, konieczne jest szczegółowe definiowanie nakładów dla tej Grupy Konstrukcyjnej:

$$N_{GK8} = \sum_{j=1}^{12} N_j \tag{7.12}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – modułu umywalki, 2 – wyłożenia toalety, 3 – systemu WC, 4 – zbiornika na fekalia i zbiornika nieczystości, 5 – pojemnika na papier, dozownika i suszarki, 6 – przewijaka dla niemowląt, 7 – dotyczące śmietnika, 8 – zbiornika wody użytkowej, 9 – oświetlenia, 10 – wyłożenia ścian, sufitu i podłogi, 11 – drzwi, 12 – lustra i nagrzewnicy.

Przedział WC (GK9)

Grupa konstrukcyjna „Przedział WC" w elektrycznym zespole trakcyjnym stanowi standardowe rozwiązanie sanitarne, którego celem jest zapewnienie podstawowych funkcji higienicznych dla pasażerów. Pod względem funkcjonalnym oba przedziały WC spełniają podobne zadania, jednak „Przedział WC dla osób z ograniczoną możliwością poruszania się" charakteryzuje się podwyższonym standardem dostępności, zgodnym z wymaganiami norm europejskich (np. TSI PRM). Nakłady dla Grupy Konstrukcyjnej GK9 oblicza się:

$$N_{GK9} = \sum_{j=1}^{11} N_j \tag{7.13}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite tak samo jak w Grupie Konstrukcyjnej GK8, z wyłączeniem punktu 6 (przewijak dla niemowląt).

Kabina maszynisty (GK10)

Kabina maszynisty stanowi integralny element konstrukcyjny elektrycznego zespołu trakcyjnego, pełniąc funkcję centrum sterowania pojazdem oraz przestrzeni pracy operatora.

Jej projektowanie wymaga uwzględnienia szeregu kryteriów ergonomicznych, funkcjonalnych i bezpieczeństwa, zgodnych z obowiązującymi normami technicznymi (np. PN-EN 16186-2, PN-EN 45545). Narzędzie opracowane w ramach doktoratu pozwala ustalać liczbę kabin (jedna lub dwie). Nakłady finansowe (i/lub środowiskowe) dla Grupy Konstrukcyjnej GK10 (kabina maszynisty) składają się z następujących składowych:

$$N_{GK10} = \sum_{j=1}^{10} N_j \tag{7.14}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – pulpitu maszynisty, 2 – fotela maszynisty, 3 – szyby czołowej, 4 – okien bocznych z lustrami, 5 – układu wycieraczki, 6 – drzwi kabiny, 7 – rolety szyby czołowej, 8 – szafki socjalnej i szafki odzieżowej, 9 – chłodziarki, 10 – wyłożenia ścian, sufitu i podłogi.

Systemy bezpieczeństwa (GK11)

Grupa konstrukcyjna „Systemy bezpieczeństwa" ma za zapewnić bezpieczną eksploatację pojazdu oraz ochronę pasażerów i personelu. Obejmuje ona zintegrowane rozwiązania techniczne, które wspólnie minimalizują ryzyko wystąpienia sytuacji awaryjnych oraz umożliwiają skuteczne reagowanie w przypadku ich zaistnienia. Nakłady finansowe (i/lub środowiskowe) dla tej Grupy Konstrukcyjnej definiuje się jako:

$$N_{GK11} = \sum_{j=1}^{4} N_j \tag{7.15}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – Systemu Hamowania Pociągu (SHP), 2 – radiotelefonu/radiostopu, 3 – systemu rejestracji parametrów jazdy, 4 – systemu przeciwpożarowego.

Malatura (GK12)

Grupa konstrukcyjna „Malatura" odnosi się do technologii i systemu powłok ochronno-dekoracyjnych stosowanych na powierzchni nadwozia pojazdu szynowego. Malatura pełni funkcję nie tylko estetyczną, ale również eksploatacyjną i ochronną, wpływając na trwałość konstrukcji nadwozia, a także łatwość utrzymania pojazdu. Podobnie jak dla wcześniejszych grup konstrukcyjnych, nakłady finansowe (i/lub środowiskowe) wyznacza się zapisem:

$$N_{GK12} = \sum_{j=1}^{3} N_j \tag{7.16}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – warstwy podkładowe, 2 – warstwy nawierzchniowe, 3 – powłok antygrafitti.

Wyprawka (GK13)

Wyprawka to zestaw części zapasowych, narzędzi, materiałów eksploatacyjnych i dokumentacji technicznej, który dostawca pojazdu szynowego przekazuje odbiorcy wraz z pojazdem. Jej celem jest zapewnienie możliwości prawidłowej obsługi, konserwacji i napraw w początkowym okresie eksploatacji, a w jej składowych znajdują się:

$$N_{GK13} = \sum_{j=1}^{4} N_j \tag{7.17}$$

gdzie j oznacza nakłady całkowite dotyczące: 1 – części zapasowych, 2 – narzędzi specjalistycznych, 3 – instrukcji obsługi, dokumentacji serwisowej itp., 4 – dodatkowego wyposażenia awaryjnego.

7.6. Nakłady dodatkowe, ryzyka, zagrożenia

Proces konfiguracji pojazdu szynowego, poza wymaganiami technicznymi wynikającymi bezpośrednio ze specyfikacji zamówienia, uwzględnia również czynniki dodatkowe związane z realizacją projektu oraz późniejszą eksploatacją pojazdu. Czynniki te mogą wpływać przede wszystkim na całkowity koszt realizacji zamówienia, harmonogram produkcji oraz możliwość dotrzymania przyjętych założeń projektowych.

Istotne ryzyka ekonomiczne i organizacyjne obejmują w szczególności możliwość wzrostu cen surowców, materiałów i komponentów, zmiany kursów walut, a także zakłócenia w łańcuchach dostaw. Opóźnienia w dostępności kluczowych podzespołów mogą powodować konieczność zmiany harmonogramu produkcji, zastosowania komponentów alternatywnych lub wydłużenia całego procesu realizacji zamówienia. Ryzyko organizacyjne obejmuje również możliwość wydłużenia poszczególnych etapów projektowania, produkcji, integracji oraz odbioru pojazdu.

Odrębną grupę stanowią wymagania związane z utrzymaniem pojazdu w całym okresie jego eksploatacji. Obejmują one przede wszystkim planowane przeglądy okresowe, czynności obsługowe oraz wymagania dotyczące zapewnienia odpowiedniego zaplecza technicznego. Przyjęte rozwiązania konstrukcyjne powinny zatem uwzględniać nie tylko możliwość wytworzenia pojazdu, lecz również jego późniejszą obsługę i utrzymanie zgodnie z wymaganym poziomem niezawodności i dostępności.

Dodatkowym elementem są badania, odbiory i proces certyfikacji, których przeprowadzenie jest wymagane przed dopuszczeniem pojazdu do eksploatacji. Zakres tych działań zależy od rodzaju pojazdu, zastosowanych rozwiązań technicznych oraz wymagań wynikających z właściwych przepisów i specyfikacji technicznych. Powodują one powstanie dodatkowych kosztów oraz powinny zostać uwzględnione w harmonogramie realizacji projektu.

Do wymagań dodatkowych zaliczono również koszty ubezpieczeniowe oraz szkoleniowe. W szczególności dotyczy to przygotowania personelu technicznego odpowiedzialnego za obsługę, diagnostykę i utrzymanie pojazdu. Znaczenie tego elementu może wzrastać w przypadku zastosowania nowych lub niestandardowych technologii, w tym innowacyjnych układów napędowych.

Uwzględnienie powyższych czynników w procesie konfiguracji pozwala rozszerzyć ocenę projektowanego pojazdu poza jego podstawowe parametry techniczne. Ryzyka i wymagania dodatkowe stanowią tym samym element wspomagający ocenę wykonalności technicznej, ekonomicznej i organizacyjnej konfiguracji, umożliwiając identyfikację czynników, które mogą wpływać na koszt oraz termin realizacji zamówienia, a także na późniejsze utrzymanie pojazdu.

Dodatkowym czynnikiem jest ryzyko wystąpienia kar umownych, wynikających w szczególności z niedotrzymania terminów realizacji, niespełnienia wymaganych

parametrów technicznych lub warunków określonych w umowie. Ryzyko to może istotnie wpływać na końcową rentowność projektu, dlatego jego potencjalne skutki powinny być uwzględniane już na etapie oceny wykonalności i konfiguracji pojazdu.

Do ekonomicznych obciążeń projektu zaliczane są również koszty gwarancji z tytułu odpowiedzialności za wady oraz gwarancji należytego wykonania umowy, których wysokość wynika z warunków konkretnego zamówienia. Koszty te, związane m.in. z ustanowieniem odpowiednich zabezpieczeń finansowych oraz potencjalnymi zobowiązaniami w okresie gwarancyjnym, są uwzględniane w kalkulacji całkowitego kosztu realizacji projektu i ocenie jego rentowności.

Podsumowanie powyższych nakładów dodatkowych N_d [PLN lub kg CO_2] formułowane jest w następujący sposób:

$$N_d = N_s + N_{ut} + N_b + N_{ub} + N_{sk} + N_k + N_g \tag{7.18}$$

gdzie:

N_s – nakłady wynikające ze wzrostu cen materiałów i komponentów [PLN lub kg CO_2],
N_{ut} – nakłady wynikające z kosztów utrzymania pojazdu [PLN lub kg CO_2],
N_b – nakłady wynikające z kosztów badań, odbiory i certyfikacji [PLN lub kg CO_2],
N_{ub} – nakłady wynikające z kosztów ubezpieczeń [PLN lub kg CO_2],
N_{sk} – nakłady wynikające z kosztów szkoleń [PLN lub kg CO_2],
N_k – nakłady wynikające z ryzyka wystąpienia kar umownych [PLN lub kg CO_2],
N_g – nakłady wynikające z kosztów gwarancji [PLN lub kg CO_2].

Do wyznaczenia wartości ryzyka N_r stosuje się iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia danego zdarzenia oraz wartości jego potencjalnego skutku finansowego. Tak wyznaczona wartość ryzyka stanowi oczekiwany koszt jego wystąpienia i może zostać uwzględniona w kalkulacji całkowitego kosztu realizacji projektu według zależności:

$$N_r = P_r \cdot S_r \tag{7.19}$$

gdzie:

P_r – prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyka,
S_r – wartość skutków finansowych ryzyka.

W celu usystematyzowania oceny zagrożeń zastosowano macierz 5×5, w której każde zidentyfikowane ryzyko oceniane jest w dwóch wymiarach: prawdopodobieństwa jego wystąpienia P oraz skutku S (oba parametry określono w pięciopunktowej skali).

Uzyskana wartość ryzyka N_r, mieszcząca się w przedziale od 1 do 25, stanowi podstawę klasyfikacji ryzyka do jednej z czterech przyjętych kategorii: ryzyka niskiego, umiarkowanego, istotnego oraz wysokiego lub krytycznego. Graficzne przedstawienie wyników w postaci macierzy (rys. 7.10) umożliwia jednoczesną ocenę obu składowych oraz identyfikację zagrożeń wymagających podjęcia działań ograniczających lub uwzględnienia odpowiedniej rezerwy w kalkulacji nakładów.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że największy poziom ryzyka związany jest ze wzrostem cen surowców (Ryzyko R1) oraz opóźnieniami w łańcuchu dostaw (Ryzyko R3), dla których wartość wskaźnika R wynosi odpowiednio 20 i 16. Parametry związane ze zmianami kursów walut (Ryzyko R2) oraz wydłużeniem procesu produkcyjnego (Ryzyko R4) osiągnęły odpowiednio wartości 12 i 10, co kwalifikuje je do grupy ryzyka istotnego.

Zastosowana metoda pozwala zatem na ilościowe uporządkowanie zidentyfikowanych zagrożeń oraz określenie ich znaczenia dla realizacji projektu.

IDENTYFIKACJA RYZYK	OPIS	PRAWDOPODOBIEŃSTWO (P) (1–5)	SKUTEK (S) (1–5)	WSKAŹNIK RYZYKA R = P × S	POZIOM RYZYKA
Ryzyko R1 – wzrost cen surowców	Wzrost cen stali, aluminium, miedzi i innych kluczowych surowców	5	4	20	**Wysokie / krytyczne**
Ryzyko R2 – zmiany kursów walut	Niekorzystne zmiany kursów EUR/PLN, USD/PLN	3	4	12	**Istotne**
Ryzyko R3 – opóźnienia w łańcuchu dostaw	Opóźnienia dostaw kluczowych komponentów od dostawców	4	4	16	**Wysokie / krytyczne**
Ryzyko R4 – wydłużenie procesu produkcyjnego	Wydłużenie cyklu produkcyjnego z powodów technologicznych	2	5	10	**Istotne**

Wartość wskaźnika ryzyka	Poziom ryzyka
15 – 25	Ryzyko wysokie / krytyczne
10 – 14	Ryzyko istotne
5 – 9	Ryzyko umiarkowane
1 – 4	Ryzyko niskie

Prawdopodobieństwo (P_r)	1 Bardzo mały	2 Mały	3 Średni	4 Duży	5 Bardzo duży
5 Bardzo wysokie	5	10	15	20 (Ryzyko R1)	25
4 Wysokie	4	8	12	16 (Ryzyko R3)	20
3 Średnie	3	6	9	12 (Ryzyko R2)	15
2 Niskie	2	4	6	8	10 (Ryzyko R4)
1 Bardzo niskie	1	2	3	4	5

Skutek (S_r)

Rys. 7.10. Charakterystyka oceny ryzyka w konfiguratorze pojazdu szynowego

W celu zwiększenia obiektywności oceny przyjęto, że skutek S określany jest na podstawie przewidywanego wpływu materializacji danego ryzyka na całkowite nakłady N_c. Poszczególnym poziomom pięciostopniowej skali skutku przyporządkowano przedziały procentowego wzrostu nakładów dla wszystkich grup konstrukcyjnych N_i, dzięki czemu ocena skutku nie ma wyłącznie charakteru jakościowego, lecz jest bezpośrednio powiązana z wymiernym efektem ekonomicznym. Skala skutków zdefiniowana została następująco:

- 1 – wzrost nakładów do 1% włącznie,
- 2 – wzrost nakładów powyżej 1% do 3% włącznie,
- 3 – wzrost nakładów powyżej 3% do 5% włącznie,
- 4 – wzrost nakładów powyżej 5% do 10% włącznie,
- 5 – wzrost nakładów powyżej 10%.

Procentowe zwiększenie nakładów można, zatem wyrazić w postaci:

$$S = \begin{cases} 1, & \Delta N_c < 1\% \\ 2, & 1\% \leq \Delta N_c < 3\% \\ 3, & 3\% \leq \Delta N_c < 5\% \\ 4, & 5\% \leq \Delta N_c < 10\% \\ 5, & \Delta N_c \geq 10\% \end{cases} \tag{7.20}$$

Przeprowadzona analiza pozwala na ilościowe uwzględnienie potencjalnych zagrożeń mogących wpływać na całkowite nakłady związane z konfiguracją i realizacją projektu pojazdu. Powiązanie prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka z jego skutkiem ekonomicznym umożliwia identyfikację zagrożeń o największym znaczeniu oraz uwzględnienie ich wpływu w końcowej kalkulacji nakładów N_c.

7.7. Zintegrowany wskaźnik eksploatacji pojazdu

Dodatkowym elementem stanowiącym integralny element narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego w procesie ofertowania, ze szczególnym uwzględnieniem innowacyjnych źródeł zasilania, jest zintegrowany wskaźnik eksploatacji pojazdu W_{ep} wyrażany w PLN na 100 km lub kg CO_2 na 100 km. Jego ogólny zapis formułowany jest w następujący sposób:

$$W_{ep} = Z_e + U_s + O_s^* \tag{7.21}$$

gdzie:

Z_e – zużycie energii lub paliwa obliczony na podstawie konstrukcji pojazdu, jego energochłonności oraz planowanej pracy przewozowej [PLN/100 km lub kg CO_2/100 km],

U_s – nakłady związane z serwisem i utrzymaniem układu napędowego (awarie, naprawy i in.) określone na podstawie cyklu życia pojazdu [PLN/100 km lub kg CO_2/100 km],

O_s* – opłaty środowiskowe przedsiębiorstwa związane z wykonywaniem usług transportowych (uzależnione przede wszystkim od rodzaju układu napędowego) – tylko dla W_{ep} wyrażanego w PLN na 100 km [PLN/100 km].

7.8. Obliczenia ofertowe dla różnych wariantów układu napędowego

Zgodnie z opisanymi wcześniej schematem działania narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego, zrealizowano kompletny scenariusz obliczeń dla postępowania przetargowego omówionego w rozdziale 6. Specyfikacja z góry definiowała rodzaj układu napędowego, jednak na potrzeby rozprawy dokonano analizy, która uwzględniała również inne jego konstrukcje. Zestawienie uzyskanych wartości przedstawiono w tab. 7.7. Uwzględniono także zmianę nakładów całkowitych N_c w stosunku do napędu elektrycznego (rys. 7.11).

Przeprowadzone obliczenia wskazują na istotne zróżnicowanie całkowitych nakładów N_c w zależności od zastosowanego rodzaju układu napędowego. Najmniejszą wartość uzyskano dla pojazdu z napędem elektrycznym trakcyjnym – 35,5 mln PLN, natomiast dla pozostałych wariantów uzyskano 41,5 mln PLN (napęd hybrydowy), 43,7 mln PLN (napęd elektryczny –

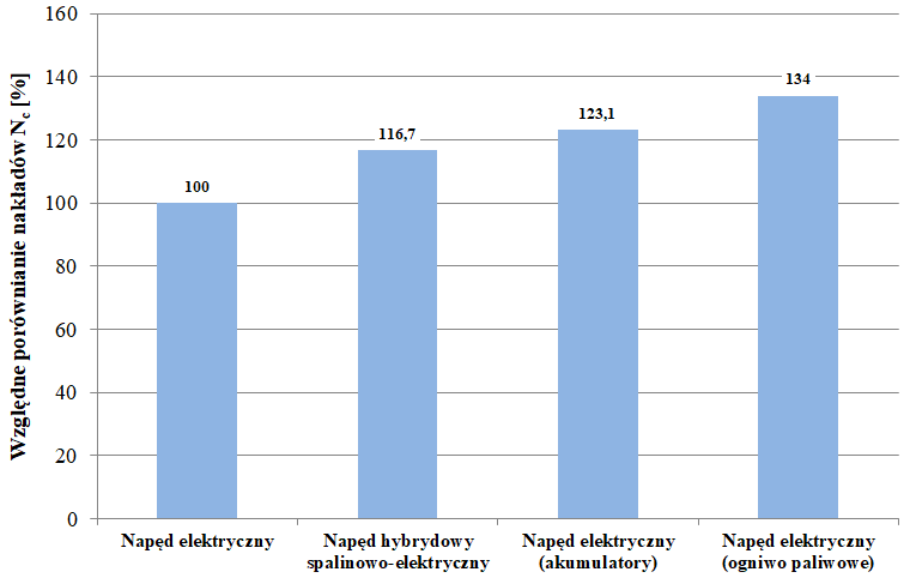
akumulatory) oraz 47,6 mln PLN (napęd elektryczny – ogniwa paliwowe). Porównując uzyskane wyniki względem wariantu elektrycznego, nakłady względne zwiększyły się odpowiednio o 16,7%, 23,1% oraz 34%.

Tabela 7.7. Podsumowanie nakładów całkowitych N_c dla pojazdu o maksymalnej prędkości v = 160 km/h w różnych wariantach napędu

Grupa Konstrukcyjna	**Rodzaj układu napędowego (dla v = 160 km/h)**							
	Napęd elektryczny (trakcyjny)		**Napęd hybrydowy spalinowo-elektryczny**		**Napęd elektryczny (akumulatory)**		**Napęd elektryczny (ogniwo paliwowe)**	
	Koszt [PLN]	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**
GK1	5 589 010	15,7	6 259 691	15,1	6 650 922	15,2	6 717 431	14,1
GK2.1	3 989 320	11,2	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0
GK2.2	nie dotyczy	0	7 579 708	18,2	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0
GK2.3	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0,0	9 474 635	21,7	nie dotyczy	0
GK2.4	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0	12 317 026	25,9
GK3	749 876	2,1	974 839	2,3	1 004 084	2,3	1 184 819	2,5
GK4	10 193 205	28,7	11 212 526	27	11 008 661	25,2	11 118 748	23,4
GK5	2 939 505	8,3	3 086 480	7,4	3 027 690	6,9	3 057 967	6,4
GK6	1 674 691	4,7	1 758 426	4,2	1 724 932	3,9	1 742 181	3,7
GK7	7 553 701	21,3	7 780 312	18,7	7 704 775	17,6	7 781 823	16,4
GK8	370 432	1	370 432	0,9	370 432	0,8	370 432	0,8
GK9	319 444	0,9	319 444	0,8	319 444	0,7	319 444	0,7
GK10	730 876	2,1	752 802	1,8	760 330	1,7	767 934	1,6
GK11	701 876	2	736 970	1,8	958 061	2,2	1 341 285	2,8
GK12	389 432	1,1	389 432	0,9	389 432	0,9	389 432	0,8
GK13	317 444	0,9	320 618	0,8	323 825	0,7	469 546	1
N_c (suma)	**35 518 812**	**100**	**41 541 680**	**100**	**43 717 223**	**100**	**47 578 067**	**100**

Uzyskane różnice wynikają przede wszystkim ze zmiany nakładów przypisanych do grupy konstrukcyjnej związanej z układem napędowym. W wariancie elektrycznym Grupa konstrukcyjna GK2.1 odpowiada za 11,2% całkowitych nakładów, podczas gdy udział odpowiedniej grupy napędowej zwiększa się do 18,2% dla napędu hybrydowego spalinowo-elektrycznego, do 21,7% dla napędu elektrycznego z akumulatorami oraz do 25,9% dla wariantu wykorzystującego ogniwa paliwowe. Jednocześnie zmiana rodzaju napędu wpływa również na nakłady finansowe (i/lub środowiskowe) przypisane do pozostałych grup konstrukcyjnych, co wskazuje, że wybór źródła zasilania nie może być rozpatrywany

wyłącznie jako zamiana pojedynczego zespołu pojazdu, lecz wymaga uwzględnienia jego oddziaływania na całą konfigurację konstrukcyjną.



Rys. 7.11. Względne porównanie nakładów całkowitych N_c w odniesieniu do napędu elektrycznego (N_c = 100%), prędkość 160 km/h

Przeprowadzone prace pozwoliły na opracowanie spójnej metody konfiguracji pojazdu szynowego, łączącej wymagania techniczne wynikające ze specyfikacji zamówienia z danymi konstrukcyjnymi, technologicznymi, ekonomicznymi i środowiskowymi. Opracowany konfigurator umożliwia analizę pojazdu zarówno na poziomie poszczególnych elementów i podzespołów, jak również całych grup konstrukcyjnych, co pozwala na określenie ich wpływu na całkowite nakłady finansowe (i/lub środowiskowe) związane z realizacją określonego wariantu pojazdu. Istotnym elementem zaproponowanej metody jest również uwzględnienie ryzyka i wymagań dodatkowych, dzięki czemu ocena konfiguracji nie ogranicza się wyłącznie do parametrów technicznych pojazdu, lecz obejmuje także czynniki wpływające na koszt i wykonalność realizacji zamówienia.

7.9. Konfigurator jako cyfrowa reprezentacja pojazdu szynowego w kontekście koncepcji bliźniaka cyfrowego

Współczesne procesy projektowania, konfiguracji i eksploatacji złożonych systemów technicznych coraz częściej wykorzystują koncepcję bliźniaka cyfrowego (*Digital Twin*). Pojęcie to oznacza cyfrową reprezentację rzeczywistego obiektu, systemu lub procesu, która pozwala na analizę jego właściwości, monitorowanie stanu, symulację zachowania oraz wspomaganie decyzji w całym cyklu życia produktu [123]. Istotną cechą pełnego bliźniaka cyfrowego jest powiązanie modelu cyfrowego z rzeczywistym obiektem oraz możliwość jego aktualizacji na podstawie danych pozyskiwanych z systemów pomiarowych, diagnostycznych lub eksploatacyjnych. W takim ujęciu Digital Twin nie jest wyłącznie statycznym modelem projektowym, lecz dynamicznym narzędziem wspierającym projektowanie, produkcję, eksploatację, utrzymanie i modernizację obiektu technicznego. W sektorze kolejowym

koncepcja bliźniaka cyfrowego znajduje zastosowanie przede wszystkim w obszarze utrzymania taboru, diagnostyki, monitorowania stanu technicznego, optymalizacji eksploatacji oraz zarządzania cyklem życia pojazdów i infrastruktury. Rozwiązania tego typu umożliwiają łączenie danych projektowych, eksploatacyjnych i serwisowych, a następnie wykorzystywanie ich do oceny stanu technicznego, prognozowania zużycia podzespołów oraz planowania działań utrzymaniowych. W literaturze podkreśla się, że zastosowanie bliźniaków cyfrowych w kolejnictwie może przyczyniać się do poprawy niezawodności, bezpieczeństwa, efektywności operacyjnej oraz ograniczenia kosztów utrzymania.

W odniesieniu do niniejszej rozprawy należy podkreślić, że opracowane narzędzie doboru parametrów pojazdu szynowego nie stanowi pełnego bliźniaka cyfrowego w ścisłym znaczeniu tego pojęcia. Nie jest ono bowiem bezpośrednio sprzężone z rzeczywistym pojazdem ani nie wykorzystuje bieżących danych eksploatacyjnych pozyskiwanych z czujników, systemów diagnostycznych lub systemów monitorowania pracy pojazdu. Konfigurator można jednak traktować jako cyfrową reprezentację projektowanego pojazdu szynowego, odwzorowującą jego najważniejsze parametry techniczne, eksploatacyjne, ekonomiczne i środowiskowe. W tym znaczeniu stanowi on istotny etap pośredni pomiędzy klasycznym modelem konfiguracyjnym a pełnym bliźniakiem cyfrowym pojazdu.

Opracowany konfigurator odwzorowuje strukturę pojazdu poprzez zdefiniowane grupy parametrów, obejmujące m.in. konstrukcję nośną, układ energoelektroniki, innowacyjne źródła zasilania, układ sterowania i diagnostyki pokładowej, wózki, systemy informatyczne, systemy ogrzewania i klimatyzacji, wyposażenie przedziału pasażerskiego, kabinę maszynisty oraz systemy bezpieczeństwa. Takie ujęcie pozwala na przedstawienie pojazdu jako spójnego systemu technicznego, w którym poszczególne rozwiązania konstrukcyjne i funkcjonalne są ze sobą powiązane. Dzięki temu konfigurator nie pełni jedynie funkcji listy kontrolnej, lecz stanowi uporządkowany model danych opisujący wariant pojazdu na etapie przygotowania oferty i projektowania wstępnego. Znaczenie konfiguratora jako cyfrowej reprezentacji pojazdu wzmacnia wykorzystanie otwartej macierzy danych oraz danych pochodzących z systemu ERP IFS Applications 9. W pracy wskazano, że system ERP stanowi źródło danych wejściowych dla procesu konfiguracji, natomiast sama macierz danych umożliwia porządkowanie, przetwarzanie i analizę informacji niezbędnych do doboru parametrów pojazdu. Dodatkowe rozszerzenie źródeł danych o narzędzia środowiskowe, takie jak NeoGage Carbon Footprint, OperatFB czy Envirly, pozwala powiązać konfigurację techniczną pojazdu z oceną śladu węglowego, emisji oraz aspektów cyklu życia produktu. Takie podejście zbliża konfigurator do logiki cyfrowego modelu produktu, w którym parametry konstrukcyjne, eksploatacyjne, kosztowe i środowiskowe są analizowane w jednym środowisku decyzyjnym.

Istotną cechą opracowanego rozwiązania jest również możliwość formalizacji wiedzy eksperckiej. Utworzenie karty konfiguracyjnej, listy kontrolnej i macierzy zależności pozwala przenieść rozproszoną wiedzę inżynierską do ustrukturyzowanego modelu danych. W praktyce ogranicza to uznaniowość procesu konfiguracji, zwiększa powtarzalność decyzji projektowych i ofertowych oraz ułatwia audytowanie przyjętych założeń. W tym zakresie konfigurator pełni funkcję cyfrowego odwzorowania logiki doboru parametrów pojazdu, a nie tylko zbioru danych technicznych. Jest to szczególnie istotne w przypadku pojazdów z innowacyjnymi źródłami zasilania, gdzie dobór układu napędowego wymaga jednoczesnego

uwzględnienia zasięgu, masy, pojemności magazynów energii, kosztów cyklu życia, ograniczeń infrastrukturalnych oraz wymagań środowiskowych.

Z punktu widzenia rozwoju narzędzia koncepcja bliźniaka cyfrowego może stanowić naturalny kierunek dalszych prac. Integracja konfiguratora z danymi eksploatacyjnymi, systemami diagnostyki pokładowej, danymi RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, Safety* – analiza niezawodności, dostępności, obsługiwalności i bezpieczeństwa), informacjami serwisowymi oraz rzeczywistymi danymi o zużyciu energii umożliwiłaby stopniowe przekształcenie statycznego modelu konfiguracyjnego w dynamiczny model cyfrowy pojazdu. W takim wariancie konfigurator mógłby nie tylko wspierać dobór parametrów na etapie ofertowania, lecz także służyć do porównywania założeń projektowych z rzeczywistą eksploatacją, aktualizacji modeli kosztów cyklu życia, oceny degradacji magazynów energii oraz doskonalenia kolejnych wariantów pojazdów. Włączenie koncepcji bliźniaka cyfrowego do interpretacji opracowanego narzędzia podkreśla jego znaczenie nie tylko jako praktycznego konfiguratora ofertowego, lecz również jako elementu szerszej transformacji cyfrowej przemysłu kolejowego. Narzędzie opracowane w ramach rozprawy może być traktowane jako fundament przyszłej platformy konfiguracyjno-analitycznej, która po rozszerzeniu o dane eksploatacyjne i mechanizmy automatycznej aktualizacji mogłaby wspierać cały cykl życia pojazdu szynowego — od etapu koncepcji i oferty, przez projektowanie i produkcję, aż po eksploatację, utrzymanie i modernizację.

8. Ocena zależności rodzaju układu napędowego, prędkości jazdy i nakładów finansowych

8.1. Konfiguracja pojazdu w zależności od prędkości maksymalnej

Konfigurację bazową pojazdu szynowego, przedstawioną w poprzednim rozdziale, opracowano dla prędkości eksploatacyjnej wynoszącej 160 km/h. Wartość ta wynika bezpośrednio z wymagań Zamawiającego określonych w Specyfikacji Warunków Zamówienia i została przyjęta jako jeden z podstawowych parametrów wejściowych karty konfiguracyjnej. Tym samym przeprowadzona konfiguracja odzwierciedla rzeczywisty proces przygotowania rozwiązania technicznego odpowiadającego wymaganiom konkretnego postępowania zakupowego.

Przyjęcie prędkości 160 km/h jest jednocześnie reprezentatywne dla współczesnych elektrycznych zespołów trakcyjnych, przeznaczonych do obsługi przewozów regionalnych, aglomeracyjnych i międzyregionalnych. Parametr ten odpowiada warunkom eksploatacji pojazdów na znacznej części polskiej sieci kolejowej oraz charakterowi przewozów realizowanych przy niewielkich odległościach między kolejnymi punktami zatrzymań. Zwiększanie maksymalnej prędkości pojazdu w takich warunkach nie musi prowadzić do proporcjonalnego skrócenia czasu przejazdu, ponieważ możliwość wykorzystania większej prędkości ograniczają zarówno parametry infrastruktury, jak i częstotliwość zatrzymań.

Z punktu widzenia celu naukowego rozprawy zasadne jest jednak rozszerzenie przeprowadzonych badań poza konfigurację wynikającą bezpośrednio z wymagań Zamawiającego. W tym celu przyjęto dwa dodatkowe warianty prędkości konstrukcyjnej: 140 km/h oraz 180 km/h, traktowane jako warianty badawcze. Ich wprowadzenie nie wynika z potrzeby odwzorowania konkretnych zamówień rynkowych, lecz służy ocenie wpływu kontrolowanej zmiany jednego z istotnych parametrów wejściowych na wynik procesu konfiguracji pojazdu.

Takie podejście umożliwia przeprowadzenie swoistej analizy wrażliwości konfiguratora, w której przy zachowaniu pozostałych podstawowych założeń analizowana jest reakcja modelu na zmianę zadanej prędkości pojazdu. Zmiana tego parametru może bowiem oddziaływać nie tylko na sam układ napędowy, lecz również na dobór i parametry innych grup konstrukcyjnych oraz związane z nimi nakłady finansowe (i/lub środowiskowe). Opracowany w poprzednim rozdziale model pozwala na analizowanie poszczególnych grup konstrukcyjnych oraz wpływu zmian ich elementów na całkowite nakłady związane z konfiguracją pojazdu.

Analizę dla prędkości konstrukcyjnej: 140 km/h (tab. 8.1) oraz 180 km/h (tab. 8.2) przeprowadzono dla wszystkich czterech rozpatrywanych rodzajów układu napędowego: elektrycznego trakcyjnego, hybrydowego spalinowo-elektrycznego, elektrycznego (akumulatory) i elektrycznego (ogniwa paliwowe). Podobnie, jak w poprzednim rozdziale, uwzględniono także zmianę nakładów całkowitych N_c w stosunku do napędu elektrycznego (rys. 8.1 i 8.2).

Przeprowadzone obliczenia wskazują na istotne zróżnicowanie całkowitych nakładów N_c w zależności od zastosowanego rodzaju układu napędowego. Najmniejszą wartość uzyskano dla pojazdu z napędem elektrycznym trakcyjnym – 34,7 mln PLN, natomiast dla pozostałych

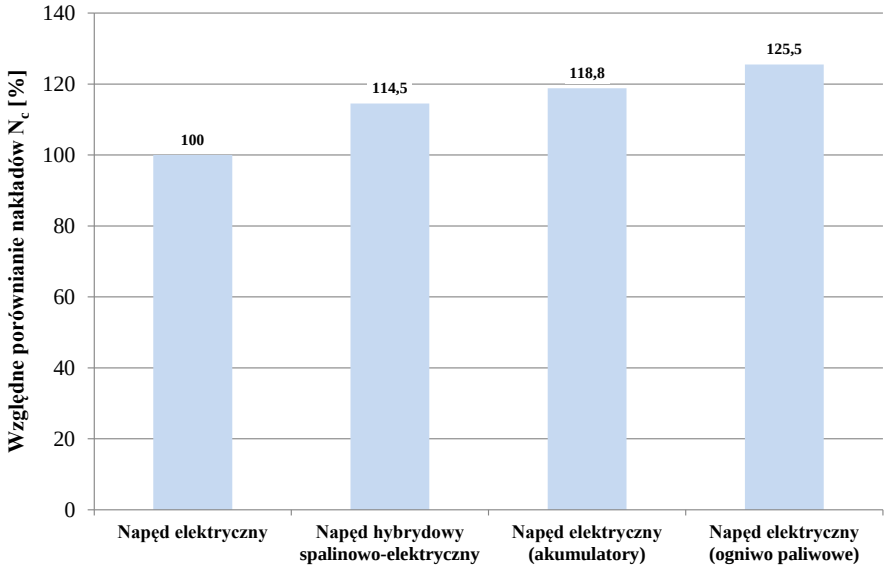
wariantów uzyskano odpowiednio 39,7 mln PLN, 41,2 mln PLN oraz 43,5 mln PLN. Oznacza to wzrost całkowitych nakładów na każdy układ napędowy względem podstawowego wariantu elektrycznego o 14,5%, 18,8% oraz 25,5%.

Tabela 8.1. Podsumowanie nakładów całkowitych N_c dla prędkości pojazdu v = 140 km/h w różnych wariantach napędu

Grupa Konstrukcyjna	**Rodzaj układu napędowego (dla v= 140 km/h)**							
	Napęd elektryczny (trakcyjny)		**Napęd hybrydowy spalinowo-elektryczny**		**Napęd elektryczny (akumulatory)**		**Napęd elektryczny (ogniwo paliwowe)**	
	Koszt [PLN]	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**
GK1	5 477 230	15,8	6 134 497	15,4	6 387 545	15,5	6 322 392	14,5
GK2.1	3 789 854	10,9	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0
GK2.2	nie dotyczy	0	7 124 926	17,9	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0
GK2.3	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0	8 549 911	20,7	nie dotyczy	0
GK2.4	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0	10 559 140	24,3
GK3	742 377	2,1	965 090	2,4	984 103	2,4	1 149 629	2,6
GK4	9 785 477	28,2	10 118 183	25,5	9 934 216	24,1	9 632 216	22,1
GK5	2 924 807	8,4	3 055 693	7,7	2 997 489	7,3	3 012 327	6,9
GK6	1 666 318	4,8	1 740 885	4,4	1 720 989	4,2	1 738 199	4
GK7	7 515 932	21,7	7 762 530	19,5	7 627 920	18,5	7 665 678	17,6
GK8	370 432	1,1	370 432	0,9	370 432	0,9	370 432	0,9
GK9	319 444	0,9	319 444	0,8	319 444	0,8	319 444	0,7
GK10	723 567	2,1	737 822	1,9	737 748	1,8	737 674	1,7
GK11	680 820	2	693 415	1,7	874 396	2,1	1 187 430	2,7
GK12	389 432	1,1	389 432	1,0	389 432	0,9	389 432	0,9
GK13	314 270	0,9	314 238	0,8	314 207	0,8	451 044	1,0
N_c (suma)	**34 699 960**	**100**	**39 726 587**	**100**	**41 207 832**	**100**	**43 535 036**	**100**

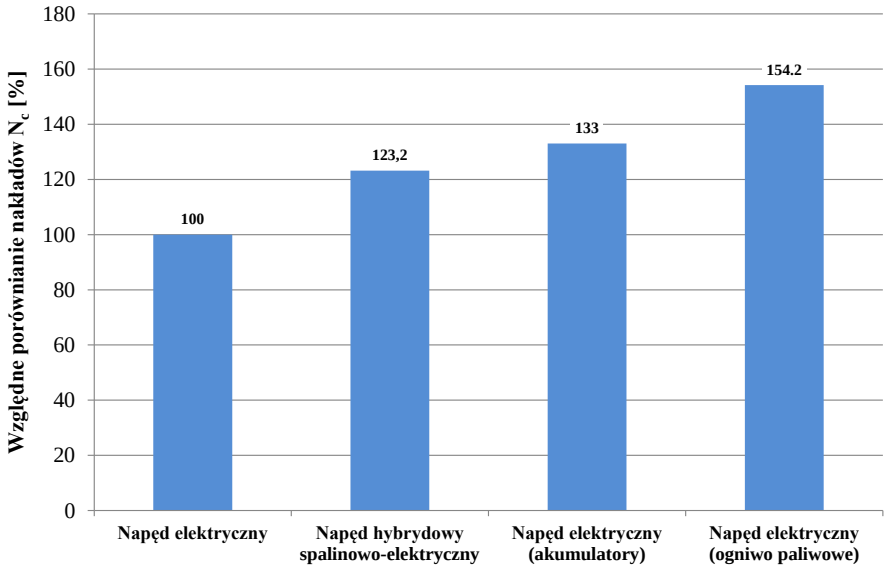
Osiągnięte różnice wynikają przede wszystkim ze zmiany nakładów przypisanych do grupy konstrukcyjnej związanej z układem napędowym. W wariancie elektrycznym GK2.1 odpowiada za 10,9% całkowitych nakładów, podczas gdy udział odpowiedniej grupy napędowej wzrasta do 17,9% dla napędu hybrydowego spalinowo-elektrycznego. Dla napędu elektrycznego z akumulatorami uzyskano dla tej grupy 20,7%, a dla konstrukcji z ogniwami paliwowymi 24,3%. Tak, jak w poprzednim rozdziale, zmiana rodzaju napędu wpływa

również na nakłady w pozostałych grupach konstrukcyjnych. To oznacza, że wybór źródła zasilania musi uwzględniać całą konstrukcję pojazdu szynowego.



Rys. 8.1. Względne porównanie nakładów całkowitych N_c w odniesieniu do napędu elektrycznego (N_c = 100%), prędkość 140 km/h

Analiza nakładów całkowitych dla różnych rodzajów napędów pojazdu szynowego dla prędkości maksymalnej 180 km/h wskazuje, że najmniejszą wartość osiągnięto dla napędu elektrycznego trakcyjnego – l36,9 mln PLN. Napęd hybrydowy natomiast dla wariantów spalinowo-elektrycznego uzyskał 45,5 mln PLN, elektrycznego z akumulatorami – 49,2 mln PLN, a elektrycznego z ogniwami paliwowymi 57 mln PLN. Zatem całkowite nakłady względem pojazdu elektrycznego zwiększały się dla kolejnych konstrukcji odpowiednio o 23,2%, 33% oraz 54,2%.



Rys. 8.2. Względne porównanie nakładów całkowitych N_c w odniesieniu do napędu elektrycznego (N_c = 100%), prędkość 180 km/h

Jak w poprzednich rozważaniach, największy wpływ na uzyskane wyniki miały zmiany kosztów w grupie konstrukcyjnej związanej z układem napędowym. W wariancie elektrycznym GK2.1 odpowiada za 11,7% całkowitych nakładów, podczas gdy udział odpowiedniej grupy napędowej wzrasta do 19,8% dla napędu spalinowo-elektrycznego, 25,0% dla napędu akumulatorowego oraz 30,8% dla wariantu wykorzystującego ogniwa paliwowe.

Tabela 8.2. Podsumowanie nakładów całkowitych N_c dla prędkości pojazdu v = 180 km/h w różnych wariantach napędu

Grupa Konstrukcyjna	**Rodzaj układu napędowego (dla v = 180 km/h)**							
	Napęd elektryczny (trakcyjny)		**Napęd hybrydowy spalinowo-elektryczny**		**Napęd elektryczny (akumulatory)**		**Napęd elektryczny (ogniwo paliwowe)**	
	Koszt [PLN]	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**	**Koszt [PLN]**	**Udział w koszcie całkowitym [%]**
GK1	5 812 570	15,7	6 770 482	14,9	7 193 637	14,6	7 556 196	13,3
GK2.1	4 308 466	11,7	nie dotyczy	0,0	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0
GK2.2	nie dotyczy	0	9 004 693	19,8	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0
GK2.3	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0,0	12 268 894 zł	25	nie dotyczy	0
GK2.4	nie dotyczy	0	nie dotyczy	0,0	nie dotyczy	0	17 544 519	30,8
GK3	764 874	2,1	1 014 222	2,2	1 065 542	2,2	1 282 486	2,2
GK4	11 008 661	29,8	13 078 290	28,7	12 840 503	26,1	14 006 420	24,6
GK5	2 968 900	8	3 148 519	6,9	3 088 547	6,3	3 150 627	5,5
GK6	1 674 691	4,5	1 758 426	3,9	1 724 932	3,5	1 742 181	3,1
GK7	7 553 701	20,4	7 780 312	17,1	7 704 775	15,7	7 781 823	13,7
GK8	370 432	1	370 432	0,8	370 432	0,8	370 432	0,6
GK9	319 444	0,9	322 638	0,7	325 865	0,7	329 123	0,6
GK10	738 185	2	760 330	1,7	767 934	1,6	775 613	1,4
GK11	729 951	2	797 107	1,8	1 077 688	2,2	1 569 114	2,8
GK12	389 432	1,1	389 432	0,9	389 432	0,8	389 432	0,7
GK13	323 793	0,9	333 571	0,7	343 645	0,7	508 251	0,9
N_c (suma)	**36 963 100**	**100**	**45 528 454**	**100**	**49 161 825**	**100**	**57 006 218**	**100**

Uzyskane wyniki wskazują, że wpływ prędkości konstrukcyjnej na całkowite nakłady finansowe nie może być traktowany jako jednakowy dla wszystkich rodzajów napędu. Wraz z przyrostem prędkości, zwiększa się różnica pomiędzy nakładami dla pojazdu zasilanego z sieci trakcyjnej a nakładami dla pozostałych technologii napędowych. Szczególnie istotne

jest to przy prędkościach 160 i 180 km/h, przy czym efekt ten jest tym silniejszy, im bardziej złożony jest zastosowany układ napędowy. Przeprowadzona analiza wskazuje zatem na występowanie współzależności między prędkością konstrukcyjną a rodzajem zastosowanego napędu. Parametry te nie powinny być rozpatrywane jako niezależne determinanty całkowitych kosztów. Zwiększenie prędkości konstrukcyjnej powoduje bowiem nie tylko wzrost N_c, ale również zmianę relacji kosztowych pomiędzy poszczególnymi wariantami napędowymi.

8.2. Ocena wskaźnikowa uzyskanych rozwiązań

W celu ilościowego uzupełnienia przeprowadzonej analizy porównawczej zdefiniowano trzy wskaźniki umożliwiające ocenę zależności pomiędzy prędkością konstrukcyjną, rodzajem zastosowanego układu napędowego oraz całkowitymi nakładami N_c. Pierwszy z nich określa względną zmianę nakładów wynikającą ze zwiększenia prędkości konstrukcyjnej, drugi pozwala ocenić strukturę nakładów według grup konstrukcyjnych, natomiast trzeci określa względną różnicę nakładów pomiędzy poszczególnymi technologiami napędowymi a referencyjnym wariantem elektrycznym.

Względna zmiana całkowitych nakładów $W_{N,v}$ – wskaźnik odpowiada na pytanie o ile procent wzrosną nakłady N_c, jeżeli dla tego samego rodzaju napędu zwiększymy prędkość konstrukcyjną z v_1 do v_2:

$$W_{N,v}(v_1, v_2) = \frac{N_c(v_2) - N_c(v_1)}{N_c(v_1)} \cdot 100\% \tag{8.1}$$

gdzie:

$W_{N,v}$ – względna zmiana całkowitych nakładów wynikająca ze zwiększenia prędkości konstrukcyjnej [%],

$N_c(v_1)$ – całkowite nakłady dla mniejszej wartości prędkości konstrukcyjnej [PLN],

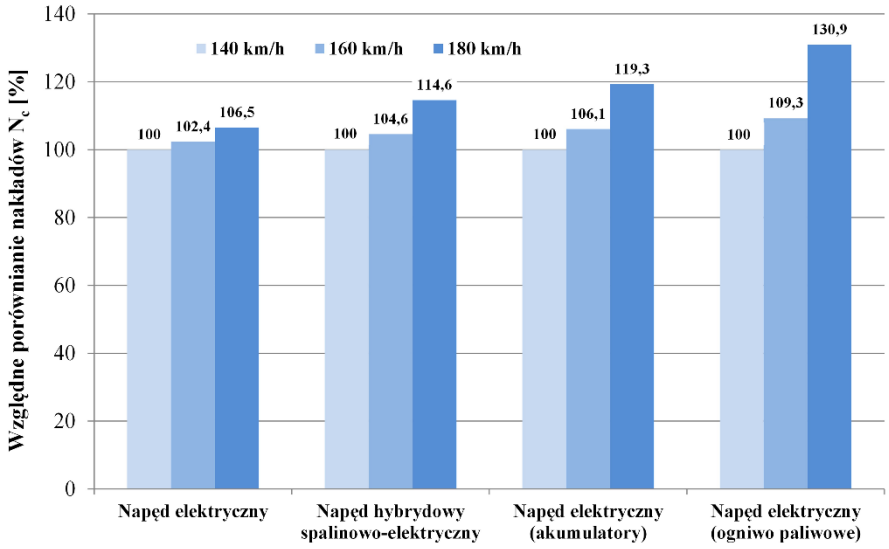
$N_c(v_2)$ – całkowite nakłady dla większej wartości prędkości konstrukcyjnej [PLN].

Dla pojazdu z napędem elektrycznym trakcyjnym i dla prędkości v_1 = 140 km/h i v_2 = = 180 km/h wzór (8.1) przybiera postać:

$$W_{N,v} = \frac{36\,963\,100 - 34\,699\,960}{34\,699\,960} \cdot 100\% = 6{,}5\% \tag{8.2}$$

Porównanie wyników uzyskanych dla trzech analizowanych prędkości konstrukcyjnych (140, 160 oraz 180 km/h) wskazuje, że jej zwiększenie przyczynia się do wzrostu nakładów N_c dla wszystkich rozpatrywanych wariantów układu napędowego (rys. 8.3). Skala tego zjawiska nie jest jednak liniowa, lecz zależy głównie od zastosowanej technologii napędu. Najmniejszą różnicę całkowitych nakładów na zmianę prędkości konstrukcyjnej zaobserwowano dla pojazdu z napędem elektrycznym trakcyjnym. Wartość N_c zwiększyła się z 34,7 mln PLN dla 140 km/h do 35,5 mln PLN dla 160 km/h oraz 36,9 mln PLN dla 180 km/h. W całym analizowanym przedziale prędkości oznacza to wzrost o 6,5%. Dla pojazdu z napędem hybrydowym spalinowo-elektrycznym wartości te wyniosły odpowiednio 39,7 mln PLN, 41,5 mln PLN i 45,5 mln PLN, co odpowiada wzrostowi o 14,6% między skrajnymi wartościami prędkości. Jeszcze większą dynamikę zmian stwierdzono dla napędów alternatywnych. Dla pojazdu elektrycznego z akumulatorami całkowite nakłady zwiększyły

się z 41,2 mln PLN przy 140 km/h do i 49,2 mln PLN przy 180 km/h, co oznacza łączny wzrost o 19,3%. Największe różnice wystąpiły dla wariantu konstrukcyjnego z ogniwami paliwowymi, dla którego N_c zwiększa się z 43,5 mln PLN do 47,6 mln PLN, a następnie do 57 mln PLN. Względna różnica między prędkością 140 i 180 km/h wynosi 30,9%.



Rys. 8.3. Względne porównanie nakładów całkowitych N_c dla różnych wariantów napędu i różnych prędkości

Przeprowadzona analiza wykazała występowanie zależności między prędkością konstrukcyjną pojazdu, zastosowaną technologią napędu oraz poziomem całkowitych nakładów N_c. Uzupełnieniem przeprowadzonych rozważań jest analiza struktury całkowitych nakładów oraz dynamiki ich zmian wraz ze zmianą prędkości konstrukcyjnej. W tym celu zdefiniowano dwa dodatkowe wskaźniki. Pierwszy z nich określa udział poszczególnych grup konstrukcyjnych w całkowitych nakładach N_c, umożliwiając identyfikację grup o największym znaczeniu ekonomicznym dla analizowanego wariantu konfiguracji. Drugi pozwala natomiast ocenić dynamikę zmian w kolejnych analizowanych przedziałach prędkości.

Wskaźnik udziału grupy konstrukcyjnej w całkowitych nakładach U_{GKi} – wskaźnik określa, jaka część całkowitych nakładów związanych z konfiguracją pojazdu przypada na i-tą grupę konstrukcyjną (wzór 8.3). Pozwala tym samym na ocenę struktury N_c oraz wskazanie grup konstrukcyjnych mających największy wpływ na poziom całkowitych nakładów:

$$U_{GKi} = \frac{N_{GKi}}{N_c} \cdot 100\% \tag{8.3}$$

gdzie:

U_{GKi} – udział i-tej grupy konstrukcyjnej w całkowitych nakładach [%],

N_{GKi} – nakłady przypisane do i-tej grupy konstrukcyjnej [PLN].

Zastosowanie wskaźnika U_{Gki} pozwala na porównywanie znaczenia poszczególnych grup konstrukcyjnych zarówno pomiędzy różnymi rodzajami napędu, jak i pomiędzy wariantami prędkości konstrukcyjnej. Szczególnie istotna jest możliwość obserwacji zmian udziału grup związanych bezpośrednio z układem napędowym, tj. GK2.1–GK2.4, ponieważ ich wartość

oraz udział w strukturze całkowitych nakładów są bezpośrednio związane z przyjętym rozwiązaniem technologicznym.

Przykładowo dla pojazdu z napędem wykorzystującym ogniwa paliwowe (FCEMU) udział grupy GK2.4 w całkowitych nakładach wynosi 24,3% dla prędkości 140 km/h, 25,9% dla prędkości 160 km/h oraz 30,8% dla prędkości 180 km/h. Oznacza to, że wraz ze zwiększeniem prędkości konstrukcyjnej, zwiększa się nie tylko wartość bezwzględna nakładów związanych z układem napędowym, ale również jego udział w całkowitych nakładach N_c. Zmiana struktury nakładów jest szczególnie widoczna przy porównaniu wariantów technologicznych. Dla prędkości 180 km/h udział odpowiedniej grupy napędowej wynosi 11,7% dla napędu elektrycznego trakcyjnego, 19,8% dla napędu spalinowo-elektrycznego, 25,0% dla napędu elektrycznego z akumulatorami oraz 30,8% dla napędu wykorzystującego ogniwa paliwowe.

Wskazuje to, że wraz ze zwiększeniem stopnia złożoności technologii napędowej, zwiększa się znaczenie ekonomiczne grupy konstrukcyjnej związanej bezpośrednio z realizacją napędu pojazdu. Analogiczną analizę można przeprowadzić dla pozostałych grup konstrukcyjnych. Wskaźnik U_{GKi} pozwala zatem określić, które elementy konfiguracji w największym stopniu odpowiadają za poziom oraz zmianę całkowitych nakładów i w jaki sposób ich znaczenie ekonomiczne zmienia się wraz ze zmianą parametrów wejściowych konfiguratora. Stanowi to rozwinięcie analizy całkowitych nakładów N_c, ponieważ umożliwia przejście od oceny pojazdu jako całości do identyfikacji źródeł obserwowanych zmian na poziomie jego grup konstrukcyjnych.

Wskaźnik przyspieszenia wzrostu nakładów K_A służy do porównania bezwzględnego przyrostu całkowitych nakładów w dwóch kolejnych, jednakowych przedziałach zmiany prędkości konstrukcyjnej – wzór (8.4). W analizowanym przypadku są to przedziały 140–160 km/h oraz 160–180 km/h, dla których zmiana prędkości wynosi każdorazowo 20 km/h:

$$K_A = \frac{N_c(180) - N_c(160)}{N_c(160) - N_c(140)} \tag{8.4}$$

Wskaźnik K_A jest wielkością bezwymiarową, ponieważ stanowi iloraz dwóch przyrostów całkowitych nakładów wyrażonych w tych samych jednostkach. Jego interpretacja przyjmuje następującą postać:

- $K_A = 1$ – przyrost całkowitych nakładów w obu analizowanych przedziałach prędkości jest jednakowy,
- $K_A > 1$ – przyrost nakładów w przedziale prędkości 160–180 km/h jest większy niż w przedziale 140–160 km/h,
- $K_A < 1$ – przyrost nakładów w przedziale prędkości 160–180 km/godz. jest mniejszy niż w przedziale 140–160 km/h.

Dla pojazdu z napędem elektrycznym trakcyjnym (oznaczonym we wzorze EMU) wskaźnik przyspieszenia wzrostu nakładów wynosi:

$$K_A^{EMU} = \frac{36\,963\,100 - 35\,518\,812}{35\,518\,812 - 34\,699\,960} = 1{,}76 \tag{8.5}$$

Otrzymana wartość $K_A^{EMU} = 1{,}76$ oznacza, że bezwzględny przyrost całkowitych nakładów związany ze zwiększeniem prędkości konstrukcyjnej ze 160 do 180 km/h jest około 1,76 razy

większy niż przyrost nakładów występujący przy zwiększeniu prędkości pojazdu ze 140 do 160 km/h.

Analogiczne obliczenia dla pozostałych technologii napędowych dają następujące wartości (napęd hybrydowy spalinowo-elektryczny oznaczono we wzorze jako DEMU):

$$K_A^{DEMU} = \frac{45\,528\,454 - 41\,541\,680}{41\,541\,680 - 39\,726\,587} = 2{,}20 \tag{8.6}$$

$$K_A^{BEMU} = \frac{49\,161\,825 - 43\,717\,223}{43\,717\,223 - 41\,207\,832} = 2{,}17 \tag{8.7}$$

$$K_A^{FCEMU} = \frac{57\,006\,218 - 47\,578\,067}{47\,578\,067 - 43\,535\,036} = 2{,}33 \tag{8.8}$$

Uzyskane wartości ($K_A > 1$) dla wszystkich analizowanych technologii napędowych wskazują, że zwiększenie całkowitych nakładów w kolejnych przedziałach prędkości nie jest równomierne. Zmiana prędkości konstrukcyjnej ze 160 do 180 km/h powoduje większy bezwzględny przyrost N_c niż zwiększenie prędkości ze 140 do 160 km/h, mimo że w obu przypadkach zmiana prędkości wynosi 20 km/h. Najmniejszą wartość wskaźnika K_A uzyskano dla pojazdu z napędem elektrycznym trakcyjnym – 1,76, natomiast dla pozostałych technologii wartości przekraczają wartość 2. Dla napędu hybrydowego spalinowo-elektrycznego $K_A = 2{,}20$, dla napędu elektrycznego z akumulatorami $K_A = 2{,}17$, natomiast dla pojazdu z ogniwami paliwowymi osiągnięto największą wartość $K_A = 2{,}33$.

Wyniki te należy interpretować w granicach przyjętego zakresu badawczego. Na podstawie trzech analizowanych wartości prędkości nie jest zasadne formułowanie ogólnego wniosku o przebiegu funkcji $N_c = f(v)$ poza badanym zakresem. Można natomiast stwierdzić, że w analizowanym przedziale 140–180 km/h przyrost całkowitych nakładów między 160 a 180 km/h jest większy niż między 140 a 160 km/h dla wszystkich czterech rozpatrywanych technologii napędowych. Wskaźnik K_A stanowi ilościową miarę tego zjawiska.

Zastosowanie wskaźników U_{GKi} oraz K_A rozszerza zakres analizy przedstawionej w rozdziale 8. Pierwszy z nich pozwala określić, w których obszarach konstrukcji pojazdu koncentrują się nakłady i jak zmienia się ich udział w strukturze N_c, natomiast drugi umożliwia ocenę dynamiki przyrostu całkowitych nakładów wraz ze zwiększaniem prędkości konstrukcyjnej. Oba wskaźniki pozwalają tym samym przejść od prostego porównania końcowych wartości N_c do analizy struktury oraz charakteru zachodzących zmian.

Z punktu widzenia opracowanej metody konfiguracji pojazdu oznacza to, że ocena wariantu konstrukcyjnego powinna uwzględniać nie tylko końcową wartość całkowitych nakładów N_c, ale również strukturę ich powstawania oraz dynamikę zmian wywołanych modyfikacją parametrów wejściowych. Zastosowanie wskaźników U_{GKi} oraz K_A, zwiększa możliwości analityczne opracowanego konfiguratora i pozwala na bardziej kompleksową ocenę wpływu przyjętych parametrów technicznych oraz technologii napędowej na ekonomiczne skutki konfiguracji pojazdu.

9. Weryfikacja narzędzia doboru parametrów

Proces weryfikacji narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego stanowi kluczowy etap badań własnych. Weryfikacja ma na celu potwierdzenie, że opracowane narzędzie zostało zaprojektowane i zaimplementowane zgodnie z przyjętymi założeniami, a jego struktura, logika działania oraz algorytmy decyzyjne są wewnętrznie spójne i poprawne [124]. W odróżnieniu od walidacji, weryfikacja koncentruje się na poprawności technicznej i metodologicznej rozwiązania, a nie na ocenie jego skuteczności rynkowej czy formalnej w konkretnym postępowaniu przetargowym [125]. Odpowiada ona na pytanie: czy opracowane narzędzie jest zbudowane w sposób prawidłowy i zgodny z założeniami projektowymi?

Proces weryfikacji został przeprowadzony zgodnie z podejściem procesowym, charakterystycznym dla systemów zarządzania jakością w przemyśle kolejowym, w szczególności w kontekście norm IRIS/ISO/TS 22163, gdzie szczególny nacisk kładzie się na jednoznaczność danych wejściowych, spójność procesu oraz kontrolę punktów decyzyjnych [126]. Zakres weryfikacji obejmował wszystkie kluczowe elementy narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego, w tym:

- strukturę konfiguratora oraz jego zgodność z kartą konfiguracyjną pojazdu,
- kompletność i jednoznaczność parametrów technicznych,
- poprawność powiązań pomiędzy parametrami,
- jakość i spójność danych wejściowych,
- poprawność działania algorytmów decyzyjnych,
- zgodność procesu konfiguracji z realnym procesem ofertowania.

Weryfikacja została przeprowadzona w oparciu o dane pochodzące z:

- platform postępowań przetargowych,
- systemów klasy ERP (IFS),
- otwartej macierzy danych opracowanej w arkuszu kalkulacyjnym,
- dokumentacji technicznej i ofertowej stosowanej w praktyce przemysłowej.

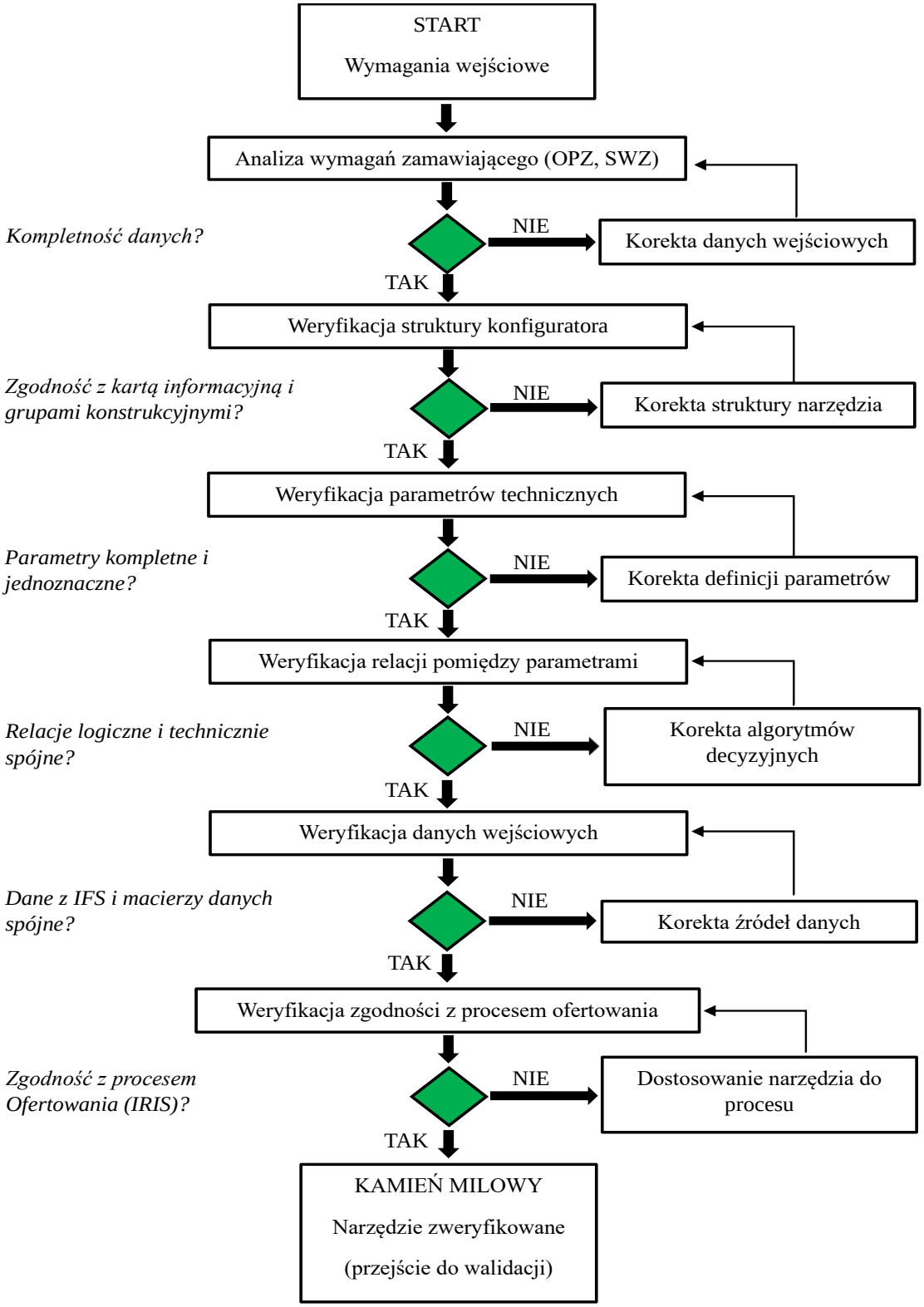
W celu zapewnienia obiektywności i powtarzalności procesu weryfikacji zastosowano kryteria weryfikacyjne, umożliwiające systematyczną ocenę poszczególnych obszarów funkcjonowania narzędzia (tab. 9.1). Kluczowym elementem weryfikacji była ocena poprawności procesu konfiguracji pojazdu szynowego, rozumianego jako sekwencja logicznych decyzji prowadzących od wymagań zamawiającego do spójnego zestawu parametrów technicznych pojazdu. W szczególności zweryfikowano, czy:

- każdy parametr posiada jednoznaczną definicję,
- określony jest jego dopuszczalny zakres wartości,
- zdefiniowane są relacje z innymi parametrami,
- eliminowane są konfiguracje sprzeczne technicznie lub formalnie.

Dodatkowym elementem weryfikacji była ocena zgodności narzędzia z rzeczywistym procesem ofertowania, zidentyfikowanym wcześniej jako proces główny w ujęciu norm IRIS. W ramach tego etapu przeprowadzono mapowanie narzędzia na poszczególne etapy procesu ofertowego, zweryfikowano spójność danych wejściowych i wyjściowych oraz potwierdzono możliwość wykorzystania wyników konfiguracji bezpośrednio w dokumentacji ofertowej.

Proces weryfikacji narzędzia został przedstawiony w formie schematu decyzyjnego (rys. 9.1), uwzględniającego kolejne bramki decyzyjne oraz sprzężenia, charakterystyczne dla

podejścia procesowego stosowanego w normie IRIS. Przeprowadzony etap weryfikacji pozwolił na kompleksową ocenę poprawności opracowanego narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego w ujęciu strukturalnym, funkcjonalnym oraz procesowym.



Rys. 9.1. Schemat decyzyjny procesu weryfikacji

Przeprowadzona weryfikacja potwierdziła zgodność struktury i logiki działania narzędzia z przyjętymi założeniami oraz jego powiązanie z rzeczywistym przebiegiem procesu ofertowego. Zastosowanie bramek decyzyjnych i pętli korekcyjnych umożliwia identyfikowanie niespójności na wczesnym etapie konfiguracji.

Tabela 9.1. Przyjęte kryteria weryfikacyjne dla narzędzia doboru parametrów pojazdu szynowego

Grupa kryteriów	**Obszar oceny**	**Opis kryterium**	**Metoda weryfikacji**	**Wynik**
Strukturalne	Struktura konfiguratora	Zgodność struktury narzędzia z kartą konfiguracyjną i grupami konstrukcyjnymi	Analiza porównawcza	✓
Strukturalne	Karta konfiguracyjna	Kompletność sekcji i brak luk parametrycznych	Przegląd ekspercki	✓
Funkcjonalne	Dobór parametrów	Poprawność przypisania parametrów do konfiguracji	Testy scenariuszowe	✓
Funkcjonalne	Relacje parametrów	Spójność zależności (np. napęd–masa–zasięg–LCC)	Analiza logiczna	✓
Dane wejściowe	Dane przetargowe	Jednoznaczność i kompletność wymagań opis przedmiotu zamówienia (OPZ)	Analiza dokumentów	✓
Dane wejściowe	Dane z IFS	Spójność danych kosztowych i technicznych	Weryfikacja systemowa	✓
Algorytmiczne	Reguły decyzyjne	Brak sprzeczności i pętli logicznych	Testy iteracyjne	✓
Algorytmiczne	Odporność	Reakcja na dane skrajne i wariantowe	Testy graniczne	✓
Procesowe	Proces ofertowania	Zgodność z mapą procesu IRIS	Mapowanie procesu	✓

10. Podsumowanie i wnioski

10.1. Ogólna charakterystyka wyników pracy

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy opracowania i wdrożenia autorskiej metody doboru parametrów pojazdu szynowego na etapie przygotowania oferty, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania innowacyjnych źródeł zasilania. Punktem wyjścia do przeprowadzonych badań była identyfikacja problemu dużej liczby wzajemnie powiązanych parametrów technicznych, eksploatacyjnych, ekonomicznych i środowiskowych, które muszą zostać uwzględnione podczas definiowania konfiguracji pojazdu. Informacje niezbędne do realizacji tego procesu pochodzą z wielu źródeł i podlegają ograniczeniom wynikającym zarówno z wymagań zamawiającego, jak i możliwości konstrukcyjnych, technologicznych oraz produkcyjnych przedsiębiorstwa.

W odpowiedzi na zidentyfikowany problem, opracowano metodykę konfiguracji oraz stanowiące jej praktyczną implementację narzędzie doboru parametrów pojazdu szynowego. Jego zadaniem jest wspomaganie procesu przechodzenia od wymagań zawartych w dokumentacji postępowania przetargowego do określenia konfiguracji technicznej pojazdu oraz związanych z nią nakładów finansowych lub/i środowiskowych. Podstawowymi elementami rozwiązania są karta konfiguracyjna, otwarta baza danych, lista kontrolna grup konstrukcyjnych oraz moduł konfiguracji, uzupełnione o reguły decyzyjne i procedurę weryfikacji. Narzędzie wykorzystuje dane pochodzące m.in. z dokumentacji przetargowej, systemów informatycznych przedsiębiorstwa, dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej oraz danych dotyczących stosowanych podzespołów.

W ramach opracowanej metody pojazd podzielono na grupy konstrukcyjne, co umożliwiło analizę wpływu poszczególnych parametrów na określone obszary jego konstrukcji oraz przypisanie rozwiązaniom technicznym odpowiednich nakładów. Strukturę narzędzia rozszerzono również o identyfikację nakładów dodatkowych oraz czynników ryzyka związanych m.in. ze zmianami cen materiałów i komponentów, kursów walut, dostępnością podzespołów i zakłóceniami w łańcuchach dostaw. Pozwoliło to na uwzględnienie w procesie konfiguracji nie tylko parametrów technicznych pojazdu, lecz także uwarunkowań mających znaczenie dla przygotowania i realizacji oferty.

Szczególnym obszarem badań była analiza wpływu zastosowanej technologii napędowej. Rozpatrzono cztery warianty: elektryczny zespół trakcyjny zasilany z sieci trakcyjnej, zespół trakcyjny z napędem spalinowo-elektrycznym, elektryczny zespół trakcyjny wyposażony w akumulatory oraz elektryczny zespół trakcyjny wykorzystujący ogniwa paliwowe. Dla sytuacji, w której technologia napędowa nie została jednoznacznie określona przez zamawiającego, zastosowano konfigurację iteracyjną. W pierwszym etapie układ napędowy może być traktowany jako funkcjonalna „czarna skrzynka", dla której określane są wymagania dotyczące m.in. mocy, zasięgu i sposobu użytkowania, natomiast w kolejnym etapie następuje dostosowanie konstrukcji pojazdu do wybranego rozwiązania napędowego.

Opracowane narzędzie poddano weryfikacji strukturalnej, funkcjonalnej, algorytmicznej i procesowej. Sprawdzono zgodność jego struktury z przyjętą metodyką, kompletność i jednoznaczność parametrów, poprawność relacji pomiędzy nimi, spójność danych wejściowych oraz działanie reguł decyzyjnych. Zweryfikowano również zgodność procesu

konfiguracji z przebiegiem procesu ofertowego. Zastosowanie macierzy kryteriów weryfikacyjnych, bramek decyzyjnych i pętli korekcyjnych umożliwiło sprawdzenie działania narzędzia dla analizowanych wariantów konfiguracji.

Rezultatem wdrożeniowym rozprawy jest funkcjonujące w przedsiębiorstwie narzędzie wspomagające proces konfiguracji pojazdu na etapie przygotowania oferty. Jego otwarta struktura umożliwia dalsze uzupełnianie bazy danych wraz z realizacją kolejnych projektów oraz pozyskiwaniem nowych informacji technicznych, konstrukcyjnych, produkcyjnych i ekonomicznych. Wdrożenie rozwiązania pozwoliło tym samym przenieść opracowaną metodykę z poziomu koncepcji badawczej do praktycznego zastosowania w rzeczywistym procesie przedsiębiorstwa.

Wkład naukowy rozprawy obejmuje sformalizowanie procesu konfiguracji pojazdu szynowego na etapie ofertowania, opracowanie sposobu integracji danych i zależności pomiędzy parametrami, agregowania nakładów w strukturze grup konstrukcyjnych oraz zastosowanie wskaźników umożliwiających ilościową ocenę wpływu wybranych parametrów technicznych i technologii napędowej na konfigurację pojazdu. Istotnym elementem opracowanej metodyki jest również iteracyjne podejście do konfiguracji, umożliwiające ponowną ocenę powiązanych elementów konstrukcji po zmianie kluczowych parametrów.

Przeprowadzone badania oraz uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że główny cel rozprawy został osiągnięty. Opracowano, zweryfikowano i wdrożono autorskie narzędzie doboru parametrów pojazdu szynowego wspomagające proces jego konfiguracji na etapie przygotowania oferty, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości zastosowania różnych technologii napędowych oraz ich wpływu na konstrukcję pojazdu i związane z nią nakłady. Uzyskane rezultaty stanowią jednocześnie odpowiedź na sformułowane w pracy główne pytanie badawcze. Wykazano możliwość zintegrowania wymagań zamawiającego, danych technicznych i produkcyjnych oraz zależności pomiędzy parametrami w ramach jednej metodyki konfiguracji, której strukturę tworzą karta konfiguracyjna, otwarta baza danych, lista kontrolna grup konstrukcyjnych, moduł konfiguracji, reguły decyzyjne oraz procedura weryfikacji. Przyjęte rozwiązanie umożliwia prowadzenie konfiguracji w sposób spójny, powtarzalny i weryfikowalny oraz ilościową ocenę wpływu wybranych parametrów technicznych i technologii napędowej na strukturę konstrukcyjną pojazdu i związane z nią nakłady.

Zrealizowane badania, analizy wariantowe oraz weryfikacja opracowanego narzędzia pozwalają sformułować wnioski o charakterze ogólnym i szczegółowym, odnoszące się zarówno do sposobu prowadzenia procesu konfiguracji pojazdu szynowego, jak i do wpływu wybranych parametrów technicznych oraz technologii napędowej na jego konstrukcję i związane z nią nakłady.

10.2. Wnioski ogólne

1. Konfiguracja pojazdu szynowego powinna być prowadzona jako proces systemowy, w którym parametry techniczne, eksploatacyjne i ekonomiczne są rozpatrywane łącznie, z uwzględnieniem występujących pomiędzy nimi zależności. Zmiana jednego

z kluczowych parametrów może powodować konieczność modyfikacji wielu grup konstrukcyjnych pojazdu.

2. Pomimo rosnących wymagań środowiskowych w Unii Europejskiej, obecne postępowania przetargowe cały czas opierają się przede wszystkim na kryterium cenowym. Nadal brakuje formalnych wytycznych dotyczących oceny kosztów środowiskowych w tych dokumentach.
3. Uporządkowanie wymagań zamawiającego w ramach karty konfiguracyjnej i listy kontrolnej grup konstrukcyjnych ogranicza ryzyko pominięcia lub błędnej interpretacji wymagań oraz umożliwia prześledzenie wpływu poszczególnych decyzji konfiguracyjnych na rozwiązania techniczne pojazdu.
4. Integracja danych pochodzących z dokumentacji przetargowej, systemów klasy ERP, dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej oraz informacji o dostępnych podzespołach zwiększa powtarzalność procesu konfiguracji. Otwarta struktura bazy danych umożliwia jej systematyczne uzupełnianie o wiedzę i doświadczenia pochodzące z kolejnych realizowanych projektów.
5. Iteracyjny charakter procesu konfiguracji umożliwia porównywanie alternatywnych wariantów technicznych przed podjęciem ostatecznej decyzji. Ma to szczególne znaczenie w sytuacji, gdy wymagania zamawiającego określają oczekiwane właściwości funkcjonalne pojazdu, lecz nie wskazują jednoznacznie technologii napędowej.
6. Rodzaj układu napędowego należy rozpatrywać jako parametr wpływający na konfigurację całego pojazdu, a nie wyłącznie na grupę konstrukcyjną odpowiedzialną za napęd. Zastosowanie odmiennej technologii zasilania może powodować zmiany m.in. konstrukcji nośnej, wózków, układów sterowania, bezpieczeństwa oraz wyposażenia pomocniczego.
7. Ocena wariantów konfiguracji nie powinna ograniczać się do minimalizacji nakładów. Rozwiązanie charakteryzujące się większymi nakładami może być uzasadnione wymaganiami eksploatacyjnymi, w szczególności koniecznością jazdy po liniach niezelektryfikowanych, wymaganym zasięgiem lub innymi warunkami użytkowania pojazdu.
8. Uwzględnienie ryzyka, wymagań dodatkowych oraz nakładów pośrednich pozwala oceniać konfigurację w szerszym kontekście wykonalności projektu. Dotyczy to m.in. zmian cen surowców, kursów walut, zakłóceń łańcucha dostaw, badań, certyfikacji, szkoleń, utrzymania oraz zobowiązań gwarancyjnych.
9. Formalne punkty kontrolne, bramki decyzyjne i pętle korekcyjne zwiększają niezawodność procesu konfiguracji, ponieważ umożliwiają identyfikację niespójności technicznych i formalnych przed przejściem do kolejnych etapów przygotowania oferty.
10. Standaryzacja procesu konfiguracji ogranicza jego zależność od indywidualnego doświadczenia poszczególnych pracowników. Wiedza ekspercka pozostaje niezbędna, jednak może być w większym stopniu formalizowana, utrwalana i wykorzystywana w kolejnych projektach.
11. Opracowana struktura narzędzia może zostać również użyta do innych kategorii taboru szynowego. Logika oparta na wymaganiach wejściowych, karcie

konfiguracyjnej, otwartej bazie danych, podziale na grupy konstrukcyjne i module obliczeniowym ma charakter możliwy do adaptacji. Dalsze badania mogą zatem obejmować tramwaje, lokomotywy, pojazdy dwusystemowe, zespoły trakcyjne przeznaczone do ruchu dalekobieżnego lub inne klasy pojazdów, przy odpowiednim dostosowaniu list parametrów oraz struktury grup konstrukcyjnych.

10.3. Wnioski szczegółowe

1. Dla bazowej konfiguracji pojazdu o prędkości konstrukcyjnej 160 km/h najmniejsze całkowite nakłady uzyskano dla wariantu EMU – 35,5 mln zł. Dla wariantu spalinowo-elektrycznego wyniosły one 41,5 mln zł, dla BEMU 43,7 mln zł, a dla FCEMU 47,6 mln zł. W stosunku do wariantu referencyjnego oznaczało to zwiększenie nakładów odpowiednio o 16,7%, 23,1% oraz 34%.
2. Głównym źródłem różnic nakładów pomiędzy analizowanymi wariantami była grupa konstrukcyjna bezpośrednio związana z układem napędowym, jednak skutki zastosowania odmiennej technologii występowały również w pozostałych grupach konstrukcyjnych.
3. Zmiana prędkości konstrukcyjnej ze 140 do 180 km/h powodowała zwiększenie całkowitych nakładów dla wszystkich analizowanych technologii napędowych, przy czym skala tego wzrostu była wyraźnie zróżnicowana. Nakłady zwiększyły się o 6,5% dla EMU, 14,6% dla wariantu spalinowo-elektrycznego, 19,3% dla BEMU oraz 30,9% dla FCEMU.
4. Wraz ze zwiększeniem prędkości konstrukcyjnej zmieniała się wrażliwość całkowitych nakładów na zastosowaną technologię napędową. Oznacza to, że znaczenie właściwego doboru źródła zasilania zmienia się wraz ze zwiększaniem wymagań dotyczących parametrów dynamicznych pojazdu.
5. Wskaźnik dla nakładów K_A osiągnął wartości większe od jedności dla wszystkich analizowanych technologii. Wynosił on 1,76 dla EMU, 2,2 dla wariantu spalinowo-elektrycznego, 2,17 dla BEMU oraz 2,33 dla FCEMU. W badanym zakresie 140–180 km/h wskazuje to na większy przyrost nakładów pomiędzy 160 a 180 km/h niż pomiędzy 140 a 160 km/h.
6. Wraz ze zwiększeniem złożoności technologii napędowej rozbudowywał się udział grupy konstrukcyjnej związanej z napędem w całkowitych nakładach. Dla prędkości 180 km/h udział ten wynosił 11,7% dla EMU, 19,8% dla wariantu spalinowo-elektrycznego, 25,0% dla BEMU oraz 30,8% dla FCEMU.
7. Wskaźnik udziału grupy konstrukcyjnej U_{GKi} umożliwia identyfikację obszarów mających największy wpływ na całkowite nakłady. Może być dzięki temu wykorzystywany do wskazywania obszarów wymagających optymalizacji, negocjacji z dostawcami oraz prowadzenia analiz typu „make or buy”.
8. Zastosowane wskaźniki pozwalają przejść od prostego porównania końcowych wartości nakładów do ilościowej analizy struktury i dynamiki ich zmian. Umożliwia to określenie nie tylko, który wariant jest bardziej kosztowny, lecz również wskazanie przyczyn i obszarów powstawania różnic.

9. Weryfikacja narzędzia potwierdziła możliwość wykorzystania opracowanej struktury do identyfikowania konfiguracji niespójnych technicznie lub formalnie. Zastosowanie reguł decyzyjnych, bramek kontrolnych oraz pętli korekcyjnych umożliwia przeprowadzenie procesu konfiguracji w sposób uporządkowany i weryfikowalny.
10. Opracowane narzędzie może wspomagać podejmowanie decyzji już na wczesnym etapie przygotowania oferty, wskazując nie tylko poziom całkowitych nakładów dla poszczególnych wariantów, lecz również grupy konstrukcyjne odpowiedzialne za różnice oraz skutki zmian parametrów wejściowych.

Przedstawione wnioski potwierdzają praktyczne znaczenie opracowanej w ramach rozprawy autorskiej metodyki konfiguracji pojazdu szynowego. Jej istotą jest integracja wymagań zamawiającego, danych technicznych i produkcyjnych przedsiębiorstwa, struktury grup konstrukcyjnych, technologii napędowych oraz oceny nakładów i ryzyka w ramach jednego, iteracyjnego procesu. Praktyczną implementację metodyki stanowi opracowane i wdrożone narzędzie konfiguracyjne, umożliwiające prowadzenie procesu doboru parametrów w sposób uporządkowany, powtarzalny i weryfikowalny. Otwarta struktura rozwiązania pozwala na jego dalsze doskonalenie wraz z rozszerzaniem bazy danych i gromadzeniem doświadczeń z kolejnych projektów.

10.4. Proponowane kierunki dalszych prac

Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość dalszego rozwoju zarówno samego konfiguratora, jak i opracowanej metodyki badawczej. Ze względu na otwartą strukturę bazy danych oraz modułowy charakter narzędzia dalsze prace mogą być prowadzone równolegle w obszarze zwiększania dokładności modeli, rozszerzania zakresu analizowanych pojazdów oraz automatyzacji procesu decyzyjnego.

1. Pierwszym kierunkiem powinno być systematyczne rozwijanie otwartej bazy danych. Kolejne zakończone projekty i postępowania przetargowe mogą dostarczać nowych informacji dotyczących parametrów technicznych, rzeczywistych nakładów, cen podzespołów, pracochłonności, zmian konstrukcyjnych oraz wymagań zamawiających. Zwiększanie liczby obserwacji umożliwi stopniowe ograniczanie niepewności wartości wykorzystywanych podczas konfiguracji oraz stworzy podstawę do analiz statystycznych i prognostycznych.
2. Szczególnie wartościowe byłoby rozszerzenie badań wariantowych o większą liczbę wartości prędkości konstrukcyjnej oraz innych parametrów wejściowych. W niniejszej pracy analizę przeprowadzono dla trzech wartości: 140, 160 i 180 km/h. Pozwoliło to wykazać występowanie narastającego przyrostu nakładów pomiędzy analizowanymi punktami w badanym przedziale, nie daje jednak podstaw do określenia przebiegu zależności poza tym zakresem. Zwiększenie liczby punktów badawczych pozwoliłoby dokładniej określić charakter funkcji $N_c = f(v)$, wyznaczyć obszary szczególnie dużej wrażliwości oraz zweryfikować, czy obserwowana dynamika utrzymuje się w szerszym zakresie prędkości. Szczególnie istotne jest to w kontekście wprowadzenia kolei dużych prędkości.

3. Analogiczne analizy wrażliwości mogą zostać przeprowadzone dla innych parametrów karty konfiguracyjnej, takich jak masa pojazdu, liczba członów, pojemność pasażerska, wymagane przyspieszenie, zasięg w trybie bezsieciowym czy pojemność magazynu energii. Pozwoliłoby to zbudować wielowymiarową mapę zależności pomiędzy parametrami wejściowymi a całkowitymi nakładami i określić parametry o największym wpływie na wynik konfiguracji.
4. Istotnym kierunkiem rozwoju jest pogłębienie analiz dotyczących innowacyjnych źródeł zasilania. W przypadku pojazdów BEMU szczególnego znaczenia nabiera odwzorowanie wpływu pojemności, masy i degradacji akumulatorów, liczby cykli ładowania, profilu trasy oraz dostępności infrastruktury ładowania. W przypadku pojazdów FCEMU dalsze badania powinny uwzględniać konfigurację magazynu wodoru, udział akumulatora buforowego, sposób zarządzania energią oraz wpływ infrastruktury tankowania i źródła pochodzenia wodoru.
5. Dalszego rozwoju wymaga również część środowiskowa narzędzia. Naturalnym rozszerzeniem jest integracja konfiguratora z pełną analizą cyklu życia, obejmującą nie tylko etap wytwarzania pojazdu, lecz również produkcję i transport materiałów, eksploatację, wymianę kluczowych podzespołów, utrzymanie oraz zagospodarowanie pojazdu po zakończeniu użytkowania. Szczególnie istotne byłoby stworzenie jednolitego sposobu porównywania nakładów ekonomicznych i środowiskowych dla wszystkich analizowanych technologii napędowych. Szczególnie jest to istotne w kontekście planowanego rozwoju i zakresu raportów niefinansowych dla przedsiębiorstw.
6. Kolejnym obszarem dalszych prac jest rozwój analizy ryzyka. Opracowaną metodę oceny prawdopodobieństwa i skutku wystąpienia poszczególnych zagrożeń można rozbudować o analizę scenariuszową i probabilistyczną. Pozwoliłoby to na określanie nie tylko jednej oczekiwanej wartości nakładów, lecz również przedziału możliwych wyników zależnego od zmian cen materiałów, kursów walut, terminowości dostaw, kosztów energii oraz innych zmiennych rynkowych. W dalszej perspektywie możliwe byłoby zastosowanie metod symulacyjnych, np. symulacji Monte Carlo, do ilościowej oceny niepewności konfiguracji.
7. Perspektywicznym kierunkiem rozwoju jest wykorzystanie metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. Wraz ze zwiększeniem liczby danych historycznych, możliwe byłoby zastosowanie modeli predykcyjnych do prognozowania nakładów, identyfikowania typowych konfiguracji, wykrywania nietypowych wartości oraz wspomagania wyboru wariantów spełniających jednocześnie wiele ograniczeń technicznych i ekonomicznych. Sztuczna inteligencja nie powinna zastępować reguł inżynierskich stanowiących podstawę konfiguratora, lecz może stanowić dodatkową warstwę wspomagającą analizę dużej liczby możliwych kombinacji parametrów.
8. Długookresowym kierunkiem rozwoju może być stopniowe przekształcanie konfiguratora w element cyfrowej reprezentacji pojazdu zbliżonej funkcjonalnie do koncepcji bliźniaka cyfrowego. Obecne rozwiązanie opisuje projektowany pojazd i jego konfigurację, lecz nie posiada ciągłego sprzężenia z rzeczywistym obiektem eksploatacyjnym. Połączenie go w przyszłości z danymi pochodzącymi z systemów

diagnostycznych i pokładowych, informacjami RAMS, rzeczywistym zużyciem energii, danymi dotyczącymi niezawodności i kosztów utrzymania pozwoliłoby na aktualizowanie modelu w całym cyklu życia pojazdu.

9. Istotnym elementem przyszłych badań będzie także dalsze sprawdzanie narzędzia na rosnącym zbiorze rzeczywistych projektów i konfiguracji. Obecna praca potwierdza poprawność strukturalną, funkcjonalną i procesową zaproponowanego rozwiązania. Poszerzanie zbioru zastosowań pozwoliłoby natomiast w przyszłości przeprowadzić odrębne badania nad trafnością prognoz kosztowych, stabilnością wyników oraz skutecznością narzędzia w różnych klasach projektów i warunkach rynkowych.

Podsumowując, opracowane rozwiązanie należy traktować jako otwartą platformę konfiguracyjno-analityczną, której funkcjonalność może być rozwijana wraz z rozszerzaniem bazy danych, zwiększaniem liczby analizowanych parametrów i wariantów pojazdów oraz integracją z kolejnymi systemami informatycznymi przedsiębiorstwa. Uzyskane wyniki wykazały, że zmiana technologii napędowej wpływa nie tylko na układ napędowy, lecz również na pozostałe grupy konstrukcyjne oraz poziom i strukturę całkowitych nakładów. Potwierdza to zasadność systemowego i iteracyjnego podejścia do konfiguracji pojazdu, uwzględniającego jednocześnie wymagania zamawiającego, zależności techniczne, uwarunkowania ekonomiczne oraz możliwości produkcyjne przedsiębiorstwa. Opracowana metodyka i stanowiący jej praktyczną implementację konfigurator tworzą podstawę do dalszego doskonalenia procesu ofertowania oraz wstępnego projektowania pojazdów szynowych. Rozwiązanie stanowi zatem zarówno rezultat badawczy rozprawy, jak i narzędzie o bezpośrednim znaczeniu wdrożeniowym, które będzie rozwijane i aktualizowane wraz z postępem technologicznym oraz gromadzeniem nowych doświadczeń przedsiębiorstwa.

Bibliografia

[1] Komisja Europejska. Insights from the European Commission's 2024 Transport Report. Bruksela; 2024.

[2] Komisja Europejska. Statistical pocketbook 2025. Bruksela; 2025.

[3] Komisja Europejska. Strategia na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności – europejski transport na drodze ku przyszłości. Bruksela; 2020.

[4] Komisja Europejska. Plan działania na rzecz rozwoju dalekobieżnych i transgranicznych kolejowych przewozów pasażerskich. COM(2021) 810 final. Bruksela; 2021.

[5] Urząd Transportu Kolejowego. Podsumowanie 2024 r. w przewozach pasażerskich i towarowych. Warszawa; 2025.

[6] Eurostat. Rail passenger transport increased by 5.8% in 2024. Luxemburg; 2025.

[7] Rada Unii Europejskiej. Europejski zielony ład. Bruksela; 2025.

[8] Rada Unii Europejskiej. Bardziej ekologiczny transport. Bruksela; 2025.

[9] Europejska Agencja Środowiska. Rail and waterborne – best for low-carbon motorised transport. EEA Briefing No 01/2021. Kopenhaga; 2021.

[10] Europejska Agencja Środowiska. Specific CO2 emissions per passenger-km and per mode of transport in Europe. Kopenhaga; 2024.

[11] Europejska Agencja Środowiska. Transport and Environment Report 2020: Train or plane? Report no 19/2020. Luksemburg; 2021.

[12] Eurostat. Freight transport statistics – modal split. Luksemburg; 2025.

[13] Urząd Transportu Kolejowego. Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego w 2023 r. Warszawa; 2024.

[14] Fundacja ProKolej. Kolej dla klimatu – klimat dla kolei. Warszawa; 2021.

[15] Europejska Agencja Środowiska. Transport and Environment Report 2022: Digitalisation in the mobility system – challenges and opportunities. Report no 17/2022. Luksemburg; 2023.

[16] Europe's Rail. Delivering a high capacity integrated European railway network. Bruksela: Europe's Rail Joint Undertaking; 2024.

[17] Komisja Europejska. Horizon Europe – research and innovation funding programme. Bruksela; 2021.

[18] Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Programy krajowe. Warszawa; 2026 [cyt. 21.01.2026]. Dostępne z: https://www.gov.pl/web/ncbr/programy-krajowe.

[19] Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności. Stan implementacji technologii wodorowych w sektorze transportu. Warszawa; 2025.

[20] Komisja Europejska. Zrozumieć politykę Unii Europejskiej: Transport. Luksemburg; 2014.

[21] Wańkowicz W. Transport po przystąpieniu Polski do Unii Europejskiej. Problemy Rozwoju Miast. 2007;4(1-2):27-41.

[22] Raczyński J. Od Dyrektywy 91/440 do liberalizacji rynku kolejowego. TTS Technika Transportu Szynowego. 2003;(12):38-45.

[23] Parlament Europejski. Transport kolejowy – polityka UE. Noty tematyczne o Unii Europejskiej. Bruksela; 2025.

[24] Międzynarodowy Związek Kolei. 2024 Global Rail Sustainability Report. Paryż: International Union of Railways; 2025.

[25] Komisja Europejska. White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system. COM(2011) 144 final. Bruksela; 2011.

[26] Europejski Komitet Ekonomiczno-Społeczny. Rail helping the EU meet the Green Deal's goals. Luksemburg; 2021.

[27] Torkayesh AE, Venghaus S. Decoding the transport policy maze towards climate neutrality: Cross-sectoral policy landscapes. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024;206:114865. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114865.

[28] Pielecha I, Merkisz J, Andrzejewski M, Daszkiewicz P, Świechowicz R, Nowak M. Ultrakondensatory i ogniwa paliwowe w układach napędowych pojazdów szynowych. Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe. 2019;(2):9-19. doi: https://doi.org/10.53502/RAIL-138526.

[29] Furuta R, Kawasaki J, Kondo K. Hybrid traction technologies with energy storage devices for nonelectrified railway lines. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2010;5(3):291-297. doi: https://doi.org/10.1002/tee.20532.

[30] Europejska Agencja Kolejowa. Report on Railway Safety and Interoperability in the EU. Walencja; 2024.

[31] Morfoulaki M, Kotoula M. TEN-T analysis: TEN-T accessibility and project impact network on TEN-T Network. MOVE21 project deliverable D8.7. 2025 [cyt. 21.02.2026]. Dostępne z: https://move21.eu/wp-content/uploads/2025/02/MOVE21-WP8-D8.7-TEN-T-Analysis-TEN-T-Accessibility-and-project-impact-network-on-TEN-T-Network.pdf.

[32] Budgen E. Connecting Europe: TEN-T and the need for cross-border interoperability. Global Railway Review. 2024.

[33] Favre A. UIC Railway Statistics – latest updates and rail traffic trend monitoring. Przedstawiono na: UNECE Working Party on Transport Statistics; 2023.

[34] UNIFE. UNIFE vision paper on the evolution of regulation, standardisation and innovation for a competitive European rail supply industry. Bruksela; 2022.

[35] Helmold M. Virtual and innovative quality management across the value chain. Cham: Springer; 2023. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30089-9.

[36] Mozhaeva T, Simkin A, Proskurin A. Evaluation of the maturity level of sustainable transport enterprise development. E3S Web of Conferences. 2024;471:06004. doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447106004.

[37] Yadav N, Heriyati P, Kumar H, Tamara D. Influence of quality management and allied certifications on consumers. International Journal of Quality and Service Sciences. 2022;14(3):421-441. doi: https://doi.org/10.1108/IJQSS-09-2021-0120.

[38] Gaponov V, Kuznetsov D, Khvostikov A, Alekhin R. Risk analysis is a prerequisite for quality management of traction rolling stock repairs. MATEC Web of Conferences. 2021;346:03018.
doi: https://doi.org/10.1051/matecconf/202134603018.

[39] Chruzik K, Graboń-Chałupczak M. Railway safety management: systems, practices, and emerging trends. Londyn: Routledge; 2025.
doi: https://doi.org/10.4324/9781003658726.

[40] Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym. Dz.U. 2003 nr 86 poz. 789; tekst jedn. Dz.U. 2025 poz. 1234 z późn. zm.

[41] Centrum Unijnych Projektów Transportowych. Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym – omówienie kluczowych założeń i zakresu regulacji. Warszawa; 2025.

[42] Kancelaria Senatu. Opinia prawna o ustawie o Funduszu Kolejowym. Warszawa; 2005.

[43] Rico C, Heyl B. The state of the EU's rail infrastructure: investment priorities for more connected and resilient networks. Bruksela; 2025.

[44] Góra I. Dokonania i zamierzenia Urzędu Transportu Kolejowego. Warszawa: Stowarzyszenie Ekspertów i Menedżerów Transportu Szynowego; 2025.

[45] Urząd Transportu Kolejowego. Strategia UTK na lata 2023-2027. Warszawa; 2023.

[46] Bocheński T. Komponent kolejowy Centralnego Portu Komunikacyjnego – ocena inwestycji. Instytut Studiów Regionalnych; 2024.

[47] Żurkowski A. High-speed rail in Poland: advances and perspectives. Boca Raton: CRC Press; 2018. doi: https://doi.org/10.1201/9781351003308.

[48] Gawłowski K. Realizacja programu budowy linii dużych prędkości w Polsce. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. 2011;96(158):95-105.

[49] Kolejowy Portal. Spółka CPK chce kupić ponad 100 pociągów KDP. 2023 [cyt. 13.03.2026]. Dostępne z: https://kolejowyportal.pl/spolka-cpk-chce-kupic-ponad-100-pociagow-kdp/.

[50] Boratyńska-Karpiej E, Engel P. Innowacyjność w projektach transportowych finansowanych z Funduszy Europejskich. Transport Miejski i Regionalny. 2021;(7-8):28-34.

[51] Pieriegud J. System transportowy Polski: 20 lat w Unii Europejskiej. Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH; 2025.

[52] Urząd Transportu Kolejowego. Potencjał taborowy – trendy i prognozy. Warszawa; 2020.

[53] Urząd Transportu Kolejowego. Jakie będą trendy na rynku taboru? Przedstawiono na: IX Europejskie Forum Taborowe; Warszawa; 2022.

[54] Ustawa z dnia 11 września 2019 r. – Prawo zamówień publicznych (t.j. Dz.U. z 2026 r. poz. 793 z późn. zm.).

[55] Kardas M. Zamówienia publiczne jako instrument polityki innowacyjnej. Zarządzanie Publiczne. 2016;35(1):32-46.
doi: https://doi.org/10.15678/ZP.2016.35.1.03.

[56] Komisja Europejska. Public procurement guidance for practitioners on the avoidance of the most common errors in projects funded by the European Structural and Investment Funds. Luksemburg; 2018.

[57] Komisja Europejska. Guidance on public procurement of innovation. Luksemburg; 2020.

[58] Raczyńska J. Usługi publiczne w kolejowym transporcie pasażerskim w Unii Europejskiej. Technika Transportu Szynowego. 2012;(4):33-45.

[59] Chyliński P, red. Wytyczne dla zamawiającego tabor pasażerski. Warszawa: Instytut Kolejnictwa; 2020.

[60] Sitarz M. The safety, operation, and energy efficiency of rail vehicles - a case study for Poland. Energies. 2024;17(6):1298. doi: https://doi.org/10.3390/en17061298.

[61] Frankowski M. Criteria for evaluating offers in tender procedures for the purchase of new rolling stock. Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe. 2024;(3-4):3-12. doi: https://doi.org/10.53502/RAIL-195803.

[62] Frankowski M. Application of Multi Criteria Decision Making using weighted sum method in tender procedures for the procurement of rail vehicles with innovative power sources. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie. 2024;90:223-238. doi: https://doi.org/10.21008/j.0239-9415.2024.090.12.

[63] PKP Intercity SA. Ogłoszenie o zamówieniu 2017/S 106-213587: Dostawa 55 wagonów osobowych wraz z wykonaniem ich przeglądu na 3-cim poziomie utrzymania. 3 czerwca 2017 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://ted.europa.eu/pl/notice/-/detail/213587-2017.

[64] PKP Intercity SA. Specyfikacja Istotnych Warunków Zamówienia: Dostawa 8 wagonów osobowych specjalnych do przewozu osób na potrzeby Sił Zbrojnych RP, postępowanie 15/10/TUT/2017. 2017 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://www.intercity.pl/dokumenty/przetargi/rok%202017/8%20wagon%C3%B3w%20specjalnych%20%2817.11.2017%29/SIWZ.pdf.

[65] PKP Intercity SA. Ogłoszenie o zamówieniu 2022/S 213-612542: Dostawa 300 wagonów osobowych wraz z wykonaniem przeglądu na 3-cim poziomie utrzymania. 4 listopada 2022 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://ted.europa.eu/pl/notice/-/detail/612542-2022.

[66] PKP Intercity SA. Postępowanie 23/WNP-018177/TUT: Dostawa 18 lekkich manewrowych lokomotyw spalinowych. 16 sierpnia 2023 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://www.intercity.pl/pl/site/o-nas/przetargi/biezace-przetargi/dostawa-18-lekkich-manewrowych-lokomotyw-spalinowych-nr-23/wnp-018177/tut.html.

[67] PKP Intercity SA. Postępowanie 20/WNP-006234/TUT: Dostawa 63 lokomotyw elektrycznych wielosystemowych o prędkości nie mniejszej niż 200 km/h wraz ze świadczeniem usług utrzymania. 4 czerwca 2021 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://www.intercity.pl/pl/site/o-nas/przetargi/wyniki-postepowan-przetargowych/dostawa-63-lokomotyw-elektrycznych-wielosystemowych-o-predkosci-nie-mniejszej-niz-200-km/h-wraz-ze-swiadczeniem-uslug-utrzymania-nr-20/wnp-006234/tut.html.

[68] PKP Intercity SA. Ogłoszenie o zamówieniu 2023/S 149-474352: Dostawa 38 siedmiowagonowych składów piętrowych typu push-pull wraz z 45 lokomotywami wielosystemowymi oraz świadczeniem usług utrzymania lokomotyw wielosystemowych. 4 sierpnia 2023 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://ted.europa.eu/pl/notice/-/detail/474352-2023.

[69] Polregio SA. Ogłoszenie o zamówieniu 2022/S 085-231191: Zawarcie umowy ramowej na dostawę fabrycznie nowych elektrycznych zespołów trakcyjnych do obsługi kolejowych przewozów pasażerskich. 2 maja 2022 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://ted.europa.eu/pl/notice/-/detail/231191-2022.

[70] Województwo Wielkopolskie. Ogłoszenie o zamówieniu 2023/S 117-365928: Poprawa mobilności przestrzennej mieszkańców Wielkopolski w publicznym transporcie zbiorowym poprzez zakup nowego taboru kolejowego. 20 czerwca 2023 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://ted.europa.eu/pl/notice/-/detail/365928-2023.

[71] PKP Szybka Kolej Miejska w Trójmieście Sp. z o.o. Ogłoszenie o zamówieniu 2022/S 169-480044: Dostawa 10 czteroczłonowych fabrycznie nowych elektrycznych zespołów trakcyjnych wraz z dostawą sprzętu przeznaczonego do unowocześnienia zaplecza utrzymania taboru. 2 września 2022 [cyt. 16.03.2026]. Dostępne z: https://ted.europa.eu/pl/notice/-/detail/480044-2022.

[72] Mohamad Idris MF, Saad NH, Yahaya MI, Shuib A, Wan Mohamed WM, Mohamed Amin AN. Cost of rolling stock maintenance in urban railway operation: literature review and direction. Pertanika Journal of Science and Technology. 2022;30(2):1045-1071. doi: https://doi.org/10.47836/pjst.30.2.11.

[73] Rungskunroch P, Shen ZJ, Kaewunruen S. Benchmarking environmental and economic impacts from the HSR networks considering life cycle perspectives. Environmental Impact Assessment Review. 2021;90:106608. doi: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106608.

[74] Seyedan Oskouei SF, Abapour M, Beiraghi M. Identifying critical components for railways rolling stock reliability: a case study for Iran. Scientific Reports. 2024;14:12080. doi: https://doi.org/10.1038/s41598-024-62841-2.

[75] Borjigin AO, Sresakoolchai J, Kaewunruen S, Hammond J. Digital twin aided sustainability assessment of modern light rail infrastructures. Frontiers in Built Environment. 2022;8:796388. doi: https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.796388.

[76] Jarzębowski S, Mondy C, Dalewska-Mądra I, Enz M. Strategic procurement management of railroad rolling stock in the European Union. Central European Management Journal. 2024;32(4):567-584. doi: https://doi.org/10.1108/CEMJ-07-2023-0288.

[77] Gołębiowski P, Góra I, Bolzhelarskyi Y. Risk assessment in railway rolling stock planning. Archives of Transport. 2023;65(1):137-154. doi: https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.2817.

[78] Taherdoost H, Madanchian M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods and concepts. Encyclopedia. 2023;3(1):77-87. doi: https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006.

[79] Sharma V, Zivic F, Adamovic D, Ljusic P, Kotorcevic N, Slavkovic V, i wsp. Multi-Criteria Decision Making methods for selection of lightweight material for railway vehicles. Materials. 2023;16(1):368. doi: https://doi.org/10.3390/ma16010368.

[80] Ćwil M, Bartnik W, Jarzębowski S. Railway vehicle energy efficiency as a key factor in creating sustainable transportation systems. Energies. 2021;14(16):5211. doi: https://doi.org/10.3390/en14165211.

[81] Olmos J, Gandiaga I, Lopez D, Larrea X, Nieva T, Aizpuru I. In-depth life cycle cost analysis of a Li-ion battery-based hybrid diesel-electric multiple unit. W: 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Piscataway: IEEE; 2020. s. 1-5. doi: https://doi.org/10.1109/VPPC49601.2020.9330908.

[82] Karkosińska-Brzozowska N, Stromski P, Karkosiński D. A multi-criteria decision model for the introduction of electric storage multiple units on the partially electrified Gdynia-Hel railway. Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe. 2021;(2):1-15. doi: https://doi.org/10.53502/RAIL-139978.

[83] Čarný Š, Šperka A, Zitrický V. Multi-criteria evaluation of railway transport using evaluation method. LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics. 2020;11(2):88-99. doi: https://doi.org/10.2478/logi-2020-0018.

[84] Jiang K, Tian Z, Wen T, Hillmansen S, Zhang Y. Cost modelling-based route applicability analysis of United Kingdom passenger railway decarbonization options. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2024;160:110094. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110094.

[85] Yeboah DB, Kaewunruen S. Comparative lifecycle cost and sustainability assessments between very-light rail and bus-rapid transit. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2025;32:101529. doi: https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101529.

[86] Szeląg A, Massel A. Application of multi-criteria analysis for the selection of power supply system for electrification new lines in the existing railway network energized by 3 kV DC system. Archives of Transport. 2025;74(2):43-63. doi: https://doi.org/10.61089/aot2025.RV42MS78.

[87] Manzolli JA, Yu J, Miranda-Moreno L. Synthetic multi-criteria decision analysis (S-MCDA): a new framework for participatory transportation planning. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2025;31:101463. doi: https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101463.

[88] Popovich N, Johnsen M. An action plan for rail energy and emissions innovation. Washington: U.S. Department of Energy; 2024. Report no: DOE/EE-2865. doi: https://doi.org/10.2172/2502030.

[89] Cichoński Z, Andrzejewski M, Kustosz J. Przegląd rozwiązań technicznych zeroemisyjnych pojazdów szynowych. Przedstawiono na: XXV Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe; 2023; Polanica-Zdrój.

[90] Domínguez M, Fernández-Cardador A, Fernández-Rodríguez A, Cucala AP, Pecharromán RR, Urosa Sánchez P, et al. Review on the use of energy storage systems in railway applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025;207:114904. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114904.

[91] Boev P, Zimmermann U, Ebrecht B, von Mach S. First passenger operation of a state-of-the-art battery-electric multiple unit (BEMU) in Germany. Transportation Research Procedia. 2023;72:2510-2517. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.757.

[92] Nqodi A, Mosetlhe TC, Yusuff AA. Advances in hydrogen-powered trains: a brief report. Energies. 2023;16(18):6715. doi: https://doi.org/10.3390/en16186715.

[93] Ding D, Wu XY. Hydrogen fuel cell electric trains: technologies, status and future. Applications in Energy and Combustion Science. 2024;17:100255. doi: https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2024.100255.

[94] Xu L, Li Y, Zhang W, Ma T, Jing X. Safety analysis of hydrogen-powered train in different application scenarios: a review. Energies. 2025;18(7):1743. doi: https://doi.org/10.3390/en18071743.

[95] Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemyśle ORGMASZ. Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych VII: założenia techniczne i technologiczne oraz przegląd strategii wodorowych. Warszawa; 2023.

[96] Peyrani G, Marocco P, Gandiglio M, Cherchi P, Santarelli M. Techno-economic modeling framework to assess the feasibility of hydrogen-powered trains on non-electrified routes. Journal of Power Sources. 2025;652:237677. doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237677.

[97] Bu Q, Sun B, Yan Y, Yang R, Zhang S. Parameter matching and real-time energy management for multi-hydrogen hybrid power system for intercity electric multiple unit train. Energy. 2025;336:138293. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138293.

[98] Kołodziejczak K, Kowalski P, Frąckowiak E. Battery Electric Multiple Units (BEMU) as an alternative to railway line electrification. Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe. 2025;(1-2):39-47. doi: https://doi.org/10.53502/RAIL-211845.

[99] Koleje Mazowieckie. Zakup pojazdów kolejowych wraz z usługą serwisową – 6 EAZT. 16 czerwca 2023 [cyt. 30.03.2026]. Dostępne z: https://km.eb2b.com.pl/open-preview-auction.html/399036/zakup-pojazdow-kolejowych-wraz-z-usluga-serwisowa-6-eazt.

[100] Koleje Mazowieckie. Zakup pojazdów kolejowych wraz z usługą serwisową II – 6 EAZT. 6 września 2023 [cyt. 30.03.2026]. Dostępne z: https://km.eb2b.com.pl/open-preview-auction.html/408429/zakup-pojazdow-kolejowych-wraz-z-usluga-serwisowa-ii-6-eazt.

[101] Koleje Mazowieckie. Zakup pojazdów kolejowych wraz z usługą serwisową III – 6 EAZT. 3 października 2023 [cyt. 30.03.2026]. Dostępne z: https://km.eb2b.com.pl/open-preview-auction.html/411499/zakup-pojazdow-kolejowych-wraz-z-usluga-serwisowa-iii-6-eazt-zamowienie-podstawowe-3-eazt-opcja-1.

[102] Koleje Mazowieckie. Zakup pojazdów kolejowych wraz z usługą serwisową IV – 6 EAZT. 11 stycznia 2024 [cyt. 30.03.2026]. Dostępne z: https://km.eb2b.com.pl/open-preview-auction.html/423156/zakup-pojazdow-kolejowych-wraz-z-usluga-serwisowa-iv-6-eazt-zamowienie-podstawowe-3-eazt-opcja.

[103] Jüngst M, Sawczuk W. Outlook on the decarbonization of non-electrified passenger railway connections in Poland. Energies. 2025;18(22):5900. doi: https://doi.org/10.3390/en18225900.

[104] Lipiński L. SM42-6Dn Hydrogen. Bydgoszcz: PESA; 2023 [cyt. 10.04.2026]. Dostępne z: https://pesa.pl/produkty/lokomotywy/sm42-6dn-hydrogen/.

[105] Gallas D, Stobnicki P. Adoption of modern hydrogen technologies in rail transport. Journal of Ecological Engineering. 2022;23(3):84-91. doi: https://doi.org/10.12911/22998993/145291.

[106] Lalik M. Możliwości techniczne i organizacyjne redukujące zużycie paliwa w transporcie kolejowym. Prace Instytutu Kolejnictwa. 2022;(169):5-14.

[107] Correa L, Razi F, Sadiq R, Hewage K. Life cycle costing analysis of a retrofitted hydrogen-powered locomotive: Canadian context. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024;133:104295. doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104295.

[108] Preston R. Pesa hydrogen shunting locomotive approved for operation. International Railway Journal. 13 czerwca 2023 [cyt. 10.04.2026]. Dostępne z: https://www.railjournal.com/fleet/pesa-hydrogen-shunting-locomotive-approved-for-operation/.

[109] Railvolution. Tests of the PESA-built hydrogen locomotive at CIECH Cargo. 2023 [cyt. 10.04.2026]. Dostępne z: https://www.railvolution.net/news/tests-of-the-pesa-built-hydrogen-locomotive-at-ciech-cargo.

[110] Adams KM, Ibrahim I, Krahn S. Engineering systems with standards and digital models: development of a 15288-SysML grid. Systems. 2024;12(8):276. doi: https://doi.org/10.3390/systems12080276.

[111] Fijas M, Grobler-Dębska K, Kucharska E. Supporting equipment allocation for multiple projects in ERP systems – functionality extension in IFS Applications. Applied Sciences. 2025;15(17):9801. doi: https://doi.org/10.3390/app15179801.

[112] Plecka P. Will AI streamline ERP system implementations in enterprises? Procedia Computer Science. 2025;270:554-562. doi: https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.174.

[113] Soori M, Jough FKG, Dastres R, Arezoo B. AI-based decision support systems in Industry 4.0, a review. Journal of Economy and Technology. 2026;4:206-225. doi: https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.08.005.

[114] Kirmizi M, Kocaoglu B. The influencing factors of enterprise resource planning (ERP) readiness stage on enterprise resource planning project success: a project manager's perspective. Kybernetes. 2022;51(3):1089-1113. doi: https://doi.org/10.1108/K-11-2020-0812.

[115] Xu X, Xu Y, Zhao Y., Liu H, Cheng H, et al. Fuel and Emissions Calculator (FEC), version 2.0. Davis: National Center for Sustainable Transportation; 2016.

[116] Zaragozí B, Trilles S, Gutiérrez A, Miravet D. Development of a common framework for analysing public transport smart card data. Energies. 2021;14(19):6083. doi: https://doi.org/10.3390/en14196083.

[117] Zhao J. The planning and analysis implications of automated data collection systems: rail transit OD matrix inference and path choice modeling examples [rozprawa doktorska]. Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2004.

[118] Kumari J. A system-of-systems approach for enhancing asset management of railway system [rozprawa doktorska]. Luleå: Luleå University of Technology; 2024.

[119] Day CJ, Merkert R. Unlocking public procurement as a tool for place-based industrial strategy. Regional Studies. 2023;57(6):1029-1042. doi: https://doi.org/10.1080/00343404.2021.1956682.

[120] Streuling C, Pagenkopf J, Schenker M, Lakeit K. Techno-economic assessment of battery electric trains and recharging infrastructure alternatives integrating adjacent renewable energy sources. Sustainability. 2021;13(15):8234. doi: https://doi.org/10.3390/su13158234.

[121] Murray-Smith D. A review of developments in electrical battery, fuel cell and energy recovery systems for railway applications: a report for the Scottish Association for Public Transport. Glasgow: Scottish Association for Public Transport; 2019.

[122] Kapetanović M, Núñez A, van Oort N, Goverde RMP. Energy model of a fuel cell hybrid-electric regional train in passenger transport service and vehicle-to-grid applications. Journal of Rail Transport Planning & Management. 2023;28:100415. doi: https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100415.

[123] Soleimani-Chamkhorami K, Garmabaki AHS, Kasraei A, Famurewa SM, Odelius J, Strandberg G. Life cycle cost assessment of railways infrastructure asset under climate change impacts. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024;127:104072. doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104072.

[124] Mańka A, Kisielewski P, Konieczny J, Labisz K, Ćwiek J. Verification of a train on railway track simulation and optimization system. Transport Problems. 2023;18(3):137-150. doi: https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.3.12.

[125] Pressman RS, Maxim BR. Software engineering: a practitioner's approach. New York: McGraw-Hill Education; 2019.

[126] Gueorguiev T. Railway quality management systems – past, present, and future trends. Proceedings of the University of Ruse. 2023;62(5.1):164-169.