

Rail Vehicles quarterly is covered by the patronage
of the Transport Committee of the Polish Academy of Science

Kwartalnik Pojazdy Szynowe objęty jest patronatem
Komitetu Transportu Polskiej Akademii Nauk

ISSN 0138-0370

Contents/Spis treści

Nr 3/2021

<i>Durzyński Z.</i> : Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 2) (Napędy trakcyjne pojazdów szynowych zasilane wodorem (cz. 2))	1
<i>Łasińska N.</i> : Agile method of managing railway transport projects (Zwinna metodyka zarządzania transportowymi projektami kolejowymi)	12
<i>Kuczyk M., Jędrzejewski P., Załuski P.</i> : Evaluation of suspended rail vehicle movement Parameters (Ocena parametrów ruchowych pojazdu kolei podwieszanej).....	20
<i>Milewicz J., Mokrzan D., Szymański G. M.</i> : Methods for reducing the number of collisions between wild animals and rail vehicles (Sposoby redukcji liczby kolizji dzikich zwierząt z pojazdami szynowymi).....	30
<i>Mokrzan D., Szymański G. M.</i> : Time-frequency methods for processing non-stationary diagnostic vibroacoustic signals (Czasowo-częstotliwościowe metody przetwarzania niestacjonarnych diagnostycznych sygnałów wibroakustycznych)	44

R a i l V e h i c l e s

The scientific–technical quarterly journal dedicated to problems of designing,
construction and researches of railway stock

P o j a z d y S z y n o w e

Kwartalnik naukowo–techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji,
budowy i badań taboru szynowego

Editorial/Redakcja:

Sieć Badawcza Łukasiewicz –
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”
61-055 Poznań, Warszawska 181
tel. 61 66-41-488 fax: 61-653-40-02
mail: redakcja@tabor.lukasiewicz.gov.pl

Włodzimierz Gąsowski

(Editor-in-chief / Redaktor Naczelny)

Ireneusz Pielecha

(Vice-editor-in-chief / Z-ca Red. Naczelnego)

Zbigniew Durzyński

(Science Editor / Redaktor Naukowy)

Władysław Stankowski

(Technical Editor / Redaktor Techniczny)

Grażyna Barna, Zygmun Giziński, Jerzy Madej,

Krzysztof Magnucki, Marian Medwid

(Associate Editors / Redaktorzy Tematyczni)

Krzysztof Magnucki

(Statistical Editor / Redaktor Statystyczny)

Alicja Iwanowska, Jan Kalinowski, Jerzy Lewiński,

Katarzyna Zgodzińska, Joanna Tomaszewska

(Proofreading Editors / Redaktorzy Językowi)

Editor / Wydawca

ŁUKASIEWICZ Research Network –

Rail Vehicles Institute „TABOR”

Sieć Badawcza Łukasiewicz –

Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

Scientific Board / Rada Programowa

Chairman / Przewodniczący: Jerzy Merkis

Andrzej Chudzikiewicz, Jan Czerwiński (Szwajcaria),

Andrzej Fórmanik (W.Brytania), Juraj Gerlici

(Słowacja), Stanisław Guzowski, Tomasz Hueckel

(USA), Evgeenij Kossov (Rosja), Valeriy Kuznetsov

(Ukraina), Otmar Krettek (Niemcy), Nikolay Lukov

(Rosja), Janusz Mielniczuk, Paweł Piec, Adam Szela

Franciszek Tomaszewski, Mirosław Wyszyński

(W.Brytania)

Reviewers / Recenzenci

Grażyna Barna (Ł-TABOR), Zbigniew Durzyński

(Ł-TABOR), Włodzimierz Gąsowski (Ł-TABOR),

Iwona Grabarek, Andrzej Grzyb, Marek Idzior, Marian

Kaluba (Ł-TABOR), Ewa Kardas-Cinal, Krzysztof

Magnucki (Ł-TABOR), Janusz Mielniczuk

(Ł-TABOR), Marian Ostwald, Ireneusz Pielecha,

Marek Sobaś (Ł-TABOR), Adam Szela, Antoni

Świątek, Eugeniusz Świtoński, Krzysztof Zboński,

Wiesław Zwierzycki

Print/Druk:

ODL Sp. Z o.o.
60-456 Poznań, ul. Straży Ludowej 15
tel. (061) 876 89 08

Projekt okładki : Hanna Stawecka

- * All articles published in the quarterly are reviewed / Wszystkie artykuły zamieszczane w kwartalniku są recenzowane
- * Editorial team reserves the right to shorten the received articles / Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów nadesłanych artykułów
- * Editorial team does not return the articles which were not ordered / Artykułów nie zamówionych redakcja nie zwraca
- * The original version of the journal is the printed version. An electronic version is also available / Pierwotną wersją czasopisma jest wersja drukowana, dostępna jest również wersja elektroniczna
- * Editorial team is not responsible for the content and the form of advertisements / Za treść i formę ogłoszeń redakcja nie odpowiada
- * The editors take care of maintaining the ethical standards in scientific publications and take all steps against the negligence and failures in this area / Redakcja dba o utrzymanie standardów etycznych w publikacjach naukowych i podejmuje wszelkie kroki przeciwko zaniedbaniom i uchybieniom w tym zakresie
- * The author makes a statement aimed at preventing ghostwriting/guest authorship practices / Autor składa oświadczenie, którego celem jest zapobieganie praktykom ghostwriting/guest authorship.

Artykuły z czasopisma rejestrowane są w bazie danych **BAZTECH** zawierającej polskie opracowania techniczne : www.baztech.icm.edu.pl

oraz

Polskiej Bazy Cytowań



POL-index
Polska Baza Cytowań

Czasopismo indeksowane w międzynarodowej bazie **IC Journal Master List-Index Copernicus**

ICV 2019 = 73,57

www.indexcopernicus.com

Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 2)

Napędy trakcyjne pojazdów szynowych zasilane wodorem (cz. 2)

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. The first part of the paper has been published in the previous issue of the Rail Vehicles.

W artykule przedstawiono powody uruchomienia działań mających na celu wdrożenie nisko-emisyjnych 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. Następna 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.

Pierwsza część artykułu została opublikowana w poprzednim numerze Pojazdów Szynowych.

Keywords: rail vehicle, traction drive, hydrogen powered

Słowa kluczowe: pojazd szynowy, napęd trakcyjny, zasilanie wodorem

5. The action plans launched domestically

At present, in Poland neither the hydrogen-powered rail vehicles nor any hydrogen fueling station are available. Nevertheless, the Polish rolling stock manufacturers, carriers and fuel producers are starting discussion on this matter. Three consortia notified the attempts to build hydrogen-powered locomotives:

- PESA Bydgoszcz and PKN Orlen. On December 12, 2019, these parties have signed a letter of intent on cooperation. PESA Bydgoszcz and PKN Orlen intend to introduce their locomotives (electric-hydrogen hybrids) to Reda-Hel passenger line (railway line No. 213). This line is located in the Pomeranian Province, where the Gdańsk-Gdynia-Sopot Metropolitan Area Association in 2019 signed a declaration establishing the Pomeranian Hydrogen Valley [23].

5. Plany działań uruchomione w kraju

Obecnie w Polsce nie ma jeszcze pojazdów szynowych napędzanych wodorem ani stacji, w której można zapatrzyć się w takie paliwo, jednak polscy producenci taboru, przewoźnicy i producenci paliwa rozpoczynają rozmowy w tym kierunku. Próbę zbudowania lokomotyw napędzanych wodorem zasygnalizowały trzy konsorcja:

- PESA Bydgoszcz i PKN Orlen. Strony podpisały 12 grudnia 2019 r. list intencyjny w sprawie współpracy. PESA Bydgoszcz i PKN Orlen chcą wprowadzić swoje lokomotywy (hybrydy elektryczno-wodorowe) do obsługi linii pasażerskiej na odcinku Reda - Hel (linia kolejowa nr 213). Linia ta znajduje się na terenie województwa pomorskiego, gdzie w 2019 roku podpisana została deklaracja zakładająca powołanie Pomorskiej

Such an initiative complies with the position of the Office of Rail Transport, assuming a pilot project to be launched, that should engage at least three entities: a hydrogen producer, a rolling stock manufacturer and a railway carrier, which will operate a hydrogen-powered vehicle.

- PKP Cargo (the carrier), Jastrzębska Spółka Węglowa (fuel manufacturer) and Fabryka Pojazdów Szynowych H. Cegielski (rolling stock manufacturer). The project is specifically oriented to freight transport. The main contractors of the project believe that the traction vehicles built by the consortium should use hydrogen extracted from the coke oven gas. This would be conducive to the situation in which the PKP Cargo could increase its energy security, decrease the negative railway impact on the environment and reduce the energy cost by about 30%. The hydrogen locomotives would run on strictly defined, mainly freight routes, delivering coal to the power plants. Taking into account that such transport is highly regular in terms of relation, time and size of the cargo, the problem of hydrogen storage would be solved. The hydrogen fuel storage facilities would be located at the end of the railway line section.
- Lotos Lab and Lotos Kolej. The project is related to hybrid shunting locomotives. Both companies intend to build two prototype locomotives based on shunters. They will be electrically powered with lithium-ion batteries. The alternative drive of one of them will be diesel, while the other will be provided with hydrogen propulsion.

Trajectory of the TEN-T rail corridors through Poland is nearly equal to the network of the car traffic roads. Therefore, hydrogen might be distributed both to TEN-T road and rail networks from the same HRS base stations [17].

The work on hydrogen application is also carried out by PKP Energetyka, that together with Deutsche Bahn presented a fuel cell at the TRAKO railway fair. In the nearest future, it may power the vehicles running on non-electrified sections and displace the diesel locomotives. PKP Energy is involved in several hydrogen projects, including the ones designed for the Reda-Hel railway line, where construction of the traction network is difficult [23], [27].

It is expected that the hydrogen drive may be disseminated in Europe over the period 2030-2050. According to UTK (Rail Transport Office), the time when the first hydrogen-powered railway vehicles shall be launched in Poland depends, first of all, on timing and feasibility of hydrogen supply station construction. According to the information of UTK, the first such investments are planned for 2021, that should enable to put into operation the first hydrogen cells-powered vehicles in 2022.

The energy companies intend to launch hydrogen

Doliny Wodorowej przez Stowarzyszenie Obszar Metropolitalny Gdańsk-Gdynia-Sopot [23].

Taka inicjatywa jest zgodna ze stanowiskiem UTK, wg którego należy uruchomić pilotażowy projekt obejmujący przynajmniej trzy podmioty: producenta wodoru, producenta taboru i przewoźnika kolejowego, który będzie wykorzystywał napędzany wodorem pojazd.

- PKP Cargo (przewoźnik), Jastrzębska Spółka Węglowa (producent paliwa) i Fabryka Pojazdów Szynowych H. Cegielski. Projekt jest ukierunkowany na przewozy towarowe. Głównymi wykonawcami tego projektu są: Pojazdy trakcyjne zbudowane przez to konsorcjum wykorzystywałyby wodór wyodrębniony z gazu koksowniczego, dzięki temu przewoźnikowi PKP Cargo udałooby się zwiększyć swoje bezpieczeństwo energetyczne, zmniejszyć negatywne oddziaływanie kolei na środowisko oraz obniżyć koszty energii o około 30%. Lokomotywy wodorowe kursowałyby na ściśle określonych trasach, głównie towarowych, np. dowożąc węgiel do elektrowni. Dzięki temu, że takie przewozy są bardzo regularne pod względem relacji, czasu i wielkości ładunku, rozwiązany byłby problem magazynowania wodoru. Magazyny paliwa wodorowego byłyby zlokalizowane na końcu odcinka linii kolejowej.
- Lotos Lab i Lotos Kolej. Przedsięwzięcie dotyczy hybrydowych lokomotyw manewrowych. W zamierzeniu obu spółek mają powstać dwie prototypowe lokomotywy, które powstaną na bazie lokomotyw manewrowych. Lokomotywy te będą miały napęd elektryczny z bateriami litowo-jonowymi, natomiast napęd alternatywny będzie w jednej z lokomotyw spalinowy, a w drugiej wodorowy.

Przebieg korytarzy kolejowych TEN-T przez Polskę jest niemal tożsamy z drogowymi, zatem lokalizacja bazowych stacji HRS dla potrzeb transportu kolejowego mogłaby połączyć dystrybucję wodoru na obu sieciach TEN-T drogowej i kolejowej [17].

Prace nad wykorzystaniem wodoru prowadzi także PKP Energetyka, która na targach kolejowych TRAKO zaprezentowała ogniwo paliwowe wspólnie z Deutsche Bahn. W niedalekiej przyszłości może zasilać pojazdy na odcinkach niezelektryfikowanych i wyprzeć lokomotywy spalinowe. PKP Energetyka zaangażowana jest w kilka projektów wodorowych, m.in. dla linii kolejowej Reda – Hel, gdzie budowa sieci trakcyjnej jest utrudniona [23], [27].

Upowszechnienie napędu wodorowego w Europie przewidywane jest w latach 2030÷2050. Według UTK rozpoczęcie eksploatacji w Polsce pierwszych pojazdów kolejowych napędzanych wodorem zależy przede wszystkim od terminu i możliwości budowy stacji

production facilities, allowing to produce 21 kg of hydrogen per hour, but at present recipients of this fuel are missing [19].

JSW is planning to build a manufacturing plant and a production line of the carriages and hydrogen-powered locomotives. Therefore, a letter of intent was signed with PKP Cargo, with a view to develop hydrogen propulsion technology, and another letter of intent with Rail Vehicles Factory (Cegielski) for modernization of diesel locomotives [15].

The project "Energy Policy of Poland" (PEP2040) assumes an increase in the use of waste materials for production of biocomponents and biomethane for transport purposes and dissemination of alternative biogas purification technologies to achieve its parameters equal to biomethane. The biohydrogen so obtained may be used in co-hydrogenation and hydrogenation processes [2].

The Polish fuel concern declares construction of a hydrogen purification installation to be built at the ORLEN Południe plant in Trzebinia. Start-up of production of clean hydrogen fuel, which would be used to power vehicles, including locomotives planned at PESA, is scheduled for 2021.

PKN ORLEN, one of major hydrogen producers in the world, already manufactures nearly 45 tons of high-quality hydrogen per hour and sells it currently for purposes of fueling the automobiles.

Other Polish fuel companies also participate in interesting hydrogen projects. LOTOS begins cooperation with Toyota, with a view to build the refueling stations for supplying this environmentally friendly fuel. Preliminary discussion with Toyota was also undertaken by our gas giant PGNiG, which intends to become one of the leaders in hydrogen technologies development in Poland. The considered activity includes production, storage, vehicle propulsion and distribution network to serve customers.

At PESA Bydgoszcz Inc. a project of a shunting locomotive provided with hydrogen fuel cells is being developed. The hydrogen locomotive is based on the SM42 one, from which the bogie and locomotive frames will be used. The other parts, such as wheelsets, asynchronous traction motors and the transmission, will be new. Two 85 kW fuel cells will be used. Capacity of the tanks is sufficient for 175 kg of hydrogen. Duration of locomotive refueling will not exceed 20 minutes.

What concerns the market potential, the "Eastern Poland" program should be mentioned, which assumes an increase in rail transport availability in this region, as well as the "KolejPlus" program, aiming in deliveries of at least 200 hydrogen-powered vehicles.

Apart from the project of deep modernization of the locomotive and replacement of the drive with hydrogen, PESA also develops an electric multiple unit with two drive types. One will be powered from the over-

zasilania wodorem. Z informacji posiadanych przez UTK wynika, że pierwsze tego typu inwestycje zostały zaplanowane na 2021 rok, co pozwoli na wprowadzenie do eksploatacji pierwszych pojazdów zasilanych ogniwami wodorowymi w 2022 r.

Spółki energetyczne chcą uruchomić instalacje produkcji wodoru, pozwalające na wytworzenie 21 kg wodoru w ciągu godziny, ale dziś brakuje odbiorców tego paliwa [19].

JSW ma w planach budowę fabryki i linii produkcyjnej wagonów oraz lokomotyw z napędem wodorowym. W tej sprawie podpisany został list intencyjny z PKP Cargo, co pozwoli na rozwój technologii napędu wodorowego oraz list intencyjny z Fabryką Pojazdów Szynowych (Cegielski) w zakresie modernizacji lokomotyw o napędzie diesla [15].

W projekcie „Polityka Energetyczna Polski” (PEP2040) zakłada się zwiększenie wykorzystania surowców odpadowych do wytwarzania biokomponentów oraz biometanu zużywanego w transporcie oraz upowszechnienie alternatywnych technologii oczyszczania biogazu do parametrów biometanu, a także stosowanie pozyskanego biowodoru do procesów współwodornienia i uwodornienia [2].

Polski koncern paliwowy zapowiada budowę instalacji do oczyszczania wodoru, która powstanie w zakładzie w Trzebinie, należącym do spółki ORLEN Południe. Rozpoczęcie produkcji czystego paliwa wodorowego, które wykorzystywane byłoby do napędu pojazdów, w tym w lokomotywach planowanych w PESA, przewidziane jest na rok 2021.

PKN ORLEN, jeden z największych producentów wodoru na świecie, już teraz w procesie produkcyjnym wytwarza blisko 45 ton wysokiej jakości wodoru na godzinę i na razie prowadzi sprzedaż tego surowca dla aut osobowych.

W ciekawych projektach wodorowych udział biorą także inne polskie firmy paliwowe. LOTOS zaczyna współpracę z Toyotą, na mocy której ma zbudować stacje do tankowania tego ekologicznego paliwa. Wstępne rozmowy z Toyotą podjął również nasz gigant gazowy PGNiG, który chce stać się jednym z liderów rozwoju technologii wodorowych w Polsce. W badanych obszarach jest produkcja, magazynowanie, napędy pojazdów i sieć dystrybucji do klientów.

W PESA Bydgoszcz S.A. powstaje projekt lokomotywy manewrowej z wodorowymi ogniwami paliwowymi. Podstawą do opracowania lokomotywy wodorowej jest lokomotywa SM42, z której wykorzystane zostaną ramy wózków i ostoja pojazdu. Inne elementy, jak zestawy kołowe, trakcyjne silniki asynchroniczne oraz przekładnia, będą nowe. Zastosowane zostaną dwa ogniwa paliwowe o mocy 85 kW, a pojemność zbiorników wystarczy na 175 kg wodoru. Czas tankowania lokomotywy nie przekroczy 20 minut.

W kontekście potencjału rynkowego trzeba jeszcze

head line, while the other from fuel cells. It will be a 3-car version with 172 seating and 182 standing passengers. Its configuration has been agreed with self-governments and complies with their needs. The range of the hydrogen-powered vehicle should amount approximately to 600 kilometers, with the cells' power equal to 340 kW. The Polish manufacturer is currently negotiating the delivery of this type of vehicle with one of the carriers [24].

6. Hydrogen technologies for rail transport in the National Reconstruction Plan (NRP) project

Provisions of the National Reconstruction Plan project (and Resilience Enhancement) [16] related to development of hydrogen fuel technology as an alternative energy source, should be referred to two domains:

- the infrastructure suited to distribute the fuel to various customers;
- the rolling stock using large quantities of the fuel.

By submitting the National Reconstruction Plan to the European Commission, Poland will apply for over EUR 12.1 billion from the Restaurant Revitalization Fund loan. These means will be destined, first of all, to additional financing of the operations related to climate transformation and digitalization. Together with the reforms connected to them, they include such projects as:

- the investments in rail transport in cities;
- the investments in regional passenger rolling stock.

As part of the planned economic recovery, based on the approved strategies described below, the measures related to transport will also be implemented:

- Polish Hydrogen Strategy until 2030, with further course until 2040.

This document will be adopted in the form of a resolution of the Cabinet and will define the main goals of development of a low-emission hydrogen economy in Poland. It will serve as a basis for launching two programs supporting development of the hydrogen economy at the National Fund for Environmental Protection and Water Management, i.e. "New Energy" and "Green Public Transport" (phase I) in 2021.

- Sustainable Development Strategy in Transport until 2030.

Based on this strategy, the investments into hydrogen technologies for the production, storage and transportation of hydrogen will be launched. Hydrogen charging stations will be built, intended for electric vehicles, including the rail ones.

Having in mind proper funding of implementation of the Polish Hydrogen Strategy, the programs are planned to be launched that shall support the research and development of the hydrogen technologies financed from national funds, including start-up, in 2021, of a dedicated Program for Hydrogen Technology Support at the National Center for Research and

wspomnieć o programie „Polska Wschodnia”, który zakłada wzrost dostępności transportu kolejowego dla tego regionu oraz o programie „Kolej Plus”, którego efektem ma być co najmniej 200 pojazdów zasilanych wodorem.

Niezależnie od projektu głębokiej modernizacji lokomotywy i wymiany napędu na wodorowy PESA pracuje również nad elektrycznym zespołem trakcyjnym z dwoma rodzajami napędu. Jeden będzie zasilany z sieci trakcyjnej, a drugi z ogniw paliwowych. Ma być to wersja 3-członowa ze 172 miejscami siedzącymi i 182 stojącymi. Jego konfiguracja została uzgodniona z samorządami i odpowiada ich potrzebom. Zasięg pojazdu zasilanego wodorem ma wynosić ok. 600 kilometrów, a moc ogniw wyniesie 340 kW. Polski producent prowadzi obecnie rozmowy z jednym z przewoźników na dostawy tego typu pojazdów [24].

6. Technologie wodorowe dla transportu szynowego w projekcie KPO

Zapisy projektu Krajowego Planu Odbudowy (i Zwiększenia Odporności) [16] dotyczące rozwoju technologii paliwa wodorowego, jako alternatywnego źródła energii, należy odnieść do dwóch obszarów:

- infrastruktury przystosowanej do dystrybucji dla różnorodnych konsumentów tego paliwa
- taboru szynowego, który będzie wykorzystywał to paliwo w dużych ilościach.

Polska przedkładając KPO do KE będzie wnioskowała o ponad 12,1 mld euro z części pożyczkowej RRF. Środki te zostaną przeznaczone przede wszystkim na dodatkowe finansowanie przedsięwzięć związanych z transformacją klimatyczną i cyfryzacją. Należą do nich wraz z towarzyszącymi im reformami takie przedsięwzięcia jak, m.in.:

- inwestycje w transport szynowy w miastach
- inwestycje w regionalny pasażerski tabor kolejowy.

W ramach planowanej odbudowy gospodarki w oparciu o zatwierdzone, opisane niżej strategie, będą wdrażane działania także związane z transportem:

- Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.

Dokument ten zostanie przyjęty w formie uchwały Rady Ministrów i określi główne cele rozwoju niskoemisyjnej gospodarki wodorowej w Polsce. Na tej podstawie nastąpi uruchomienie w Narodowym Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej dwóch programów wspierających rozwój gospodarki wodorowej, tj. „Nowa Energia” i „Zielony transport publiczny” (faza I) w 2021 r.

- Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 r.

Na podstawie tej strategii zostaną uruchomione inwestycje w technologie wodorowe dotyczące wytwarzania, magazynowania i transportu wodoru. Budowane będą stacje ładowania wodorem pojazdów elektrycznych, w tym szynowych.

Development.

These endeavours will contribute to reach the target determined by the EU, i.e. reduction of emissivity of the energy-intensive sectors. The investments into the hydrogen technologies development will be launched under the sustainable economic growth, with a view to use hydrogen for transport, industry and energy purposes.

The National Reconstruction Plan, in its part related to the grants, includes the chapter referred to as Component B "Green energy and reduction of the energy intensity". The objective of the measures referred to in this part of the NRP is to reduce negative impact of the economy on the environment, ensuring, at the same time, competitiveness and energy and environmental security of the country.

In the point B2.1. of the Component the improvement of the conditions for development of hydrogen technologies and other decarbonized gases is provided for, inclusive of:

- establishment of a regulatory framework for hydrogen application to the transport in the third quarter of 2021;
- adoption of the legislative hydrogen package in the fourth quarter of 2023.

These steps shall enable achieving the following results of hydrogen technology implementation by the third quarter of 2026:

- approx. 320 MW power of the installation for production of low-emission, renewable hydrogen, inclusive of the accompanying infrastructure;
- 25 refueling stations, including hydrogen bunkering;
- 3 types of innovative hydrogen-powered transport units being a result of the research processes and implementation of building of hydrogen-powered transport units.

The point B2.1.1. provides for the investments into the hydrogen technologies, i.e. hydrogen production, storage and transport. The timeframe for this task is assumed from the first quarter of 2021 to the third quarter of 2026.

The construction of equipment and infrastructure is planned, necessary, among others, in rail transport. Commissioning of the innovative hydrogen-powered transport units ready for use will become justified. These tasks will be implemented from the first quarter of 2021 to the third quarter of 2026. The implementation costs are estimated to € 800 million.

The National Reconstruction Plan, in its part related to the loans, also includes the chapter referred to as Component B "Green energy and reduction of the energy intensity".

One of the items of the Component is the detailed objective referred to in point E1, "Increase in the share of zero- and low-emission transport and preventing and reducing the negative transport impact

Na rzecz zapewnienia finansowania realizacji Polskiej Strategii Wodorowej planuje się uruchomienie programów wspierających badania i rozwój w dziedzinie technologii wodorowych finansowanych ze środków krajowych, w tym uruchomienie od 2021 r. dedykowanego Programu Wsparcia Technologii Wodorowych w Narodowym Centrum Badań i Rozwoju.

Działania te będą wkładem w uzyskanie celu wyznaczonego przez UE, tj. obniżenie emisyjności sektorów energochłonnych. W ramach zrównoważonego wzrostu gospodarczego będą uruchamiane inwestycje w rozwój technologii wodorowych w celu zastosowania wodoru na potrzeby transportu, przemysłu, energetyki.

W część grantowej KPO ujęto rozdział: **Komponent B „Zielona energia i zmniejszenie energochłonności”**. Celem działania opisanego w tej części KPO jest ograniczenie negatywnego oddziaływania gospodarki na środowisko przy jednoczesnym zapewnieniu konkurencyjności i bezpieczeństwa energetycznego oraz ekologicznego kraju.

W ramach tego komponentu w pkt. B2.1. ujęto poprawę warunków dla rozwoju technologii wodorowych oraz innych gazów zdekarbonizowanych, w tym:

- stworzenie ram regulacyjnych funkcjonowania wodoru w transporcie w III kw. 2021 r.
- przyjęcie legislacyjnego pakietu wodorowego w IV kw. 2023 r.

Kroki te pozwolą uzyskać do III kw. 2026 r. następujące efekty wdrożenia technologii wodorowej:

- ok. 320 MW mocy instalacji do produkcji niskoemisyjnego, odnawialnego wodoru wraz z infrastrukturą towarzyszącą
- 25 stacji tankowania, w tym bunkrowania wodoru
- 3 typy innowacyjnych jednostek transportowych zasilanych wodorem, jako wynik procesów badawczych i wdrożenia budowy jednostek transportowych zasilanych wodorem.

W pkt. B2.1.1. określono inwestycje w technologie wodorowe, tj. wytwarzanie, magazynowanie i transport wodoru. Założono, że zakres czasowy realizacji tego zadania to I kw. 2021 r. do III kw. 2026 r.

Uruchomiona zostanie budowa urządzeń oraz infrastruktury niezbędnej m.in. w transporcie kolejowym. Zasadne stanie się rozpoczęcie przekazywanie do eksploatacji zbudowanych innowacyjnych jednostek transportowych zasilanych wodorem. Te zadania będą realizowane od I kw. 2021 r. do III kw. 2026 r. i szacuje się, że koszty realizacji wyniosą 800 mln €.

W część pożyczkowej KPO również ujęto rozdział: **Komponent B „Zielona energia i zmniejszenie energochłonności”**.

Jednym z elementów tego komponentu jest cel szczegółowy ujęty w pkt. E1. „Zwiększenie udziału zero- i niskoemisyjnego transportu oraz przeciwdziałanie i

on the environment". Hereinafter it is specified in point E1.2.1. as "Zero and low-emission collective transport (trams)", in the form of the purchase of approx. 110 modern trams by the second quarter of 2026, and in point E2.3.1 "Passenger rolling stock of regional railways" consisting in delivery of 75 trains planned for the third quarter of 2026.

The support will be granted firstly to the areas in which the clean transport zones have already been or are planned to be introduced.

The list of the funds allocated to hydrogen technologies from the RRF (*Recovery and Resilience Facility*) grant part and loan part, to be used for purposes of rail transport, is presented in the table below

zmniejszenie negatywnego oddziaływania transportu na środowisko", dalej rozpisany w pkt. E1.2.1. jako „Zero i niskoemisyjny transport zbiorowy (tramwaje)” w formie zakupu ok. 110 nowoczesnych tramwajów z realizacją do II kw. 2026 r. oraz w pkt. E2.3.1 „Pasażerski tabor kolei regionalnej” z realizacją w formie 75 pociągów przewidzianą do III kw. 2026 r.

Wsparcie będzie udzielane w pierwszej kolejności obszarom, gdzie już wprowadzono lub planowane jest wprowadzenie stref czystego transportu.

Zestawienie środków finansowych przeznaczonych na technologie wodorowe z części grantowej RRF i pożyczkowej RRF (*Recovery and Resilience Facility*), które mogą być wykorzystane w obszarze transportu pojazdami szynowymi, zestawione jest w tablicy poniżej.

Środki finansowe przeznaczone na technologie wodorowe
The funds allocated to hydrogen technologies

Tabl. 2
Table 2

WIĄZKI PROJEKTOWE REALIZOWANE W RAMACH KRAJOWEGO PLANU ODBUDOWY	ALOKACJA Z RRF (W MLN EUR)	SEKTOR INSTYTUCJONALNY
	SUMA	
B2.1.1. Inwestycje w technologie wodorowe, wytwarzanie, magazynowanie i transport wodoru	897	SEKTOR PRYWATNY
E 2.1.2. Inwestycje w tabor kolejowy	965	SEKTOR RZĄDOWY/SAMORZĄDOWY (50/50)

THE SETS OF PROJECTS IMPLEMENTED UNDER THE NATIONAL RECONSTRUCTION PLAN	ALLOCATION FROM RRF (IN € MILLION)	INSTITUTIONAL SECTOR
	AMOUNT	
B2.1.1. Investments in the hydrogen technologies, hydrogen production, storage and transport		PRIVATE SECTOR
E2.1.2. Investments in the rolling stock		GOVERNMENT/SELF-GOVERNMENT SECTOR (50/50)

The resources from the RRF loan part designed for the component E "Green Smart Mobility" amount to € 700 million, inclusive of:

- € 200 million to be divided by way of competition for the investments in rail transport (trams) with a view to increase the share of zero- and low-emission transport and to reduce the negative transport impact on the environment. Implementation is planned for the period from the second quarter of 2020 to the third quarter of 2026. The cost of a single tram was estimated at PLN 8 million, based on the projects carried out under the Cohesion Policy 2014-2020.

- € 500 million to support the investments in regional rolling stock, in order to increase transport accessibility and safety, and to deploy digital solutions

These resources will be used to implement the reforms and investments directly contributing towards the main objective and specific objectives of the component, as listed in the table below.

Środki z części pożyczkowej RRF na komponent E „Zielona inteligentna mobilność” to 700 mln €, w tym:

- 200 mln € do podziału w trybie konkursowym na inwestycje w transport szynowy (tramwaje) w celu zwiększenia udziału zero- i niskoemisyjnego transportu oraz zmniejszenie negatywnego oddziaływania transportu na środowisko. Planowany okres realizacji to II kw. 2020 r. do III kw. 2026 r. Koszt jednego tramwaju został oszacowany na kwotę 8 mln zł na podstawie projektów realizowanych w ramach Polityki Spójności 2014-2020.
- 500 mln € na wsparcie inwestycji w regionalny tabor kolejowy dla zwiększenia dostępności transportowej i bezpieczeństwa oraz wdrażania rozwiązań cyfrowych.

Ze środków tych realizowane będą reformy i inwestycje przyczyniające się bezpośrednio do osiągnięcia celu głównego i celów szczegółowych komponentu, zestawione w tablicy poniżej.

Zestawienie reform i inwestycji wpływające na osiągnięcie celu głównego i celów szczegółowych
Specification of the reforms and investments influencing achievement of the main objective and specific objectives

Tabl. 3
Table 3

Cel szczegółowy komponentu Specific objective of the component	Reformy The reforms	Cel reformy Reform objective	Inwestycje investments	Cel inwestycji Investment objective
E1. Zwiększenie udziału zero i niskoemisyjnego transportu oraz przeciwdziałanie i zmniejszenie negatywnego oddziaływania transportu na środowisko E1. Increase in the share of zero and low-emission transport, preventing and reducing the negative transport impact on the environment	E1.2. Zwiększenie udziału zero i niskoemisyjnego transportu oraz przeciwdziałanie i zmniejszenie negatywnego oddziaływania transportu na środowisko E1.2. Increase in the share of zero and low-emission transport, preventing and reducing the negative transport impact on the environment	Zapewnienie sprawnego transportu zbiorowego na obszarach miast gdzie wprowadzono strefy czystego transportu To ensure efficient public transport in the urban areas where the clean transport zones have been established.	E1.2.1 Zero i niskoemisyjny transport zbiorowy (tramwaje) E1.2.1 Zero and low-emission public transport (trams)	Zwiększenie liczby nowoczesnego transportu szynowego (tramwajowego) w miastach Increase in the number of modern rail (tram) transport vehicles in cities
E2. Zwiększenie dostępności transportowej, bezpieczeństwa i cyfrowych rozwiązań E2. Improvement in transport accessibility, security and digital solutions	E2.3 Zwiększenie dostępności transportowej, bezpieczeństwa i cyfrowych rozwiązań E2.3 Improvement in transport accessibility, security and digital solutions	Zwiększenie roli sektora kolejowego w systemie transportowym Increase in the role of railway sector within the transport system	E2.3.1. Pasażerski tabor kolei regionalnej E2.3.1. Passenger rolling stock of the regional railway	Odnowa taboru pasażerskiego i podniesienie atrakcyjności transportowej regionów poprzez zwiększenie dostępności i komfortu podróży koleją Renewal of the passenger rolling stock and improvement of the transport attractiveness of the regions by way of enhancement of accessibility and comfort of rail travel

The next table presents the impact of the tasks related to hydrogen-powered rolling stock included in the Package E on the ecological and digital transformation.

W kolejnej tablicy przedstawiono wpływ na transformację ekologiczną i cyfrową zadań dotyczących taboru szynowego z napędem wodorowym ujętych w pakiecie E.

Wskaźniki osiągnięcia celu reformy/inwestycji (w 0, 40 lub 100%)
Indicators of attainment of the reform/investment target (0, 40 or 100%)

Tabl. 4
Table 4

Krótki tytuł	Cele ekologiczne				Cele cyfrowe
	Klimatyczne	Środowiskowe	Obszar interwencji dla inwestycji	DNSH	
	Tag	Tag			
E1.2.1. Zero i niskoemisyjny transport zbiorowy (tramwaje)	100%	40%	073/ 074// 077	tak	0%
E2.3.1. Pasażerski tabor kolei regionalnej	100%	40%	072a	tak	0%

A concise title	Ecological objectives				Digital objectives
	Climate objectives	Environmental objectives	Intervention area for the investments	DNSH	
E1.2.1.Zero and low-emission public transport (trams)					
E2.3.1. Passenger rolling stock of the regional railway					

Applications for the rolling stock have already been submitted to the National Reconstruction Plan, among others for financial support of the purchase of 20 new five-unit electric multiple units and 12 new hydrogen-powered vehicles, all of them designed for handling the regional and agglomeration traffic [27].

7. Economic aspects

In order to analyze this aspect, the CAPEX (Capital Expenditures) and TCO (Total Cost of Ownership) should be taken into account, i.e. the total costs of acquisition, installing, using, maintaining and completing the investment. The cost of retrofitting of the trains becomes important in this case. At present it is estimated at around € 6 million per a single train, including the FCH system (Fuel Cells and Hydrogen) and its relevant components, such as:

- fuel cell stacks of the batteries, enabling more optimum way of fuel cell operation;
- the cells of a certain capacity, amounting approximately to 300 ÷ 400 kW
- on-board hydrogen storage tanks of a specific capacity (e.g. vehicle roof-mounted), designed for example for 180 kg or more, e.g. 350 kg of hydrogen.

Moreover, the infrastructure expenses should be taken into account, inclusive, first of all, of the costs resulting from refueling the train tanks with hydrogen. For example, in the case of producing hydrogen by electrolysis on site, a fuel cost of € 1.50/km should be envisaged, based on the price estimated with reference to achieved power of € 76/MWh [0].

According to RailEngineer and Alstom, the 10 MW wind farm is able to produce 2.5 ton of hydrogen daily. It is enough to power a fleet of 14 iLint trains at the distance of 600 km/day [4].

Construction cost of a single hydrogen charging station ranges from PLN 1 to 2.5 million. Therefore, according to the Rail Transport Office, the approach consisting in construction of bimodal stations, intended both for road and rail transport, is worthy of consideration. In result, it would be reasonable to adopt, at the government level, a strategy promoting and popularizing the hydrogen propulsion, which might be conducive to reduction in the costs [19].

The self-governments say openly that without financial compensation they would be able to order only limited number of the hydrogen passenger trains, since at present they are expensive. Due to high cost of hydrogen transport implementation, over the next 5 years it will need to be constantly and largely co-financed. At the same time, the price of hydrogen is expected to decrease as hydrogen will be produced on a larger scale and from cheaper sources, including among others the wastes.

The debate devoted to this subject took place as part of the Wodór2030.pl project, whose main partner is PKN ORLEN, the leader in the field of hydrogen

Do Krajowego Planu Odbudowy złożono już wnioski dotyczące taboru szynowego, m.in. na dofinansowanie zakupu 20 sztuk nowych pięcioczonowych elektrycznych zespołów trakcyjnych, które miałyby obsługiwać ruch regionalny i aglomeracyjny oraz na zakup 12 sztuk nowych pojazdów o napędzie wodorowym do obsługi ruchu regionalnego i aglomeracyjnego [27].

7. Aspekty ekonomiczne

Analizując ten aspekt należy wziąć pod uwagę wydatki inwestycyjne CAPEX (*Capital Expenditures*) oraz TCO (*Total Cost of Ownership*), czyli całkowite koszty pozyskania, instalowania, użytkowania, utrzymania i zakończenia inwestycji. Ważne będą tutaj koszty modernizacji pociągów, szacowane obecnie na ok. 6 mln € w odniesieniu do jednego pociągu, włączając system FCH i jego odpowiednich składników, takich jak:

- stopy ogni w paliwowych baterii umożliwiających bardziej optymalną pracę ogniwa paliwowego
- ogniwa o określonej mocy ok. 300 ÷ 400 kW
- pokładowe zbiorniki magazynowania wodoru (mocowane np. na dachu pojazdu) o określonej pojemności, przykładowo na 180 kg wodoru lub większej np. na 350 kg wodoru.

Ponadto należy uwzględnić koszty związane z infrastrukturą, w tym przede wszystkim koszty związane z napełnianiem zbiorników pociągu wodorem. Przykładowo przy produkowaniu wodoru na miejscu na drodze elektrolizy należy przewidywać koszt paliwa na poziomie 1,50 €/km, w oparciu o szacunkową cenę 76 €/MWh [0].

Według Rail Engineer i Alstom, farma wiatrowa o mocy 10 MW jest w stanie produkować 2,5 tony wodoru dziennie, a to wystarczy, aby zasilić flotę 14 pociągów iLint na dystansie 600 km dziennie [4].

Koszt budowy jednej stacji ładowania wodoru jest rzędu 1÷2,5 mln zł, dlatego zdaniem UTK warte rozważenia są rozwiązania polegające na budowie stacji bimodalnych, przeznaczonych jednocześnie dla transportu drogowego i kolejowego. Zasadne byłoby zatem przyjęcie na szczeblu rządowym strategii promującej napęd wodorowy i jego popularyzację, a przełoży się na zmniejszenie kosztów [19].

Samorządy mówią wprost, że bez dofinansowania będą w stanie zamówić tylko pojedyncze sztuki pociągów pasażerskich na wodór, bo ich zakup jest obecnie drogi. Ze względu na duży koszt wdrożenia transportu wodorowego będzie musiał w ciągu najbliższych 5 lat być stale i w dużym stopniu dofinansowywany. Jednocześnie należy przewidywać, że cena wodoru będzie malała, ponieważ będzie on produkowany na większą skalę i z tańszych źródeł, m.in. takich jak odpady.

Debata na ten temat odbyła się w ramach projektu *Wodór2030.pl*, którego partnerem głównym jest PKN ORLEN, lider w obszarze technologii wodorowych w Polsce [24].

technologies in Poland [24].

8. Quantifiable benefits for environmental protection

The data shown in Table 5, obtained from the carrier, enabled making the basic assessments and assumptions aimed at reducing the CO₂ emission on the Gdynia-Hel-Gdynia route by replacing the previously used trains with compression-ignition (CI) engines with the ones equipped with hydrogen fuel cells. [17].

Zmniejszenie emisji CO₂ przez zastąpienie obsługi trasy przejazdowej Gdynia-Hel-Gdynia przez pociągi wyposażone w ogniwo paliwowe zamiast pociągów napędzanych silnikiem spalinowym z ZS.

Reduction of the CO₂ emission on the Gdynia-Hel-Gdynia route by replacing the trains with compression-ignition (CI) engines with the ones equipped with hydrogen fuel cells.

Tabl. 5

Table 5

Wyszczególnienie Specification	Zużycie wodoru 0,36 [kg/km] Hydrogen consumption 0.36 kg/km		Zużycie wodoru 0,22 [kg/km] Hydrogen consumption 0.22 kg/km	
	Produkcja ze źródeł odnawialnych (farmy wiatrowe) Production from renewable sources (wind farms) 1[kgH ₂]=1[kg CO ₂]	Produkcja z gazu ziemnego Production based on natural gas 1[kgH ₂]=10 [kg CO ₂]	Produkcja ze źródeł odnawialnych (farmy wiatrowe) Production from renewable sources (wind farms) 1[kgH ₂]=1[kg CO ₂]	Produkcja z gazu ziemnego Production based on natural gas 1[kgH ₂]=10 [kg CO ₂]
Rozkład jazdy wiosenny – roczne zmniejszenie emisji CO ₂ Spring timetable –annual reduction of the CO ₂ emission	1641 [ton]	162 [tony]	1705 [ton]	800 [ton]
Rozkład jazdy letni – roczne zmniejszenie emisji CO ₂ Summer timetable – annual reduction of the CO ₂ emission	769 [ton]	44 [tony]	800 [ton]	354 [tony]
Sumarycznie zmniejsze- nie emisji CO ₂ w roku Total reduction of annual CO ₂ emission	2410 [ton]	206 [ton]	2505 [ton]	1154 [tony]

Taking into account a single electrolyser and maximum daily hydrogen demand in the considered case (i.e. 876 kg H₂ per day), the electrolyser capacity could amount e.g. to 2.5 MW delivering 850 ÷ 900 kg H₂ per day, at a pressure of 350 bar. Mass of the stored hydrogen delivered by HRS could reach double daily demand i.e. the refueling capacity (approx. 1.700 ÷ 1.800 kg), with a view to be enough for two full days or operation of two trains.

In Poland, other studies and analyzes have been also carried out based on operation of 10 shunting locomotives used on the 35 km Gdańsk – Gdynia route. At present they are used mainly on sidetracks for unloading, filling, sorting and shipping petrochemical tanks used at the Lotos refinery. Replacement of the existing shunting locomotives powered by combustion engines with those using hydrogen fuel cells would allow, among others, to reduce the CO₂ emission by 339 ton in 2022 [17].

9. Summary

Further development of rail transport may aim towards the following goal:

8. Wymierne korzyści dla ochrony środowiska

Dane uzyskane od przewoźnika, przedstawione w tabl. 5, pozwoliły na przyjęcie następujących zasadniczych ocen i założeń dla oszacowania zmniejszenia emisji CO₂ dzięki wykorzystaniu pociągów wyposażonych w wodorowe ogniwa paliwowe na trasie przejazdowej Gdynia-Hel-Gdynia, zamiast dotychczas wykorzystywanych pojazdów z silnikami z zapłonem samoczynnym (ZS) [17].

W odniesieniu do elektrolizera, biorąc pod uwagę maksymalne zapotrzebowanie dzienne na wodór w analizowanym przypadku (876 kg H₂ dziennie), mógłby to być np. 1 elektrolizer o mocy 2,5 MW z możliwością napełnienia 850÷900 kg H₂ dziennie przy ciśnieniu 350 bar, przy tym masa do magazynowania dla HRS mogłaby być na poziomie podwójnego zapotrzebowania dziennego lub pojemności tankowania (ok. 1.700 kg÷1.800 kg) w celu zapewnienia dwóch pełnych dni lub pracy dwóch pociągów.

W odniesieniu do Polski były jeszcze prowadzone także inne badania i analizy na podstawie wykorzystania 10 lokomotyw manewrowych na 35 km trasie Gdańsk – Gdynia. Operują one obecnie głównie na bocznicach i są używane do rozładowania, napełniania, sortowania i wysyłki cystern petrochemicznych używanych w rafinerii Lotos. Zastąpienie dotychczasowych lokomotyw manewrowych napędzanych silnikami spalinowymi na wykorzystujące wodorowe ogniwa paliwowe umożliwiłoby zmniejszenie m.in. emisji CO₂ o 339 ton w 2022 r. [17].

- electrification of non-electrified lines, with improvement, at the same time, of the renewable energy availability;
- putting the hydrogen-powered vehicles into service. The relatively new vehicles should be modernized, while the older ones should be progressively withdrawn and replaced with the modern hydrogen-powered vehicles. Such an approach results from advanced age of the combustion vehicles in Poland.

It is important to remark that the national strategies [21] and [22] include no plans for financing the development and purchase of hydrogen powered railway vehicles. Similar situation occurs in most provincial strategies, as by 2030 the purchase of hydrogen-powered railway vehicles is not foreseen in any of them, except for Great Poland and Pomeranian provinces. It should be noticed that Great Poland is one of the first Polish regions considering seriously the purchase of hydrogen-powered railway vehicles. The second area where such plans are considered is the Pomeranian province. The interest in rail vehicles with an innovative drive is observed there [11].

The presented review of the situation related to the development of hydrogen-powered rail vehicles shows only a small share of this technology with reference to the trams to be provided with such a drive.

10. 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>
- [2] *Biowodór może zwiększyć udział OZE w transporcie.* <https://wysokienapiecie.pl/15922-biowodor-moze-zwiekszyc-udzial-oze-w-transporcie/>
- [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 SIDA. Politecnico Di Bari. 14-15.09.2017. University of L'Aquila ITALY
- [4] *Droga droga do samochodów wodorowych w Polsce.* 4.03.2019. <https://wysokienapiecie.pl/17436-samochody-wodorowe-w-polsce-ceny-tankowanie/>
- [5] Durzyński Z., Orczyk M.: *Tram-train elementem proekologicznego systemu transportu zbiorowego w aglomeracji poznańskiej.* Pojazdy Szynowe nr 4/2019. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138542>
- [6] Durzyński Z.: *Stan obecny i perspektywy niezelektryfikowanego transportu kolejowego w Polsce.* Pojazdy Szynowe nr 1/2020. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138558>
- [7] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych - 2014/94/UE*
- [8] https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_pl
- [9] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pl/fs_19_6726
- [10] <https://elektrosystemy.pl/?p=31955>
- [11] <https://www.nakolei.pl/wielkopolska-zainteresowana-kupnem-pociagow-wodorowych-i-hybrydowych/>
- [12] <https://www.wnp.pl/logistyka/chinczycy-prezentuja-drugi-tramwaj-z-napedem-wodorowym,272461.html>
- [13] *Hydrail.* <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrail>
- [14] *Hydrogen-powered trains could replace diesel engines in Germany.* <https://edition.cnn.com/2020/11/23/business/hydrogen-train-siemens/index.html>
- [15] *JSW chce być czołowym producentem wodoru.* 10.12.2018. <https://niezalezna.pl/249644-jsw-chce-byc-czolowym-producentem-wodoru>
- [16] *Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności. Projekt.* Ministerstwo Funduszy i Polityki Regionalnej. Warszawa, kwiecień 2021 r.
- [17] Orczyk M. i inni: *Circumstances of Railway Transport Hydrogenization in Poland.* SAE Technical Paper 2020-01-2131, 2020. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2131>

9. Podsumowanie

Kierunki dalszego rozwoju transportu kolejowego mogą być następujące:

- elektryfikacja linii niezelektryfikowanych przy równoczesnym zwiększaniu dostępu do OZE
- wprowadzanie do eksploatacji pojazdów zasilanych wodorem, przy czym w miarę nowe należy modernizować, a starsze sukcesywnie wycofywać i zastępować nowoczesnymi z napędem wodorowym. Ten kierunek wynika z zaawansowanego wieku pojazdów spalinowych w Polsce.

Należy podkreślić fakt, że w strategiach krajowych [21] i [22] nie przedstawiono planów finansowania rozwoju i zakupów pojazdów kolejowych z napędem wodorowym. Podobnie jest w strategiach województw, za wyjątkiem wielkopolskiego i pomorskiego, bowiem do roku 2030 prawie wszystkie nie planują zakupów pojazdów kolejowych z napędem wodorowym. Warto zaznaczyć, że Wielkopolska jako jeden z pierwszych rejonów w Polsce poważnie rozważa zakup pojazdów kolejowych zasilanych wodorem. Drugim województwem rozważającym takie plany jest województwo pomorskie, które wyraża zainteresowanie pojazdami szynowymi z innowacyjnym napędem [11].

Z przedstawionego w artykule przeglądu sytuacji związanej z rozwojem pojazdów szynowych z napędem wodorowym wynika mały udział tej technologii w rozwoju tramwajów z takim napędem.

- [18] Pielecha i inni: Ultrakondensatory i ogniwa paliwowe w układach napędowych pojazdów szynowych. *Pojazdy Szynowe* nr 2/2019. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138526>
- [19] Radomski M.: Pociągi wodorowe na polskich torach? To możliwe już w 2022 roku, ale do rozwiązania jest kilka problemów. *Fleetguru*. 12.09.2018
- [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/>
- [21] Strategia na rzecz odpowiedzialnego rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.). Warszawa 2017
- [22] Uchwała nr 110/2019 Rady Ministrów z dnia 17 września 2019 r. zmieniająca Uchwałę w sprawie ustanowienia Krajowego Programu Kolejowego do 2023 roku
- [23] Usidus. M.: Wsiąść do pociągu... wodorowego. <https://mlodytechnik.pl/technika/30054-wsiasc-do-pociagu-wodorowego>
- [24] Wodór – samorządy potrzebują systemowego wsparcia finansowego i nowego modelu współpracy. <https://www.rynekinfrastruktury.pl/mobile/wodor--samorzady-potrzebuja-systemowego-wsparcia-finansowego-i-nowego-modelu-wspolpracy-74524.html>
- [25] Wodór jako paliwo konwencjonalne. https://pl.wikipedia.org/wiki/Wod%C3%B3r_jako_paliwo_konwencjonalne
- [26] Wodór, prąd, biopaliwa. Dekarbonizacja transportu będzie kosztowna. <https://wysokienapiecie.pl/19529-wodor-prad-biopaliwa-dekarbonizacja-transportu-bedzie-kosztowna/>
- [27] Woźniak. A.: Transport zamierza tankować wodór. 15.10.2020. <https://energia.rp.pl/nowa-energia/elektromobilnosc/24738-transport-zamierza-tankowac-wodor>

Agile method of managing railway transport projects

Zwinna metodyka zarządzania transportowymi projektami kolejowymi

The increasing complexity of tasks performed by enterprises requires the implementation of a modern approach to enterprise management. Competition and the dynamics of the business environment drives the search for new forms of cooperation, operating costs reduction, and implementation of new management methods. Project management meets these requirements, by accelerating the processes of implementing new strategies and making it possible to stay ahead of the competition in the volatile area of new products and services. The goal of the article was to present the elements of agile project management methodologies that can be used during the implementation of railway transport projects, so far implemented on the basis of traditional project management methodologies. The article presents recommendations based on the results of research conducted in May and June of 2021 among members of project teams implementing rolling stock projects co-financed from public funds. The obtained research results made it possible to identify elements of agile project management methodologies that could be successfully implemented during the implementation of transport projects related to superstructure.

Wzrost złożoności zadań realizowanych przez przedsiębiorstwa wymaga wdrażania nowoczesnego podejścia do zarządzania przedsiębiorstwem. Konkurencja, dynamika otoczenia biznesowego wymusza poszukiwanie nowych form współpracy, obniżanie kosztów działalności, wdrażanie nowych metod zarządzania. Naprzeciw tym wymaganiom wychodzi zarządzanie projektami, przyspieszając procesy wdrażania nowych strategii i umożliwiając wyprzedzenie konkurencji w obszarze nowych produktów i usług. Celem artykułu jest przedstawienie elementów zwinnych metodyk zarządzania projektami, które można zastosować podczas realizacji transportowych projektów kolejowych, dotychczas realizowanych w oparciu o tradycyjne metodyki zarządzania projektami. W artykule przedstawiono rekomendacje opracowane w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych w okresie maja i czerwca 2021 r. pośród członków zespołów projektowych realizujących projekty dotyczące taboru, współfinansowane ze środków publicznych. Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły wskazanie elementów zwinnych metodyk zarządzania projektami, które można z powodzeniem zaimplementować podczas realizacji projektów transportowych dotyczących suprastruktury.

Keywords: Agile project management methodology, traditional project management methodology, project management.

Słowa kluczowe: Zwinna metodyka zarządzania projektami, tradycyjna metodyka zarządzania projektami, zarządzanie projektami

1. Introduction

Enterprises increasingly more often implement projects with a high degree of innovation, which determines their competitive advantage. Disseminating projects as a mode of operation for modern institutions has become important and is treated as a separate trend, called "projectification" (Wyrozębski, 2019), "projectization", as well as "project orientation" (Strojny, 2015). Implementation of projects, especially innovative ones, with the use of project management methods increases the effectiveness of these projects and increases their rate of success. In the face of dynamic technological changes, traditional project management

1. Wprowadzenie

Coraz częściej przedsiębiorstwa realizują projekty o wysokim poziomie innowacyjności, stanowiącym o ich przewadze konkurencyjnej. Rozpowszechnianie projektów, jako sposobu działania współczesnych instytucji stało się ważne i jest traktowane jako osobny trend, nazywany „projektyfikacją” (ang. *projectification*) (Wyrozębski, 2019), „projektyzacją” (ang. *projectization*), jak również „orientacją projektową” (ang. *project orientation*) (Strojny, 2015). Realizowanie projektów, zwłaszcza innowacyjnych, z wykorzystaniem metod zarządzania projektami zwiększa efektywność projektów i warunkuje ich powodzenie. W obliczu

methods become insufficient in some areas of the project life cycle. Implementation of a project using a hybrid methodology, combining elements of traditional and agile methods, similar to using just traditional or agile methods themselves, requires adapting the methods to the specifics of a given project, company and industry.

According to the traditional PRINCE2 methodology (*PRojects IN Controlled Environments 2*) (Managing, 2017), a project is a temporary organization established for a given period of time, which is created to deliver one or more business products in accordance with an established business case.

Projects are unique undertakings of high complexity, defined as to the period of their implementation (with a stated beginning and end date), requiring the involvement of significant, but limited resources (material, human, financial, information). They are carried out by a team of highly qualified contractors from various fields (interdisciplinary) in a manner that is relatively independent of the standard continuous activities of the company (Knapp, 2006). They are associated with a high level of technical, organizational and economic risk, which forces their implementation to be carried out with the use of special methods and tools. Most commonly, a project is carried out by people from various departments of the organization. This allows for the collection and use of the most valuable skills, which, combined with appropriate coordination, allows for achieving results that could not have been achieved if the project was entrusted to a single department of the organization (Young, 2007).

The variety of definitions and, at the same time, some common features shared among them allow to summarize the term "project" as: an undertaking brought about by an idea that attempts to address an existing demand. A specific idea, transformed into an action plan, placed within a time frame and with a specific goal, becomes a project. It is a separate undertaking, not related to the routine activities of the company. It is characterized by temporality, complexity, uniqueness, an appropriate degree of intricacy and novelty. A project uses business opportunities and translates them into real benefits for the company, e.g. increasing competitiveness and increasing the company's profitability. Implementation of a project requires the involvement and separate management of interdisciplinary human, financial and material resources.

During the many years of development in the field of project management, many different methods have been devised. A design culture was developed, based on general methodologies as well as specific methodologies devised to fit a given industry (Strojny, Szmigiel, 2015). There is no one universal project management methodology that would be suitable for all types of projects. There are more or less general methodologies that can be used during the implementa-

dynamicznych zmian technologicznych, tradycyjne metody zarządzania projektami w niektórych obszarach cyklu życia projektu stają się niewystarczające. Realizacja projektu z wykorzystaniem metodyki hybrydowej, łączącej elementy metod tradycyjnych i zwinnych, podobnie, jak tradycyjnej czy zwinnej, wymaga dostosowania jej do specyfiki danego projektu, przedsiębiorstwa oraz branży.

Według tradycyjnej metodyki PRINCE2 (*PRojects IN Controlled Environments 2*) (Managing, 2017) projekt jest organizacją tymczasową powołaną na pewien czas, która jest tworzona w celu dostarczania jednego lub więcej produktów biznesowych zgodnie z ustalonym uzasadnieniem biznesowym.

Projekty to niepodwarzalne przedsięwzięcia o wysokiej złożoności, określone co do okresu ich wykonania (z wyróżnionym początkiem i końcem), wymagające zaangażowania znacznych, lecz limitowanych środków (rzeczowych, ludzkich, finansowych, informacyjnych). Realizowane są przez zespół wysoko kwalifikowanych wykonawców z różnych dziedzin (interdyscyplinarne) w sposób względnie niezależny od powtarzalnej działalności przedsiębiorstwa (Knapp, 2006). Wiąże się one z wysokim poziomem ryzyka technicznego, organizacyjnego i ekonomicznego, co wymusza ich realizację za pomocą specjalnych metod i narzędzi. Najczęściej projekt jest realizowany przez osoby wywodzące się z różnych działów organizacji. Umożliwia to zgromadzenie i wykorzystanie najbardziej wartościowych umiejętności, co w połączeniu z odpowiednią koordynacją pozwala na osiąganie rezultatów niemożliwych do uzyskania w sytuacji, gdyby projekt został powierzony jednemu działowi organizacji (Young, 2007).

Wielość definicji, a jednocześnie występujące wśród nich pewne cechy wspólne pozwalają podsumować projekt jako przedsięwzięcie, którego genezą jest pomysł, będący odpowiedzią na występujące zapotrzebowanie. Pomysł skonkretyzowany, przełożony na plan działań, umiejscowiony w czasie i mający określony cel staje się projektem. Jest odrębnym przedsięwzięciem, niezwiązanym z rutynową działalnością firmy. Charakteryzuje się tymczasowością, złożonością, unikalnością, odpowiednim stopniem skomplikowania i nowości. Projekt wykorzystuje szanse biznesowe i przekłada je na realne korzyści dla przedsiębiorstwa, np. podnosząc konkurencyjność i zwiększając zyskowność firmy. Realizacja projektu wymaga zaangażowania i odrębnego zarządzania interdyscyplinarnymi zasobami ludzkimi, zasobami finansowymi i materiałowymi.

Podczas wieloletniego rozwoju dziedziny zarządzania projektami opracowanych zostało wiele różnorodnych metod. Wykształciła się kultura projektowa, opierająca się na metodykach ogólnych oraz specyficznych, adresowanych do danej branży (Strojny, Szmigiel, 2015). Nie istnieje jedna uniwersalna metodyka zarządzania projektami odpowiadająca wszystkim rodzajom

tion of projects in different branches of the economy, and sectoral methods adapted to specific departments, e.g. IT, government administration or construction. The use of a given methodology depends on the specificity of a given project. One of the most effective ways to implement projects is to combine selected elements from various project management methodologies and adapt them to a specific project and the specifics of the company, creating a hybrid methodology made specifically for the implementation of a given project. When selecting activities and tools for project implementation, and then adapting them to the needs of a specific project, the nature of the enterprise, its organizational culture, work culture and general principles of the company's operation should be taken into account.

2. Research problem and methodology

The basic research problem was to identify which elements of agile project management methodologies could be successfully adopted for projects related to the construction of railway transport superstructure in order to increase the effectiveness of their implementation. The research was conducted with the use of the survey method, in the form of direct interview CAWI (*Computer Assisted Web Interview*), as an electronic questionnaire, filled in directly and independently by the respondents. The survey was conducted among members of project teams, i.e. project managers, middle managers, project contractors and employees of Project Management Offices, realizing projects on the part of the entrepreneur and the research unit.

The questionnaire consisted of 61 questions, both open and closed, allowing for statements to be shaped freely by the study participants. It was created in accordance with the four phases of the project life cycle, i.e. the project initiation phase, the structuring phase, the implementation phase and the project closure phase. The questionnaire was completed by 28 members of project teams, including 15 employees of a research unit and 13 employees of the enterprise.

Members of project teams constituted the dominant group among the respondents. Two project managers and two employees of the project management office participated in the study. More than half of the respondents who were employees of a research unit had multiple years of experience, more than 5 years, in projects implementation co-financed from public funds (66.7%) and participated in the implementation of more than five projects (60%). In the case of project team members from the enterprise, the main group of respondents (46.2%) had less than two years of experience in implementing projects. One person has participated in the implementation of more than 5 projects.

The analysis provided empirical material thus leading to the development of recommendations for the implementation of agile methodologies elements for railway transport projects management related to roll-

projektów. Są metodyki mniej lub bardziej ogólne, które mogą być wykorzystywane podczas realizacji projektów w odmiennych gałęziach gospodarki oraz metody sektorowe, dostosowane do określonych działań, np. informatyka, administracja rządowa czy budownictwo. Wykorzystanie danej metodyki uwarunkowane jest specyfiką danego projektu. Jednym ze skuteczniejszych sposobów realizacji projektów jest łączenie wybranych elementów z różnych metodyk zarządzania projektami i dostosowanie ich do konkretnego projektu oraz specyfiki przedsiębiorstwa, tworząc hybrydową metodykę stworzoną na potrzeby realizacji konkretnego przedsięwzięcia. Podczas wyboru działań i narzędzi realizacji projektu, a następnie ich dostosowywania do potrzeb konkretnego projektu należy uwzględniać charakter przedsiębiorstwa, jego kulturę organizacyjną, kulturę pracy i ogólne zasady funkcjonowania firmy.

2. Problem badawczy i metodyka badawcza

Podstawowy problem badawczy polegał na rozpoznaniu, które elementy zwinnych metodyk zarządzania projektami można z powodzeniem zaimplementować do realizacji transportowych projektów kolejowych, dotyczących suprastruktury, celem zwiększenia efektywności ich realizacji. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metody badania ankietowego, w postaci wywiadu bezpośredniego CAWI (ang. *Computer Assisted Web Interview*), w formie elektronicznego kwestionariusza ankietowego, wypełnianego bezpośrednio i samodzielnie przez respondentów. Badanie ankietowe przeprowadzone zostało wśród członków zespołów projektowych, tj. kierowników projektów, kierowników zarządzających, wykonawców projektów oraz pracowników Biur Zarządzania Projektami, realizujących projekty po stronie przedsiębiorcy i jednostki naukowej.

Ankieta składała się z 61 pytań zamkniętych i otwartych, umożliwiających swobodne kształtowanie wypowiedzi. Zbudowana została zgodnie z czterema fazami cyklu życia projektu, tj. fazą inicjacji projektu, fazą strukturyzacji, fazą realizacji i fazą zamykania projektu. Ankietę wypełniło 28 członków zespołów projektowych, w tym 15 pracowników jednostki naukowej i 13 pracowników przedsiębiorstwa.

Spośród ankietowanych dominującą grupę stanowili członkowie zespołów projektowych. W badaniu wzięło udział dwóch kierowników projektów oraz dwóch pracowników biura zarządzania projektami. Ponad połowa ankietowanych będących pracownikami jednostki naukowej posiadała wieloletnie, dłuższe niż 5 lat, doświadczenie w realizacji projektów dofinansowywanych ze środków publicznych (66,7 %) i brała udział w realizacji więcej niż pięciu projektów (60 %). W przypadku członków zespołu projektowego ze strony przedsiębiorstwa, większość ankietowanych (46,2 %) posiadała doświadczenie w realizacji projektów krótsze niż dwa lata. Jedna osoba brała udział w reali-

ing stock in order to improve the overall implementation of the projects.

3. Research results and recommendations

Recommendations regarding the introduction of agile project management methodologies during the implementation of publicly co-financed superstructure rail transport projects mostly concern two phases of the project life cycle: the structuring phase and the implementation phase. In these two phases, the potential increase in efficiency is most noticeable and the greatest benefits from the use of an agile, adaptive approach to project management could be seen. The initiation and closing phases are similar for all projects, regardless of the project management methodology used, and regardless of the industry sector, hence the recommendations for the implementation of Agile methodology elements do not apply to these phases of the project life cycle. The introduction of agile project management methodologies elements is recommended more at the level of project team management than at the higher level of project management as a whole.

As part of the structuring phase, i.e. planning a transport, railway superstructure project, co-financed using public funds, involving more people who will be contractors of the project in the future, other than just the future project manager, such as several key contractors and project management offices, will streamline the process of developing a project grant application. At the same time, this will relieve the project manager by distributing responsibility for the shape of the future project over the project team, not focusing only on the person of the project manager. Project planning involves a series of concurrent processes for scheduling, scope, budget, and project team planning. Integrating all these processes by a single project manager carries a greater risk than when using a wider team.

In managing publicly funded rolling stock projects, using a direct, network-based communication system should be a preferred choice. It is more effective than traditional, hierarchical systems and makes it possible to effectively implement and use agile, adaptive methodologies and tools during the project implementation phase.

As a result of the rolling stock designs analysis, developing a written communication plan for the project each time at the beginning of the project implementation is recommended. This ensures the stability of project activities in the context of the work progress reporting principles (who reports, to whom, what and how often), information on the frequency of status meetings and the personal composition during these meetings. It is useful to include information on how long the iterations are and when the retrospective meetings will be held already in the communication plan.

During the implementation of the project, it is recommended to use software that facilitates the schedul-

zacji więcej niż 5 projektów.

Analiza dostarczyła materiał empiryczny umożliwiający opracowanie rekomendacji wdrożenia elementów zwinnych metodyk zarządzania transportowymi projektami kolejowymi, dotyczącymi taboru celem usprawnienia ich realizacji.

3. Wyniki badań i rekomendacje

Rekomendacje dotyczące wprowadzenia elementów zwinnych metodyk zarządzania projektami podczas realizacji transportowych projektów kolejowych dotyczących suprastruktury współfinansowanych ze środków publicznych dotyczą dwóch faz cyklu życia projektu: fazy strukturyzacji i fazy realizacji. W tych dwóch fazach zauważalny jest potencjalny wzrost efektywności i najwięcej korzyści z wykorzystania zwinnego, adaptacyjnego podejścia do zarządzania projektami. Faza inicjacji i faza zamykania są podobne dla wszystkich projektów, niezależnie od stosowanej metodyki zarządzania projektami, a także niezależnie od branży, stąd rekomendacje dotyczące implementacji elementów zwinnych metodyk nie dotyczą tych faz cyklu życia projektu. Wprowadzenie elementów zwinnych metodyk zarządzania projektami jest rekomendowane bardziej na poziomie zarządzania zespołem projektowym, niż na wyższym poziomie zarządzania projektem jako całością.

W ramach fazy strukturyzacji, czyli planowania projektu transportowego, kolejowego dotyczącego suprastruktury, współfinansowanego ze środków publicznych, zaangażowanie większej liczby osób, będących w przyszłości wykonawcami projektu, niż tylko przyszłego kierownika projektu, kilku kluczowych wykonawców oraz biura zarządzania projektami, usprawni proces opracowywania wniosku o dofinansowanie projektu. Odciaży to jednocześnie kierownika projektu rozkładając odpowiedzialność za kształt przyszłego projektu na zespół projektowy, nie skupiając jej tylko na osobie kierownika projektu. Planowanie projektu obejmuje szereg współbieżnych procesów dotyczących planowania harmonogramu, zakresu, budżetu i zespołu projektowego. Zintegrowanie wszystkich procesów przez jedną osobę kierownika projektu obciążone jest większym ryzykiem niż szacowanie zespołowe.

W zarządzaniu projektami dotyczącymi taboru, współfinansowanymi ze środków publicznych należy skłaniać się do stosowania bezpośredniego, sieciowego systemu komunikacji. Jest on skuteczniejszy niż tradycyjne, hierarchiczne systemy i pozwala efektywnie wdrożyć i stosować zwinne, adaptacyjne metodyki i narzędzia podczas realizacji projektu.

W wyniku przeprowadzonej analizy projektów taborowych, zaleca się opracowywanie każdorazowo na początku realizacji projektu pisemnego planu komunikacji w projekcie. Zapewnia to stabilność działań projektowych w kontekście zasad raportowania postępów prac (kto, komu, co i jak często raportuje), informacji o częstotliwości spotkań statusowych i składu osobowe-

ing and visualization of the project status and work progress. The visual presentation of tasks and organizing the task register facilitate flexible management of priorities, in accordance with the current needs of the organization and changes occurring in the project. A visual presentation of tasks can be carried out in the form of a team board, a *kanban* board, presenting the workload of individual people with given tasks. This makes it possible to quickly identify bottlenecks and make appropriate modifications to the team's work plan and distribution. The main purpose of the *kanban* board is to illustrate what the team as a whole is currently doing, as well as individual team members, and what they will be working on in the near future, as well as what are the current priorities. The tasks written on the *kanban* board should be sorted according to their importance. The consequence of updating the tasks on the board is the creation of a project progress report. This is not expected to require a lot of work. It is enough to collect data from the *kanban* board and process it accordingly.

Agile project management methodologies emphasize the reduction of the number of tasks currently in progress. Simultaneous implementation of several tasks by team members resulting from working for several projects and the basic operational activity of the organization leads to a situation where members of the project team are carrying out many ongoing tasks. Work in progress, work in process (WIP) includes currently started work, work waiting for verification or implementation, as well as work not yet started, but already waiting to begin. Reducing work portions is one of the main aspects of agile project management methodologies, especially the *kanban* approach. The term *kanban* was introduced by the Toyota company, where that was the name of the manufacturing scheduling system (Hammarberg, 2020). *Kanban* is a combination of Japanese words "*kan*" meaning visual and "*ban*" meaning card - thus "*visual card*". It is worth noting that in the case of intellectual work, work in progress is not visible and can rarely be shown. Hence, a good solution is to implement a tool for its visualization, e.g. in the form of a *kanban* board. It is a table containing at least three parts, gathering information about work that is "to be done", work that is "in progress", and work "done" (Ockerman, Reindl, 2020), an example of which was shown in Figure 1.

Elementy zadań/prac	Do zrobienia	W trakcie	Ukończone
	 	 	
			
	   		
	 		

go podczas tych spotkań. Warto w planie komunikacji zawrzeć informacje o tym, jakie długie są iteracje i kiedy będą się odbywały spotkania retrospektywy.

Podczas realizacji projektu rekomenduje się wykorzystanie oprogramowania ułatwiającego harmonogramowanie i wizualizację statusu projektu i postępu prac. Wizualna prezentacja zadań i porządkowanie rejestru zadań usprawnia elastyczne zarządzanie priorytetami, zgodnie z aktualnymi potrzebami organizacji i zmianami pojawiającymi się w projekcie. Wizualną prezentację zadań można prowadzić w postaci tablicy zespołu, typu tablicy *kanban*, inaczej nazywanej promiennikiem informacji, prezentującej obciążenie poszczególnych osób zadaniami. Pozwala to na szybką identyfikację wąskich gardeł i dokonanie odpowiednich modyfikacji w pracy zespołu. Głównym przeznaczeniem tablicy *kanban* jest zobrazowanie czym w danej chwili zajmuje się zespół jako całość, a także poszczególni członkowie zespołu i nad czym będą pracować w najbliższym czasie, jakie są aktualne priorytety. Zadania rozpisywane na tablicy *kanbanowej* należy posortować według ich ważności. Konsekwencją aktualizacji zadań na tablicy jest stworzenie raportu postępu prac w projekcie. Nie wymaga to wówczas dużego nakładu pracy. Wystarczy zebrać dane z tablicy *kanban* i odpowiednio je opracować.

Zwinne metodyki zarządzania projektami akcentują redukcję liczby zadań w toku. Jednoczesne realizowanie przez członków zespołu kilku zadań wynikających z prac na rzecz kilku projektów oraz podstawowej, operacyjnej działalności organizacji skutkuje posiadaniem przez członków zespołu projektowego wielu zadań w toku realizacji. Praca w toku, praca częściowa (ang. *work in progress*, *work in process* – *WIP*) obejmuje aktualnie rozpoczętą pracę, pracę czekającą na weryfikację lub wdrożenie, a także prace jeszcze nie-rozpoczęte, ale już czekające na rozpoczęcie. Ograniczenie pracy częściowej jest jednym z głównych elementów zwinnych metodyk zarządzania projektami, zwłaszcza podejścia *kanban*. Określenie *kanban* zostało wprowadzone w koncernie Toyota, w którym tak nazwano system harmonogramowania produkcji (Hammarberg, 2020). *Kanban* to połączenie japońskich słów „*kan*” oznaczające wizualny oraz „*ban*” oznaczający kartę - „kartę wizualną”. Warto zauważyć, iż w przypadku pracy umysłowej praca w toku nie jest widoczna. Stąd dobrym rozwiązaniem jest wdrożenie narzędzia do jej wizualizacji, np. w postaci tablicy *kanbanowej*. Jest to tablica zawierająca co najmniej trzy części, gromadzące informacje odpowiednio o pracy, która jest „do zrobienia”, „w trakcie realizacji”, „zrobiona” (Ockerman, Reindl, 2020), której przykład zamieszczono na rysunku 1.

Fig. 1. Example of a *kanban* board. Source: author's creation based on Ockerman, Reindl (2020).

Rys. 1. Przykładowa tablica *kanbanowa*. Źródło: opracowanie własne na podstawie Ockerman, Reindl (2020).

The agile approach of *kanban* emphasizes the need to complete the task, in the form of the slogan "start to finish", before accepting the next one for implementation. It is recommended during the project implementation to complete the ongoing task before starting a new one, which helps improve the worker's focus, eliminates distractions, and increases work efficiency. According to Little's law¹, the greater (on average) the number of tasks is to be performed at a given moment, the (on average) more time it will take to complete each of them (Kim, Whitt, 2013). The implementation of several tasks at the same time, e.g. in parallel for several projects, relates to the concept of the so-called context switching, meaning the need to trigger a state of mind in workers appropriate for a task previously interrupted. This results in a loss of focus and time. The actual working time of a team member includes the time spent on completing the task and the time spent switching between tasks and redeploying to the subject matter. When carrying out other tasks, the loss of time and attention when changing the execution of subsequent tasks can be significant. Having more work in progress slows down each task and increases the time it takes to receive feedback by extending the feedback loop shown in Figure 2. In an Agile approach, feedback is key to project management.

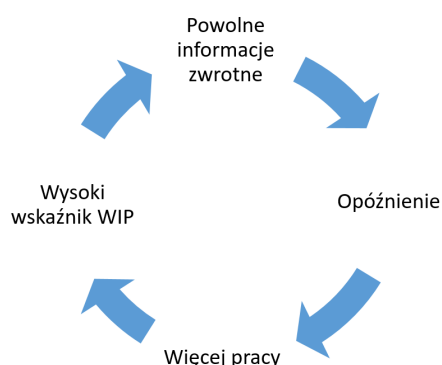


Fig. 2. The impact of the number of works in progress on the delay of work completion. Source: created based on Hammarberg (2020).

Rys. 2. Wpływ ilości pracy w toku na opóźnienia w realizacji zadań. Źródło: opracowanie własne na podstawie Hammarberg (2020).

Breaking tasks down into smaller pieces with similar ranges and sizes is a way to reduce the amount of work in progress. Thanks to this solution, it is possible to maintain a relatively constant pace of work and constant feedback, which is a characteristic element of an

Zwinne podejście kanban podkreśla konieczność dokończenia zadania, przed przyjęciem kolejnego do realizacji, w postaci hasła „zaczynaj kończyć”. Rekomenduje się podczas realizacji projektu dokończenie zadania przed rozpoczęciem nowego, co pozytywnie wpływa na skupienie, eliminuje rozpraszanie uwagi, zwiększa efektywność pracy. Zgodnie z prawem Little'a¹ im większa (przeciętnie) liczba zadań znajduje się w danym momencie do wykonania, tym (przeciętnie) więcej czasu zajmie ukończenie każdej z nich (Kim, Whitt, 2013). Realizacja kilku zadań jednocześnie, np. w kilku projektach, związana jest z tzw. przełączaniem kontekstu, oznaczającym konieczność uruchomienia w umyśle stanu dla zadania wcześniej przerwane. Skutkuje to utratą skupienia i czasu. Rzeczywisty czas pracy członka zespołu obejmuje czas poświęcony wykonaniu danego zadania oraz czas związany z przełączaniem się między zadaniami i ponownym wdrożeniem w dane zagadnienie. Przy realizacji większej liczby zadań jednocześnie utrata czasu i uwagi przy zmianie realizacji kolejnych zadań może być znacząca. Posiadanie większej ilości bieżącej pracy w toku spowalnia każde z wykonywanych zadań i wydłuża czas otrzymania informacji zwrotnej, poprzez wydłużenie pętli informacji zwrotnych, którą przedstawiono na rysunku 2. W podejściu zwinnym informacje zwrotne są kluczowe do zarządzania projektami.

Podział zadań na mniejsze elementy, o zbliżonych do siebie zakresach i rozmiarach jest sposobem na zmniejszenie ilości pracy w toku. Dzięki temu możliwe jest zachowanie względnie stałego tempa prac i stałej informacji zwrotnej, co jest charakterystycznym elementem zwinnego podejścia do zarządzania projektami. Informacje zwrotne dostarczają wiedzę o tym, co należy zmienić w realizacji projektu, o jakości pracy, co należy pozostawić w niezmienionej formie. Zarządzanie projektem z wykorzystaniem elementów zwinnych metodyk skutkuje sprawniejszym, bardziej dynamicznym uzyskiwaniem informacji zwrotnych, co skutkuje szybszą realizacją projektu i osiągnięciem zakładanych rezultatów.

Z punktu widzenia zarządzania projektem na poziomie kilkudziesięcioosobowego zespołu projektowego kluczowym jest organizowanie regularnych, możliwie krótkich spotkań statusowych, przeglądowych. Rekomenduje się wprowadzenie cyklicznych spotkań, trwających nie dłużej niż godzinę i odbywających się

¹ Little's law is a statement saying that the average number of things/clients in the system is equal to the product of the average time spent in the system and the average rate of their appearance. This law is part of queuing theory, a field of mathematics that is a part of operations research. It was formulated in 1954 by Alan Cobham. They were presented in algebraic form in 1958 by Philip Morse. In 1961, Massachusetts Institute of Technology professor John Little presented evidence that this law applies to any queuing system if it is observed long enough (Little, 2008).

¹ Prawo Little'a jest twierdzeniem mówiącym o tym, że średnia liczba rzeczy/klientów w systemie jest równa iloczynowi średniego czasu przebywania w systemie oraz średniego tempa ich przybywania. Prawo to jest elementem teorii kolejek, dziedziny matematyki będącej częścią badań operacyjnych. Zostało sformułowane w 1954 r. przez Alana Cobhama. W formie algebraicznej przedstawił je w roku 1958 Philip Morse. W 1961 r. profesor Massachusetts Institute of Technology John Little przedstawił dowód na to, że prawo to obowiązuje w każdym systemie kolejkowym, jeśli obserwuje się je odpowiednio długo (Little, 2008).

agile approach to project management. Feedback provides knowledge about what should be changed in the implementation of the project, provides information on the quality of work, as well as what should be left unchanged. Project management with the use of agile methodologies results in more efficient, more dynamic feedback, which results in faster project implementation and achievement of the expected results.

From the project management point of view at the level of a project team consisting of several dozen people, the key is to organize regular, possibly short status and review meetings. It is recommended to introduce periodic meetings, lasting no more than one hour and held regularly, at least once every two weeks. Such an approach allows for efficient monitoring of the work done in the project and early detection of problems and threats. The status meetings should be attended by members of the steering committee (or its representative), R&D manager, managing director, key members of the project team and a representative of the project management office. One should look for ways to shorten the duration of the regular status meetings. During status meetings, each member of the project team should briefly describe:

- what they did/worked on since the previous review meeting,
- what they will be working on/what they will be doing until the next meeting,
- what difficulties they encountered.

The project is assumed to be a time-limited undertaking, hence the period of cooperation between team members is predetermined and set along with the start and end dates of the project. Regular status meetings in the project improve communication and feedback. Status meetings are meetings "for" team members, they integrate the team, enable regular exchange of information, ideas and knowledge. Planning the implementation of subsequent activities in the project in two- or three-month timeboxes, i.e. in cycles of no longer than quarterly, minimizes the risk of poor planning of activities and running over the deadline. This keeps the team members' involvement in the project implementation at a higher level than when planning in the time scale of the year or immediately for the entire, several-year-long project. Long-term planning and its disadvantages may result in a cascade of delays in the implementation of the project tasks. When planning long-term, the effects of the activities of individual team members are distant in time, the satisfaction with the work of team members and motivation decrease, which is very difficult to maintain at a high level throughout the several years that a project could last. Cascade models of project implementation according to traditional methodologies are ineffective because they require the project team to prepare a complete description of the project work at the very beginning of the project and implementation

regularly, not rarer than once every two weeks. This allows for efficient monitoring of the progress of work in the project and early detection of threats. In status meetings, members of the steering committee (or its representative), project manager, key members of the project team and a representative of the project management office should participate. One should look for ways to shorten the duration of regular status meetings. During status meetings, each member of the project team should briefly describe:

- co zrobił/nad czym pracował od czasu poprzedniego spotkania przegląadowego,
- nad czym będzie pracował/czym się będzie zajmował do czasu kolejnego spotkania,
- jakie napotykał trudności.

Projekt z założenia jest przedsięwzięciem o ograniczonym czasie, stąd okres współpracy członków zespołu jest z góry określony terminem rozpoczęcia i zakończenia projektu. Regularne spotkania statusowe w projekcie usprawniają komunikację i przekazywanie informacji zwrotnej. Spotkania statusowe są spotkaniami „dla” członków zespołu, integrują zespół, umożliwiają regularną wymianę informacji, pomysłów i wiedzy. Planowanie realizacji kolejnych działań w projekcie w timeboxach dwu- lub trzymiesięcznych, tj. czyli w cyklach maksymalnie kwartalnych, minimalizuje ryzyko złego planowania działań i ich niedoszacowania czasowego. Utrzymuje to zaangażowanie członków zespołu w realizację projektu na wyższym poziomie niż podczas planowania w horyzoncie roku lub od razu całego, kilkuletniego projektu. Planowanie w długookresowe może skutkować kaskadowym narastaniem opóźnień w realizacji prac projektowych. Przy planowaniu w horyzoncie wieloletnim efekty działań poszczególnych członków zespołu są oddalone w czasie, spada zadowolenie z pracy członków zespołu i motywacja, którą bardzo trudno utrzymać na wysokim poziomie przez cały czas trwania kilku lat projektu. Modele kaskadowe realizacji projektu zgodnie z tradycyjnymi metodami są nieefektywne, ponieważ wymagają od zespołu projektowego przygotowania kompletnego opisu prac projektowych na początku projektu i realizacji projektu zgodnie z tymi, ustalonymi na początku wytycznymi. Takie podejście utrudnia reagowanie na zmiany.

Adaptacyjne podejście do zarządzania projektami na poziomie zespołu projektowego przynosi największe korzyści w sytuacji, gdy zespoły projektowe rozumieją ideę zwinnego podejścia i mają możliwość oraz chęć pracy w projekcie w samoorganizujących się, niewielkich zespołach. Autonomiczne zespoły projektowe będące fundamentem zwinnego podejścia do realizacji projektów składają się maksymalnie z kilkunastu osób i posiadają niezbędną wiedzę oraz kompetencje do samodzielnego realizowania projektu. Oznacza to, iż działania zespołów samoorganizujących się

of the project in accordance with the guidelines set at the beginning. This approach makes it difficult to react to changes and make adjustments on the fly.

An adaptive approach to project management at the project team level brings the greatest benefits when project teams understand the idea of an agile approach and have the ability and willingness to work in a project in self-organizing, small teams. Autonomous project teams, which are the foundation of an agile approach to project implementation, consist of a maximum of a dozen people and have the necessary knowledge and competences to carry out the project independently. This means that the activities of the self-organizing teams in the project do not depend on the knowledge possessed by people outside of the project team. In the case of transport and rail projects related to rolling stock, the project teams built are generally interdisciplinary, have extensive specialist knowledge and many years of experience, both in the field of rolling stock and the implementation of projects co-financed from public funds. Hence the transition of such a team to work in a self-organizing and self-disciplinary model and building the most autonomous project team is possible and recommended in order to increase the efficiency of the team's work and increase the involvement of team members in the implementation of the project.

4. Conclusion

Disseminating agile project management methodologies will gradually eliminate the antinomies between existing methodologies. Elements of agile methodologies are beginning to be used increasingly more often in the implementation of projects previously based in traditional management methods, which in turn leads to the creation of hybrid methodologies containing elements of both traditional and agile approaches. The implementation of a transport project concerning rolling stock with the use of agile methodologies elements, and thus based on a hybrid methodology, adapted to be used for the specificity of a given company, is a response to the constantly increasing economic requirements and competition.

w projekcie nie są uzależnione od wiedzy posiadanej przez osoby spoza zespołu projektowego. W przypadku projektów transportowych, kolejowych dotyczących taboru budowane zespoły projektowe są interdyscyplinarne, posiadają szeroką specjalistyczną wiedzę i wieloletnie doświadczenie, zarówno w obszarze dotyczącym taboru, jak i realizacji projektów współfinansowanych ze środków publicznych, stąd przejście takiego zespołu do pracy w modelu samoorganizującym się i samodyscyplinującym się oraz budowa jak najbardziej autonomicznego zespołu projektowego jest możliwa i rekomendowana, celem zwiększenia efektywności pracy zespołu oraz zwiększenia zaangażowania członków zespołu w realizację projektu.

4. Podsumowanie

Upowszechnianie zwinnych metodyk stopniowo niwelować będzie występujące pomiędzy metodykami antynomie. Elementy zwinnych metodyk zaczynają być coraz częściej wykorzystywane w realizacji projektów dotychczas opartych na tradycyjnym zarządzaniu, co w konsekwencji prowadzi do powstania hybrydowych metodyk, zawierających elementy zarówno podejścia tradycyjnego, jak i zwinnego. Realizacja projektu transportowego dotyczącego taboru kolejowego z wykorzystaniem elementów metodyk zwinnych, w oparciu o metodykę hybrydową, dostosowaną do specyfiki danego przedsiębiorstwa jest odpowiedzią na rosnące wymagania gospodarcze.

Bibliography/Bibliografia

- [1] Hammarberg M., Sundén J., *Kanban. Zobacz, jak skutecznie zarządzać pracą!*, HELION Gliwice 2020.
- [2] *Managing Successful Projects with PRINCE2*, TSO (The Stationery Office), London 2017.
- [3] Kim SH., Whitt W., *Statistical Analysis with Little's Law, Operations Research*, Vol. 61, No. 4, July-August 2013, pp. 1030-1045. DOI: 10.1287/opre.2013.1193
- [4] Knapp B. W., *A Project Manager's Guide to Passing the Project Management Exam*, The Project Management Excellence Center. Inc., US 2006.
- [5] Little J. D.C., Graves S. C., *Little's Law*, [w:] D. Chhajed, T. J. Lowe, *Bulding Intuition. Insights from Basic Operations Management Models and Principles*, Springer 2008, pp. 81-100.
- [6] Ockerman S., Reindl S., *Doskonalenie Scruma. Przewodnik dla praktyków. O wyzwaniach, korzyściach i zwinnych zespołach*, Wydawnictwo HELION, Gliwice 2020.
- [7] Strojny J., Szmigiel K., *Analiza porównawcza podejść w zakresie zarządzania projektami*, *Modern Management Review*, vol. XX, 22/3 (2015), s. 249 – 265. DOI: 10.7862/rz.2015.mmr.48
- [8] Wyrozębski P., *Biuro zarządzania projektami (PMO)*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2019.
- [9] Young T. L., *The Handbook of Project Management. A Practical Guide to effective policies, techniques and processes*, Koghan Page, London 2007.

Evaluation of suspended rail vehicle movement parameters

Ocena parametrów ruchowych pojazdu kolei podwieszanej

This publication is devoted to the evaluation of the movement parameters of the concept suspended monorail vehicle which was conducted on a basis of its traction characteristic and dynamic capabilities. Firstly, the construction of the proposed vehicle was briefly described along with the specification of the most important design assumptions. Subsequently, the focus was put on the methodology and the very plotting of the vehicle's traction characteristic, as well as the process of its acceleration as a function of speed. Finally, the braking system was assessed by determining the average braking deceleration depending on its type. 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 ocenie parametrów ruchowych koncepcyjnego pojazdu kolei podwieszanej, którą dokonano w oparciu o jego charakterystykę trakcyjną oraz możliwości dynamiczne. W pierwszej kolejności skrótkowo opisano konstrukcję proponowanego pojazdu wraz z wyszczególnieniem najważniejszych założeń projektowych. Następnie skupiono się na metodyce oraz samym wykreśleniu charakterystyki trakcyjnej pojazdu, jak również przebiegu jego przyspieszenia w funkcji prędkości. Na koniec poddano ocenie układ hamulcowy poprzez wyznaczenie średniego opóźnienia hamowania w zależności od jego rodzaju. Artykuł ten powstał na podstawie pracy dyplomowej pt. „Koncepcja wagonu silnikowego kolei podwieszanej”, na wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.

Keywords: rail vehicle, traction drive, hydrogen powered

Słowa kluczowe: pojazd szynowy, napęd trakcyjny, zasilanie wodorem

1. INTRODUCTION

Suspended railway, belonging to the group of monorails, should be treated as a cheaper alternative to the metro in medium-sized urban agglomerations. Vehicles of this type are characterised by: full independence from traffic, the possibility of easy automation and a relatively short construction time of the necessary infrastructure which takes up only a small area of ground. Currently, there are three suspended monorail systems in the world that are used in urban transportation, namely: Schwebbahn in the German city of Wuppertal and located in the metropolitan area of Tokyo in Japan: Shonan and Chiba monorail. More on the existing solutions can be found in the earlier publication of the authors [1].

Due to the low popularity of suspended monorail, there are only a few studies in the professional literature concerning this type of vehicles. Moreover, those publications refer only to the general description of solutions and in the same time they concentrate on comparison between different types of monorails. Excellent example of such literature is [2]. In the field of more specialized studies, there could be distinguished for example [3], which refers to vehicle dynamic issues. Technical papers that concentrate on monorail traction calculations, actually don't exist. Due to the fact that authors' vehicle concept is very different from standard suspended monorail vehicles

1. WSTĘP

Kolej podwieszaną zaliczającą się do grupy kolei jednoszynowych należy traktować, jako tańszą alternatywę dla metra w średniej wielkości aglomeracjach miejskich. Pojazdy tego typu charakteryzują się: całkowitą niezależnością od ruchu ulicznego, możliwością łatwej automatyzacji czy stosunkowo krótkim czasem budowy niezbędnej infrastruktury, która zajmuje jedynie nieznaczną powierzchnię gruntu. Aktualnie na świecie można wyróżnić trzy systemy kolei podwieszanej pełniące funkcję transportu miejskiego, to jest: Schwebbahn w niemieckich mieście Wuppertal oraz znajdujące się w obszarze aglomeracyjnym Tokyo w Japonii: Shonan i Chiba monorail. Więcej na temat istniejących rozwiązań można znaleźć we wcześniejszej publikacji autorów [1].

Ze względu na małe rozpowszechnienie kolei podwieszanej, występują tylko nieliczne opracowania w literaturze fachowej dotyczące tego typu pojazdów. Ponadto prezentują one dość ogólny przegląd stosowanych rozwiązań technicznych jednocześnie porównując różne typy kolei jednoszynowych. Dobrym przykładem opracowań tego typ jest [2]. Jeżeli chodzi o pozycje bardziej szczegółowe można wyróżnić chociażby [3], która skupia się na zagadnieniach dynamiki pojazdu. Z kolei literatura poświęcona zagadnieniom obliczeń trakcyjnych w ujęciu kolei podwieszanych praktycznie nie istnieje. Jednak zważywszy na fakt, że

(generally not only suspended but all monorail vehicles), in the course of writing this paper, the authors used mainly studies on traction calculations for traditional rail vehicles, of course wherever it is necessary adapting them to this particular solution. One of the most helpful publications of this kind was [4].

2. VEHICLE'S MOVEMENT ANALYSIS

The vehicle proposed by the authors (Fig. 1) is a three-section, bidirectional, suspended electric multiple unit.

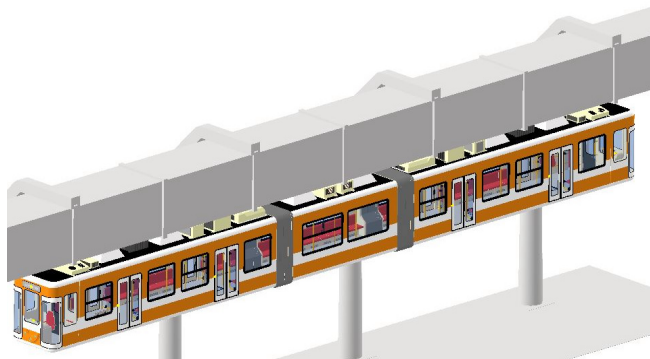


Fig. 1. Authors' suspended electric multiple unit [5]

Rys. 1. Podwieszany elektryczny zespół trakcyjny autorów [5]

The vehicle is suspended below a closed guideway beam where, along a pair of steel rails, move three bogies similar in their design to conventional rail bogies (Fig. 2). The electric energy is supplied to the rolling stock from an additional current rail through a bottom-running current collector. The electric circuit is closed by wheel-rail contact.

Table 1 Technical specification of suspended EMU
Tabela 1 Wybrane dane techniczne podwieszanego 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 carriage 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
Axle arrangement / Układ osi	–	1A ² +1A ² +1A ²
Wheel diameter / Średnica kół	mm	700/750
Bogie centre distance / Rozstaw czopów skreću	mm	10 680
Wheelbase / Baza wózka	mm	1 600

proponowane przez autorów rozwiązanie, w znacznej mierze odbiega od standardowych pojazdów kolei podwieszanej (czy ogólniej jednoszynowej), autorzy przeważnie skupiali się na publikacjach poświęconych tradycyjnym pojazdom szynowych, oczywiście tam gdzie to konieczne dostosowując wzory do specyficznych zagadnień kolei podwieszanej. Szczególnie istotna i pomocna w tym zakresie okazała się [4]

2. ANALIZA RUCHOWA POJAZDU

Proponowany przez autorów pojazd (rys. 1) jest trójczłonowym, dwukierunkowym, podwieszanym elektrycznym zespołem trakcyjnym. Pojazd zawieszony jest poniżej zamkniętej belki jezdnej, w której poruszają się, po parze stalowych szyn, trzy wózki podobne w swojej konstrukcji do konwencjonalnych wózków kolejowych (rys. 2). Energia elektryczna zasilająca skład jest pobierana z dodatkowej szyny prądowej, przez odbierak prądu o ślizgu dolnym. Sieć powrotną stanowią zestawy kołowe oraz szyny.

Do najważniejszych założeń projektowych, mających decydujący wpływ na ostateczny kształt pojazdu, należy zaliczyć:

- prędkość maksymalną przekraczającą 50 km/h;
- możliwość pokonywania toru o znacznym kącie nachylenia;
- możliwie dużą pojemność całkowitą.

Dodatkowo miejskie przeznaczenie pojazdu wymusza dążenie do minimalizacji emisji dźwięku i drgań do otoczenia jak również umożliwienia pokonywania torów o małym promieniu krzywizny. Wymagania te spełniono poprzez odpowiednią budowę wózków: krótką bazę, smarowanie obrzeży kół czy niską masę nieusprężynowaną. Wybrane parametry techniczne składu zostały zestawione w tabeli 1 [5], gdzie celowo nie uwzględniono parametrów ruchowych takich jak przyspieszenie czy opóźnienie.

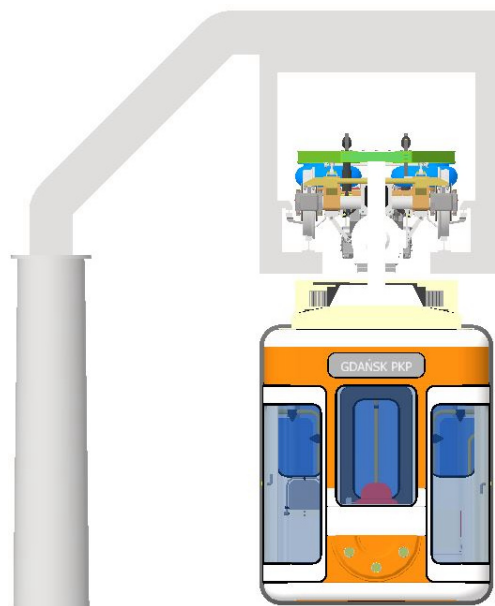


Fig. 2. Concept of the suspended railway system [5]

Rys. 2. Proponowany system kolei podwieszanej [5]

The most important assumptions that had the biggest influence on the final vehicle's design are:

- maximum speed exceeding 50 km/h;
- ability to run on a track with significant slope angle;
- as high total capacity as possible.

In addition, the urban designation of the vehicle forces a need to minimize sound emission and vibrations to the surroundings, as well as to enable it to run in a curve with a small turning radius. These requirements were fulfilled by a suitable bogie design: short wheelbase, lubrication of the wheel flanges and low unsprung mass. Selected technical data of the rolling stock are presented in Table 1 [5], where the parameters regarding acceleration and braking are omitted on purpose.

Visible in the table untypical axle arrangement is dictated by the need to place in the bogie a gearbox with a high gear ratio and a relatively high-powered motor which made it impossible to drive simultaneously both wheelsets. Detailed description of the vehicle's design will be a subject of another publication and in this one authors focus only on propulsion and braking systems and more specifically on the parameters obtained by them.

2.1. Propulsion system

The vehicle is equipped with three asynchronous, squirrel-cage motors (DKLBZ 0910-04 made by VEM which technical data originated from [5] were used in the calculations), powered individually from traction inverters that convert direct current supplied to the vehicle into alternating current with adjustable parameters (e.g. frequency or voltage values). Every motor is connected via a flexible coupling with a two-stage bevel-helical gear unit. Finally, the torque is transferred on a single wheelset by a pair of link couplings connected with each other by a hollow shaft. Both the motor and the gearbox are suspended in the frame of the bogie. In order to plot the traction characteristic of the vehicle, the following quantities are necessary (a lack of numerical value means that the value of the given parameter is not a constant during the calculations):

- total number of axles – $c=6$;
- total number of driven axles – $b=3$;
- total number of vehicle's motors – $s=3$;
- total efficiency of the gearbox – $\eta_c=0.96$;
- pressure of powered wheelsets on the track – Q_n [N] (assuming an even distribution of the vehicle weight between all wheelsets);
- vehicle weight – Q [kN];
- maximal total vehicle's mass – 71 811 kg;
- angle of inclination – α [°];
- number of cars in a multiple unit – $z=2$;
- number of axles – $n=6$;

Widoczny w tabeli nietypowy układ osi jest podyktowany koniecznością zabudowy w wózku przekładni o dużym przełożeniu i silnika o stosunkowo dużej mocy, co skutecznie uniemożliwia jednocześnie napędzanie obu zestawów kołowych. Szczegółowa budowa pojazdu będzie tematem oddzielnej publikacji, a w niniejszym artykule autorzy skupią się wyłącznie na układzie napędowym i hamulcowym, a dokładniej na użytych dzięki nim parametrach.

2.1. Układ napędowy

Pojazd został wyposażony w trzy klatkowe silniki asynchroniczne (DKLBZ 0910-04 firmy VEM, których dane techniczne wykorzystane w obliczeniach pochodzą z [5]), zasilane indywidualnie z falowników trakcyjnych zamieniających doprowadzony do pojazdu prąd stały na prąd zmienny o regulowalnych parametrach (np. częstotliwości czy wartości napięcia). Każdy silnik połączony jest przy pomocy sprzęgła podatnego z dwustopniową, stożkowo-walcową przekładnią mechaniczną. Na koniec moment napędowy przenoszony jest na pojedynczy zestaw kołowy, poprzez parę sprzęgieł ciągnowych połączonych ze sobą wałem drążonym. Zarówno silnik jak i przekładnia zostały zawieszone w ramie wózka. W celu wykreślenia charakterystyki trakcyjnej pojazdu niezbędne są następujące wielkości (brak wartości liczbowej oznacza, że wartość danego parametru nie jest stała w czasie obliczeń):

- całkowita liczba osi – $c=6$;
- całkowita liczba osi napędnych – $b=3$;
- całkowita liczba silników pojazdu – $s=3$;
- całkowita sprawność przekładni mechanicznej – $\eta_c=0.96$;
- ciężar napędny pojazdu – Q_n [N] (przy założeniu równomiernego rozkładu masy pojazdu pomiędzy wszystkie zestawy kołowe);
- ciężar pojazdu – Q [kN];
- dopuszczalna, całkowita masa pojazdu – $m=71\,811$ kg;
- kąt nachylenia wzniesienia – α [°];
- liczba wagonów w zespole trakcyjnym – $z=2$;
- liczba osi zespołu trakcyjnego – $n=6$;
- moc silnika – $N_{sil}=280\,000$ W;
- moment obrotowy silnika – M_{sil} [Nm];
- prędkość ruchu pojazdu – v [m/s];
- przełożenie przekładni mechanicznej – $i=8$ (przełożenie to wynika z założonej prędkości maksymalnej pojazdu oraz średnicy tocznej jego kół);
- przyspieszenie ziemskie – $g=9.81$ m/s²;
- statyczny współczynnik przyczepności – $\Psi_0=0.33$ (zgodnie z [6, 7] wartość ta jest powszechnie przyjmowana w kolejnictwie dla szyn suchych, a wykorzystanie jej w charakterystyce pojazdu jest uzasadnione umiejscowieniem szyn w zamkniętej belce jezdnej);
- średnica toczna nowego koła – $D_k=750$ mm;

- motor power – $N_{sil}=280\,000\text{ W}$;
- motor torque – $M_{sil}\text{ [Nm]}$;
- vehicle speed – $v\text{ [m/s]}$;
- mechanical transmission gear ratio – $i=8$ (this ratio results from the assumed maximum speed of the vehicle and the rolling diameter of its wheels);
- gravitational acceleration – $g=9.81\text{ m/s}^2$;
- static adhesion coefficient – $\Psi_0=0.33$ (according to [6, 7] the value is commonly adopted in railways for dry rails and its use in the vehicle characteristics justifies the location of the rails in a closed guideway beam);
- rolling diameter of the new wheel – $D_K=750\text{ mm}$;
- rotational mass coefficient – $\gamma=1.15$ (according to [4] it is an approximate value for railcars).

The basic determinant of the assessment of the vehicle's movement parameters is its traction characteristic (Fig. 3) showing a graph of: motion resistance, adhesion forces and resultant traction force as a function of speed.

The vehicle's motion resistance (W) is a sum of the basic resistance (the so-called own resistance) which can be divided into component resistances: wheel motion along the rail, resistance coming from bearings in wheelsets' axleboxes, caused by energy dissipation in the trackbed and in the vehicle suspension; and additional resistances such as climbing or curve resistance. The first of the aforementioned was determined on a basis of the following empirical relationship: [4]

$$W_{zas} = (0,65 + 0,054 \cdot v) \cdot Q + 147 \cdot n + (2,7 + z) \cdot 1,271 \cdot v^2 \quad (1)$$

This formula was developed by the Railway Research Institute IK for railway multiple units. Due to the unusual configuration of the designed vehicle, the authors decided that it can be compared to a two-section, three-bogie (with a central Jacobs bogie), a railway EMU and for such carried out the calculations. As for the additional resistance, it was decided to take into account only the climbing resistance, in accordance with:

$$W_i = Q \cdot \sin(\alpha) \quad (2)$$

The adhesion forces between rail and wheels are the practical limitation of traction forces. Exceeding this limit value results in increase in slip up to 100%. The limit value of adhesion forces was calculated in accordance with: [7]

$$F_\Psi = Q_n \cdot \Psi \cdot \cos(\alpha) = m \cdot g \cdot \frac{b}{c} \cdot \Psi \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

The crucial impact on the value of traction forces has the value of the adhesion coefficient which change as a function of speed was determined according to the Parodi formula: [6, 7]

- współczynnik mas wirujących – $\gamma=1,15$ (według [4] jest to przybliżona wartość dla wagonów silnikowych).

Podstawowym wyznacznikiem oceny parametrów ruchowych pojazdu jest jego charakterystyka trakcyjna (rys. 3), ukazująca przebieg: oporów ruchu, sił przyczepności oraz wypadkowej siły trakcyjnej w funkcji prędkości.

Opory ruchu pojazdu (W) są sumą oporu zasadniczego (tzw. oporu własnego), który można podzielić na opory składowe: ruchu koła po szynie, oporu pochodzącego od łożysk w maźnicach zestawów kołowych, spowodowanego dyssypacją energii w podtorzu i w zawieszeniu pojazdu; oraz opory dodatkowe takie jak opór wzniesienia czy zakrętu. Opór własny pojazdu został wyznaczony na podstawie poniższej zależności empirycznej: [4]

$$W_{zas} = (0,65 + 0,054 \cdot v) \cdot Q + 147 \cdot n + (2,7 + z) \cdot 1,271 \cdot v^2 \quad (1)$$

Wzór ten został opracowany przez Instytut Kolejnictwa dla kolejowych zespołów trakcyjnych. W związku z nietypową konfiguracją zaprojektowanego pojazdu, autorzy uznali, że można go przyrównać do dwuczłonowego, trójwózkowego (z środkowym wózkiem Jacobsa), kolejowego EZT i dla takiego przeprowadzić obliczenia. Z oporów dodatkowych zdecydowano się na uwzględnienie wyłącznie oporu wzniesienia, zgodnie z:

$$W_i = Q \cdot \sin(\alpha) \quad (2)$$

Siły przyczepności występujące pomiędzy szyną a kołami, stanowią praktyczne ograniczenie sił trakcyjnych. Przekroczenie wartości granicznej skutkuje stopniowym wzrostem poślizgu aż do 100%. Graniczna wartość sił przyczepności została obliczona zgodnie z: [7]

$$F_\Psi = Q_n \cdot \Psi \cdot \cos(\alpha) = m \cdot g \cdot \frac{b}{c} \cdot \Psi \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

Decydujący wpływ na wartość sił przyczepności ma wielkość współczynnika przyczepności, którego przebieg w funkcji prędkości wyznaczono według wzoru Parodiiego: [6, 7]

$$\Psi = \frac{\Psi_0}{1 + 0,036 \cdot v} \quad (4)$$

Do wyznaczenia samej siły trakcyjnej posłużono się zależnością: [7]

$$F = \frac{2 \cdot s \cdot M_{sil} \cdot i_a \cdot \eta_c}{D_K} \quad (5)$$

Zastosowanie przetwornic częstotliwościowych do zasilania silników trakcyjnych pojazdu pozwala na praktycznie dowolne kształtowanie jego charakterystyki trakcyjnej. Na wyznaczonej krzywej granicznej sił pociągowych (linia czerwona na rys. 3), można wyróżnić dwa obszary pracy: ze stałym momentem (do częstotliwości 55 Hz, odpowiadającej prędkości 30 km/h) i ze stałą mocą. W drugim przypadku moment obrotowy silnika w danej chwili czasu wyznaczono według: [8]

$$\psi = \frac{\psi_0}{1 + 0,036 \cdot v} \quad (4)$$

The following equation was used to determine the traction force itself: [7]

$$F = \frac{2 \cdot s \cdot M_{sil} \cdot i_a \cdot \eta_c}{D_K} \quad (5)$$

The use of frequency converters to supply the vehicle's traction motors allows for practically any shaping of its traction characteristic. On the determined boundary curve of tractive forces (red line in Fig. 3), two areas of operation can be distinguished: with constant torque (up to the frequency of 55 Hz, corresponding to a speed of 30 km/h) and with constant power. In the second case, the engine torque at a given moment of time was determined according to: [8]

$$M_{sil} = \frac{N_{sil}}{\omega_1} \quad (6)$$

It is possible to eliminate the initial working area with a constant torque which makes it easier to start the rolling stock with a high load. In this case, the amount of torque decreases exponentially, as the motor speed (supply frequency) increases, from its maximum value.

The determined characteristic proves the fulfilment of one of the initial design assumptions, that is, running on a track with a significant slope angle p [%]. This was achieved thanks to the high value of traction and adhesion forces. The first of them were obtained as a result of the use of high-power motors (280 kW) and a mechanical transmission with a high ratio. On the other hand, the latter are the result of the high ratio of driving axles to trailing axles (high value pressure of powered axles against rails) and the protection of the rails against weather conditions in the guideway beam and the resulting relatively high value of the static coefficient of adhesion.

The aforementioned characteristic was determined for the fully loaded vehicle. In operational practice, this type of situation is extremely rare, and most of the courses take place with only half of the total vehicle capacity. Along with the decrease in the total weight of the vehicle, the adhesion forces and motion resistance also decrease, which in total translates into a slight increase in the value of the maximum track inclination. In addition, there is then a significant surplus of traction forces in relation to the adhesion forces, and therefore, in order to prevent excessive skid of the wheelsets, an anti-skid system was used.

An important movement parameter of the public transport rolling stock is its appropriate dynamics, necessary for a high number of starts and braking. In order to assess the dynamic capabilities of the vehicle, the acceleration value was used, determined according to: [4]

$$a = \frac{1}{\gamma \cdot m} \cdot \left(\frac{s \cdot N_{sil} \cdot \eta_c}{v} - W \right) \quad (7)$$

$$M_{sil} = \frac{N_{sil}}{\omega_1} \quad (6)$$

Istnieje możliwość wyeliminowania początkowego obszaru pracy ze stałym momentem, co ułatwia ruszanie z miejsca składu o dużym obciążeniu. W takim przypadku wielkość momentu zmniejsza się wykładniczo, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika (częstotliwości zasilania), od jego wartości maksymalnej.

Wyznaczona charakterystyka świadczy o spełnieniu jednego z początkowych założeń projektowych, to jest pokonywania toru o znacznym kącie nachylenia p [%], co udało się osiągnąć dzięki wysokiej wartości sił trakcyjnych oraz przyczepności. Pierwsze z nich uzyskano w wyniku zastosowania silników wysokiej mocy (280 kW) oraz przekładni mechanicznej o wysokim przełożeniu. Z kolei drugie są efektem wysokiego stosunku liczby osi napędnych do tocznych (wysoka wartość nacisku napędnego) oraz osłony szyn przed warunkami atmosferycznymi w belce jezdnej i wiążącej się z tym stosunkowo wysokiej wartości statycznego współczynnika przyczepności. Przytoczoną charakterystykę wyznaczono dla pojazdu w pełni obciążonego. W praktyce eksploatacyjnej sytuacja tego typu jest niezmiernie rzadka, a większość kursów odbywa się przy zaledwie połowie wypełnienia składu. Wraz ze spadkiem całkowitej masy pojazdu, zmniejszeniu ulegają również siły przyczepności i opory ruchu, co sumarycznie przekłada się na nieznaczny wzrost wartości maksymalnego nachylenia toru. Ponadto pojawia się wtedy znaczna nadwyżka sił trakcyjnych w stosunku do sił przyczepności, a więc w celu nie dopuszczenia do nadmiernego poślizgu zestawów kołowych, zastosowano układ antypoślizgowy.

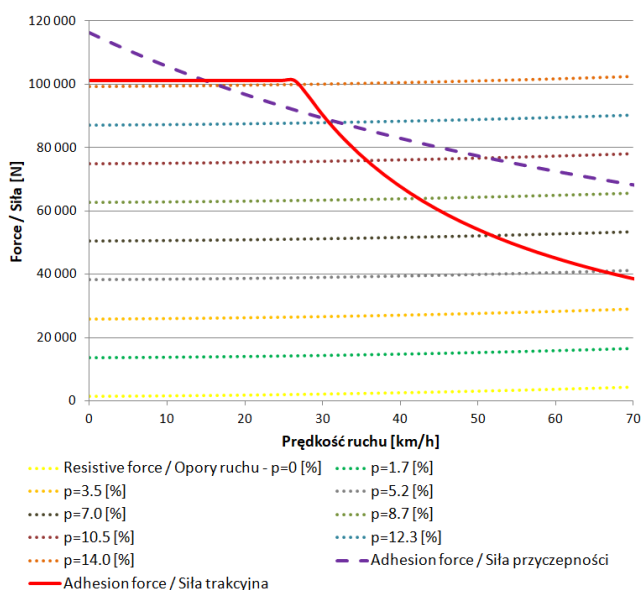


Fig. 3. Vehicle traction characteristic [5]
Rys. 3. Charakterystyka trakcyjna pojazdu [5]

Obviously, the maximal acceleration value is limited by adhesion forces represented on the graph by dashed curve (Fig. 4), determined according to Newton's second law of motion.

Comparing the obtained values for a fully loaded vehicle with the starting and finally acceleration for metro vehicles ($0.8 - 1.2 \text{ m/s}^2$ and $0.08 - 0.15 \text{ m/s}^2$ [4], respectively) and EMU ($0.6 - 0.8 \text{ m/s}^2$ and $0.05 - 0.07 \text{ m/s}^2$ [4]), it can be concluded that the obtained dynamic properties are sufficient.

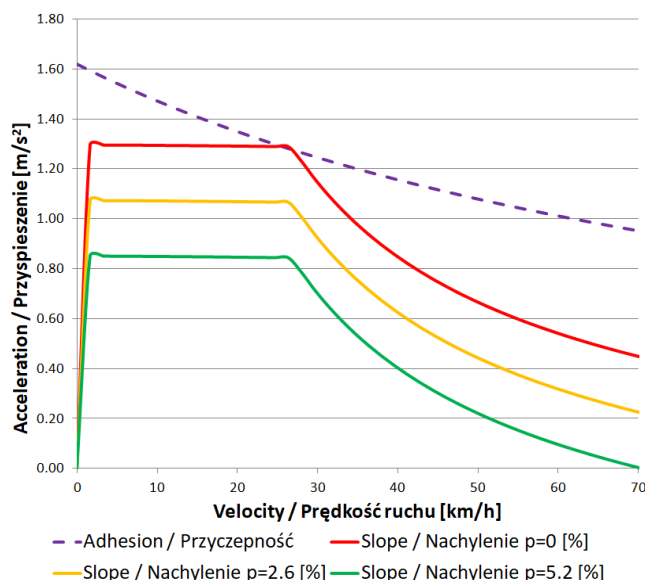


Fig. 4. Vehicle dynamics (acceleration) capabilities [5]
Rys. 4. Parametry dynamiczne pojazdu [5]

2.2. Braking system

In the calculations performed in this subsection, the following quantities were used:

- total number of rail brake drag shoes – $l_{HS}=6$ (two in every bogie);
- total number of friction rings of the vehicle's disc brake – $l_{HT}=12$ (two rings are mounted on every wheel);
- number of friction surfaces – $n=2$;
- radius of the action of the friction force – $R_{THT}=0.2325 \text{ m}$;
- pressure force of the friction lining of the disc brake – Q_{DHT} [N] (its maximum value results from the permissible unit pressure of the friction lining);
- contact pressure of the rail brake drag shoe – $Q_{DHS}=36\,000 \text{ N}$ (being a function of its length, assuming 72 kN/m according to [9]);
- friction coefficient of disc brake lining – $\mu_{HT}=0.35$ (suitable for FR20H.2 lining, according to [10]);
- coefficient of friction of a rail brake shoe – μ_{HS} [-], the value of which changes as a function of speed according to the Krawiecki formula: [4]

$$\mu_{HS} = \mu_0 \cdot \frac{3,6 \cdot v + 100}{1,8 \cdot v + 100} \quad (8)$$

Istotnym parametrem ruchowym składu komunikacji miejskiej, jest jego odpowiednia dynamika, niezbędna przy dużej liczbie rozruchów i hamowań. W celu oceny możliwości dynamicznych pojazdu posłużono się wartością jego przyspieszenia, wyznaczoną według: [4]

$$a = \frac{1}{\gamma \cdot m} \cdot \left(\frac{s \cdot N_{sil} \cdot \eta_c}{v} - W \right) \quad (7)$$

Oczywiście wartość maksymalnego przyspieszenia ograniczona jest siłami przyczepności, które reprezentuje na wykresie przerywana krzywa (rys. 4), wyznaczona zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona.

Porównując uzyskane wartości dla w pełni obciążonego pojazdu z przyspieszeniami początku i końca rozruchu dla pojazdów metra (odpowiednio $0,8 - 1,2 \text{ m/s}^2$ i $0,08 - 0,15 \text{ m/s}^2$ [4]) oraz EZT ($0,6 - 0,8 \text{ m/s}^2$ i $0,05 - 0,07 \text{ m/s}^2$ [4]), można stwierdzić, że uzyskane własności dynamiczne są wystarczające.

2.2. Układ hamulcowy

W wykonanych w niniejszym podrozdziale obliczeniach posłużono się następującymi wielkościami:

- całkowita liczba płóz hamulca szynowego – $l_{HS}=6$ (po dwie w każdym wózku);
- całkowita liczba pierścieni ciernych hamulca tarczowego pojazdu – $l_{HT}=12$ (na każdym kole zamocowane są dwa pierścienie);
- liczba powierzchni tarcia – $n=2$;
- promień działania siły tarcia – $R_{THT}=0,2325 \text{ m}$;
- siła docisku okładziny cierniej hamulca tarczowego – Q_{DHT} [N] (jej maksymalna wartość wynika z dopuszczalnego nacisku jednostkowego okładziny cierniej);
- siła docisku płozy hamulca szynowego – $Q_{DHS}=36\,000 \text{ N}$ (będąca funkcją jej długości, przy założeniu 72 kN/m według [9]);
- współczynnik tarcia okładziny cierniej hamulca tarczowego – $\mu_{HT}=0,35$ (odpowiedni dla okładziny FR20H.2, zgodnie z [10]);
- współczynnik tarcia płozy hamulca szynowego – μ_{HS} [-], którego wartość zmienia się w funkcji prędkości zgodnie ze wzorem Krawieckiego: [4]

$$\mu_{HS} = \mu_0 \cdot \frac{3,6 \cdot v + 100}{1,8 \cdot v + 100} \quad (8)$$

gdzie założono wartość początkowego współczynnika tarcia $\mu_0=0,37$, tak aby uzyskać średni współczynnik tarcia równy $0,2$; który przyjęto w obliczeniach hamulca szynowego w [11].

W powyższym zestawieniu nie uwzględniono symboli wykorzystanych przy wyznaczeniu charakterystyki trakcyjnej. W pojeździe zastosowano następujące rodzaje hamulców:

- hamulec elektrodynamiczny (ED) z rekuperacją energii w zasobnikach pokładowych – baterie superkondensatorów lub poprzez zwrot do sieci (pod

The value of the initial coefficient of friction was established as $\mu_0=0.37$ to achieve the average coefficient of friction equal to 0.2 which was used in the calculations of the rail brake in [11].

The set above does not take into account the symbols used to determine the traction characteristic. The vehicle has the following types of brakes:

- electrodynamic brake (ED) with energy recuperation in vehicle storage units - supercapacitors batteries or by return to the network (provided that there is another vehicle with adequate energy demand on the same section). When energy recuperation is impossible, electrical energy is lost in the form of heat on the braking resistors. This type of brake is characterized by: no frictional wear, generation of braking force only on powered wheelsets and low efficiency at low speeds, which means that it must cooperate with another type of brake, but at the same time it should provide the highest possible percentage of the total braking power. The braking force was calculated according to:

$$F_{HED} = \frac{S \cdot N_{sil}}{v} \quad (9)$$

the motor power is constant in the area of constant power operation and varies according to the multiplication of the torque and the rotational speed in the area of the constant moment.

- disc brake which is an active direct electro-pneumatic brake in which the braking force is generated as a result of pressing the friction lining against friction ring. Its value was calculated according to:

$$F_{THT} = \frac{Q_{DHT} \cdot R_{THT} \cdot \mu_{HT}}{R_K} \cdot n \cdot l_{HT} \quad (10)$$

The parameters of the selected friction lining enable the realisation of the full braking power using only disc brake. This power is practically limited by the adhesion forces at the wheel-rail contact.

- tram-type electromagnetic rail brake (independent brake drag shoes are elastically suspended in the bogie frame), the braking force of which, generated by pressing its drag shoe against the rail surface, was calculated in accordance to:

$$F_{HHS} = Q_{DHS} \cdot \mu_{HS} \cdot l_{HS} \quad (11)$$

This value isn't restricted by wheel-rail contact adhesion phenomena.

The disc brake can be controlled by:

- BCU (Brake Control Unit) controller which is a part of the microprocessor control system of the vehicle (Fig. 5 – the diagram was created based on [12]). This system consists of two CAN main lines which allow the transfer of information between individual controllers with the most important of them being connected to both networks. The superior function is performed by the VCU (Vehicle

warunkiem znajdowania się innego pojazdu, wykazującego odpowiednie zapotrzebowanie energetyczne, na tym samym odcinku sekcyjnym). W momencie, gdy rekuperacja energii jest niemożliwa energia elektryczna zostaje wytracona w postaci ciepła na rezystorach hamowania. Hamulec tego typu charakteryzuje się: brakiem zużycia ciernego, wytwarzaniem siły hamującej jedynie na napędnych zestawach kołowych oraz małą efektywnością przy niskich prędkościach, przez co musi on współpracować z innym typem hamulca, ale jednocześnie powinien realizować możliwie największy procent całkowitej mocy hamowania. Siłę hamującą obliczono zgodnie z:

$$F_{HED} = \frac{S \cdot N_{sil}}{v} \quad (9)$$

przy czym moc silnika jest stała w obszarze pracy ze stałą mocą, a zmienia się według iloczynu momentu i prędkości obrotowej, w obszarze stałego momentu.

- hamulec tarczowy (aktywny hamulec elektro-pneumatyczny, typu bezpośredniego) w którym siła hamowania jest generowana w wyniku docisku okładziny cierniej do pierścienia ciernego. Jej wartość została wyznaczona według:

$$F_{THT} = \frac{Q_{DHT} \cdot R_{THT} \cdot \mu_{HT}}{R_K} \cdot n \cdot l_{HT} \quad (10)$$

Parametry dobranej okładziny cierniej umożliwiają realizację pełnej mocy hamowania roboczego, wyłącznie hamulcem tarczowym. Moc ta jest praktycznie ograniczona przez siły przyczepności na styku koła z szyną.

- elektromagnetyczny hamulec szynowy typu tramwajowego (niezależne płozy hamulca są podatnie zawieszone w ramie wózka), którego siłę hamowania, wytworzoną poprzez docisk jego płozy do powierzchni szyny, obliczono zgodnie z:

$$F_{HHS} = Q_{DHS} \cdot \mu_{HS} \cdot l_{HS} \quad (11)$$

Sama jej wartość nie jest ograniczona zjawiskiem przyczepności na styku koło-szyna.

Sterowanie hamulcem tarczowym może być realizowane przez:

- sterownik BCU (z ang. Brake Control Unit) stanowi część mikroprocesorowego układu sterowania pojazdu (rys. 5. – schemat został opracowany w oparciu o [12]). Układ ten złożony jest z dwóch magistrali sieci CAN, pozwalających na przesyłanie informacji pomiędzy poszczególnymi sterownikami, przy czym najważniejsze z nich zostały podłączone do obu magistral. Funkcję nadrzędną sprawuje sterownik VCU (z ang. Vehicle Control Unit), realizujący odpowiednie algorytmy sterowania. Za pracę układu napędowego, zwłaszcza przetwornic częstotliwości, odpowiadają sterowniki trakcyjne.

- Control Unit) controller which implements the appropriate control algorithms. Traction controllers are responsible for the operation of the propulsion system, especially frequency converters.
- an additional, independent electronic network.

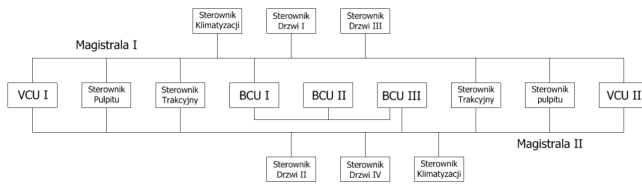


Fig. 5. Vehicle microprocessor system [5]

Rys. 5. Schemat mikroprocesorowej sieci pojazdu [5]

This way control redundancy was ensured, increasing the reliability of the braking system. In addition, a safety loop was used, the break of which causes the power supply to the emergency brake valve coil to be interrupted and braking with full power.

To evaluate the efficiency of the braking system, the average value of braking deceleration was used, during which the total energy of the vehicle (kinetic and potential) is lost by its motion resistance and forces generated by the braking system according to the equation: [13]

$$E_K + E_P = \int_0^{S_H} (F_H \cdot ds) + \int_0^{S_H} (W_{zas} \cdot ds) \quad (12)$$

Assuming the average values of the braking force (F_H) and basic resistance of motion (W_{zas}), the above equation can be written as:

$$E_K + E_P = F_H \cdot S_H + W_{zas} \cdot S_H \quad (13)$$

Then substituting for:

- kinetic energy

$$E_K = \frac{\gamma \cdot m \cdot v^2}{2} \quad (14)$$

- potential energy

$$E_P = m \cdot g \cdot S_H \cdot \sin(\alpha) \quad (15)$$

- braking distance

$$S_H = \frac{v^2}{2 \cdot a_H} \quad (16)$$

The final equation was obtained:

$$a_H = \frac{F_H + W_{zas} - m \cdot g \cdot \sin(\alpha)}{\gamma \cdot m} \quad (17)$$

Table 2 summarizes the average deceleration values calculated according to the above equation, taking into account: extremely different vehicle masses (empty and maximum mass), two different braking start speeds and different types of braking (the division was developed on the basis of the regulation of the minister of infrastructure regarding tram vehicles [14]), this is:

- service braking - enabling smooth speed regulation, is realized by cooperation of the ED brake with the disc brake (so-called blending), or only

- dodatkową, niezależną sieć elektroniczną.

W taki sposób została zapewniona redundancja sterowania, zwiększająca pewność działania układu hamulcowego. Oprócz tego wykorzystano pętlę bezpieczeństwa, której przerwanie powoduje zaprzestanie zasilania cewki zaworu hamowania nagłego i hamowanie z pełną mocą.

Do oceny skuteczności układu hamulcowego posłużono się średnią wartością opóźnienia hamowania, w trakcie którego sumaryczna energia pojazdu (kinetyczna i potencjalna) wytracana jest przez jego opory ruchu i siły generowane przez układ hamulcowy, zgodnie z zależnością: [13]

$$E_K + E_P = \int_0^{S_H} (F_H \cdot ds) + \int_0^{S_H} (W_{zas} \cdot ds) \quad (12)$$

Zakładając średnie wartości siły hamującej (F_H) i zasadniczych oporów ruchu (W_{zas}), powyższe równanie można zapisać w postaci:

$$E_K + E_P = F_H \cdot S_H + W_{zas} \cdot S_H \quad (13)$$

Następnie podstawiając za:

- energię kinetyczną

$$E_K = \frac{\gamma \cdot m \cdot v^2}{2} \quad (14)$$

- energię potencjalną

$$E_P = m \cdot g \cdot S_H \cdot \sin(\alpha) \quad (15)$$

- drogę hamowania

$$S_H = \frac{v^2}{2 \cdot a_H} \quad (16)$$

Uzyskano końcowe równanie:

$$a_H = \frac{F_H + W_{zas} - m \cdot g \cdot \sin(\alpha)}{\gamma \cdot m} \quad (17)$$

Table 2 Vehicle braking capabilities
Tabela 2 Parametry hamowania pojazdu

Braking type / Rodzaj hamowania	Velocity of braking initiation / Początkowa prędkość hamowania			
	30 km/h		70 km/h	
	Braking deceleration [m/s ²] / Opóźnienie hamowania [m/s ²]			
	Empty / Próżny	Full / Ładowny	Empty / Próżny	Full / Ładowny
Service / Robocze	2.4943	2.4863	2.1805	2.1604
Emergency / Awaryjne	1.1344	0.6918	0.9119	0.5577
Safety / Bezpieczeństwa	2.4943	2.4863	2.1805	2.1604
Sudden / Nagłe	3.6009	3.1584	3.0420	2.6879

W tabeli 2 zestawiono obliczone, według powyższego równania średnie wartości opóźnienia, biorąc pod uwagę: skrajnie różne masy pojazdu (masę własną i maksymalną), dwie różne prędkości rozpoczęcia hamowania oraz różne jego rodzaje (podział opracowano na podstawie rozporządzenia ministra infrastruktury

- by the disc brake. The degree of use of each type of brake is controlled by the BCU controller;
- emergency braking - allows the vehicle to be stopped in the event of a complete failure of the service brake and is performed by the rail brake;
- safety braking - braking implemented by the passenger and performed by the ED and disc brake;
- sudden braking - ensuring the maximum value of deceleration, assumes simultaneous use of all types of brakes.

In addition, a parking brake can be distinguished, which immobilizes an already stopped vehicle, and it is implemented by spring brakes installed in every second disc brake calliper (one per wheelset). Moreover, the calculations took into account, if necessary, the limitation of the deceleration value related to the adhesion phenomenon.

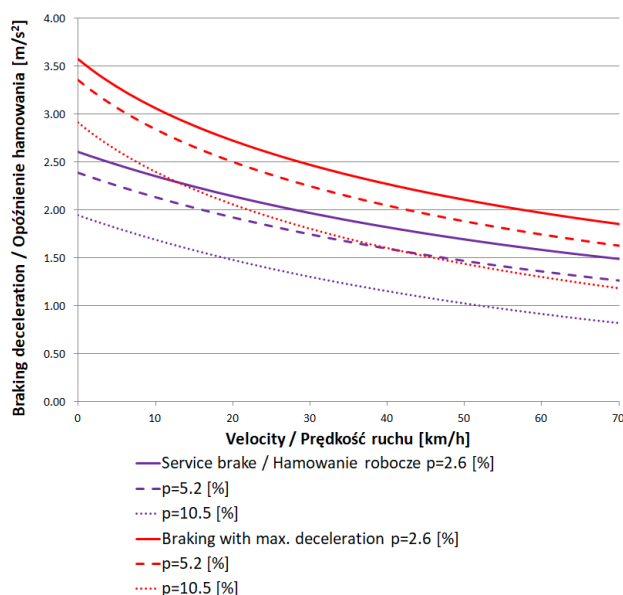


Fig. 6. Vehicle deceleration depending of the velocity [5]

Rys. 6. Przebieg opóźnienia hamowania w funkcji prędkości [5]

The values presented in Table 2 [5] can be compared with those required in the Journal of Laws No. 2011 No. 65, item. 343 [14] for a tram (manufactured after 01.01.2005) empty on a horizontal track, where the braking deceleration must be greater than or at least equal to:

- 3.0 m/s^2 – for sudden braking;
- 1.4 m/s^2 – for service braking;
- 1.8 m/s^2 – for safety braking.

The obtained deceleration values meet the above guidelines. However, taking into account the design assumptions and the traction capabilities of the vehicle, the curve and value of braking deceleration curves were determined depending on its type, track gradient and speed (Fig. 6). The decreasing nature of the presented curves is mainly due to the decrease in the value of adhesion forces with speed.

The average value of deceleration for the vehicle with the maximum load, sliding on the track with a gradient

odnośnie pojazdów tramwajowych [14]), to jest:

- hamowanie robocze – umożliwiające płynną regulację prędkości, jest realizowane poprzez współpracę hamulca ED z hamulcem tarczowym (tzw. blending), lub wyłącznie przez hamulec tarczowy. Stopień wykorzystania poszczególnych typów hamulców kontroluje sterownik BCU;
- hamowanie awaryjne – pozwala na zatrzymanie pojazdu w przypadku całkowitej niesprawności hamulca roboczego i jest realizowane przez hamulec szynowy;
- hamowanie bezpieczeństwa – hamowanie wdrożone przez pasażera, a realizowane przez hamulec ED i tarczowy;
- hamowanie nagłe – zapewniające maksymalną wartość opóźnienia hamowania, zakłada jednocześnie wykorzystanie wszystkich typów hamulców.

Dodatkowo można wyróżnić hamulec postojowy, unieruchamiający już zatrzymany pojazd, a realizowany poprzez hamulce sprężynowe zabudowane w co drugim zacisku hamulca tarczowego (po jednym na zestaw kołowy). Ponadto w obliczeniach uwzględniono, tam gdzie to konieczne, ograniczenie wartości opóźnienia związane ze zjawiskiem przyczepności.

Zestawione w tabeli 2 [5] wartości można porównać z wymaganiami zawartymi w Dz.U. 2011 nr 65 poz. 343 [14] dla tramwaju (wyprodukowanego po 01.01.2005) próżnego na torze poziomym, gdzie opóźnienie hamowania musi być większe, lub co najmniej równe:

- $3,0 \text{ m/s}^2$ – dla hamowania nagłego;
- $1,4 \text{ m/s}^2$ – dla hamowania roboczego;
- $1,8 \text{ m/s}^2$ – dla hamowania bezpieczeństwa.

Uzyskane wartości opóźnień spełniają powyższe wytyczne. Jednak zważywszy na założenia projektowe i możliwości trakcyjne pojazdu, wyznaczono przebieg oraz wartości opóźnienia hamowania w zależności od: jego rodzaju, stopnia nachylenia toru oraz prędkości (rys. 6). Malejący charakter zaprezentowanych krzywych jest w głównej mierze spowodowany spadkiem wartości sił przyczepności wraz z prędkością.

Średnia wartość opóźnienia hamowania dla pojazdu o maksymalnym obciążeniu, zjeżdżającym po torze o nachyleniu 10,5% przy hamowaniu roboczym wynosi $1,27 \text{ m/s}^2$. Wartość ta jest o $0,13 \text{ m/s}^2$ mniejsza od tej wymaganej dla tramwajów przy nieporównywalnie mniej wymagających warunkach, co świadczy o odpowiednich parametrach układu hamulcowego.

3. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w artykule metodyka obliczeniowa pozwoliła na wyznaczenie podstawowych parametrów trakcyjnych pojazdu, w tym również wartości liczbowych przyspieszenia oraz opóźnienia hamowania. Wyniki obliczeń, zaprezentowane w postaci wykresów i tabel, pozwoliły stwierdzić, że opracowany przez autorów układ napędowy oraz hamulcowy, spełniają założenia projektowe (pokonywanie toru o znacznym

of 10.5% with service braking is 1.27 m/s^2 . This value is 0.13 m/s^2 lower than that required for trams in incomparably less demanding conditions, which proves the appropriate parameters of the braking system.

3. SUMMARY

Thanks to calculation methodology which was presented in the article, it is possible to obtain vehicle traction parameters with exact values of acceleration and deceleration. Calculation results were presented in tables and graphs, which allowed to make conclusion that designed propulsion and braking systems fulfils earlier assumptions, especially ability to run on a track with significant slope angle. Moreover, thanks to those systems, the vehicle could be operated safely. This conclusion was based on the requirements from tram norms, because appropriate norms for monorails vehicles, aren't available. In addition there is a significant advantage of the solution in which the rails are inside the guideway beam, which results in obtaining stable and optimal working conditions. However, when interpreting the combined results, one should take into account the conceptual nature of the vehicle (including its systems), as well as the simplifications and assumptions adopted in the calculations. The methodology itself can be used to evaluate the movement parameters of other, including conventional, rail vehicles.

kącie nachylenia). Ponadto, dzięki nim pojazd może podlegać bezpiecznej eksploatacji, co można wnioskować jedynie w oparciu o normy tramwajowe z racji faktu, że odpowiednie przepisy dla kolei jednoszynowych praktycznie nie są dostępne. Dodatkowo, uwiadacznia się tu wyraźna przewaga rozwiązania, w którym szyny są osłonięte wewnątrz belki jezdnej, czego skutkiem jest uzyskanie stabilnych i optymalnych warunków pracy. Interpretując zestawione wyniki należy mieć na uwadze koncepcyjny charakter pojazdu (w tym jego układów), jak również przyjęte w obliczeniach uproszczenia i założenia. Sama metodologia może być wykorzystana do oceny parametrów ruchowych innych, w tym konwencjonalnych, pojazdów szynowych.

BIBLIOGRAPHY / BIBLIOGRAFIA

- 1 Kuczyk M., Jędrzejewski P., Załuski P.: *Koncepcja miejskiego pojazdu kolei podwieszanej (The concept of suspended rail vehicle); Pojazdy Szynowe 2021; (2):52–66 (DOI: <https://doi.org/10.53502/RAIL-139982>)*.
- 2 Kikuchi S., Onaka A.: *Monorail development and application in Japan; Jurnal of Advanced Transportation vol 22, Issue 1 / p. 17-38 (DOI: <https://doi.org/10.1002/atr.5670220103>)*
- 3 *Dynamic analysis on suspended monorail vehicles passing through turnouts; Qiang Guo et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 439 042078 (DOI: 10.1088/1757-899X/439/4/042078)*
- 4 Madej J.: *Teoria ruchu pojazdów szynowych; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.*
- 5 Jędrzejewski P., Kuczyk M.: *Koncepcja wagonu silnikowego kolei podwieszanej; praca magisterska, Gdańsk 2020.*
- 6 Dudzik M.: *Metodyka obliczania największego możliwego przyspieszenia ograniczonego warunkiem przyczepności dla pojazdu trakcyjnego na przykładzie pojazdu Flirt ED 160 firmy Stadler; PTiL 3/2018 (43) (DOI: 10.18276/ptl.2018.43-02).*
- 7 Lipiński L., Miszewski M.: *Wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych pojazdów kolejowych z asynchronicznymi napędami trakcyjnymi; Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 1/2012 (94); artykuł dostępny pod adresem: http://www.komel.katowice.pl/ZRODLA/FULL/94/ref_12.pdf (dostęp na dzień 21.09.21).*
- 8 Skibicki J.: *Pojazdy elektryczne część I; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2010.*
- 9 Broszura informacyjna firmy Knorr – Bremse: *Magnetic track brakes – light rail vehicles; 2018; dostępna pod adresem: https://www.knorr-bremse.com/remote/media/documents/railvehicles/product_broschures/2018_2/product/brake_systems/Magnetic_Track_Brakes_-_LRV_P-1269_EN.pdf (dostęp na dzień 21.09.21).*
- 10 Katalog firmy Frenoplast: *Wagony pasażerskie i metro; wydanie 2 z dnia 16.08.2018; dostępny pod adresem: <https://frimatrail-frenoplast.pl/wp-content/uploads/pdf/pasazerskie/Katalog-Frenoplast-pasazerskie-PL-2018.pdf> (dostęp na dzień 21.09.21).*
- 11 Piechowiak T.: *Obliczenia hamulca wózka tramwajowego; Czasopismo techniczne Mechanika, 2012, R. 109, z. 7-M; artykuł dostępny pod adresem: <https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/resources/31364> (dostęp na dzień 21.09.21).*
- 12 Barna G., Durzyński Z.: *Struktura rozproszonego systemu mikroprocesorowego sterowania zespołem trakcyjnym; Technika Transportu Szynowego nr 3/2008, str. 36 – 43; artykuł dostępny pod adresem: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BGPK-2072-7844> (dostęp na dzień 21.09.21).*
- 13 Gunay M., Korkmaz M. E., Ozmew R.: *An investigation on braking systems used In railway vehicles; Engineering Science and Technology, an International Journal, (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.01.009>)*.
- 14 Przepióra K., Szuberski P.: *Badania układów hamulcowych pojazdów tramwajowych w aspekcie homologacji typu tramwajów; Pojazdy Szynowe nr 2/2017, str. 52 – 61 (DOI: <https://doi.org/10.53502/RAIL-138455>)*.

Methods for reducing the number of collisions between wild animals and rail vehicles

Sposoby redukcji liczby kolizji dzikich zwierząt z pojazdami szynowymi

The article presents the issues of collisions between wild animals and approaching trains. The reasons for the presence of animals on the tracks are explained and the potential threats to the environment and the safety of railway traffic are described. In order to reduce the chance of an accident involving animals, the various solutions are used: infrastructure (making animals difficult to enter the tracks) and stimulus (warning against the approaching train) and supporting methods that may increase the effectiveness of other measures. The analysis of the results of research carried out in various ecosystems around the world allowed to assess the effectiveness of the most popular methods of protecting fauna against the collision with a vehicle and the innovative solutions, taking into account the psychology of animals. Their use will allow to reach a compromise between the development of transport networks, traffic safety and reduction of the impact on the natural environment.

W artykule przedstawiono problematykę zderzeń dzikich zwierząt z nadjeżdżającymi pociągami. Wyjaśniono przyczyny obecności zwierząt na torowiskach i opisano potencjalne zagrożenia dla środowiska, jak i dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego. W celu zmniejszenia zagrożenia wypadkiem z udziałem zwierząt stosuje się różne rozwiązania: infrastrukturalne (utrudniające wstęp zwierząt na tory) i bodźcowe (ostrzegające przed zbliżającym się pociągiem) oraz metody wspomagające, które mogą zwiększyć skuteczność działania innych środków. Analiza wyników badań przeprowadzanych w różnych ekosystemach na całym świecie pozwoliła ocenić efektywność najpopularniejszych sposobów ochrony fauny przed zderzeniem z pojazdem oraz innowacyjnych rozwiązań, uwzględniających psychologię zwierząt. Zastosowanie ich pozwoli na osiągnięcie kompromisu pomiędzy rozwojem sieci transportowych, bezpieczeństwem ruchu i redukcją oddziaływania na środowisko naturalne.

Keywords: ecology, wildlife collisions, traffic safety, railway transport

Słowa kluczowe: ekologia, transport kolejowy, bezpieczeństwo ruchu, wypadki z udziałem dzikich zwierząt

1. INTRODUCTION

The development and modernization of railway infrastructure results in an increasing number of collisions of wild animals with vehicles [24]. The lines cross many animal habitats, forcing them to risky crossing tracks for feeding, reproduction and rest. Though for some species the tracks form so-called the behavioral barrier effect [42], which limits migration and leads to fragmentation of the environment (which has a serious negative impact on the balance of the ecosystem [25]) the straight majority of animals move perpendicular to the line, not treating the approaching trains as natural enemies or reacting too slowly when vehicles are approaching [22]. For the safety of rolling stock, collisions with large mammals or entire herds of animals are a particular threat. They can cause serious damage to the vehicle, traffic delays and, in extreme cases, also train derailment [7]. From the data of Koleje Wielkopolskie it appears that in 2019 there were over 400 collisions with wild animals, of which

1. WPROWADZENIE

Rozwój i modernizacja infrastruktury kolejowej skutkują zwiększającą się liczbą kolizji dzikich zwierząt z pojazdami [24]. Linie przecinają wiele siedlisk zwierząt, zmuszając je do ryzykownego przekraczania torów w celach żerowania, rozmnażania się i odpoczynku. Choć dla niektórych gatunków tory tworzą tzw. efekt bariery behawioralnej [42], która ogranicza migracje i prowadzi do fragmentacji środowiska, co ma poważny negatywny wpływ na równowagę ekosystemu [25], zdecydowana większość zwierząt przemieszcza się prostopadle do linii, nie traktując nadjeżdżających pociągów jako naturalnych wrogów lub reagując zbyt wolno, gdy pojazdy się zbliżają [22]. Dla bezpieczeństwa taboru szczególnym zagrożeniem są zderzenia z dużymi ssakami lub całymi stadami zwierząt. Mogą one powodować poważne uszkodzenia pojazdu, opóźnienia w ruchu oraz w skrajnych przypadkach także wykoślenie pociągu [7]. Z danych Kolei Wielkopolskich wynika, że w 2019 roku miało

64 caused damage to the rolling stock of this carrier [11]. In order to increase the traffic safety, especially in forested and sparsely populated areas [7], limitation of financial and environmental losses, the efforts are made to reduce the number of railway accidents with animals.

Many solutions developed for the motor transport were adopted by railway, but the rail transport makes it impossible to quickly change the direction and avoid the obstacle, so the methods of animal protection must be based only on preventing them from entering under the approaching train [9]. Moreover, the railway lines pose the additional threats to animals: being trapped between rails or electric shock for example from the wires supplying infrastructure or unprotected distribution board. There are used the methods that make the physical access of animals to the railway tracks difficult and those which, although are not a tight barrier, are designed to scare off animals from the tracks only when the train passes. There are also the complementary solutions that increase the effectiveness of the used measures.

1. THREATS TO ENVIRONMENT AND TRANSPORT

Collisions with animals and the related measurable damage are in particular experienced by the passenger trains [7], which results from the higher driving speed and the type of vehicle structure (electric or diesel multiple units are more susceptible to collision damage than heavy freight locomotives) [40]. In most cases, train arrival is delayed and the timetable is deregulated.

Although the death of animals on the tracks is not the threat to large populations (e.g. hoofed animals), it is very harmful to the protected species. From an ecological point of view, fatal collisions of vehicles with rare species of animals that live in small populations over a large territory and are characterized by low fertility (e.g. bears or lynxes) are the worst for the ecosystem because the deaths of individuals can be the threat to the entire species in a given habitat (and the straight majority of accidents is mortal to animals [14]). Other species susceptible to the behavioral barrier and collisions with vehicles are species that often migrate searching food and daily refuges (e.g. deer, wild boar) or with long seasonal migrations (reindeer, moose) [25]. The collisions with representatives of the last two groups most often result in damage to the rolling stock (including damage to the guard-iron, end sill, cooling pipes, broken windows [7]), although the collisions with herds of farm animals (sheep, cows) more often end in injuries or even the death of passengers [47].

Therefore, it is in the interest of both railway carriers and environmental protection to take preventive measures and reduce the number of accidents involving animals.

miejsce ponad 400 kolizji z dzikimi zwierzętami, z czego 64 spowodowały uszkodzenia taboru tego przewoźnika [11]. W celu podniesienia bezpieczeństwa ruchu, szczególnie na terenach zalesionych i słabo zaludnionych [7], ograniczenia strat finansowych oraz ekologicznych podejmowane są starania, aby zredukować liczbę wypadków kolejowych z zwierzętami.

Wiele rozwiązań stworzonych dla transportu samochodowego zostało zaadaptowanych przez kolej, jednak transport szynowy uniemożliwia szybką zmianę kierunku i ominięcie przeszkody, zatem metody ochrony zwierząt muszą bazować wyłącznie na powstrzymaniu ich przed wchodzeniem pod nadjeżdżający pociąg [9]. Ponadto linie kolejowe niosą dla zwierząt dodatkowe zagrożenia: uwięzienie między szynami lub porażenie prądem, na przykład z przewodów zasilających infrastrukturę lub niezabezpieczonych rozdzielni prądu. Stosuje się zarówno metody utrudniające fizyczny dostęp zwierząt do torów kolejowych oraz takie, które choć nie stanowią szczelnej bariery, mają za zadanie odstraszać zwierzęta z torów wyłącznie na moment przejazdu pociągu. Istnieją też rozwiązania uzupełniające, zwiększające skuteczność zastosowanych środków.

2. ZAGROŻENIA DLA ŚRODOWISKA I TRANSPORTU

Kolizji ze zwierzętami i związanych z nimi wymiernych szkód w szczególności doświadczają pociągi pasażerskie [7], co wynika z większej prędkości jazdy oraz rodzaju konstrukcji pojazdu (elektryczne lub spalinowe zespoły trakcyjne są bardziej podatne na uszkodzenia w wyniku zderzenia niż ciężkie lokomotywy pociągów towarowych) [40]. W większości zdarzeń dochodzi do opóźnień przyjazdu pociągu i rozregulowania rozkładu jazdy.

Choć śmierć zwierząt na torach nie jest zagrożeniem dla dużych populacji, np. ssaków kopytnych, jest bardzo szkodliwa dla gatunków chronionych. Z ekologicznego punktu widzenia najgorsze dla ekosystemu są śmiertelne kolizje pojazdów z rzadkimi gatunkami zwierząt, które żyją w małych populacjach na dużym terytorium i charakteryzują się małą dzietnością (np. niedźwiedzie lub rysie), ponieważ śmierć pojedynczych osobników może być zagrożeniem dla całego gatunku w danym siedlisku, a zdecydowana większość wypadków jest dla zwierząt śmiertelna [14]. Innymi wrażliwymi na barierę behawioralną i zderzenia z pojazdami są gatunki często wędrujące w poszukiwaniu pożywienia i dziennych ostoj (np. jeleniowate, dziki) lub o długich sezonowych migracjach (renifery, łosie) [25]. Zderzenia z przedstawicielami właśnie tych dwóch ostatnich grup skutkują najczęściej uszkodzeniami taboru (m.in. uszkodzeniami zagarniacza, czołownicy, przewodów chłodzenia, rozbiciem szyb [7]), choć to zderzenia ze stadami zwierząt gospodarskich (owiec, krów) częściej kończą się obrażeniami lub nawet śmiercią pasażerów [47].

3. REASONS OF ANIMAL PRESENCE ON TRACKS AND COLLISIONS WITH ANIMALS

The animals cross the tracks searching the food, for the purpose of reproduction or dispersion of young specimen [25], but also when escaping from predators. Moreover, it happens that they use the tracks as a path in the case of large snow banks and walk along the line, which exposes them at greater risk than during crossing tracks transversely (and additionally the snow accumulated on the sides of the track makes escape difficult [20]). In addition, the railway lines can be an attractive feeding place for some species: rubbish and food remains thrown by people from the train, attract, among others, bears or wild boars, while the bodies of animals killed in the collision with the train may result in the presence of scavengers [14]. Cutting grass on the railway lines also encourages the herbivores to stay near the tracks [13, 25, 49].

The frequency of collisions of wild animals with trains is influenced by the nature of the landscape, the number and concentration of animals in a given area, the height of the embankment in relation to the natural area and the periods of increased animal migration. Moreover, it depends on the traffic congestion, vehicle speed, line construction technique and the closeness of human settlements [7, 25]. The higher frequency of accidents occurs at night (in particular at dusk and dawn [42]) and in autumn and winter [7, 24, 25]. This may be related to the fact that in autumn the population of hoofed animals increases, which then form larger the herds in which they migrate to winter feeding grounds [24]. Weather conditions also have an impact: the presence of thick snow cover (Scandinavian countries, Canada) results in an increased mortality of moose during the winter months [20]. Usually, the collisions occur in meadows close to forests, in poorly urbanized areas.

Climate changes, hunting and the development of tourism change the animal behavior patterns and disrupt their migration [24], which may result in increased animal confusion, linked to the unpredictability of their reactions (and a higher likelihood of collisions).

Although it is advisable to investigate and limit the route impact on the environment before the track is built, the accident prevention activities are usually carried out on the existing lines rather than during the construction of new ones [9], which may increase costs and make it difficult to select appropriate measures. On the operated lines, it is important to define the so-called hotspots, i.e. places or sections of increased risk of collision and focus on introducing the protective measures mainly in these places. The characteristics of the terrain and its specific natural features should also be taken into account in order to optimally select the methods of reducing the risk of collisions.

Podjęcie zatem działań zapobiegawczych i redukcja liczby wypadków z udziałem zwierząt jest w interesie zarówno przewoźników kolejowych jak i ochrony środowiska.

3. POWODY OBECNOŚCI ZWIERZĄT NA TORACH I KOLIZJI Z POCIĄGAMI

Zwierzęta przekraczają tory w poszukiwaniu pożywienia, w celach reprodukcyjnych lub dyspersji młodych osobników [25], ale także podczas ucieczki przed drapieżnikami. Ponadto zdarza się, że wykorzystują tory jako ścieżkę, w przypadku dużych zasp śnieżnych, i idą wzdłuż linii, co naraża je na większe niebezpieczeństwo niż podczas poprzecznego przekraczania torów (i dodatkowo śnieg zgromadzony na poboczach torowiska utrudnia ucieczkę [20]). Ponadto linie kolejowe mogą być atrakcyjnym miejscem żerowania dla niektórych gatunków: wyrzucane przez ludzi z pociągu śmieci i resztki jedzenia, przyciągają m.in. niedźwiedzie lub dziki, natomiast ciała zwierząt zabitych w zderzeniu z pociągiem mogą skutkować obecnością padlinożerców [14]. Ścinana trawa na liniach kolejowych zachęca także roślinożerców do przebywania w pobliżach torów [13, 25, 49].

Na częstotliwość kolizji dzikich zwierząt z pociągami wpływa charakter krajobrazu, liczebność i koncentracja zwierząt na danym terenie, wysokość nasypu względem terenu naturalnego oraz okresy zwiększonych migracji zwierząt. Ponadto zależy ona od zagęszczenia ruchu, prędkości pojazdów, techniki wykonania linii oraz bliskość siedzib ludzkich [7, 25]. Większa częstotliwość wypadków występuje w nocy, w szczególności o zmierzchu i o świcie [42], oraz jesienią i zimą [7, 24, 25]. Może mieć to związek z tym, że w okresie jesiennym zwiększa się populacja zwierząt kopytnych, które następnie formują większe stada, w których migrują na zimowe żerowiska [24]. Wpływ mają także warunki pogodowe: obecność grubej pokrywy śnieżnej (kraje skandynawskie, Kanada) skutkuje zwiększoną śmiertelnością łośi w miesiącach zimowych [20]. Zazwyczaj do kolizji dochodzi na terenach łkowych blisko lasów, w rejonach słabo zurbanizowanych.

Zmiany klimatu, polowania oraz rozwój turystyki zmieniają schematy zachowania zwierząt i zaburzają ich migrację [24], co może skutkować zwiększoną dezorientacją zwierząt, łącząc się z nieprzewidywalnością ich reakcji (i wyższym prawdopodobieństwem kolizji).

4. METODY OCHRONY ZWIERZĄT PRZED KOLIZJĄ Z POCIĄGIEM

4.1. Dobór odpowiednich środków

Wybór sposobu zmniejszania liczby kolizji zależy w dużej mierze od powodów jej występowania, częstotliwości oraz gatunków zwierząt najbardziej narażonych na zderzenie. W zależności od środowiska klimatu i krajobrazu wypadek z innymi gatunkami zwierząt, przede wszystkim dużych ssaków, powoduje

4. METHODS OF PROTECTING ANIMALS AGAINST COLLISION WITH TRAIN

4.1 Selection of appropriate measures

The choice of reduction way of the number of collisions depends largely on the reasons for their occurrence, the frequency and the species of animals most exposed to collision. Depending on the environment, climate and landscape, the accident with other animal species (especially large mammals) causes the most damage (including both death of the animal and damage to the rolling stock). In Norway, Sweden and Canada the anti-collision activities focus mainly on accidents involving moose [34], while in southern and central Europe (including Poland) more accidents are due to the presence of roe deers, deers and wild boars on the tracks. Apart from the hoofed animals, the bears are frequently involved in collisions with trains in Europe and North America, the elephants in India, and the kangaroos in Australia [32,45]. Knowledge of animal species, their behavior and routes of migration, because each of them has different environmental preferences and patterns of operation, helps to protect them more effectively and increase the safety of train running.

4.2. Infrastructural methods

The most common method of reducing the risk of a vehicle collision with an animal is fencing the line with the appropriately high and dense nets, as it is done in the case of motorways and expressways [28]. Fencing the railway line is the simple and economical solution, but it makes animals to move freely and leads to fragmentation of habitats and a decrease of the genetic diversity of species in a given area, which has the catastrophic effects for the environment (much more significant than the death of individuals [42]). From the point of view of nature protection, the regulation of ecological corridors is therefore crucial. Moreover, despite the high effectiveness of the net barrier, it does not affect animals that may jump over it (e.g. during escape from the predator), fly over it or dig under it [17] – there is also a possibility that the animal will get trapped on the tracks between two nets and will not have enough space (e.g. for a run-up) to escape, even if it sees the approaching train. Occasionally it is that the net is damaged by people, which creates a gap in protection [49]. Nowadays, the fencing of longer sections of the railway line is being abandoned, limiting the use of the net as a guiding element for special animal crossings.

The construction of animal crossings, above or under the tracks, is a compromise solution, allowing the migration of animals across the track and minimizing the barrier effect of the infrastructure and effectively avoiding the collisions with the vehicle (Fig.1). Best when the crossings may be already built culverts, bridges and viaducts adapted for the purposes of animal protection, or as a planned part of the

najwięcej szkód (w tym zarówno śmierć zwierzęcia oraz uszkodzenie taboru). W Norwegii, Szwecji i Kanadzie działania antykolizyjne skupiają się głównie na wypadkach z udziałem łosi [34], podczas gdy w południowej i środkowej Europie (w tym w Polsce) więcej wypadków wynika z obecności saren, jeleni i dzików na torach. Poza zwierzętami kopytnymi często w kolizjach z pociągami w Europie i Ameryce Północnej uczestniczą niedźwiedzie, w Indiach słonie, a w Australii kangury [32,45]. Znajomość gatunków zwierząt, ich zachowania oraz dróg wędrówek migracyjnych, ponieważ każde z nich ma inne preferencje środowiskowe i schematy działania, pomaga skuteczniej je chronić i zwiększać bezpieczeństwo jazdy pociągu.

4.2. Metody infrastrukturalne

Najbardziej rozpowszechnionym sposobem redukcji ryzyka zderzenia pojazdu z zwierzęciem jest grodzenie linii odpowiednio wysokimi i gęstymi siatkami, tak jak robi się to w przypadku autostrad i dróg szybkiego ruchu [28]. Grodzenie linii kolejowej jest prostym i ekonomicznym rozwiązaniem, jednak uniemożliwia swobodny ruch zwierząt i prowadzi do fragmentacji siedlisk i spadku różnorodności genetycznej gatunków na danym terenie, co ma katastrofalne skutki dla środowiska, o wiele bardziej znaczące niż śmierć pojedynczych osobników [42]. Z punktu widzenia ochrony przyrody drożność korytarzy ekologicznych jest więc kluczowa. Ponadto mimo wysokiej skuteczności działania bariery siatkowej, nie działa ona na zwierzęta, które mogą ją przeskoczyć (np. podczas ucieczki przed drapieżnikiem), przelecieć nad nią lub przekopać się pod [17]. Istnieje też możliwość, że zwierzę uwięzi się na torach między dwoma siatkami i nie będzie miało dostatecznie dużo miejsca (np. na rozbieg), żeby uciec, nawet jak zobaczy nadjeżdżający pociąg. Sporadycznie zdarza się także, że siatka zostaje uszkodzona przez ludzi, co tworzy lukę w zabezpieczeniu [49]. Odchodzi się współcześnie od grodzenia dłuższych odcinków linii kolejowej, ograniczając stosowanie siatki jako elementu naprowadzającego na specjalne przejścia dla zwierząt.

Budowa przejść dla zwierząt, nad lub pod torami, jest rozwiązaniem kompromisowym, pozwalającym na migrację zwierząt w poprzek toru i minimalizację barierowego wpływu infrastruktury oraz skuteczne uniknięcie zderzeń z pojazdem (rys.1). Najlepiej, gdy przejściami mogą być wybudowane już przepusty, mosty i wiadukty, zaadaptowane do celów ochrony zwierząt lub jako zaplanowana część infrastruktury kolejowej, co ogranicza dodatkowe inwestycje finansowe, ponieważ budowa takich przejść jest kosztowna [42]. Skuteczność działania przejść dla zwierząt i zredukowania liczby kolizji pociągów ze zwierzętami zależy od ich lokalizacji, wymiarów, oświetlenia czy rodzaju powierzchni [9]. Należy także uwzględnić ich niedostępność dla ludzi (zapach człowieka blisko takiego przejścia będzie odstraszać zwierzęta) oraz wza-

railway infrastructure, which limits the additional financial investments because the construction of such crossings is expensive [42]. The effectiveness of animal crossings and reducing the number of collisions of trains with animals depends on their location, dimensions, lighting or the type of surface [9]. Their inaccessibility to people should also be taken into account (the smell of person close to such a crossing will scare animals off) and mutual interactions between species (the crossings of predators in hunting areas, e.g. wolves, can serve as traps for victims), which may affect the frequency of use [10]. An important aspect is the appropriately dense distribution of such crossings along the railway lines, which increases the costs and may cause the technical difficulties [22].

For the small and medium-sized animals it is sufficient adaptation of the pipe culverts, which were originally used for the flow of water. It consists in installing the additional shelves in the culverts and fences leading to the entrance [9,42]. Another way to protect the small animals (in particular amphibians and reptiles) are crossings on the surface of the track, directly under the rails (e.g. leaving a gap between the crushed stone and the rail foot) [9,42]. Although it could seem that small animals do not pose a threat to rail vehicle traffic (in Poland there are no statistics on the presence of small animals on the tracks - drivers simply do not notice them, so they do not report [7]), and such crossings are purely ecological, it turns out that there have been cases of blocking the turnout movement by the turtles in the Nara Prefecture of Japan [18, 19]. The animals could not get out of the rails, which resulted in the death of the animals, stopping the traffic on the railway line and significant delays. In order to avoid the further incidents West Japan Railway built a small U-shaped concrete gutters (Fig. 2) under the rails where turtles crossed the tracks, thus reducing the number of collisions.



Rys. 2. Przejścia pod szynami w prefekturze Nara [19]
Fig. 2. Crossings under the rails in Nara Prefecture [19]

jemne interakcje między gatunkami (przejścia na terenach łownych drapieżników, np. wilków, mogą służyć jako pułapki na ofiary), które mogą wpłynąć na częstotliwość użytkowania [10]. Ważnym aspektem jest odpowiednio gęste rozmieszczenie takich przejść wzdłuż linii kolejowych, co zwiększa koszty i może sprawiać trudności techniczne [22].



Rys. 1. Przejścia pod szynami na trasie Rail Baltica [30]
Fig. 1. Crossings under the rails on Rail Baltica route [30]

Dla małych i średnich zwierząt wystarczająca jest adaptacja przepustów rurowych, służących pierwotnie do przepływu wody. Polega ona na zamontowaniu dodatkowych półek w przepustach oraz ogrodzeń doprowadzających do wejścia [9,42]. Innym sposobem ochrony małych zwierząt (w szczególności płazów i gadów) są przejścia na powierzchni torowiska, bezpośrednio pod szynami, np. pozostawienie szczeliny między tłuczniem a stopką szyny [9,42]. Choć mogłoby się wydawać, że małe zwierzęta nie stanowią zagrożenia dla ruchu pojazdu szynowego (w Polsce nie ma statystyk dotyczących obecności drobnych zwierząt na torach – maszyniści po prostu ich nie zauważają, więc i nie raportują [7]), a takie przejścia mają charakter czysto ekologiczny, to okazuje się, że zdarzały się przypadki zablokowania ruchu zwrotnicy przez żółwie w prefekturze Nara w Japonii [18, 19]. Zwierzęta nie mogły wydostać się spod szyn, co powodowało śmierć zwierząt, zatrzymanie ruchu na linii kolejowej i znaczące opóźnienia. W celu uniknięcia dalszych incydentów West Japan Railway zbudowało niewielkie betonowe rynny U-kształtne (rys. 2) pod szynami w miejscach przekraczania torów przez żółwie, redukując tym liczbę kolizji.

W przypadku przejść pod torami dla większych zwierząt niezbędne są optymalnie duże wymiary przejścia, które jednak nie stanowi tunelu podziemnego, ponieważ wiele zwierząt niechętnie by z niego korzystało, i nie grozi zalaniem podczas nasilonych opadów [9]. Najlepszą opcją zatem są zaadaptowane

In the case of passages under the tracks for larger animals, the optimal large dimensions of the crossing are necessary, which, however, does not constitute an underground tunnel that many animals would use with reluctance and there is no risk of flooding during heavy rainfall [9]. Thus, the adapted railway bridges and viaducts are the best option, provided that only animals would use them. Railroad crossings with planted flora (so-called ecoducts) built over highways enable the connection of fragments of the environment crossed by tracks [9], but they have the disadvantage that in the case of electrified railway lines they must be built high enough above the natural terrain, which may demotivate animals to use them (because instinctively they do not want to be "in sight" of predators [42,49]). Monitoring of the effectiveness of crossings cannot be short-term because the animals change their migration routes slowly and even despite the use of guidance nets, the animals need time to get used to the built crossings [39].

4.3. Active methods

It is left slowly infrastructural solutions in favor of methods that allow for free migration across the tracks – which scare off the animals only when the train appears [9]. They do not create a physical, tight barrier, but they are more economically and ecologically profitable. However, the problem is the evaluation of the effectiveness of scaring off - it will never be 100% due to the unpredictability of animal behavior [51]. However, the influence of selected stimuli on the psyche of animals increases their vigilance and allows for a faster reaction in the case of a threat [9]. Among the stimuli, there are mainly smell, sound and optical (and a combination of several types). The signals can be related to the movement of the approaching vehicle or operate independently [49].

The olfactory repellants, i.e. synthetic or organic substances sprayed on the tracks or the flora around them (e.g. imitating the smells of predators and people [46]) are aimed at scaring animals away from a given place or increase vigilance. Research in Norway [9] shows that the smells have a deterrent effect on moose, but that effectiveness is variable. Similarly in Germany, at analyzing the number of collisions with deer [31], while in Denmark, the influence of affect collisions of roe deer and deer with vehicles of two chemically different repellants was not found (which was explained by the animals' quick habituation to the new smell [12]). In the Czech Republic [26] the use of repellants significantly reduced animal mortality on roads and railway lines, although a negative impact of temperature drop on the effectiveness of this method was noticed. Moreover, the method works worse in the case of large areas, therefore repellants should not be used in the wide ecological corridors, but in shorter sections with an increased risk of collision of the vehicle with animals [46].

mosty kolejowe i wiadukty, pod warunkiem, że korzystałyby z nich tylko zwierzęta. Przejścia nad torami razem z nasadzoną roślinnością (tzw. ecoducts) budowane nad autostradami, umożliwiają połączenie fragmentów przeciętego torami środowiska [9], jednak mają tę wadę, że w przypadku linii kolejowych zelektryfikowanych muszą one być zbudowane dostatecznie wysoko ponad naturalnym terenem, co może demotywować zwierzęta do korzystania z nich (ponieważ instynktownie nie chcą być „na widoku” drapieżników [42,49]). Monitoring skuteczności przejść nie może być krótkotrwały, ponieważ zwierzęta powoli zmieniają trasy migracyjne i nawet pomimo zastosowania siatek naprowadzających potrzebują czasu na przyzwyczajenie się do wybudowanych przejść [39].

4.3. Metody aktywne

Powoli odchodzi się od infrastrukturalnych rozwiązań na rzecz metod pozwalających na swobodną migrację przez tory - odstraszać zwierzęta tylko w przypadku pojawienia się pociągu [9]. Nie tworzą one fizycznej, szczelnej bariery, lecz są bardziej opłacalne ekonomicznie i ekologicznie. Problemem natomiast jest ocena efektywności odstraszenia – nigdy nie będzie ona stuprocentowa, z racji nieprzewidywalności zachowania zwierząt [42, 50]. Jednak oddziaływanie wybranymi bodźcami na psychikę zwierząt zwiększa ich czujność i pozwala na szybszą reakcję w przypadku zagrożenia [9]. Wśród bodźców rozróżnia się głównie zapachowe, dźwiękowe i optyczne oraz kombinację kilku rodzajów. Sygnały mogą być powiązane z ruchem zbliżającego się pojazdu lub działać niezależnie [49].

Repelenty węchowe, czyli syntetyczne lub organiczne substancje rozpylane na tory lub roślinność wokół nich, np. imitujące zapachy drapieżników i ludzi [46], mają na celu odstraszyć zwierzęta z danego miejsca lub zwiększyć czujność. Badania w Norwegii [9] wskazują, że zapachy mają odstraszący wpływ na łosie, jednak skuteczność jest zmienna. Podobnie jest w Niemczech, przy analizie liczby kolizji z jeleniami [31], natomiast w Danii nie stwierdzono wpływu oddziaływania dwóch, odmiennych chemicznie repelentów na kolizje saren i jeleni z pojazdami. Wy tłumaczono to szybkim przyzwyczajaniem się zwierząt do nowego zapachu [12]). W Czechach [26] zastosowanie repelentów znacząco zmniejszyło śmiertelność zwierząt na drogach i liniach kolejowych, choć zauważono negatywny wpływ spadku temperatury na skuteczność tej metody. Ponadto metoda działa gorzej w przypadku dużych arealów, dlatego repelenty nie powinny być stosowane przy szerokich korytarzach ekologicznych, lecz na krótszych odcinkach o zwiększonym ryzyku kolizji pojazdu ze zwierzętami [46].

The method that affects the sense of sight are reflectors (Fig. 3), located on posts along the tracks and activating when the vehicle approaches, creating the so-called light fence. It is a popular solution for collision protection on car roads, but in the case of trains it is much less effective – among other reasons, because the locomotive lights are not as strong as cars [42]. Reflective elements are higher than on the roads (due to the railway embankment), so they aren't always in the animal's line of sight. Animals rarely look up, and they differ in size, so the line of sight is at different heights [23]. The reflected light of the rail vehicle is aimed at alarming an animal that will slow down or stop before crossing the light barrier.



Rys. 3. Reflektory odblaskowe [42]

Fig. 3. Reflective reflectors [42]

On account of its rule of operation, the method is effective only at night, while a large number of collisions with animals occur at dusk or at dawn [42]. The light is reflected outside the tracks and animals that are directly on the tracks are not alerted. Although the purchase and installation of reflectors is cheap, the disadvantage is the ineffectiveness [9, 23, 41], so this method should be complementary, used together with other means of protection against collisions and on roads with lower traffic [49].

Another method is using the appropriate sounds that scare the animals from the tracks. It is distinguished the sound signals that warn animals against the approaching vehicle and the sound barriers that constantly alert animals at the tracks, regardless of the presence of the vehicle [9]. The sound signalling can be triggered by light-sensitive sensors reacting to the approaching train. In this second case, the limitations are similar as in the visual method with reflective reflectors. Signalling works only at night [41]) or the animal motion sensors at the track. In the first case, the acoustic module can be supplemented with the reflective elements (creating a visual-acoustic module) to increase the effectiveness of animal scaring. Short, modulated sounds with a frequency of 2-5 kHz are used. The disadvantage of this solution is

Metodą działającą na zmysł wzroku są reflektory odblaskowe (rys. 3), umiejscowione na słupkach wzdłuż torów i uaktywniające się w momencie zbliżania się pojazdu, tworząc tzw. płot świetlny. Jest to popularne rozwiązanie z systemów ochrony przed kolizją na drogach samochodowych, jednak w przypadku pociągu jest o wiele mniej skuteczne – między innymi dlatego, że światła lokomotywy nie są tak mocne, jak samochodów [42]. Elementy odblaskowe znajdują się wyżej niż przy drogach (z powodu nasypu kolejowego), przez co nie zawsze znajdują się na linii wzroku zwierzęcia. Zwierzęta rzadko patrzą do góry, ponadto różnią się one rozmiarami, więc linia wzroku jest na różnych wysokościach [23]. Odbite światło pojazdu szynowego ma na celu zaniepokojenie zwierzęcia, które zwolni lub zatrzyma się przed przekroczeniem bariery świetlnej.

Z racji zasady swojego działania, metoda jest skuteczna tylko w nocy, podczas gdy duża liczba kolizji ze zwierzętami ma miejsce o zmierzchu lub o świcie [42]. Światło odbijane jest na zewnątrz torów i nie alarmuje zwierząt znajdujących się bezpośrednio na torach. Choć zakup i montaż reflektorów jest tani, to wadą pozostaje brak skuteczności [9, 23, 41], zatem metoda ta powinna mieć charakter uzupełniający, stosowany w połączeniu z innymi środkami ochrony przed kolizją i na drogach o niższym natężeniu ruchu [49].

Inną metodą jest zastosowanie odpowiednich dźwięków odstrasżających zwierzęta z torów. Rozróżnia się sygnalizację dźwiękową, która ostrzega zwierzęta przed nadjeżdżającym pojazdem i bariery dźwiękowe, które stale alarmują zwierzęta znajdujące się przy torach, niezależnie od obecności pojazdu [9]. Sygnalizacja dźwiękowa może być uruchamiana dzięki czujnikom światłoczułym, reagującym na zbliżający się pociąg, lub czujnikom ruchu zwierząt przy torowisku. W pierwszym przypadku ograniczenia są podobne jak w metodzie wizualnej z reflektorami odblaskowymi, czyli sygnalizacja działa tylko w nocy [41], natomiast w drugim przypadku moduł akustyczny może być uzupełniony elementami odblaskowymi (tworząc moduł wizualno-akustyczny) by zwiększyć skuteczność odstraszenia zwierząt. Wykorzystywane są krótkie, modulowane dźwięki o częstotliwości 2-5 kHz. Wadą tego rozwiązania jest wykorzystanie sztucznych wygenerowanych dźwięków, które nie niosą zwierzętom zrozumiałej informacji, ponadto możliwe jest ich szybkie przyzwyczajenie się do sygnału, ponieważ nie nastąpi negatywne wzmocnienie i zwierzę nie połączy sygnału z realnym zagrożeniem, więc po pewnym czasie mogą one zacząć go ignorować [15]. Podobnie nieskuteczne [31,42] wydają się być gwizdki ultradźwiękowe mocowane na pojeździe lub przy torach, które emitują one dźwięki o częstotliwości 16-20 kHz przy prędkości powyżej 60 km/h.

the use of artificial generated sounds that do not convey understandable information to the animals, moreover, it is possible that they quickly get used to the signal because there will be no negative amplification and the animal will not connect the signal with the real threat, so after some time they may start to ignore it [15]. Similarly ineffective [31,42] seem to be ultrasonic whistles mounted on the vehicle or on the tracks, which emit sounds with a frequency of 16-20 kHz at speeds above 60 km/h.

The applications of acoustic signals naturally occurring in nature is the basis for the operation of the animal protection device (abbreviated as UOZ-1) (Fig.4). It has the shape of a cylinder with a diameter of 30 cm and wa height of 110 cm. It is based on the emission of a chain of key stimuli, which motivates the animals to leave the areas of the railway tracks [22]. The sequence consists of sounds that animals instinctively associate with danger, among others with an alarm signal of jay, a dog barking, a wolf howl, a wild boar squeal [9]. This device was designed with the railway traffic in mind in cooperation with the naturalists. The sequence lasts from 30 seconds to 3 minutes, it is activated automatically at the moment of receiving a signal from the railway traffic control system detecting the train thanks to the sensors, which allows for the emission of sounds in advance, not directly in front of the vehicle [43]. It is required the integration of the scaring devices with the railway infrastructure and the power supply from the container of automatic line block or KUOZ container. UOZs should be located densely enough along the tracks. The manufacturer recommends a distance of 70 meters [41, 44], alternately on both sides, on sections of routes most exposed to frequent collisions with wild animals. The studies carried out in Poland confirm the high effectiveness of action scaring both the herbivorous animals and predators [2, 21, 43, 44] and no signs of animals getting used to the sounds emitted [2]. Even the animals brought - up in captivity react to them instinctively [42]. An additional advantage is the possibility to change the sequence and volume of emitted sounds [50]. The use of naturally occurring the warning sounds of deer as an effective method of scaring the animals from the track was also studied in Japan [37], but in this case they were emitted from the approaching train.

An innovative way to increase the effectiveness of operation of visual and acoustic methods is the use of precise detection of the approaching train and providing advance the information about the time of its arrival to the system of scaring animal. A longer time of emission of scared signals would allow for a longer time of escape [22] and a better reaction of animals to warnings, because too sudden and strong stimuli may result in the animal panic and irrational behavior [36].

Zastosowanie sygnałów akustycznych naturalnie występującymi w przyrodzie jest podstawą działania Urzędnienia Ochrony Zwierząt, w skrócie UOZ-1 (rys.4). Ma ono kształt walca o średnicy 30 cm i wysokości 110 cm i bazuje na emitowaniu łańcucha bodźców kluczowych, który motywuje zwierzęta do opuszczenia okolic torów kolejowych [22]. Sekwencja składa się z dźwięków instynktownie kojarzących się zwierzętom z niebezpieczeństwem, m.in. z sygnału alarmowego sójki, ujadania psa, wycia wilka, kwiku dzika [9]. Urządzenie to zostało zaprojektowane z myślą o ruchu kolejowym, przy współpracy przyrodników. Sekwencja trwa od 30 sekund do 3 minut, uruchamiana jest automatycznie w momencie otrzymania sygnału z systemu sterowania ruchem kolei, wykrywającym pociąg dzięki czujnikom, co pozwala na emisję dźwięków z wyprzedzeniem, a nie bezpośrednio przed pojazdem [43]. Wymagana jest integracja urządzeń przepłaszających z infrastrukturą kolejową oraz zasilanie prądem, z kontenera samoczynnej blokady linowej lub kontenera KUOZ.



Rys. 4. Urządzenie UOZ-1 ma kształt walca o średnicy 30 cm i wysokości 110 cm [23]

Fig. 4. UOZ-1 device [23]

UOZ-y powinny być umiejscowione dostatecznie gęsto wzdłuż torów. Producent zaleca odstęp 70 metrów [41, 44], naprzemiennie po obu stronach, na odcinkach tras najbardziej narażonych na częste kolizje z dzikimi zwierzętami. Badania wykonane w Polsce poświadczają wysoką skuteczność działania, odstrasza zarówno zwierzęta roślinożerne, jak i drapieżniki [2,21,43,44] oraz brak oznak przyzwyczajania się zwierząt do emitowanych dźwięków [2]. Instynktownie reagują na nie nawet zwierzęta wychowane w niewoli [42]. Dodatkową zaletą jest możliwość zmiany sekwencji oraz głośności emitowanych dźwięków [50]. Zastosowanie naturalnie występujących dźwięków ostrzegawczych jeleni jako efektywnej metody odstraszenia zwierząt z torowiska badano także w Japonii [37], jednak w tym przypadku emitowane były

Two types of detection were considered in studies conducted in Canada [3]. In the first one, the sensor transmits information about a passing train to a receiver located on a selected section with an increased risk of collision with animals, which activates the scared system. The most reliable sensors turned out to be: magnetic and vibration acceleration sensors. In the second case, the effectiveness of a single piezoelectric sensor of rail vibration reacting to approaching vehicle the vehicle to the potential collision zone was analysed. The first type of detection achieved the greater credibility of the transmitted information. The advantage of both versions of the system is the simplicity of construction and assembly without changing the railway infrastructure.

A project implemented in Sweden [36] envisages the construction of special crossings for animals at a track level (around which there will be a net guiding fence with an integrated detection system of train approaching and animal motion sensors. Only in the case of receiving both signals, presence of animals and the approaching train, the scared device will be activated. Effectiveness of different types of warning signals and the entire system will be tested.

Another method of early detection of animals on the tracks is considered in India, where the collisions of train with elephants are frequent [32, 35, 38]. The vibration sensors or seismic geophones placed in the ground at the defined distances from the railway tracks at the sites of the most frequent accidents would transmit information about the presence of large animals directly to the driver's cab or traffic control. It would make prevent a collision easier by reducing the speed of vehicle and increasing vigilance of people.

Research in Central Africa [48] shows the effectiveness of application of geophones during monitoring the elephant population in Etosha National Park. Vibration measurements with the special modules (Fig.5) reacting to the weight of a passing elephant are also analyzed in Thailand [29].



Rys. 5. Moduł pomiaru drgań wykorzystany w badaniu w Tajlandii [29]

Fig. 5. Module of vibration measurement used in the research in Thailand [29]

one z nadjeżdżającego pociągu.

Innowacyjnym sposobem na podniesienie skuteczności działania wizualnych i akustycznych metod jest zastosowanie precyzyjnej detekcji zbliżającego się pociągu i przekazanie z wyprzedzeniem informacji o czasie jego przyjazdu do systemu odstraszenia zwierząt. Dłuższy czas emisji sygnałów odstraszących pozwoliłby na dłuższy czas ucieczki [22] i lepszą reakcję zwierząt na ostrzeżenia, bowiem zbyt nagle i silne bodźce mogą skutkować paniką zwierzęcia i irracjonalnym zachowaniem [36].

W badaniach przeprowadzonych w Kanadzie [3,4] rozważono dwa rodzaje detekcji. W pierwszym czujnik przekazuje informacje o przejeżdżającym pociągu do odbiornika znajdującego się na wytypowanym odcinku o zwiększonym ryzyku kolizji ze zwierzętami, który aktywuje system odstraszący. Najbardziej niezawodne okazały się czujniki: magnetyczny i przyspieszenia drgań. W drugim przypadku analizowano skuteczność pojedynczego piezoelektrycznego czujnika drgań szyny, reagującego na zbliżenie się pojazdu do strefy potencjalnej kolizji. Większą wiarygodność przekazywanych informacji osiągnął pierwszy rodzaj detekcji. Zaletą obu wersji systemu jest prostota konstrukcji i montażu bez zmiany infrastruktury kolejowej.

Projekt realizowany w Szwecji [36] zakłada budowę specjalnych przejść dla zwierząt na poziomie torów, wokół których będzie siatkowe ogrodzenie naprowadzające z zintegrowanym systemem wykrywania zbliżającego się pociągu i czujnikami ruchu zwierząt. Tylko w przypadku odebrania obydwóch sygnałów (obecności zwierząt i nadjeżdżającego pociągu) uruchomione zostanie urządzenie odstraszące. Skuteczność różnych typów sygnałów ostrzegawczych jak i całego systemu będzie badana.

Inny sposób wczesnego wykrywania obecności zwierząt na torach jest rozważany w Indiach, w których często dochodzi do kolizji pociągu ze słoniami [32, 35, 38]. Czujniki vibracji lub geofony sejsmiczne umieszczone w ziemi w określonych odległościach od torów kolejowych w miejscach najczęstszych wypadków, przekazywałyby informacje o obecności dużych zwierząt bezpośrednio do kabiny maszynisty lub kontroli ruchu. Ułatwiłoby to zapobiegnięcie kolizji poprzez zredukowanie prędkości pojazdu i wzmożonej czujności ludzi.

Badania w Afryce Środkowej [48] wskazują na skuteczność zastosowania geofonów podczas monitorowania populacji słoni w Parku Narodowym Etosha. Pomiary vibracji specjalnymi modułami (rys.5), reagującymi na ciężar przechodzącego słonia analizowane są także w Tajlandii [29].

Tego rodzaju czujniki wydają się być obiecującą metodą wykrywania zbliżających się dużych zwierząt, szczególnie niebezpiecznych dla ruchu kolejowego, jako alternatywa dla standardowych czujników

These types of sensors seem to be a promising method of detecting the approaching large animals (especially dangerous to the railway traffic) as an alternative to standard motion sensors, especially in areas with high animal populations such as national parks. However, their rightness of their application depends on integration with animal warning systems, because informing the traffic control or the driver is a solution prone to human error.

4.4. Supplementary methods

Limiting the train speed on sections with increased activity of animals or on the popular migration routes is the effective method of reducing the collisions [7, 8, 9], however, taking into account the density of railway traffic and its purpose, that is the fast transport of passengers and cargo is not the way that is willingly implemented by the carriers [42], although it is recommended by the naturalists as the basic method of animal protection, especially in the lack of more complicated solutions [31, 32].

Cutting down the trees along the track in order to improve the visibility of the area has the different effects. In Norway, there was a decrease in the number of train collisions with moose after cutting the flora at the tracks [1] although he studies in Sweden indicated a lack of impact of such a solution [13]. Moreover, the analysis of places of the most frequent collisions in Poland, which occur more frequently in meadows rather than in the forests, [7] does not link the greater visibility of the area with a smaller number of collisions with animals. Cut and unremoved flora can also motivate herbivores to look for food by the tracks [27]. Cutting down trees and bushes would have to be regular, which increases costs, is not a fully ecological solution, because it destroys the habitats of small animals. The attempts were also made to change the animal migration routes by setting the feeders away from the collision places, so that the animals did not have to cross the highway [27]. The studies in Norway on management of moose population showed the effective influence of using the artificial feeding places on the behavior of migrating moose [33]. This solution can contribute to the reduction of the number of accidents involving the herbivores [9] by persuading them to avoid the railway lines or to cross the tracks in appropriate places where the warning systems are used.

4.5. Monitoring of effectiveness of used solutions

Knowledge of the behavior of animals and the increase in their population in a given area has an impact on the assessment of the effectiveness of the taken actions [14]. Data on the potential reduction in mortality of animals as a result of collision can be obtained from reports of carrier, based on the video data (Fig.6) or independent tests of entities responsible for traffic safety.

ruchu, szczególnie w miejscach licznych populacji zwierząt, takich jak parki narodowe. Jednak słuszność ich stosowania zależy od integracji z systemami ostrzegającymi zwierzęta, ponieważ samo informowanie kontroli ruchu lub maszynisty jest rozwiązaniem podatnym na błąd ludzki.

4.4. Metody uzupełniające

Ograniczenie prędkości jazdy pociągu na odcinkach o wzmożonej aktywności zwierząt lub popularnych trasach ich migracji jest skuteczną metodą redukcji kolizji [7, 8, 9], jednak biorąc pod uwagę zagęszczenie ruchu kolejowego oraz jego cel, czyli szybki transport pasażerów i ładunków, nie jest sposobem chętnie realizowanym przez przewoźników [42], choć jest zalecana przez przyrodników, jako podstawowa metoda ochrony zwierząt, szczególnie przy braku bardziej skomplikowanych rozwiązań [31, 32].

Różne skutki przynosi wycinka drzew wzdłuż torowiska, służąca polepszeniu widoczności okolicy. W Norwegii zanotowano spadek liczby kolizji pociągu z łosiami po wycięciu roślinności przy torach [1], choć badania w Szwecji wskazywały brak oddziaływania takiego rozwiązania [13]. Ponadto analiza miejsc najczęstszych kolizji w Polsce, które występują częściej na terenach łąkowych, a nie samych lasach [7], nie łączy większej widoczności terenu z mniejszą liczbą zderzeń ze zwierzętami. Ścięta i nieusunięta roślinność może także motywować roślinożerców do poszukiwania pożywienia przy torach [27]. Wycinka drzew i krzewów musiałaby być regularna, co zwiększa koszty, nie jest też w pełni ekologicznym rozwiązaniem, ponieważ niszczy siedliska drobnych zwierząt. Podejmowane były też próby zmiany tras migracji zwierząt, za pomocą ustawienia paśników z dala od miejsc kolizji, tak by zwierzęta nie musiały przekraczać drogi szybkiego ruchu samochodów [27]. Badania w Norwegii nad zarządzaniem populacją łosi wskazały na skuteczny wpływ stosowania sztucznych miejsc żerowania na zachowanie wędrujących łosi [33]. Rozwiązanie to przyczynić się może do redukcji liczby wypadków z udziałem roślinożerców [9] poprzez skłonienie ich do omijania linii kolejowych lub do przechodzenia przez tory w odpowiednich miejscach, w których zastosowano systemy ostrzegawcze.

4.5. Monitorowanie efektywności wykorzystanych rozwiązań

Na ocenę skuteczności podjętych działań ma wpływ znajomość zachowania zwierząt oraz wzrostu ich populacji na danym terenie [14]. Dane na temat potencjalnego zmniejszenia śmiertelności zwierząt w wyniku kolizji można uzyskać dzięki raportom przewoźników, na podstawie danych wideo (rys.6) lub samodzielnych badań podmiotów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo ruchu.



Rys. 6. Obraz z kamery monitoring przy torowisku [42]
Fig. 6. Picture from camera monitoring by the track [42]

Monitoring of the methods of protection against collisions with animals should be a methodically developed test [9] to allow for reliable conclusions and possible changes in the strategy. Among the methods of observing the frequency of using the animal crossings it is included the recording of tracks on lanes with sand and recording with video cameras [28]. In the case of acoustic and visual scared methods, the video recordings with motion sensors are also used [2]. A universal method of monitoring is the analysis of carriers' data on the number of incidents on a given section.

5. SUMMARY

The growing railway infrastructure, the development of transport corridors and increasing speeds of vehicles cause the increase in impact of railways on the natural environment. Apart from the emission of exhaust gases into the atmosphere, among the effects of this long-term impact it can be noticed the fragmentation of habitats and disturbance of the balance of ecosystems as well as an increase in animal mortality as a result of the collision with the train [5]. This is undesirable both ecologically and for the reasons of traffic safety. An accident involving the large animals, such moose, deers, bears or elephants can cause the serious damage to the traction vehicle or locomotive, and a collision with the herd - in the extreme cases even a train derailment [7]. An important element of the analysis of collisions of wild animals with trains is the designation of places with the higher risk of collision, the so-called hotspots. This makes the measures possible to be taken on the most dangerous sections of the line. In order to prevent the undesirable situations, the different methods of protecting animals against railway accidents are used. Some of them are best implemented during the construction of railway lines (e.g. animal crossings, adapted pipe culverts), others can be implemented on already the operated routes (e.g. acoustic modules), but each of the solutions faces certain limitations: financial, operational, ecological or difficult integrity

Monitoring metod ochrony przed kolizją ze zwierzętami powinien być metodycznie opracowanym badaniem [9], aby pozwalał na wiarygodne wnioski i ewentualne zmiany strategii. Wśród metod obserwowania częstotliwości użytkowania przejść dla zwierząt rozróżnia się rejestrację tropów na pasach z piaskiem oraz rejestracja przy użyciu kamer wideo [28]. W przypadku akustycznych i wizualnych metod odstraszających stosuje się także rejestracje wideo z czujnikami ruchu [2]. Uniwersalną metodą monitoringu jest analiza danych przewoźników o liczbie incydentów na danym odcinku.

5. PODSUMOWANIE

Rozbudowująca się infrastruktura kolejowa, rozwój korytarzy transportowych i coraz większe prędkości poruszania się pojazdów powodują zwiększenie oddziaływania kolei na środowisko naturalne. Poza emisją spalin do atmosfery, wśród skutków tego długofalowego oddziaływania można zauważyć fragmentację siedlisk i zaburzenie równowagi ekosystemów oraz wzrost śmiertelności zwierząt w wyniku kolizji z pociągiem [5,6]. Jest to niepożądane zarówno ekologicznie, jak i ze względów bezpieczeństwa ruchu. Wypadek z udziałem dużych zwierząt, takich jak łosie, jelenie, niedźwiedzie lub słonie, może powodować poważne uszkodzenia pojazdu trakcyjnego lub lokomotywy, a zderzenie ze stadem, w skrajnych przypadkach nawet wykoślenie pociągu [7]. Ważnym elementem analiz kolizji dzikich zwierząt z pociągami jest wyznaczenie miejsc o podwyższonym ryzyku zderzenia, tzw. hotspotów. Umożliwia to zastosowanie środków na najbardziej niebezpiecznych odcinkach linii. W celu zapobiegnięcia niepożądanym sytuacjom stosowane są różne metody ochrony zwierząt przed wypadkiem kolejowym. Niektóre z nich najlepiej realizować podczas budowy linii kolejowych (np. przejścia dla zwierząt, zaadaptowane przepusty rurowe), inne można implementować na trasach już eksploatowanych (np. moduły akustyczne), ale każde z rozwiązań napotyka pewne ograniczenia: finansowe, eksploatacyjne, ekologiczne lub utrudnionej integralności z resztą systemu kolejowego. Ograniczenia te utrudniają wybór optymalnego środka redukcji liczby kolizji dzikich zwierząt z pociągami.

Prowadzone są badania nad zwiększeniem skuteczności odstraszania zwierząt z torów, m.in. polegające na emisji sygnału ostrzegawczego z wyprzedzeniem, zanim pojawi się pociąg [2, 3, 39] lub łączenia kilku różnych metod [36]. Innowacyjne sposoby redukcji liczby kolizji z pociągami uwzględniają wpływ przyzwyczajzeń, instynktów i psychologii zwierząt [22], pozwalając im odpowiednio reagować w nowych sytuacjach. Rozwój technologii powinien sprzyjać zarówno unowocześnianiu środków transportu, jak i efektywniejszej redukcji negatywnego oddziaływania na środowisko, nie tylko ze względów ekologicznych, ale i w celu podniesienia poziomu bezpieczeństwa ruchu.

with the rest of the railway system. These limitations make it difficult to choose the optimal measure for reducing the number of collisions of wild animals with trains.

Research is conducted on increasing the effectiveness of scaring the animals off the tracks, among others consisting in emission a warning signal in advance before the train arrives [2, 3, 39] or combination of several different methods [36]. The innovative methods for reducing the number of collisions with trains take into account the influence of habits, instincts and animal psychology [22] allowing them to react appropriately in the new situations. The development of technology should contribute to both the modernization of the means of transport and the more effective reduction of the negative impact on the environment, not only for ecological reasons, but also to increase the level of traffic safety.

Bibliography/ Bibliografia

- [1] Andreassen H.P., Gundersen H., Storaas T.: *The effect of scent? marking, forest clearing, and supplemental feeding on moose? train collisions. The Journal of Wildlife Management*, 69, 2005. [https://doi.org/10.2193/0022-541X\(2005\)069\[1125:TEOSFC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0022-541X(2005)069[1125:TEOSFC]2.0.CO;2)
- [2] Babińska-Werka J., Krauze-Gryz D., Wasilewski M., Jasińska, K.: *Effectiveness of an acoustic wildlife warning device using natural calls to reduce the risk of train collisions with animals. Transportation Research D*, 38, 6–14, 2015.
- [3] Backs J. A.J., Nychka J.A., St. Clair C.C.: *Warning systems triggered by trains could reduce collisions with wildlife. Ecological Engineering*, vol.106, Part A, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.024>.
- [4] Backs J. A.J., Nychka J.A., St. Clair C.C.: *Warning systems triggered by trains increase flight-initiation times of wildlife, Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102502>
- [5] Barrientos R., Borda-de-Água L.: *Railways as Barriers for Wildlife: Current Knowledge. In: Borda-de-Água L., Barrientos R., Beja P., Pereira H. (eds) Railway Ecology. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_4*
- [6] Barrientos R., Ascensão F., Beja P. Pereira H., Borda-de-Água L.: *Railway ecology vs. road ecology: similarities and differences. Eur J Wildl Res* 65, 12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10344-018-1248-0>
- [7] Bartoszek D., Stolarski M.: *Kolizje pojazdów szynowych ze zwierzętami a bezpieczeństwo ruchu pociągów, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, t. 96, 49-58, 2013. [bwmeta1.8c538381-3b33-4b4d-98fa-a57ff98fd2d0](https://doi.org/10.1007/s10344-011-0517-y)
- [8] Belant J. L.: *Moose collisions with vehicles and trains in Northeastern Minnesota. Alces*, 31, 1–8, 1995.
- [9] Carvalho F., Santos S.M., Mira A., Lourenço R.: *Methods to monitor and mitigate wildlife mortality in railways. In: Borda-de-Água L., Barrientos R., Beja P., Pereira H. (eds) Railway Ecology. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_3*
- [10] Clevenger A. P., Waltho N.: *Factors influencing the effectiveness of wildlife underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada. Conservation Biology*, 14, 47–56, 2000.
- [11] *Coraz więcej dzikich zwierząt ginie na torach https://regiony.rp.pl/trendy/24549-coraz-wiecej-dzikich-zwierzat-ginie-na-torach (dostęp: 13.04.2021)*
- [12] Elmeros M., Winblad J., Andersen P. N., Madsen A. B., & Christensen, J. T.: *Effectiveness of odour repellents on red deer (Cervus elaphus) and roe deer (Capreolus capreolus): a field test. European Journal of Wildlife Research*, 57(6), 1223-1226, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10344-011-0517-y>
- [13] Eriksson C.: *Does tree removal along railroads in Sweden influence the risk of train accidents with moose and roe deer? Dissertation, Second cycle, A2E. Grimsö och Uppsala: SLU, Department of Ecology, Grimsö Wildlife Research Station.*
- [14] Gilhooly P. S., Nielsen S. E., Whittington J., and St. Clair C.C.: *Wildlife mortality on roads and railways following highway mitigation. Ecosphere* 10(2):e02597. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2597>
- [15] Gilsdorf J.M., Hygnstrom S.E., VerCauteren Kurt C.: *Use of frightening devices in wildlife damage management. USDA National Wildlife Research Center - Staff Publications*, 227, 2013. https://digitalcommons.unl.edu/icwdm_usdanwrc/227
- [16] Iuell, B. et al.: *Wildlife and Traffic: A European Handbook for Identifying Conflicts and Designing Solutions. Brusel, KNNV Publishers, 2003.*
- [17] Jackson, S. D., & Griffin, C. R.: *A strategy for mitigating highway impacts on wildlife. In T. A. Messmer B. West (eds.) Wildlife and highways: Seeking solutions to an ecological and socio-economic dilemma, Bethesda: The Wildlife Society, 2000.*

- [18] Japan builds turtles their tunnels to help them cross rail tracks <https://www.lifegate.com/japan-tunnels-turtles> (dostęp: 13.04.2021)
- [19] Japanese rail workers build special tunnels to save turtles from train deaths <https://www.independent.co.uk/news/world/asia/japanese-rail-workers-build-special-tunnels-save-turtles-train-deaths-a6757466.html> (dostęp: 13.04.2021)
- [20] Jasińska K. D., Bijak S., Child K. N., Rea R. V.: Wzorce czasowe kolizji łosi z pociągami na terenie Kolumbii Brytyjskiej i ich wpływ na metody zapobiegające takim zdarzeniom. *Sylwan*, 164 (1), 32? 40, 2020. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2019135>
- [21] Jasińska K., Werka J., Krauze? Gryz D., Wasilewski M.: Urządzenia akustyczne UOZ? I sposobem na ograniczenie kolizji z udziałem zwierząt na liniach kolejowych. *Sylwan*, 158 (2), 143? 150, 2014.
- [22] Kossak S., Zasada działania atrapy bodźców kluczowych zastosowanej w urządzeniu UOZ-1 wypłaszającym zwierzęta z torów kolei szybkiego ruchu. W: *Oddziaływanie infrastruktury transportowej na przestrzeń przyrodniczą*. Red. B. Jackowiak Warszawa – Poznań – Lublin: 173–179, 2007.
- [23] Kowal P., Jasińska K., Babińska-Werka J.: Aktywne metody ochrony zwierząt wzdłuż linii kolejowych na obszarach Europejskiej Sieci Ekologicznej Natura 2000. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 22 (4), 463-471, 2013.
- [24] Krauze-Gryz D., Żmihorski M., Jasińska K., Kwaśny Ł., Werka J.: Temporal pattern of wildlife-train collisions in Poland. *Journal of wildlife management*, 81(8), 1513-1519, 2017.
- [25] Kušta T., Ježek M., Keken Z.: Mortality of large mammals on railway tracks. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 42, 12–18, 2011.
- [26] Kušta T., Keken Z., Ježek M., & Kůta Z.: Effectiveness and costs of odor repellents in wildlife-vehicle collisions: A case study in Central Bohemia, Czech Republic. *Transportation Research Part D*, 38, 1–5, 2015.
- [27] Mastro L. L., Conover M.R., Frey S. N.: Deer–vehicle collision prevention techniques. *Human–Wildlife Interactions*. 75, 2008. <https://digitalcommons.unl.edu/hwi/75>
- [28] Nowak S., Mysłajek R.W.: Propozycja metodyki podstawowego monitoringu użytkowania przejść dla zwierząt przez ssaki naziemne. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 21 (59), 14-23, 2019.
- [29] Phokharatkul P., Liswadiratanakul D.: Using the vibration sensors to detect elephants, *Kasem Bundit Engineering Journal*, 8, 260-270, 2018. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kbej/article/view/120317>
- [30] Przepusty dla zwierząt przy liniach kolejowych. Ciekawostki. Za: PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. <https://inzynierbudownictwa.pl/przepusty-dla-zwierzat-przy-liniach-kolejowych-ciekawostki> (dostęp 13.04.2021)
- [31] Putman R.J., Langbein J., Staines B.W.: Deer and Road Traffic Accidents: A Review of Mitigation Measures: Costs and Cost-Effectiveness, Report for the Deer Commission for Scotland, Contract RP23A, UK, 2004.
- [32] Roy M., Sukumar R.: Railways and Wildlife: A Case Study of Train-Elephant Collisions in Northern West Bengal, India. In: Borda-de-Água L., Barrientos R., Beja P., Pereira H. (eds) *Railway Ecology*. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_10
- [33] Sahlsten J., Bunnefeld N., Månsson J., Ericsson G., Bergström R., Dettki H.: Can supplementary feeding be used to redistribute moose *Alces alces*?, *Wildlife Biology*, 16(1), 85-92, 2010. <https://doi.org/10.2981/08-085>
- [34] Santos S.M., Carvalho F., Mira A.: Current Knowledge on Wildlife Mortality in Railways. In: Borda-de-Água L., Barrientos R., Beja P., Pereira H. (eds) *Railway Ecology*. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_2
- [35] Sarma U. K., Easa P. S., Menon V.: Deadly lines: A scientific approach to understanding and mitigating elephant mortality due to train hits in Assam. Occasional Report no. 24, New Delhi: Wildlife Trust of India, 2006.
- [36] Seiler A., Olsson M.: Wildlife Deterrent Methods for Railways—An Experimental Study. In: Borda-de-Água L., Barrientos R., Beja P., Pereira H. (eds) *Railway Ecology*. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_17
- [37] Shimura M., Ushiogi T., Ikehata M.: Development of an acoustic deterrent to prevent deer-train collisions. *Quart. Report RTRI* 59, 207–211, 2018. https://doi.org/10.2219/rtriqr.59.3_207
- [38] Singh A. K., Kumar A., Mookerjee A., Menon V.: Jumbo express: A scientific approach to understanding and mitigating elephant mortality due to train accidents in Rajaji National Park. Occasional Report no. 3, New Delhi: Wildlife Trust of India, 2001.
- [39] St. Clair C.C., Backs J., Friesen A., Gangadharan A., Gilhooly P., Murray M., Pollock S.: Animal learning may contribute to both problems and solutions for wildlife–train collisions. *Phil. Trans. R. Soc. B* 374: 20180050, 2019. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2018.0050>
- [40] Stolarski M., Żyłkowska J.: Wypadki z udziałem zwierząt w transporcie kolejowym, *Transport i Komunikacja*, 3, 26-28, 2014.
- [41] Stolarski M., Żyłkowska J.: Aktywne metody ochrony zwierząt na liniach kolejowych, *Technika Transportu Szynowego* 5-6, 2008.
- [42] Stolarski M., Żyłkowska J.: Ochrona zwierząt jako istotny element procesu inwestycyjnego podczas budowy i modernizacji linii kolejowych. *Problemy Kolejnictwa*, 153, 2011.
- [43] Stolarski M., Pielech M.: Metody powiązania urządzeń sterowania ruchem kolejowym z systemem ochrony zwierząt UOZ-1. *Logistyka*, 3, 2012. *bwmeta1.BPGA-0001-0041*

- [44] Stolarski M.: Urządzenia do odstraszenia zwierząt UOZ-I dla linii kolejowych o dużych prędkościach ruchu pociągu. In: Jackowiak B. (eds) *Oddziaływanie infrastruktury transportowej na przestrzeń przyrodniczą*, 181-187, 2007. *bwmeta1.BGPK-2072-7786*
- [45] Visintin C., Golding N., van der Ree R., McCarthy M. A.: *Managing the timing and speed of vehicles reduces wildlife-transport collision risk. Transportation research part D: Transport and Environment*, 59, 86-95, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.003>
- [46] *Wildlife-Vehicle Collision Reduction Study: Report to Congress*, 2018. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08034/08034> (dostęp 13.04.2021)
- [47] Wojtynek L., Kulińska E., Budzik R., Kulińska A.: *Wypadki z udziałem zwierząt w transporcie drogowym i kolejowym w Polsce. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 18 (6), 1460-1463, 2017.
- [48] Wood J., O'Connell-Rodwell C., Klempere, S.: *Using Seismic Sensors to Detect Elephants and Other Large Mammals: A Potential Census Technique. Journal of Applied Ecology*, 42(3), 587-594, 2005. <http://www.jstor.org/stable/3505991>
- [49] Żyłkowska J.: *Ochrona fauny w korytarzach transportowych, metody alternatywne wobec przejść dla zwierząt. Logistyka*, 3, 2012. *bwmeta1.BUS8-0024-0033*
- [50] Żyłkowska J. Stolarski M.: *Problematyka kolizji dzikich zwierząt z pociągami w aspekcie psychologii zwierząt oraz bezpieczeństwa ruchu pociągów. Logistyka*, 3, 2011. *bwmeta1.BPL1-0007-0038*

Time-frequency methods for processing non-stationary diagnostic vibroacoustic signals

Czasowo-częstotliwościowe metody przetwarzania niestacjonarnych diagnostycznych sygnałów wibroakustycznych

The article presents the issues of interpretation of non-stationary vibroacoustic diagnostic signals. The reasons of the incomplete usefulness of the traditional analysis solely in the field of time or frequency for such cases are explained. The use of time-frequency methods is presented as the proposed solution. The literature was reviewed in aspect of the methods currently used or on which the research is carried out. Older applications, such as the short-time Fourier transform and more complex and contemporary applications such as the Hilbert-Huang transform, are mentioned. Further development directions were also assessed, taking into account the combination of methods and the use of artificial neural networks, assessing the latter as giving the greatest potential in aspect of the evolution of signal processing methods.

W artykule zaprezentowano problematykę interpretacji niestacjonarnych wibroakustycznych sygnałów diagnostycznych. Wyjaśniono przyczyny niepełnej przydatności tradycyjnej analizy wyłącznie w dziedzinie czasu lub częstotliwości dla takich przypadków. Jako proponowane rozwiązanie przedstawiono wykorzystanie metod czasowo-częstotliwościowych. Dokonano przeglądu literatury w aspekcie metod obecnie wykorzystywanych lub nad którymi prowadzone są badania. Wymieniono zarówno zastosowania starsze jak krótkoczasowa transformata Fouriera oraz bardziej złożone i współczesne jak transformata Hilberta-Huanga. Dokonano również oceny dalszych kierunków rozwoju z uwzględnieniem kombinacji metod oraz wykorzystania sztucznych sieci neuronowych oceniając te ostatnie jako dające największy potencjał w aspekcie ewolucji metod przetwarzania sygnałów.

Keywords: vibroacoustic diagnostics, non-stationary signals, time-frequency methods

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna, sygnały niestacjonarne, metody czasowo-częstotliwościowe

1. INTRODUCTION

Most of the vibroacoustic signals recorded and processed during the operation of machines and vehicles, including rail vehicles, are in fact variable in time and non-stationary [37,40]. It results, among others, from what that most of the real systems are non-linear systems, whose features can be characterized as corresponding to a linear system only with low-amplitude vibrations [2]. Another aspect influencing on the non-stationarity of the signal is occurring the failure of the systems - at each stage of the use of a technical device there are defects affecting the signals of the processes taking place during the operation of machine, from imperfections during designing and production to failures caused by extreme wearing out. Moreover, the very nature of the work of a technical object may be non-stationary, e.g. variable rotational speed during use or variable speed of movement [6].

1. WPROWADZENIE

Większość sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych i przetwarzanych w trakcie eksploatacji maszyn i pojazdów, w tym pojazdów szynowych, jest w istocie zmienna w czasie i niestacjonarna [37,40]. Wynika to między innymi z tego, że większość układów rzeczywistych to układy nieliniowe, których cechy można scharakteryzować jako odpowiadające układowi liniowemu tylko przy drganiach nisko amplitudowych [2]. Innym aspektem wpływającym na niestacjonarność sygnału jest powstawanie uszkodzeń w układach. Na każdym etapie użytkowania urządzenia technicznego, występują defekty wpływające na sygnały procesów zachodzących podczas pracy maszyny, poczynając od niedoskonałości w trakcie konstruowania i wytwarzania, kończąc na awariach spowodowanych skrajnym wyeksploatowaniem. Ponadto sama natura pracy obiektu technicznego może być niestacjonarna np. zmienna

Such variability of signals in time, which is characterized by aperiodicity, causes that the usefulness of only time or only frequency analysis becomes limited in aspect of technical diagnostics [32]. The Fourier transform analyses the signal globally - it makes it possible to determine the characteristics of frequency components for the entire tested signal. However thanks to it, it cannot be determined how these components changed with the course of time. A practical example of limited usefulness in the diagnostic aspect is a technical examination of a reducer with a damaged toothed wheel, where the defect manifests itself in the form of crushing a single tooth. The spectrum of vibrations during the operation of a damaged gear will differ from the spectrum of vibrations of a technically efficient gear, which in fact will allow to state that the defect has occurred. However, it will be impossible to precisely define the form of the damage and the exact place of its occurrence [4,29].

The presented state of affairs also applies to the operation and diagnostics of elements of the rail transport system. In [5,8,19,33,37] it is presented, among others, the use of non-stationary vibroacoustics signals for the detection of flat places on wheels, the detection of a slip phenomenon, identification of damage to the gear transmission or analysis of vibrations surrounded by railways. Therefore, it determines the necessity to develop the methods of signal processing allowing for the correct interpretation of the non-stationary diagnostic vibroacoustic signal. Such methods include the time-frequency methods.

2. STATIONARITY OF SIGNALS

To determine the stationarity of the process, it is necessary to know the value of mean described by the equation (1) and the correlation function expressed by the relation (2).

$$m_s(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t_1), \quad (1)$$

$$R_s(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t_1) \cdot s_k(t_1 + \tau), \quad (2)$$

The stochastic process $\{s(t)\}$ is stationary in the broader sense (poorly stationary), when the value of the function $m_s(t_1)$ and $R_s(t_1, t_1 + \tau)$ do not depend on time t . In practice, this means that the average value of poorly stationary processes is constant, and the autocorrelation function depends only on the shift τ , i.e. $m_s(t_1) = m_s$ and $R_s(t_1, t_1 + \tau) = R_s(\tau)$.

If for the stochastic process $\{s(t)\}$ an infinite set of moments of higher orders and total moments can be calculated, and if all possible moments and total moments do not depend on the time of the process, then the process $\{s(t)\}$ is strictly called stationary or stationary in a narrower sense.

prędkość obrotowa w trakcie użytkowania lub zmienna prędkość poruszania się [6].

Taka zmienność sygnałów w czasie charakteryzowana aperiodycznością powoduje, że przydatność analizy wyłącznie czasowej lub wyłącznie częstotliwościowej staje się ograniczona w aspekcie diagnostyki technicznej [32]. Transformata Fouriera analizuje sygnał w sposób globalny i pozwala ona wyznaczyć charakterystyki składowych częstotliwościowych dla całego badanego sygnału. Nie można jednak dzięki niej rozstrzygnąć jak te składowe się zmieniały wraz z przebiegiem czasu. Praktycznym przykładem ograniczonej przydatności w aspekcie diagnostycznym jest badanie techniczne reduktora z uszkodzonym kołem zębatym, gdzie defekt objawia się w postaci skruszenia pojedynczego zęba. Widmo drgań podczas pracy przekładni uszkodzonej będzie różnić się od widma drgań przekładni sprawnej technicznie, co w istocie pozwoli stwierdzić, że defekt wystąpił. Niemożliwe jednak będzie dokładne określenie postaci uszkodzenia oraz dokładnego miejsca jego wystąpienia [4, 29].

Przedstawiony stan rzeczy dotyczy także eksploatacji i diagnostyki elementów systemu transportu szynowego. W kilku publikacjach [5, 8, 19, 33, 37] przedstawiono między innymi wykorzystanie niestacjonarnych sygnałów wibroakustycznych do detekcji płaskich miejsc na kołach, wykrywania zjawiska poślizgu, identyfikowanie uszkodzeń przekładni zębatej i analizy drgań w otoczeniu dróg szynowych. Determinuje więc to konieczność opracowania metod przetwarzania sygnałów pozwalających poprawnie zinterpretować niestacjonarny diagnostyczny sygnał wibroakustyczny. Do takich metod należą metody czasowo-częstotliwościowe.

2. STACJONARNOŚĆ SYGNAŁÓW

Do określenia stacjonarności procesu niezbędna jest znajomość wartości średniej opisanej równaniem (1) oraz funkcji korelacji wyrażonej zależnością (2).

$$m_s(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t_1), \quad (1)$$

$$R_s(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t_1) \cdot s_k(t_1 + \tau), \quad (2)$$

Proces stochastyczny $\{s(t)\}$ jest stacjonarny w szerszym sensie (słabo stacjonarny), kiedy wartość funkcji $m_s(t_1)$ i $R_s(t_1, t_1 + \tau)$ nie zależą od czasu t . W praktyce oznacza to, że średnia wartość słabo stacjonarnych procesów jest stała, a funkcja autokorelacji zależy tylko od przesunięcia τ , tzn. $m_s(t_1) = m_s$ oraz $R_s(t_1, t_1 + \tau) = R_s(\tau)$.

Jeżeli dla procesu stochastycznego $\{s(t)\}$ można obliczyć nieskończony zbiór momentów wyższych rzędów i momentów łącznych oraz gdy wszystkie możliwe momenty oraz momenty łączne nie zależą od czasu procesu, wtedy proces $\{s(t)\}$ nazywa się

If the statistical functions are used to description of the stochastic process, i.e. the mean value written in the form of the relation (3) and the autocorrelation function (4), then if the random process $\{s(t)\}$ is stationary and the values $m_s(k)$ and $R_s(\tau, k)$ defined by the formulas (3) and (4) are the same for the different random functions, then such a random process is called ergodic. If the signal is ergodic, then it can be concluded about the entire population of implementations based on the analysis of one implementation.

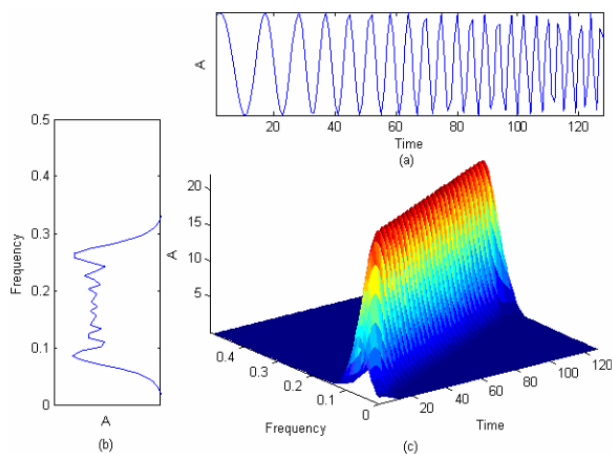
$$m_s(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_k(t) dt, \quad (3)$$

$$R_s(\tau, k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_k(t) \cdot s_k(t + \tau) dt, \quad (4)$$

From the analysis of relations (1) to (4) it is concluded that the ergodic processes are a special case of stationary processes [28].

3. THE USE OF TIME - FREQUENCY METHODS

The solution that allows to increase the amount of information obtained from the tested vibration signal is the use of the analysis that uses joint time-frequency (t/f) representations of Joint Time-Frequency Analysis (JTFA) signals. A graphic example of such a joint representation compared to the time and frequency domain representations is presented in Fig.1.



Rys. 1. Porównanie dziedzin czasu, częstotliwości i czasowo-częstotliwościowej [41]

Fig. 1. Comparison of time, frequency and time-frequency domain [41]

The list of characteristics presented in Fig. 1 clearly presents the differences between the time, frequency and time-frequency representation of the signal. The diagnostic usefulness of the latter is also clearly visible. By analyzing only the overall spectrum of the signal, it is difficult to obtain feedback that is suitable for diagnostic conclusion - it is difficult to distinguish the possible dominant components. Using JTFA, such information is

ściśle stacjonarnym lub stacjonarnym w węższym sensie.

Jeśli do opisu procesu stochastycznego zostaną użyte funkcje statystyczne, tzn. wartość średnia zapisana w postaci zależności (3) i funkcja autokorelacji (4), to jeżeli proces losowy $\{s(t)\}$ jest stacjonarny i wartości $m_s(k)$ i $R_s(\tau, k)$ określone wzorami (3) i (4) są jednakowe dla różnych funkcji losowych, to taki proces losowy nazywa się ergodycznym. Jeżeli sygnał jest ergodyczny to na podstawie analizy jednej realizacji można wnioskować o całej populacji realizacji.

$$m_s(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_k(t) dt, \quad (3)$$

$$R_s(\tau, k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_k(t) \cdot s_k(t + \tau) dt, \quad (4)$$

Z analizy zależności (1) do (4) wynika wniosek, że procesy ergodyczne są szczególnym przypadkiem procesów stacjonarnych [28].

3. WYKORZYSTANIE METOD CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH

Rozwiązaniem pozwalającym zwiększyć ilość informacji uzyskanych z badanego sygnału drgań, jest zastosowanie analizy, która wykorzystuje łączne czasowo-częstotliwościowe (t/f) reprezentacje sygnałów *Joint Time-Frequency Analysis* (JTFA). Przykład graficzny takiej reprezentacji łączonej porównany z reprezentacjami w domenie czasu i częstotliwości przedstawiony jest na rys. 1.

Zestawienie charakterystyk przedstawionych na rys. 1 klarownie przedstawia różnice między reprezentacją czasową, częstotliwościową oraz czasowo-częstotliwościową sygnału. Wyraźnie widoczna również jest przydatność diagnostyczna tej ostatniej. Analizując wyłącznie całościowe widmo sygnału trudno uzyskać informację zwrotną zdatną do przeprowadzenia wnioskowania diagnostycznego, trudno wyróżnić ew. składowe dominujące. Taka informacja zostaje uzyskana na podstawie JTFA. Sygnał jest niestacjonarny, charakteryzuje się pojedynczą składową częstotliwością dominującą, która ulega przesunięciu fazowemu wraz z przebiegiem czasu. Tak jednoznacznie sformułowany opis sygnału pozwalają wykorzystać go do przeprowadzenia precyzyjnego wnioskowania diagnostycznego. Można więc stwierdzić, że JTFA są zaawansowanymi metodami przetwarzania sygnałów pozwalającymi w pełniejszy sposób wykorzystać ich analizy w aspekcie diagnostyki technicznej [31].

Praktyczne wykorzystanie analizy czasowo-częstotliwościowej oraz jej zalety przedstawiono na rys. 2 przy sformułowaniu charakterystyk przyspieszeń drgań uszkodzonej przekładni stożkowej. Rysunek 2 przedstawia reprezentację JTFA sygnału przyspieszeń drgań zarejestrowanych w trakcie pracy przekładni stożkowej z uszkodzonym pojedyn-

obtained - the signal is non-stationary, characterized by a single dominant frequency component, which is phase shifted with the course of time. Such an explicitly formulated signal description allows to use it to carry out precise diagnostic conclusion. Therefore, it can be concluded that JTFA are the advanced methods of signal processing that allow for a more fully use of their analysis in the aspect of technical diagnostics [31].

The practical use of time-frequency analysis and its advantages are presented in Fig. 2 with the formulation of the vibration acceleration characteristics of the damaged conical gear.

Fig. 2 presents the JTFA representation of the signal of vibration accelerations recorded during the operation of the conical gear with the damaged single tooth - the defect in the form of injured structure and broken part of the tooth. The repeatable presence of the dominant frequency component is visible, but the repetition is at equal time period. It results from the rotary motion of the gear - occurring the resonance frequencies can be interpreted as an effect of the entering of the damaged tooth in the contact points. The damage causes occurring the increased vibrations in relation to the undamaged element. In further analysis, knowing the rotational speed of the machine, it is possible to link the occurrence of the dominant component with the current angle of rotation of the gear - knowing the starting position it is possible to precisely indicate which tooth was damaged. This proves the advantage of time-frequency methods over the others - the determination of an ordinary spectrum would only allow to conclude that the tested gear is probably damaged, because it has different frequency characteristics than the reference gear. The use of JTFA allowed not only to detect the damage, but also to state that it is local and it is possible to mark the place of its occurrence.

4. VIBROACOUSTIC METHODS IN COMPOSITE DIAGNOSTICS

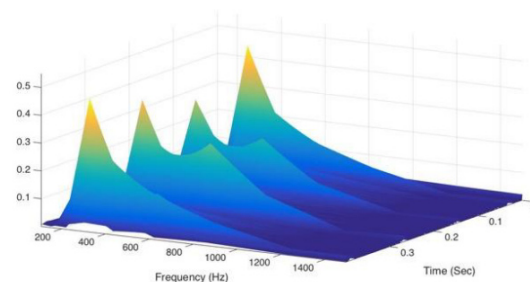
Now the following methods of determining the time-frequency characteristics are distinguished [41]:

- Short Time Fourier Transform (STFT)
- Wavelet Transform (WV)
- Wigner-Ville Distribution (WVD)
- Pseudo Wigner-Ville Distribution, (PWVD)
- Hilbert-Huang Transform (HHT)

4.1. Short Time Fourier Transform

The Short Time Fourier Transform can be defined as subjecting the spectral analysis using FFT, the short signal sequences treated as quasi-stationary. The division of the input signal into next analyzed segments is implemented with using the technique called a moving window. Presentation of the spectra

czym zębem - defekt w postaci naruszenia struktury i skruszenia części zęba. Widoczne jest powtarzalne występowanie składowej częstotliwościowej dominującej, przy czym powtarzanie następuje w równych przedziałach czasowych. Wynika to z ruchu obrotowego przekładni - występowanie częstości rezonansowych można zinterpretować jako efekt wchodzenia uszkodzonego zęba w przypór. Uszkodzenie powoduje powstawanie zwiększonych drgań w stosunku do elementu nieuszkodzonego. W dalszej analizie znając prędkość obrotową maszyny można powiązać wystąpienie składowej dominującej z aktualnym kątem obrotu przekładni - znając pozycję wyjściową możliwe jest dokładne wskazanie, który ząb uległ uszkodzeniu. Udowadnia to przewagę metod czasowo-częstotliwościowych na pozostałymi - wyznaczenie zwykłego widma pozwoliłoby jedynie na stwierdzenie, że badana przekładnia jest prawdopodobnie uszkodzona, bo ma inne charakterystyki częstotliwościowe niż przekładnia wzorcowa. Zastosowanie JTFA pozwoliło nie tylko wykryć uszkodzenie, ale też stwierdzić, że jest ono lokalne i oznaczyć miejsce wystąpienia.



Rys. 2. Reprezentacja czasowo-częstotliwościowa drgań uszkodzonej przekładni stożkowej [13]

Fig. 2. Time-frequency representation of the vibrations of the damaged conical gear [13]

4. METODY WIBROAKUSTYCZNE W DIAGNOSTYCE KOMPOZYTÓW

Obecnie wyróżnia się następujące metody wyznaczania charakterystyk czasowo-częstotliwościowych [41]:

- Krótkoczasowa Transformata Fouriera (Short Time Fourier Transform, STFT)
- Transformata falkowa (Wavelet Transform, WV)
- Dystrybucja Wigner-Villea (Wigner-Ville Distribution, WVD)
- Funkcja pseudo-rozkładu Wignera (Pseudo Wigner-Ville Distribution, PWVD)
- Transformata Hilberta-Huanga (Hilbert-Huang Transform, HHT)

4.1. Krótkoczasowa Transformata Fouriera

Krótkoczasową Transformatę Fouriera można zdefiniować jako poddanie analizie widmowej, z wy-

obtained in this way on one characteristic allows to obtain the time-frequency representation of the analyzed process called a spectrogram. STFT can be defined by the following equation 5 [36].

$$STFT[x_w(t, \tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} w(t, \tau)x(t) \cdot e^{-i2\pi f t} dt \quad (5)$$

gdzie/where:

$x(t)$ – reprezentacja analizowanego sygnału wejściowego w dziedzinie czasu/ representation of the analysed input signal in time domain

τ – pozycja ruchomego okna w dziedzinie czasu/ position of the moving window in the time domain

$x_w(t, \tau) = w(t-\tau)x(t)$ – wyodrębniony analizowany segment danych/ isolated analysed segment of data.

Therefore, the STFT result can be interpreted as a sequence of spectra determined for the shorter local time fragments. Among the advantages of the described method, it can be mentioned, among others, the short computation time required to determine the spectrogram, the requirement of small computing power and constant resolution in the entire range of spectrum. Moreover, the use of STFT for signal interpretation can be assessed as easy and intuitive compared to other methods. The fundamental disadvantages of this method include the inability to simultaneously obtain the high window resolution for time and frequency (Heisenberg's uncertainty principle). Increasing the resolution for one domain causes decreasing the other. It is possible to minimize the negative effects of this limitation by using the overlapping method consisting in partial overlapping of the analysed signal segments.

As a result, the increased resolution in the time domain is obtained without necessity of reducing it in the frequency domain [36]. Another disadvantage of the method is the possibility of occurring the frequency and amplitude estimation errors for the local peaks of the time-spectral representation. The solution is application of Amplitude and Frequency Correction (AFC), which allows about 50 times more precise estimation of frequency components in comparison to the FFT spectrum [2].

4.2. Wavelet Transform

To effectively analyse the spectral properties of non-stationary signals, there is a need to look at them in an appropriately wide and shifting time period. This requirement can be formulated as the necessity of using the windows that automatically narrow on high frequency analysis and similarly widen on low frequency analysis. These properties have the integral transformations based on wavelets due to using the scaling [3]. In the wavelet transformation, the wavelets are called the used base functions (mother function). They can be any functions. In an effort to simplify and speed up the computational

korzystaniem FFT, krótkich sekwencji sygnału traktowanych jako quasi-stacjonarne. Podział sygnału wejściowego na kolejne analizowane segmenty realizowany jest z wykorzystaniem techniki nazywanej ruchomym oknem. Przedstawienie uzyskanych w ten sposób widm na jednej charakterystyce pozwala uzyskać reprezentację czasowo-częstotliwościową analizowanego procesu nazywaną spektrogramem. STFT można zdefiniować następującym równaniem 5 [36].

$$STFT[x_w(t, \tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} w(t, \tau)x(t) \cdot e^{-i2\pi f t} dt \quad (5)$$

gdzie:

$x(t)$ – reprezentacja analizowanego sygnału wejściowego w dziedzinie czasu

τ – pozycja ruchomego okna w dziedzinie czasu

$x_w(t, \tau) = w(t-\tau)x(t)$ – wyodrębniony analizowany segment danych.

Wynik STFT można więc interpretować jako ciąg widm wyznaczonych dla krótszych, lokalnych fragmentów czasowych. Pośród zalet opisywanej metody wymienić można m. in. krótki czas obliczeń wymaganych do wyznaczenia spektrogramu, wymóg niezmiennych mocy obliczeniowych oraz stałą rozdzielczość w całym zakresie widma. Ponadto wykorzystanie STFT do interpretacji sygnału można ocenić jako łatwe i intuicyjne w porównaniu do innych metod. Do zasadniczych wad tej metody można zaliczyć niemożność jednoczesnego uzyskania wysokiej rozdzielczości okna dla czasu i częstotliwości (zasada nieoznaczoności Heisenberga). Zwiększanie rozdzielczości dla jednej dziedziny powoduje jej zmniejszenie dla drugiej. Możliwe jest zminimalizowanie negatywnych skutków tego ograniczenia przez zastosowanie metody *overlapping* polegającej na częściowym nachodzeniu na siebie analizowanych segmentów sygnału.

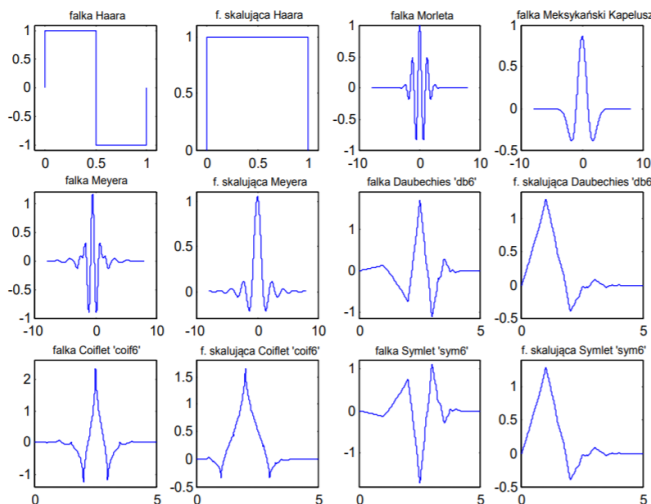
W rezultacie uzyskuje się zwiększoną rozdzielczość w dziedzinie czasu bez konieczności jej zmniejszenia w dziedzinie częstotliwości [36].

Inną wadą metody jest możliwość występowania błędów estymacji częstotliwości oraz amplitudy dla lokalnych maksimów reprezentacji czasowo-widmowej. Rozwiązaniem jest zastosowanie korekcji amplitudowo-częstotliwościowej (*Amplitude and Frequency Correction* - AFC), która pozwala na około 50-krotnie precyzyjniejsze oszacowanie składowych częstotliwościowych w porównaniu do widma FFT [2].

4.2. Transformata falkowa

W celu efektywnej analizy własności spektralnych sygnałów o charakterze niestacjonarnym istnieje potrzeba spojrzenia na nie w odpowiednio szerokim i przesuwalnym przedziale czasu. Można ten wymóg sformułować jako konieczność posługiwania się oknami, które automatycznie ulegają zwięźeniu się przy analizie wysokich częstotliwości oraz analo-

process in many cases it is used as a Morlet wavelet - its form and comparison with other used wavelets are shown in Fig. 3. The use of this wavelet enables the FFT procedure to be used in the processing, and as a result it accelerates calculation process. The form of the result depends on the adopted base functions, therefore the basic process of signal analysis is the appropriate selection of the wavelet [1,36].



Rys. 3. Porównanie falek stosowanych w transformacie falkowej
Fig. 3. Comparison of wavelets used in the wavelet transform

There are two forms of the wavelet transform - continuous (Continuous Wavelet Transform, CWT) and discrete (Discrete Wavelet Transform, DWT). CWT can be defined by equation 6.

$$CWT_{\Psi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

gdzie/where:

$\Psi(t-\tau)$ – falka bazowa/ base wavelet (mother function)

$x(t)$ – sygnał ciągły w dziedzinie czasu/ continuous signal in the time domain

a – parametr skali/ scale parameter

b – parametr przesunięcia (miejsca)/ shift parameter (place)

Ψ^* – sprzężenie funkcji $\Psi(t-\tau)$ / conjugation of the function $\Psi(t-\tau)$

The continuous wavelet transform can be presented as a sum after all time of the signal multiplied by the scaled, shifted version of the wavelet. The result of this process is the determination of the so-called wavelet coefficients which are a function of scale and shift. The described type of analysis can be compared to filtration with a constant relative bandwidth $\Delta f/f_s$. The position of the filter on the time-spectral representation is determined by the scale and shift parameters (a , b). With moving towards the higher frequencies, the bandwidth of the analysis increases with decreasing analysis of the resolution in the frequency domain, while in turn the resolution increases in the time domain. This feature is potentially useful for the simultaneous analysis and observation with different time step of processes

gicznie rozszerzają się przy analizie niskich częstotliwości. Własności te posiadają transformacje całkowe oparte na falkach dzięki zastosowaniu skalowania [3]. W transformacji falkowej falkami nazywa się wykorzystywane funkcje bazowe (mother function). Mogą być nimi dowolne funkcje. W dążeniu do uproszczenia i przyspieszenia procesu obliczeniowego w wielu przypadkach stosowana jest jako falka Morleta – jej postać i porównanie z innymi stosowanymi falkami przedstawione są na Rys. 3. Zastosowanie tej falki umożliwia wykorzystanie w procesie przetwarzania procedury FFT, w rezultacie przyspieszając proces obliczeniowy. Postać wyniku jest zależna od przyjętych funkcji bazowych, dlatego zasadniczym procesem analizy sygnału jest odpowiedni dobór falki [1,36].

Rozróżnia się dwie postacie transformaty falkowej – ciągłą (Continuous Wavelet Transform, CWT) oraz dyskretną (Discrete Wavelet Transform, DWT). CWT można zdefiniować równaniem 6.

$$CWT_{\Psi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

gdzie/where:

$\Psi(t-\tau)$ – falka bazowa/ base wavelet (mother function)

$x(t)$ – sygnał ciągły w dziedzinie czasu/ continuous signal in the time domain

a – parametr skali/ scale parameter

b – parametr przesunięcia (miejsca)/ shift parameter (place)

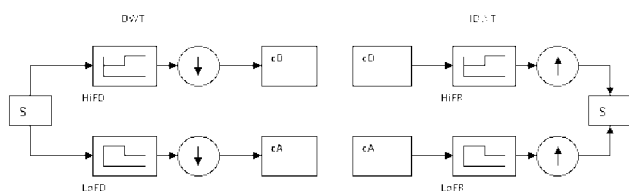
Ψ^* – sprzężenie funkcji $\Psi(t-\tau)$ / conjugation of the function $\Psi(t-\tau)$

Ciągłą transformatę falkową można przedstawić jako sumę po całym czasie sygnału zwiokrotnionej o przeskalowaną, przesuniętą wersję falki. Wynikiem tego procesu jest wyznaczenie tzw. współczynników falkowych, które są funkcją skali i przesunięcia. Opisany typ analizy przyrównać można do filtracji o stałej względnej szerokości pasma $\Delta f/f_s$. Pozycja filtra na reprezentacji czasowo-widmowej określona jest parametrami skali i przesunięcia (a , b). Wraz z przemieszczaniem w stronę częstotliwości wyższych, wzrasta szerokość pasma analizy, a przy zmniejszeniu rozdzielczości analizy w dziedzinie częstotliwości, jednocześnie wzrasta z kolei rozdzielczość w dziedzinie czasu. Cecha ta jest potencjalnie przydatna dla jednoczesnej analizy i obserwacji z różnym krokiem czasowym procesów charakteryzujących się szybkozmiennością i dużymi amplitudami składowych częstotliwościowych, np. praca zaworów proces spalania i analogicznie wolnozmennych procesów niskoczęstotliwościowych. Różnicę pomiędzy skalowanymi oknami charakterystycznymi dla transformacji WV, a oknami o stałej rozdzielczości charakterystycznymi dla transformacji STFT przedstawiono na rys. 4. Do wad opisanej metody można zaliczyć zależność postaci wyniku od przyjętej funkcji bazowej oraz nie zawsze intuicyjną interpretację graficznej postaci wyniku [12, 23].

characterized by the fast changeability and the large amplitudes of frequency components, e.g. operation of valves, combustion process and analogously slow-changing low-frequency processes. The difference between the scaled windows characteristic for the WV transformation and the windows with the constant resolution characteristic for the STFT transformation is presented in Fig. 4. The disadvantages of the described method include the dependence of the result form on the adopted base function and the not always the intuitive interpretation of the graphical form of the result [12,23].

Calculation of the wavelet coefficients for each possible scale (the scale domain is continuous) requires a lot of work and computing time with simultaneous generation of a large data volume.

The solution is limitation of the subset of scales and positions for which the computation will be made (the scale domain is discrete). In order to increase the accuracy of calculations, the scales and positions based on the power of two, the so-called doubled (dyadic) are used. For this purpose, four wavelet filters are used: high-pass and low-pass and their equivalents for the inverse transform (Inverted Discrete Wavelet Transform, IDWT). The result of the described actions is the separation of the signal into two courses of the wavelet coefficients, the first cA with the large scale value describes the approximation component A, and the second cD with the smaller scale value representing the detailed component D. IDWT filters are used to reconstruct the original signal based on cA and cD [14]. The block diagram of carrying out the DWT and IDWT process is shown in Fig. 5.

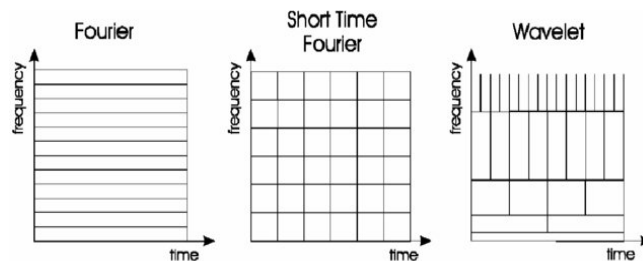


Rys. 5. Dyskretna transformata falkowa DWT i odwrotna IDWT. HiFD – filtr górnoprzepustowy DWT, LoFD – filtr dolnoprzepustowy DWT, HiFR – filtr górnoprzepustowy IDWT, LoFR – filtr dolnoprzepustowy IDWT [14]

Fig. 5. Discrete wavelet transform DWT and reverse IDWT. HiFD – high-pass filter DWT, LoFD – low-pass filter DWT, HiFR – high-pass filter IDWT, LoFR – low-pass filter IDWT [14]

The difference in the time-frequency graphical representation between CWT and DWT is presented in Fig. 6.

Comparing DWT and CWT it can be found that the discrete form of the wavelet transform is useful for decomposition and selective reconstruction of the signal tested in the entire scope of the analysis. The continuous form of this transform is considered as especially predestined for the tests of internal processes of the machine, the manifestation of which is the local differentiation of the informational

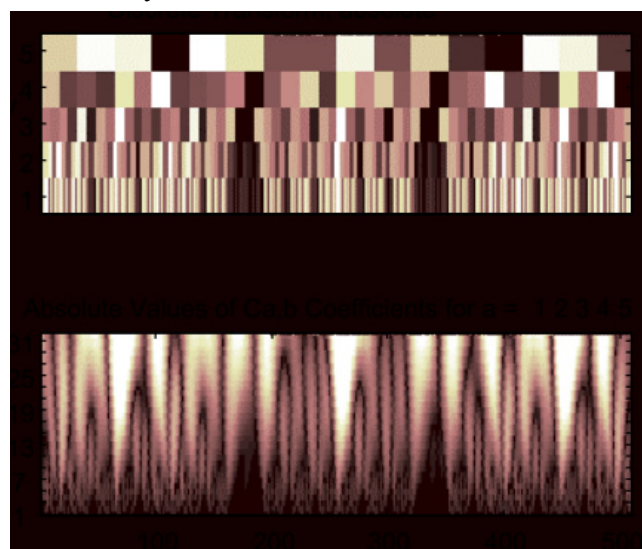


Rys. 4. Porównanie okien pomiędzy FFT, STFT i WV [34]
Fig. 4. Comparison of windows between FFT, STFT and WV [34]

Obliczanie współczynników falkowych dla każdej możliwej skali (dziedzina skali jest ciągła) wymaga dużej ilości pracy i czasu obliczeniowego z jednoczesnym wygenerowaniem dużego woluminu danych.

Rozwiązaniem jest ograniczenie podzbioru skal i położenia, dla których wykonywane będą obliczenia (dziedzina skali jest dyskretna). W celu zwiększenia dokładności obliczeń stosuje się skale i położenia oparte na potęgach dwójki tzw. podwojone (dyadic). Wykorzystuje się do tego celu cztery filtry falkowe: górnoprzepustowe oraz dolnoprzepustowe oraz ich odpowiedniki dla transformaty odwrotnej (Inverted Discrete Wavelet Transform, IDWT). Wynikiem opisywanych działań jest rozdział sygnału na dwa przebiegi współczynników falkowych, pierwszy cA o dużej wartości skali opisuje składową aproksymacyjną A, a drugi cD o mniejszej wartości skali reprezentujący składową szczegółową D. Filtry IDWT służą do rekonstrukcji sygnału pierwotnego na podstawie cA i cD [14]. Schemat blokowy przeprowadzenia procesu DWT i IDWT przedstawiono na Rys. 5.

Różnicę w graficznej reprezentacji czasowo-częstotliwościowej pomiędzy CWT i DWT przedstawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Przykład dyskretny (na górze) i ciągły (na dole) transformaty falkowej [3]

Fig. 6. Example of the discrete (top) and continuous (bottom) wavelet transform [3]

changeability of external vibroacoustic phenomena, not only limited to the time domain [3].

4.3. Wigner-Ville Distribution

The Wigner-Ville distribution is implemented by the time-frequency window with a two-dimensional defined resolution. This type allows hypothetically to assume any size of the analysis window. Freedom in defining the size of the window analysis may lead to obtain the negative values of distribution, occurring the interference in the frequency and time domains, which in final effect leads to difficulties in the interpretation of the analysis results. WVD is characterized by a relatively long computation time, compared to previous methods, especially for long time series. The WVD distribution is more often defined as the windowed Wigner-Ville distribution in form presented in equation 7.

$$WVD_w(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) l_w(t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

gdzie/where:

$l_w(t)$ – symetryczna funkcja wagowa/ symmetric weighting function

The Gaussian function defined by equation 8 is considered as the optimal weight function.

$$l_w(t) = c^2 e^{-\frac{1}{2}p^2\tau^2} \quad (8)$$

gdzie/where:

$c; p$ – dodatnie stałe rzeczywiste/ positive real constants.

The STFT and WT transforms are based on similar assumptions in relation to each other - the difference between them comes down to a different definition of the base functions, and the processed signal is expressed in a direct form. The signal obtained as a result of applying the WVD distribution is expressed in the form of a double-differentiated autocorrelation function. For this reason, it can be defined as a bilinear transform. WVD is characterized by scaling and shift properties, like WT, which makes it useful in the context of numerical applications, including identification of faults using the analysed signals [16]. Taking into account the optimal resolution and the momentary spectrum of power density in time and frequency domains, WVD is considered as particularly useful in diagnosing the rotating machines [9,17,25,40].

The fundamental disadvantage of WVD for signals with non-stationary frequency modulation is occurrence of characteristic interferences called cross-terms. These are signals defined as parasitic with frequencies equal to the harmonics frequency differences that generate them. Therefore, it became justified to introduce the additional filtering windows reducing the resulting cross elements. There are many variants of methods using the mentioned windows enabling reduction of disruptions, e.g.

Porównując DWT i CWT można stwierdzić, że dyskretna forma transformaty falkowej jest przydatna przy dekompozycji i selektywnej rekonstrukcji sygnału badanego w całym zakresie analizy. Ciągła postać tej transformaty oceniana jest jako szczególnie predestynowana dla badań procesów wewnętrznych maszyny, których przejawem jest lokalne różnicowanie zmienności informacyjnej zewnętrznych zjawisk wibroakustycznych, nie tylko ograniczonych do dziedziny czasu [3].

4.3. Dystrybucja Wigner-Ville

Dystrybucja Wigner-Ville jest realizowana poprzez okno czasowo-częstotliwościowe o rozdzielczości definiowanej dwuwymiarowo. Taki rodzaj pozwala hipotetycznie na przyjmowanie dowolnego rozmiaru okna analizy. Dowolność w definiowaniu rozmiaru okna analizy, może prowadzić do uzyskiwania ujemnych wartości dystrybucji, powstawania interferencji w dziedzinach częstotliwości i czasu, co w efekcie końcowym prowadzi do utrudnień w interpretacji wyników analizy. WVD charakteryzuje się w porównaniu z poprzednimi metodami stosunkowo długim czasem obliczeń, zwłaszcza dla długich szeregów czasowych. Dystrybucja WVD jest częściej definiowana jako oknowana dystrybucja Wigner-Ville w postaci przedstawionej równaniem 7.

$$WVD_w(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) l_w(t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

gdzie/where:

$l_w(t)$ – symetryczna funkcja wagowa/ symmetric weighting function

Za optymalną funkcję wagową uznaje się funkcję Gaussa definiowaną równaniem 8.

$$l_w(t) = c^2 e^{-\frac{1}{2}p^2\tau^2} \quad (8)$$

gdzie:

$c; p$ – dodatnie stałe rzeczywiste.

Transformaty STFT i WT opierają się na podobnych względem siebie założeniach – różnica między nimi sprowadza się do innego definiowania funkcji bazowych, a przetworzony sygnał jest wyrażony w formie bezpośredniej. Sygnał uzyskany w wyniku zastosowania dystrybucji WVD jest natomiast wyrażony w postaci funkcji autokorelacji, podwójnie różniczkowanej. Z tego powodu można ją określić jako transformatę biliniową. WVD charakteryzuje się własnościami skalowania i przesunięcia, podobnie jak WT, co czyni ją przydatną w kontekście zastosowań numerycznych, w tym identyfikacji uszkodzeń za pomocą analizowanych sygnałów [16]. Biorąc pod uwagę optymalną rozdzielczość i widmo chwilowe gęstości mocy w dziedzinach czasu i częstotliwości, WVD jest uznawana za szczególnie przydatną w diagnozowaniu maszyn wirujących [9,17,25,40].

Zasadniczą wadą WVD dla sygnałów o niestacjonarnej modulacji częstotliwości jest pojawianie się

Wigner-Ville Pseudo-Distribution (PWVD), [11,35,41]. They are defined by equations 9 and 10.

$$PWVD_w(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) l_w(t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (9)$$

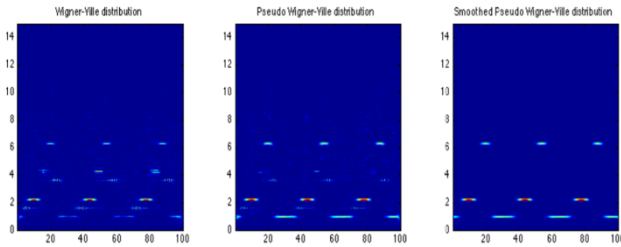
$$SPWVD_w(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} q(u-t) \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) l_w(t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau du \quad (10)$$

gdzie/where:

$h(\tau)$ – okno redukujące częstotliwościowe człony krzyżowe/ window reducing frequency cross elements

$q(u-t)$ – okno redukujące czasowe człony krzyżowe/ window reducing temporal cross elements

Both in the case of $h(\tau)$ like $q(u-t)$ parametric and non-parametric windows can be used. However, in carrying out the measurements for diagnostic purposes, rectangular or Hanning windows are most often used [35]. A comparison of the time-frequency representations of the signal with using WVD, PWVD, SPWVD is presented in Fig. 7.



Rys. 7. Porównanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej uzyskanej przy użyciu WVD, PWVD, SPWVD [10]

Fig. 7. Comparison of the time-frequency representation obtained using WVD, PWVD, SPWVD [10]

The disadvantage of the above solutions is the loss of the original very good resolution properties of the WVD method. Choosing the form of the transform, it should be considered whether, in the aspect of the analysis, it is more important to freely shape the resolution of the processed signal window or the necessity of disturbing the result by excessive interference [32].

4.4. Hilbert-Huang Transform

In 1998 Norden Huang proposed a new method of the time-frequency analysis called the Hilbert-Huang transformation. This method can be divided into two main stages [41]:

- Empirical Mode Decomposition (EMD) used to separate a non-linear and non-stationary signal into its individual components, each with one dominant frequency, and as a result to obtain an intrinsic mode function (IMF). The EMD can be presented as the relation described in equation 11.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N imf(i) + reszta \quad (11)$$

charakterystycznych interferencji zwanych członami krzyżowymi (cross-terms). Są to sygnały określane

gdzie:

$h(\tau)$ – okno redukujące częstotliwościowe człony krzyżowe

$q(u-t)$ – okno redukujące czasowe człony krzyżowe

jako pasożytnicze o częstotliwościach równych różnicom częstotliwości generujących je harmonicznych. Zasadne stało się więc wprowadzenie dodatkowych okien filtrujących redukujących powstałe człony krzyżowe. Istnieje wiele odmian metod wykorzystujących wspomniane okna umożliwiające redukcję zakłóceń m.in. pseudodystrybucja Wignera-Ville'a (Pseudo Wigner-Ville Distribution, PWVD), wygładzona pseudodystrybucja Wignera-Ville'a (Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution, SPWVD) [11,35,41]. Definiują je równania 9 i 10.

Zarówno w przypadku $h(\tau)$ jak $q(u-t)$ zastosowanie mogą mieć okna parametryczne jak i nieparametryczne. W wykonywaniu pomiarów dla celów diagnostycznych najczęściej jednak stosuje się okna prostokątne lub Hanninga [35]. Porównanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnału z zastosowaniem WVD, PWVD, SPWVD przedstawiono na Rys. 7.

Wadą powyższych rozwiązań jest utrata pierwotnych bardzo dobrych właściwości rozdzielczych metody WVD. Przy wyborze formy transformaty należy więc rozważyć czy w aspekcie analizy ważniejsze jest swobodne kształtowanie rozdzielczości okna przetwarzanego sygnału czy konieczność zakłócenia wyniku przez nadmierne interferencje [32].

4.4. Transformata Hilberta-Huanga

W 1998 Norden Huang zaproponował nową metodę analizy czasowo-częstotliwościowej nazywaną transformacją Hilberta-Huanga. Metodę tą można podzielić na dwa zasadnicze etapy [41]:

- Dekompozycję empiryczną (Empirical Mode Decomposition, EMD) używaną w celu rozdelenia sygnału nieliniowego i niestacjonarnego na poszczególne jego składowe, każda z jedną częstotliwością dominującą, a w rezultacie uzyskania wewnętrznej funkcji składowej (Intrinsic Mode Function, IMF). EMD można przedstawić w postaci zależności opisaną w równaniu 11.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N imf(i) + reszta \quad (11)$$

gdzie:

$x(t)$ – sygnał pomiarowy

$imf(i)$ – i-ta wewnętrzna funkcja składowa IMF

$reszta$ – sygnał posiadający cechy monotoniczności pozostały po określeniu wszystkich IMF

gdzie/where:

$x(t)$ – sygnał pomiarowy/ measurement signal

$imf(i)$ – i-ta wewnętrzna funkcja składowa IMF/ i-th IMF intrinsic mode function

$reszta/ rest$ – sygnał posiadający cechy monotoniczności pozostały po określeniu wszystkich IMF/ a signal having the features of monotonicity, remaining after determining all IMFs

- Spectral analysis using the Hilbert transform (Hilbert Spectral Analysis, HSA), the purpose of which is to present the individual component functions on a time-frequency diagram. Representation of the signal in this form is obtained by computing the Hilbert transform for each component function.

The signal after applying HSA on the IMF components can be presented by equation 12.

$$x(t) = \sum_{j=1}^N a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (12)$$

Equation 12 allows to generate the time-spectral map of the amplitude and instantaneous frequency called the Hilbert-Huang spectrum (HHS). The comparison of HHS with the scalogram of the continuous wavelet transformation of the signal is presented in Fig. 8.

HHT and the obtained HHS can be successfully used for technical diagnostics of machines. The experiment comparing HHT with CWT in the assessment of the technical condition of the rolling bearing showed that the good resolving properties of the Hilbert-Huang transformation allowed to identify more accurately the shocks in the vibration signal on the time-frequency map compared to the representation obtained with the continuous wavelet transformation [27]. However, it should be added that the Hilbert-Huang transform, due to the empirical approach, differs from the FFT in the approach to the analysis of signals. The obtained results must be appropriately interpreted, and the extraction of the desired information from the signal must be preceded by appropriate tests [39].

4.5. Further directions of method research of processing the vibroacoustic signals

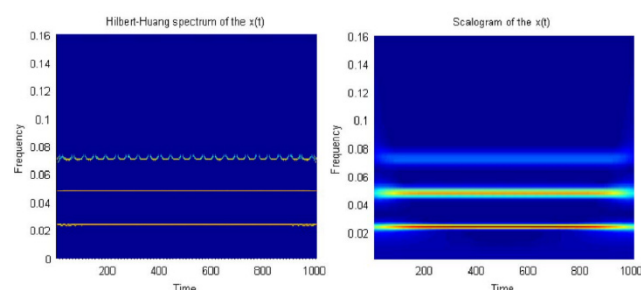
All the above-mentioned transforms are still used in the analysis of vibroacoustic diagnostic signals undergoing the continuous development [20,22,24,30]. The increasing complexity of the operated devices and the simultaneous striving for sufficiently early detection of faults causes the necessity of further research aimed at the development of methods supporting the interpretation of diagnostic signals, in particular non-stationary ones. In the aspect of diagnostics of rail vehicles, it is particularly important for high-speed railways, where the forces acting on the structures are very large and a delay in detecting a technical defect could lead to a disaster

- Analizę spektralną z wykorzystaniem transformaty Hilberta (Hilbert Spectral Analysis, HSA), której celem jest przedstawienie poszczególnych funkcji składowych na wykresie czasowo-częstotliwościowym. Reprezentację sygnału w ten formie uzyskuje się przez obliczenie transformaty Hilberta dla każdej funkcji składowej.

Sygnał po zastosowaniu HSA na komponentach IMF można przedstawić za pomocą równania 12.

$$x(t) = \sum_{j=1}^N a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (12)$$

Równanie 12 pozwala na wygenerowanie mapy czasowo-widmowej amplitudy i częstotliwości chwilowej nazywanej widmem Hilberta-Huanga (Hilbert-Huang Spectrum, HHS). Porównanie HHS ze skalogramem ciągłej transformacji falkowej sygnału przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8. Porównanie zastosowania HHT i CWT do uzyskania mapy czasowo-częstotliwościowej analizowanego sygnału [27]
Fig. 8. Comparison of using HHT and CWT to obtain a time-frequency map of the analysed signal [27]

HHT i uzyskiwana dzięki niemu HHS z powodzeniem wykorzystywane może być do diagnostyki technicznej maszyn. Eksperyment porównujący HHT z CWT w ocenie stanu technicznego łożyska tocznego wykazał, że dobre własności rozdzielcze transformacji Hilberta-Huanga umożliwiły dokładniejsze zidentyfikowanie uderzeń w sygnale drgań na mapie czasowo-częstotliwościowej w porównaniu do reprezentacji uzyskanej za pomocą ciągłej transformacji falkowej [27]. Należy jednak dodać, że transformata Hilberta-Huanga z powodu podejścia empirycznego różni się od FFT w podejściu do analizowania sygnałów. Otrzymywane wyniki muszą być odpowiednio interpretowane a ekstrakowanie pożądanych informacji z sygnału poprzedzić należy odpowiednimi badaniami [39].

4.5. Dalsze kierunki badań metod przetwarzania sygnałów wibroakustycznych

Wszystkie wymienione wcześniej transformaty znajdują cały czas użycie w analizie wibroakustycznych sygnałów diagnostycznych ulegając ciągłemu rozwojowi [20,22,24,30]. Rosnąca komplikacja eksploatowanych urządzeń oraz jednocześnie dążenie do odpowiednio wczesnej detekcji uszkodzeń powoduje

[15].

Two directions of development are now the worth highlighting - by combination of the above-mentioned methods as in [7] and by supporting their application with using the artificial neural networks. The latter is currently used in the high-speed railways and railway infrastructure diagnostics. Algorithms of the detection of cracks in rails with the use of acoustic signal processing were developed using the wavelet transform and the classification of failures with using the multilayer convolutional neural networks [21]. A similar approach was used in the diagnosis of axle boxes, the neural networks with residual learning were used to develop a model of damage formation based on the vibroacoustic signals [26]. The authors of both publications concluded that the presented direction of signal processing gives the reliable results and presents the further development potential, which allows to predict that it will be a further path in the development of vibroacoustic diagnostics in applications of rail vehicle.

5. SUMMARY

The increasing complication of technical objects, including rail vehicles and the increasing the operational requirements in relation to them cause the necessity of constant development of the methods of their diagnostics. One of the most useful and constantly developed directions in this aspect is the vibroacoustic diagnostics. The difficulty in the proper analysis of the vibration and noise of signal is, however, the fact that in most cases it is non-stationary in time, which causes the limited usefulness of application of the traditional methods of signal processing.

One of the solutions of the presented problem is using the time-frequency methods. They allow the signal to be analysed simultaneously in the time and frequency domains. Obtaining the high frequencies in both domains at the same time is a complex issue and it is subjected to the constant research. This is due to the fact that increasing the frequency in one domain lowers it in the other. It is visible in the case of STFT, which is characterized by constant dimensions of time windows. Other methods of scaling domain windows allow to obtain more accurate results at the cost of making the computation process more difficult. In the case of the wavelet transform using the scaling coefficients, the problem is to increase the computational time, as well as the significant influence of the base wavelet selection on the final results. The Wigner-Ville distribution theoretically allows to obtain any size of the window of analysis. However, this causes a risk of obtaining the negative distribution and occurrence of interference, which finally makes the analysis difficult. The Hilbert-Huang transform also allows to obtain the accurate signal processing results, but due to the

konieczność dalszych badań ukierunkowanych na rozwój metod wspomagających interpretację sygnałów diagnostycznych, w szczególności niestacjonarnych. W aspekcie diagnostyki pojazdów szynowych jest to szczególnie ważne dla kolei dużych prędkości, gdzie siły działające na konstrukcje są bardzo duże i opóźnienie w wykryciu defektu technicznego mogłoby doprowadzić do katastrofy [15].

Warte wyróżnienia są obecnie dwa kierunki rozwoju – poprzez kombinacje wymienionych już metod jak w [7] oraz wspomaganie ich wykorzystania z użyciem sztucznych sieci neuronowych. Te ostatnie znajduje obecnie zastosowanie w kolejach wysokich prędkości oraz diagnostyce infrastruktury kolejowej. Opracowano algorytmy detekcji pęknięć w szynach z wykorzystaniem przetwarzania sygnału akustycznego przy pomocy transformaty falkowej oraz klasyfikacji uszkodzeń z użyciem wielowarstwowych konwolucyjnych sieci neuronowych [21]. Podobne podejście zastosowano przy diagnostyce maźnic, wykorzystano sieci neuronowe z nauczaniem rezydującym do opracowania modelu powstawania uszkodzeń w oparciu o sygnały wibroakustyczne [26]. Autorzy obydwu publikacji wywnioskowali, że przedstawiony kierunek przetwarzania sygnałów daje wiarygodne wyniki i wykazuje dalszy potencjał rozwojowy, co pozwala na przewidywanie, że będzie to dalsza ścieżka rozwoju diagnostyki wibroakustycznej w zastosowaniach pojazdów szynowych.

5. PODSUMOWANIE

Rosnąca komplikacja obiektów technicznych, w tym pojazdów szynowych oraz zwiększające się w stosunku do nich wymagania eksploatacyjne, powodują konieczność nieustannego rozwoju metod ich diagnostyki. Jednym z najbardziej przydatnych i stale rozwijanych w tym aspekcie kierunków jest diagnostyka wibroakustyczna. Utrudnieniem we właściwej analizie sygnału drgań i hałasu jest jednak to, że w większości przypadków jest on niestacjonarny w czasie, co powoduje ograniczoną przydatność wykorzystania tradycyjnych metod przetwarzania sygnałów.

Jednym z rozwiązań przedstawionego problemu jest wykorzystanie metod czasowo-częstotliwościowych. Pozwalają one na analizę sygnału jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości. Uzyskanie wysokiej częstotliwości w przypadku obu dziedzin jednocześnie, jest zagadnieniem złożonym i podlegającym nieustannym badaniom. Wynika to z faktu, że zwiększenie częstotliwości w jednej dziedzinie powoduje obniżenie jej w drugiej. Widoczne jest to w przypadku STFT, którą charakteryzują stałe wymiary okien czasowych. Inne metody skalowania okien dziedzinowych pozwalają uzyskać dokładniejsze wyniki kosztem utrudnienia procesu obliczeniowego. W przypadku transformaty falkowej wykorzystującej współczynniki skalujące problemem jest

empirical approach, it requires in-depth interpretation to obtain the results without unnecessary artefacts.

The presented state of affairs indicates the further development potential of time-frequency methods as a tool for interpreting the non-stationary signals. The main goal is to obtain the most accurate results from both domains at the same time. The direction of research, currently giving the promising results, is using the artificial neural networks in supporting the analysis with using the traditional methods. Self-learning algorithms allow for a more accurate classification of the technical condition based on the vibroacoustic signal, and thus for the improved diagnostics of technical objects. This allows to predict that it will be the most effective development direction.

zwiększenie czasu obliczeniowego, a także znaczny wpływ doboru falki bazowej na ostateczne wyniki. Dystrybucja Wigner-Ville'a teoretycznie pozwala uzyskać dowolne rozmiary okna analizy. Powoduje to jednak ryzyko uzyskania ujemnej dystrybucji i powstania interferencji, co w ostateczności powoduje utrudnienie analizy. Transformata Hilberta-Huanga pozwala również uzyskać dokładne wyniki przetworzenia sygnału, jednak z powodu podejścia empirycznego wymaga pogłębionej interpretacji w celu uzyskania rezultatów bez zbędnych artefaktów.

Przedstawiony stan rzeczy wskazuje na dalszy potencjał rozwojowy metod czasowo-częstotliwościowych jako narzędzia interpretacji sygnałów niestacjonarnych. Celem zasadniczym jest uzyskanie jak najdokładniejszych wyników z obydwu dziedzin jednocześnie. Kierunkiem badań dającym obecnie obiecujące wyniki jest wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych we wspomaganiu analizy z użyciem metod tradycyjnych. Algorytmy samouczące pozwalają na dokładniejszą klasyfikację stanu technicznego na podstawie sygnału wibroakustycznego, a tym samym na ulepszoną diagnostykę obiektów technicznych. Pozwala to przewidywać, że będzie to najbardziej efektywny kierunek rozwoju.

Bibliography / Bibliografia

- [1] Augustyniak P. Przybornik falkowej analizy sygnałów. I Krajowa Konferencja Użytkowników MATLAB-A 1995.
- [2] Barczewski R. Diagnostowanie układów na podstawie analizy zmian krzywej szkieletowej uzyskiwanej metodą STFT-AFC. *Diagnostyka* 2000;23:15–18.
- [3] Batko W, Ziółko M. Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej. Warszawa: WIMiR; 2002.
- [4] Baydar N, Ball A. A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2001;15:1091–1107. <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1338>.
- [5] Burdzik R, Konieczny Ł, Deuszkiewicz P, Vaskova I. Application of time-frequency method for research on influence of locomotive wheel slip on vibration. *Journal of Vibroengineering* 2018;20:2998–3008. <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20450>.
- [6] Cempel C. Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej; 1985.
- [7] Chen Z-S, Rhee SH, Liu G-L. Empirical mode decomposition based on Fourier transform and band-pass filter. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 2019;11:939–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.04.004>.
- [8] Cheng G, Cheng Y, Shen L, Qiu J, Zhang S. Gear fault identification based on Hilbert–Huang transform and SOM neural network. *Measurement* 2013;46:1137–1146. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10.026>.
- [9] Clemente-Alarcon V, Antonino-Daviu JA, Riera-Guasp M, Puche-Panadero R, Escobar L. Application of the Wigner–Ville distribution for the detection of rotor asymmetries and eccentricity through high-order harmonics. *Electric Power Systems Research* 2012;91:28–36. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.05.001>.
- [10] Fedotenkova M, Hutt A. Research report: Comparison of different time-frequency representations. INRIA. Nancy: 2014.
- [11] Górecki K, Szmajda M, Zygarlicki J, Zygarlicka M, Mroczka J. Zaawansowane metody analiz w pomiarach jakości energii elektrycznej. *Pomiary Automatyka Kontrola* 2011;57:284–286.
- [12] Haan JM De. METHODS FOR TIME-FREQUENCY ANALYSIS. University of Karlskrona, 1998.
- [13] Hartono D, Halim D, Widodo A, Roberts G. Bevel Gearbox Fault Diagnosis using Vibration Measurements. *MATEC Web of Conferences* 2016;59:06002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165906002>.

- [14] Jaworek K, Kownacki C, Pauk J. Transformata falkowa - nowoczesne narzędzie do analizy sygnałów pomiarowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej Budowa i Eksploatacja Maszyn* 2001;199–212.
- [15] Jin X. Key problems faced in high-speed train operation. *Journal of Zhejiang University Science A* 2014;15:936–945. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400338>.
- [16] Katunin A. Damage Identification and Quantification in Beams Using Wigner-Ville Distribution. *Sensors* 2020;20:6638. <https://doi.org/10.3390/s20226638>.
- [17] Kim BS, Lee SH, Lee MG, Ni J, Song JY, Lee CW. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. *Journal of Materials Processing Technology* 2007;187–188:30–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.222>.
- [18] Klemiato M. *Przetwarzanie Sygnałów - Materiały dydaktyczne studiów podyplomowych AGH - Automatyka i Robotyka*. Kraków: 2021.
- [19] Komorski P, Szymański GM, Nowakowski T, Orczyk M, Awrejcewicz J. Advanced acoustic signal analysis used for wheel-flat detection. *Latin American Journal of Solids and Structures* 2021;18:1–14. <https://doi.org/10.1590/1679-78256086>.
- [20] Laval X, Mailhes C, Martin N, Bellemain P, Pachaud C. Amplitude and phase interaction in Hilbert demodulation of vibration signals: Natural gear wear modeling and time tracking for condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2021;150:107321. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107321>.
- [21] Li D, Wang Y, Yan W-J, Ren W-X. Acoustic emission wave classification for rail crack monitoring based on synchrosqueezed wavelet transform and multi-branch convolutional neural network. *Structural Health Monitoring* 2021;20:1563–1582. <https://doi.org/10.1177/1475921720922797>.
- [22] Manhertz G, Bereczky A. STFT spectrogram based hybrid evaluation method for rotating machine transient vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2021;154:107583. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107583>.
- [23] Newland DE. *Practical Signal Analysis: Do Wavelets Make Any Difference? Volume 1A: 16th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, American Society of Mechanical Engineers; 1997.* <https://doi.org/10.1115/DETC97/VIB-4135>.
- [24] Osadchiy A, Kamenev A, Saharov V, Chernyi S. Signal Processing Algorithm Based on Discrete Wavelet Transform. *Designs* 2021;5:41. <https://doi.org/10.3390/designs5030041>.
- [25] Padovese LR. Hybrid time–frequency methods for non-stationary mechanical signal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2004;18:1047–1064. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2003.12.003>.
- [26] Peng D, Liu Z, Wang H, Qin Y, Jia L. A Novel Deeper One-Dimensional CNN With Residual Learning for Fault Diagnosis of Wheelset Bearings in High-Speed Trains. *IEEE Access* 2019;7:10278–10293. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888842>.
- [27] Peng ZK, Tse PW, Chu FL. A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2005;19:974–988. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.01.006>.
- [28] Plucińska A, Pluciński E. *Probabilistyka. Statystyka matematyczna Procesy stochastyczne Rachunek prawdopodobieństwa*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2021.
- [29] Polyshchuk V V., Choy FK, Braun MJ. Gear Fault Detection with Time-Frequency Based Parameter NP4. *International Journal of Rotating Machinery* 2002;8:57–70. <https://doi.org/10.1155/S1023621X02000064>.
- [30] Rizvi SHM, Abbas M. An advanced Wigner–Ville time–frequency analysis of Lamb wave signals based upon an autoregressive model for efficient damage inspection. *Measurement Science and Technology* 2021;32:095601. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abef3c>.
- [31] Safizadeh MS, Lakis AA, Thomas M. Using Short-Time Fourier Transform in Machinery Diagnosis. *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Electronic, Signal Processing and Control, Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS); 2007.*
- [32] Sandsten M. *Time-Frequency Analysis of Time-Varying Signals and Non-Stationary Processes. An Introduction*. Lund University; 2020.
- [33] Song Y, Liang L, Du Y, Sun B. Railway Polygonized Wheel Detection Based on Numerical Time-Frequency Analysis of Axle-Box Acceleration. *Applied Sciences* 2020;10:1613. <https://doi.org/10.3390/app10051613>.
- [34] Strackeljan J, Lahdelma S. *Smart Adaptive Monitoring and Diagnostic Systems. 2nd International Seminar on Maintenance, Condition Monitoring and Diagnostics, Oulu, Finland: 2005.*
- [35] Szmajda M, Górecki K, Mroczka J. Gabor Transform, SPWVD, Gabor-Wigner Transform and Wavelet Transform - Tools for Power Quality monitoring. *Metrology and Measurement Systems* 2010;17:383–396.

- [36] Szymański GM, Misztal A, Misztal W. Zastosowanie krótkoczasowej analizy częstotliwościowej do wyznaczenia częstotliwości wymuszeń odrzutowego silnika lotniczego na stanowisku badawczym. *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 2017;18:1328–1332.
- [37] Tatara T, Kożuch B. Analiza propagacji drgań wywołanych przejazdami pociągów z zastosowaniem FFT i STFT. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie* 2016;109:177–189.
- [38] Vu V-H, Thomas M, Lakis AA, Marcouiller L. Short-Time Autoregressive (STAR) Modeling for Operational Modal Analysis of Non-stationary Vibration. *Vibration and Structural Acoustics Analysis*, Dordrecht: Springer Netherlands; 2011, p. 59–77. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1703-9_3.
- [39] Wójcik A, Pankanin G. Zastosowanie transformaty Hilberta-Huanga do przetwarzania sygnału z przepływomierza wirowego. *Przegląd Elektrotechniczny* 2012;88:37–45.
- [40] Wu J-D, Huang C-K. An engine fault diagnosis system using intake manifold pressure signal and Wigner–Ville distribution technique. *Expert Systems with Applications* 2011;38:536–544. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.099>.
- [41] Zhu Q, Wang Y, Shen G. Research and comparison of time-frequency techniques for nonstationary signals. *Journal of Computers* 2012;7:954–958. <https://doi.org/10.4304/jcp.7.4.954-958>