

A multi-criteria decision model for the introduction of electric storage multiple units on the partially electrified Gdynia-Hel railway

Wielokryterialny model decyzyjny wprowadzenia elektrycznych zasobnikowych zespołów trakcyjnych na częściowo zelektryfikowanej linii Gdynia - Hel

In this article, a multi-criteria study of the use of independently powered electric multiple units on the partially electrified Gdynia Główna - Hel railway was carried out. The use of (currently used) diesel and, as an alternative, electric and electric multiple units with an electric energy storage was considered. The analysis was carried out on the basis of three criteria for assessing the route service options, i.e. environmental, economic, operational and economic investment criteria. A multi-criteria decision model was developed for the analysis and a comparative analysis of the considered options for servicing the Gdynia Główna - Hel route was carried out. As part of the environmental criterion, it was found that the most environmentally friendly is the use of storage units. As part of the operational economic criterion, it was shown that the storage units have the lowest operating costs. The analysis, as part of the investment cost criterion, showed that the lowest investment costs are characteristic of route operation with the use of combustion units. The highest investment costs are related to the route operation by classic electric units, which is associated with the complete electrification of the line.

Przeprowadzono wielokryterialne studium zastosowania zasobnikowych zespołów trakcyjnych na częściowo zelektryfikowanej linii Gdynia Główna - Hel. Rozpatrzono zastosowanie używanych obecnie spalinowych oraz jako alternatywę, elektrycznych i elektrycznych zespołów trakcyjnych z zasobnikiem (magazynem) energii elektrycznej. Analizę przeprowadzono w oparciu o trzy kryteria oceny wariantów obsługi trasy, tj. kryterium środowiskowe, ekonomiczne eksploatacyjne oraz ekonomiczne inwestycyjne. Do analizy opracowano wielokryterialny model decyzyjny i przeprowadzono analizę porównawczą rozpatrywanych wariantów obsługi trasy Gdynia Główna - Hel. W ramach kryterium środowiskowego stwierdzono, iż najprzyjaźniejszym dla środowiska naturalnego jest zastosowanie zasobnikowych zespołów trakcyjnych. W ramach kryterium ekonomicznego eksploatacyjnego wykazano, że najniższymi kosztami eksploatacji charakteryzują się pojazdy zasobnikowe. Analiza w ramach kryterium kosztu inwestycji wykazała, że najniższymi kosztami inwestycji cechuje się obsługa trasy przy zastosowaniu zespołów spalinowych. Najwyższe koszty inwestycji związane są z obsługą trasy przez klasyczne zespoły elektryczne, co wiąże się z całkowitą elektryfikacją linii.

INTRODUCTION

According to the data provided by the Polish Central Statistical Office in 2019, the total length of railway lines in use in Poland is 19,325 km. The length of electrified lines is 11,894 km, which is nearly 62% of the total length of Polish railway lines. The rest of the lines are non-electrified. The non-electrified lines in use in Poland are currently operated only by diesel traction vehicles. The use of these vehicles does not require advanced railway infrastructure, however, their operation adversely affects

WSTĘP

Zgodnie z danymi przedstawionymi przez Główny Urząd Statystyczny w 2019 r. łączna długość eksploatowanych w Polsce linii kolejowych wynosiła 19 325 km. Długość linii zelektryfikowanych wynosi 11 894 km, co stanowi blisko 62% łącznej długości polskich linii kolejowych. Pozostała część linii jest niezelektryfikowana. Eksploatowane w Polsce niezelektryfikowane linie obecnie obsługiwane są wyłącznie przez spalinowe pojazdy trakcyjne. Użytkowanie tych pojazdów nie wymaga zaawansowanej infra-

the local natural environment as a result of the emission of harmful substances in the process of fuel combustion. An alternative to the costly electrification of lines and the use of diesel traction vehicles, which is harmful to the local environment, may be the operation of lines with the use of storage traction vehicles. Their introduction into traffic does not require the construction of a traction network, which is characterized not only by high construction costs but also by the disturbance of the local landscape.

Storage electric multiple units - IPEMU (Independently Powered Electrical Multiple-Unit) are more and more widely used by developed European countries as an alternative to DMU (Diesel Multiple-Unit) as well as electrification and use of classic electric units EMU (Electrical Multiple Units).

The specific railway Gdynia Główna - Hel was considered for the first national use of IPEMU, which is mainly single-track and non-electrified, and at the same time is characterized by a very high load in the summer season related to tourist traffic on the Hel peninsula. This railway consists of two sections. The first is the two-track electrified section Gdynia Główna - Reda, which is a part of line 202 connecting the Gdańsk Główny station with the Stargard station. The second single-track section covers the completely non-electrified line 213 Reda - Hel. This line runs through the Hel peninsula, which is fully protected by the natural environment under the Natura 2000 program [1]. These aspects lead to the consideration of introducing modern multiple units with energy storage in the form of batteries or accumulators with supercapacitors on this line.

Based on the results of the selection of the energy storage for electric multiple units presented in [11], it is advisable to analyze all aspects of the possible introduction of storage electric multiple units on a partially electrified line in one of the most attractive tourist regions of the Polish coast - the Hel peninsula.

The comparative analysis of the options for the operation of the partially electrified Gdynia Główna - Hel route was carried out on the basis of a multi-criteria decision model including environmental, economic, operational and investment criteria.

1. BASIS OF THE DECISION MODEL - EVALUATION CRITERIA

1.1. Environmental criterion

The environmental criterion for assessing possible variants of the Gdynia Główna - Hel route is a non-negligible criterion in the context of the non-electrified line 213 running through the Hel peninsula. The modernization of railway line 213 should not disturb the landscape aesthetics of the Hel peninsula, which may occur in the case of the electrification of this line. Equally important as the landscape values is the noise emitted by the traction vehicle.

struktury kolejowej, jednakże ich eksploatacja wpływa negatywnie na lokalne środowisko naturalne w wyniku emisji substancji szkodliwych w procesie spalania paliwa. Alternatywą dla kosztownej elektryfikacji linii oraz szkodliwego dla lokalnego środowiska naturalnego wykorzystania spalinowych pojazdów trakcyjnych może być obsługa linii przy wykorzystaniu zasobnikowych pojazdów trakcyjnych. Ich wprowadzenie do ruchu nie wymaga budowy sieci trakcyjnej, która charakteryzuje się nie tylko wysokimi kosztami budowy, ale również zaburzeniem miejscowego krajobrazu.

Niezależnie zasobnikowe elektryczne zespoły trakcyjne – z.e.z.t. (ang. *Independently Powered Electrical Multiple-Unit*) są coraz szerzej stosowane przez rozwinięte kraje europejskie, jako alternatywa dla zespołów spalinowych (ang. *Diesel Multiple-Unit*) oraz elektryfikacji i używania klasycznych zespołów elektrycznych e.z.t. (ang. *Electrical Multiple Units*).

Do pierwszego krajowego zastosowania z.e.z.t. rozpatrzono specyficzną trasę Gdynia Główna - Hel, która jest głównie jednotorowa i niezelektryfikowana, a jednocześnie charakteryzuje się bardzo wysokim obciążeniem w sezonie letnim związanym z ruchem turystycznym na Mierzei Helskiej. Trasa ta składa się z dwóch odcinków. Pierwszym z nich jest odcinek dwutorowy zelektryfikowany Gdynia Główna - Reda, stanowiący fragment linii 202 łączącej stację Gdańsk Główny ze stacją Stargard. Drugi odcinek jednotorowy obejmuje w całości niezelektryfikowaną linię 213 Reda - Hel. Linia ta przebiega przez Półwysep Helski, który w całości objęty jest ochroną środowiska naturalnego w ramach programu Natura 2000 [1]. Aspekty te skłaniają do rozważenia wprowadzenia na tej linii elektrycznych nowoczesnych zespołów trakcyjnych z zasobnikiem energii w postaci akumulatorów lub akumulatorów z superkondensatorami.

Bazując na wynikach doboru zasobnika energii do elektrycznego zespołu trakcyjnego przedstawionych w [11], celowe jest przeanalizowanie wszystkich aspektów ewentualnego wprowadzenia zasobnikowych elektrycznych zespołów trakcyjnych na częściowo zelektryfikowanej linii w jednym z najbardziej atrakcyjnych turystycznie rejonów polskiego wybrzeża - Mierzei Helskiej.

Analizę porównawczą wariantów obsługi częściowo zelektryfikowanej trasy Gdynia Główna - Hel wykonano w oparciu o wielokryterialny model decyzyjny obejmujący kryterium środowiskowe, kryteria ekonomiczne eksploatacyjne oraz inwestycyjne.

1. PODSTAWY MODELU DECYZYJNEGO - KRYTERIA OCENY

1.1. Kryterium środowiskowe

Środowiskowe kryterium oceny możliwych wariantów obsługi trasy Gdynia Główna - Hel jest

The environmental criterion for assessing the railway service options also applies to the emission of CO₂ (carbon dioxide) and other harmful substances into the atmosphere. A vehicle with an internal combustion engine emits harmful substances into the atmosphere at the place of its use, which is a significant disadvantage in the context of the area protected by the Natura 2000 program. In Poland, where currently more than 80% of electricity is produced by burning coal, emission of harmful substances as a result of energy production used to power electric vehicles is 29% lower than the emissions resulting from the operation of vehicles powered by internal combustion engines [1].

1.2. Operating cost criterion

There are five different maintenance levels in the operation of railway vehicles. The levels differ in terms of the frequency and the level of advancement of service work. As part of the work performed on the lower maintenance levels, routine works are carried out, e.g. replenishment or replacement of operating fluids. The higher maintenance levels of railway vehicles include specialized servicing and decommissioning repairs. The frequency with which the activities foreseen under the different maintenance levels are performed depends on the type of the trainset. The highest operating costs are generated under the first maintenance level. Table 1 summarizes the computational data and the results of the operating costs of the diesel multiple unit. The unit costs and consumption of fuel and engine oil were adopted on the basis of [2 ÷ 5]. The periods and costs of replacing filters and friction elements of the braking system were estimated on the basis of the analysis of operational data of vehicles equipped with combustion drives. The calculations were made for one year of operation, within which 300 operating days of the vehicle were assumed. The average daily distance travelled by one multiple unit was assumed at the level of 915 km. This value was determined on the basis of an analysis of the timetable of regional vehicles on the Gdynia Główna - Hel route (in the summer season and outside it) and the transport capacity of a single trainset, assuming the daily shutdown of the vehicle for 2 hours.

The cost of operating the unit powered from the electric network is mainly related to the cost of electricity and the cost of maintaining the catenary network, including repairs of damage resulting from atmospheric phenomena. Table 2 summarizes the computational data and the results of the operating costs of the electric multiple unit. The unit cost of electricity was assumed on the basis of [6].

The predominant operating costs of electric storage units are related to the cost of electricity and the need for periodic replacement of traction batteries. As part of the analysis, an assumption was made to replace

niepomijalnym kryterium w kontekście niezelektryfikowanej linii 213 przebiegającej przez Półwysep Helski. Modernizacja linii kolejowej 213 nie powinna zakłócić estetyki krajobrazowej Półwyspu Helskiego, co może mieć miejsce w przypadku elektryfikacji tej linii. Równie istotny, jak walory krajobrazowe, jest hałas emitowany przez pojazd trakcyjny.

Kryterium środowiskowe oceny wariantów obsługi trasy odnosi się również do emisji dwutlenku węgla oraz innych szkodliwych substancji do atmosfery. Pojazd z napędem spalinowym emituje do atmosfery substancje szkodliwe w miejscu jego eksploatacji, co jest istotną wadą w kontekście obszaru chronionego programem Natura 2000. W Polsce, gdzie obecnie ponad 80% energii elektrycznej produkuje się w wyniku spalania węgla, emisja substancji szkodliwych w wyniku produkcji energii elektrycznej wykorzystywanej do zasilania pojazdów elektrycznych jest o 29% mniejsza niż emisja mająca miejsce w wyniku eksploatacji pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi [1].

1.2. Kryterium kosztów eksploatacji

W ramach eksploatacji pojazdów kolejowych wyróżnia się pięć różnych poziomów ich utrzymania. Poziomy różnią się częstotliwością oraz poziomem zaawansowania prac serwisowych. W ramach prac wykonywanych w zakresie niższych poziomów utrzymania wykonywane są rutynowe prace, m.in. uzupełnienie bądź wymiana płynów eksploatacyjnych. Wyższe poziomy utrzymania pojazdów kolejowych obejmują wyspecjalizowane czynności serwisowe oraz naprawy wykonywane podczas wyłączenia pojazdu z eksploatacji.

Częstość wykonywania czynności przewidzianych w ramach różnych poziomów utrzymania uzależniona jest od rodzaju zespołu trakcyjnego. Największe koszty eksploatacji generowane są w ramach pierwszego poziomu utrzymania. W tabelicy 1 zestawiono dane obliczeniowe oraz wyniki kosztów eksploatacji spalinowego zespołu trakcyjnego. Jednostkowe koszty i zużycie paliwa oraz oleju silnikowego przyjęto na podstawie [2÷5]. Okresy i koszty wymiany filtrów oraz elementów ciernych układu hamulcowego oszacowano na podstawie analizy danych eksploatacyjnych pojazdów wyposażonych w napędy spalinowe. Obliczenia wykonano dla jednego roku eksploatacji, w ramach którego przyjęto 300 dni operacyjnych pojazdu. Średni dzienny dystans pokonywany przez jeden zespół trakcyjny przyjęto na poziomie 915 km. Wartość tę określono na podstawie analizy rozkładu jazdy pojazdów regionalnych na trasie Gdynia Główna - Hel (w sezonie letnim oraz poza nim) oraz możliwościach transportowych pojedynczego zespołu trakcyjnego przy założeniu dziennego wyłączenia pojazdu z ruchu przez 2 godziny.

Koszt eksploatacji zespołu zasilanego z sieci elektrycznej związany jest głównie z kosztem energii elektrycznej oraz kosztem utrzymania sieci trakcyj-

the battery bank after 10 years of operation. The cost of the new battery was included in the annual operating costs of the vehicle. An important factor increasing the operating costs of storage traction units is the operating cost of the converter system cooling systems. This cost is mainly related to the periodic replacement of fan air filters. Table 3 summarizes the computational data and the results of operating costs of the storage multiple unit. The cost and period of replacement of the air filter of the fan of the power electronic converter cooling system were estimated on the basis of the analysis of operating costs of fan cooling systems.

Summary of the DMU calculation data and operating costs

Table 1
Zestawienie danych obliczeniowych oraz kosztów eksploatacji s.z.t. Tablica 1

Unit diesel fuel cost	3.37 PLN/litre
Unit diesel fuel consumption	50 litre/100 km
Unit cost of engine oil	11.36 PLN/litre
Unit oil consumption	0.3% of fuel consumption
The cost of replacing the oil filter	120 PLN
Filter and engine oil change period	1/200 000 km
The cost of replacing the air filter	500 PLN
Air filter replacement period	1/100 000 km
The cost of replacing the friction elements of the brake system	12 600 PLN
The period of replacement of the friction elements of the brake system	1/100 000 km
Expenditure	
Diesel fuel	137 591 litres
Engine oil	413 litres
Annual operating cost	
The cost of diesel fuel	463 405 PLN
Het cost of engine oil	5 468 PLN
Cost of replacing engine oil and air filters	1 536 PLN
The cost of replacing the friction elements of the brake system	34 569 PLN
Total cost	504 980 PLN

nej, uwzględniającym naprawy uszkodzeń powstających w wyniku zjawisk atmosferycznych. W tablicy 2 zestawiono dane obliczeniowe oraz wyniki kosztów eksploatacji elektrycznego zespołu trakcyjnego. Jednostkowy koszt energii elektrycznej przyjęto na podstawie [6].

Przeważające koszty eksploatacji elektrycznych zespołów zasobnikowych związane są z kosztem energii elektrycznej oraz z koniecznością okresowej wymiany akumulatorów trakcyjnych. W ramach analizy przyjęto założenie wymiany baterii akumulatorów po 10 latach eksploatacji. Koszt nowej baterii został wliczony w roczne koszty eksploatacji pojazdu. Istotnym czynnikiem zwiększającym koszty eksploatacji zasobnikowych zespołów trakcyjnych jest koszt eksploatacji systemów chłodzenia układów przekształtnikowych. Koszt ten związany jest głównie z okresową wymianą filtrów powietrza wentylatorów. W tablicy 3 zestawiono dane obliczeniowe oraz wyniki kosztów eksploatacji zasobnikowego zespołu trakcyjnego. Koszt oraz okres wymiany filtra powietrza wentylatora systemu chłodzenia przekształtnika energoelektronicznego oszacowano na podstawie analizy kosztów eksploatacji wentylatorów systemów chłodzenia.

Summary of the EMU calculation data and operating costs

Table 2
Zestawienie danych obliczeniowych oraz kosztów eksploatacji e.z.t. Tablica 2

Calculation data	
Unit cost of electricity	0.24 PLN/kWh
Unit cost of maintaining the catenary network	15,000 PLN/km
Expenditure	
Average energy demand on the route	2.98 kWh/km
Total electricity consumption	817,625 kWh
Annual operating costs	
Electricity cost	196,230 PLN
The cost of maintaining the catenary	924,300 PLN
Total cost	1,120,530 PLN

Calculation data	
Unit cost of electricity	0.24 PLN
Mileage to replace the fan air filter	50,000 km
Cost of replacing the fan air filter	500 PLN
Expenditure	
Average energy demand on the route	3.16 kWh/km
Total electricity consumption	868,149 kWh
Annual operating costs	
Electricity cost	208,356 PLN
Cost of battery replacement	214,673 PLN
Cost of replacing the fan air filter	2,744 PLN
Total cost	425,771 PLN

Summary of the IPEMU calculation data and operating costs Table 3

Zestawienie danych obliczeniowych oraz kosztów eksploatacji z.e.z.t. Tablica 3

1.3. Investment criterion

The investment criterion covers all costs of modernization of line 213 and the purchase or modernization of rolling stock. As part of this criterion, the common costs of modernization of lines were taken into account, including the costs of building passing passes at the stations discussed in [11], aimed at increasing the line capacity. The costs determined on the basis of [7, 8] are presented in Table 4.

Summary of common costs of modernization of line 213
Zestawienie wspólnych kosztów modernizacji linii 213

Table 4
Tablica 4

Description	Quantity	Cost
One-edge platform, 200 m long, 5 m wide	1	1,470,797 PLN
Double-edged platform, 200 m long, 5 m wide	1	1,792,858 PLN
3.1 class track	2250 m	4,011,875 PLN
Class 3.1 track turnout	10	3,258,944 PLN
Footpath	60 m	64,159 PLN
Lighting of pedestrian routes and platforms	-	172,800 PLN
Railway traffic control system	-	3,047,880 PLN
Total cost		6,586,758 PLN

The operation of the partially electrified Gdynia Główna - Hel route with the use of diesel multiple units does not involve the costs of purchasing rolling stock, as this route has been operated in regional traffic since 2010 by diesel units SA137 and SA138 type of the Newag company. For the analysis of investment costs of route operation by DMU common costs of modernization of line 213 were assumed for all variants presented in Table 4.

The use of electric multiple units for route service requires the electrification of line 213 and the purchase of the required number of multiple units. According to the current summer timetable, 16 journeys are carried out each day on the route Gdynia Główna - Hel and Hel - Gdynia Główna. Taking into account the travel time on this route in the summer season and the vehicle's operation around the clock, it is necessary to purchase 3 multiple units. The considerations were based on the use of the Flirt electric multiple unit from Stadler, the modernized version of which was proposed for the line service as IPEMU. The electrification of line 213 requires the construction of two traction substations in order to supply the line and maintain the required voltage level. The construction of the first substation is proposed in Władysławowo, where a 110 kV high voltage line runs in close proximity to line 213. Hel is proposed as the location of the second traction substation, however, this solution requires a 35 km cable connection from the Władysławowo 110/30/15 kV substation. Table 5 summarizes the costs determined on the basis of [7, 8] related to the electrification of line 213 and the total cost of servicing the route with the use of electric multiple units.

1.3. Kryterium inwestycyjne

Inwestycyjne kryterium obejmuje wszelkie koszty modernizacji linii 213 oraz zakupu bądź modernizacji taboru. W ramach tego kryterium uwzględnione zostały wspólne koszty modernizacji linii obejmujące koszty budowy mijanek na stacjach omówionych w [11], mających na celu zwiększenie przepustowości linii. Koszty określone na podstawie [7, 8] zestawiono w tablicy 4.

Obsługa częściowo zelektryfikowanej trasy Gdynia Główna - Hel przy wykorzystaniu spalinowych zespołów trakcyjnych nie wiąże się z kosztami zakupu taboru, gdyż trasa ta od 2010 roku w ruchu regionalnym obsługiwana jest przez jednostki spalinowe SA137 oraz SA138 f-my Newag. Do analizy kosztów inwestycyjnych obsługi trasy przez s.z.t. przyjęto koszty wspólne modernizacji linii 213 dla wszystkich wariantów przedstawione w tablicy 4.

Wykorzystanie do obsługi trasy elektrycznych zespołów trakcyjnych wiąże się z koniecznością elektryfikacji linii 213 oraz zakupem wymaganej liczby zespołów trakcyjnych. Zgodnie z aktualnie obowiązującym letnim rozkładem jazdy każdego dnia realizowanych jest 16 kursów na trasie Gdynia Główna - Hel oraz Hel - Gdynia Główna. Przy uwzględnieniu czasu przejazdu na tej trasie w sezonie letnim oraz pracy pojazdu przez całą dobę konieczny jest zakup 3 zespołów trakcyjnych. Rozważania oparto na zastosowaniu elektrycznego zespołu trakcyjnego Flirt f-my Stadler, którego zmodernizowana wersja zaproponowana została do obsługi linii jako z.e.z.t. Elektryfikacja linii 213 wiąże się z koniecznością budowy dwóch podstacji trakcyjnych w celu zasilania linii oraz utrzymania wymaganego poziomu napięcia. Budowę pierwszej podstacji proponuje się w miejscowości Władysławowo, gdzie w bliskiej odległości od linii 213 przebiega linia wysokiego napięcia 110 kV. Jako lokalizację drugiej podstacji trakcyjnej proponuje się miejscowość Hel, jednakże rozwiązanie to wiąże się z koniecznością doprowadzenia połączenia kablowego o długości 35 km ze stacji elektroenergetycznej Władysławowo 110/30/15 kV. W tablicy 5 zestawiono określone na podstawie [7, 8] koszty związane z elektryfikacją linii 213 oraz łączny koszt obsługi trasy przy wykorzystaniu elektrycznych zespołów trakcyjnych.

List of investment costs of route maintenance by EMU

[7, 8] Table 5

Zestawienie kosztów inwestycyjnych obsługi trasy przez e.z.t.
Tablica 5

Construction of the catenary	
Installation of supporting structures with foundations	318,937 PLN
Installation of net suspensions	63,039 PLN
Installation of net anchoring	18,303 PLN
Installation of network cables	378,111 PLN
Installation of electrical connections and splice circuits	4,632 PLN
Network regulation	12,710 PLN
Cost of 1 km of the network	795,731 PLN
Cost of 62.61 km of the network	49,032,964 PLN
Construction of traction substations	
Construction of traction substations Władysławowo and Hel	6,000,000 PLN
Construction of a 15 kV cable line to power the Hel traction substation	15,848,94 PLN
Cost	21,848,945 PLN
Total investment cost	
Construction of the traction network	49,032,964 PLN
Construction of traction substations	21,848,945 PLN
Purchase of 3 Flirt electric multiple units from Stadler	108,195,000 PLN
Common line upgrade costs	6,586,758 PLN
Total cost	185,663,667 PLN

The introduction of storage multiple units to the route is associated with the construction of a charging station in Hel. Requirements for the parameters of the charging station are presented in [11]. In order to ensure the required power of the charging station of 1.2 MW, it is necessary to build a cable line with a rated voltage of 15 kV, supplying electricity from the 110/30/15 kV power station Władysławowo. As part of this study, the use of Stadler's modernized Flirt electric multiple units, equipped with an on-board battery bank and a supercapacitor was proposed for the operation of the analyzed route. As in the case of route operation with the use of electric units, in order to ensure the required operability, the purchase of 3 units is assumed. Table 6 presents the costs of route servicing with the use of storage trains prepared on the basis of [7, 8].

2. MULTICRITERIAL DECISION MODEL

In order to indicate the best option for servicing the partially electrified Gdynia Główna - Hel route, a multi-criteria decision model was used [10]. This model was built using the VIKOR method, which consisted of measuring the divergence of a given analysis variant from the assumed ideal scenario. In this method, the evaluation criteria of the considered variants are normalized, which enables the criteria of various measures and the desired values to be compared with each other. These criteria are assigned spe-

Wprowadzenie do obsługi trasy zasobnikowych zespołów trakcyjnych wiąże się z budową stacji ładowania w miejscowości Hel. Wymagania dotyczące parametrów stacji ładowania przedstawiono w [11]. W celu zapewnienia wymaganej mocy stacji ładowania wynoszącej 1,2 MW konieczna jest budowa linii kablowej o napięciu znamionowym 15 kV dostarczającej energię elektryczną ze stacji elektroenergetycznej Władysławowo 110/30/15 kV. W ramach niniejszej pracy do obsługi analizowanej trasy zaproponowano zastosowanie zmodernizowanych elektrycznych zespołów trakcyjnych Flirt f-my Stadler, wyposażonych w pokładową baterię akumulatorów oraz superkondensator. Tak jak w przypadku obsługi trasy przy wykorzystaniu zespołów elektrycznych, w celu zapewnienia wymaganej operatywności, przyjmuje się zakup 3 zespołów. Tablica 6 przedstawia zestawienie kosztów obsługi trasy przy wykorzystaniu zasobnikowych zespołów trakcyjnych przygotowanych na podstawie [7, 8].

List of investment costs of route maintenance by IPEMU [7, 8]

Table 6

Zestawienie kosztów inwestycyjnych obsługi trasy przez z.e.z.t. [7, 8]
Tablica 6

Purchase of 3 Flirt electric multiple units from Stadler	92,957,746 PLN
Installation of on-board energy storage	22,781,700 PLN
Construction of the Hel charging station	3,000,000 PLN
Construction of a 15 kV cable line to power the Hel traction substation	15,848,945 PLN
Common railway upgrade costs	6,586,758 PLN
Total cost	141,175,149 PLN

2. WIELOKRYTERIALNY MODEL DECYZYJNY

W celu wskazania najlepszego wariantu obsługi częściowo zelektryfikowanej trasy Gdynia Główna – Hel posłużono się wielokryterialnym modelem decyzyjnym [10]. Model ten zbudowano metodą VIKOR, polegającej na pomiarze rozbieżności danego wariantu analizy od zakładanego scenariusza idealnego. W metodzie tej kryteria oceny rozpatrywanych wariantów podlegają normalizacji, umożliwiającą konfrontowanie ze sobą kryteriów różnych miar oraz pożądaných wartości. Kryteriom tym przypisuje się określone wagi w zależności od oczekiwań stawianym modernizowanej trasie w ramach scenariuszy. W ramach analizy obliczane są wskaźniki rankingowe odzworowujące poziom dopasowania danego wariantu obsługi trasy do przewidzianego scenariusza idealnego. Na podstawie wartości wskaźników tworzona jest tablica wyników analizy przedstawiająca ranking rozpatrywanych wariantów analizy. Metodologia podejmowania decyzji przedstawiona jest na rys. 1.

cific weights depending on the expectations of the modernized route under the scenarios. As part of the analysis, ranking indicators are calculated reflecting the level of adjustment of a given route service variant to the predicted ideal scenario. Based on the values of the indicators, an analysis results table is created, presenting the ranking of the analyzed variants of the analysis. The decision-making methodology is presented in Fig. 1.

In the first stage of the calculations made as part of the multi-criteria analysis, Table 7 lists the variants of the analysis and the criteria for their evaluation. This table presents the evaluation criteria in a non-standardized form, which means that the units of the evaluation criteria are different and it is impossible to compare the route service variants at this stage.

In order to standardize the evaluation criteria of the modernization variants, the spread coefficient of the criterion function is calculated:

$$d_{ij} = \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (1)$$

where:

d_{ij} – spread coefficient of the criterion function [-],

f_{ij} – i -th criterion function for j -th alternative solution [-],

f_i^* – the maximum value of f_{ij} when the i -th criterion function shows an advantage, the minimum value of f_{ij} when the i -th criterion function shows a disadvantage [-],

f_i^- – the minimum value of f_{ij} when the i -th criterion function shows an advantage, the maximum value of f_{ij} when the i -th criterion function shows an advantage [-].

Table 8 presents the normalized values of the criteria for assessing the variants of the Gdynia Główna - Hel route service. At this stage of the analysis, it is possible to evaluate the modernization options against individual criteria.

Variants of analysis and evaluation criteria **Table 7**
Warianty analizy oraz kryteria oceny **Tablica 7**

	SR [point]	EE [PLN]	EI [PLN]
DMU	1	504,979	6,586,758
EMU	2	1,120,529	185,663,667
IPEMU	3	425,770	141,175,149

Standardized variants of the analysis and evaluation criteria **Table 8**

Znormalizowane warianty analizy i kryteria oceny **Tablica 8**

	SR	EE	EI
DMU	1.00	0.11	0.00
EMU	0.50	1.00	1.00
IPEMU	0.00	0.00	0.75



Fig. 1. Methodology of making decisions in a multi-criteria decision model

Rys. 1. Metodologia podejmowania decyzji wielokryterialnego modelu decyzyjnego

W pierwszym etapie obliczeń wykonanych w ramach analizy wielokryterialnej w tablicy 7 zestawiono warianty analizy oraz kryteria ich oceny. Tablica ta przedstawia kryteria oceny w formie nieznormalizowanej, co oznacza, że jednostki kryteriów oceny są różne i porównanie wariantów obsługi trasy na tym etapie jest niemożliwe.

W celu znormalizowania kryteriów oceny wariantów modernizacji obliczany jest współczynnik rozpiętości funkcji kryterialnej d_{ij}

$$d_{ij} = \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (1)$$

gdzie:

d_{ij} – współczynnik rozpiętości funkcji kryterialnej [-]

f_{ij} – wartość i -tej funkcji kryterialnej dla j -tego rozwiązania alternatywnego [-]

f_i^* – wartość maksymalna f_{ij} gdy i -ta funkcja kryterialna wykazuje korzyść, wartość minimalna gdy f_{ij} i -ta funkcja kryterialna wykazuje niekorzyść [-]

f_i^- – wartość minimalna f_{ij} gdy i -ta funkcja kryterialna wykazuje korzyść, wartość maksymalna gdy f_{ij} i -ta funkcja kryterialna wykazuje niekorzyść [-].

The next stage of the multi-criteria analysis is to define scenarios in which the assessment criteria are assigned specific weights, the sum of which in each scenario is equal to 10. As part of the analysis, the following four scenarios are envisaged:

- SR_{SC} – the most important is the environmental criterion, the economic criteria are of equal weight (environmental scenario),
- EI_{SC} – the most important is the economic investment criterion, the operational economic criterion and the environmental criterion have equal weight (investment scenario),
- EE_{SC} – the most important is the operational economic criterion, the investment economic criterion and the environmental criterion are of equal weight (operational scenario),
- RW_{SC} – all criteria have equal weights (equal weighting scenario).

Table 9 presents a list of multi-criteria analysis scenarios and the corresponding weights of the criteria.

The next stage of calculations in the multi-criteria analysis is the calculation of the compromise ranking indicators S_j and R_j , which will be used to calculate the unified ranking indicator Q_j . These indicators are calculated on the basis of the dependence:

$$S_j = \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (2)$$

$$R_j = \max \frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (3)$$

where:

- S_j, R_j – compromise ranking indicators [-],
- w_i – the weighting factor of the given criterion [-],
- f_{ij} – the value of the i -th criterion function for the j -th alternative solution [-],
- f_i^* – maximum value of f_{ij} when the i -th criterion function shows an advantage, minimum value of f_{ij} when i -th criterion function shows a disadvantage [-],
- f_i^- – minimum value of f_{ij} when the i -th criterion function shows an advantage, maximum value of f_{ij} when i -th criterion function shows a disadvantage [-].

Table 10 shows a summary of the calculated values of the compromise ranking coefficients S_j and R_j .

In order to determine the unified ranking index, it is necessary to calculate the coefficients of the ranges of the ranking indicators QS_j and QR_j . These coefficients are determined on the basis of the dependence:

$$QS_j = \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} \quad (4)$$

W tablicy 8 przedstawiono znormalizowane wartości kryteriów oceny wariantów obsługi trasy Gdynia Główna - Hel. Na tym etapie analizy możliwa jest ocena wariantów modernizacji względem poszczególnych kryteriów.

Kolejnym etapem analizy wielokryterialnej jest określenie scenariuszy, w ramach których kryteriom oceny przypisywane są określone wagi, których suma w każdym scenariuszu jest równa 10. W ramach przeprowadzonej analizy przewidziano cztery następujące scenariusze:

- SR_{SC} – najważniejsze jest kryterium środowiskowe, kryteria ekonomiczne mają równe wagi (scenariusz środowiskowy)
- EI_{SC} – najważniejsze jest kryterium ekonomiczne inwestycyjne, kryterium ekonomiczne eksploatacyjne oraz kryterium środowiskowe mają równe wagi (scenariusz inwestycyjny),
- EE_{SC} – najważniejsze jest kryterium ekonomiczne eksploatacyjne, kryterium ekonomiczne inwestycyjne oraz kryterium środowiskowe mają równe wagi (scenariusz eksploatacyjny)
- RW_{SC} – wszystkie kryteria mają równe wagi (scenariusz równych wag).

W tablicy 9 przedstawiono zestawienie scenariuszy analizy wielokryterialnej oraz odpowiadających im wag kryteriów.

Następnym etapem obliczeń w ramach analizy wielokryterialnej jest obliczenie wskaźników rankingu kompromisowego S_j oraz R_j , które wykorzystane zostaną do obliczenia zunifikowanego wskaźnika rankingowego Q_j . Wskaźniki te obliczane są na podstawie zależności:

$$S_j = \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (2)$$

$$R_j = \max \frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (3)$$

gdzie:

- S_j, R_j – wskaźniki rankingu kompromisowego [-],
 - w_i – współczynnik wagowy danego kryterium [-],
 - f_{ij} – wartość i -tej funkcji kryterialnej dla j -tego rozwiązania alternatywnego [-],
 - f_i^* – wartość maksymalna f_{ij} gdy i -ta funkcja kryterialna wykazuje korzyść, wartość minimalna gdy f_{ij} i -ta funkcja kryterialna wykazuje niekorzyść [-],
 - f_i^- – wartość minimalna f_{ij} gdy i -ta funkcja kryterialna wykazuje korzyść, wartość maksymalna gdy f_{ij} i -ta funkcja kryterialna wykazuje niekorzyść [-].
- Tablica 10 przedstawia zestawienie obliczonych wartości współczynników rankingu kompromisowego S_j oraz R_j .

where:

- QS_j – range factor of the ranking indicator S_j [-],
- S_j – compromise ranking indicator [-],
- S^* – the minimum value of the indicator S_j [-],
- S^- – the maximum value of the indicator S_j [-].

$$QR_j = \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (5)$$

where:

- QR_j – range factor of the ranking indicator R_j [-],
- R_j – compromise ranking indicator [-],
- R^* – the minimum value of the indicator S_j [-],
- R^- – the maximum value of the indicator S_j [-].

Based on formula (6), a unified ranking index is calculated Q_j . The lower its value, the more advantageous a given variant of the railway route service is, according to the selected analysis scenario S_j and R_j , and the unified ranking index Q_j .

$$Q_j = v \cdot QS_j + (1 - v) \cdot QR_j \quad (6)$$

where:

- Q_j – unified ranking index [-],
- v – the importance of the decision strategy [-],
- QS_j – range factor of the ranking indicator S_j [-],
- QR_j – range factor of the ranking indicator R_j [-].

Weights of the criteria of the analysis scenarios Table 9
Wagi kryteriów scenariuszy analizy Tablica 9

Criteria	Scenarios			
	SR _{sc}	EI _{sc}	EE _{sc}	RW _{sc}
SR	6.00	2.00	2.00	3.33
EE	2.00	2.00	6.00	3.33
EI	2.00	6.00	2.00	3.33

Standardized variants of the analysis and evaluation criteria Table 10
Znormalizowane warianty analizy i kryteria oceny Tablica 10

Scenario	Indicator	Variant		
		DMU	EMU	IPEMU
SR _{sc}	S _j	6.23	7.00	1.50
	R _j	6.00	3.00	1.50
EI _{sc}	S _j	2.23	9.00	4.51
	R _j	2.00	6.00	4.51
EE _{sc}	S _j	2.68	9.00	1.50
	R _j	2.00	6.00	1.50
RW _{sc}	S _j	3.71	8.33	2.50
	R _j	3.33	3.33	2.50

W celu wyznaczenia zunifikowanego wskaźnika rankingowego konieczne jest obliczenie współczynników zakresów wskaźników rankingowych QS_j oraz QR_j . Współczynniki te wyznaczane są na podstawie zależności:

$$QS_j = \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} \quad (4)$$

gdzie:

- QS_j – współczynnik zakresu wskaźnika rankingowego S_j [-],
- S_j – wskaźnik rankingu kompromisowego [-],
- S^* – wartość minimalna wskaźnika S_j [-],
- S^- – wartość maksymalna wskaźnika S_j [-].

$$QR_j = \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (5)$$

gdzie:

- QR_j – współczynnik zakresu wskaźnika rankingowego R_j [-],
- R_j – wskaźnik rankingu kompromisowego [-],
- R^* – wartość minimalna wskaźnika S_j [-],
- R^- – wartość maksymalna wskaźnika S_j [-].

Na podstawie zależności (6) obliczany jest zunifikowany wskaźnik rankingowy Q_j . Im niższa jest jego wartość, tym korzystniejszy jest dany wariant obsługi trasy kolejowej według wybranego scenariusza analizy. W tabelicy 11. zestawiono obliczone wartości współczynników zakresu rankingowego S_j oraz R_j oraz zunifikowanego wskaźnika rankingowego Q_j .

$$Q_j = v \cdot QS_j + (1 - v) \cdot QR_j \quad (6)$$

gdzie:

- Q_j – zunifikowany wskaźnik rankingowy [-]
- v – waga strategii decyzyjnej [-]
- QS_j – współczynnik zakresu wskaźnika rankingowego S_j [-]
- QR_j – współczynnik zakresu wskaźnika rankingowego R_j [-]

Decision table of multi-criteria analysis Table 11
Tablica decyzyjna analizy wielokryterialnej Tablica 11

Scenario	Factor	Variants		
		IPEMU	EMU	DMU
SR _{sc}	Q _j	0.93	0.67	0.00
	QS _j	0.86	1.00	0.00
	QR _j	1.00	0.33	0.00
EI _{sc}	Q _j	0.00	1.00	0.48
	QS _j	0.00	1.00	0.34
	QR _j	0.00	1.00	0.63
EE _{sc}	Q _j	0.13	1.00	0.00
	QS _j	0.16	1.00	0.00
	QR _j	0.11	1.00	0.00
RW _{sc}	Q _j	0.60	1.00	0.00
	QS _j	0.21	1.00	0.00
	QR _j	1.00	1.00	0.00

Comparison of the values of the unified ranking index Q_j calculated for each of the considered options for servicing the Gdynia Główna - Hel route is insufficient to choose the best solution. According to the VIKOR method, the best alternative from the point of view of multi-criteria criteria is the one that is on the first position in the ranking list for the decision strategy weight value of $v = 0,5$ and meets the criteria:

- "sufficient advantage" over the next alternative on the list (condition U1),
- "sufficient position stability" when changing the value of the weight of the decision strategy (condition U2).

The alternative solution has a sufficient advantage over the next solutions from the ranking list when the condition expressed in the relationship is met:

$$Q(V'') - Q(V') \geq DQ \quad (7)$$

where:

$Q(V'')$ – value of the unified ranking index for the second solution on the list [-],
 $Q(V')$ – the value of the unified ranking index for the first solution on the list [-],
 DQ – advantage threshold [-].

The threshold of the advantage of the best solution over the next one on the ranking list is calculated using the formula below. The threshold value for the analysis with a small number of considered variants is limited to 0.25.

$$DQ = \min \left(0,25; \frac{1}{m-1} \right) \quad (8)$$

where:

DQ – advantage threshold [-],
 m – number of alternatives [-].

The best alternative meets the 'sufficient position stability' condition if it meets at least one of the following conditions:

- takes the first position in the ranking list according to Q for the value of the decision strategy weight of $v = 0,25$ and $v = 0,75$
- ranks first in the ranking list by QS
- ranks first in the ranking list by QR.

Table 12 presents the calculation results for four multi-criteria analysis scenarios.

Ranking table of variants of multi-criteria analysis Table 12
Tablica rankingowa wariantów analizy wielokryterialnej
Tablica 12

Ranking	Scenario			
	SR _{sc}	EI _{sc}	EE _{sc}	RW _{sc}
1	IPEMU (0,00)	DMU (0,00)	IPEMU (0,00)	IPEMU (0,00)
2	EMU (0,67)	IPEMU (0,48)	DMU (0,13)	DMU (0,60)
3	DMU (0,93)	EMU (1,00)	EMU (1,00)	EMU (1,00)

Porównanie wartości zunifikowanego wskaźnika rankingowego Q_j obliczonego dla każdego z rozpatrywanych wariantów obsługi trasy Gdynia Główna - Hel, jest niewystarczające do wyboru najlepszego rozwiązania. Zgodnie z metodą VIKOR najlepszą alternatywą z punktu widzenia wielokryterialności jest alternatywa, która znajduje się na pierwszej pozycji listy rankingowej dla wartości wagi strategii decyzyjnej wynoszącej $v = 0,5$ oraz spełnia kryteria:

- „wystarczającej przewagi” nad kolejną alternatywą na liście (warunek U1)
- „wystarczającej stabilności pozycji” przy zmianie wartości wagi strategii decyzyjnej (warunek U2).

Alternatywne rozwiązanie ma wystarczającą przewagę nad kolejnymi rozwiązaniami z listy rankingowej gdy spełniony jest warunek wyrażony zależnością:

$$Q(V'') - Q(V') \geq DQ \quad (7)$$

gdzie:

$Q(V'')$ – wartość zunifikowanego wskaźnika rankingowego dla drugiego rozwiązania z listy [-],
 $Q(V')$ – wartość zunifikowanego wskaźnika rankingowego dla pierwszego rozwiązania z listy [-],
 DQ – próg przewagi [-].

Próg przewagi najlepszego rozwiązania nad kolejnym na liście rankingowej obliczany jest za pomocą poniższej zależności. Wartość progów dla analizy z niewielką liczbą rozpatrywanych wariantów ograniczana jest do wartości 0,25.

$$DQ = \min \left(0,25; \frac{1}{m-1} \right) \quad (8)$$

gdzie:

DQ – próg przewagi [-],
 m – liczba alternatywnych rozwiązań [-].

Najlepsze alternatywne rozwiązanie spełnia warunek „wystarczającej stabilności pozycji”, jeśli spełnia co najmniej jeden z następujących warunków:

- zajmuje pierwszą pozycję na liście rankingowej według Q dla wartości wagi strategii decyzyjnej wynoszącej $v = 0,25$ oraz $v = 0,75$
- zajmuje pierwszą pozycję na liście rankingowej według QS
- zajmuje pierwszą pozycję na liście rankingowej według QR.

W tablicy 12 przedstawiono wyniki obliczeń dla czterech scenariuszy analizy wielokryterialnej.

3. ANALIZA WYNIKÓW Z MODELU DECYZYJNEGO

Na podstawie wyników analizy wielokryterialnej przedstawionych w tablicy 12 stwierdzić można, że najkorzystniejszym wariantem obsługi częściowo zelektryfikowanej trasy Gdynia Główna - Hel według scenariusza środowiskowego oraz scenariusza równych wag jest wykorzystanie do obsługi

3. ANALYSIS OF THE RESULTS FROM THE DECISION MODEL

Based on the results of the multi-criteria analysis presented in Table 12, it can be concluded that the most advantageous variant of servicing the partially electrified Gdynia Główna - Hel route according to the environmental scenario and the scenario of equal weights is the use of storage units for servicing the route. For both of the above-mentioned scenarios, the use of storage units reservoir teams meets the condition of "sufficient advantage" and the condition of "sufficient position stability". In the case of the operational scenario, the use of storage units is also the best solution, however, it does not meet the condition of "sufficient advantage" over the next alternative on the ranking list. The only scenario where the best solution is not to support the route with storage units is the investment scenario. According to this scenario, the best solution is to use combustion units. The comparative analysis was performed assuming that in the case of route servicing with the use of diesel units, the currently used rolling stock will be maintained. As part of the analysis of the results, an alternative variant of using combustion units was considered, taking into account the replacement of the diesel rolling stock with a new one. The analysis was based on the use of Stadler's 3 Flirt diesel multiple units. The unit cost of this vehicle in the combustion version is PLN 21.6 million. The results of the analysis are presented in Table 13.

Ranking table of variants of multi-criteria analysis taking into account the exchange the DMU Table 13

Tablica rankingowa wariantów analizy wielokryterialnej z uwzględnieniem wymiany s.z.t. Tabela 13

Ranking	Scenario			
	SR _{sc}	EI _{sc}	EE _{sc}	RW _{sc}
1	IPEMU (0.00)	DMU (0.00)	IPEMU (0.00)	IPEMU (0.00)
2	EMU (0.67)	IPEMU (0.42)	DMU (0.14)	DMU (0.61)
3	DMU (0.93)	DMU (1000)	EMU (1.00)	EMU (1.00)

The data presented in Table 13 allow for the conclusion that in the event of considering the replacement of diesel rolling stock, the operation of the Gdynia Główna - Hel route using vehicles of this type is still the most advantageous solution according to the investment scenario while meeting the conditions of the so-called stable advantage.

Considering the results of the multi-criteria analysis, it should be considered which of the presented analysis scenarios is decisive in the case of the partially electrified Gdynia Główna - Hel railway. This route runs through the Hel peninsula, which is a protected area under the Natura 2000 program. The

trasy zespołów zasobnikowych. Dla obu z wymienionych scenariuszy zastosowanie zespołów zasobnikowych spełnia warunek „wystarczającej przewagi” oraz warunek „wystarczającej stabilności pozycji”. W przypadku scenariusza eksploatacyjnego zastosowanie zespołów zasobnikowych również jest najlepszym rozwiązaniem, jednakże nie spełnia ono warunku „wystarczającej przewagi” nad kolejną alternatywą na liście rankingowej. Jedynym scenariuszem, w którym najlepszym rozwiązaniem nie jest obsługa trasy przy wykorzystaniu zespołów zasobnikowych jest scenariusz inwestycyjny. Według tego scenariusza najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie zespołów spalinowych.

Analizę porównawczą wykonano przyjmując założenie, że w przypadku obsługi trasy przy wykorzystaniu zespołów spalinowych zachowany zostanie obecnie wykorzystywany tabor. W ramach analizy wyników rozpatrzono alternatywny wariant zastosowania zespołów spalinowych uwzględniający wymianę taboru spalinowego na nowy. Do analizy przyjęto wykorzystanie 3 spalinowych zespołów trakcyjnych Flirt f-my Stadler. Jednostkowy koszt tego pojazdu w wersji spalinowej wynosi 21,6 mln zł. Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono w tablicy 13.

Dane przedstawione w tablicy 13 pozwalają na stwierdzenie, iż w przypadku rozpatrzenia wymiany taboru spalinowego obsługa trasy Gdynia Główna - Hel przy wykorzystaniu pojazdów tego typu jest nadal rozwiązaniem najkorzystniejszym według scenariusza inwestycyjnego, spełniając przy tym warunki tzw. stabilnej przewagi.

Rozważając wyniki analizy wielokryterialnej należy rozpatrzyć, który z przedstawionych scenariuszy analizy ma decydujące znaczenie w przypadku częściowo zelektryfikowanej trasy Gdynia Główna - Hel. Trasa ta przebiega przez Półwysep Helski, który jest obszarem chronionym w ramach programu Natura 2000. Walory przyrodnicze oraz krajobrazowe Półwyspu Helskiego czynią go miejscem unikalnym w skali kraju, co skłania do uznania scenariusza środowiskowego za priorytetowy. W ramach tego scenariusza najkorzystniejszym rozwiązaniem, ze spełnieniem warunków tzw. stabilnej przewagi, jest zastosowanie zespołów zasobnikowych. Drugie miejsce w ramach scenariusza środowiskowego zajmuje obsługa trasy przy wykorzystaniu elektrycznych zespołów trakcyjnych. Rozwiązanie to zajmuje jednak niższe pozycje od zastosowania z.e.z.t. według scenariuszy ekonomicznych.

Istotnym wynikiem analizy wielokryterialnej jest wynik uzyskany według scenariusza równych wag. Wynik ten jest szczególnie, gdyż scenariusz równych wag jest niezależny od subiektywnej oceny istotności poszczególnych kryteriów oceny mającej miejsce w pozostałych scenariuszach analizy. Według scenariusza równych wag zastosowanie do ob.-

natural and landscape values of the Hel peninsula make it a unique place on a national scale, which makes it a priority to consider the environmental scenario. Under this scenario, the most advantageous solution, meeting the conditions of the so-called stable advantage is the use of storage units. The second place in the environmental scenario is the route operation with the use of electric multiple units. This solution, however, occupies lower positions than the application of IPEMU according to economic scenarios.

An important result of the multi-criteria analysis is the result obtained according to the equal weights scenario. This result is special because the scenario of equal weights is independent of the subjective assessment of the significance of individual assessment criteria taking place in the other scenarios of the analysis. According to the equal weights scenario, the use of storage trains for the operation of the analyzed route is the most advantageous solution, provided that the conditions of the so-called stable advantage over other variants of the route service is met. On the basis of the presented analysis, it is concluded that the most reasonable variant of servicing the partially electrified Gdynia Główna - Hel route is the use of storage multiple units.

SUMMARY

This article presents a multi-criteria comparative analysis of the operation of the partially electrified Gdynia Główna - Hel railway by diesel, electric and storage electric multiple units. For the purposes of the analysis in the previous article [11], calculations were made of the theoretical travel and the energy demand of the storage train unit on the non-electrified section of the analyzed route. An on-board hybrid energy storage was selected, consisting of a battery with an energy of 499.3 kWh and a supercapacitor with an energy of 35.6 kWh. The multi-criteria analysis was based on three evaluation criteria. As part of the environmental criterion, the environmental impact of each of the route operation options was assessed. The considered variants of the route operation were compared in terms of the emission of harmful substances as a result of the use of a given type of vehicle and the impact of each variant on the landscape values. As part of this criterion, it was found that the most environmentally friendly is the use of storage units. The use of these vehicles to service the route does not involve the construction of a traction network that interferes with the landscape of the Hel peninsula and does not cause local pollution of the natural environment.

The second criterion used is the operational economic criterion, within which the annual operating costs of diesel, electric and storage multiple units were analyzed. It has been shown that the lowest operating costs are characteristic of storage vehicles,

sluży analizowanej trasy zasobnikowych zespołów trakcyjnych jest najkorzystniejszym rozwiązaniem przy spełnieniu warunków tzw. stabilnej przewagi nad pozostałymi wariantami obsługi trasy. Na podstawie przedstawionej analizy stwierdza się, że najbardziej zasadnym wariantem obsługi częściowo zelektryfikowanej trasy Gdynia Główna - Hel jest zastosowanie zasobnikowych zespołów trakcyjnych.

PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przeprowadzono wielokryterialną analizę porównawczą obsługi częściowo zelektryfikowanej trasy Gdynia Główna - Hel przez spalinowe, elektryczne oraz zasobnikowe elektryczne zespoły trakcyjne. Na potrzeby analizy w poprzednim artykule [11] wykonano obliczenia przejazdu teoretycznego oraz zapotrzebowania energetycznego zasobnikowego zespołu trakcyjnego na niezelektryfikowanym odcinku analizowanej trasy. Dobrano pokładowy hybrydowy zasobnik energii składający się z baterii akumulatorów o energii 499,3 kWh oraz superkondensatora o energii 35,6 kWh.

Przeprowadzoną analizę wielokryterialną oparto na trzech kryteriach oceny. W ramach kryterium środowiskowego oceniono wpływ zastosowania każdego z wariantów obsługi trasy na środowisko naturalne. Rozważane warianty obsługi trasy porównano pod kątem emisji szkodliwych substancji w wyniku użytkowania danego typu pojazdu oraz oceniono wpływ każdego z wariantów na walory krajobrazowe. W ramach tego kryterium stwierdzono, iż najprzystajniejsze dla środowiska naturalnego jest zastosowanie zasobnikowych zespołów trakcyjnych. Wykorzystanie do obsługi trasy tych pojazdów nie wiąże się z budową sieci trakcyjnej ingerującej w krajobraz Półwyspu Helskiego oraz nie powoduje lokalnego zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

Drugim z zastosowanych kryteriów jest kryterium ekonomiczne eksploatacyjne, w ramach którego przeanalizowano roczne koszty użytkowania spalinowych, elektrycznych oraz zasobnikowych zespołów trakcyjnych. Wykazano, że najniższymi kosztami eksploatacji charakteryzują się pojazdy zasobnikowe, dla których koszty te wynoszą 425,8 tys. zł. Najdroższymi w eksploatacji są natomiast elektryczne zespoły trakcyjne. Roczny koszt ich eksploatacji wynosi 1,1 mln zł, co związane jest głównie z kosztem utrzymania infrastruktury trakcyjnej. Roczne koszty eksploatacyjne związane z obsługą trasy przez s.z.t. wynoszą 505 tys. zł. Ostatnim z kryteriów analizy jest koszt inwestycji związany z danym wariantem obsługi trasy. W ramach tego kryterium wyróżnia się koszty wspólne inwestycji wynoszące 6,6 mln zł. Koszty te związane są z budową nowych mijanek na linii 213 Reda - Hel mających na celu zwiększenie przepustowości linii, niezbędnej w sezonie letnim. Najniższymi kosztami inwestycji cechuje się obsługa trasy przy zastosowaniu s.z.t.

for which these costs amount to PLN 425.8 thousand. Electric multiple units, on the other hand, are the most expensive to operate. The annual cost of their operation is PLN 1.1 million, which is mainly related to the cost of maintaining the traction infrastructure. Annual operating costs related to the route operation by DMU are 505 thousand PLN. The last criterion of the analysis is the investment cost related to a given route service option. This criterion includes common investment costs amounting to PLN 6.6 million. These costs are related to the construction of new passing passes on the 213 Reda - Hel line, aimed at increasing the line capacity, necessary in the summer season. The lowest investment costs are characteristic of the route service with the use of DMU. Assuming no rolling stock replacement, these costs are equal to the common investment costs. The highest investment costs are related to the operation of the route by EMU, which is associated with the electrification of line 213. These costs amount to PLN 185.7 million. The investment costs resulting from the use of reservoir teams to operate the traction route amount to PLN 141.2 million.

A multi-criteria comparative analysis was carried out for 4 different scenarios: environmental, operational, investment and the equal weight scenario. The weights of individual criteria, depending on the selected analysis scenario, are different. The use of storage units is the best variant according to the environmental and operational scenarios and the equal weights scenario. Route service using IPEMU is not the best variant according to the investment scenario, according to which the use of diesel multiple units is the best variant for the route service. This is due to the lack of the need to invest in diesel rolling stock, which is currently used on the route in question. The second reason for the superiority of DMU over IPEMU in the investment scenario includes the high price of the railroad multiple unit. As part of the analysis, it was proposed to operate the route using the Flirt electric multiple unit from Stadler, equipped with a hybrid on-board energy storage. The cost of such a vehicle is less than PLN 31 million. The cost of equipping it with an on-board energy storage is PLN 7.6 million. Therefore, the total purchase cost of the container multiple unit is PLN 38.6 million. A significant part of the cost of the on-board energy storage is the purchase cost of supercapacitors, the price of which is PLN 3.7 million. Reduction of the purchase cost of IPEMU is possible by resigning from equipping the vehicle with supercapacitors.

The technology of production of traction batteries is constantly being improved, which makes it possible to power storage trains without limiting the dynamics of the vehicle resulting from the limitation of charging and discharging currents of the

Koszty te przy założeniu braku wymiany taboru kolejowego równe są wspólnym kosztom inwestycji. Najwyższe koszty inwestycji związane są z obsługą trasy przez e.z.t., co wiąże się z elektryfikacją linii 213. Koszty te wynoszą 185,7 mln zł. Koszty inwestycyjne wynikające z zastosowania do obsługi trasy zasobnikowych zespołów trakcyjnych wynoszą 141,2 mln zł.

Wielokryterialną analizę porównawczą przeprowadzono dla 4 różnych scenariuszy: środowiskowego, eksploatacyjnego, inwestycyjnego oraz scenariusza równych wag. Wagi poszczególnych kryteriów w zależności od wybranego scenariusza analizy są różne. Zastosowanie zasobnikowych zespołów trakcyjnych jest najlepszym wariantem według scenariusza środowiskowego, eksploatacyjnego oraz scenariusza równych wag. Obsługa trasy przy wykorzystaniu z.e.z.t. nie jest najlepszym wariantem według scenariusza inwestycyjnego, według którego najlepszym wariantem obsługi trasy jest zastosowanie spalinowych zespołów trakcyjnych. Związane jest to brakiem konieczności inwestowania w spalinowy tabor kolejowy, który aktualnie jest stosowany na omawianej trasie. Drugą z przyczyn wyższości s.z.t. nad z.e.z.t. w ramach scenariusza inwestycyjnego jest wysoka cena zasobnikowego zespołu trakcyjnego. W ramach analizy zaproponowano obsługę trasy przy wykorzystaniu elektrycznego zespołu trakcyjnego Flirt f-my Stadler wyposażonego w hybrydowy pokładowy zasobnik energii. Koszt takiego pojazdu wynosi niespełna 31 mln zł. Koszt wyposażenia go w pokładowy zasobnik energii to 7,6 mln zł. Łączny koszt zakupu zasobnikowego zespołu trakcyjnego wynosi zatem 38,6 mln zł. Znaczną część kosztu pokładowego zasobnika energii stanowi koszt zakupu superkondensatorów, których cena wynosi 3,7 mln zł. Redukcja kosztu zakupu z.e.z.t. możliwa jest poprzez rezygnację z wyposażenia pojazdu w superkondensatory.

Technologia produkcji akumulatorów trakcyjnych nieustannie jest doskonała, co daje możliwość zasilania zasobnikowych zespołów trakcyjnych bez ograniczania dynamiki pojazdu wynikającej z ograniczeń prądów ładowania oraz rozładowania akumulatora trakcyjnego. Przykładem obecnie produkowanego zasobnikowego zespołu trakcyjnego wyposażonego wyłącznie w baterię akumulatorów jest Talent 3 f-my Bombardier. Pojazd ten umożliwia przejechanie 40 km przy zasilaniu bateryjnym, a jego koszt wynosi 27 mln zł. Zastosowanie takich pojazdów na analizowanej trasie, przy założeniu zakupu 3 zespołów pozwoliłoby na zredukowanie kosztów zakupu taboru zasobnikowego o 34,8 mln zł. Przyjmując do analizy w ramach scenariusza inwestycyjnego konieczność wymiany taboru spalinowego oraz obsługę trasy przez seryjnie produkowane zespoły zasobnikowe powoduje, iż różnica kosztów inwestycyjnych obu rozwiązań zostaje zredukowana ze 134,6

traction battery. The Bombardier Talent 3 is an example of a currently produced storage unit equipped only with a batteries. This vehicle allows you to travel 40 km with battery power, and its cost is PLN 27 million. The use of such vehicles on the analyzed route, assuming the purchase of 3 units, would allow for the reduction of the purchase costs of the rolling stock by PLN 34.8 million. Assuming the necessity to replace the diesel rolling stock and the route service by mass-produced storage units for the analysis as part of the investment scenario, the difference in investment costs of both solutions is reduced from PLN 134.6 million to PLN 35.0 million.

The multi-criteria analysis was carried out on the basis of the summer timetable data for regional trains on the Gdynia Główna - Hel route. As part of the further analysis of the use of storage units on this route, it is proposed to take into account the seasonal traffic of long-distance trains. These trains are currently run on the route in question by diesel locomotives. During the tourist season, an average of 6 arrivals and departures of long-distance trains is registered every day at the Hel station. It is predicted that taking into account the seasonal traffic of long-distance trains in the analysis will increase the advantage of route service by electric and storage units, with the advantage of IPEMU over EMU not changing under the environmental scenario.

As a result of the multi-criteria analysis, it can be concluded that the most advantageous variant of route service is the use of storage multiple units. This solution, in relation to the other variants, is characterized by the lowest harmfulness to the natural environment, the lowest operating costs and investment costs constituting 57% of the investment costs of route maintenance by electric multiple units.

List of major symbols and abbreviations

IPEMU – Independently Powered Electric Multiple-Unit,

EMU – Electric Multiple-Unit,

DMU – Diesel Multiple-Unit,

SR – environmental criterion,

EE – operational economic criterion,

EI – economic investment criterion,

SR_{SC} – environmental scenario,

EE_{SC} – operational economic scenario,

EI_{SC} – economic investment scenario.

mln zł do 35,0 mln zł.

Przeprowadzoną analizę wielokryterialną przeprowadzono w oparciu o dane letniego rozkładu jazdy pociągów regionalnych na trasie Gdynia Główna - Hel. W ramach dalszej analizy zastosowania zasobnikowych zespołów trakcyjnych na tej trasie proponuje się uwzględnienie sezonowego ruchu pociągów dalekobieżnych. Pociągi te aktualnie prowadzone są na omawianej trasie przez lokomotywy spalinowe. W sezonie turystycznym każdego dnia na stacji Hel rejestruje się średnio 6 przyjazdów oraz odjazdów pociągów dalekobieżnych. Przewiduje się, iż uwzględnienie w analizie sezonowego ruchu pociągów dalekobieżnych spowoduje zwiększenie przewagi obsługi trasy przez zespoły elektryczne oraz zasobnikowe, przy czym przewaga z.e.z.t. nad e.z.t. w ramach scenariusza środowiskowego nie ulegnie zmianie.

W wyniku przeprowadzonej analizy wielokryterialnej można stwierdzić, że najkorzystniejszym wariantem obsługi trasy jest wykorzystanie zasobnikowych zespołów trakcyjnych IPe.z.t. Rozwiązanie to w odniesieniu do pozostałych wariantów charakteryzują się najmniejszą szkodliwością dla środowiska naturalnego, najniższymi kosztami eksploatacji oraz kosztami inwestycyjnymi stanowiącymi 57% kosztów inwestycyjnych obsługi trasy przez elektryczne zespoły trakcyjne e.z.t.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów:

z.e.z.t. – autonomiczny elektryczny zespół trakcyjny

(ang. *Independently Powered Electric Multiple-Unit*),
e.z.t. – elektryczny zespół trakcyjny (ang. *Electric Multiple-Unit*),

s.z.t. – spalinowy zespół trakcyjny (ang. *Diesel Multiple-Unit*),

SR – kryterium środowiskowe,

EE – kryterium ekonomiczne eksploatacyjne,

EI – kryterium ekonomiczne inwestycyjne,

SR_{SC} – scenariusz środowiskowy,

EE_{SC} – scenariusz ekonomiczny eksploatacyjny,

EI_{SC} – scenariusz ekonomiczny inwestycyjny.

BIBLIOGRAPHY/BIBLIOGRAFIA

- [1] *rozladowani.pl*, Nawet w Polsce samochód elektryczny emituje mniej CO₂ niż pojazdy spalinowe, <https://rozladowani.pl/lepsze-od-spalinowych/>, (data dostępu 18.08.2020 r.)
- [2] *lotos.pl*, Ceny hurtowe paliw https://www.lotos.pl/144/poznaj_lotos_dla_biznesu/hurtowe_ceny_paliw (data dostępu 04.08.2020 r.)
- [3] *trójmiasto.pl*, Szynobusy na linii PKM zużywają więcej paliwa niż zakładano, <https://www.trojmiasto.pl/wiadomosci/Szynobusy-na-linii-PKM-zuzywaja-wiecej-paliwa-niz-zakladano-n94452.html>, (data dostępu 03.08.2020 r.)

- [4] *motohurtownia.com*, Dane katalogowe Lokomotiv Extra CF 40, <https://www.motohurtownia.com/product-pol-3578-Lokomotiv-Extra-CF-40.html> (data dostępu 03.08.2020 r.)
- [5] Szkoła M., *Koszt cyklu trwałości jako kryterium efektywności modernizacji lokomotyw spalinowych*, Politechnika Krakowska, Kraków 2007 r.
- [6] *slovnaft.pl*, Większa niezawodność <https://slovnaft.pl/pl/oleje-i-smary/transport/historie-sukcesu/wieksza-niezawodnosc-transport/> (data dostępu 04.08.2020 r.)
- [7] *forsal.pl*, Ile zapłacimy za prąd? Ceny hurtowe energii szacuje się na 240-280 zł za MWh do 2022 r., <https://forsal.pl/artykuly/1440311,ile-zaplacimy-za-prad-ceny-hurtowe-energii-szacuje-sie-na-240-280-zl-za-mwh-do-2022-r.html>, (data dostępu 04.08.2020 r.)
- [8] *Bistyp Koleje i tramwaje*, Katalog cen robót kolejowych i tramwajowych, Wydawnictwo Wolters Kluwer Polska Sp. z o.o. Warszawa, II kwartał 2020 r.
- [9] *Gala-de Vacqueret M., Kaczmarek P., Mitelski K., Plińska M., Planeta M., Sierakowski T., Sikorska-Ożgo M., Wypych A., Biuletyn cen obiektów budowlanych, cz. II Obiekty inżynierijne. Sekocenbud, zeszyt 33/2020 (1951), Ośrodek wdrożeń ekonomiczno-organizacyjnych budownictwa Promocja Sp. z o.o. Warszawa, II kwartał 2020 r.*
- [10] *Milana Kosijer, Miloš Ivić, Milan Marković, Ivan Belošević, Multicriteria decision-making in railway route planning and design, GRADEVINAR 64 (2012) 3, 195-205, Belgrad 2012 r.*
- [11] *Karkosiński D., Stromski P., Karkosińska-Brzozowska N., Hybrydowy zasobnik energii dla elektrycznych zespołów trakcyjnych do obsługi częściowo zelektryfikowanej linii Gdynia - Hel, Pojazdy szynowe nr 1/2021,*

Wheel wear during the operation of rail vehicles. Causes and effects

Zużycie koła podczas eksploatacji pojazdów szynowych. Przyczyny i skutki

The article presents the issues related to the wear of the outer outline of monoblock wheel rims in rail vehicles. The most often causes of wheel wear during commercial operation of rail vehicles are presented over the many decades of experiences gathered by European boards. The effects of rail vehicle wheels wear and countermeasures against wear are presented.

W artykule przedstawiono problematykę związaną ze zużyciem zarysu zewnętrznego wieńców kół monoblokowych w pojazdach szynowych. Przedstawiono najczęstsze przyczyny zużycia kół podczas eksploatacji komercyjnej pojazdów szynowych na przestrzeni wielu doświadczeń zebranych podczas wielu dziesiątków lat przez zarządy europejskie. Zaprezentowano skutki zużycia kół pojazdów szynowych oraz środki zaradcze, przeciwdziałające zużyciu.

1.INTRODUCTION

Wear in the wheel-rail system is one of the most significant problems in modern railways. This study is a further continuation of the significant problems that occur in urban, suburban, regional and long-distance passenger rail transport and freight rail transport [4÷10]. Its importance has not diminished at all, but increased with the development of rail vehicles in two main directions: the increase in speed to 350 km/h (long-distance multiple units) and the increase in the wheelset load per track on regular lines to 22.5 t and selected 25t (245kN)- e.g. Kiruna-Narvik (Sweden-Norway), and on some selected, separated railway lines 30t (294 kN, heavy freight, iron ore transport) in the countries of the European Union **The wheel-rail system should be considered as the most loaded construction and operational node in modern railway technology.** The wear of the rolling surface of the outer outline of the monoblock wheel rims is a function of the vertical pressure of the wheel on the rail Q_{rz} (wear of the rolling surface) and the longitudinal friction forces during travel and the forces occurring at start-up and braking, but the flange wear is a function of the acting lateral forces Y . According to the detailed study work the problem is more complex from the point of view of modern technology. The more complex a vehicle is (e.g. a multiple unit set for regional or long-distance traffic), the more important issue of wheel wear becomes. The user/operator is not only interested in relatively low wear of the individual wheels, but also their even wear (as far as possible) not only in one running gear, but in the whole vehicle.

1.WSTĘP

Zużycie w układzie koło-szyna jest jednym z najistotniejszych problemów we współczesnym kolejnictwie. Niniejsze opracowanie jest dalszą kontynuacją istotnych problemów, które występują w transporcie kolejowym osobowym miejskim, podmiejskim, regionalnym i dalekobieżnym osobowym oraz transporcie kolejowym ładunków [4÷10]. Jego znaczenie wcale nie zmalało, a wzrosło wraz z rozwojem pojazdów szynowych w dwóch zasadniczych kierunkach: wzrost prędkości do 350 km/h (zespoły trakcyjne dalekobieżne) oraz wzrost nacisku zestawu kołowego na tor na liniach regularnych do 22,5 t oraz wybranych 25t (245kN)-np. Kiruna-Narvik (Szwecja-Norwegia), a na niektórych wybranych, wydzielonych liniach kolejach 30t (294 kN, ciężkie przewozy towarowe, transport rudy żelaza) w krajach Unii Europejskiej. **Układ koło-szyna należy uznać jako najbardziej obciążony węzeł konstrukcyjno-eksploatacyjny we współczesnej technice kolejowej.** Zużycie powierzchni tocznej zarysu zewnętrznego wieńców kół monoblokowych jest funkcją nacisku pionowego koła na szynę Q_{rz} (zużycie powierzchni tocznej) oraz sił wzdłużnych tarcia podczas jazdy oraz sił pojawiających się przy rozruchu i hamowaniu, natomiast zużycie obrzeża funkcją działających sił poprzecznych Y . Jak wynika ze szczegółowych prac studialnych problem jest bardziej złożony z punktu widzenia współczesnej techniki. Im bardziej złożony jest pojazd (np. wielocłonowy zespół trakcyjny ruchu regionalnego lub dalekobieżnego), tym sprawa zużycia kół nabiera coraz większego znaczenia. Użytkownik/przewoźnik

It should be taken into account that a traction unit has driving wheelsets and rolling wheelsets, situated differently in the construction of a traction unit, which leads to the conclusion that due to their location in the vehicle some wheelsets in relation to others are in a more favourable situation with respect to wear. The increasing requirements regarding the wheelset wear result from the current situation on the passenger and freight transport market, which direct to increased availability, reliability and maintenance-free operation or longer maintenance intervals. It seems, however, that all these requirements must lead to another development trend, namely the "monitoring" of the technical condition of the vehicle and the railway infrastructure using sensors installed on board ("online") of the rail vehicle, where the measured data are transmitted via radio to a central station, where the data are collected, classified, processed and evaluated from the point of view of operating safety. Thanks to a such procedure it is possible to make decision about repairing the vehicle in the moment when data indicate an imminent exceeding of permissible operating parameters ("on-time" repair).

2. INFLUENCE OF INDIVIDUAL FACTORS ON WHEEL WEAR OF WHEELSET

2.1. Influence of running gear construction on wheel wear

Analysing the running gear of a rail vehicle, it should be considered the problem of the basic parameters influencing the wear of wheelsets. The basic factors which influence the wear of wheelsets due to the construction of bogie (the running gear) can be included:

- the ability to track curve negotiation with a radius of $R \geq 250$ m on main lines and siding tracks with a radius of $R \geq 150$ m; this can be ensured constructionally by means of longitudinal clearances in the axlebox suspension (the so-called **passive** system of radial control of wheelset positioning in the track curves) and the use of radial control mechanism (the so-called **active** system of radial control of wheelset positioning in the track curves) as well as on the workshop tracks with radius $R=100$ m (traction vehicles, passenger wagons) and with radii $R=35$ m or $R=75$ m (freight wagons),
- as far as possible, a small value of the resistance moment of the bogie relative to the body when the vehicle negotiates curves of the track; in the case of freight wagons, due to the fulfilment of the dynamic properties, this value must be specific (for freight wagons with a gross weight of 90 000 kg the value should be approx. 45 kNm),
- small impact angles of the wheel on the rail head; in this case it depends on the bogie base;

jest zainteresowany nie tylko relatywnie małym zużyciem pojedynczych kół, ale również ich równomiernym zużyciem (w miarę możliwości) nie tylko w jednym układzie biegowym, ale w całym pojeździe. Należy wziąć pod uwagę, że zespół trakcyjny posiada zestawy kołowe napędne oraz zestawy kołowe toczne, różnie usytuowane w konstrukcji zespołu trakcyjnego, skąd wynika wniosek, że ze względu na usytuowanie w pojeździe jedne zestawy w stosunku drugich są bardziej korzystnej sytuacji ze względu na zużycie. Zwiększające się wymagania odnośnie zużycia kół zestawów kołowych, wynikają z obecnej sytuacji na rynku przewozowym osób i towarów, sprowadzające się do zwiększenia dyspozycyjności, niezawodności oraz bezobsługowości lub wydłużenia okresów między-naprawczych. Wydaje się jednak, że wszystkie te wymagania muszą prowadzić do innego trendu rozwojowego, a mianowicie „monitoringu” stanu technicznego pojazdu i infrastruktury kolejowej za pomocą czujników, zainstalowanych na pokładzie („online”) pojazdu szynowego, gdzie pomierzone dane są przekazywane na drodze radiowej do centrali, gdzie dane są gromadzone, klasyfikowane, poddane obróbce oraz oceniane z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Dzięki zastosowaniu takiej procedury można podjąć decyzję o przeprowadzeniu naprawy w chwili, kiedy dane wskazują na rychłe przekroczenie dopuszczalnych parametrów eksploatacyjnych (tzw. naprawa „on-time”).

2. WPLYW POSZCZEGÓLNYCH CZYNNIKÓW NA ZUŻYCIE KÓŁ ZESTAWÓW KOŁOWYCH

2.1. Wpływ konstrukcji układów biegowych na zużycie kół

Analizując układ biegowy pojazdu szynowego, należy rozważyć problematykę podstawowych parametrów wpływających na zużycie kół zestawów kołowych. Do podstawowych czynników, które mają wpływ na zużycie kół zestawów kołowych z uwagi na konstrukcję wózka (układu biegowego) można zaliczyć:

- zdolność do wpisywania się w łuki toru o promieniu $R \geq 250$ m na liniach szlakowych oraz na tory bocznicowe o promieniu $R \geq 150$ m; konstrukcyjnie można to zapewnić przez zastosowanie luzów wzdłużnych w zawieszeniu przymażnicznym (tzw. **pasywny** układ sterowania radialnego ustawiania się zestawu kołowego w łukach toru) oraz zastosowanie mechanizmu sterowania radialnego (tzw. **aktywny** system układu sterowania radialnego ustawiania się zestawów kołowych w łukach toru) oraz na tory warsztatowe o promieniu $R=100$ m (pojazdy trakcyjne, wagony osobowe) oraz o promieniach $R=35$ m lub $R=75$ m (wagony towarowe),

- the smaller bogie base is the impact angles are smaller, and with the increase of the bogie base the impact angles are larger; it should be taken into account that the bogie base in some cases is a result of standardization works, e.g. **1800 mm** for the family of freight bogies of **Y25 (UIC 510-1 leaflet [16])** and **2600 mm (UIC 515-0 leaflet [18])** for the running gears of passenger wagons; the base of driving bogie in case of traction vehicles is limited by the size of a drive transmission of engine+gearbox, whereas in case of the carrying bogies of passenger wagons, the electromagnetic brake may be such a boundary condition, especially when the longitudinal dimension of the equalizer is taken into account; it should also be taken into account that railway vehicle constructors aim at a compact construction of the bogie, because it is a favourable factor for the possible installation of other devices, e.g. pneumatic brake systems,
 - use of a disc brake instead of a block brake; then the rolling surface of the wheel is significantly relieved; examples of such running gears are the following selected running gears of the design of the **Ścieć Badawcza Łukasiewicz - IPS „TABOR”**:
 - ⇒ bogies **11ANa, 11ANc** (for passenger wagons for maximum speed of **200 km/h** and **250 km/h** respectively),
 - ⇒ bogie **5TN** and **5TN/1** (for freight wagons e.g. **424 S** with sliding walls for maximum speed of **160 km/h**),
 - ⇒ bogie **33 MN** for broken stone ballast cleaner **OT-84**,
 - ⇒ bogie **6TN** and **6TN/1** for bimodal transport (adapted for maximum speed of **160 km/h**),
 - ⇒ bogie for **111E locomotive** (brake discs mounted on both sides of the wheels); the advantage of this type of solution is elimination of friction wear and thermo-mechanical loading of the wheel rim and significant reduction in the emission of noise to the environment, both in relation to the grey iron (**GG**) brake-shoe inserts, inserts made of composite materials with the same characteristics as the grey iron (**LL**) inserts and composite (**K-type**) inserts with a high coefficient of friction,
 - use of a device for wheel flange lubrication (traction bogies of locomotives and multiple traction units),
 - use of an inter-bogie coupling between the traction bogies of locomotives,
 - use of an anti-slip system operating during start-up and braking, especially in the traction vehicles (locomotives and multiple units) to
- w miarę możliwości mała wartość momentu oporowego wózka względem nadwozia, podczas wpisywania się pojazdu w łuki toru; w przypadku wagonów towarowych z uwagi na spełnienie własności dynamicznych wartość ta musi mieć charakter określony (w przypadku wagonów towarowych o masie brutto **90 000 kg** wartość ta powinna wynosić ok. **45 kNm**),
 - małe kąty nabiegania koła na główkę szyny; w tym przypadku zależy to od bazy wózka; im mniejsza baza wózka kąty nabiegania maleją, natomiast ze wzrostem bazy wózka kąty nabiegania rosną; należy uwzględnić, że baza wózka w niektórych przypadkach jest efektem prac standaryzacyjnych np. **1800 mm** rodzina wózków wagonów towarowych **Y25 (karta UIC 510-1[16])** oraz **2600 mm (karta UIC 515-0 [18])** dla układów biegowych wagonów osobowych; bazę wózka napędowego w przypadku pojazdów trakcyjnych limituje rozmiar układu przeniesienia napędu silnik+przekładnia, natomiast w przypadku wózków tocznych dla wagonów osobowych, takim warunkiem brzegowym może być hamulec elektromagnetyczny, zwłaszcza kiedy uwzględni się wymiar wzdłużny wahacza; należy również wziąć pod uwagę, że konstruktorzy pojazdów szynowych i tak dążą do kompaktowej zabudowy wózka, gdyż jest to czynnik sprzyjający do ewentualnej zabudowy innych urządzeń np. układu pneumatycznego hamulcowych,
 - zastosowanie hamulca tarczowego, zamiast hamulca klockowego; wówczas odciążona jest w sposób znaczący powierzchnia toczna koła; przykładami takich układów biegowych mogą następujące, wybrane układy biegowe konstrukcji **Sieci Badawczej Łukasiewicz IPS „TABOR”**:
 - ⇒ wózki **11ANa, 11ANc** (dla wagonów osobowych odpowiednio dla prędkości maksymalnej **200 km/h** oraz **250 km/h**),
 - ⇒ wózek **5TN** i **5TN/1** (dla wagonów towarowych np. **424 S** z rozsuwanymi ścianami do prędkości maksymalnej **160 km/h**),
 - ⇒ wózek **33 MN** dla oczyszczarki tłucznia **OT-84**,
 - ⇒ wózek **6TN** i **6TN/1** do transportu bimodalnego (przystosowane do prędkości maksymalnej **160 km/h**),
 - ⇒ wózek dla lokomotywy **111E** (tarcze hamulcowe zamontowane po obu stronach kół); zaletą tego rodzaju rozwiązania jest wyeliminowanie zużycia ciernego oraz obciążenia termo-mechanicznego wieńca koła oraz znaczące zmniejszenie emisji hałasu do środowiska naturalnego, zarówno w stosunku do

prevent wheel slippage of individual wheel sets,

- systematic increase in the accuracy of making the running gear; the structure itself can't cause the wheelset to be skew placed on a straight track; such a situation may happen if the running gears are equipped with the suspension with a gap-free guiding of the wheelset,
- the amount of unit pressures „ q ” in the ellipse of the contact between the wheel and the rail; in this case, the decisive factor is the coefficient of friction „ μ ” between wheel and rail; as a result of the above, the decisive factors of wear of the outer surface of the wheel rim is the unit friction force „ $\mu \times q$.” During operation, a dynamic factor occurs in the case of unit pressures, but the wheel-rail friction coefficient decreases with speed; thus, in the case of quasi-static riding there is a unit friction force „ $\mu_{MAX} \times q$ ”, but in the case of operation „ $\mu_{DYN} \times (q + q_{DYN})$ ”.

In general, it can be concluded that all design measures limiting the values of forces in the wheel-rail interaction system contribute to lower wear of the rim of monoblock wheels.

Friction coefficient μ in the wheel-rail system is the result of some compromise in the railway technology. In the case of a low value of the friction coefficient, a lower wear of wheel rim can actually be expected.

However, a relatively high value of the friction coefficient is desirable during:

- start-up of traction vehicles, which requires increasing adhesion by using the devices for sanding,
- using the handbrake or parking brake, especially on the track gradient, in order to prevent its low efficiency, and consequently undesirable, automatic setting the rail vehicle in motion,
- braking of the rail vehicle and
- reduces the safety while riding of the vehicle, especially in quasi-static conditions.

The value of the friction coefficient changeable in time and depends on many different factors. An average value of $\mu=0.4$ is often used in the calculations. In the case of lack of lubrication of rails and wheels and in atmospheric conditions with low humidity (so-called dry conditions), the value of the friction coefficient may even be $\mu=0.5$ [2]. In the case of using the wheel flange lubrication and rail grooves it is used the value of the coefficient value of $\mu=0.1$. But as the operational experience shows, the value of the friction coefficient may drop even below 0.1 . It should be noticed that the friction coefficient is a statistical value between rails and wheels. In the case

wstawek klocków hamulcowych z żeliwa szarego (**GG**), wstawek z materiałów kompozytowych o takiej samej charakterystyce jak wstawki z żeliwa szarego (**LL**) oraz wstawek kompozytowych (typu **K**) o dużym współczynniku tarcia,

- zastosowanie urządzenia do smarowania obrzeży kół (wózki trakcyjne lokomotyw i zespołów trakcyjnych),
- zastosowanie sprzęgu międzywózkowego pomiędzy wózkami trakcyjnymi lokomotyw,
- zastosowanie układu przeciwpoślizgowego, działającego podczas rozruchu i hamowania, zwłaszcza w pojazdach trakcyjnych (lokomotywy oraz zespoły trakcyjne), zapobiegającemu poślizgom kół poszczególnych zestawów kołowych,
- systematyczne zwiększenie dokładności wykonania układu biegowego; konstrukcja sama w sobie nie może wywoływać skośnego ustawienia zestawu kołowego na torze prostym; taka sytuacja może się zdarzyć jeżeli układy biegowe są wyposażone w zawieszenie z bezluzowym prowadzeniem zestawu kołowego,
- wielkość nacisków jednostkowych „ q ” w elipsie styku pomiędzy kołem i szyną; w takim przypadku decydującym czynnikiem jest współczynnik tarcia „ μ ” pomiędzy kołem, a szyną; wskutek powyższego do czynników decydującym o zużyciu powierzchni zewnętrznej wieńca koła jest jednostkowa siła tarcia „ $\mu \times q$.” W trakcie eksploatacji dochodzi czynnik dynamiczny w przypadku nacisków jednostkowych, ale współczynnik tarcia koło-szyna maleje wraz z prędkością; tak więc w przypadku jazdy quasi-statycznej występuje jednostkowa siła tarcia „ $\mu_{MAX} \times q$ ”, natomiast podczas eksploatacji „ $\mu_{DYN} \times (q + q_{DYN})$ ”.

Ogólnie można wysunąć wniosek, że wszystkie środki konstrukcyjne, ograniczające wartości sił w układzie oddziaływania koło-szyna, przyczyniają się do mniejszego zużycia wieńca kół monoblokowych.

Współczynnik tarcia μ w układzie koło-szyna jest wynikiem pewnego kompromisu w technice kolejowej. W przypadku małej wartości współczynnika tarcia, rzeczywiście można spodziewać się mniejszego zużycia wieńca koła.

Jednak relatywnie duża wartość współczynnika tarcia jest pożądana podczas:

- rozruchu pojazdów trakcyjnych, co wymaga zwiększenia przyczepności poprzez zastosowanie urządzeń do piaskowania,
- wykorzystania hamulca ręcznego lub postojowego, zwłaszcza na pochyleniu toru, w celu

of a rail, it is exposed to a large extent to the effects of the weather conditions, as a result of which oxide layers form and layers of dust and particulates are accumulate. The friction coefficient μ can be divided into four ranges of values:

- $0 < \mu \leq 0,1$ – very humid conditions - **range I**,
- $0,1 < \mu < 0,25$ - humid conditions - **range II**,
- $0,25 \leq \mu \leq 0,4$ - humid conditions - **range III**,
- $\mu > 0,4$ - very dry conditions, low air humidity - **range IV**.

The division into four value ranges makes it even visible that the friction coefficient has an influence not only on the wear of the wheel, but also on the operation of the vehicle. The functioning of the vehicle related to the value of the friction coefficient is influenced by such factors as riding safety in quasi-static and dynamic conditions as well as proper starting-up, braking and operation of the parking brake. A very high value of the coefficient, e.g. while riding in the quasi-static conditions and at starting - up of the rail vehicle has a negative impact on the life of the pressing connection between the seat of the axle of wheelset and the wheel hub (it reduces the safety factor of the pressing connection between the wheel hub and seat of axle).

2.2. Influence of wheelset and wheel construction

The factors influencing the wear on the part of the construction of the wheelset and wheels should include:

- difference of the rolling diameters of the wheels of the same wheelset; the smaller difference of wheelset diameters is, the lower value of the equivalent conicity (UIC 519 leaflet [19] and PN-EN 14363:2016 [15]) and the tendency of wheelset to slip is; with decreasing the difference of rolling radii, the vehicle becomes more and more symmetrical, the so-called the asymmetry angle of the entire construction of the vehicle " α " decreases, which entails a greater chance on a relatively even distribution of vertical pressure of the wheelsets during operation,
- outer outline of a wheel rim of a wheelset (wheel profile); the more it fits to the railhead profile, the less wear is; the selection of the outline of the outer rim of wheel has a long history, which will be described later in the text,
- value of the deviations in the shape of the rim of wheel, i.e. radial run-out of the rolling surface and internal rims (Fig. 1),
- roughness of the rolling surface of the wheel rim and flange, assessed using the parameters R_a , R_z and R_t ; the smaller roughness of the wheels is (the greater the smoothness), the lower wear should be (Fig. 1),

- zapobieżenia jego niskiej sprawności, a w efekcie niepożądanemu, samoczynnemu wprawieniu w ruch pojazdu szynowego,
- hamowania pojazdu szynowego oraz
- zmniejsza bezpieczeństwo podczas jazdy pojazdu zwłaszcza w warunkach quasi-statycznych.

Wartość współczynnika tarcia jest zmienna w czasie i zależy od wielu różnorodnych czynników. W obliczeniach przyjmuje się często wartość średnią, wynoszącą $\mu=0,4$. W wypadku braku smarowania szyn i kół i przy warunkach atmosferycznych o małej wilgotności (tzw. warunki suche) możliwa jest wartość współczynnika tarcia, wynosząca nawet $\mu=0,5$ [2]. W przypadku stosowania smarowania obrzeży kół oraz rowków szyn stosuje się wartość współczynnika tarcia $\mu=0,1$. Ale jak wynika z doświadczeń eksploatacyjnych wartość współczynnika tarcia może spaść nawet poniżej $0,1$. Należy zwrócić uwagę, że współczynnik tarcia jest wartością statystyczną pomiędzy szynami i kołami. W przypadku szyny, jest ona narażona w znacznym stopniu na działanie czynników atmosferycznych, w wyniku czego tworzą się warstwy tlenków oraz odkładają się warstwy kurzu i pyłu. Współczynnik tarcia μ można podzielić na cztery przedziały wartości:

- $0 < \mu \leq 0,1$ –warunki bardzo wilgotne- **przedział I**,
- $0,1 < \mu < 0,25$ - warunki wilgotne- **przedział II**,
- $0,25 \leq \mu \leq 0,4$ -warunki suche- **przedział III**,
- $\mu > 0,4$ - warunki bardzo suche, niska wilgotność powietrza- **przedział IV**.

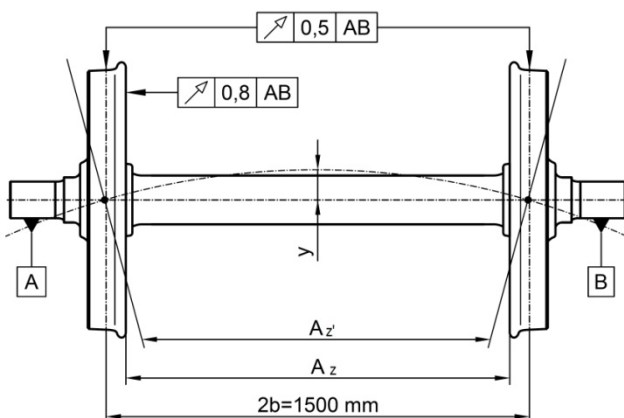
Podział na cztery przedziały wartości uwidacznia jeszcze bardziej, że współczynnik tarcia ma nie tylko wpływ na zużycie koła, ale również na funkcjonowanie pojazdu. Na funkcjonowanie pojazdu związane z wartością współczynnika tarcia, mają takie czynniki jak bezpieczeństwo jazdy w warunkach quasi-statycznych i dynamicznych oraz właściwy rozruch, hamowanie i działanie hamulca postojowego. Bardzo duża wartość współczynnika np. podczas jazdy w warunkach quasi-statycznych oraz przy rozruchu pojazdu szynowego ma negatywny wpływ na trwałość połączenia właczanego pomiędzy podpiąściem osi zestawu kołowego i piastą koła (zmniejsza współczynnik bezpieczeństwa połączenia właczanego pomiędzy piastą koła i podpiąściem osi).

2.2. Wpływ konstrukcji zestawu kołowego i konstrukcji koła

Do czynników wpływających na zużycie ze strony konstrukcji zestawu kołowego oraz kół należy zaliczyć:

- różnicę średnic tocznych kół tego samego zestawu kołowego; im mniejsza różnica średnic zestawu kołowego tym mniejsza wartość stożkowatości ekwiwalentnej (karta

- appropriate rigidity of the wheelset so that the width „A” between the inner rims of the wheels does not exceed 1360 ± 3 mm under the maximum loaded vehicle (Fig. 1); in order to fulfill this condition, the same dimension from the dismantled wheelset from under the vehicle should be 1360^{+2} , while this dimension is valid for wheelsets with the external bearings in accordance with **UIC 510-2 leaflet [17]** and **PN-EN 13260+A1:2011[11]**; it is necessary the appropriate rigidity of the axle made in accordance with the requirements of **PN-EN 13261+A1:2011 [12]** (especially in the middle part [8]) between them to meet this condition,
- use of appropriate types of steel for the wheel, resistant to wear, i.e. **ER6, ER7** in the case of a disc brake and **ER8** or **ER9** in the case of a disc brake (steels according to **PN-EN 13262:2011[13]**); above materials are heat-treated steels with compressive stresses in the rim of the wheel.



Rys.1. Wybrane wymiary konstrukcyjne i odchyłki kształtu zmontowanego zestawu kołowego

Fig.1. Selected construction dimensions and shape deviations of the assembled wheelset

Legenda:/Legend:

A,B - bazy pomiarowe na czopach osi zestawu kołowego/ measurement bases on wheelset axle journals,

A_z - rozstaw powierzchni wewnętrznych wieńców kół na zestawie kołowym w stanie nowym oraz na zdemontowanym zestawie kołowym z pojazdu/ distance of inner surfaces of wheel rims on the wheelset in new condition and on the disassembled wheelset from the vehicle,

A_z' - rozstaw powierzchni wewnętrznych wieńców kół, w zamontowanym na pojeździe załadowanym w stanie brutto; wymiar mierzony w dolnej strefie, w rejonie styku kół zestawu kołowego z szynami/ distance of inner surfaces of wheel rims mounted on the vehicle loaded in the gross condition; dimension measured in the lower zone, in the area of the wheelset's contact with the rails,

2b - rozstaw kregów tocznych/ distance of the rolling treads.

- **UIC 519 [19]** oraz **PN-EN 14363:2016 [15]**) i skłonność kół zestawu do poślizgu; wraz ze zmniejszeniem się różnicy promieni tocznych, pojazd staje się coraz bardziej symetryczny, tzw. kąt asymetrii całej konstrukcji pojazdu „α” zmniejsza się, co pociąga za sobą większą szansę na w miarę równomierny rozkład nacisków pionowych zestawów kołowych w trakcie eksploatacji,
- zarys zewnętrzny wieńca koła zestawu kołowego (profil koła); im bardziej dopasowany do profilu główki szyny, tym zużycie jest mniejsze; dobór zarysu zewnętrznego wieńca koła ma swoją długą historię, która będzie opisana dalej w tekście,
- wartość odchyłek kształtu wieńca koła tzn.: bicie promieniowe powierzchni tocznej oraz wieńców wewnętrznych (rys.1),
- chropowatość powierzchni tocznej wieńca koła oraz obrzeża, oceniana przy pomocy parametrów **R_a, R_z** oraz **R_i**; im mniejsza chropowatość kół (im większa gładkość), tym zużycie powinno być mniejsze (rys.1),
- odpowiednią sztywność zestawu kołowego, tak aby szerokość „A” pomiędzy wewnętrznymi wieńcami kół nie przekraczała pod pojazdem maksymalnie załadowanym 1360 ± 3 mm (rys.1); aby ten warunek był spełniony ten sam wymiar z demontowanego zestawu kołowego spod pojazdu powinien wynosić 1360^{+2} , przy czym wymiar niniejszy obowiązuje dla zewnętrznie ułożyskowanych zestawów kołowych zgodnie z kartą **UIC 510-2 [17]** oraz **PN-EN 13260+A1:2011[11]**; aby ten warunek był spełniony konieczna jest między innymi odpowiednia sztywność osi wykonanej zgodnie z wymaganiami **PN-EN 13261+A1:2011 [12]** (zwłaszcza w części środkowej[8]),
- zastosowanie odpowiednich gatunków stali na koło, odpornych na zużycie tzn. **ER6, ER7** w przypadku hamulca klockowego oraz **ER8** lub **ER9** w przypadku hamulca tarczowego (stałe wg **PN-EN 13262: 2011[13]**); ww. materiały są stalami ulepszanymi cieplnie z naprężeniami ściskającymi w wieńcu koła.

2.3. Inne czynniki decydujące o zużyciu kół

Do innych czynników, decydujących o zużyciu są takie, które są związane z torem kolejowym, a mianowicie:

- trajektoria toru,
- pochylenie profilu główki szyny [**1:20** (profil **DB**), **1:40** (profil **SNCF**) oraz **1:30** (**SJ** koleje szwedzkie)],
- jakość toru, a zwłaszcza wady toru, w postaci regularnych i nieregularnych nierówności pionowych i poprzecznych,

2.3. Other factors determining the wheel wear

Other factors determining wear are those related to the railway track, namely:

- track trajectory,
- rail head profile inclination [**1:20** (**DB** profile), **1:40** (**SNCF** profile) and **1:30** (**SJ** Swedish railways)],
- track quality, especially track defects in the form of regular and irregular vertical and lateral irregularities,
- roughness of rails,
- use of track moistening devices, especially on the curves with a small radius; this treatment reduces the friction coefficient (used on the SBB Swiss railways).

In turn, according to the study [1] the source of consumption are the general factors, which can include:

- rail vehicle,
- technical condition of the vehicle,
- operation,
- track position (routing), which is understood as the condition of the infrastructure (describing the required condition of the track with curves and cant),
- technical condition of track (geometric deviations from the required track condition),
- factors related to climate (ambient temperature, rainfall, frequency and intensity of rainfall, dust, sand, rail icing, etc.).

2.4. Factors limiting wheel wear

Factors affecting the permissible wear of the wheel (or the permissible range of wear) include such as:

- minimum and maximum height of screw coupler and railway buffers,
- deflection of **primary** suspension (freight wagons) or **primary and secondary** suspensions (passenger wagons) or **primary, secondary and third** suspensions (multiple units of high speed),
- reference outline of the kinematic or static gauge,
- wheel strength to vertical and lateral forces as well as friction forces,
- wheel strength to the friction forces caused by the block brake, especially with the **LL** and **L** inserts (instead of **GG** inserts according to **UIC 832** leaflet [20]) and **K**,
- type of used brake (disc or block),
- adjustment range of the brake block stroke adjuster and the value of the brake cylinder stroke,
- the vehicle is not equipped with an anti-slip device,
- riding safety in quasi-static and dynamic conditions,

- chropowatość szyn kolejowych,
- stosowanie urządzeń nawilżających tor, zwłaszcza na łukach o małym promieniu; zabieg ten zmniejsza współczynnik tarcia (stosowany na kolejach szwajcarskich SBB).

Z kolei zgodnie z opracowaniem [1] źródłem zużycia są ogólne czynniki, do których można zaliczyć:

- pojazd szynowy,
- stan techniczny pojazdu,
- eksploatację,
- położenie toru (trasowanie), przez które rozumie się stan infrastruktury (opisujące stan wymagany toru wraz z łukami i przechyłkami),
- stan techniczny toru (odchyłki geometryczne od wymaganego stanu toru),
- czynniki związane z klimatem (temperatura otoczenia, opady deszczu, częstotliwość i intensywność opadów deszczu, pył, piasek, oblodzenie szyn itd.)

2.4. Czynniki ograniczające zużycie koła

Do czynników mających wpływ na dopuszczalne zużycie koła (lub dopuszczalny zakres zużycia) należą między innymi:

- wysokość minimalna oraz maksymalna sprzęgu śrubowego i zderzaków kolejowych,
- ugięcie usprężynowania **I.** stopnia (wagony towarowe) lub **I. i II.** stopnia (wagony osobowe) lub **I., II. i III.** stopnia (zespoły trakcyjne wysokich prędkości),
- zarys odniesienia skrajni kinematycznej lub statycznej,
- wytrzymałość koła na działanie sił pionowych i poprzecznych oraz sił tarcia,
- wytrzymałość koła na działanie sił tarcia, wywoływanych przez hamulec klockowy, zwłaszcza ze wstawką typu **LL** i **L** (zamiast wstawek **GG** wg karty **UIC 832** [20]) oraz **K**,
- rodzaj zastosowanego hamulca (tarczowy lub klockowy),
- zakres regulacji nastawiacza skoku klocków hamulcowych i wartość skoku cylindra hamulcowego,
- brak wyposażenia pojazdu w urządzenie antypoślizgowe,
- bezpieczeństwo jazdy w warunkach quasi-statycznych oraz dynamicznych,
- bezpieczeństwo jazdy przez rozjazdy i skrzyżowania toru (wielkość parametru q_R),
- ograniczenie do niezbędnego minimum wartości mas nieusprężynowanych, bezpośrednio oddziaływujących na tor,
- zdolność przejazdu przez hamulce torowe, które są zainstalowane u podnóża górów rozrządowych (np. wagony towarowe),

- riding safety across turnouts and track crossings (parameter value q_R),
- limiting the values of the non-suspended masses directly affecting the track to the necessary minimum,
- ability to riding over the track brakes that are installed at the foot of humps (e.g. freight wagons),
- compatibility of the entrance step, steps of rail vehicle entrance door with the platform (multiple units of local, regional and high-speed transport and passenger wagons),
- emission of consumption substances (including a worn wheel) to the environment,
- the number of permissible disassemblies of worn wheels and installation of new wheels on the axle seat, which is associated with possible damage to surface of the axle seat and the necessity to turn the diameter to a lower dimension (the limitation here is the limit dimension of the minimum seat diameter),
- emission of noise, vibrations and shocks to the natural environment (especially to residential buildings).

Paradoxically, the steel grades used for the railway rails are also a certain limitation in the scope of steel grades used for monoblock wheels. In the railway industry, the principle was adopted that the steel used for railway rails should have better strength properties and a higher hardness than steel used for railway wheels.

3. Outer outline of the rim of monoblock wheels

The selection of the outline of the outer rim of a wheel (wheel profile) has its 100th. history [3]. In the 1920s years a profile was used consisting of a straight cone with two inclinations of **1:20** respectively and on the outer part of **1:10** with a rounding radius of **15 mm** (between the rolling surface and the rim) and an inclination angle of **60°**.

In turn, in the 1930s it was found that the dynamic properties of wagons intended for higher speeds improve if the inclination is slightly gentler. Thus, the wheel profile with an inclination of **1:40** and **1:20** was used for these wagons (Fig. 2). Careful observation of the wear of passenger wagons, where the wheel profile with inclination of **1:40** and **1:20** was used, gave grounds to draw the conclusion that the increasing difference between the wheel diameters will not be evened out during further riding. Apart this the dynamic properties of the wagons deteriorated due to the indentation in the rolling surface. The expected mileage until the inspection at the repair shop turned out to be shorter than previously assumed. Besides that it was found that the wheelsets mounted on the vehicle had the tendency to one-sided impact, even on a straight track. As a result, the wheel profile was

- kompatybilność stopnia wejściowego, stopni drzwi wejściowych pojazdu szynowego z peronem (zespoły trakcyjne transportu lokalnego, regionalnego oraz wysokich prędkości oraz wagony osobowe),
- emisja substancji zużycia (między innymi zużytego koła) do środowiska naturalnego,
- ilość dopuszczalnych demontażów zużytych kół oraz montażu nowych kół na podpięcie osi, co wiąże się z możliwym uszkodzeniem powierzchni podpięcia osi i konieczności przetoczenia średnicy na niższy wymiar (ograniczeniem jest tutaj wymiar kresowy minimalnej średnicy podpięcia),
- emisja hałasu drgań, wibracji i wstrząsów do środowiska naturalnego (zwłaszcza do budynków mieszkalnych).

Paradoksalnie użyte gatunki stali na szyny kolejowe są też pewnym ograniczeniem w zakresie gatunków użytych stali na koła monoblokowe. W kolejnictwie przyjęto zasadę, że stal użyta na szyny kolejowe powinna mieć lepsze własności wytrzymałościowe i wyższą twardość niż stale użyte na koła kolejowe.

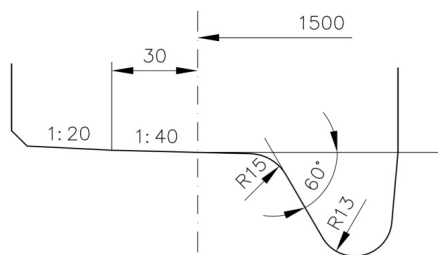
3. Zarys zewnętrzny wieńca kół monoblokowych

Dobór zarysu zewnętrznego wieńca koła (profilu koła) ma swoją 100. historię [3]. W 20 latach XX wieku stosowano profil, składający się z prostego stożka o dwóch pochyleniach odpowiednio **1:20** oraz na zewnętrznej części **1:10**, z promieniem zaokrąglenia **15 mm** (pomiędzy powierzchnią toczną i obrzeżem) oraz kątem pochylenia obrzeża **60°**.

Z kolei w latach 30. XX wieku stwierdzono, że właściwości dynamiczne wagonów przeznaczonych do wyższych prędkości polepszają się, jeśli pochylenie jest nieco łagodniejsze. W ten sposób doszło do zastosowania profilu koła o pochyleniu **1:40** oraz **1:20** dla tych wagonów (rys.2). Dokładna obserwacja zużycia wagonów osobowych, gdzie został zastosowany profil koła o pochyleniu **1:40** oraz **1:20** dała podstawy do wyciągnięcia wniosku, że powiększająca się różnica pomiędzy średnicami kół nie będzie więcej wyrównana w trakcie dalszej jazdy. Oprócz tego pogarszały się właściwości dynamiczne wagonów z powodu wgłębienia na powierzchni tocznej. Przewidywany przebieg aż do przeprowadzenia przeglądu na warsztacie naprawczym okazał się krótszy, niż wcześniej zakładano. Poza tym stwierdzono, że zestawy kołowe zamontowane w pojeździe miały tendencje do jednostronnego nabiegania, nawet na torze prostym. W związku z tym dochodziło do przedwczesnych odtworzeń profilu kół (reprofilacji zarysu zewnętrznego wieńca koła).

Na początku lat 50. XX wieku doszło do wdrożenia profilu wg Heumanna i Lottera dla zespołów trakcyjnych (transport osobowy), który jest przedstawiony na rys.3.

reconstructed prematurely (the outline of the outer rim of the wheel was re-profiled).



Rys.2. Zarys zewnętrzny wieńca koła z pochyleniem powierzchni toczonej 1:40 oraz 1:20 wg [3]

Fig.2. The outer outline of the wheel rim with a rolling surface inclination of 1:40 and 1:20 according to [3]

At the beginning of the 1950s, the profile according to Heumann and Lotter for traction units (passenger transport) was implemented, which is shown in Fig. 3. The important geometric changes that were introduced in this profile consisted in introducing:

- two conical surfaces, i.e. **without a radius** (from the inside) and 1:10 (from the outside),
- recess (transition) between the running surface and the flange with two radii **R=15 mm** and **R=25 mm**, and
- the rim inclination angle $\gamma=70^\circ$, instead of the previously used angle $\gamma=60^\circ$.

This was the first attempt to approach the use of such a profile, which is formed as a result of wear, but is still a profile matched to the wheel-rail friction pair. The introduction of the rim inclination angle from $\gamma=60^\circ$ to $\gamma=70^\circ$ changed in favor of the safety criterion against derailment in accordance with the dependencies:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}\gamma - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg}\gamma} = \frac{\operatorname{tg}60^\circ - 0,36}{1 + 0,36 \cdot \operatorname{tg}60^\circ} = 0,84 \quad (1)$$

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}\gamma - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg}\gamma} = \frac{\operatorname{tg}70^\circ - 0,36}{1 + 0,36 \cdot \operatorname{tg}70^\circ} = 1,20 \quad (2)$$

where:

Y, Q- odpowiednio siła poprzeczna oraz siła pionowa / lateral force and vertical force, respectively,

μ – współczynnik tarcia między obrzeżem koła i główką szyny/ friction coefficient between the flange of the wheel and the rail head.

The increase in the criterion against derailment in the quasi-static riding conditions is valid for both the **DB I** and **DB II** profiles.

Analyzing formulas (1) and (2) it can be found that the smaller the rim inclination angle γ is, the more probability of rail vehicle derailment increases. Thus, with the wear of the flange (in the direction of reducing the inclination angle), the derailment index (Y/Q) reduces.

As a result of this unsatisfactory operating experiences with a running surface profile of 1:40 and 1:20, **DB II** profile was developed, which was later called „worn profile.” This profile was further developed by the

Istotne zmiany geometryczne, które zostały wprowadzone w tym profilu polegały na prowadzeniu:

- dwóch powierzchni stożkowych tzn. **bez promienia** (od strony wewnętrznej) oraz 1:10 (od strony zewnętrznej),
- zastosowanie wgłębienia (przejścia) pomiędzy powierzchnią toczną oraz obrzeżem za pomocą dwóch promieni **R=15 mm** oraz **R=25 mm**,
- wprowadzeniu kąta pochylenia obrzeża $\gamma=70^\circ$, zamiast wcześniej stosowanego kąta $\gamma=60^\circ$.

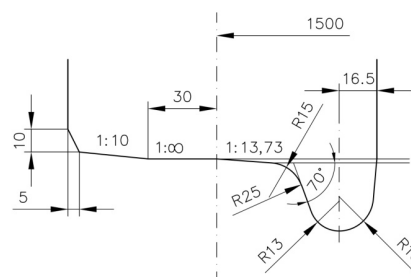
Była to pierwsza próba zbliżenia się do zastosowania takiego profilu, który powstaje w wyniku zużycia, ale dalej jest profilem dopasowanym do pary ciernej kołoszyna. Wprowadzenie kąta pochylenia obrzeża z $\gamma=60^\circ$ na $\gamma=70^\circ$ zmieniło na korzyść kryterium bezpieczeństwa przed wykolejeniem zgodnie z zależnościami:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}\gamma - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg}\gamma} = \frac{\operatorname{tg}60^\circ - 0,36}{1 + 0,36 \cdot \operatorname{tg}60^\circ} = 0,84 \quad (1)$$

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}\gamma - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg}\gamma} = \frac{\operatorname{tg}70^\circ - 0,36}{1 + 0,36 \cdot \operatorname{tg}70^\circ} = 1,20 \quad (2)$$

Zwiększenie kryterium przed wykolejeniem w warunkach jazdy quasistatycznej obowiązuje zarówno dla profilu **DB I** oraz **DB II**.

Analizując wzory (1) oraz (2) można stwierdzić, że im mniejszy kąt pochylenia obrzeża γ , tym bardziej zwiększa się prawdopodobieństwo wykolejenia pojazdu szynowego. Tak więc wraz ze zużyciem obrzeża w kierunku pomniejszenia jego kąta pochylenia obrzeża, działa negatywnie na bezpieczeństwo jazdy, a ściślej zmniejsza wskaźnik wykolejenia (Y/Q).

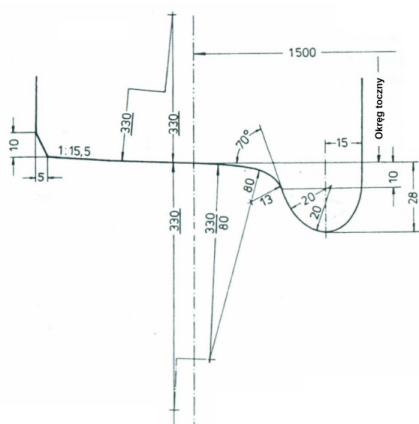


Rys.3. Zarys zewnętrzny wieńca koła o pochyleniu powierzchni toczonej 1:∞ oraz 1:10 wg Heumanna i Lottera (tzw. profil **DB I**) wg [3]

Fig.3. The outer outline of the wheel rim with a running surface inclination of 1:∞ and 1:10 according to Heumann and Lotter (so-called **DB I** profile) according to [3]

W wyniku tych nie zadawalających doświadczeń eksploatacyjnych z profilem powierzchni toczonej 1:40 i 1:20, opracowano profil **DB II**, który później został nazwany „profilem zużyтым.” Profil ten został dalej rozwijany przez kolej niemiecką **DB** oraz inne europejskie zarządy kolejowe i przyjął nazwę profilem **UIC-ORE S1002**. Profil ten został przedstawiony w

German railway **DB** and other European railway authorities and it was called the **UIC-ORE S1002** profile. This profile was presented in the **UIC 510-2 leaflet [17]** and in **PN-EN 13715+A1:2011 [14]** (Fig.4) as a standard one.



Rys.4. Zarys zewnętrzny wieńca koła **DBII (profil DB II)** wg [3]
Fig.4. The outer outline of **DBII** wheel rim (**DB II profile**) according to [3]

4. Wear of the wheel rim outline (profile)

The rim wear of wheel can be divided into the following types:

- profile wear,
- damage to the running surface,
- permanent deformation (rolling),
- non-roundness (non-periodic, e.g. flat places, single delaminations with periodic character e.g. polygonization or waviness of the wheel).

Profile wear always occurs and therefore overlaps with other types of wear. Profile wear can be divided into running surface wear and rim wear. This wear as a continuous loss of material (in macroscopic form) is defined in the literature as “natural wear.” [1]. The definition of the frictional wear rule can be adopted on the basis of the so-called friction work hypothesis.

To determine the volume of wear of the wheel rim material, the following relation can be used:

$$V_V = k \cdot W_R \quad (3)$$

V_V - objętość zużytego materiału [m^3]/ volume of worn material [m^3],

k - współczynnik zużycia [m^3/J]/ worn coefficient [m^3/J],

W_R - praca tarcia [J]/ friction work [J].

The relation (3) describes the so-called “friction work” hypothesis, the main assumption of which is that the volume of wear increases linearly with increasing the friction work.

From the carried out research and development works, it was found that the A_{REF} friction surface remains unchanged, but the height of wear h changes. Therefore, the relation (3) takes the form:

karcie **UIC 510-2 [17]** oraz w **PN-EN 13715+A1:2011 [14]** (rys.4) jako standardowy.

4. Zużycie zarysu wieńca (profilu) koła

Zużycie wieńca koła można podzielić na następujące rodzaje:

- zużycie profilu,
- uszkodzenia na powierzchni tocznej,
- deformacje o charakterze trwałym (rozwalcowanie),
- nieokrągłości (nie mające charakteru okresowego np. płaskie miejsca, pojedyncze rozwarstwienia, mające charakter okresowy np. poligonizacja lub falistość koła).

Zużycie profilu występuje zawsze, a zatem nakłada się z innymi rodzajami zużycia. Zużycie profilu, można podzielić na zużycie powierzchni tocznej oraz zużycie obrzeża. Zużycie to jako ciągła utrata materiału (w formie makroskopowej), jest określana w literaturze jako „zużycie naturalne.” [1]. Określenie reguły zużycia ciernej można przyjąć na podstawie tzw. hipotezy pracy ciernej.

Aby określić objętość zużycia materiału wieńca koła można posłużyć się następującą zależnością:

$$V_V = k \cdot W_R \quad (3)$$

Zależność (3) opisuje tzw. hipotezę „pracy ciernej”, której głównym założeniem jest to, że objętość zużycia rośnie liniowo wraz ze wzrostem pracy ciernej.

Z przeprowadzonych prac badawczo-rozwojowych stwierdzono, że powierzchnia ciera A_{REF} pozostaje niezmienna, natomiast zmienia się wysokość zużycia h . W związku z tym zależność (3) przyjmuje postać:

$$V_V = h \cdot dA_{REF} \quad (4)$$

Wykorzystując zależność (3) wzór (4) przyjmuje postać:

$$h = k \cdot \frac{W_R}{dA_{REF}} \quad (5)$$

Jeśli przyjąć zależność z rys.5, że powierzchnia ubytku materiału powierzchni tocznej koła o promieniu $R_{(R)}$ wskutek zużycia wynosi $A_{REF} = 2 \cdot \pi \cdot R_{(R)} \cdot dy_R$, to wówczas zależność (5) przyjmuje postać następującą:

$$h(y) = k \cdot \frac{W_R(y)}{2 \cdot \pi \cdot R_{(R)} \cdot dy_R} \quad (6)$$

Eksperymenty laboratoryjne pokazują ogólnie, że współczynnik zużycia k nie przyjmuje wartości stałej przy równym stanie tarcia.

Wartość charakteryzuje intensywność pracy tarcia, co jest pokazane na rys.6 i ma bezpośredni związek na intensywność zużycia:

- jeśli współczynnik $P_R/A < 4 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 4 \text{ W/mm}^2$, to wówczas występuje tzw. „łagodne zużycie”,

$$V_V = h \cdot dA_{REF} \quad (4)$$

where:

A_{REF} –powierzchnia zużycia [m^2]/ wear surface [m^2],

h - wysokość zużycia [m]/ wear height [m].

Using the relation (3) the formula (4) takes the form:

$$h = k \cdot \frac{W_R}{dA_{REF}} \quad (5)$$

If we assume the relation from Fig. 5 that the surface of the material loss of the running surface of a wheel with radius R_R due to wear is $A_{REF} = 2 \times \int R_R(y) \cdot dy_R$, then the relation (5) takes the following form:

$$h(y) = k \cdot \frac{W_R(y)}{2 \cdot \pi \cdot R_R \cdot dy_R} \quad (6)$$

where:

R_R - promień toczny koła [m]/rolling radius of wheel [m],

dy_R - przyrost współrzędnej odciętych na powierzchni tocznej koła [m] (rys.5)/increase of abscissa coordinate on the running surface of wheel [m] (Fig.5).

Laboratory experiments generally show that the wear coefficient k does not take a constant value at an equal state of friction.

The value characterizes the work intensity of friction, which is shown in Fig. 6 and it has a direct relation to the wear intensity:

- if coefficient $P_R/A < 4 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 4 \text{ W/mm}^2$, then there is the so-called „mild wear”,
- if coefficient $P_R/A > 4 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 4 \text{ W/mm}^2$, then there is the so-called „violent wear” or „heavy wear.”

„Mild wear” in the wheel-rail system occurs when the phenomenon of trioxidation is dominant, while with „violent wear” is accompanied by the phenomenon of adhesion. Therefore, the transition from „mild wear” to „rapid wear” is accompanied by a change in the wear mechanisms. It can be assumed that in the case of „catastrophic wear” there is a phenomenon of abrasion. It is assumed that within the existing regimes, i.e. mild wear and violent wear, the coefficient k has a constant value.

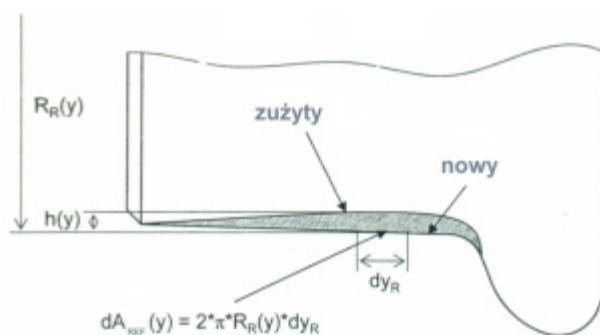
The wear of a monoblock wheel (including for the most frequently met wheel diameter) is divided into two stages:

- wheel wear until the last permissible reprofiling,
- wheel wear after the last until reaching the limit dimensions of wheel.

As it can be seen from Fig.5 the wear of the wheel is not equal in terms of intensity on the entire running surface.

The wear of a monoblock wheel (including for a monoblock wheel with the most frequently met diameter of $\phi 920 \text{ mm}$) is divided into two stages:

- jeśli współczynnik $P_R/A > 4 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 4 \text{ W/mm}^2$, to wówczas występuje tzw. „gwałtowne zużycie lub „intensywne zużycie.”



Rys.5. Wysokość zużycia $h(y)$ i powierzchnia referencyjna (odniesienia) dA_{REF} oraz promień $R_R(y)$ na powierzchni tocznej koła kolejowego

Fig.5. Wear height $h(y)$ and reference surface dA_{REF} and radius $R_R(y)$ on the running surface of a railway wheel

Legenda/ Legend:

dA_{REF} - przyrost referencyjnej powierzchni zużycia koła-szyna/increase of the reference surface of wheel-rail wear

$h(y)$ - głębokość zużycia zależna od współrzędnej „y”/depth of wear depending on the „y” coordinate

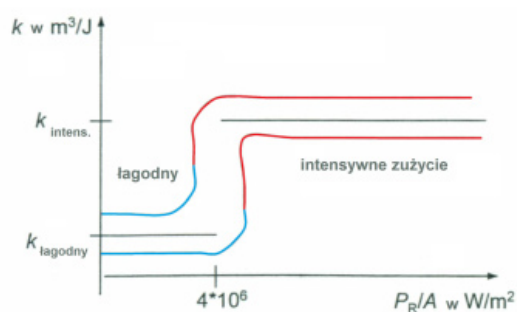
$R_R(y)$ -promień koła/ wheel radius.

„Łagodne zużycie” w układzie koło-szyna występuje wtedy, gdy dominujące jest zjawisko tryooksydacji, podczas gdy przy „gwałtownym zużyciu” towarzyszy zjawisko adhezji. Dlatego też podczas przejścia z „łagodnego zużycia” do „gwałtownego zużycia” towarzyszy zmiana mechanizmów zużycia. Można wyjść z założenia, że w przypadku „katastrofalnego zużycia” występuje zjawisko abrazji. Zakłada się, że w ramach występujących reżimów tzn. zużyciu o charakterze łagodnym oraz zużyciu o charakterze gwałtownym współczynnik k wykazuje stałą wartość.

Zużycie koła monoblokowego (w tym dla najczęściej spotykanej średnicy koła) dzieli się na dwa etapy:

- zużycie koła do ostatniej dopuszczalnej reprofilacji,
- zużycie koła po ostatniej aż do osiągnięcia wymiarów kresowych koła.

Jak widać z rys.5 zużycie koła nie jest równe pod względem intensywności na całej powierzchni tocznej.



Rys.6. Współczynnik „k” w zależności od wskaźnika P_R/A w W/m^2 (reguła zużycia wg hipotezy pracy tarcia)

Fig.6. Coefficient „k” in dependence on P_R/A index in W/m^2 (wear rule according to the friction work hypothesis)

- wheel wear until the last permissible reprofiling,
- wheel wear until the wear groove disappears; in this case both wheels should be rolled from the axle and new wheels should be rolled onto it.

In the first standard wheel with a nominal rolling diameter, the wear of the wheel until the last allowable „reprofiling” is 25 mm on the radius, and until reaching the limit dimension is 4÷6 mm (i.e. 29÷31 mm). Later, as far as necessary to improve the competitiveness of rail transport on the transport market, the consumption reserve was increased even to 40 mm (until the last rolling) and an additional 5 mm after the last rolling. Such a possibility appeared in bogies of freight wagons after using the brake block insert „K”. In the case of increasing the reserve for wear to the above-mentioned values, in order to avoid exceeding the reference profile of the kinematic gauge by the sprung parts, the wear of the wheels of the wheelset should be compensated by inserting adjusting washers, preferably in the fastening place of the primary suspension coil springs. These washers must be removed after replacing worn wheels of wheelsets with new ones.

5. CONCLUSIONS

1. The issue of wheel wear of wheelsets is very complex and depends on many factors. The search for new materials for wheels by various railway institutions will still be valid, and the PN-EN 13262+A2:2011 standard [13] will be updated with time. This issue should always be related to the fact that the second element of the friction pair is the rail. The service life of the rails is very important here and their replacement is becoming more and more expensive. Therefore, the rails are made of steel with higher strength and hardness properties.
2. The important element to increase the life of wheel is certainly the quality of the track. Hence, it can be said that the introduction of new types of repairs, that is “on-time” repairs and repairs based on the forecast of occurring damage based on the collected data is a great progress in the range of extending the service life of both the vehicle and the railway infrastructure.
3. Wheel wear is a very complex and complicated process. This issue requires the detailed analysis. Simplifying, it can be concluded that the smaller wheel-rail or in general track-vehicle system interaction, the lower wear of the wheels should be.

Zużycie koła monoblokowego (w tym dla koła monoblokowego o najczęściej spotykanej średnicy $\phi 920$ mm) dzieli się na dwa etapy:

- zużycie koła do ostatniej dopuszczalnej reprofilacji,
- zużycie koła aż do zniknięcia rowka zużytego; w tym przypadku należy wykonać stłoczenie obydwu kół z osi oraz wtłoczenie nowych kół.

W pierwszym kole standardowym o nominalnej średnicy tocznym zużycie koła do ostatniej dopuszczalnej „reprofilacji” wynosi 25 mm na promieniu, natomiast aż do osiągnięcia wymiaru kresowego wynosi 4÷6 mm (tzn. 29÷31 mm). Później w miarę konieczności polepszenia konkurencyjności transportu kolejowego na rynku przewozowym zapas zużycia zwiększono nawet do 40 mm (do ostatniego przetoczenia) oraz dodatkowo 5 mm po ostatnim przetoczeniu. Możliwość taka pojawiła się w wózkach wagonów towarowych po zastosowaniu wstawki typu „K”. W przypadku zwiększenia zapasu na zużycie do ww. wartości, aby uniknąć przekroczenia zarysu odniesienia skrajni kinematycznej przez części usprężynowane, należy dokonać kompensacji zużycia kół zestawu kołowego przez wstawienie podkładek regulujących, najlepiej w miejsce osadcze sprężyn śrubowych usprężynowania pierwszego stopnia. Podkładki te muszą być zdjęte po wymianie zużytych kół zestawów kołowych na nowe.

5. WNIOSKI

1. Problematyka zużycia kół zestawów kołowych jest bardzo złożona i zależy od wielu czynników. Poszukiwanie nowych materiałów na koła przez różne instytucje zajmujące się kolejnictwem będzie wciąż aktualne, a norma PN-EN 13262+A2:2011 [13] będzie z czasem aktualizowana. Zagadnienie to należy zawsze wiązać z faktem, że drugim elementem pary ciernej jest szyna. Żywotność szyn kolejowych jest tutaj bardzo istotna, a ich wymiana jest coraz bardziej kosztowna. Dlatego też szyny kolejowe są wykonywane ze stali o wyższych własnościach wytrzymałościowych oraz twardości.
2. Istotnym elementem, mającym na celu zwiększenie żywotności koła jest na pewno jakość toru. Stąd można powiedzieć, że wprowadzanie nowych rodzajów napraw czyli napraw typu „on-time” oraz napraw opartych na prognozie występujących uszkodzeń w oparciu o zebrane dane jest dużym postępem w zakresie wydłużenia żywotności, zarówno pojazdu, jak i infrastruktury kolejowej.
3. Zużycie koła jest procesem bardzo złożonym i skomplikowanym. Zagadnienie to wymaga szczegółowej analizy. Upraszczając można wyciągnąć wniosek, że im mniejsze oddziaływanie w układzie koło-szyna lub ogólnie tor-pojazd, tym zużycie kół powinno być mniejsze.

6. BLIOGRAPHY / BIBLIOGRAFIA

- [1] Kämpfer B., Semrad F., Six K. Friedl K. *Verschleiß- und Schädigungserscheinungen an Schienenfahrzeigrädern. ZEVrail Glassers Annalen Nr. 132 .2008*
- [2] Kik W., Mensen R., Moelle D. *Kräfte und Verschleiß in der Wendeschleife und im Abzweig einer Weiche. Eisenbahningenieur. Nr. 4/2003*
- [3] Krugmann H.L.: *Lauf der Schienenfahrzeuge im Gleis. Eine Einführung. R. Oldenburg Verlag München. Wien 1982*
- [4] Sobaś M.: *Zawieszenia i układy biegowe wagonów towarowych. Poznań 2014.*
- [5] Sobaś M.: *Wpływ omaźnicowych zestawów kołowych na bezpieczeństwo eksploatacyjne wagonów towarowych. Pojazdy Szynowe nr 4/2016.*
- [6] Sobaś M.: *Zastosowanie uszczelnień filcowych we współczesnych węzłach układów biegowych pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe nr 1/2018.*
- [7] Sobaś M.: *Stan toru w świetle obowiązujących przepisów, a bezpieczeństwo jazdy wagonów towarowych w wózkach standardowych. Pojazdy Szynowe nr 3/2018*
- [8] Sobaś M.: *Wytyczne do określenia nośności osi zestawów kołowych wagonów towarowych z czopem o wymiarach $\varnothing 120 \times 179$ mm. Pojazdy Szynowe nr 2/2019*
- [9] Sobaś M.: *Analityczne określenie nośności osi zestawów kołowych wagonów towarowych. Pojazdy Szynowe nr 3/2019*
- [10] Sobaś M.: *Określenie ugięcia osi z czopem o wymiarach $\varnothing 120 \times 179$ mm zestawów kołowych wagonów towarowych. Pojazdy Szynowe nr 4/2019*
- [11] PN-EN 12060+A1:2011. *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Zestawy kołowe. Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [12] PN-EN 12061+A1:2011. *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie. Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [13] PN-EN 13262+A2:2011. *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Kola. Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [14] PN-EN 13715+A1:2011. *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Kola. Zewnętrzne zarysy wieńców kół.*
- [15] PN-EN 14363:2016. *Kolejnictwo. Badania i symulacje modelowe właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu. Badania właściwości biegowych i próby stacjonarne.*
- [16] Karta UIC 510-1. *Wagony towarowe. Układ biegowy. Normalizacja. 9.te wydanie z 1.01.78. 14. zmian od 1.01.80 do 1.01.97*
- [17] Karta UIC 510-2. *Pojazdy doczepne. Warunki dla stosowania kół o różnych średnicach w układach biegowych różnego typu. 4.te wydanie. Październik 2002 –kwiecień 2004.*
- [18] Karta UIC 515-0. *Wagony pasażerskie. Wózki-Układy biegowe.2.gie wydanie, kwiecień 2001*
- [19] Karta UIC 519. *Metoda określenia stożkowatości ekwiwalentnej. 1. wydanie grudzień 2004.*
- [20] Karta UIC 832. *Warunki techniczne dostawy wstawek klocków hamulcowych z żeliwa fosforowego dla pojazdów trakcyjnych i wagonów. Sierpień 2015.*

Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 1)

Napędy trakcyjne pojazdów szynowych zasilane wodorem (cz. 1)

The paper presents the reasons for launching the efforts aimed at implementing the low-emission rail vehicles. A short history of development of the hydrogen-powered drive solutions is described. It has been pointed out that implementation of hydrogen-powered rail vehicles results in simultaneous development of production and distribution of this fuel. The qualities of new energy sources suitable for use in the rail vehicles are depicted, while further part of the paper presents the rail vehicles already implemented in the world. Another part of the article pertains to domestically undertaken measures related to hydrogen propulsion. Due to topicality of the National Reconstruction Plan, the excerpts from its provisions related to hydrogen production and modern rail transport have been mentioned. The following chapter is devoted to economic aspects, while the last one to measurable environmental benefits resulting from the use of the hydrogen traction. Another part of the paper will be published in the next issue of the Rail Vehicles.

W artykule przedstawiono powody uruchomienia działań mających na celu wdrożenie niskoemisyjnych pojazdów szynowych. Opisano krótką historię rozwoju napędów zasilanych wodorem. Zwrócono uwagę, że wdrożenie do eksploatacji pojazdów szynowych zasilanych wodorem wiąże się z równoczesnym rozwojem produkcji i dystrybucji tego paliwa. Zostały opisane cechy nowych źródeł energii do stosowania w pojazdach szynowych, a w kolejnej części artykułu zaprezentowano pojazdy szynowe wdrożone na świecie. Następną część artykułu dotyczy podjętych w kraju działań związanych z napędami wodorowymi. Ze względu na aktualność tematu Krajowego Planu Odbudowy przytoczone zostały fragmenty jego zapisów dotyczące produkcji wodoru i nowoczesnego transportu szynowego. Dalszy rozdział został poświęcony aspektom ekonomicznym, a ostatni wymiernym korzyściom dla środowiska z zastosowania napędów trakcyjnych zasilanych wodorem.

Drużga część artykułu zostanie opublikowana w następnym numerze Pojazdów Szynowych.

1. Introduction

One of the main objectives of the European Union's policy consists in protecting the environment, minimizing the risk to human health and climate, and to preserving the biodiversity. Thanks to the European Green Deal, Europe is to become the first climate-neutral continent, largely due to the use of cleaner energy sources and technologies [8], [9].

The search for less energy-consuming and low-emission transport systems, especially in agglomerations, becomes a serious challenge for the people responsible for civilization development of the country, acting at any state of the management level. Such the undertakings should be based on responsible analyses of the current situation and the conditions achievable in the future.

The COP 54 Conference (The Conference of Parties 25) in Madrid (December 2–13, 2019) confirmed importance of the subject of the climate change and indicated enormous threat to our planet in the case of the

1. Wstęp

Jednym z głównych celów polityki Unii Europejskiej jest ochrona środowiska naturalnego i zminimalizowanie zagrożeń dla zdrowia ludzi i dla klimatu oraz zachowanie różnorodności biologicznej. Europa za sprawą Europejskiego Zielonego Ładu ma stać się pierwszym kontynentem neutralnym dla klimatu, w dużej mierze dzięki bardziej ekologicznym źródłom energii i technologiom [8], [9].

Poszukiwanie mniej energochłonnych i niskoemisyjnych systemów transportowych, szczególnie w aglomeracjach, staje się poważnym wyzwaniem dla ludzi odpowiedzialnych za rozwój cywilizacyjny kraju, na każdym szczeblu zarządzania państwem. Podstawą do takich działań powinny być odpowiedzialnie przeprowadzone analizy sytuacji obecnej i możliwej do uzyskania w przyszłości.

Konferencja COP 54 (Conference of Parties 25) w Madrycie (2–13 grudnia 2019) potwierdziła ważność tematu zmian klimatycznych i wskazała na olbrzymie

lack of much more intense action than before [5].

The use of the transport means, inclusive of the rail ones, also adversely affects the environment condition. This is the result of CO₂ emission to the atmosphere, the noise generated by the rail vehicles and contamination caused by the dust from brake blocks and discs, as well as leaking oil and grease.

The difficult situation in the field of environmental protection contributed to the launch of development works on new energy sources and new rail vehicle drives, including the hydrogen-powered ones.

As early as in 1807, the Swiss designer Isaac de Rivaz built the first hydrogen-powered wheeled vehicle. The de Rivaz engine was one of the first internal combustion engines [25].

Over 40 years ago, TVP aired the "Sonda" program held by Kamiński and Kurek who have presented a project of a hydrogen-powered car. It was an electrically powered car, in which the electric power is generated on an ongoing basis by the fuel cells supplied with previously refueled hydrogen. Twenty five years later James May leading the Top Gear - the British entertainment program - presented a prototype hydrogen vehicle of GM, claiming that in 10-20 years such cars will become available [4].

The term "hydrail" was first used on August 22, 2003 at a speech in the Volpe National Transportation Systems Center of the U.S. Department of Transportation in Cambridge. Stan Thompson from AT&T then gave a presentation entitled "*Mooreville Hydrail Initiative*".

Since 2005, the International Hydrail Conferences are held annually by Appalachian State University and Mooreville South Iredell Chamber of Commerce, in collaboration with universities and other entities. They are aimed to bring together the scientists, engineers, and business leaders, industry experts and operators engaged in this technology or using it, with a view to discuss and exchange the knowledge, thus accelerating implementation of the hydrogen solutions, with a view to improve the environment condition, climate, energy security and overall economic development.

In the beginning the hydrogen fuel cells technology was best known and widespread in Japan and California, nevertheless, recently the investments undertaken in Germany predominate [23].

2. Premises for implementation of new power supply systems to the railway vehicles traction

Potential advantages for the environment resulting from using the FCH (Fuel Cell Hydrogen) consist, first of all, in the lack of the exhaust pollutants emission, caused by the transport means and in reduction in the noise emission [17].

Vehicles referred to as "hydrail" usually falling under hybrid vehicles, are provided with renewable energy storage, as for example batteries or supercapacitors, and with regenerative braking. Possible applications

zagrożenie dla naszej planety w sytuacji braku działań znacznie intensywniejszych niż dotychczasowe [5].

Eksploracja środków transportu, w tym szynowego, wpływa także negatywnie na stan środowiska. Jest to wynik emisji CO₂ do atmosfery, generowania hałasu przez pojazdy szynowe oraz zanieczyszczania terenu pyłem z klocków i tarcz hamulcowych, wycieku oleju i smarów.

Trudna sytuacja w zakresie ochrony środowiska spowodowała uruchomienie prac rozwojowych nad nowymi źródłami energii i nowymi napędami do pojazdów szynowych, w tym zasilanych paliwem wodorowym.

Już w 1807 r. szwajcarski konstruktor Isaac de Rivaz zbudował pierwszy pojazd kołowy napędzany silnikiem wodorowym. Silnik de Rivaza był jednym z pierwszych silników o spalaniu wewnętrznym [25].

Ponad 40 lat temu TVP wyemitowała program „Sonda”, w którym redaktorzy Kamiński i Kurek prezentowali widzom projekt samochodu na wodór, czyli auta o napędzie elektrycznym, w którym energia elektryczna wytwarzana jest na bieżąco w ogniach paliwowych z zatankowanego uprzednio wodoru, a 25 lat później w brytyjskim programie rozrywkowo-motoryzacyjnym Top Gear prowadzący James May prezentował prototypowy pojazd wodorowy koncernu GM twierdząc, że za 10-20 lat takie samochody będą dostępne dla kierowców [4].

Termin "**kolej wodorowa**" (*hydrail*) został po raz pierwszy użyty 22 sierpnia 2003 r. w trakcie prezentacji w Centrum Systemów Transportowych Volpe Departamentu Transportu USA w Cambridge. Stan Thompson z firmy AT&T wygłosił wówczas prezentację "*Mooreville Hydrail Initiative*".

Od 2005 r. odbywają się coroczne Międzynarodowe Konferencje na temat Hydrail (*International Hydrail Conference*), organizowane przez Appalachian State University oraz Mooreville South Iredell Chamber of Commerce, we współpracy z uniwersytetami i innymi podmiotami. Mają one na celu gromadzenie naukowców, inżynierów, liderów biznesu, ekspertów przemysłowych i operatorów pracujących z tą technologią lub korzystających z niej, w celu wymiany wiedzy i dyskusji prowadzących do przyspieszenia wdrażania wodorowych rozwiązań, pod kątem ochrony środowiska, klimatu, bezpieczeństwa energetycznego i ogólnego rozwoju gospodarczego.

Początkowo technologia wodorowych ogni paliwowych najbardziej znana i rozpowszechniona była w Japonii oraz w Kalifornii, jednak ostatnio głośniejsze jest o związanych z nią inwestycjach podejmowanych w Niemczech [23].

2. Przesłanki wdrażania nowych systemów zasilania napędów trakcyjnych w pojazdach kolejowych

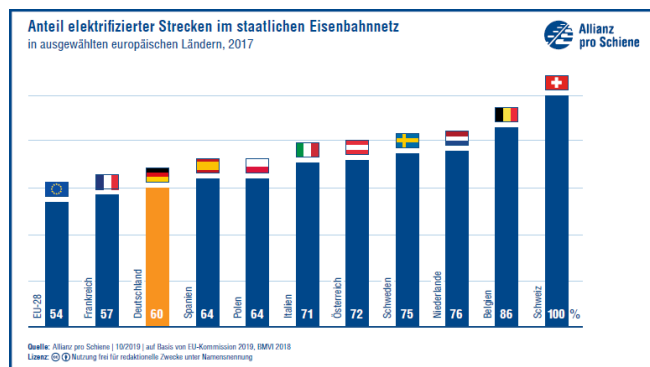
of the hydrail system include all types of the rail transport, i.e. suburban and passenger rail, freight rail, light rail, high speed transit railway, mine rail, industrial rail systems, trams and special park and museum railway lines [13].

Railway is the most ecological form of transportation in the European Union. In 2018, it emitted only 0.5% of greenhouse gases generated by the entire transport sector. Thanks to hydrogen-powered trains, the emission may be reduced virtually to zero. Hydrogen is one of the power-efficient fuels. It is burnt without greenhouse gases emission and, therefore, is considered to be zero emission [19]. The tests carried out by the Polytechnic University of Bari, consisting in simulated driving cycle of a hydrogen-powered train on the route equivalent to the existing rebuilt line section of the length of 23.6 km in the suburban area of the city of L'Aquila, allow to draw the following conclusions:

- zero-emission driving cycles can be attained using no electrochemical batteries for the traction purposes;
- operation of a light hydrogen-powered train enables to save 20.31 gCO₂/passenger-km compared to the diesel train [3].

In case of the distance from 400 to 800 km, the hydrogen-powered trains provide a reasonable solution allowing to reduce local emission at no high cost incurred for track electrification [20].

For understandable reasons, the hydrogen fueled vehicles should be operated firstly at non-electrified lines. In order to assess the share of non-electrified lines in the Polish rail transport system this parameter should be compared to the ones determined in other European countries. The share of electrified lines is shown in Fig. 1 [6]. According to the Allianz pro Schiene data, the average value of this share in the European Union amounts to 54%, while in Poland, placed at the upper part of this list, it amounts to 64%. Such a large share of non-electrified lines is still conducive to widespread use of the diesel vehicles.



Rys.1. Procentowy udział linii zelektryfikowanych w krajach europejskich

Fig. 1. Percentage share of electrified lines in European countries

Potencjalne korzyści dla środowiska dzięki stosowaniu technologii wodorowej FCH (*Fuel Cell Hydrogen* - wodorowe ogniwa paliwowe) to przede wszystkim brak emisji substancji zanieczyszczających spalin bezpośrednio ze środków transportu oraz zmniejszenie emisji hałasu [17].

Pojazdy określane jako „hydrail” to zazwyczaj pojazdy hybrydowe z magazynem energii odnawialnej, na przykład w akumulatorach lub superkondensatorach i z hamowaniem odzyskowym. Potencjalne zastosowania systemu hydrail obejmują wszystkie rodzaje transportu szynowego: kolej podmiejską, kolej pasażerską, kolej towarową, lekką kolej, szybki tranzyt kolejowy, koleje kopalniane, przemysłowe systemy kolejowe, tramwaje oraz specjalne kolejki w parkach i muzeach [13].

Kolej jest najbardziej ekologiczną formą transportu w Unii Europejskiej. W 2018 roku odpowiadała za emisję jedynie 0,5% gazów cieplarnianych generowanych przez cały sektor transportu. Dzięki pociągom z napędem wodorowym emisja może być praktycznie zerowa. Wodór należy do paliw wydajnych energetycznie, a jego spalanie nie emituje gazów cieplarnianych i dlatego uznawane jest jako zero emisyjne [19].

Z badań przeprowadzonych metodą symulacji jazdy pociągiem wodorowym w cyklu jazdy na trasie odpowiadającej przekonstruowanej istniejącej sekcji linii o długości 23,6 km w obszarze podmiejskim miasta L'Aquila wykonanych przez Politechnikę w Bari, wynikają następujące wnioski:

- można uzyskać cykle jazdy z zerową emisją bez użycia baterii elektrochemicznych dla potrzeb trakcji
- stosowanie lekkiego pociągu zasilanego wodorem pozwala zaoszczędzić 20,31 g CO₂ / pasażero-km w porównaniu do pociągu spalinowego [3].

Na dystansach od 400 do 800 km pociągi napędzane wodorem są inteligentnym rozwiązaniem ograniczającym lokalne emisje bez ponoszenia wysokich kosztów elektryfikacji torów” [20].

Pojazdy z napędem zasilanym paliwem wodorowym ze zrozumiałych względów będą w pierwszej kolejności eksploatowane na liniach niezelektryfikowanych. Dla oceny udziału linii niezelektryfikowanych systemie transportu kolejowego w Polsce należy odnieść ten parametr do innych krajów europejskich. Przedstawia to wykres udziału linii zelektryfikowanych na poniższym rys. 1 [6]. Według danych Allianz pro Schiene wartość średnia w Unii Europejskiej to 54%, a w Polsce, która znajduje się w czołówce tej listy, 64%. Tak duży udział linii niezelektryfikowanych jest powodem powszechnego jeszcze stosowania pojazdów spalinowych.

According to the Annual Report of the PKP Group for 2018, the number of traction rolling stock, including the diesel units, was as follows:

- The PKP CARGO Group had 2352 locomotives, including 1286 diesel ones;
- The PKP IC Company owned 363 locomotives (inclusive of seven diesel locomotives rented from the Czech Republic), 74 electric multiple units (20 ED250, 20 ED160, 20 ED161 and 14 ED74), 2114 passenger carriages;
- The PKP LHS Company operated 77 diesel locomotives;
- PKP SKM Group had 13 diesel multiple units, nevertheless, from December 9, 2018, their number was restricted to 10 units.

Entire number of the diesel multiple units operated by domestic carriers amounts to 244. According to Statistics Poland 2149 diesel locomotives were in operation in Poland at the end of 2019, while total number of the manufactured ones was equal to 4152.

According to PKP LHS, the average age of line diesel locomotives is 39 years, while in case of shunters it is 42 years. The average age of diesel locomotives used by Polish passenger traffic operators is also increasing, reaching 41.7 years at the end of 2018.

It should be noted that, both in the case of diesel and electric locomotives, the scope of modernizations and purchases forecasted by state and regional carriers will not significantly affect the average age of the rolling stock [6].

3. Characteristics of new energy sources for use in the rail traction vehicles

It should be noticed that safety level of the hydrogen transport means as compared to conventional ones is similar. It should also be highlighted that the refueling duration of the fuel cell electric vehicles at a pressure of 700 bar is practically the same as in the case of usual passenger cars powered by combustion engines, while in the case of buses, e.g. city buses, it amounts approximately to 15-20 minutes. The FCH trains are distinguished by relatively fast refueling, lasting below 20 minutes, that allows to run for 18 hours. Analyses made for the European market have shown that the FCH trains could reach an 11% share by 2030 in case of a so-called low scenario, up to 20% by 2030 in the basic scenario and up to 40% by 2030 in the high scenario [17].

What concerns the hydrogen ratios of calorific value and heat of combustion to mass, they are the highest among fuels. Nevertheless, due to very low density of hydrogen, these ratios are unfavorable as compared to other fuels, when related to volume. Therefore, hydrogen is well suited to the vehicles where mass plays more important role than volume, such as rockets or spacecrafts. These comparison is shown in Table 1 [25].

Według Raportu Roczno Grupy PKP za 2018 r. stan liczbowy taboru trakcyjnego, w tym spalinowego, był następujący:

- Grupa PKP CARGO posiadała 2.352 lokomotywy, w tym 1.286 lokomotyw spalinowych
- Spółka PKP IC roku posiadała 363 lokomotywy (w tym siedem lokomotyw spalinowych wynajętych z kolei ČD), 74 elektryczne zespoły trakcyjne (20 szt. ED250, 20 szt. ED160, 20 szt. ED161 oraz 14 szt. ED74), 2 114 wagonów pasażerskich
- Spółka PKP LHS posiadała 77 lokomotyw spalinowych
- PKP SKM miała na stanie 13 spalinowych zespołów trakcyjnych, jednak od 9 grudnia 2018 roku ich liczba została ograniczona do 10 szt.

Łącznie krajowi przewoźnicy dysponowali 244 spalinowymi zespołami trakcyjnymi. Według GUS pod koniec 2019 r. w Polsce było 2.149 czynnych lokomotyw spalinowych, a łącznie wyprodukowano ich 4.152.

Według danych PKP LHS, średni wiek liniowych lokomotyw spalinowych wynosi 39 lat, natomiast manewrowych 42 lata. Także średni wiek spalinowych lokomotyw używanych przez operatorów przewozów pasażerskich w Polsce rośnie i na koniec 2018 roku wynosił 41,7 lat.

Warto podkreślić, że zarówno w przypadku lokomotyw spalinowych jak i elektrycznych, zakres planowanych modernizacji i zakupów przez przewoźników państwowych i regionalnych nie będzie miał dużego znaczenia dla średniego wieku taboru [6].

3. Charakterystyka nowych źródeł energii do zastosowania w kolejowych pojazdach trakcyjnych

Wart odnotowania jest fakt, że poziom bezpieczeństwa wodorowych środków transportu ze stosowanymi konwencjonalnie jest porównywalny. Podkreślenia wymaga również fakt, że czas tankowania elektrycznych samochodów z ogniwami paliwowymi (FCEV - *Fuel Cell Electric Vehicle*) przy ciśnieniu 700 bar, jest praktycznie taki sam jak konwencjonalnych samochodów osobowych napędzanych silnikami spalinowymi i ok. 15÷20 minutowy w przypadku autobusów np. miejskich. Pociągi FCH charakteryzują się relatywnie szybkim napełnianiem wynikającym z czasu krótszego niż 20 min i mogą pracować przez 18 godz. na jednym tankowaniu. Analizy rynku europejskiego ujawniły, że pociągi FCH mogłyby mieć 11 % udziału do 2030 r. wg tzw. scenariusza niskiego, do 20% do 2030 r. wg scenariusza podstawowego i do 40% do 2030 r. w scenariuszu wysokim [17].

Wodór ma w odniesieniu do masy największą wśród paliw wartość opałową i ciepło spalania. Ze względu na bardzo małą gęstość wodoru niekorzystnie prezentuje się na tle innych paliw, jeżeli wartości te zostaną odniesione do objętości. Z tego powodu wodor

4. Implementation of hydrogen-powered rail traction vehicles in the world

The need for new investments related to building a network of hydrogen refueling stations poses an important challenge. A certain lack of up-to-date knowledge related to modern hydrogen technology may be

observed. One should take into consideration a greater energy efficiency of hydrogen as compared to fossil fuels, nevertheless, being lower than that of advanced technological fuel cells, e.g. of electric vehicles. Moreover, the purchase price still remains high. The Directive 2014/94/EU on the development of alternative fuels infrastructure includes recommendations on construction of the hydrogen refueling infrastructure by EU Member States, primarily along the TEN-T Corridors [7].

Porównanie właściwości paliw Comparison of fuel properties

Tabl. 1

Parametr	Benzyna	Metan	Propan	Wodór
Ciepło parowania, kJ/kg	302	577	388	444
Wartość opałowa, MJ/kg	44,4	50,0	46,4	120,0
Ciepło spalania, MJ/kg	46,7	55,5	48,9	141,9
Temperatura samozapłonu, °C	222	534	466	585

observed. One should take into consideration a greater energy efficiency of hydrogen as compared to fossil fuels, nevertheless, being lower than that of advanced technological fuel cells, e.g. of electric vehicles. Moreover, the purchase price still remains high. The Directive 2014/94/EU on the development of alternative fuels infrastructure includes recommendations on construction of the hydrogen refueling infrastructure by EU Member States, primarily along the TEN-T Corridors [7].

Such an infrastructure of the hydrogen refueling stations is already under construction in several countries, among others in Germany, France, Great Britain, Scandinavian countries, USA, Japan and South Korea. As of the end of 2017, already 378 hydrogen refueling stations were operative in the world for motor vehicles and several ones intended for railway transport means. The problem that needs to be solved with a view to make implementation of hydrogen cells in rail transport more effective resolves itself to quick launch of a reasonable, safe and easily accessible hydrogen filling system designed for rail vehicles at their service points.

In 2018, a successful study of the FCH idea was carried out. In result two hydrogen-powered trains were put in operation on an approximately 100 km route in Lower Saxony, Germany. It is planned to increase their number to 14 by 2021.

Toyota recently declared a partnership with the Japanese Eastern Railways in order to develop hydrogen trains in Japan.

A few selected examples presented below show a brief history of hydrogen technology development in rail transport:

- In 2002, a hydrogen-powered mine locomotive was demonstrated in Val-d'Or (Quebec - Canada).
- In 2006, the world's first hydrogen wagon was developed by the East Japan Railway Company.
- In 2007, a mini hydrogen train was designed at the Taiwan National Science and Technology center.

4. Wdrożenia szynowych pojazdów trakcyjnych zasilanych wodorem na świecie

Konieczność nowych inwestycji związanych z budową sieci stacji tankowania wodoru stanowi istotne wyzwanie. Zauważalny jest pewien brak zaktualizowanej wiedzy na temat nowoczesnej technologii wodorowej. Trzeba też zwrócić uwagę na większą efektywność energetyczną wodoru niż paliw kopalnych, ale mniejszą niż zaawansowanych technologicznie ogniwi paliwowych w przypadku np. pojazdów elektrycznych (EV – *Electric Vehicles*) oraz na wysoką jeszcze cenę ich zakupu. Dyrektywa 2014/94/UE w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych zawiera zalecenia dotyczące budowy infrastruktury tankowania wodoru przez kraje członkowskie UE, przede wszystkim wzdłuż korytarzy TEN-T [7].

Taka infrastruktura stacji tankowania wodoru budowana jest już w kilku krajach, m.in. w Niemczech, Francji, Wielkiej Brytanii, krajach skandynawskich, USA, Japonii i Korei Płd. Według stanu na koniec 2017 r. na świecie funkcjonowało już 378 stacji tankowania wodoru (HRS - *Hydrogen Refuelling Station*), dla pojazdów samochodowych i kilka bezpośrednio dla środków transportu kolejowego.

Problemem, który należy rozwiązać dla efektywniejszego wdrażania ogniwi wodorowych w transporcie szynowym, jest szybkie uruchomienie racjonalnego, bezpiecznego i łatwo dostępnego systemu napełniania wodorem zbiorników pojazdów szynowych w punktach ich obsługi technicznej.

W roku 2018 przeprowadzono udane badanie pomysłu FCH i wprowadzono dwa pociągi na około 100 km trasie w Dolnej Saksonii w Niemczech i planuje się zwiększenie ich liczby do 14 pociągów do 2021 r.

Toyota ostatnio ogłosiła partnerstwo z Japońskimi Kolejami Wschodnimi dla rozwijania pociągów wodorowych w Japonii.

Kilka wybranych przykładów przedstawia poniżej skróconą historię rozwoju technologii wodorowej w transporcie kolejowym:

- In 2010, the University of Southwest Jiaotong in China presented a prototype of its first hydrogen train.
- In 2012 an attempt was made in Denmark (Hydrogen Train Project) to build the first European train using hydrogen as a fuel of an internal combustion engine.
- In 2012, the University of Birmingham introduced a novel hydrogen mini train.
- In September 2018, the world's first zero-emission commercial passenger train was put into service in Lower Saxony.
- In November 2019, the first train provided with hydrogen fuel cells, to be operated in the USA, was ordered from the Stadler Railfor Factory (Switzerland) intended for the future Arrowrail line between Redlands and San Bernardino, California.
- w 2002 r. w Val-d'Or (Quebec – Kanada) została zademonstrowana lokomotywa kopalniana zasilana wodorem
- w 2006 r. pierwszy na świecie wodorowy wagon został opracowany przez East Japan Railway Company
- w 2007 r. powstał mini pociąg wodorowy w ośrodku Taiwan National Science and Technology
- w 2010 r. Uniwersytet Southwest Jiaotong w Chinach zademonstrował prototyp swojego pierwszego pociągu wodorowego
- w 2012 r. w Danii (Hydrogen Train Project) podjęto próbę budowy pierwszego europejskiego pociągu zasilanego wodorem z zastosowaniem wodoru w silniku spalinowym z wewnętrznym spalaniem
- w 2012 r. Uniwersytet w Birmingham przedstawił pionierski mini pociąg wodorowy
- w 2018 r. we wrześniu wszedł do eksploatacji w Dolnej Saksonii pierwszy na świecie komercyjny pociąg pasażerski zasilany wodorem, które nie emitują dwutlenku węgla
- w 2019 r. w listopadzie został zamówiony w fabryce Stadler Railfor (Szwajcaria) pierwszy dla USA pociąg z wodorowymi ogniwami paliwowymi dla przyszłej linii Arrowrail między Redlands i San Bernardino w Kalifornii.

Rhein-Main Transport (Germany) in May 2019 ordered 27 units for the northern lines in Frankfurt, that are currently served by diesel traction. In the UK a gradual withdrawal of all diesel trains by 2040 was declared in 2018.

Moreover, SNCF in France, commissioned in Alstom construction of the first hydrogen multiple unit designed for the Auxerre and Auvergne-Rhone-Alps lines. It is intended to be fitted with 200 kW fuel cells from Ballard, currently used in the Mireo units.

The number of the examples of implementation of the hydrogen-powered trains in Europe is constantly growing.

In Romania an interesting hydrogen train intended to operate on the line from Otopeni airport to the Bucharest centre was presented [17].

A few years ago, Alstom's hydrogen-powered locomotives began trial operation of the route Cuxhaven – Buxtehude. The North Sea routes will be served by 14 Alstom Coradia iLint hydrogen rail buses, belonging to the Lower Saxony EVB railways. Moreover, in 2022 27 hydrogen-powered rail buses will be used by the local government company HLB Railways in Hesse, operating them on the lines around Frankfurt am Main and Wiesbaden. [27].

The train, referred to as Coradia iLint, was built at the Alstom plant in Salzgitter, Germany. It runs with the speed up to 140 km/h. A single refueling is sufficient for a whole working day. Its full autonomy allows to cover a distance of 1,000 km. The train is refueled at a mobile hydrogen refueling station, located just next to the tracks. A stationary refueling station will be launched in 2021 at which time Alstom will supply the German LNVG Railway Office with another fourteen Coradia iLint trains.

News also emerged that Alstom will produce another 27 hydrogen trains for the RMV Association, intended to operate in the Rhine-Main region as part of a long-term infrastructure project to be launched in 2022.

Rhein-Main Transport w Niemczech w maju 2019 r. zamówił 27 jednostek dla północnych linii Frankfurtu, obecnie obsługiwanych pojazdami spalinowymi. UK zapowiedziało w 2018 r. stopniowe wycofywanie wszystkich pociągów spalinowych do 2040 r.

Ponadto we Francji rozpoczęto na zamówienie SNCF w firmie Alstom budowę pierwszego wodorowego zespołu trakcyjnego dla linii regionu Auxerre i Auvergne-Rhone-Alps. Wykorzystano stosowane w jednostkach Mireo ogniwa paliwowe 200 kW z firmy Ballard.

Przykładów wdrażania pociągów z napędem zasilanym wodorem w Europie jest coraz więcej.

Rumunia pokazała interesujący pociąg wodorowy dla linii z lotniska Otopeni do centrum Bukaresztu [17].

Kilka lat temu zasilane wodorem lokomotywy firmy Alstom zaczęły pilotażowo kursować na trasie między Cuxhaven a Buxtehude. Na trasy położone nad Morzem Północnym wjedzie 14 wodorowych autobusów szynowych Alstom Coradia iLint i będą nimi dysponowały koleje EVB należące do Dolnej Saksonii. Natomiast w 2022 r. autobusy szynowe zasilane wodorem (27 pojazdów) zaczną wykorzystywać samorządowa spółka Koleje HLB w Hesji, obsługując nimi linie wokół Frankfurtu nad Menem i Wiesbaden [27].

Pociąg o nazwie Coradia iLint zbudowany został w zakładach Alstom w Salzgitter w Niemczech. Osiąga prędkość 140 km/h, a jedno tankowanie wystarcza na cały dzień pracy. Dzięki pełnej autonomii może poko-

The contract for the supply and maintenance of the trains provided with the cells accounts for € 500 million for a period of 25 years. Infraser GmbH & Co Höchst KG will be liable for hydrogen supplies. A hydrogen refueling installation is to be established in Höchst near Frankfurt am Main. The German Federal Government shall support financing of the station construction and 40% of the hydrogen purchase.

The train referred to as Vittal-One, developed by Talgo, will serve as a basis for implementation of the hydrogen technology in the southwest of Iberia. The Hexagon Purus Company was chosen to provide the high-pressure cylinders for the prototype train.

Another example is the Mireo Plus H train, consisting of two passenger carriages. It will be powered by a battery and fuel cells that generate electric power from hydrogen and oxygen. The train will enable travelling at a distance of 600 kilometers (373 miles). Moreover, Siemens also declared developing a three-carriage version with a range of up to 1,000 kilometers (621 miles) [14].

There are still more than 10,000 diesel trains in service in Europe. Some of them are planned to be replaced within the next 15 years [20].

In 2010, the fuel cells and the devices designed for hydrogen production were used by several transport operators in a number of countries, such as China, Germany, Japan, Taiwan, the United Kingdom and the United States. Many of these technologies, suitable for use in the hydrail vehicles, may also be applied to other transport means, as e.g. road vehicles. This shall be conducive to more dynamic development of these technologies [13].

British Railways will endeavour to achieve zero CO₂ emission in rail transport by 2040. This goal should be facilitated by cooperation with the manufacturer of new hydrogen-fueled vehicles. They are to be put into operation from 2022 [19].

According to Jastrzębska Spółka Węglowa (JSW), there are already hundreds hydrogen stations all over the world, approximately 150 of which in Europe. However, there is not a single station in Poland so far, while the first ones are to be built by Grupa Lotos in Warsaw and Gdańsk by the end of 2021 within the framework of the already inaugurated Pure H2 project [15].

Figure 2 presents the architecture of a novel light hybrid vehicle provided with two motor carriages and a trailer. Each motor carriage is equipped with an electric traction motor powered by a hybrid power unit consisting of a hydrogen cell connected to the flywheel energy storage system, used when no driving force is needed or in order to recover the energy while braking [3].

nać 1.000 km. Tankowanie odbywa się na mobilnej stacji tankowania wodoru, która znajduje się tuż obok torów, a stacjonarna stacja tankowania zostanie uruchomiona w 2021 roku i wtedy też Alstom dostarczy kolejne czternaście pociągów Coradia iLint do niemieckiego urzędu kolejowego LNVG.

Pojawiły się też doniesienia, że Alstom wyprodukuje następnych 27 pociągów wodorowych dla operatora RMV, które będą poruszały się w regionie Ren-Men w ramach długofalowego projektu infrastrukturalnego, który ruszy w 2022 r.

Umowa na dostawę i utrzymanie pociągów z ogniwami opiewa na 500 mln € przez okres 25 lat. Za dostawę wodoru odpowiedzialna będzie firma Infraser GmbH & Co Höchst KG. W Höchst pod Frankfurt nad Menem ustawiona zostanie instalacja tankowania wodoru. Wsparcia udzieli rząd federalny Niemiec dofinansując budowę stacji i w 40% zakup wodoru.

Pociąg opracowany przez producenta Talgo i nazwany Vittal-One posłuży jako plan wdrożenia technologii wodorowych na południowym zachodzie Iberii. Jako dostawca wysokociśnieniowych butli do prototypowego pociągu została wybrana firma Hexagon Purus.

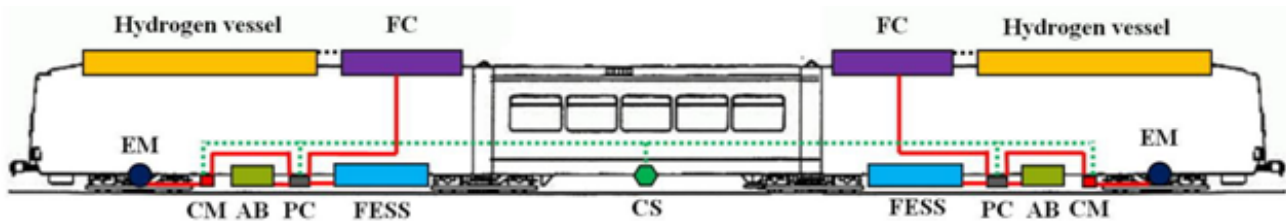
Kolejnym przykładem jest składający się z dwóch wagonów pociąg Mireo Plus H. Będzie on zasilany baterią i ogniwami paliwowymi, które zamieniają wodór i tlen w energię elektryczną. Pociąg będzie miał zasięg 600 kilometrów (373 mil), a ponadto Siemens zapowiedział również, że opracuje wersję trzywagonową o zasięgu do 1.000 kilometrów (621 mil) [14].

W całej Europie jeździ nadal ponad 10.000 pociągów z silnikiem wysokoprężnym i co do niektórych z nich są plany ich wymiany w ciągu najbliższych 15 lat [20].

W 2010 roku zarówno ogniwa paliwowe, jak i urządzenia do wytwarzania wodoru, zostały wykorzystane przez kilku operatorów transportowych w różnych krajach, takich jak Chiny, Niemcy, Japonia, Tajwan, Wielka Brytania i Stany Zjednoczone. Wiele z tych technologii, które można zastosować w pojazdach hydrail, będzie można zastosować również w innych środkach transportu, takich jak pojazdy drogowe, co przyczyni się do bardziej dynamicznego rozwoju tych technologii [13].

Koleje brytyjskie będą dążyły do osiągnięcia zerowej emisji CO₂ w transporcie szynowym w 2040 roku. Osiągnięcie tego celu ma ułatwić współpraca z producentem nowych pojazdów zasilanych paliwem wodorowym. Mają być one wprowadzane do eksploatacji od 2022 roku [19].

Według informacji Jastrzębskiej Spółki Węglowej (JSW) na świecie działa już kilkaset stacji wodorowych, z czego ok. 150 w Europie. W Polsce nie ma dotąd ani jednej stacji, a pierwsze w ramach zainaugurowanego projektu Pure H2 zamierza do końca 2021



Rys. 2. Konfiguracja systemu zasilania i sterowania pociągu

Fig. 2. Configuration of the power supply and train control system

Hydrogen vessel – zbiornik wodoru, FC – ogniwo paliwowe, FESS – system magazynowania energii koła zamachowego, PC – przekształtnik mocy, CM – przekształtnik silnika trakcyjnego, AB – bateria pomocnicza, EM – silnik elektryczny, CS – system sterowania

— szyna mocy, - - - - - szyna komunikacyjna

FC – fuel cell, FESS – flywheel energy storage system, PC – power converter, CM – traction motor converter, AB – auxiliary battery, EM – electric motor, CS – control system, szyna mocy – power bus, szyna komunikacyjna – communication bus

The Coradia iLint trains from Alstom (Figure 3), provided with fuel cells, appeared on the tracks in Lower Saxony, Germany, already in September 2018, replacing the diesel trains being in use there before. The first line served by hydrogen-powered trains was nearly 100 km long and ran through Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde and Buxtehude.



Rys. 3. Pociąg Coradia iLint [23]
Fig. 3. The Coradia iLint train [23]

The trains are refueled at a mobile hydrogen refueling station. The gaseous hydrogen will be pumped into the tanks from a steel container of the height exceeding 12 m, located beside the tracks at the Bremervörde station.

In Great Britain, Alstom, together with the local carrier Eversholt Rail, plans to adapt the 321 class trains to hydrogen propulsion, ensuring them a 1,000 km range and a maximum speed of 140 km/h. The first batch of modernized vehicles of this type is to be finalized and operational in early 2021. Another design of a fuel cell train is also presented by the British manufacturer Vivarail.

The French railway company SNCF postulates elimination of diesel-powered trains by 2035. SNCF, in the framework of this plan, intends to begin testing of the hydrogen fuel cell rail vehicles in 2021 and expects their full validation by 2022.

In the United States and Canada, the research devoted to hydrogen trains has been carried out for many years. The use of locomotives of this type was considered for example in shipyards for transport purposes. In 2009-2010 they were tested by BNSF – the local

postawić Grupa Lotos w Warszawie i Gdańsku [15]. Na rysunku 2 przedstawiono architekturę nowatorskiego lekkiego hybrydowego pojazdu z dwoma wagonami silnikowymi i wagonem doczepnym. W każdym wagonie silnikowym zabudowano elektryczny silnik trakcyjny zasilany z hybrydowej jednostki mocy składającej się z wodorowego ogniwa wodorowego połączonego z systemem magazynowania energii koła zamachowego, który jest wykorzystywany, gdy nie jest potrzebna siła napędu lub do odzyskania energii w fazie hamowania [3].

Pociągi Coradia iLint (rys. 3) firmy Alstom wyposażone w ogniwa paliwowe wyjechały na tory w niemieckiej Dolnej Saksonii już we wrześniu 2018 r. zastępując eksploatowane tam pociągi spalinowe. Pierwsza linia obsługiwana przez napędzane wodorem składy liczyła prawie 100 km i biegła przez Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde i Buxtehude.

Pociągi uzupełniają paliwo w mobilnej stacji tankowania wodoru. Gazowy wodór będzie wpompowywany do zbiorników ze stalowego kontenera o wysokości ponad 12 m, znajdującego się obok torów na stacji Bremervörde.

W Wielkiej Brytanii firma Alstom zamierza razem z miejscowym przewoźnikiem Eversholt Rail przystosować pociągi klasy 321 do napędu wodorowego, o zasięgu do 1.000 km i na maksymalną prędkość 140 km/godz. Pierwsza partia zmodernizowanych pojazdów tego typu ma być ukończona i gotowa do eksploatacji na początku 2021 r. Swój projekt pociągu na ogniwa paliwowe zaprezentował też brytyjski producent Vivarail.

Francuskie przedsiębiorstwo kolejowe SNCF zakłada wyeliminowanie do 2035 r. pociągów napędzanych silnikami diesla. W ramach tego planu SNCF planuje rozpocząć w 2021 r. testowanie pojazdów szynowych napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi i oczekuje, że do 2022 r. będą one w pełni sprawdzone.

W Stanach Zjednoczonych i w Kanadzie od wielu lat prowadzi się badania nad pociągami wodorowymi. Rozważano np. wykorzystanie lokomotyw tego typu do transportu w stocznjach. W latach 2009-2010 testował je lokalny przewoźnik BNSF w Los Angeles (rys. 4). Niedawno kontrakt na stworzenie pierwszego

carrier from Los Angeles (Fig. 4). The contract for the first passenger train in the USA powered by hydrogen was recently granted to the Stadler Company.



Rys. 4. Hybrydowa wodorowa lokomotywa, testowana w Los Angeles [23]

Fig. 4. A hybrid hydrogen-powered locomotive subjected to the tests in Los Angeles [23]

The contract involves possibility of launching four more vehicles. Hydrogen-powered Flirt H2 is to be put into operation in 2024 on a 14.5 km line between Redlands and Metrolink Station in San Bernardino, California, within the Redlands Passenger Railroad project.

According to the agreement, Stadler shall develop a hydrogen-powered train composed of two carriages on either side of the drive unit that contains fuel cells and hydrogen tanks. Such a trainset traveling at a maximum speed of up to 130 km/h shall carry a maximum of 108 passengers, providing additional space for standing persons. Hyundai Motor Group in South Korea is currently working on a fuel cell train, the first prototype of which was planned to be manufactured in 2020. The project assumes its range reaching 200 km between the refueling operations, at a speed of up to 70 km/h. Meanwhile, in Japan, the East Japan Railway Co has declared testing of new hydrogen-powered trains starting from 2021. The trains shall travel at maximum speed of 100 km/h and allow to run approximately 140 km with one hydrogen refueling [23].

Another examples of European multiple units provided with hydrogen propulsion are shown in the figures 5÷8 below.



Rys.7. Mireo Plus H firmy Siemens [5]
Fig. 7. Mireo Plus H from Siemens [5]

pasażerskiego pociągu w USA napędzanego wodorem otrzymała firma Stadler.

Umowa przewiduje możliwość uruchomienia czterech kolejnych pojazdów. Zasilany wodorem Flirt H2 ma zostać uruchomiony w 2024 r. na linii o długości 14,5 km między Redlands a stacją Metrolink w San Bernardino w Kalifornii, jako element projektu kolei pasażerskiej Redlands.

Zgodnie z umową Stadler opracuje pociąg napędzany wodorem, który będzie składał się z dwóch wagonów po obu stronach zespołu napędowego, mieszczącego ogniwa paliwowe i zbiorniki wodoru. Przewiduje się, że taki skład przewiezie maksymalnie 108 pasażerów, zapewniając też dodatkową przestrzeń dla podróżnych stojących i będzie przemieszczał się z maksymalną prędkością do 130 km/godz.

W Korei Południowej Hyundai Motor Group opracowuje obecnie pociąg z ogniwami paliwowymi, którego pierwszy prototyp miał być wyprodukowany w 2020 r. Plany zakładają, że będzie on w stanie przejechać 200 km między tankowaniem paliwem, z prędkością do 70 km/godz. Z kolei w Japonii firma East Japan Railway Co ogłosiła plan testowania nowych składów napędzanych wodorem od 2021 r. Pociągi zapewnią maksymalną prędkość 100 km/godz. i oczekuje się, że będzie pokonywał ok. 140 km na jednym tankowaniu wodoru [23].

Inne przykłady europejskich zespołów trakcyjnych napędzanych wodorem przedstawiono na poniższych rysunkach 5÷8.



Rys. 5. Pociąg napędzany wodorem stoi 1.02.2019 przed pierwszą jazdą między Lipskiem a Grimma [1]

Fig. 5. The hydrogen-powered train standing in the station before its first travel from Leipzig to Grimma on 01/02/2019 [1]



Rys. 6. Debiut pociągu pasażerskiego Coradia iLint Alstom napędzanego wodorem na Targach InnoTrans 2016 [4]

Fig. 6. Debut of the hydrogen-powered Coradia iLint Alstom passenger train at InnoTrans 2016



Rys. 8. Pierwszy hiszpański pociąg wodorowy w technologii Hexagon Purus [6]

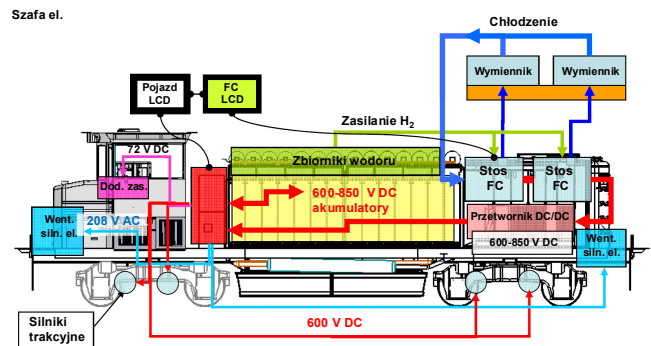
Fig. 8. The first Spanish hydrogen train designed with the Hexagon Purus technology

The American project of a locomotive (Fig. 9) provided with fuel cells was presented by Vehicle Projects LCC. The 127-ton locomotive was furnished with low-temperature PEM-type fuel cells (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) with available capacity of 250 kW. The total locomotive power, considering the batteries, amounts to 1 MW [17].

The fuel cell stack (Ballard Power System - Mk902) provides a voltage of 600 V. The cells are supplied with hydrogen (pressurized up to 1.2 MPa) from two 70 kg cylinders, where hydrogen is stored at a pressure of 35 MPa. This allows for 8-10 hours operation of the locomotive. Despite high values of momentary power (600–1000 kW) that occur during a typical locomotive load test, the average power amounts only to 40÷100 kW. This is due to long working periods under no-load condition, thus increasing possible use of the fuel cells in such rail vehicles.

Proposal of a propulsion system of the Light Hybrid Electric Train is shown below in Fig. 10.

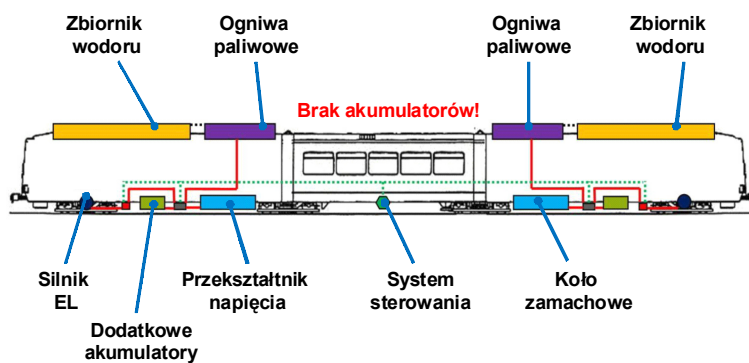
Amerykański projekt lokomotywy (rys. 9) wyposażonej w ogniwa paliwowe zaprezentowany został przez Vehicle Projects LCC. Lokomotywę o masie 127 ton wyposażono w niskotemperaturowe ogniwa paliwowe typu PEM (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) o mocy 250 kW. Moc całkowita lokomotywy, przy uwzględnieniu akumulatorów wynosi 1 MW [17]. Stos ogniw paliwowych (*Ballard Power System – Mk902*) generuje napięcie 600 V przy zasilaniu wodorem (do 1,2 MPa) z dwóch butli 70 kg, w których wodór jest przechowywany przy ciśnieniu 35 MPa. Pozwala to na eksploatację lokomotywy w czasie 8÷10 h. Mimo dużych wartości mocy chwilowych (600÷1000 kW) w typowym teście obciążenia lokomotywy moc średnia wynosi tylko 40÷100 kW. Wynika to z długich czasów pracy układu bez obciążenia, co zwiększa możliwości wykorzystania ogniw paliwowych w takich pojazdach szynowych.



Rys. 9. Lokomotywa spółki Vehicle Projects LCC wyposażona w ogniwa paliwowe

Fig. 9. A locomotive from Vehicle Projects LCC furnished with fuel cells

Propozycję systemu napędowego lekkiego pojazdu szynowego (*Light Hybrid Electric Train*) przedstawiono poniżej na rys. 10.



Koło zamachowe:

- podłączone do ogniwa paliwowego
- stanowi akumulator energii dla ogniwa
- używane podczas hamowania regeneracyjnego

	Hydrogen container	Fuel cells	Without batteries!	Fuel cells	Hydrogen container	Flywheel:
Electric motor	Additional batteries	Voltage converter	Control system	flywheel		<ul style="list-style-type: none"> • connected to the fuel cell • is a power accumulator of the cell • used while regenerative braking

Rys. 10. Elementy wyposażenia lekkiego pojazdu szynowego z hybrydowym układem napędowym

Fig. 10. The equipment parts of a light rail vehicle provided with a hybrid drive system

The hydrogen-powered fuel cells were used in it, using no electrochemical batteries. The use of flywheels in a hybrid system was found to be sufficient to accumulate the kinetic energy. Flywheels (8 pcs.) store energy while braking, allowing its reuse for acceleration of the rail vehicle.

The vehicle is composed of two rail motor coaches and a 73-ton trailer. Output power of the trainset amounts to 400 kW, while its maximum torque is equal to 1,600 Nm. The system of mechanical energy storage contains the 27-kg flywheels the rotational speed of which varies from 15,000 to 60,000 rpm. Each of these systems, storing the energy of 6.66 MJ, offers a power of 67.5 kW. Each of the two fuel cells stacks has a power of 110 kW [18].

The hydrogen-powered traction is already used also in trams. Widespread implementation of this technology shall enable opening new planned tram lines, without overhead contact line on many sections. This might be important in many cities, resulting not only in better air quality, but also avoiding the overhead traction that disturbs architectural look of historic parts of the cities in large agglomerations.

In China a hybrid tram has been presented already in 2015. It was designed by the China South Rail Corp (CSR) – a rolling stock manufacturer. A year later another Chinese electric and hydrogen hybrid tram left the assembly line at Tangshan Railway Vehicle Co Ltd (TRC) in Hebei, China's northern province. The work, carried out in TRC Company (with state capital) and Southwest Jiaotong University, took four years. It is a fully "green" tram, emitting no exhaust fumes, but only water, discharged at the terminal stop. The tram carries 336 passengers. The hydrogen cells allow to travel at the distance of 40 km with maximum speed of 70 km/h. It is powered by the energy of hydrogen cells (as supercapacitors), therefore, the tram needs no overhead contact line [12].

Wykorzystano ogniwa paliwowe zasilane wodorem, jednak bez użycia akumulatorów elektrochemicznych. Stwierdzono, że zastosowanie kół zamachowych w układzie hybrydowym będzie wystarczającym kinetycznym układem akumulacji energii. Koła zamachowe (8 szt.) gromadzą energię podczas hamowania oraz pozwalają na jej wykorzystanie podczas przyspieszania pojazdu szynowego.

Pojazd tworzą dwa wagony napędne i wagon doczepny o masie 73 t. Moc układu wynosi 400 kW, a maksymalny moment obrotowy 1.600 Nm. Układ mechanicznego gromadzenia energii stanowią koła zamachowe o masie 27 kg, których zakres prędkości obrotowej wynosi 15 ÷ 60 tys. obr/min). Moc każdego układu wynosi 67,5 kW, przy zgromadzonej energii 6,66 MJ. Każdy z dwóch stosów ogniwo paliwowych ma moc 110 kW [18].

Napędy trakcyjne zasilane wodorem są już także stosowane w tramwajach. Powszechne wdrożenie tej technologii umożliwi uruchamianie nowych planowanych linii tramwajowych z odcinkami bez sieci trakcyjnej. Może mieć to istotne znaczenie w wielu miastach, nie tylko z powodu lepszej jakości powietrza, ale także dlatego, że napowietrzne sieci trakcyjne zakłócałyby wystrój architektoniczny zabytkowych części miast w dużych aglomeracjach.

Chiny już w 2015 roku przedstawiły tramwaj z napędem hybrydowym. Skonstruował go producent kolejowy China South Rail Corp (CSR). Kolejny chiński tramwaj z napędem hybrydowym (elektrycznym i wodorowym) zjechał rok później z linii montażowej zakładów Tangshan Railway Vehicle Co Ltd (TRC) w Hebei w północnej prowincji Chin. Prace nad tą konstrukcją zajęły spółce TRC (z kapitałem państwowym) oraz Southwest Jiaotong University cztery lata. Jest to w pełni „zielony” tramwaj, bowiem nie emituje żadnych spalin, a jedynie wodę, odprowadzaną na przystanku końcowym.

Tramwaj może przewozić 336 pasażerów. Ogniwa wodorowe zapewniają przejazd na dystansie 40 km z maksymalną prędkością 70 km/h. Zasilany jest energią z ogniwo wodorowych (jako superkondensatorów), zatem tramwaj nie musi korzystać z napowietrznej linii zasilającej [12].

5. Bibliography / Bibliografia

- [1] *Are hydrogen-powered trains the future?* <https://www.independent.co.uk/news/science/hydrogen-powered-trains-transport-future-transport-diesel-cost-uk-a8786306.html> [17]
- [2] *Biowódór może zwiększyć udział OZE w transporcie.* <https://wysokienapiecie.pl/15922-biowodor-moze-zwiekszyc-udzial-oze-w-transporcie/> [9]
- [3] *D'Ovidio G., Carpenito A., Masciovecchio C., Ometto A.: Preliminary analysis on advanced technologies for hydrogen light-rail train application in sub-urban non electrified routes. National Scientific Seminar SIDT. Politecnico Di Bari. 14-15.09.2017. University of L'Aquila ITALY* [3]
- [4] *Droga droga do samochodów wodorowych w Polsce. 4.03.2019.* <https://wysokienapiecie.pl/17436-samochody-wodorowe-w-polsce-ceny-tankowanie/> [11]
- [5] *Durzyński Z., Orczyk M.: Tram-train elementem proekologicznego systemu transportu zbiorowego w aglomeracji poznańskiej. Pojazdy Szynowe nr 4/2019* [16]
- [6] *Durzyński Z.: Stan obecny i perspektywy nieelektryfikowanego transportu kolejowego w Polsce. Pojazdy Szynowe nr 1/2020* [2]

- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych - 2014/94/UE [25]
- [8] https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_pl [24]
- [9] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pl/fs_19_6726 [20]
- [10] <https://elektrosystemy.pl/?p=31955> [23]
- [11] <https://www.nakolei.pl/wielkopolska-zainteresowana-kupnem-pociagow-wodorowych-i-hybrydowych/> [21]
- [12] <https://www.wnp.pl/logistyka/chinczycy-prezentuja-drugi-tramwaj-z-napedem-wodorowym,272461.html> [27]
- [13] Hydrail. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrail> [4]
- [14] Hydrogen-powered trains could replace diesel engines in Germany. <https://edition.cnn.com/2020/11/23/business/hydrogen-train-siemens/index.html> [5]
- [15] JSW chce być czołowym producentem wodoru. 10.12.2018. <https://niezalezna.pl/249644-jsw-chce-byc-czolowym-producentem-wodoru> [12]
- [16] Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności. Projekt. Ministerstwo Funduszy i Polityki Regionalnej. Warszawa, kwiecień 2021 r. [26]
- [17] Orczyk M. i inni: Circumstances of Railway Transport Hydrogenization in Poland. SAE Technical Paper 2020-01-2131, 2020, doi:10.4271/2020-01-2131 [0]
- [18] Pielecha i i inni: Ultrakondensatory i ogniwa paliwowe w układach napędowych pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe nr 2/2019 [1]
- [19] Radomski M.: Pociągi wodorowe na polskich torach? To możliwe już w 2022 roku, ale do rozwiązania jest kilka problemów. Fleetguru. 12.09.2018 [13]
- [20] Spain's first hydrogen train to feature Hexagon Purus technology. <https://www.h2-view.com/story/spains-first-hydrogen-train-to-feature-hexagon-purus-technology/> [6]
- [21] Strategia na rzecz odpowiedzialnego rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.). Warszawa 2017 [18]
- [22] Uchwała nr 110/2019 Rady Ministrów z dnia 17 września 2019 r. zmieniająca Uchwałę w sprawie ustanowienia Krajowego Programu Kolejowego do 2023 roku [19]
- [23] Usidus. M.: Wsiąść do pociągu... wodorowego. <https://mlodytechnik.pl/technika/30054-wsiasc-do-pociagu-wodorowego> [8]
- [24] Wodór – samorzady potrzebują systemowego wsparcia finansowego i nowego modelu współpracy. <https://www.rynekinfrastruktury.pl/mobile/wodor--samorzady-potrzebujaja-systemowego-wsparcia-finansowego-i-nowego-modelu-wspolpracy-74524.html> [15]
- [25] Wodór jako paliwo konwencjonalne. https://pl.wikipedia.org/wiki/Wod%C3%B3r_jako_paliwo_konwencjonalne [14]
- [26] Wodór, prąd, biopaliwa. Dekarbonizacja transportu będzie kosztowna. <https://wysokienapiecie.pl/19529-wodor-prad-biopaliwa-dekarbonizacja-transportu-bedzie-kosztowna/> [10]
- [27] Woźniak. A.: Transport zamierza tankować wodór. 15.10.2020. <https://energia.rp.pl/nowa-energia/elektromobilnosc/24738-transport-zamierza-tankowac-wodor> [7]

Using vibroacoustic methods to describe the dynamic properties of composite elements to assess their technical condition

Wykorzystanie metod wibroakustycznych do opisu własności dynamicznych elementów kompozytowych w aspekcie oceny ich sprawności technicznej

The article presents the research process and a feasibility analysis of using acoustic pressure as a diagnostic parameter in technical condition assessment of elements made of composite materials. An experiment was carried out in the form of a pulse test using a modal hammer to induce the system's vibroacoustic response. Large internal defects in the structure have been shown to cause changes in the characteristics of the Frequency Response Function (FRF) in the band below 8 kHz. The conducted analysis was used to prove that acoustic pressure can be effectively used in the diagnosis of elements made of composite materials.

W artykule zaprezentowano przebieg badań oraz analizę dotyczącą możliwości wykorzystania ciśnienia akustycznego jako parametru diagnostycznego w ocenie stanu technicznego elementów wykonanych z materiałów kompozytowych. Przeprowadzono eksperyment w postaci testu impulsowego z wykorzystaniem młotka modalnego jako wzbudnika odpowiedzi wibroakustycznej układu. Wykazano, że duże wewnętrzne ubytki w strukturze powodują zmiany charakterystyki funkcji odpowiedzi częstotliwościowej (Frequency Response Function, FRF) w paśmie poniżej 8 kHz. W wyniku przeprowadzonej analizy udowodniono, że ciśnienie akustyczne może być skutecznie wykorzystywane w diagnozie elementów wykonanych z materiałów kompozytowych.

1. INTRODUCTION

The use of composite materials continues to increase its share in the process of designing and manufacturing means of transport. This applies to virtually all vehicle types: road, rail, air and sea. This trend is caused by the desire to reduce the overall weight of individual vehicles, which could then result in an increased vehicle range with a reduced fuel and energy consumption, as well as to reduce the wear of the infrastructure used by the given means of transport, such as railway lines or asphalt roads. In the longer term, this is done to reduce the emission of harmful greenhouse gases, e.g. CO₂, to the atmosphere [13].

The last aspect is related to the broadly understood environmental protection and ecology in the operation of machines and vehicles – including those related to rail transport. This is deemed to be particularly important in the Member States of the European Union, which, as part of its climate policy, places significant emphasis on reducing the environmental impact caused by various means of transport [17].

An example of the harmful environmental impact of rail vehicles is the vehicle noise, which is one of the

1. WPROWADZENIE

Obserwowany jest rosnący udział wykorzystania materiałów kompozytowych w procesie projektowania oraz wykonywania środków transportu. Dotyczy to praktycznie wszystkich ich rodzajów: samochodowych, kolejowych, lotniczych oraz morskich. Trend ten wynika z dążenia do redukcji masy poszczególnych pojazdów, co ma pozwolić osiągnąć zwiększenie zasięgu poruszania się przy zmniejszonym wykorzystaniu paliw oraz energii, a także zmniejszyć zużycie infrastruktury stanowiącej nośnik dla danych środków transportu, jak np. linie kolejowe lub drogi asfaltowe. W dalszej perspektywie ma to skutkować ograniczeniem emitowania szkodliwych gazów cieplarnianych np. CO₂ do atmosfery ziemskiej [13].

Ten ostatni aspekt związany jest z szeroko pojętą ochroną środowiska oraz ekologią w eksploatacji urządzeń technicznych - w tym tych związanych z transportem szynowym. Jest on szczególnie ważny w państwach członkowskich Unii Europejskiej, która w ramach swojej polityki klimatycznej kładzie szczególny aspekt na redukcję uciążliwości środków transportu dla środowiska [17].

most widespread and dominant noise sources [20]. This noise is caused, among others, by railway brake blocks. Cast iron brake shoes were widely used in the past, which, due to high friction, accelerated the process of wheel wear. This is typically referred to as polygonization and it results in increased noise emission during operation. It has been shown experimentally that it is cheaper and more effective to eliminate the cause of the noise generation rather than to build noise barriers at railway tracks. Changing the brake shoes material from cast iron to composite was shown to be an effective design solution in this aspect. The research results were so promising that in 1997 the General Assembly of the Community of European Railways commissioned in Berlin works aimed at eliminating cast iron inserts from rail transport completely and replacing them with composite ones [5,6,22].

Due to the chosen direction of rail brakes development, it became desirable to develop effective, non-destructive methods for determining the dynamic properties of composite parts, especially in terms of their technical condition diagnostics. Damage and wear occurring in composite elements is fundamentally different in terms of its form from the damage observed in parts made of metal alloys. Composite elements are resistant to corrosion, however, their heterogeneous structure and composition made up of several phases results in them more often suffer from structural defects such as delamination, loss of stiffness, peeling and cracking [9].

Machines and vehicles discussed in the article are characterized by generating and emitting vibrations and acoustic noise to the environment during their operation [7]. The characteristics of the vibrations and sound generated is specific for each vehicle and machine and is also closely related to their technical condition. This means that all violations, damages, or changes in the structure, even the minimal ones such as microcracking, change the vibration and acoustic signal parameters generated during standard operation or by deliberate excitation, e.g. during tests [15,18]. Therefore, it can be concluded that vibroacoustic diagnostics is a potentially effective method of determining the dynamic properties of elements made out of composite materials; especially in the aspect of assessing their technical condition and detecting structural damage.

The aim of this article is an experimental analysis of the potential uses acoustic pressure could have as a diagnostic parameter in the technical condition assessment of composite elements. The acoustic signal was induced in the impulse test for a reference element in excellent condition and the obtained measurements will be compared with the signal obtained from an element with a damaged structural continuity. This resulted in an assessment of whether the diagnostic method used in this research can be used to assess the

Jednym z przykładów szkodliwego wpływu pojazdów szynowych na otoczenie jest hałas komunikacyjny będący jednym z najbardziej rozpowszechnionych i dominujących źródeł hałasu [20]. Jego źródłem są między innymi kolejowe wstawki hamulcowe. Dawniej w powszechnym użyciu były wstawki żeliwne, które w wyniku dużego tarcia przyspieszały proces zużywania kół nazywany poligonizacją, co w efekcie generowało zwiększony hałas emitowany do otoczenia. Doświadczalnie wykazano, że tańsza i bardziej efektywna jest likwidacja przyczyny powstania niż budowa ekranów dźwiękoszczelnych przy torach kolejowych. Jako skuteczne rozwiązanie konstrukcyjne wskazano zamianę materiału wykonania wstawek z żeliwnego na kompozytowy. Wyniki badań były na tyle obiecujące, że już w 1997 roku Zgromadzenie Generalne Wspólnoty Kolei Europejskich zleciło w Berlinie prace zmierzające do eliminacji z użycia w transporcie szynowym wstawek żeliwnych i zastąpienie kompozytowymi [5,6,22].

W związku z obranym kierunkiem rozwoju pożądane stało się wypracowanie skutecznych nieniszczących metod wyznaczania własności dynamicznych części kompozytowych, szczególnie w aspekcie ich diagnostyki technicznej. Uszkodzenia jakim ulegają elementy kompozytowe zasadniczo różnią się pod względem formy od uszkodzeń części wykonanych ze stopów metali. Są one odporne na korozję – jednak ich niejednorodna struktura i złożenie z kilku faz powoduje, że częściej ulegają defektom strukturalnym, takimi jak rozwarstwienia nazywane też delaminacją, utratą sztywności, rozklejeniem jak i też pękaniu [9].

Obiekty techniczne charakteryzuje to, że w trakcie eksploatacji generują i emitują drgania oraz hałas akustyczny do otoczenia [7]. Sygnatura drgań oraz dźwięku jest indywidualna dla każdego obiektu i maszyny, a także ściśle powiązana z ich stanem technicznym. Oznacza to, że wszelkie naruszenia, uszkodzenia, zmiany w strukturze, nawet te minimalne o charakterze mikropęknięć powodują zmianę parametrów odpowiednio sygnału drganiowego i akustycznego generowanych zarówno podczas standardowej eksploatacji jak i poprzez celowe wzbudzenie np. podczas badań [15,18]. Można więc wywnioskować, że diagnostyka wibroakustyczna jest potencjalnie skuteczną metodą wyznaczenia własności dynamicznych elementów kompozytowych – szczególnie w aspekcie oceny ich stanu technicznego i detekcji uszkodzeń w strukturze.

Celem niniejszej publikacji jest analiza doświadczalna możliwości wykorzystania ciśnienia akustycznego jako parametru diagnostycznego w ocenie stanu technicznego elementów kompozytowych. Porównany zostanie sygnał akustyczny wzbudzony testem impulsowym dla elementu sprawnego technicznie z sygnałem części z naruszoną ciągłością struktury. Rezultatem tego będzie ocena czy użyta metoda diagnostyczna może zostać wykorzystana w aspekcie sprawności technicznej elementów wykonanych z materiałów kompozytowych.

technical condition and structural integrity of elements made of composite materials.

2. VIBROACOUSTIC METHODS IN COMPOSITE MATERIALS DIAGNOSTICS

2.1. Analysis of existing solutions

One of the basic methods currently in use to study dynamic properties of materials, also for vibroacoustic diagnostics, is modal analysis [8]. The base assumption of this method is to determine the frequencies of the dominant signal (modes) corresponding to the natural frequencies of the tested object, using the measured signal of the vibration level or acoustic pressure. Analysis of specific points of the measured modes signal, especially any deviations from the reference results, enables determining whether the structure has been damaged and if so, where the damage is located. The described method has been successfully used in the literature for the diagnosis of composites of glass fiber reinforced plastics (GFRP), carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and GFRP reinforced with two layers of aluminum alloy (Al-GFRP-Al). The tested process involved vibrations in the system. The shape of modes as a function of frequency response was analyzed, as shown in Fig. 1. Some advanced signal processing methods, such as wavelet transform, were used. As a result the differences in vibrations between the tested and model structures were determined and described, and thus the mechanical damage could be identified and defined. [12].

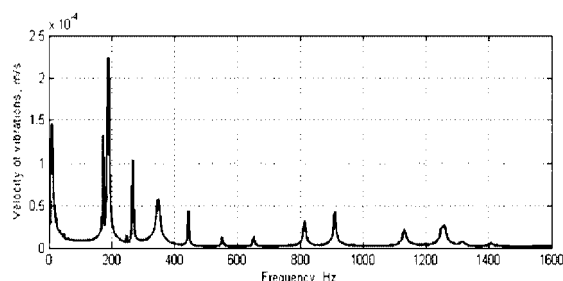


Fig. 1. An example of a FRF characteristic of a structure made out of CFRP [12]

Rys. 1. Wzorcowo charakterystyka FRF struktury wykonanej z CFRP [12]

Among other methods of vibroacoustic damage detection in elements made of composite materials, the technique used was creating acoustic pressure signal patterns for individual parts in various technical conditions. In order to achieve this, measurements were performed of the sounds induced using an audio exciter and emitted by composite structures that were undamaged and with increasing levels of structural damage. For each reference signal, such a number of measurements were made to be able to determine their normal distribution. The individual signal patterns were then compared. The dominant frequencies and their shift as a result of structural defects were analyzed (example for stretching an element made of CFRP was shown in

2. METODY WIBROAKUSTYCZNE W DIAGNOSTYCE KOMPOZYTÓW

2.1. Analiza istniejących rozwiązań

Jedną z podstawowych obecnie stosowanych metod do badania własności dynamicznych, także w aspekcie diagnostyki wibroakustycznej, jest analiza modalna [8]. Jej bazowym założeniem jest określenie, z wykorzystaniem akwizycji poziomu drgań lub ciśnienia akustycznego, częstotliwości dominujących sygnału (modów) odpowiadających częstotliwościom własnym badanego obiektu. Analizując osobliwości w sygnale przedstawiającym mody, w szczególności różnice z wynikami modelowymi, można określić, czy nastąpiło uszkodzenie struktury, i jeżeli tak to w jakim miejscu. W literaturze wykorzystywano z powodzeniem opisywaną metodę przy diagnostyce kompozytów złożonych z tworzyw sztucznych wzmocnianych włóknem szklanym (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP), włóknem węglowym (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) oraz GFRP wzmocnionym dwoma warstwami stopu aluminium (Al-GFRP-Al). Badanym procesem były drgania w układzie. Analizowano ukształtowanie modów w funkcji odpowiedzi częstotliwości przedstawione na rys. 1. Wykorzystano niektóre metody zaawansowanego przetwarzania sygnałów np. transformatę falkową. Efektem tego było opisanie różnic w drganiach pomiędzy strukturą badaną i modelową, a tym samym zdefiniowanie uszkodzeń mechanicznych [12].

Wśród innych metod wibroakustycznej detekcji uszkodzeń elementów wykonanych z materiałów kompozytowych wykorzystywano tworzenie wzorców sygnału ciśnienia akustycznego dla różnych stanów technicznych poszczególnych części. W tym celu wykonano pomiary dźwięku, wzbudzanego z użyciem wzbudnika, emitowanego przez struktury kompozytowe nieuszkodzone oraz z narastającymi poziomami uszkodzeń. Dla każdego wzorca wykonano taką liczbę pomiarów by można było wyznaczyć z nich rozkład normalny. Następnie porównano poszczególne wzorce sygnałów. Przeanalizowano częstotliwości dominujące oraz ich przesunięcie spowodowane defektami struktury (przykład dla rozciągania elementu wykonanego z CFRP na rys. 2). Pozwoliło to końcowo wykorzystać modele regresyjne do ustalenia jak badane uszkodzenia elementów wpływają na częstotliwości dominujące w badanym sygnale [10].

Przykładem zastosowania analizy drgań w diagnostyce materiałów kompozytowych zastosowanych w kolei dużych prędkości przedstawiono na rys. 3.

Podczas badań, których wynikiem była zależność przedstawiona na rys. 3 wykazano, że grubość warstwy powierzchniowej materiału kompozytowego, z którego wykonana jest podłoga pociągu kolei dużych prędkości wpływa bezpośrednio na widmo przyśpieszeń drgań – największe różnice widać przy wyższych częstotliwościach [11].

Fig. 2). This ultimately allowed to use regression models to determine how the tested element damage affects the dominant frequencies in the tested signal [10].

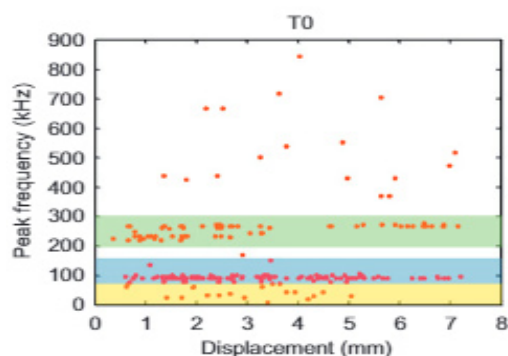


Fig. 2. Graph of the relationship between the dominant frequency of the acoustic signal and the amount of damage caused by stretching the CFRP element [10]

During the tests, which resulted in the relation presented in Fig. 3, it was shown that the thickness of the surface layer of the composite material which makes up the floor of the high-speed railway train directly affects the spectrum of vibration accelerations – the greatest differences can be observed at higher frequencies [11].

The research completed so far indicates that the analysis of vibroacoustic signals can be an effective form of composite materials diagnosis. It should be noted, however, that this method is still under development and not all of its aspects are thoroughly researched yet. A notable example is the use of an impulse test to perform spectral analysis, which is rarely mentioned in scientific publications, with acoustic pressure being the measured parameter used to assess the technical condition of a composite element.

2.2. Use of frequency analysis in the interpretation of results

In the publications discussed in point 2.1, frequency is used as the basis for the analysis of vibration signals and sound pressure in the context of damage assessment in composite materials elements. The research measurements are performed in the time domain, and the results obtained this way give direct information on how the signal changes with time. In some cases, this provides sufficient data for diagnostic assessment. However, if the signal is complex and contains noise or disruptions, or if it is obtained as a result of impulse forcing, which causes it to be very dynamic, time domain analysis becomes very difficult or even insufficient. In such a case carefully comparing the effect the structural defects have on the obtained signal becomes particularly challenging. Thus, a frequency domain transformation is used, which allows the recorded data to be analyzed more clearly by precisely defining the dominant frequencies (modes) [16,19].

Z dotychczasowych badań można wywnioskować, że analiza sygnałów wibroakustycznych jest skuteczną formą diagnozowania kompozytów. Należy jednak wskazać, że nadal jest ona w fazie rozwojowej i nie wszystkie jej aspekty są dokładnie zbadane. Przykładem jest tutaj rzadko poruszane w publikacjach naukowych wykorzystanie testu impulsowego do wykonania analizy widmowej, z ciśnieniem akustycznym jako badanym parametrem w ocenie stanu technicznego elementu kompozytowego.

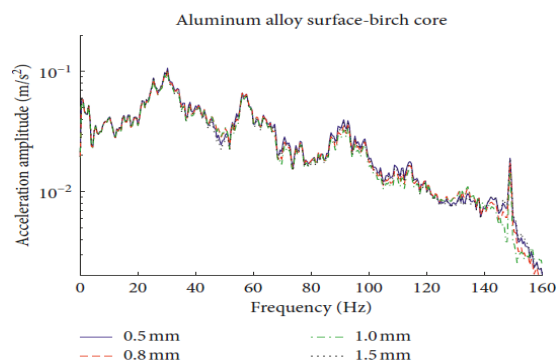


Fig. 3. A visual representation of the relationship between the vibrations acceleration value and the aluminum layer thickness in the floor material while moving at a speed of 350 km/h [11]

Rys. 3. Zależność wielkości przyspieszeń drgań od grubości warstwy aluminiowej w materiale podłogi podczas poruszania się z prędkością 350 km/h [11]

2.2. Wykorzystanie analizy częstotliwościowej w interpretacji wyników

W publikacjach omawianych w pkt 2.1 podstawą analizy sygnałów drgań oraz ciśnienia akustycznego w kontekście oceny uszkodzeń w elementach wykonanych z materiałów kompozytowych jest częstotliwość. Pomiar w trakcie badań dokonywane są w dziedzinie czasu, a uzyskane w ten sposób wyniki dają bezpośrednią informację na temat tego jak zmienia się sygnał wraz z upływem czasu. W niektórych przypadkach uzyskuje się w ten sposób wystarczające dane do wnioskowania diagnostycznego. Jeżeli jednak sygnał jest złożony, a przy tym pojawiły się w nim zakłócenia lub jeżeli uzyskany jest w wyniku wymuszenia impulsowego co powoduje jego szybkozmienność, analiza w dziedzinie czasu staje się bardzo trudna lub wręcz niewystarczająca, wtedy szczególnie wymagające jest dokładne porównanie wpływu defektów strukturalnych na sygnał. Z tego powodu stosuje się transformację do dziedziny częstotliwości, która pozwala przeanalizować zarejestrowane dane w sposób bardziej klarowny poprzez precyzyjne określenie dominujących częstotliwości (modów) [16,19].

Transformację z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości wykonuje się za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera (Discrete Fourier Transform, DFT). Jej obliczanie staje się jednak czasochłonne dla bardziej złożonych sygnałów. Opracowana została więc metoda szybkiej transformacji Fouriera (Fast Fourier Transform, FFT), która pozwala w efektywniejszy

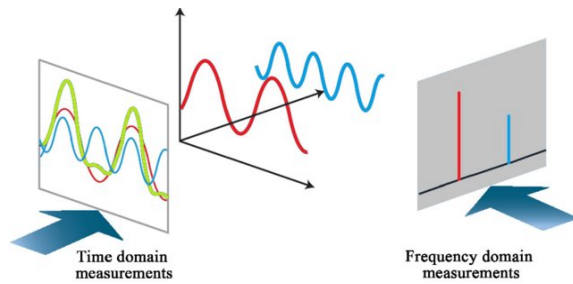


Fig. 4. The difference between the representation of the signal in the time and frequency domains [14]
 Rys. 4. Różnica między przedstawieniem sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości [14]

The time-domain to frequency-domain transformation was performed by a Discrete Fourier Transform (DFT). However, its computation becomes time consuming for more complex signals. Therefore, the method of Fast Fourier Transform (FFT) was developed, which allows for more effective transformations without loss of data quality in relation to DFT.

FFT can be obtained using several methods. One of the most popular of these methods is using the Cooley-Tukey algorithm. Equations 1-3 show its implementation on signal value sequences with a base equal to 2:

N samples of the discrete signal were available (where N is a power of two). This sequence was divided into two smaller sequences: $x_p(n)$, $x_n(n)$, consisting of $x(n)$ signal samples with even (0, 2, 4, ...) and odd (1, 3, 5, ...) indices. Fourier transformations of these sequences were performed: $X_p(n)$, $X_n(n)$, using a recursive FFT calculation procedure. Then the transform of the entire sample sequence was combined using equations:

$$X(k) = X_p(k) + W_k^N X_n(k) \quad (1)$$

$$X\left(k + \frac{N}{2}\right) = X_p(k) - W_k^N X_n(k) \quad (2)$$

$$W_k^N = e^{-\frac{2\pi j k N}{N}} \quad (3)$$

$0 \leq k \leq \frac{N}{2}$

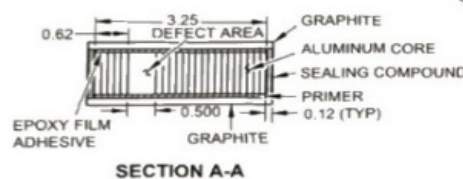
In short, the FFT calculation using this algorithm consisted of dividing the samples into odd and even sequences until two-point sequences were obtained for which

$$X(0) = x(0) + x(1), X(1) = x(0) - x(1).$$

The end result was joining the above two transform sequences into a transform being their overall combination, and as a result the signal waveform being researched could be obtained as a function of frequency [1].

Fig. 5. Diagram of the damaged element samplers with markings for where the defects were

Rys. 5. Schemat próbnika elementu uszkodzonego z zaznaczonymi defektami



sposób dokonać przekształceń bez utraty jakości danych względem DFT.

Można wyróżnić kilka metod wyznaczenia FFT. Jedną z najpopularniejszych jest wykorzystanie algorytmu Cooleya-Tukeya. W równaniach 1-3 przedstawiono jego realizację na ciągach wartości sygnału o podstawie równej liczbie 2:

Do dyspozycji jest N próbek sygnału dyskretnego (N jest potęgą dwójki). Dzieli się ten ciąg na dwa mniejsze ciągi: $x_p(n)$, $x_n(n)$, składające się z próbek sygnału $x(n)$ o indeksach odpowiednio parzystych (0, 2, 4, ...) oraz nieparzystych (1, 3, 5, ...). Dokonuje się transformacji Fouriera tych ciągów: $X_p(n)$, $X_n(n)$, używając w sposób rekurencyjnej procedury obliczania FFT. Następnie łączy się transformatę całego ciągu próbek, zgodnie z zależnością:

$$X(k) = X_p(k) + W_k^N X_n(k) \quad (1)$$

$$X\left(k + \frac{N}{2}\right) = X_p(k) - W_k^N X_n(k) \quad (2)$$

$$W_k^N = e^{-\frac{2\pi j k N}{N}} \quad (3)$$

dla $0 \leq k \leq \frac{N}{2}$.

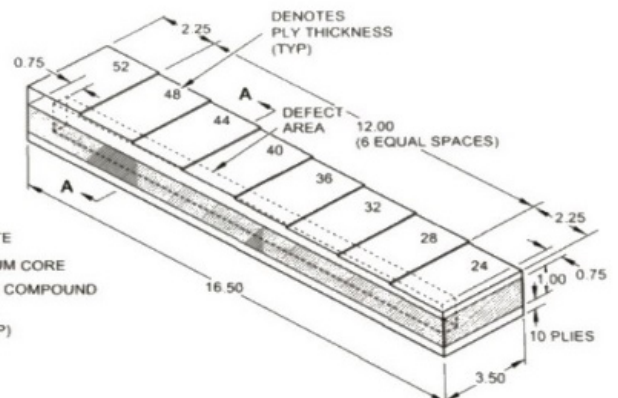
Podsumowując obliczenie FFT tym algorytmem polega na kolejnym dzieleniu próbek na ciągi nieparzyste i parzyste tak długo, aż się otrzyma dwupunktowe ciągi, dla który.

$$X(0) = x(0) + x(1), X(1) = x(0) - x(1).$$

Efektom końcowym jest złożenie dwóch powyższych ciągów transformat w transformatę będącą ich całościowym połączeniem - w wyniku czego uzyskuje się szukany przebieg sygnału w funkcji częstotliwości [1].

3. OBIEKT BADAŃ

W trakcie eksperymentu badaniu zostały poddane próbki wzorcowe elementu wykonanego z materiału kompozytowego. Porównany został próbnik bez uszkodzeń z próbnikiem z defektami struktury, którego schemat z opisem przedstawiony jest na rys. 5, a wygląd rzeczywisty na rys. 6.



3. TEST OBJECT

Standard samplers made using an element made of a composite material were tested in the research. The structurally intact sampler was compared with the sampler containing structure defects, the diagram of which was shown in Fig. 5, and a real picture in Fig. 6.

The defects mapped in the damaged sampler include delamination and internal material loss, i.e. damage characteristic of composites that are invisible to the unaided eye and therefore difficult to detect and diagnose.

Both samplers, undamaged and with structural damage, were made of a material with an aluminum matrix and reinforced with a sealing compound. The cover was made out of graphite plates and the binding agent used was an epoxy resin.

4. RESEARCH METHOD

The aim of the research was determining the impact of structural continuity defects of an element made of composite material on the resulting signal from the emitted acoustic pressure. To generate the sound wave, an impulse test was used which consisted of hitting the test object with a modal hammer. Signal acquisition was performed using two microphones arranged in perpendicular to each other. The recording was carried out in stable acoustic conditions, without exposure to unexpected noise sources. Then, the signal was converted by a measuring cassette to a file format enabling further processing with dedicated software and was saved on an external memory card.

The research equipment used in the experiment was shown in Figures 7, 8 and 9.

A Brüel & Kjær 3050 type dynamic signal acquisition unit was used to record and process the tested signals. The device made it possible to measure the sound pressure using up to 6 input channels as well as being able to power 200V microphones. The acquisition module enabled the signal recording at a sampling rate of up to 131,072 samples per second.



Fig. 8. Brüel & Kjær type 8206 modal hammer - manufacturer's diagram [3]

Rys. 8. Młotek modalny – Brüel & Kjær typ 8206 – schemat producenta [3]

For the impulse test, a type 8206 modal hammer from Brüel & Kjær with a sensitivity of 22.7 mV/N was used as an inductor to generate the initial signal.

Wśród defektów odwzorowanych w próbniku uszkodzonym można wymienić delaminację oraz wewnętrzny ubytek materiału, czyli charakterystyczne dla kompozytów uszkodzenia, które są niewidoczne nieuzbrojonym okiem, a przez to trudne do diagnozy.



Fig. 6. Picture of the damaged sampler

Rys. 6. Rzeczywisty wygląd próbnika z uszkodzeniami

Oba próbki, nieuszkodzony i z naruszeniami struktury, wykonane zostały z materiału o osnowie wykonanej z aluminium wzmocnionego masą uszczelniającą. Osłona składa się z grafitowych płyt, a rolę spoiwa pełni żywica epoksydowa.

4. METODYKA BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu naruszeń ciągłości struktury elementu wykonanego z materiału kompozytowego na przebieg sygnału emitowanego ciśnienia akustycznego. Do wygenerowania fali dźwiękowej wykorzystano test impulsowy w postaci uderzeń w obiekt badań za pomocą młotka modalnego. Akwizycja sygnału wykonywana była za pomocą dwóch prostopadle względem siebie ułożonych mikrofonów. Rejestracja przebiegała w stabilnych warunkach akustycznych, bez narażenia na hałas nieustalony. Następnie sygnał konwertowany był za pomocą kasy pomiarowej do pliku umożliwiającego dalsze przetwarzanie za pomocą dedykowanego oprogramowania i zapisywany na zewnętrznej karcie pamięci.

Wyposażenie badawcze użyte w trakcie eksperymentu przedstawiono na rys 7, 8 i 9.



Fig. 7. Brüel & Kjær type 3050 data acquisition module - manufacturer's diagram [2]

Rys. 7. Moduł akwizycji danych Brüel & Kjær typu 3050 – schemat producenta [2]

Dla wykonania testu impulsowego jako wzbudnik wykorzystany został młotek modalny firmy Brüel & Kjær typ 8206 o czułości 22.7 mV/N.



Fig. 9. Brüel & Kjær type 4189-A-021 microphone – manufacturer's diagram [4]

Rys. 9. Mikrofon – Brüel & Kjær typ 4189-A-021 – schemat producenta [4]

Two Brüel & Kjær type 4189-A-021 microphones, shown in Fig. 9, were used to measure the acoustic pressure. The microphones had a detection frequency range of 20 Hz – 20 kHz and a sensitivity of 50 mV/Pa when using a mutually perpendicular arrangement.

The research included in its scope the measurements of the sound pressure signal generated by undamaged and damaged elements in an impulse test. The test was performed by hitting the undamaged element as well as the damaged element in the location where the discontinuities caused by delamination were present (the layer marked as number 24 in Fig. 5). The experiment was carried out with the equipment freely suspended. This was done to prevent the recorded signal from being disrupted due to the substrate affecting the noise generated by the tested element. The time function and the frequency spectrum of the acoustic wave obtained with the use of FFT were further analyzed. The parameters names and values of the frequency analysis performed in the BK Connect software for the correct processing of the acoustic signal were shown in Table 1.

FRF was determined for the spectrum in order to reduce the influences of different force values, with which the modal hammer was used, on the obtained results.

5. RESULTS

The recorded measurement data was subject to processing using the analyzing software provided by the manufacturer of the test equipment used in the experiment - Brüel & Kjær "BK Connect" – the "Data processing" module, with which the initial analysis of the sound pressure signal in time was performed. The quality of the obtained data was assessed based on the results of this processing. Measurements where disruptions to the signals were observed, that prevent the analysis or otherwise causing the data to not be diagnostically useful, such as the pressure generated as a result of accidental double strokes, were rejected.

Fig. 10 shows the time characteristic of the acoustic pressure after inducing a signal on the undamaged element.

Do pomiaru wartości ciśnienia akustycznego zostały użyte dwa mikrofony Brüel & Kjær typ 4189-A-021, przedstawione na rys. 9, charakteryzowane zakresem rejestrowanej częstotliwości 20 Hz – 20 kHz oraz czułości 50 mV/Pa o ułożeniu wzajemnie prostopadłym.

W zakres badań wchodziły pomiary ciśnienia akustycznego generowanego przez elementy nieuszkodzone i uszkodzone w trakcie testu impulsowego. Test wykonany przez uderzenia w strukturę nieuszkodzoną oraz uderzenia w strukturę uszkodzoną w miejscu występowania nieciągłości z delaminacją (warstwa oznaczona numerem 24 na Rys 5). Eksperyment wykonany był w swobodnym podwieszeniu. Miało to na celu zapobiec zakłóceniu rejestrowanego sygnału przez wpływ podłoża na hałas generowany przez badany element. Dalszej analizie poddawany był przebieg czasowy oraz widmo częstotliwościowe fali akustycznej uzyskane z wykorzystaniem FFT. Nazwy i wartości parametrów analizy częstotliwościowej wykonanej w oprogramowaniu BK Connect do prawidłowego przetworzenia sygnału akustycznego przedstawione zostały w tablicy 1.

Tab. 1. FFT analysis parameter names and values obtained in BK Connect software

Tab. 1. Nazwy i wartości parametrów analizy FFT w oprogramowaniu BK Connect

Parameter name	Value
Signal Type	transient
Frequency Range	25.6 kHz
Frequency Resolution	32 Hz
FFT Lines	800
Average Domain	spectrum averaging
Averaging	linear all
Time Weighting	uniform
Reference Signal	impact hammer excitation
Minimum reference signal level	50 N
Output	FRF H1

Dla widma wyznaczono FRF celem redukcji wpływu różnej siły uderzeń młotkiem modalnym na prezentowane wyniki.

5. WYNIKI BADAŃ

Zarejestrowanie pomiaru zostały przetworzone z użyciem oprogramowania analizującego dostarczonego przez producenta aparatury badawczej użytej w eksperymencie - Brüel & Kjær „BK Connect” – moduł „Data processing”, za pomocą którego dokonano wstępnej analizy przebiegu sygnału ciśnienia akustycznego w czasie. Na tej podstawie dokonano oceny jakości uzyskanych danych. Odrzucono pomiary charakteryzujące zakłóceniami uniemożliwiającymi analizę lub w inny sposób nieprzydatne diagnostycznie, jak np. ciśnienie wygenerowane w wyniku przypadkowych podwójnych uderzeń.

Na rysunku 10 przedstawiono przebieg ciśnienia akustycznego w czasie po zadziałaniu wymuszenia na element nieuszkodzony.

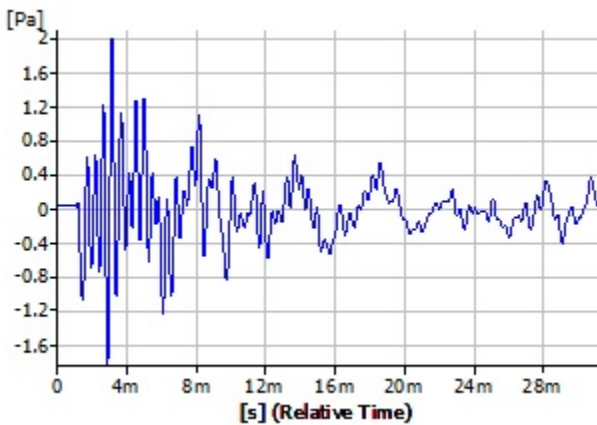


Fig. 10. The acoustic pressure signal in time domain after a force has been applied to the undamaged element

Rys. 10. Przebieg sygnału ciśnienia akustycznego w czasie po zadziałaniu wymuszenia na element nieuszkodzony

The difference in the tone of sound between the damaged and intact element during the testing was audible to the unaided ear. The sound generated by the composite element with the structural defect during the impact test was perceived as a signal with stronger treble than the sound for the composite without any damage. In order to compare the acoustic signals with each other, the frequency response functions were determined, with the input data in the form of a modal hammer impact force for the damaged and undamaged elements. The comparison of the FRF was shown in Fig. 12.

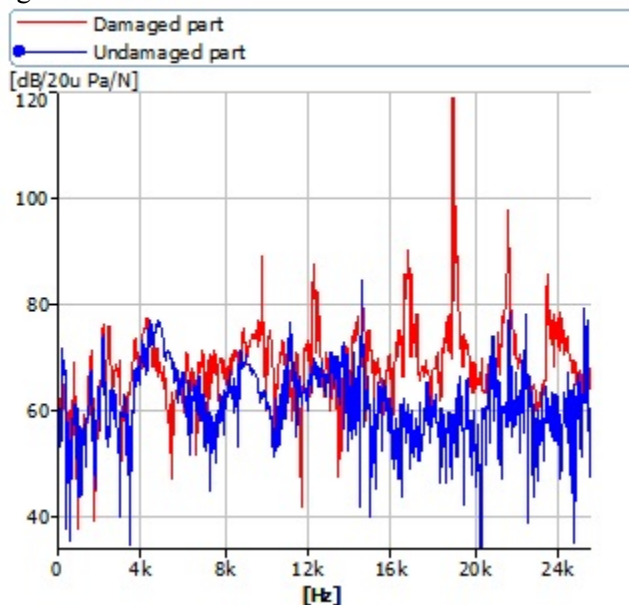


Fig. 12. FRF characteristics for the undamaged (in blue) and damaged (in red) elements

Rys. 12. Charakterystyka FRF dla elementu nieuszkodzonego (kolor niebieski) i uszkodzonego (kolor czerwony)

When analyzing Fig. 13, diagnostically significant differences can be observed in three local points of the signal:

- appearance of an additional mode for the frequency of 2.4 kHz for the damaged part (Fig. 14),

Analogiczny przebieg sygnału przedstawiony jest na rys. 11 dla elementu uszkodzonego.

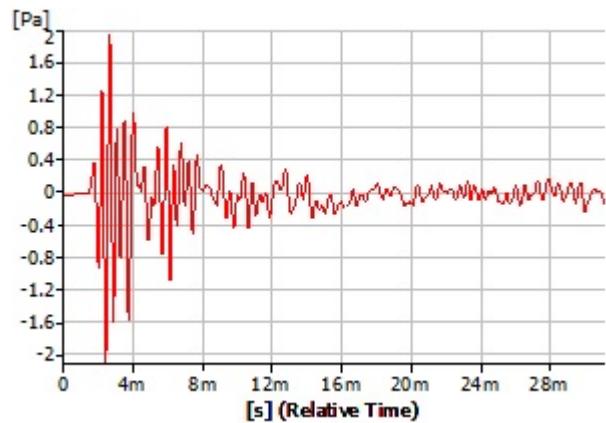


Fig. 11. The acoustic pressure signal in time domain after a force has been applied to the element with structural damage

Rys. 11. Przebieg sygnału ciśnienia akustycznego w czasie po zadziałaniu wymuszenia na element uszkodzony

W trakcie badań słyszalna była uchem nieuzbrojonym różnica w tonie dźwięku pomiędzy elementem uszkodzonym i sprawnym. Dźwięk generowany przez kompozyt z defektem w trakcie testu uderowego odbierany był jako sygnał silniejszych tonach wysokich niż kompozyt bez uszkodzeń. W celu porównania sygnałów akustycznych między sobą wyznaczono funkcje odpowiedzi częstotliwościowej, z daną wejściową w postaci siły uderzenia młotka modalnego, dla elementu uszkodzonego i nieuszkodzonego. Porównanie FRF przedstawiono na rys. 12.

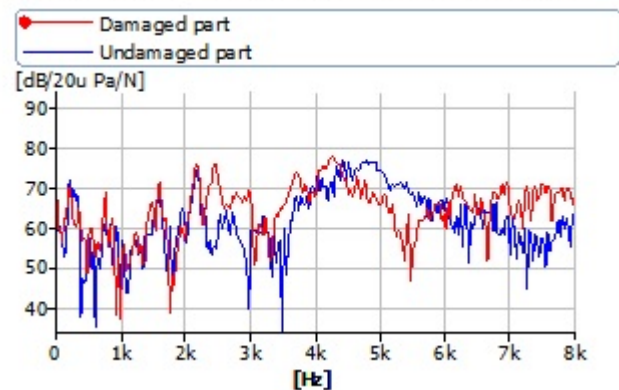


Fig. 13. FRF characteristics for the undamaged (in blue) and damaged (in red) elements in the 0-8kHz range

Rys. 13. Charakterystyka FRF dla elementu nieuszkodzonego (kolor niebieski) i uszkodzonego (kolor czerwony) w paśmie 0-8kHz

Analizując rys. 13 zaobserwować można znaczące diagnostycznie różnice w trzech punktach lokalnych sygnału:

- pojawienie się dodatkowego modu dla częstotliwości 2,4 kHz dla części uszkodzonej (rys. 14),
- przesunięcie fazowe (rys. 15)
- zmiana przebiegu charakterystyki (rys. 16).

- phase shift (Fig. 15)
- change of the signal curve (Fig. 16).

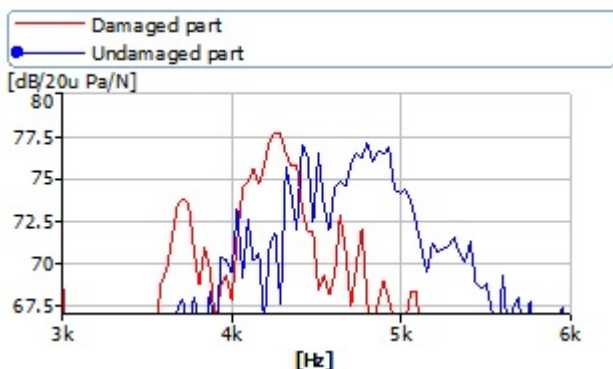


Fig. 15. FRF characteristics for the undamaged (in blue) and damaged (in red) elements – in the 3-6 kHz range

Rys. 15. Charakterystyka FRF dla elementu nieuszkodzonego (kolor niebieski) i uszkodzonego (kolor czerwony) – w paśmie 3-6 kHz

Analysis of Figure 14 allows to conclude that structural damage of the composite element causes an additional mode to appear at the 2464 Hz frequency with the same sound pressure level as for the 2176 Hz mode.

It can be observed (Figure 15) that structural damage causes a negative phase shift in the described frequency range – the frequency mode of 4928 Hz of an intact composite element has been shifted to 4256 Hz as a result of a structural defect.

In the frequency range as shown in Fig. 16, the FRF characteristics for both elements can be seen to intersect and diverge. Up to the frequency of 6 kHz, the intact composite element could be seen to produce higher amplitudes than the damaged one. On the frequencies increased beyond 6 kHz, however, the sound pressure amplitude of the undamaged element decreased while the amplitude for the structurally damaged element significantly increased. For a frequency of 7264 Hz, the difference between the sound levels of the two elements was 15 dB. Such a difference is audible even to the unaided human. RMS values of the sound pressure level (Root Mean Square) for the frequency range immediately before the characteristic intersected and after that point were compared and are presented in Table 2.

Tab. 2. Comparison of RMS values for selected frequency ranges

Tab. 2. Porównanie wartości RMS dla wybranych pasm częstotliwości

	RMS values	
	Range f: 4384-6016 Hz	Rande f: 6048-8000 Hz
Intact element	65.42 dB	55.49 dB
Damaged element	59.36 dB	60.07 dB
Variation	6.07 dB	4.58 dB

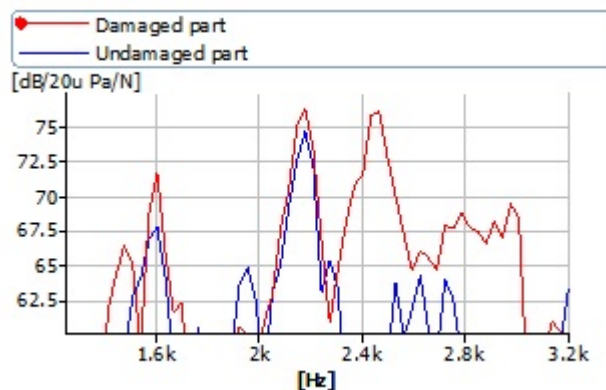


Fig. 14. FRF characteristics for the undamaged (in blue) and damaged (in red) elements – the additional mode for the frequency of about 2.4 kHz

Rys. 14. Charakterystyka FRF dla elementu nieuszkodzonego (kolor niebieski) i uszkodzonego (kolor czerwony) – dodatkowy mod dla częstotliwości 2,4 kHz

Analizując rysunek 14 można stwierdzić, że uszkodzenie struktury elementu kompozytowego powoduje powstanie dodatkowego modu dla częstotliwości 2464 Hz o poziomie ciśnienia akustycznego takim samym jak poziom dla modu 2176 Hz.

Na rysunku 15 można zaobserwować, że uszkodzenie w strukturze powoduje w opisanym paśmie ujemne przesunięcie w fazie – mod częstotliwościowy 4928 Hz elementu sprawnego technicznie uległ przesunięciu do 4256 Hz w wyniku defektu strukturalnego.

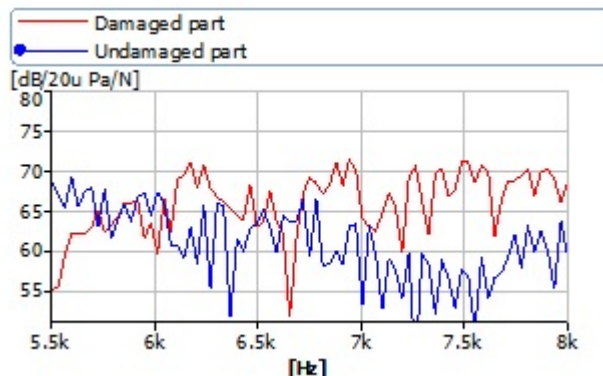


Fig. 16. FRF characteristics for the undamaged (in blue) and damaged (in red) elements – in the 5.5-8kHz range

Rys. 16. Charakterystyka FRF dla elementu nieuszkodzonego (kolor niebieski) i uszkodzonego (kolor czerwony) – w paśmie 5.5-8kHz

W paśmie przedstawionym na rys. 16 można zaobserwować odwrócenie przebiegu charakterystyk FRF dla obydwu elementów. Do częstotliwości 6 kHz większymi amplitudami charakteryzuje się przez element sprawny technicznie. W wyższych częstotliwościach zmniejsza się amplituda ciśnienia akustycznego elementu nieuszkodzonego i znacząco wzrasta ona dla elementu z defektem. Lokalnie dla częstotliwości 7264 Hz różnica między poziomami dźwięku wynosi 15 dB. Różnica na takim poziomie jest słyszalna przez człowieka uchem nieuzbrojonym. Porównano wartości skuteczne poziomu ciśnienia

The effective value took into account the large instantaneous amplitude values and is the most frequently used point measure due to its proportionality to the process power [21]. By analysing the data presented in tab. 2, it can be noted that the RMS of the damaged element in both bands does not change substantially. In comparison for the technically intact element, the effective pressure level value drops by 10 dB at the moment when the characteristics intersect each other and switch places.

The obtained measurement results, including the observable differences in the FRF characteristics, supported by auditory experiences during the test, confirm the sufficient sensitivity of the method used in this research as well as its effectiveness in detecting significant structural damage in the coatings of elements made of composite materials.

1. CONCLUSIONS

The article presented an analysis of how possible it would be to use acoustic pressure as a diagnostic parameter in the technical condition assessment of elements made of composite materials. The justification for the scientific usefulness of Research on such a diagnostic method can be justified scientifically as necessary and useful due to the increasing development of employing composite materials in all means of transport, including in rail transport.

It has been shown that in the case of extensive internal material losses, which are typically invisible from the outside to the unaided eye, the frequency response function graph of the acoustic wave signal of the damaged element was characterized by an additional mode appearing in the vicinity of 2.4 kHz. Additionally a negative phase shift in the 4-5 kHz range could be found when compared to the intact element. It also leads to the FRF characteristics between elements inverting after intersecting in the 6-8kHz range. Comparing them with the earlier 4.3-6 kHz range results, it could be stated that the effective sound pressure level value for the damaged element did not change. In the case of an intact element, the RMS for both frequency ranges differed by 10 dB. Thus, it can be concluded that the structural damage reduces the expected decrease in the effective value of the sound pressure level in the 6-8 kHz band.

The experiment was used to prove that the measurement and comparison of the resulting acoustic pressure generated by both the intact element and the element with structure defects, as a result of the provided impact force have shown such large differences in the

akustycznego (Root Mean Square, RMS) dla pasma częstotliwości bezpośrednio przed odwróceniem charakterystyki oraz po odwróceniu i przedstawiono je w tablicy 2.

Wartość skuteczna uwzględnia duże wartości amplitudy chwilowej, jest najczęściej stosowaną miarą punktową ze względu na proporcjonalność do mocy procesu [21]. Analizując dane przedstawione w tab. 2 można dostrzec, że RMS elementu uszkodzonego w obydwu pasmach się nie zmienia. Dla elementu sprawnego technicznie wartość skuteczna poziomu ciśnienia w momencie zmiany pasm spada o 10 dB.

Uzyskane wyniki, widoczne różnice w charakterystykach FRF wsparte doświadczeniami słuchowymi w trakcie badania potwierdzają czułość metody i jej skuteczność dla wykrywania dużych uszkodzeń strukturalnych w powłokach elementów wykonanych z materiałów kompozytowych.

6. WNIOSKI

W artykule przeanalizowana została możliwość wykorzystania ciśnienia akustycznego jako parametru diagnostycznego w ocenie sprawności technicznej elementów wykonanych z materiałów kompozytowych. Uzasadnieniem przydatności naukowej zbadania takiej metody diagnostycznej jest postępujący rozwój wykorzystania kompozytów we wszystkich środkach transport, m. in. w kolei.

Dowodzono, że w przypadku rozległych wewnętrznych ubytków materiałów, niewidocznych z zewnątrz okiem nieuzbrojonym, wykres funkcji odpowiedzi częstotliwościowej sygnału fali akustycznej charakteryzuje się powstaniem dodatkowego modu w okolicach 2,4 kHz, ujemnym przesunięciem fazowym w paśmie 4-5 kHz w porównaniu do elementu nieuszkodzonego. Powoduje ponadto odwrócenie charakterystyk FRF między elementami w paśmie 6-8kHz. Porównując je z pasmem wcześniejszym 4,3-6 kHz można stwierdzić, że wartość skuteczna poziomu ciśnienia akustycznego dla elementu uszkodzonego nie zmienia się. W przypadku elementu sprawnego technicznie RMS dla obydwu pasm różni się o 10 dB. Można więc stwierdzić, że uszkodzenia strukturalne powodują zmniejszającą oczekiwany spadek wartości skutecznej poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie 6-8 kHz.

Eksperyment dowiódł, że pomiar i porównanie ciśnienia akustycznego, generowanego odpowiednio przez element nieuszkodzony oraz element z defektami struktury w wyniku działania wymuszenia udarowego wykazują na tyle duże różnice w charakterystykach FRF obydwu elementów w paśmie poniżej 8 kHz, że można go ocenić jako skuteczną metodę diagnostyki obiektów technicznych wykonanych z materiałów kompozytowych.

Bibliography / Bibliografia

- [1] Brigham EO. *The fast Fourier transform and its applications*. Prentice-Hall, Inc.; 1988.
- [2] Brüel & Kjær. *Multi Purpose 6-channel Input Module - Type 3050 - Catalog data 2021*. <https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/lan-xi-daq-system/daq-modules/type-3050>.
- [3] Brüel & Kjær. *Impact Hammer - Type 8206 - Catalog data 2021*. <https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/impact-hammers/8206>.
- [4] Brüel & Kjær. *Microphone - Type 4189-A-021 - Catalog data 2021*. <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-set/4189-a-021>.
- [5] Buchalska E, Abramczyk M, Bułhak J. *Composite brake shoes FR502 on railway vehicle as a substitute for cast iron shoes: laboratory in-service test*. *Zeszyty Naukowe Transport / Politechnika Śląska* 2003;49:41–52.
- [6] Bułhak J, Buchalska E. *Composite brake shoes in Polish rolling stock: two years of in-service tests*. *Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport* 2004;54:39–45.
- [7] Cempel C. *Vibroacoustic Condition Monitoring*. Harlow, United Kingdom: Ellis Horwood Ltd; 1993.
- [8] DØSSING O. *Structural Testing: Mechanical Mobility Measurements - Handbook*. Bruel & Kjaer; 1988.
- [9] Ghobadi A. *Common Type of Damages in Composites and Their Inspections*. *World Journal of Mechanics* 2017;7:24–33. <https://doi.org/10.4236/wjm.2017.72003>.
- [10] Gutkin R, Green CJ, Vangrattanachai S, Pinho ST, Robinson P, Curtis PT. *On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses*. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2011;25:1393–1407. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.014>.
- [11] Han Y, Sun W, Zhou J, Gong D. *Vibration Analysis of Composite Multilayer Floor of High-Speed Train*. *Shock and Vibration* 2019;2019:1–13. <https://doi.org/10.1155/2019/6276915>.
- [12] Katunin A, Dragan K, Dziendzikowski M. *Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques*. *Composite Structures* 2015;127:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.080>.
- [13] Koniuszewska A, Naplocha K, Kaczmar J. *Application of lightweight polymer and metal composite elements in the transportation* 2015;22:2650–2656.
- [14] Mastriani M. *Quantum-Classical Algorithm for an Instantaneous Spectral Analysis of Signals: A Complement to Fourier Theory*. *Journal of Quantum Information Science* 2018;08:52–77. <https://doi.org/10.4236/jqis.2018.82005>.
- [15] Milewicz J, Mokrzan D, Szymański GM. *The assessment of the technical condition of SO-3 engine turbine blades using an impulse test*. *Combustion Engines* 2021;184:24–29. <https://doi.org/10.19206/CE-133872>.
- [16] Mokrzan D, Milewicz J, Szymański GM, Szrama S. *Vibroacoustic analysis in the assessment of the technical condition of the aircraft airframe composite elements*. *Diagnostyka* 2021;22:11–20. <https://doi.org/10.29354/diag/135098>.
- [17] Murphy E, King EA. *Strategic environmental noise mapping: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications*. *Environment International* 2010;36:290–298.
- [18] Randall RB. *Vibration-based Condition Monitoring*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470977668>.
- [19] Rao KD. *Signals and Systems*. Cham: Springer International Publishing; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68675-2>.
- [20] Tomaszewski F, Orczyk M. *Comparison of noise inside selected types of rail vehicles during rides*. *Pojazdy Szynowe* 2014;3:1–7.
- [21] Tomaszewski F, Szymański GM. *Wpływ luzu zaworowego na poziomy miar punktowych sygnału drganiowego w aspekcie diagnostycznym*. *Diagnostyka* 2007;3:71–74.
- [22] *Zagadnienie UIC 5T53. Redukcja hałasu. Zastosowanie kompozytowych wstawek klocków hamulcowych. Materiały robocze na posiedzenie komitetu C5/C12*. 2000.

The concept of suspended urban rail vehicle

Koncepcja miejskiego pojazdu kolei podwieszanej

The main topic of this article is the description of a concept of the authors' suspended rail vehicle. Firstly, the existing solutions were analysed with determination of their disadvantages and advantages. Subsequently, the proposed construction was described in the fields of: rolling stock build, suspension construction and guidance system. This article is based on authors' master thesis: „The concept of suspended railway engine wagon”, conducted on Mechanical Engineering Faculty of Gdansk University of Technology.

Niniejsza publikacja została poświęcona szczegółowemu opisowi proponowanej przez autorów koncepcji podwieszanego pojazdu szynowego. W pierwszej kolejności przeanalizowano istniejące rozwiązania, wraz ze wskazaniem ich podstawowych wad i zalet. Następnie opisano proponowaną konstrukcję w zakresie: budowy wagonu, sposobu jego zawieszenia oraz prowadzenia po zadanym torze ruchu. Artykuł ten powstał na podstawie pracy dyplomowej pt. „Koncepcja wagonu silnikowego kolei podwieszanej”, na wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.

1. INTRODUCTION

A constantly growing population of urban areas and connected with that transport system overload are the main reasons for new types of mass transport searching. Moreover, this new means of transport should be: independent from traffic system, safe and ecological. Known and widely used solution, compliant with such requirements, is underground railway. However, it's characterized by one main disadvantage, time- and money-consuming build, which could be even impossible because of the geological conditions.

Another, less popular solution is monorail, which vehicles move several meters above a ground level. This type of railway, like metro, is fully independent from a traffic system, also its infrastructure is less expensive (about 50% with equal maintenance costs) and shorter to build than in case of an underground railway [1]. It also requires minimal: interference in the city infrastructure and ground space (only for guideway and stations columns) or it could be a real tourist attraction.

Furthermore, this kind of vehicles can be easily equipped with autonomous system – APM (Automated People Mover). Obviously, suspended railway has got some drawbacks, like: less total capacity than metro, incompatibility with other means of transport or restricted route selection due to building density in cities (although, there are known cases in which station can be situated inside a building).

Monorail vehicles can be divided into two main groups: suspended type (car body is situated under the guideway) and straddle type (car body is situated above the guideway).

The second one is more commonly used, that is a

1. WSTĘP

Wraz ze stale rosnącą populacją aglomeracji miejskich oraz wiążącym się z tym nadmiernym obciążeniem ich systemów komunikacyjnych, poszukiwane są nowe środki transportu zbiorowego, niezależne od ruchu ulicznego, bezpieczne i ekologiczne. Od dawna znanym i szeroko wykorzystywanym rozwiązaniem, spełniającym powyższe kryteria, jest metro. Jednak charakteryzuje się ono podstawową wadą, czasochłonną i kosztowną budową, która dodatkowo może być niemożliwa do przeprowadzenia ze względu na warunki geologiczne.

Innym znanym, ale zdecydowanie mniej rozpowszechnionym rozwiązaniem jest kolej jednoszynowa, której pojazdy poruszają się po specjalnych estakadach nad powierzchnią gruntu. Kolej tego typu, podobnie jak metro, charakteryzuje się całkowitą niezależnością od ruchu ulicznego, ale koszt budowy jej infrastruktury jest o około 50% mniejszy (przy porównywalnych kosztach eksploatacyjnych) oraz zdecydowanie krótszy niż w przypadku metra [1]. Wymusza ona również mniejszą ingerencję w istniejącą infrastrukturę naziemną, zajmuje minimalną powierzchnię gruntu (jedynie filary estakad i stacji) oraz może stanowić prawdziwą atrakcję turystyczną.

Ponadto pojazdy tego typu mogą podlegać łatwej implementacji systemów autonomicznych – APM (z ang. *Automated People Mover*). Oczywiście kolej ta ma również wady, jak np.: mniejszą od metra całkowitą pojemność, całkowitą niekompatybilność z innymi środkami transportu czy ograniczony wybór trasy spowodowany gęstą zabudową miast (choć znane są przypadki umiejscowienia stacji wewnątrz budynku).

result of: simpler construction, generally higher capacity and lower infrastructure costs. The same level of guideway beam above the ground is obtained by shorter columns, however suspended vehicles are characterized by one major advantage – running surfaces are protected inside a guideway beam from weather conditions that allows safety and traction properties improvement. For that particular reason, this article focuses on the suspended railway.

2. REVIEW OF AN EXISTING SOLUTIONS

In the whole world only two basic suspended railway systems can be highlighted: Eugen Langen and SAFEGE, which are used in only three urban public transport lines. Obviously, such railways are also used in amusement parks (e.g. Ueno Zoo Monorail in Tokyo city) or at airports (e.g. H-bahn in German city of Dusseldorf), where could be applied another technical solutions but they aren't described in this article.

2.1. Eugen Langen system

The historical beginnings of monorails are dated back to the 1820s, although a real milestone in their development was an opening of a suspended monorail line between Erbfeld and Barmen in 1901 in Germany. In 1929 both cities with another five towns were merged into one city of Wuppertal, which is now located in German federal state of North Rhine-Westphalia.

In that time monorail (constructed by Eugen Langen), which had been successfully running for almost thirty years, became the first urban line of such kind. Nowadays so-called Schwebbahn (from German suspended railway) is still operating as a unique type of transport.

In its long history, there was only one serious accident (5 fatalities and 47 injured), which was caused by incautious worker who left his tools on a track. This statistic proves a high safety level of monorail [3].

In this particular system vehicle car body is asymmetrically suspended on two-wheel bogies under the track. Double flanged steel wheels prevent derailment. Asymmetrical suspension isn't stable, so the car body oscillates around its support point. Maximal swing angle is limited, in normal service, to 15°. Two rails (Wuppertal line is bidirectional) are fixed, 4 meters apart, to steel girders, which are connecting 464 supporting frames (without depots). A shift of the vehicle motion direction is realized by transfer tables and swivel arms. At the moment Wuppertal vehicle fleet consist of 31 vehicles of 15th generation, manufactured by Vossloh Kiepe (Fig. 1), which technical data according to [3, 4] are presented in Table 1 [3].

Wśród pojazdów kolei jednoszynowej można wyróżnić dwa podstawowe typy, to jest kolei podwieszaną (z ang. suspended type; pudło wagonu umiejscowione jest powyżej toru).

Drugi z wymienionych rodzajów jest bardziej rozpowszechniony, co wynika z prostszej konstrukcji, generalnie większej pojemności oraz niższych kosztów budowy infrastruktury. Do umiejscowienia toru na zadanej wysokości wykorzystywane są filary o mniejszej długości, jednak pojazdy podwieszane charakteryzuje jedna, podstawowa zaleta – całkowite zakrycie toru przed warunkami atmosferycznymi, pozwalające na poprawę bezpieczeństwa i własności trakcyjnych. Z tego względu niniejsza praca została poświęcona kolei podwieszanej.

2. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ

Na świecie można wyróżnić dwa podstawowe systemy kolei podwieszanej: Eugen Langen i SAFEGE, które znalazły zastosowanie jedynie w trzech systemach komunikacji miejskiej na całym świecie. Oczywiście kolei tego typu stosowana jest również w parkach rozrywki (np. Ueno Zoo Monorail w japońskim Tokio) czy na lotniskach (np. H-bahn w niemieckim Dusseldorf), gdzie mogą być stosowane inne rozwiązania techniczne, niebrane pod uwagę w niniejszym opracowaniu.

2.1. System Eugen Langen

Początek kolei jednoszynowych datowany jest na lata dwudzieste dziewiętnastego wieku, ale prawdziwy przełom nastąpił dopiero w 1901 roku, kiedy oddano do użytku linię kolei podwieszanej łączącej dwa niemieckie miasta: Erbfeld i Barmen. W 1929 roku miasta te zostały połączone i wraz z pięcioma innymi mniejszymi miejscowościami, dały początek jednemu miastu Wuppertal, leżącemu dziś w niemieckim kraju związkowym Nadrenia Północna Westfalia.

Kursująca już od wielu lat jednoszynowa kolej podwieszana projektu Eugena Langena stała się tym samym pierwszym na świecie miejskim środkiem transportu tego typu. Kolej ta, potocznie nazywana *Schwebbahn* (z niem. kolej podwieszana), z powodzeniem kursuje do dnia dzisiejszego, stanowiąc unikalny w skali światowej system.

W tym długim okresie czasu doszło wyłącznie do jednego poważnego wypadku (5 ofiar śmiertelnych i 47 rannych), którego przyczyną było pozostawienie przez serwisanta narzędzi na torze. Statystyka ta świadczy o wysokim bezpieczeństwie kolei podwieszanej [3].

W systemie tym pudło pojazdu zostało podwieszane asymetrycznie pod torem, a wózki wyposażono w dwa stalowe koła z podwójnym obrzeżem, które uniemożliwiają ich zejście z szyny, czyli wykolejenie. Podwieszenie uniemożliwiają ich zejście z szyny, czyli wykolejenie. Podwieszenie asymetryczne nie zapewnia pełnej stabilności jazdy, a pojazd wykonuje pewien ruch wahadłowy względem swojego punktu podparcia. W

Table 1 Technical specification of Wuppertal suspended railway

Tabela 1 Wybrane dane kolei podwieszanej w Wuppertal

Feature / Cecha	Unit / Jednostka	Value / Wartość
Line length / Długość trasy	km	13,3
Passengers per weekday / Średnia dzienna liczba pasażerów	–	65 479
Largest incline / Maksymalne nachylenie toru	%	3,02
Stops / Liczba stacji	–	20
Average transit speed / Średnia prędkość eksploatacyjna	km/h	27,5
Technical data of the 15th generation vehicles Dane techniczne pojazdów 15. generacji		
Overall length / Długość całkowita	mm	24 060
Width / Szerokość	mm	2 200
Height / Wysokość	mm	2 750
Empty vehicle mass / Masa własna pojazdu	kg	23 408
Total vehicle mass / Dopuszczalna masa całkowita	kg	38 260
Total capacity / Całkowita liczba miejsc	–	175
Seating capacity / Liczba miejsc siedzących	–	45
Standing capacity / Liczba miejsc stojących	–	130
Power supply voltage DC / Napięcie zasilania DC	V	750
Total vehicle power / Moc całkowita	kW	300
Maximum speed / Prędkość maksymalna	km/h	60
Maximum acceleration / Przyspieszenie maksymalne	m/s ²	1,2
Maximum braking deceleration / Opóźnienie maksymalne	m/s ²	2,3
Axle arrangement / Układ osi	–	B'B'+B'B'
New wheel diameter / Średnica kół nowych	mm	800 / 784
Bogie centre distance / Rozstaw środków wózków	mm	7 645
Wheelbase / Baza wózka	mm	1 280

This three-section, unidirectional, multiple-unit controlled vehicle is suspended under four powered bogies (two per outermost sections), which are controlled by two traction inverters (one per section). These inverters convert direct current to alternating current which properties, such as frequency and voltage, can be modified. One asynchronous motor simultaneously powers both wheels in the bogie and subsequently driving torque is transmitted via two-stage, helical-bevel reduction gear unit to a hollow output shaft, which is connected with wheel axle by rubber wedge coupling (Fig. 2).

Two different service brakes are used in the vehicle: electrodynamic brake and passive electro-hydraulic brake. The first one's brake force is produced by traction motor which works like generator, so this is vehicle basic brake system mainly thanks to the fact that all wheels are powered. The second one's brake force is generated by springs, so it's used also as a parking

normalnej eksploatacji kąty te nie przyjmują znacznych wartości, których górną, dopuszczalną granicę stanowi 15°. Dwie szyny (linia w Wuppertal jest dwukierunkowa) są zamocowane, w odległości 4 metrów od siebie, do stalowych kratownic rozpiętych pomiędzy 464 dźwigarami (z wyłączeniem zajezdni). Zmianę toru po którym porusza się skład umożliwiają przesuwnice lub obrotnice.

Aktualnie linię obsługuje 31 pojazdów 15. generacji, produkcji Vossloh Kiepe (rys. 1), których wybrane dane techniczne, opracowane według [3, 4], zostały zestawione w tabeli 1 [3].



Fig. 1. Vehicle of Eugen Langen system – G 15 [2]
Rys. 1. Pojazd systemu Eugen Langen – G 15 [2]

Ten trójczłonowy, jednokierunkowy, przystosowany do trakcji wielokrotnej pojazd został zawieszony na czterech wózkach napędnych (po dwa na każdy z członów skrajnych) sterowanych poprzez dwa falowniki trakcyjne (po jednym na człon), zamieniające doprowadzony do pojazdu dodatkową szyną prąd stały na zmienny o nastawialnych parametrach (takich jak napięcie, częstotliwość). W wózkach zastosowano napęd grupowy, to jest centralnie umieszczony silnik asynchroniczny napędza jednocześnie oba koła. Moment napędowy przenoszony jest przez dwustopniową, stożkowo-walcową mechaniczną przekładnię redukcyjną, której drążony wał wyjściowy połączony jest z osią koła za pośrednictwem sprzęgła z pakietami elementów metalowo-gumowych (rys. 2). Wymagana podatność pomiędzy wózkiem, a pudłem została uzyskana przy jego mocowaniu do dźwigara podwieszenia.

W pojeździe wykorzystano dwa rodzaje hamulców: hamulec elektrodynamiczny oraz pasywny hamulec elektrohydrauliczny. Pierwszy z nich wytwarza siłę hamowania na skutek prądnicowej pracy silników trakcyjnych, a więc przy występowaniu wszystkich osi napędnych, stanowi on podstawowy typ hamulca. Z kolei w pasywnym hamulcu elektrohydraulicznym siłę hamowania wytwarza zespół sprężyn, a więc pełni on również funkcję hamulca postojowego. Zaciski hamulcowe znajdują się jedynie na tylnych osiach poszczególnych wózków, a ich okładziny cierne dociskane są do zewnętrznych powierzchni bocznych

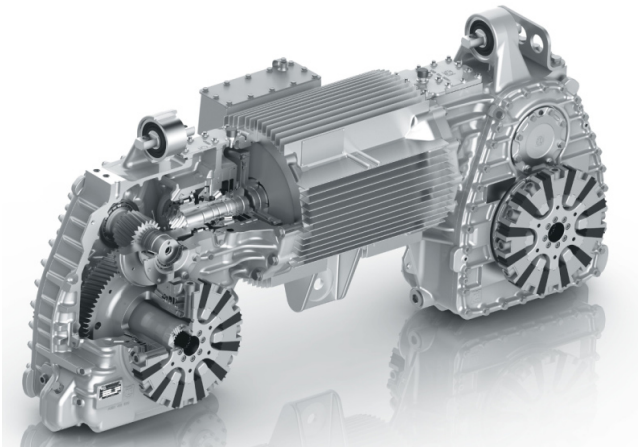


Fig. 2. Propulsion system of G 15 vehicle [5]
Rys. 2. Układ napędowy pojazdu G 15 [5]

brake. Brake units are mounted only on the bogies rear wheels and their brake linings clamp on the exterior sides of the wheel flanges. Furthermore, vehicle bogies aren't equipped in track brake (brake force is independent from wheel-rail adhesion conditions) or sanding system which enables a temporary adhesion coefficient increase [6].

Asymmetrical suspension and one-rail system is a source of intensive contact between wheel flange and rail (not only in a curved track), so it's source of noise emission and both elements wear increase. To prevent such phenomena, bogies are equipped with wheel flange lubrication system – SKF EasyRail Airless [2].

2.2. SAFEGE system

This system was invented in 1958 by SAFEGE consortium of several French companies which had been working at one line extension of Paris underground railway system. Nevertheless, that system was firstly used in Japanese Kanagawa prefecture, where almost seven kilometres long, unidirectional line (Shonan Monorail) passes through two cities: Kamakura and Fujisawa. Two tunnels, overall length of 656 m, are lined on this short route [7].

In SAFEGE system, the car body is symmetrically suspended under the one-side open, box-shaped guideway beam inside which bogies with rubber tyres run. The Shonan monorail line rolling stock fleet contains seven, three-car-body trains series 5000 manufactured by Mitsubishi (Fig. 3) and their technical data according to [7] is presented in Table 2. The second one SAFEGE monorail is located in Japan city Chiba and it was opened in 1988 [10]. This particular system is the world's longest suspended monorail system and it contains two double-track lines. At the moment, Chiba monorail line is equipped with new rolling stock fleet. Technical data according to [10, 11] of new three-section vehicles (Fig. 4) is presented in Table 3.

obrzeży kół. Ponadto w wózkach pojazdu nie zastosowano hamulca szynowego (siła hamowania niezależna od sił przyczepności) czy piasecznic, pozwalających na chwilowe zwiększenie współczynnika przyczepności [6].

Ze względu na asymetryczne podwieszenie oraz wykorzystanie pojedynczej szyny, stosunkowo często dochodzi do kontaktu obrzeża z szyną (nie tylko w czasie jazdy w łuku torowym), co wpływa na zwiększenie emisji dźwięku i zużycia obu elementów. W celu przeciwdziałania tym negatywnym zjawiskom zastosowano elektromagnetyczny system smarowania obrzeży kół – SKF EasyRail Airless [2].

2.2. System SAFEGE

System ten został opracowany już w 1958 roku przez francuskie konsorcjum firm SAFEGE, powołane w celu zaprojektowania przedłużenia jednej z linii paryskiego metra. Jednak zastosowanie znalazł on dopiero w 1970 roku w japońskiej prefekturze Kanagawa, gdzie niespełna siedmiokilometrowa, jednotorowa linia (Shonan Monorail) przebiega przez teren dwóch miast: Kamakura i Fujisawa. Na tej krótkiej trasie wybudowano dwa tunele o łącznej długości 656 m [7]. W systemie SAFEGE pudło pojazdu podwieszone jest symetrycznie pod torem, a wózki wyposażone w ogumione koła poruszają się wewnątrz otwartej od strony gruntu belki jezdnej. Linie Shonan Monorail obsługuje flota siedmiu trójwagonowych składów serii 5000 produkcji firmy Mitsubishi (rys. 3), których wybrane dane techniczne, opracowane w oparciu o [7], zostały zestawione w tabeli 2.



Fig. 3. Vehicle on Shonan Monorail line [8]
Rys. 3. Pojazd na linii Shonan Monorail [8]

Druga kolej podwieszana systemu SAFEGE znajduje się w japońskim mieście Chiba i została oddana do użytku w 1988 roku [10]. Jest to najdłuższy system podwieszanej kolei jednoszynowej na świecie, w którego skład wchodzi dwie dwutorowe linie.

Aktualnie trwa wymiana taboru obsługującego Chiba Monorail, a wybrane dane techniczne nowych dwuczłonowych pojazdów (rys. 4) zostały zestawione w tabeli 3, opracowanej na podstawie [10, 11].

Table 2 Technical specification of Shonan monorail
Tabela 2 Wybrane dane kolei Shonan monorail

Feature / Cecha	Unit / Jednostka	Value / Wartość
Line length / Długość trasy	km	6,6
Passengers per weekday / Średnia dzienna liczba pasażerów	–	30 588
Largest incline / Maksymalne nachylenie toru	%	7,4
Stops / Liczba stacji	–	8
Average transit speed / Średnia prędkość eksploatacyjna	km/h	28,8
Technical data of the Mitsubishi series 5000 vehicles (3 cars) / Dane techniczne pojazdów Mitsubishi serii 5000 (3 wagony)		
Overall length / Długość całkowita	mm	38 250
Width / Szerokość	mm	2 650
Height / Wysokość	mm	3 094
Empty vehicle mass / Masa własna pojazdu	kg	51 800
Nominal capacity / Nominalna liczba miejsc	–	228
Crush capacity / Maksymalna liczba miejsc	–	464
Power supply voltage DC / Napięcie zasilania DC	V	1 500
Total vehicle power / Moc całkowita	kW	660
Maximum speed / Prędkość maksymalna	km/h	75
Maximum acceleration / Przyspieszenie maksymalne	m/s ²	1,12
Maximum braking deceleration / Opóźnienie maksymalne	m/s ²	1,26
Bogie centre distance / Rozstaw środków wózków	mm	7 650
Wheelbase / Baza wózka	mm	1 500



Fig. 4. Vehicle on Chiba Urban Monorail Line [9]
Rys. 4. Pojazd na linii Chiba Urban Monorail [9]

A typical SAFEGE system bogie (Fig. 5) uses two different types of wheels: driving and guiding. Tractive force and vehicle weight are transmitted by the first one. The second one is used to maintain appropriate vehicle motion trajectory by rolling on the side walls of the guide beam. Both types of wheels are filled with air or nitrogen at a pressure of: 880 kPa for driving wheels and 980 kPa for guiding wheels [12]. Every car body is suspended under two bogies by trapezoidal link with oil damper. Furthermore, car body is made of aluminium which ensures weight reduction. [7]

Table 3 Technical specification of Chiba Urban monorail
Tabela 3 Wybrane dane kolei Chiba Urban monorail

Feature / Cecha	Unit / Jednostka	Value / Wartość
Line length / Długość trasy	km	15,2
Passengers per weekday / Średnia dzienna liczba pasażerów	–	44 000
Largest incline / Maksymalne nachylenie toru	%	6
Stops / Liczba stacji	–	18
Average transit speed / Średnia prędkość eksploatacyjna	km/h	30
Technical data of the Mitsubishi urban flyer type 0 / Dane techniczne pojazdów Mitsubishi urban flyer type 0		
Overall length / Długość całkowita	mm	30 800
Width / Szerokość	mm	2 580
Height / Wysokość	mm	3 715
Empty vehicle mass / Masa własna pojazdu	kg	43 000
Total capacity / Całkowita liczba miejsc	–	166
Seating capacity / Liczba miejsc siedzących	–	60
Power supply voltage DC / Napięcie zasilania DC	V	1 500
Maximum speed / Prędkość maksymalna	km/h	65
Maximum acceleration / Przyspieszenie maksymalne	m/s ²	0,98
Maximum braking deceleration / Opóźnienie maksymalne	m/s ²	1,26
Maximum braking deceleration / Rozstaw środków wózków	mm	7 650
Wheelbase / Baza wózka	mm	1 500

Typowy dla systemu SAFEGE wózek (rys. 5) wyposażony jest dwie pary kół jezdnych i prowadzących. Zadaniem pierwszych z nich jest przenoszenie sił trakcyjnych oraz utrzymanie masy pojazdu. Natomiast koła prowadzące służą nadaniu mu odpowiedniego kierunku ruchu, poprzez współpracę z bocznymi ścianami belki jezdnej. Oba rodzaje kół wypełnione są powietrzem lub azotem o ciśnieniu równym odpowiednio 880 kPa i 980 kPa [12]. Każdy wagon lub człon podwieszony jest do pary tego typu wózków przy pomocy zawieszenia trapezowego z tłumikami hydraulicznymi. Samo pudło wagonu, dla zachowania niskiej masy własnej, stanowi konstrukcję aluminiową [7].

Zasilanie elektryczne doprowadzone jest do pojazdu za pośrednictwem szyny prądowej, a sieć powrotną realizuje para dodatkowych szyn, całość zamocowana jest wewnątrz belki jezdnej (rys. 6). Belkę tę stanowi stalowa konstrukcja spawana w kształcie odwróconej litery U, z równomiernie rozmieszczonymi żebrami wzmacniającymi. Powierzchnię torów jezdnych pokrywa się zaprawą epoksydową oraz drewnem. Poszczególne odcinki belki podwieszony są pod stalowymi kolumnami, standardowo rozmieszczonymi w odstępach 30 m (minimalnie 12,48 m, maksymalnie 36,3 m). Kolumny te dokręcane są do betonowego fundamentu, wyposażonego w zbrojone filary, mogące

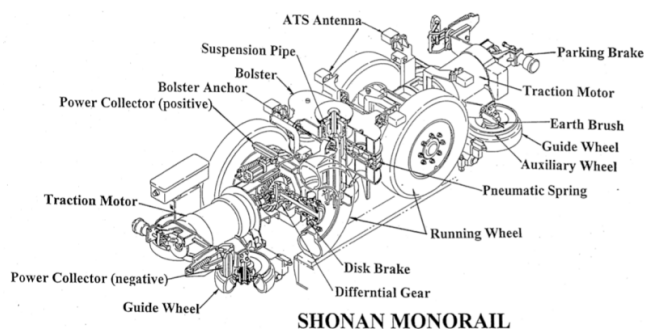


Fig. 5. Example of SAFEGE railway bogie [7]
Rys. 5. Przykładowy wózek pojazdu systemu SAFEGE [7]

Electrical power is supplied to the vehicle by so-called third rail and two additional rails are used to close current circuit. All of that is situated inside a guideway beam (Fig. 6). Such beam is U-shaped, welded steel construction with equidistant reinforcement ribs. The running surfaces are covered by epoxy mortar and wood. Guideway beam sections are suspended under columns at equal distances of 30 m (minimal 12,48 m, maximal 36,3 m). Those columns are supported on concrete foundations with reinforced concrete pillars which length could be up to 12 m. Obviously, foundation's technical data depends on soil properties [7]. Working principle of SAFEGE system switches is similar to the traditional railway but the switching time is much longer and could reach more than several seconds. Every switch is constructed from moveable partition which could become one of the guideway beams side walls.

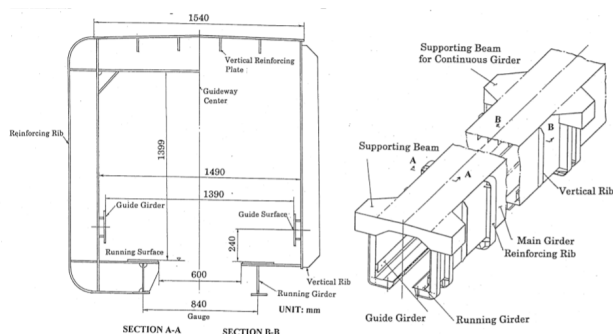


Fig. 6. Example of SAFEGE guideway girder [7]
Rys. 6. Przykładowa budowa belki jezdnej systemu SAFEGE [7]

2.3. Monorail systems comparison

According to Fig. 7, which compares both systems in a simplified way; SAFEGE system has the following benefits: symmetrical suspension (higher vehicle running stability) and running surface protection from weather conditions (stable value of adhesion coefficient).

Other differences result from steel wheel-rail contact or rubber tyre running on the surface of the guideway beam. Steel wheels, in comparison to tyres, are characterized by:

sięgać aż 12 m pod powierzchnię gruntu. Oczywiście parametry techniczne fundamentów zależą od własności podłoża [7].

System SAFEGE wykorzystuje układy zwrotnicze o podobnej zasadzie działania, co te stosowane w kolejnictwie, ale o dłuższym czasie przełączania sięgającym kilkunastu sekund. Zbudowane są one z ruchomej przegrody, stanowiącej jedną ze ścian bocznych danej belki jezdnej.

2.3. Analiza porównawcza obu systemów

Rys. 7 schematycznie porównuje oba opisane wcześniej systemy. Na jego podstawie można wskazać największe zalety rozwiązania typu SAFEGE, to jest: podwieszenie symetryczne (zapewniające większą stabilność w trakcie jazdy) oraz zapewnienie całkowitej ochrony powierzchni jezdnych przed warunkami atmosferycznymi, co przekłada się na w przybliżeniu stałą wartość współczynnika przyczepności.

Pozostałe różnice wynikają z zastosowania stalowych kół współpracujących z szyną, lub kół ogumionych poruszających się po specjalnych powierzchniach jezdnych. Pierwsze z wymienionych cechują się:

- mniejszymi oporami ruchu
- większą nośnością (rzeczywiste ograniczenie nacisku osi na tor stanowi wytrzymałość infrastruktury)
- mniejszym zużyciem
- możliwością realizacji sieci powrotnej
- większą emisją dźwięku i drgań
- niższym współczynnikiem przyczepności (wpływającym na własności dynamiczne pojazdu, w rzeczywistości ograniczone komfortem pasażerów)
- pokonywaniem toru o mniejszym kącie nachylenia.

Ponadto konstrukcja wózka wyposażonego w ogumione koła jest bardziej skomplikowana, co wynika z konieczności zabudowy dodatkowych kół prowadzących.

3. PROPONOWANE ROZWIĄZANIE

W przyjętym rozwiązaniu (rys. 8) zdecydowano się na pewnego rodzaju syntezę dotychczas omawianych systemów i tak pojazd został podwieszony symetrycznie pod wózkami, które poruszają się po stalowych szynach w zamkniętej belce jezdnej. W ten sposób połączono zalety systemu SAFEGE i kół kolejowych. Z racji podwieszenia symetrycznego zmiana toru ruchu pojazdu odbywa się z wykorzystaniem przesuwnic czy obrotnic. Przesuwnica tego typu może składać się z podwójnej belki jezdnej, w której znajdują się tory o przeciwnych promieniach krzywizny.

Do najważniejszych założeń projektowych należy zaliczyć: pokonywanie toru o znacznym kącie nachylenia, osiąganie prędkości maksymalnej przekraczającej 50 km/h oraz zapewnienie możliwie dużej pojem-

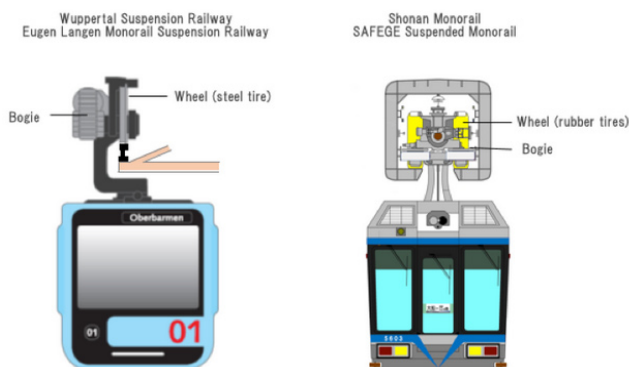


Fig. 7. Comparison of existing suspended railway systems [13]
Rys. 7. Porównanie istniejących systemów kolei podwieszanej [13]

- lower running resistance;
 - higher load capacity (pressure of a wheelset on the track is limited by the guideway beam strength);
 - less wear;
 - possibility of current return circuit implementation;
 - higher noise and vibration emission;
 - lower adhesion coefficient (which determine vehicle dynamic properties that are limited by passengers comfort);
 - less ability to run on a track with a steep gradient
- Furthermore, rubber-tyres bogies are much more complicated, thanks to necessity of mounting additional guide wheels.

3. PROPOSED SOLUTION

The solution proposed by the authors (Fig. 8) is based on a synthesis of the two aforementioned systems so the vehicle is symmetrically suspended under the bogies which are running on steel rails inside the guideway beam. This way, the advantages of steel wheels and SAFEGE system were combined.

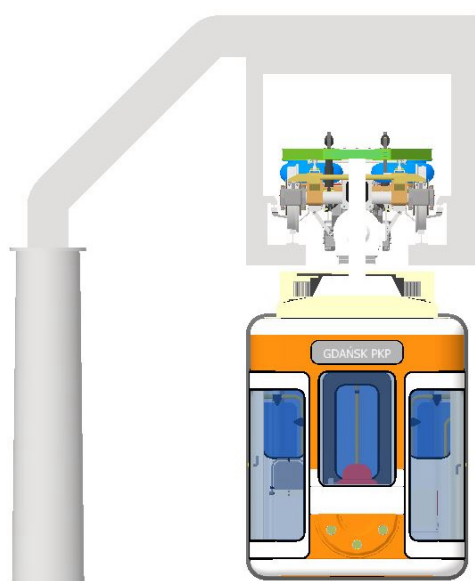


Fig. 8. Concept of the suspended railway system [14]
Rys. 8. Proponowany system kolei podwieszanej [14]

ności. Dodatkowo miejskie przeznaczenie pojazdu wymusza pokonywanie łuków torowych o małym promieniu krzywizny oraz ograniczenie poziomu natężenia dźwięku emitowanego do otoczenia. Dobre wpiśnięcie się pojazdu w łuki torowe zapewnia chociażby trójczłonowa konstrukcja (rys. 9).

Teoretycznie możliwe do uzyskania w rzeczywistej konstrukcji, wybrane parametry techniczne pojazdu zostały zestawione w tabeli 4 [14].

Table 4 Technical specification of suspended EMU
Tabela 4 Wybrane dane techniczne podwieszanej EZT

Feature / Cecha	Unit / Jednostka	Value / Wartość
Overall length / Długość całkowita	mm	32 580
Width of the vehicle car body / Szerokość pudła wagonu	mm	2 500
Height of the vehicle car body / Wysokość pudła wagonu	mm	3 025
Empty vehicle mass / Masa własna pojazdu	kg	43 611
Maximum vehicle mass / Dopuszczalna masa całkowita	kg	71 811
Total capacity / Całkowita liczba miejsc	–	376
Seating capacity / Liczba miejsc siedzących	–	80
Standing capacity / Liczba miejsc stojących	–	296
Power supply voltage DC / Napięcie zasilania DC	V	600
Total vehicle power / Moc całkowita	kW	840
Maximum speed / Prędkość maksymalna	km/h	70
Starting acceleration / Przyspieszenie pocz. rozruchu	m/s ²	1,30
Ending acceleration / Przyspieszenie końca rozruchu	m/s ²	0,45
Maximum braking deceleration / Opóźnienie hamowania maks.	m/s ²	3,60
Axle arrangement / Układ osi	–	1A'+1A'+1A'
Wheel diameter / Średnica kół	mm	700/750
Bogie centre distance / Rozstaw czopów skretu	mm	10 680
Wheelbase / Baza wózka	mm	1 600

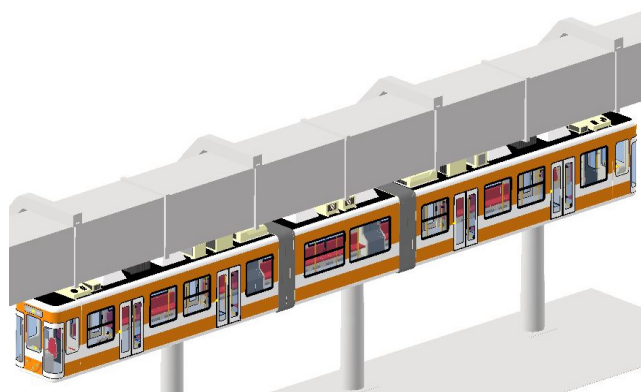


Fig. 9. View of proposed suspended railway vehicle [14]
Rys. 9. Widok ogólny pojazdu kolei podwieszanej [14]

Transfer- or turn- tables are used for track switching, because of a symmetrical vehicle suspension. Such type of a transfer table could consist of a double guideway beam with tracks curved in opposite direction.

The vehicle's ability to run on a significant inclination or in a curve with a small turning radius and maximal operational speed higher than 50 km/h are the main project assumptions. Moreover, urban destination of the vehicle requires its high capacity and low noise level emission. Mentioned good running performance in a curved track is obtained by the use of three-section vehicle construction (Fig. 9).

Theoretically possible to obtain in a real construction, vehicle technical data is presented in Table 4 [14].

Comparison between the rolling stock technical specification presented in tables 1 – 3 and proposed vehicle shows that the last one is comparable with existing ones and it's characterized by high: capacity, total power and maximal speed with good dynamic properties.

3.1. Car body

The rolling stock consists of two end sections A (Fig. 10) and one intermediate section B (Fig. 11). A particular section is suspended under one bogie. Passenger area of both sections, which interior side walls are covered by plastic panels, is equipped with several quadruple metro seats, handrails and handles. Interior floor is made of lightweight aluminium panels with two aluminium cover sheets and a corrugated core. These panels are supported by equidistant I-beams. Additionally, section A interior has got divided space adapted for needs of passengers with reduced mobility and for parents with children. Moreover, this section was equipped with two pairs of double leaf sliding plug exterior doors (one pair on each side of the car body).

On the roof of the car body A are mounted (in order from the driver's cab): the driver's cab HVAC unit, a pair of braking resistors, a static converter, a screw compressor unit, a traction inverter, a passenger HVAC unit. On the roof of car body B is mounted a pair of vehicle storage units (battery of supercapacitors).

At one end of the car body A is located the driver's cab (Fig. 12), which is separated from the passenger area by a partition wall with a pair of windows. This cabin is equipped with: driver's panel, driver seat, foldable table and additionally foldable seat. At both ends of the vehicle are mounted two pairs of glazed doors which provide good visibility and they could be used as an emergency exit. In such case, passengers are evacuated by foldable walkway to another rolling stock or to ground level via special chute.

Porównując powyższe dane z tabelami 1÷3 można stwierdzić, iż uzyskane parametry są porównywalne do istniejących rozwiązań, a na ich tle pojazd wyróżnia się wysoką: pojemnością, mocą całkowitą i prędkością maksymalną, popartą dobrymi własnościami dynamicznymi.

3.1. Pudło wagonu

Pojedynczy skład złożony jest z dwóch skrajnych członów A (rys. 10) oraz znajdującego się pomiędzy nimi członu B (rys. 11), przy czym każdy z nich podwieszony jest pod pojedynczym wózkiem. Przestrzeń pasażerską obu członów, wyłożoną panelami z tworzywa sztucznego, wyposażono w czteroosobowe fotele typu metro oraz liczne uchwyty i poręcze. Podłoga została wykonana z paneli aluminiowych (składających się z dwóch zewnętrznych arkuszy blachy przedzielonych rdzeniem z blachy falistej), wspartych o równomiernie rozmieszczone dwuteowniki. Dodatkowo w członie A wydzielono przestrzeń przystosowaną do potrzeb osób niepełnosprawnych, czy rodziców z dziećmi. Ponadto człon ten został wyposażony w dwie pary dwuskrzydłowych drzwi odskokowo-przesuwnych (po jednej na każdą ze stron).

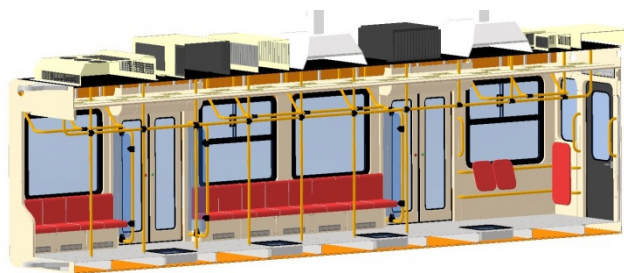


Fig. 10. Interior of the car A [14]
Rys. 10. Wnętrze członu A [14]

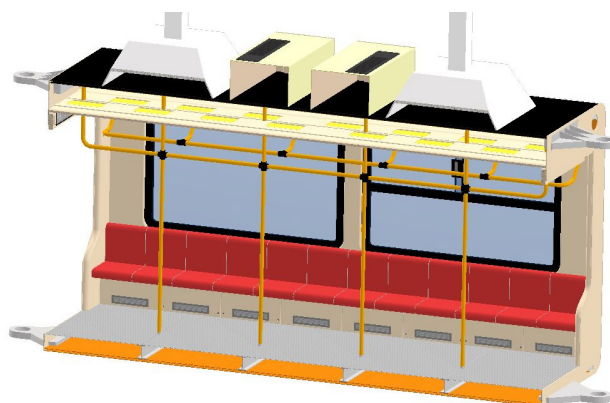


Fig. 11. Interior of the car B [14]
Rys. 11. Wnętrze członu B [14]

Na dachu członu A kolejno zamocowano (patrząc od strony czoła pojazdu): jednostkę HVAC kabiny maszynisty, parę rezystorów hamowania, przetwornicę statyczną, agregat sprężarkowy, falownik trakcyjny, jednostkę HVAC przestrzeni pasażerskiej. Z kolei na dachu członu B znajdują się dwa pojazdowe zasobniki energii (baterie superkondensatorów).

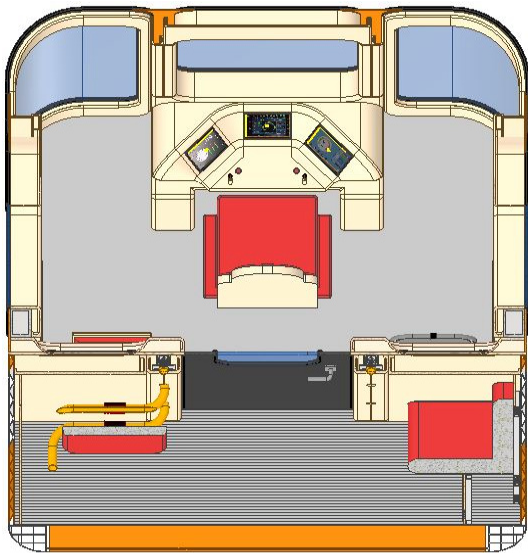


Fig. 12. Driver's cab [14]
Rys. 12. Przedział maszynisty [14]

Vehicle configuration is presented in Fig. 13, where can be seen floor's windows. Those windows are providing a possibility of the ground observation (which can make travelling more attractive) or additionally an escape way in emergency situation that is realized by pneumatic chutes.

Passenger area was relatively precisely designed to estimate surface area for standing people so their number and weight could be calculated. To do that, tramway standards from: Poland, Germany and Italy; were used, which assumptions are presented in Table 5 according to [15].

Additionally, this table contains total vehicle capacity and load (including seating passengers), which calculation was based on the aforementioned standards.

In authors' opinion the Germany norm BOStrab is the most reliable reference to real operation conditions, so vehicle load and capacity evaluation was based on it. According to that standard maximal total vehicle weight was calculated which particular element masses are presented in Table 6 [14]. Moreover, particular sections of car body weight were increased in comparison with 3D CAD model to cover devices and systems which weren't included in computer model.

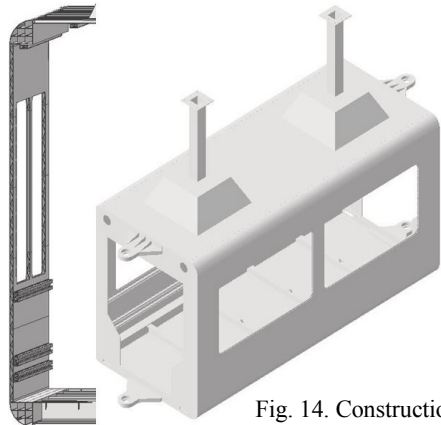


Fig. 14. Construction of the car body [14]
Rys. 14. Konstrukcja pudła wagonu [14]

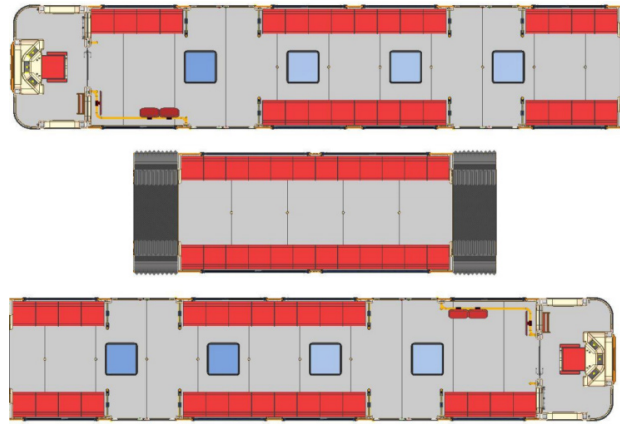


Fig. 13. Vehicle configuration [14]
Rys. 13. Konfiguracja pojazdu [14]

Człon A z jednej strony zakończony jest kabiną maszynisty (rys. 12), oddzielną od przedziału pasażerskiego ścianką z drzwiami i parą okien. Kabinę tę wyposażono w pulpit sterowniczy, fotel maszynisty, składany stolik i dodatkowy składany fotel. Od czoła pojazdu zamontowano parę przeszklonych drzwi, zapewniających dobrą widoczność oraz stanowiących drogę ewakuacyjną. W razie konieczności opuszczenia pojazdu umożliwiają one przejście do sąsiedniego składu (po rozkładanym pomoście) lub ewakuację na poziom gruntu dzięki specjalnym zjeżdżalnikom.

Na rys. 13 zaprezentowano konfigurację przestrzenną pojedynczego składu. Dobrze widoczne okna podłogowe pozwalają na obserwację otoczenia przez pasażerów (element uatrakcyjnający podróż) oraz pełnią funkcję dodatkowej drogi ewakuacyjnej, realizowanej przy użyciu zjeżdżalni pneumatycznych.

Stosunkowo dokładne zaprojektowanie przestrzeni pasażerskiej pozwoliło na oszacowanie powierzchni dostępnej dla pasażerów stojących, a więc umożliwiło określenie ich liczby i masy. W tym celu rozważono wytyczne zawarte w normach tramwajowych z trzech różnych państw: Polski, Niemiec i Włoch, zestawionymi w tabeli 5, a opracowanymi według [15].

Dodatkowo w tabeli tej zawarto wyliczoną na podstawie poszczególnych norm pojemność pojazdu i wynikające z niej obciążenie (uwzględniając pasażerów siedzących).

Na podstawie przytoczonych w tabeli danych zdecydowano się na określenie obciążenia i pojemności pojazdu według niemieckiej normy BOStrab, która zdaniem autorów najlepiej odpowiada warunkom rzeczywistym. Zgodnie z nią wyznaczono całkowitą masę maksymalną pojazdu, której składowe zostały zestawione w tabeli 6 [14]. Dodatkowo masy własne poszczególnych członów oraz wózków zostały zawyżone, w stosunku do wartości wynikających wprost z modelu CAD 3D, na poczet nieuwzględnionych instalacji i urządzeń.

Konstrukcja nośna opisanych powyżej członów została wykonana ze zgrzewanych tarciowo, ciągnionych

Table 5 Vehicle capacity according to the tramway standards
Tabela 5 Pojemność pojazdu według norm tramwajowych

Feature / Cecha	Poland Polska	Germany Niemcy	Italy Włochy
Normal conditions / War. eksploatacyjne [m ² / os]	0,15	0,22	0,25
Calculation conditions / War. obliczeniowe [m ² / os]	0,1	0,15	0,17
Passenger mass [kg] / Masa pasażera [kg]	68	75	70
Driver mass [kg] / Masa motorniczego [kg]	75	80	b/d n/a
Total number of passengers [-] / Całkowita liczba pasażerów [-]	376 +524	281 +376	257 +341
Total mass of the passengers [t] / Całkowita masa pasażerów [t]	25,6 +35,7	21,1 +28,2	18,0 +23,9

Car bodies of particular sections were made of friction stir welded aluminium extrusion panels (Fig. 14). In the same time, those panels are vehicle body shell, so total car body weight and production time can be reduced, on the other hand, a repair of such construction is time and money consuming. Aluminium extrusion profiles were welded to panels' surfaces and to them seats, handrails, interior ceiling panels and some walls panels (most of them are directly stick to the car body construction) are mounted by bolt connections. Such connection consists of special thread nut which position can be adjusted by shifting it inside a profile, so particular elements can be precisely fixed. Different build characterizes the driver's cab which construction consists of an aluminium welded frame covered with glass fiber reinforced plastic panels.

Vehicle's open floor design was ensured, thanks to a use of gangways which consist of a bridge system shielded by plastic double-corrugated bellows. Particular vehicle sections are fixed to each other by articulation joints (Fig. 15).

A particular joint contains two washers (one per section), between which is situated a composite sliding washer. This insert washer is equipped with lubrication grooves and holes, which are responsible for quiet and smooth work with low wear. Polymer cover (from top) and two-lip seal (from bottom) are used to seal the whole construction. Central bolt is responsible for construction integrity and it prevents the car body sections to climb on each other e.g. during extensive braking. Two articulation joints are used between both car body sections (top and low) that were necessary because of high vertical forces acting on both joints. Such load values result from partial support of end sections on the middle one.

3.2. Suspension system

Every vehicle section is suspended under bogie by a pair of columns (Fig. 16), which are integral car body parts. Those columns are inelastically fixed in the suspension frame, so necessary flexibility between the

paneli aluminiowych (rys. 14). Panele te, stanowiące jednocześnie poszycie zewnętrzne wagonu, pozwalają na obniżenie jego masy całkowitej oraz skrócenie poszczególnych etapów produkcyjnych. Jednocześnie naprawa, wykonanej w ten sposób zintegrowanej konstrukcji, jest praco- i czasochłonna. Dodatkowo do powierzchni paneli dospawano profile aluminiowe, stanowiące miejsca mocowania foteli, uchwytów, paneli sufitowych, czy niektórych paneli ściennych (większość jest bezpośrednio klejona do powierzchni nośnej pudła). Montaż poszczególnych elementów odbywa się za pomocą złączy śrubowych składających się ze specjalnych gwintowanych nakrętek, których położenie może być regulowane poprzez przesuwanie ich we wnętrzu odpowiednich profili, co pozwala na dokładne pozycjonowanie mocowanych elementów. Odmienną budową charakteryzuje się przedział maszynisty, gdzie funkcję konstrukcji nośnej pełni aluminiowa rama, pokryta od zewnątrz panelami z tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem szklanym. Jednoprzestrzenne wnętrze pojazdu zapewniono poprzez zastosowanie połączeń międzyczłonowych, osłoniętych przy użyciu przejścia harmonijkowego wykonanego z tworzywa sztucznego. Poszczególne człony połączone przy pomocy przegubów (rys. 15).

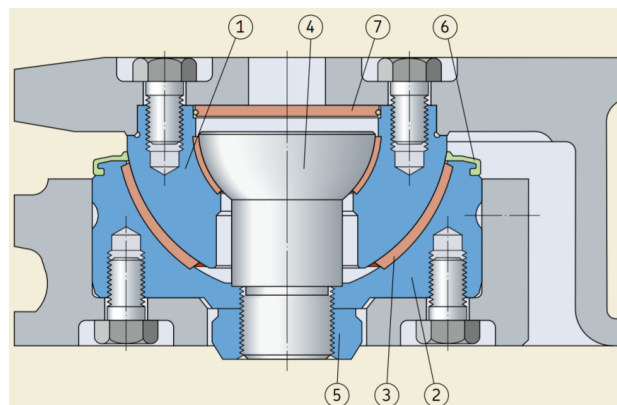


Fig. 15. Articulation joint [16]

Rys. 15. Przegub międzyczłonowy [16]

1. Shaft washer / Czasza górna;
2. Housing washer / Czasza dolna;
3. Insert of housing washer / Wkładka ślizgowa;
4. Central bolt / Śruba centralna;
5. Lock nut / Nakrętka;
6. Flexible two-lip seal / Uszczelka wargowa;
7. Polymer cover / Pokrywa polimerowa.

Przegub tego typu złożony jest z dwóch czasz (po jednej na człon) rozdzielonych kompozytowymi wkładkami ślizgowymi, wyposażonymi w rowki i otwory smarujące, które zapewniają cichą i płynną pracę oraz zmniejszają zużycie. Całość konstrukcji uszczelniona jest od góry – pokrywą polimerową, i od boków – uszczelką wargową, a jej integralność zapewnia centralna śruba, zabezpieczająca skład przed nabieganiem na siebie kolejnych członów. Pomiedzy sąsiednimi członami zastosowano dwa przeguby (dolny i górny), co było konieczne ze względu na ich

car body and the bogie is obtained by bogie's secondary suspension. In such case, a suspension frame can be treated as integral car body part.

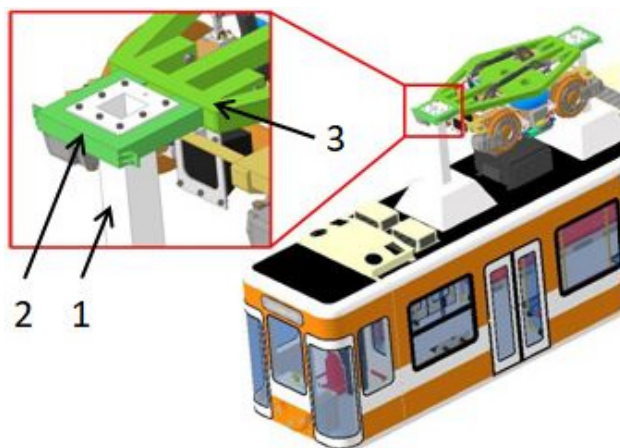


Fig. 16. Car body suspension [14]

Rys. 16. Podwieszenie pudła wagonu [14]

1. Car body column / Kolumna nadwozia;
2. Column attachment / Mocowanie kolumny;
3. Suspension frame / Stelaż podwieszenia.

Authors' suspension concept consists of: a column, a column attachment and the suspension frame. In this system, a column flange is supported by the column attachment, so the bolt connection is loaded only by longitudinal forces instead of vertical forces, which result from the total car body weight. Similarly, the bolt connection, between column attachment and suspension frame, is sheared. This type of configuration is obliged to following assembly order (Fig. 17):

- an elevation car body with use of a hydraulic lift;
- an insertion of a column attachment into the mounting holes of the suspension frame;
- bolting a column attachment to the suspension frame (bolt connection prevents relative movement between mentioned elements);
- supporting the car body on the column attachment;
- bolting a column to its attachment.

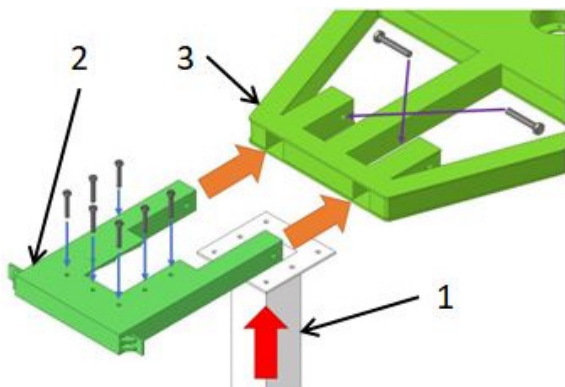


Fig. 17. Suspension system assembly [14]

Rys. 17. Montaż układu podwieszenia [14]

1. Car body column / Kolumna nadwozia;
2. Column attachment / Mocowanie kolumny;
3. Suspension frame / Stelaż podwieszenia.

znaczne obciążenie pionowe, wynikające z częściowego oparcia członów skrajnych na członie środkowym.

3.2. System podwieszenia pojazdu

Każdy z członów podwieszony jest pod wózkiem za pomocą pary kolumn (rys. 16), będących integralną częścią pudła wagonu. Kolumny te są niesprężyste mocowane w stelażu podwieszenia, a wymagana podatność pomiędzy pudłem wagonu i wózkiem, realizowana jest poprzez sprężyste oparcie stelaża podwieszenia na wózku. W takim przypadku można traktować wspomniany stelaż jako część nadwozia.

Opracowany system podwieszenia złożony jest z trzech zasadniczych elementów: kolumny, mocowania kolumny oraz stelaża podwieszenia. W systemie tym zdecydowano się na oparcie kołnierza kolumny na jej mocowaniu, dzięki czemu złącze śrubowe łączące oba elementy przenosi jedynie obciążenia wzdłużne, a nie pionowe pochodzące od masy całkowitej pudła wagonu. Również połączenie śrubowe przy stelażu podwieszenia pracuje wyłącznie na ścinanie. Jednocześnie taka konfiguracja wymusza odpowiednią kolejność montażu (rys. 17) poszczególnych elementów i tak konieczne jest:

- uniesienie pojazdu przy pomocy podnośników hydraulicznych;
- wsunięcie mocowania kolumny do otworów montażowych w stelażu podwieszenia;
- dokręcenie mocowania kolumny do stelaża (złącze śrubowe zapobiega ruchom względnym pomiędzy mocowaniem kolumny a stelażem);
- oparcie nadwozia na mocowaniu kolumny;
- dokręcenie kolumny do jej mocowania.

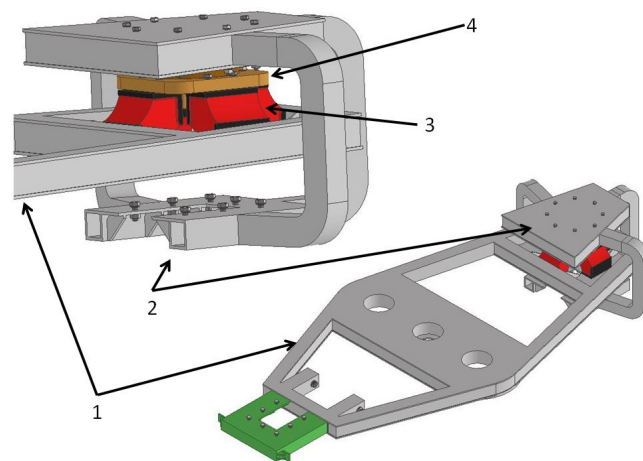


Fig. 18. Suspension frame of Jacobs bogie [14]

Rys. 18. Stelaż podwieszenia wózka Jacobsa [14]

1. Suspension frame / Stelaż podwieszenia;
2. Column attachment / Mocowanie kolumny;
3. Spring / Sprężyna metalowo-gumowa;
4. Spherical centre bowl / Czop skrzętu.

Jednym z potencjalnych problemów dotyczących wytrzymałości belki jezdnej jest wartość maksymalnego nacisku zestawu kołowego na tor, wynosząca 11,9 t.

Relatively high pressure of a wheelset on the track, maximally equals 11,9 t, could cause potential problems with strength of the guideway beam. Aforementioned value can be reduced by an increase of number of axles that could be achieved by the use of two Jacobs bogies. Those bogies construction must ensure car body sections relative movements. For this purpose, suspension system was modified (Fig. 18) by changing the middle section column attachment construction (additional car body A column would be mounted in the same way as it was described earlier). In the modified column attachment a centre pivot is used which cooperates with a spherical centre bowl (an element made of cast steel, covered inside with a friction lining) that is supported by metal-rubber springs located on the suspension frame and providing elastic connection. Centre pivot ensures not only a relative rotation of connected elements but also a transmission of loads (longitudinal, vertical and transverse). Additional advantage of such construction is a reduction of vertical load acting on articulation joints.

3.3. The bogie

The bogie construction is presented in Fig. 19 with and without suspension frame. This suspension frame is treated as an integral part of the car body, so it is a place of mounting the equipment, like dampers, which normally directly cooperate with the rolling stock car body.

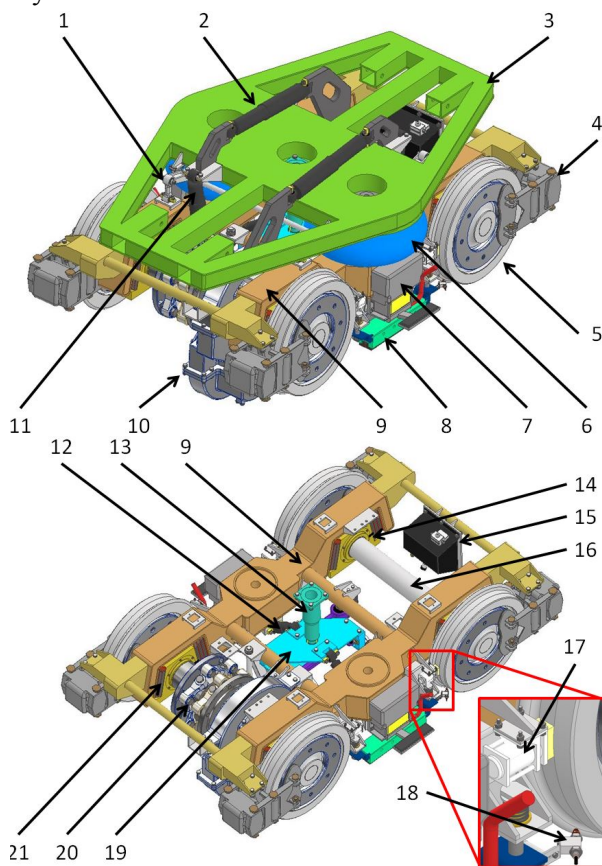


Fig. 19. Bogie components [14]

Rys. 19. Budowa wózka [14]

Wartość tą można zmniejszyć poprzez zwiększenie liczby wózków do czterech. Wymaga to jednak zastosowania dwóch wózków międzyczłonowych (tzw. wózków Jacobsa), których konstrukcja musi umożliwiać względną swobodę ruchu pomiędzy członami. W tym celu niezbędne jest zmodyfikowanie systemu podwieszenia (rys. 18), poprzez zmianę konstrukcji mocowania kolumny członu środkowego (dodatkowa kolumna członu A zostałaby zamocowana w analogiczny, do wcześniej omawianego, sposób).

W zmodyfikowanym mocowaniu kolumny zostałyby zamontowany czop skrzytu współpracujący ze swoim gniazdem (element stalowy wyłożony okładziną cierną) opartym na wielkogabarytowych sprężynach metalowo-gumowych spoczywających na stelażu podwieszenia, a zapewniających odpowiednią podatność połączenia. Czop skrzytu umożliwia nie tylko obrót elementów względem siebie, ale również przenosi obciążenia wzdłużne, pionowe i poprzeczne. Dodatkową zaletą takiej modyfikacji konstrukcji jest zmniejszenie obciążenia oddziaływującego na przeguby międzyczłonowe.

3.3. Wózek

Konstrukcję zaprojektowanego wózka prezentuje rys. 19 w dwóch wariantach, to jest kolejno z oraz bez stelaża podwieszenia. Stelaż ten, traktowany jako integralna część pudła wagonu, jest miejscem mocowania podzespołów współpracujących z nadwoziem pojazdu, takich jak np. tłumiki drgań.

Wózek, którego wybrane dane techniczne zostały zestawione w tabeli 7 [14], zostanie skrótowo opisany przy pomocy listy punktowej:

- wewnętrzna rama wózka, o trójobwodowej zamkniętej konstrukcji przestrzennej, pozwala na zmniejszenie jego masy całkowitej oraz wymiarów gabarytowych (determinujących wymiary belki jezdnej)
- krótka baza, zapewnia dobre wpisywanie się wózka w łuki torowe
- w maźnicach ułożyskowano zestawy kołowe za pomocą zespołów stożkowych łożysk tocznych, fabrycznie uszczelnionych i wyposażonych w czujniki systemu diagnostycznego (pomiar temperatury, częstotliwości drgań oraz prędkości obrotowej)
- sprężyny metalowo-gumowe typu klinowego jednocześnie pełnią funkcję usprężynowania I stopnia i prowadzenia zestawów kołowych, a odpowiedni dobór ich sztywności pozwala na quasi-radialne ustawienie się zestawów kołowych w łuku torowym (zmniejszenie kąta nabiegania)
- sprężyny pneumatyczne w II stopniu usprężynowania, współpracują ze stabilizatorem przechyłu poprzecznego nadwozia (zwiększa sztywność poprzeczną usprężynowania) oraz z hydraulicznymi tłumikami drgań

1. Anti-roll bar / Stabilizator przechyłu poprzecznego nadwozia;
2. Damper of hunting motion / Tłumik wężykowania;
3. Suspension frame / Stelaż podwieszenia;
4. Disc brake unit / Zacisk hamulca tarczowego;
5. Wheelset / Zestaw kołowy;
6. Air spring / Sprężyna pneumatyczna;
7. Current collector / Odbierak prądu;
8. Magnetic track brake / Elektromagnetyczny hamulec szynowy;
9. Bogie frame / Rama;
10. Mechanical gear / Przekładnia mechaniczna;
11. Vertical damper / Tłumik pionowy;
12. Horizontal damper / Tłumik poziomy;
13. Centre pivot / Czop skrzętu;
14. Axlebox / Maźnica;
15. Grease reservoir / Zbiornik smaru;
16. Axle of the wheelset / Oś zestawu kołowego;
17. Wheel tread cleaning unit / Blok czyszczący;
18. Lubrication nozzle / Dysza smarująca;
19. Watts linkage / Układ lemniskatowy;
20. Coupling / Sprzęgło;
21. Chevron spring / Sprężyna metalowo-gumowa typu klinowego.

The bogie, which technical specification is presented in Table 7 [14], is shortly described by a point list:

- internal, three-section, closed space frame reduces total bogie weight and dimensions (which determine guideway beam dimensions);
 - short wheelbase ensures good running performances in curved track;
 - compact tapered roller bearing units are used to support wheelsets in axleboxes housings. Every bearing is sealed in a factory and is equipped with diagnostic sensors (allowing a measurement of: rotational speed, temperature and vibration frequency);
 - primary suspension chevron springs are also used to wheelset guidance, so correct selection of springs stiffness allows a quasi-radial adjustment of wheelsets in a track curve (resulting in wheel-rail attacking angle reduction);
 - air springs in secondary suspension cooperate with anti-roll bar (which increases secondary suspension stiffness) and hydraulic dampers;
 - tractive force transmission between the bogie and the car body (suspension frame) is realized by a pair of traction rods, which are connected to the yoke in a lemniscate system (so-called Watts linkage structure). Pivot socket with friction lining is located in the yoke, to which hydraulic horizontal dampers are mounted. Pivot is fixed to suspension frame. Yoke transverse movements are limited by a pair of buffers;
 - propulsion system contains a longitudinally placed traction motor and two-stage, helical-bevel gear unit. All those elements are suspended in the bogie frame. Driving torque is transmitted from gearbox output, hollow shaft to wheelset axle (which passes through inner hole of mentioned shaft) via constant velocity transmission clutch. This clutch consists of links and inter-clutch shaft that permits
- przenoszenie sił trakcyjnych z wózka na nadwozie (stelaż podwieszenia) jest realizowane przy pomocy pary cięgien trakcyjnych połączonych z jarzmem w układzie lemniskatowym. Do jarzma, wyposażonego w wyłożone okładziną cierną gniazdo czopa skrzętu, zamocowano tłumiki drgań poziomych. Sam czop skrzętu jest sztywno zamontowany w stelażu podwieszenia. Ruch poprzeczny jarzma ogranicza para odbijaków
 - układ napędowy składa się ze wzdłużnie usytuowanego silnika trakcyjnego i dwustopniowej, stożkowo-walcowej przekładni mechanicznej, razem zawieszonych w ramie wózka. Moment napędowy przenoszony jest z wyjściowego wału drążonego przekładni na oś zestawu kołowego (przechodzącej we wnętrzu wspomnianego wału) za pośrednictwem równobieżnego sprzęgła ciągnowego z wałem międzysprzęgłowym, kompensującym osiowe, promieniowe oraz kątowe przemieszczenia pomiędzy wałem przekładni i osią. Elementy gumowe w łożach cięgien wytłumiają drgania. Również silnik z przekładnią łączy gumowe sprzęgło podatne
 - położenie osi silnika na płaszczyźnie przechodzącej przez obie główki szyn, było konieczne ze względu na duże przełożenie przekładni, a jest możliwe dzięki jednostronnemu rozcięciu belki jezdnej
 - jedynie jedna oś napędna jest efektem wykorzystania przekładni o dużym przełożeniu i silnika dużej mocy (duże wymiary gabarytowe) w wózku o wewnętrznej ramie oraz krótkiej bazie. W celu uzyskania wystarczającej mocy całkowitej pojazdu, konieczne było zastosowanie nietypowego układu osi pojazdu
 - dwie płozy elektromagnetycznego hamulca szynowego, podatnie zawieszzone w ostojnicach ramy są bezpośrednio dociskane do główki szyny, a więc generowana przez nie siła hamowania jest niezależna od zjawisk przyczepności na styku koło-szyna
 - cztery zaciski hamulca tarczowego, którego tarcze mocowane są na kołach, realizują we współpracy z hamulcem elektrodynamicznym (który wykorzystuje prądnicową pracę silników trakcyjnych do transformacji energii pojazdu w energię elektryczną gromadzoną w bateriach superkondensatorów) hamowanie robocze
 - sterowanie elektropneumatycznym hamulcem tarczowym typu bezpośredniego (w układzie pneumatycznym nie występuje przewód główny) może odbywać się za pośrednictwem sterownika hamowania wchodzącego w skład mikroprocesorowej sieci pojazdu lub też za pomocą dodatkowego, niezależnego układu elektronicznego. W ten sposób zapewniono wymaganą redundancję sterowania

- compensation of axial, radial and angular displacements. Flexible bushes in the links prevent vibration transmission. Moreover, motor is connected to gear unit via elastic clutch;
- the position of the motor axis on the plane passing through both railheads was necessary because of gearbox high ratio. Such motor placement was possible thanks to the one-sided open guideway beam;
- only one bogie axle is powered, that is due to use of high ratio gearbox and high power motor (large overall dimensions) in bogie with internal frame and short wheelbase. Therefore, to ensure high total vehicle power, unusual axle arrangement was necessary to use;
- two independent drag shoes of track brake are elastically suspended in the bogie frame. In this kind of brake, the brake force value is completely independent from wheel-rail adhesion phenomena, thanks to the fact that drag shoe is directly pressing against railhead;
- four wheel-mounted disk brake units and regenerative brake (traction motor works as a generator and enables a transformation of vehicle's energy into electric energy which is collected in battery of supercapacitors) are blended to realize service brake;
- direct electro-pneumatic disc brake system (pneumatic system is not equipped with a brake pipe) is controlled by the brake control unit, which is a part of the vehicle's microprocessor system, or by independent electronic system. In this way control redundancy is obtained;
- tread cleaning units are used for conditioning of wheel treads;
- flange lubrication system improves vehicle parameters in curved track (higher safety and lower: noise emission, motion resistance or wear of wheels and rails).

Bogie construction and strength analysis of its important components will be precisely described in another publications.

4. SUMMARY

This cursory article describes only concept of suspended vehicle, so proposed solutions should be once again thoroughly analysed. In further development of the electric suspended multiple unit, such issues as vehicle kinematics and dynamics, electronic systems or infrastructure require more precise study.

Moreover, only static strength analysis was conducted on the car body and its suspension system, so in the future those calculations should be expanded to fatigue and dynamic cases, which probably would impose changes of the construction.

Authors hope that this brief article will popularise suspended monorails and it becomes a source of

- bloki czyszczące kondycjonują powierzchnie toczone kół
- układ smarowania obrzeży, poprawia warunki ruchu w łukach torowych (zwiększenie bezpieczeństwa, zmniejszenie: hałasu, oporów ruchu oraz zużycia kół i szyn).

Szczegółowy opis konstrukcji wózka oraz analiza wytrzymałościowa jego wybranych podzespołów będą przedmiotem osobnych publikacji.

Table 7 Technical specification of vehicle's bogie
Tabela 7 Wybrane dane techniczne wózka pojazdu

Feature / Cecha	Unit / Jednostka	Value / Wartość
Track gauge / Rozstaw szyn	mm	1 435
Length / Długość	mm	2 926
Width / Szerokość	mm	1 789
Height / Wysokość	mm	1 151
Wheelbase / Baza wózka	mm	1 600
Distance of springs sets of primary suspension / Rozstaw sprężyn I st.	mm	993
Distance of spring sets of secondary suspension / Rozstaw sprężyn II st.	mm	1 068
Total mass of the bogie / Całkowita masa wózka	kg	5 607
Unsprung bogie mass / Masa niesprężynowana	kg	1 108
Suspended bogie mass by the primary suspension / Masa usprężynowana I st.	kg	4 367
Suspended bogie mass by the secondary suspension / Masa usprężynowana II st.	kg	829
Pressure of the wheelset on a track / Nacisk osi na tor	t	11,97

4. PODSUMOWANIE

Powyższy artykuł ma charakter poglądowy, a proponowane w nim rozwiązania wymagają dogłębnej analizy. W toku dalszych prac rozwojowych należałoby między innymi szerzej rozpatrzyć zagadnienia związane z kinematyką, dynamiką, elektroniką pojazdu oraz infrastrukturą.

Ponadto zarówno pudło wagonu jak i system jego podwieszenia zostały poddany wyłącznie statycznej analizie wytrzymałościowej, którą w przyszłości należałoby rozszerzyć o aspekty związane z wytrzymałością zmęczeniową, czy obciążeniem dynamicznym, co z pewnością skutkowałoby ich przeprojektowaniem.

Autorzy żywią nadzieję, że niniejsza publikacja przyczyni się w pewnym stopniu do rozpropagowania kolejowych pojazdów podwieszanych i stanie się zaczątkiem dyskusji na temat kierunków dalszego rozwoju ich konstrukcji oraz zastosowania w przestrzeni miejskiej.

discussion about further development of possible constructions and urban applications.

BIBLIOGRAPHY / BIBLIOGRAFIA

1. Hino Y.: *Monorail and Urban development In Japan*; Japan Monorail Association – prezentacja multimedialna.
2. Broszura informacyjna firmy SKF: *Technical face lift AT Wuppertal Suspension Railway*, wrzesień 2018.
3. Strona internetowa: <https://schwebbahn.de/en/> (dostęp na 10.10.2020).
4. Broszura informacyjna firmy Knorr-Bremse AG: *Wuppertal, Schwebbahn*; 2016.
5. Strona internetowa: https://press.zf.com/press/de/releases/release_2758.html (dostęp na 17.09.2019).
6. Ebmeyer J., Zwank M.: *Neue Fahrzeuge der Wuppertaler Schwebbahn*; prezentacja firmy Vossloh Kiepe.
7. Broszura informacyjna: *Outline of Shonan Monorail*; Shonan Monorail, LTD.
8. Strona Internetowa: <http://www.citytransport.info/Monorail.htm> (dostęp na 17.09.2019).
9. Strona internetowa: <https://railf.jp/event/2018/12/21/134500.html> (dostęp na 17.09.2019).
10. Demery L.: *Monorails in Japan: An Overview* publictransit.us Special Report No. 9; June 22,2005.
11. Raport techniczny Mitsubishi Heavy Industries: *Chiba Urban Monorail „Urban Flyer”*; Vol.47 No.2 (2010).
12. Liu X., Sun H., Liu F.: *Study on the Application and Development of Monorail Transit System*; IJERT Vol 3 Issue5.
13. Strona internetowa: <https://kamakura-enoshima-monorail.jp/fun/index.html> (dostęp na 07.10.2020).
14. Jędrzejewski P., Kuczyk M.: *Koncepcja wagonu silnikowego kolei podwieszanej*; praca magisterka, Gdańsk 2020.
15. Uhl T., Hanc A., Długaszek D., Szromek A.: *Rzeczywiste obciążenie tramwajów w ruchu miejskim*; TTS, 4/2004.
16. Publikacja firmy SKF: *Railway technical handbook, volume 1*; lipiec 2011.