



**Politechnika  
Śląska**

**DYSCYPLINA NAUKOWA  
INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I  
TRANSPORT**

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

**mgr inż. Paweł Słowiński**

**Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie  
sygnałów wibroakustycznych**

**Identification of a moving vehicle on the basis  
of vibroacoustic signals**

Promotor  
dr hab. inż. Rafał Burdzik, prof. PŚ

Promotor pomocniczy  
dr inż. Adam Mańka

Katowice 2023

## Spis treści

<b>STRESZCZENIE</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>SPIS ZASTOSOWANYCH OZNACZEŃ</b> .....	6
<b>WSTĘP</b> .....	8
<b>ROZDZIAŁ 1. Metody identyfikacji pojazdów w ruchu</b> .....	9
1.1 Metody identyfikacji pojazdów w ruchu w transporcie drogowym .....	9
1.2 Metody identyfikacji pojazdów w ruchu w transporcie szynowym .....	18
<b>ROZDZIAŁ 2. Analiza mechanizmów generowania hałasu i drgań przez poruszający się pojazd szynowy</b> .33	
2.1 Analiza hałasu generowanego przez składy kolejowe .....	33
2.2 Analiza drgań generowanych przez składy kolejowe .....	42
2.3 Zastosowanie sygnałów wibroakustycznych w transporcie .....	50
2.4 Podsumowanie podrozdziału – wskazanie czynników wpływających na drgania i hałas poruszających się pojazdów szynowych .....	60
<b>Rozdział 3 Transport kolejowy- specyfikacja techniczna</b> .....	63
3.1 Infrastruktura kolejowa .....	65
3.2 Suprastruktura transportu kolejowego w aspekcie podziału pociągów towarowych .....	69
3.3 Suprastruktura transportu kolejowego – podział pociągów pasażerskich .....	72
3.4 Suprastruktura transportu kolejowego - podział lokomotyw .....	75
<b>Rozdział 4. Problem badawczy, cel, teza i zakres pracy.</b> .....	77
<b>Rozdział 5. Metoda badań, założenia i plan badań</b> .....	78
5.1 Uzasadnienie metody badań .....	78
5.2 Założenia metody badawczej .....	80
5.3 Plan badań .....	81
5.4 System pomiarowy – założenia i dobór docelowych elementów systemu .....	85
5.5 System pomiarowy – konfiguracja finalna .....	91
<b>Rozdział 6. Przykładowe wyniki badań</b> .....	95
<b>Rozdział 7. Wpływ efektu dopplera na prowadzone badania</b> .....	103
<b>Rozdział 8. Koncepcja metody identyfikacji i klasyfikacji poruszających się pojazdów szynowych</b> .....	109
8.1.1 Realizacja metody identyfikacji- analiza wyników .....	110
8.1.2 Zarejestrowane sygnały .....	111
8.2 Okna sygnału przejazdowego .....	112
8.3 Analiza estymatorów sygnałów drganiowych i ciśnienia akustycznego .....	120
8.4 Analiza falkowa metoda modwt .....	126
8.5 Wyniki analizy falkowej metodą modwt .....	131
8.5.1 Wyniki analizy falkowej metodą modwt- przy użyciu falki typu coiflet (coif) .....	131

8.5.2 Wyniki analizy falkowej metodą modwt- przy użyciu falki typu feyer- korokvin (fk) .....	142
8.6 Wyznaczenie warunków charakterystycznych poziomów częstotliwości dla pojazdów szynowych na podstawie energii relatywnej uzyskanej z analizy modwT .....	154
8.7 Koncepcja metody identyfikacji pojazdów szynowych .....	157
8.8 Walidacja metody.....	159
9. Podsumowanie i wnioski .....	163
Spis ilustracji.....	166
Spis tabel .....	170
Bibliografia .....	174

## STRESZCZENIE

W rozprawie przedstawiono nowatorską metodę rozpoznawania typu poruszającego się pojazdu szynowego. Przebieg badań składa się z następujących etapów: rejestracja sygnałów wibroakustycznych, normalizacja sygnałów, wstępna analiza statystyczna, dobór falek analizy WT (Wavelet Transform), analiza MODWT (Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform), kompletowanie bazy danych z informacjami o energii relatywnej sygnału, zestawienie wyników i wyznaczeniu cech odróżniających pojazdy szynowe pod względem pojemności informacyjnej sygnału wibroakustycznego, ostateczna klasyfikacja rodzaju pojazdu.

Proces pomiarowy polega na rejestracji sygnałów drganiowych szyny w trzech ortogonalnych osiach oraz synchroniczny pomiar ciśnienia akustycznego. Na etapie przetwarzania sygnałów zastosowano wstępną analizę globalnych miar statystycznych oraz analizę falkową opartą na MODWT. Po doborze odpowiedniej falki i wykonaniu analizy MODWT, wyznaczano miary relatywnej energii sygnałów w podziale na wcześniej zdefiniowane poziomy dekompozycji. Opracowana metoda umożliwia wstępne rozpoznanie typu pojazdu szynowego oraz wyznaczenie charakterystycznych cech sygnału wibroakustycznego. Może być stosowana w celu wspomagania identyfikacji pojazdów metodą wibroakustyczną, a także do analizy różnych typów pojazdów. Aktualny stan badań umożliwia klasyfikację do następujących grup pojazdów szynowych: pociągi pasażerskie (P), pociągi towarowe (T), elektryczne zespoły trakcyjne (E) oraz lokomotywy/drezyny poruszające się „solo” (L).

W rozdziale pierwszym rozprawy przedstawiono metody identyfikacji pojazdów w ruchu, które następnie podzielono na transport drogowy oraz szynowy. Przedstawiono w nim istniejące systemy identyfikacji oparte na drganiach i hałasie. Rozdział drugi przedstawia analizę mechanizmów generowania przez pojazdy szynowe sygnałów wibroakustycznych, przedstawiono czynniki wpływające na drgania i hałas poruszających się składów kolejowych. Rozdział trzeci przybliży tematykę suprastruktury w transporcie kolejowym. Rozdział czwarty i piąty ma na celu przedstawienie pozycjonowania badań własnych pracy, celu, tezy, zakresu oraz postawionych hipotez badawczych. Rozdział szósty opisuje metodę badawczą, jej założenia oraz plan badań. Rozdział siódmy wprowadza w tematykę pomiarową, w którym przedstawione są przykładowe wyniki pomiarów drgań i ciśnienia akustycznego. Rozdział ósmy jest próbą analizy efektu Dopplera na prowadzone pomiary. Rozdział dziewiąty przedstawia prezentację wyników przeprowadzonych pomiarów jak również przedstawiono algorytm postępowania w celu opracowania metody i jego weryfikacji. Rozdział dziesiąty natomiast jest podsumowaniem rozprawy.

**SŁOWA KLUCZOWE: TRANSPORT, IDENTYFIKACJA, WIBROAKUSTYKA.**



## ABSTRACT

The dissertation presents a novel method for recognizing the type of a moving rail vehicle. The course of research consists of the following stages: registration of vibroacoustic signals, normalization of signals, preliminary statistical analysis, selection of wavelets of WT (Wavelet Transform) analysis, MODWT (Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform) analysis, completing the database with information about the relative energy of the signal, compilation of results and determination of features that distinguish rail vehicles in terms of the information capacity of the vibroacoustic signal, final classification of the type of vehicle.

The measurement process consists of recording vibration signals of the rail in three orthogonal axes and synchronous measurement of sound pressure. At the signal processing stage, a preliminary analysis of global statistical measures and wavelet analysis based on MODWT were applied. After selecting the appropriate wavelet and performing MODWT analysis, measures of relative energy of signals were determined by predefined decomposition levels.

The developed method makes it possible to initially identify the type of rail vehicle and determine the characteristic features of the vibroacoustic signal. It can be used to support the identification of vehicles by vibroacoustic methods, as well as for the analysis of various types of vehicles. The current state of research makes it possible to classify into the following groups of rail vehicles: passenger trains (P), freight trains (T), electric multiple units (E) and locomotives/trucks running "solo" (L).

Chapter one of the dissertation presents methods for identifying vehicles in motion, which are further divided into road and rail transportation. It presents existing identification systems based on vibration and noise. Chapter two presents an analysis of the mechanisms by which rail vehicles generate vibroacoustic signals, and the factors affecting the vibration and noise of moving railroad depots are presented. The third chapter introduces the topic of suprastructure in rail transportation. The fourth and fifth chapters are intended to present the positioning of the work's own research, the purpose, thesis, scope, and research hypotheses set. Chapter six describes the research method, its assumptions, and the research plan. The seventh chapter introduces the measurement topic, in which sample results of vibration and sound pressure measurements are presented. Chapter eight is an attempt to analyze the Doppler effect on the measurements carried out. The ninth chapter presents a presentation of the results of the measurements carried out as well as an algorithm for proceeding with the development of the method and its verification. Chapter ten, on the other hand, is a summary of the dissertation.

**KEYWORDS:** TRANSPORTATION, IDENTIFICATION, VIBROACOUSTICS.

## SPIS ZASTOSOWANYCH OZNACZEŃ

(E, P, T, L) - kategorie składów kolejowych: Elektryczne Zespoły Trakcyjne (E), Pasażerskie (P), Towarowe (T), Lokomotywy/solo (L).

(TN, TM, TOP, TZ, TKW, TB, TK) – rodzaje pociągów

ANPR- system rozpoznawania tablic rejestracyjnych

CCA- connected component analysis

CNN- konwencjonalna sieć neuronowa

Coif - falka Coiflet

DB - falka Daubechiesia

EC – skład kolejowy typu EuroCity,

EI – skład kolejowy typu InterCity Express,

EN – skład kolejowy typu EuroNight

EVN- European Vehicle Number

EX – skład kolejowy typu ekspresowy

EZT- Elektryczny Zespół Trakcyjny

FFT- Szybka transformacja Fouriera

Fk - falka Fejera-Korovkina

FPID- Ferrite Position Identification

GPRS- General Packet Radio Service

GPS- Global Positioning System

IBA- Improved Bernsen Algorithm

ICE- Intercity Express

IPS-System Identyfikacji Pojazdu Szynowego

ITS- Inteligentne systemy transportowe

KDP- Kolej Dużych Prędkości

MDCA- multiple-criteria decision analysis

MM – skład kolejowy typu międzynarodowy pospieszny

MODWT- Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform

MP – skład kolejowy typu międzywojewódzki pospieszny

P2P- Największy chwilowy poziom drgań

PLK- Polskie Linie Kolejowe

QR- alfanumeryczny, dwuwymiarowy, matrycowy, kwadratowy kod graficzny  
RFID- technologia radiowych identyfikatorów  
RMS- średnia kwadratowa  
RO – skład kolejowy typu wojewódzki krajowy osobowy  
RP – skład kolejowy typu wojewódzki krajowy pospieszny  
S&C- Switches and Crossing  
SBM (Sub Ballast Mats).  
STFT- Short-time Fourier transform  
STM (Slab Track Mats)  
SYM - falka Symlet  
TEN-T- Transeuropejska sieć transportowa  
TIR- potoczny skrót od ciągnika siodłowego z naczepą  
TIS- Systemu Identyfikacji Pociągu  
UIC-Union Internationale des Chemins  
USB- Universal Serial Bus  
UTK- Urząd transportu kolejowego  
WIM- system ważenia pojazdów w ruchu  
WODL- współczynnik percepcji wibracji przez człowieka  
WPT- Wireless Power Transfer  
WSA- Analizatora Sygnałów Wibroakustycznych  
WT- Wavelet Transform

## WSTĘP

Temat identyfikacji poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych jest istotny i aktualny w obszarach nauki i technologii. W dzisiejszych czasach coraz większą wagę przykładają się do rozwoju systemów bezpieczeństwa, zwłaszcza tych, które zapobiegają wypadkom w transporcie. W tym kontekście identyfikacja pojazdów przy użyciu sygnałów wibroakustycznych staje się coraz bardziej pożądana, ze względu na jej potencjał w dziedzinie ruchu kolejowego i zasad jego monitorowania.

Identyfikacja pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych jest wyzwaniem naukowym, ponieważ sygnały te są złożone i zmienne w czasie. Istniejące metody identyfikacji pojazdów są ograniczone do konkretnych sytuacji i mają wiele wad, takich jak złożoność obliczeniowa czy wysoka cena urządzeń pomiarowych lub konieczność użycia skomplikowanych klasyfikatorów. Jednocześnie temat ten ma potencjał aplikacyjny, a jego rozwój może przynieść szereg korzyści w wielu obszarach, takich jak bezpieczeństwo dróg i szlaków kolejowych, monitorowanie ruchu czy optymalizacja procesów transportowych. Wraz z rozwojem technologii identyfikacja pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych staje się coraz bardziej realna i praktyczna.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie oraz ocena nowych metod i algorytmów identyfikacji poruszających się pojazdów opartych na sygnałach wibroakustycznych, a także ocena ich działania w różnych warunkach i scenariuszach. Osiągnięto to poprzez opracowanie metody identyfikacji rodzaju przejeżdżającego pojazdu szynowego przy wykorzystaniu sygnałów drganiowych i akustycznych.

Analiza sygnałów w celu opracowania metody identyfikacji pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych, które zostały przedstawione w pracy, to analiza falkowa, filtracja i klasyfikacja sygnałów poprzez zastosowanie autorskiego algorytmu. Omówione zostaną również wyniki badań eksperymentalnych, w których zastosowano różne techniki przetwarzania sygnałów wibroakustycznych do identyfikacji różnych typów taboru kolejowego, takich jak lokomotywy, wagony i pociągi pasażerskie. Zaprezentowano metodykę opartą na analizie MODWT (Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform).




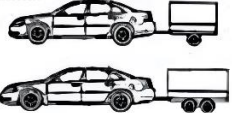
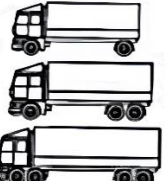
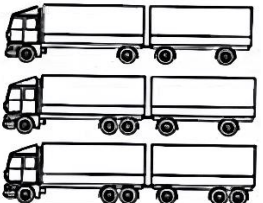
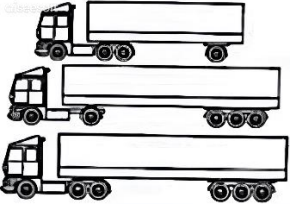

# ROZDZIAŁ 1. METODY IDENTYFIKACJI POJAZDÓW W RUCHU

## 1.1 METODY IDENTYFIKACJI POJAZDÓW W RUCHU W TRANSPORCIE DROGOWYM

W transporcie drogowym stosuje się różne metody identyfikacji pojazdów w ruchu, umożliwiające skuteczne monitorowanie i kontrolowanie ruchu pojazdów. W rozdziale tym przedstawiono kilka najważniejszych z nich.

Na wstępie, w celu dalszej analizy należy przyjąć podział na tzw. klasy pojazdów według specyfikacji Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

*Tabela 1 Klasy pojazdów. Źródło: PFU GDDIK.*

Kod	Sylwetka	Przyporządkowana klasa podstawowa
6		Pojazdy nieklasyfikowane
10		Motocykle
7		Samochody osobowe
11		Samochody dostawcze do 3,5 t
2		Samochody osobowe z przyczepami
3		Samochody ciężarowe (jednoczłonowe)
8		Samochody ciężarowe z przyczepami
9		Samochody ciężarowe z naczepami
5		autobusy

Klasy przedstawione na rysunku 1 usprawniają kategoryzację pojazdów w celu ich dalszej identyfikacji.

Najprostszą i najczęściej stosowaną metodą identyfikacji pojazdów w ruchu jest analiza tablic rejestracyjnych. Nie wymaga ona co prawda korzystania z klasyfikacji pojazdów, natomiast zaimplementowanie bazy z typami przydzielonymi do numeru rejestracyjnego zwiększa prawdopodobieństwo identyfikacji. Ta metoda polega na odczytywaniu numeru z tablicy rejestracyjnej pojazdu za pomocą kamer umieszczonych na drodze lub na fotoradarach. Należy do systemów rozpoznawania tablic rejestracyjnych (ANPR lub ANPRS - Automatic Number Plate Recognition System) – są to systemy oparte na technologii rozpoznawania znaków i umożliwiające automatyczne odczytywanie numerów rejestracyjnych pojazdów. Dzięki nim można dokładnie określić, kiedy i którędy pojazd się poruszał.

Kontrola ruchu drogowego i identyfikacja właścicieli pojazdów stała się ważną potrzebą każdego współczesnego kraju. Systemy ANPR stosowane są zwłaszcza w miejscach, w których należy zachować szczególną ostrożność związaną z ruchem na drodze lub w których konieczne jest monitorowanie prędkości pojazdu. Stosowanie zautomatyzowanych metod identyfikacji pojazdów na podstawie numerów rejestracyjnych jest pomocne zwłaszcza dla funkcjonariuszy ruchu drogowego, którzy mogą nie zdążyć zarejestrować numerów poruszającego się pojazdu z powodu jego prędkości. Automatyczne rozpoznawanie tablic rejestracyjnych (ANPR) jest stosowane jako jedno z rozwiązań tego problemu. Minusem takiego rozwiązania jest brak możliwości identyfikacji typu pojazdu, jeżeli nie znajduje się on w bazie danych przypisującej numer do typu pojazdu.

Obecnie dostępnych jest wiele systemów ANPR, opartych na zróżnicowanych metodologiach. Zaprojektowanie takiego systemu to wymagające zadanie ze względu na wiele czynników, takich jak wysoka prędkość pojazdu, niejednolite tablice rejestracyjne pojazdów, użycie różnych alfabetów i czcionek, a nawet warunki oświetleniowe. Wszystko to może wpływać na ogólny wskaźnik rozpoznawania przez system. Większość systemów działa pomimo tych ograniczeń, czego efektem są już zaimplementowane rozwiązania [105]. Przykład zaimplementowanego rozwiązania na rysunku 1.



*Rysunek 1. System ANPR polskiego producenta zamontowany na szlabanie drogowym w celu identyfikacji pojazdów. Źródło: [www.szymkowiak.pl](http://www.szymkowiak.pl).*

Rozwój dróg szybkiego ruchu i autostrad oraz rosnąca liczba poruszających się po drogach pojazdów wymusza zainteresowanie władz aglomeracji zastosowaniem najnowszych, najefektywniejszych i precyzyjnych systemów typu ITS – inteligentny system transportowy. Systemy te, dają możliwość zaimplementowania ulepszonych systemów typu ANPR. Proces identyfikacji poszczególnych obiektów przez system odgrywa kluczową rolę w dziedzinie wizji komputerowej lub cyfrowego przetwarzania obrazu.

Proces rozpoznawania tablic rejestracyjnych pojazdów (ANPR) jest trudny także ze względu na różnice w kształcie, kolorze, wielu formatach i niejednorodnych warunkach oświetlenia podczas pozyskiwania obrazów. W artykule [110] przedstawiono efektywny model ANPR oparty na głębokim uczeniu, wykorzystujący optymalną segmentację opartą na klastrach K oraz rozpoznawanie oparte na konwencjonalnej sieci neuronowej (CNN), zwany modelem OKM-CNN. Zaproponowany model OKM-CNN działa na trzech głównych poziomach, a mianowicie:

- wykrywanie tablic rejestracyjnych (LP),
- segmentacja przy użyciu (OKM) techniki klastrowania,
- rozpoznawanie numeru tablicy rejestracyjnej przy użyciu modelu CNN.

Do wykrywania i lokalizacji zastosowano model Improved Bernsen Algorithm (IBA) oraz connected component analysis (CCA). Szerokie badanie eksperymentalne odbywa się przy użyciu trzech zbiorów danych, a mianowicie Stanford Cars, FZU Cars i HumAIn 2019 Challenge dataset.

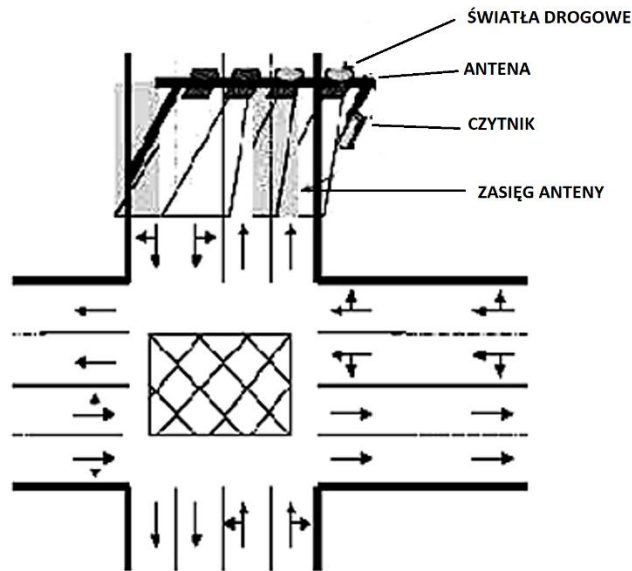
Wynik symulacji potwierdził dużą wydajność modelu OKM-CNN w stosunku do porównywanych metod.

System rozpoznawania wzorców to zaawansowana technologia, która pozwala na identyfikację pojazdów na podstawie ich unikalnych cech. System ten analizuje kształt, rozmiar, markę i kolor pojazdu, aby ustalić jego tożsamość. Systemy optyczne są dobrym rozwiązaniem do obserwacji i zarządzania ruchem. Wymagania dotyczące funkcjonowania w czasie rzeczywistym mogą zostać spełnione poprzez wdrożenie odpowiednich algorytmów przetwarzania obrazu. Jednym z najważniejszych zastosowań czujników optycznych jest wizyjna detekcja pojazdów i rozpoznawanie kształtów w celu zbierania informacji o zatłoczeniu dróg. Stosuje się to do wspomagania kierowców oraz do planowania przyszłego rozwoju sieci drogowej. Systemy tego typu stanowią rozwinięcie systemów ITS. Umożliwiają m.in. poprawę bezpieczeństwa, prowadzenie statystyki liczby wypadków drogowych czy zwiększenie kontroli nad stale rosnącym ruchem na drogach. Możliwość wykorzystywania zaawansowanych technologii komputerowych przyniosła ogromny postęp w badaniach nad systemami wizyjnymi usprawniającymi działanie systemów ITS.

Algorytmy detekcji pojazdów muszą przetwarzać pozyskane obrazy w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego [64, 124]. Przeszukiwanie całości obrazu w celu zlokalizowania potencjalnych pozycji pojazdów jest procesem trudnym i złożonym, wymagającym sporych zasobów obliczeniowych. Najczęściej wykorzystuje się do tego wykrywanie i rozpoznawanie kształtu pojazdów z wykorzystaniem logiki rozmytej, dopasowanie konturów, fuzję czujników, maszyny wektorów wsparcia, rozkład prawdopodobieństwa, ukryty model Markowa, operacje morfologiczne oraz automatyczną ekstrakcję dróg [93]. Systemy identyfikacji kierowców umożliwiają rozpoznanie osoby, która prowadzi pojazd w danym momencie. W systemach tych wykorzystuje się m.in. rozpoznawanie twarzy, skanowanie linii papilarnych czy rozpoznawanie głosu. Nie mogą być one jednak traktowane jako alternatywa do identyfikacji pojazdów, lecz wsparcie tych systemów, gdy pojazd jest przypisany do właściciela.

Systemy identyfikacji radiowej (RFID) to systemy wykorzystujące fale radiowe do bezkontaktowej identyfikacji pojazdów w ruchu. Systemy RFID do działania wymagają tagów umieszczanych na pojeździe oraz czytników ustawianych w pobliżu drogi. Pojazd zostaje zidentyfikowany, gdy przekracza pole czytnika RFID. Dogłębniej temat ten rozwinięto w podrozdziale 1.2 niniejszej rozprawy. Na rysunku 2 przedstawiono przykład implementacji takiego systemu w infrastrukturze drogowej:





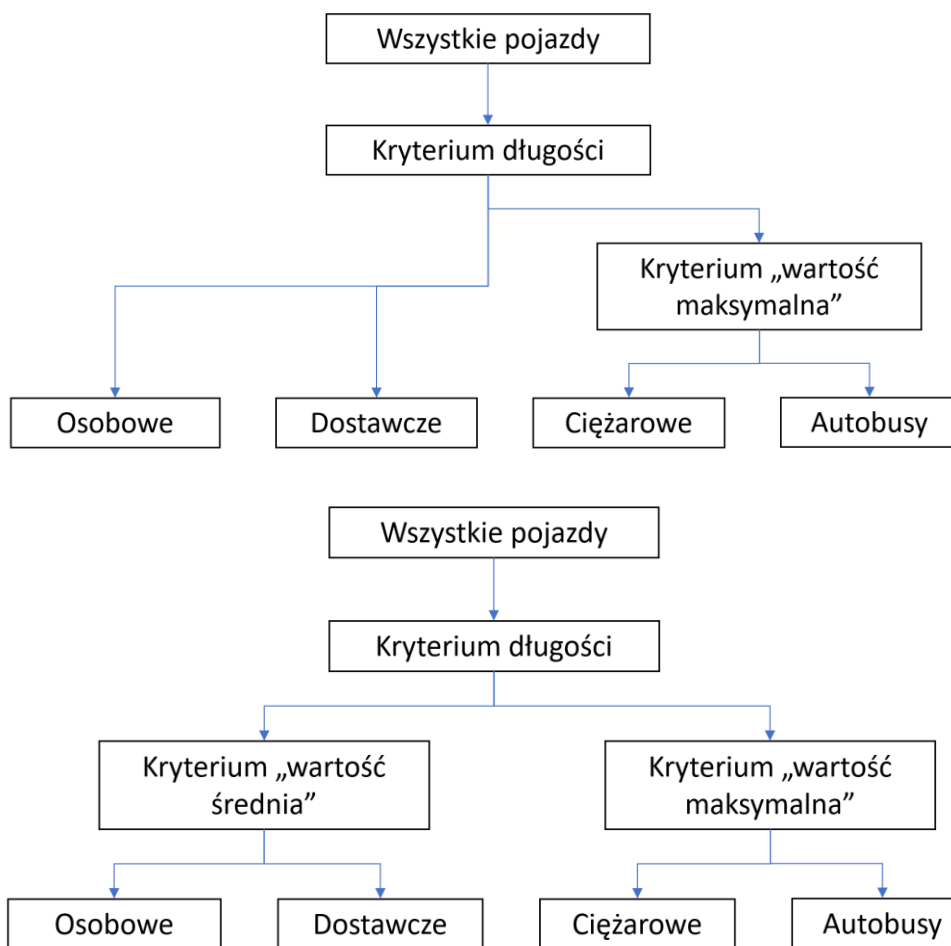
Rysunek 2. Instalacja urządzeń systemu RFID na skrzyżowaniu drogowym. Źródło: [59].

Główne obszary zastosowań systemu RFID:

- elektroniczny pobór opłat za przejazd autostradą,
- inteligentny system zarządzania parkowaniem i bezpieczeństwem,
- system elektronicznej tablicy rejestracyjnej,
- inteligentny system zarządzania ruchem drogowym,
- transport publiczny, w tym e-bilet,
- system ważenia elektronicznego,
- śledzenie zaginionych i skradzionych pojazdów.

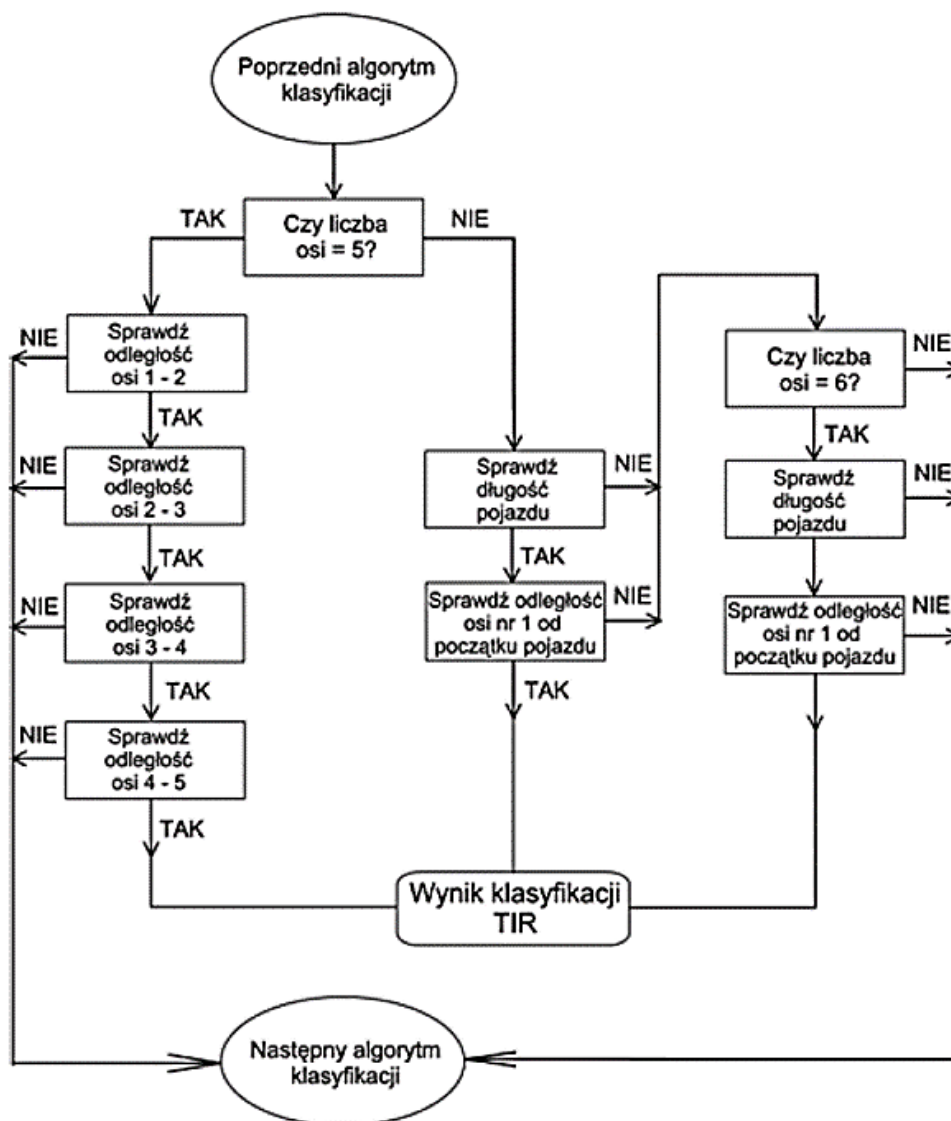
Na drogach, po których poruszają się pojazdy nie tylko samochodowe i ciężarowe, ale także autokary i autobusy, dobrze funkcjonują klasyfikatory oparte np. na liczbach osi czy długości pojazdu. Przykładem takiego zastosowania jest algorytm zaprezentowany w [20, 53, 54].

Na rysunku 3. przedstawione są kryteria oparte na dwóch klasyfikatorach. Pierwszy opiera się na długości pojazdu – na tej podstawie następuje przydział do jednej z czterech grup: pojazdów osobowych, dostawczych, ciężarowych oraz autobusów. Drugim typem jest rozbudowana wersja pierwszego o klasyfikację ze względu na liczbę osi. W opisanym przypadku dotyczy ona ciągnika siodłowego z naczepą, przez autorów nazwanego potocznie TIR.



Rysunek 3 Przykładowe schematy procesu klasyfikacji hierarchicznej pojazdów. Źródło: [53]

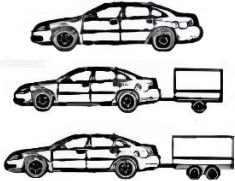

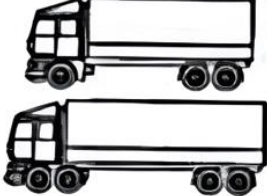
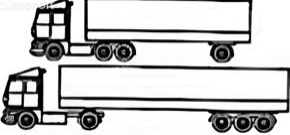
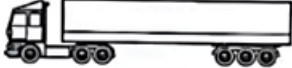
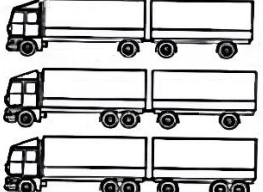
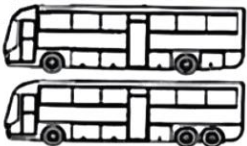
W przypadku dopasowania liczby osi wynikiem klasyfikacji jest „TIR”, gdy nie ma dopasowania, następuje dobór kolejnego algorytmu- rysunek 4. Taki system jest możliwy do wykorzystania przez sztuczną inteligencję, która, wyuczona poprzez odpowiednie algorytmy, może dać poprawne wyniki analizy.



Rysunek 4. Algorytm klasyfikacji pojazdów samochodowych do klasy pojazdów ciężarowych typu TIR. Źródło [54].

Coraz częściej w Polsce stosuje się system identyfikacji pojazdów w ruchu oparty na wadze preselekcyjnej. Do stosowania wagi preselekcyjnej konieczne jest zastosowanie podziału na typy oraz kategorie pojazdów- tabela 2.

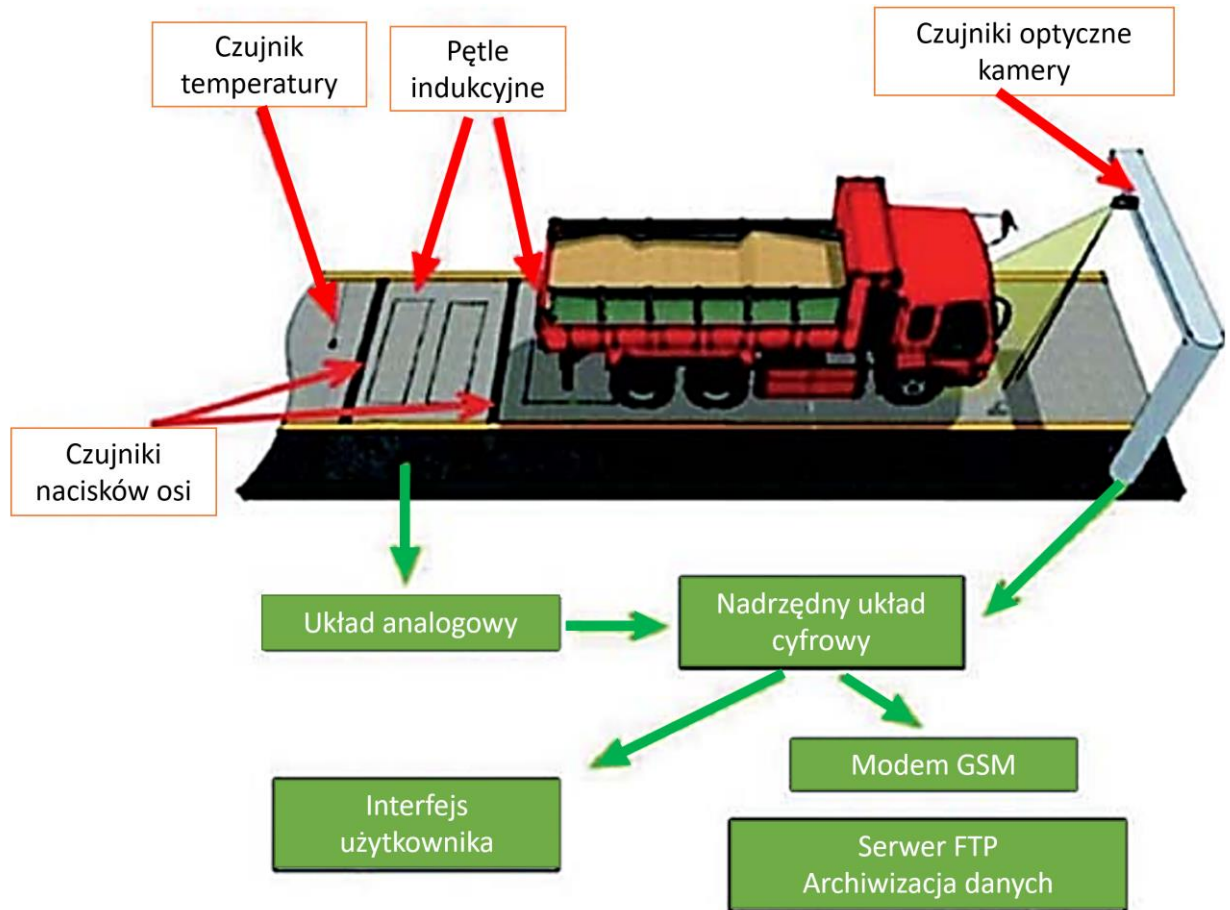
Tabela 2 Kategorie pojazdów. Źródło: COST 323.

Kategoria	Sylwetka	Opis
1		Samochody osobowe, sam. Osobowe z lekkimi przyczepami i samochody dostawcze o masie <35kN
2		Samochody ciężarowe 2-osiowe
3		Samochody ciężarowe 3-osiowe Samochody ciężarowe 4-osiowe
4		Ciągniki siodłowe od trzech do sześciu osi (o maksymalnie dwóch osiach w grupie)
5		Ciągniki siodłowe od pięciu do siedmiu osi (o maksymalnie trzech osiach w grupie)
6		Samochody ciężarowe z przyczepami
7		Autobusy
8		Inne pojazdy

System ważenia preselekcyjnego lub precyzyjniej – ważenia pojazdów w ruchu (WIM), to według definicji zaproponowanej przez American Society for Testing and Materials „proces estymacji nacisków statystycznych na podstawie pomiarów dynamicznych nacisków kół pojazdu na podłoże, w sytuacji, gdy kontakt obiektu mierzonego z czujnikiem jest bardzo krótki”. Taki system składa się z dwóch części zamontowanych na torze pomiarowym:

- czujników pomiarowych z układami akwizycji danych rejestrujących sygnały poruszających się pojazdów (ciężarowych),
- oprogramowania przetwarzającego niniejsze dane oraz wykorzystującego algorytmy eksperckie.

Analiza danych uzyskanych na podstawie nacisków osi, masy całkowitej (przy pomocy pomostów ważących, prędkości czy liczbie osi – przy pomocy pętli indukcyjnych), wymiarów zewnętrznych pojazdu (przy pomocy pętli indukcyjnych oraz kamer) umożliwia klasyfikację według odpowiedniej kategorii pojazdu wprowadzonego wcześniej do bazy danych (rysunek 5).



Rysunek 5. Schemat poglądowy budowy i działania stacji WIM. Źródło: judico.co.kr na podstawie [98].

Każda z wyżej omówionych metod identyfikacji pojazdów w ruchu drogowym ma swoje zalety i wady, jednak wszystkie przyczyniają się do poprawy bezpieczeństwa na drogach, zwiększenia efektywności transportu oraz umożliwienia kontroli ruchu pojazdów, zwłaszcza w kontekście optymalizacji systemów ITS.

## 1.2 METODY IDENTYFIKACJI POJAZDÓW W RUCHU W TRANSPORCIE SZYNOWYM

Identyfikacja pojazdów szynowych jest zagadnieniem technicznym, które wymaga dogłębnego zrozumienia specyfiki działania i charakterystyk taboru kolejowego oraz wykorzystywanych technologii. Identyfikacja ta ma znaczenie dla bezpieczeństwa i efektywności funkcjonowania transportu kolejowego, a także dla zapewnienia prawidłowego utrzymania infrastruktury kolejowej.

W porównaniu do identyfikacji pojazdów drogowych, sposoby identyfikacji pojazdów szynowych nie są tak dogłębnie przeanalizowane. Zrozumienie zasad ich funkcjonowania wymaga specjalistycznej i szerokiej wiedzy, na przykład na temat specyfiki systemów sygnalizacyjnych i sterowania ruchem kolejowym, a także złożonych systemów diagnostycznych wykorzystywanych w pojazdach szynowych.

Ponadto, identyfikacja pojazdów szynowych odbywa się w warunkach o innej charakterystyce niż w przypadku identyfikacji pojazdów drogowych i wymaga innego podejścia do zagadnienia. Dla przykładu, systemy identyfikacji pojazdów szynowych muszą działać w warunkach KDP (Kolei Dużych Prędkości), czyli powyżej 250 km/h (według UIC-Union Internationale des Chemins).

Rozprawa doktorska na temat identyfikacji pojazdów szynowych w transporcie kolejowym jest uzasadniona, ponieważ praca nad nią wymaga dogłębnego zrozumienia zagadnień technicznych i specyfiki funkcjonowania systemów kolejowych. Przyczyni się ona do dalszego rozwoju wiedzy na temat identyfikacji pojazdów szynowych oraz jej efektywnego wykorzystania w transporcie kolejowym.

Systemy identyfikacji pojazdów szynowych stosowane w Polsce można podzielić ze względu na ich charakter i cel instalacji w obszarze skrajni kolejowej. W ostatnich latach znacznie rozwinięto technologię systemów opartych na inteligentnych mechanizmach (ITS – Intelligent Transport Systems oraz IIS – Intelligent Infrastructure System) [23]. Mechanizmy te, w ostatniej dekadzie stosowane licznie w transporcie drogowym także w Polsce, powoli odnoszą sukces również w obszarze kolejnictwa. Mogą pomóc w przyszłości rozwiązać problemy związane z integracją systemów, unifikacją oraz standaryzacją. Dzięki licznym modernizacjom oraz rozbudowie infrastruktury coraz częściej sięga się po nowoczesne rozwiązania z zakresu identyfikacji pojazdów szynowych. Dodatkowym aspektem skłaniającym do modernizacji są oczekiwania społeczeństwa dotycząca wzrostu bezpieczeństwa, niezawodności, punktualności oraz efektywnego wykorzystania infrastruktury.

Wykorzystanie nowoczesnych elementów zarządzania infrastrukturą kolejową powoduje, że zmniejsza się rola człowieka w zakresie sterowania oraz zarządzania przewozami [29, 63, 68, 137]. Coraz częściej pojawiają się scentralizowane jednostki, takie jak obszarowe centra sterowania ruchem kolejowym. Zauważalnie wzrosło zainteresowanie implementacją automatycznych systemów doradczych, stworzonych według przyjętych wcześniej algorytmów postępowania.

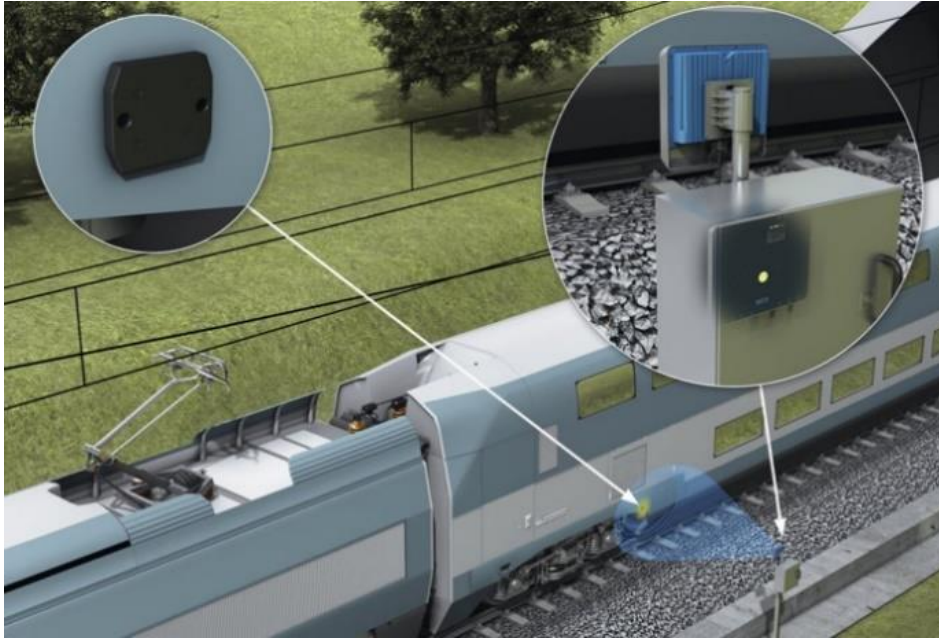
Bardzo ważnym aspektem z punktu widzenia zarządzania taborem jest pozyskiwanie i wymiana niezbędnych informacji w procesie optymalizacji procesów transportowych. Ważny jest czas, w którym informacja dotrze do odbiorcy oraz zostanie przetworzona i przeanalizowana [52, 149].

Powstawanie systemów identyfikacji pojazdów jest ważne także z punktu widzenia systemów informacji pasażerskiej. Coraz częściej wymaga się szczegółowych informacji o położeniu, kolejności pociągów na linii kolejowej, ilości oraz typie wagonu oraz np. lokalizacji drzwi w wagonach jako elementu taboru kolejowego. Systemy obecnie stosowane w sieci PKP PLK S.A. nie umożliwiają sprawnej identyfikacji poszczególnych składów kolejowych, co może powodować w pewnych niesprzyjających warunkach błędne komunikaty dla pasażerów.

Rzadziej stosowane, ale coraz częściej pojawiające się na polskich torach, są systemy oparte na identyfikacji taboru poprzez systemy wizyjne – dzięki metodom opartym na rozwiązaniach automatycznych oraz doświadczeniu z transportu drogowego, gdzie systemy ITS z powodzeniem stosowane są od wielu lat, możliwe było zaimplementowanie gotowych rozwiązań dla transportu kolejowego. Minusem takiego rozwiązania jest wciąż niedoskonałość odczytu w gorszych warunkach pogodowych, takich jak mgła, śnieg, a także nocna pora bez wystarczającego oświetlenia.

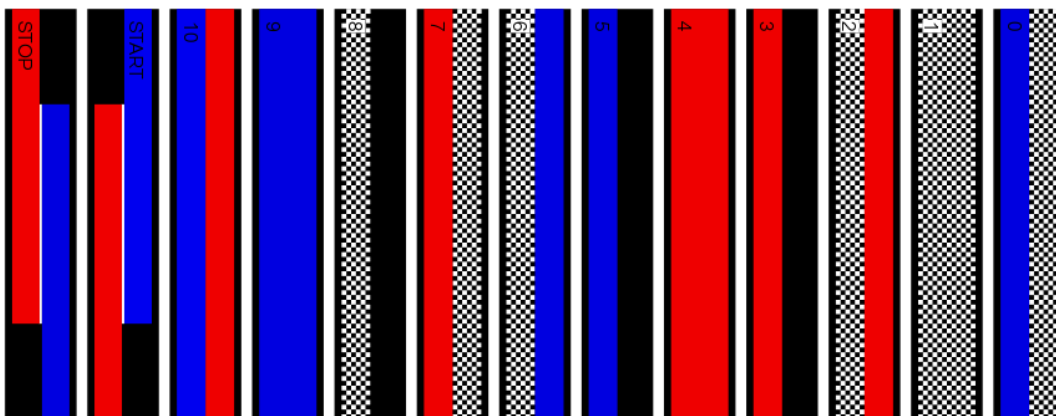
Sporadycznie stosuje się także systemy oparte na technologii RFID (Radio Frequency Identification) (rysunek 6). Wywodzą się one wprost z doświadczenia branży logistycznej, a znalazły zastosowanie także w transporcie kolejowym. Systemy radiowe, w przeciwieństwie do paskowych, mają przewagę ze względu na mniejszą wrażliwość na zakłócenia odczytu danych o taborze. Minusem jest wyższa cena zastosowania takich rozwiązań ze względu na konieczność umieszczania czipów na każdym wagonie i lokomotywie oraz stosowania odpowiednich bramownic odczytujących z nich dane. Plusem jest to, że mikroprocesory można w każdej chwili wymontować, dzięki czemu można to rozwiązanie zastosować tymczasowo.





Rysunek 6. Przykład implementacji systemu RFID RFU630 przez producenta SICK. Źródło: sick.com.

Czasem zamiennie lub dodatkowo z kodami RFID stosuje się kody paskowe/QR. Są tańszą i prostszą alternatywą, która umożliwia rozwinięcie identyfikacji poprzez obserwację wzrokową. Wadą kodów jest to, że są wrażliwe na zanieczyszczenia oraz zniszczenia farby z oznaczeniami kodowymi (rysunek 7).



Rysunek 7. Przykład niestosowanego już systemu kodowania KarTrak, który uznaje się za prekursora obecnie stosowanych systemów znakowania kodami kreskowymi. Projekt porzucony w latach 70. ze względu na problemy techniczne. Źródło: Ceros.com.

Metody oparte na identyfikacji taboru poprzez obserwację wzrokową i analizę dokumentów przewozowych stosuje się coraz rzadziej.

Zgodnie z Dz. U z 2020 r. poz. 1043 o transporcie kolejowym, przewoźnik kolejowy lub zarządca może realizować pracę przewozową jedynie pojazdami kolejowymi oznaczonymi



według systemu EVN (ang. European Vehicle Number), o ile prezes UTK nie wyraził zgody na oznakowania odrębne od EVN.

Na europejski numer pojazdu (EVN) składają się odpowiednio uszeregowane i umiejscowione cyfry i znaki, które określają:

- rodzaj taboru (1 cyfra),
- zdolność pojazdu do interoperacyjności (1 i 2 cyfra),
- państwo rejestracji pojazdu kolejowego (3 i 4 cyfra),
- charakterystykę techniczną pojazdu (cyfry 5-7 w przypadku pojazdów trakcyjnych, cyfry 5-8 dla pozostałych rodzajów taboru),
- numer seryjny (cyfry 8-11 w przypadku pojazdów trakcyjnych, cyfry 9-11 dla pozostałych rodzajów taboru),
- cyfrę kontrolną (12 cyfra).

Dodatkowo należy nadmienić, iż na oznaczenie literowe charakterystyki technicznej pojazdu kolejowego składają się [34]:

- w wagonach pasażerskich:
  - oznaczenie serii wagonu w postaci liter dużych i małych, określających rodzaj oraz przeznaczenie wagonu pasażerskiego,
  - oznaczenie liczby przedziałów w wagonie pasażerskim w postaci indeksu górnego, umiejscowionego bezpośrednio po ostatniej literze oznaczenia literowego serii wagonu pasażerskiego,
  - oznaczenie powinno być umieszczone na każdym wagonie pasażerskim z wyjątkiem wagonów restauracyjnych, pocztowych, bagażowych, bagażowo-pocztowych, specjalnego znaczenia (służbowych, socjalnych, salonowych, konferencyjnych, dyskotekowych, barowych, kinowych, wideo i do przewozu chorych) oraz wagonów do przewozu samochodów,
  - oznaczenie indeksu wagonu w postaci liter małych, określających szczegółowe cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne wagonu pasażerskiego,
- w wagonach towarowych:
  - oznaczenie serii wagonu w postaci liter dużych, określających kategorię wagonu towarowego,
  - oznaczenie indeksu wagonu w postaci liter małych, określających szczegółowe cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne wagonu towarowego.

94 51 2 130 297-6 PL-PREG

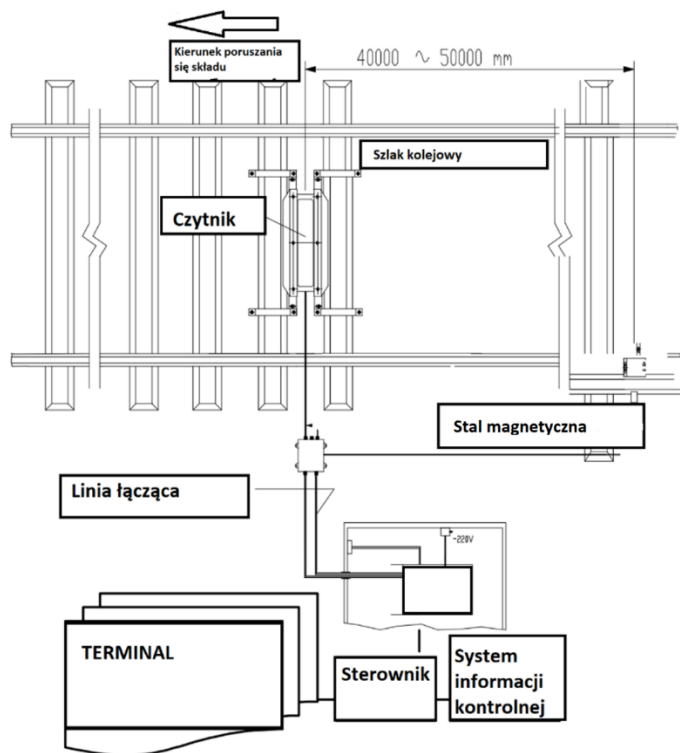
33 RIV

56 SK-AXBSK

5331 202-5

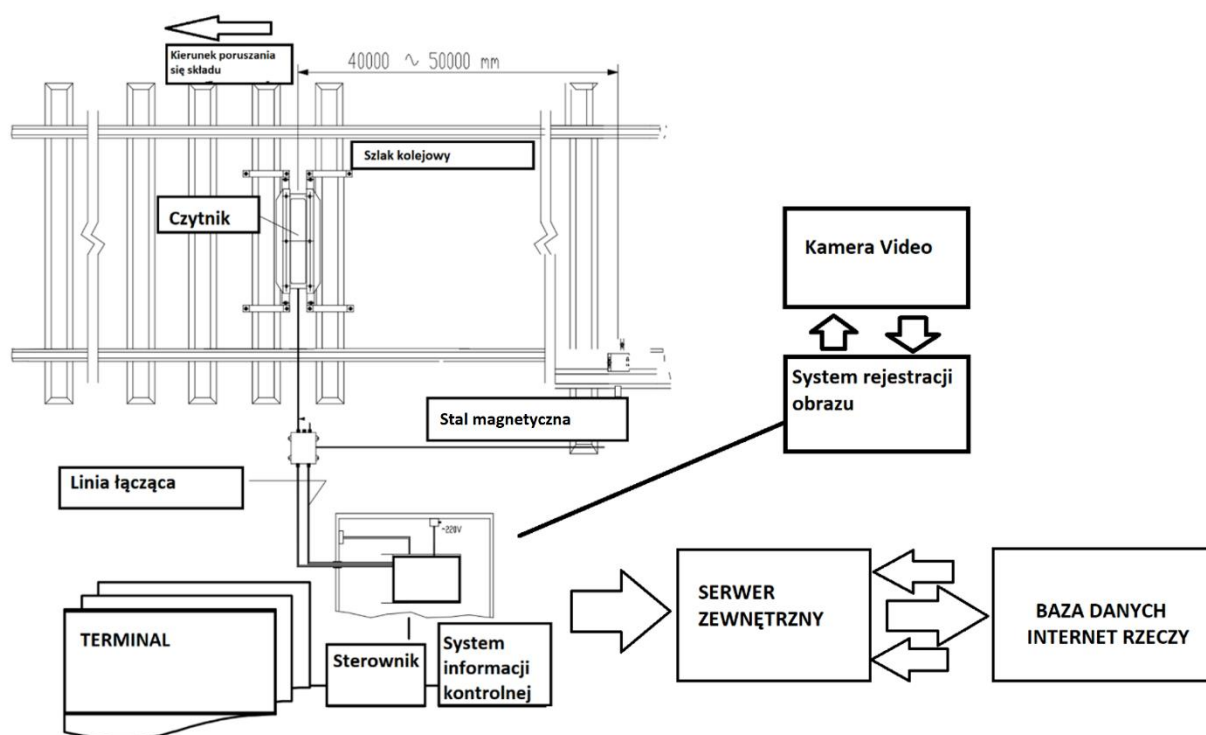
Rysunek 8. Przykładowe identyfikatory pojazdów kolejowych. Źródło: Tabor Kolejowy 2019 UTK [34].

Informacja zawierająca identyfikację w formie tekstu jest o tyle przydatna, że umożliwia jego konwersję np. na kod QR lub zastosowanie tagu RFID. Przykładem zaawansowanego systemu tagowania przy pomocy danych zaszyfrowanych w mikroprocesorze jest stosowany w Chinach system automatycznej identyfikacji składów kolejowych, oparty na technologii ATIS-RFID. [151] System działa bardzo dobrze dla składów poruszających się z prędkością do 150 km/h, jednak wciąż nie rozwiązano wielu kwestii związanych z rozszerzeniem tej technologii na rejestrację składów typu KDP o prędkościach do 500 km/h. Schemat działania i jego architektura przedstawiona została na rysunku 9.



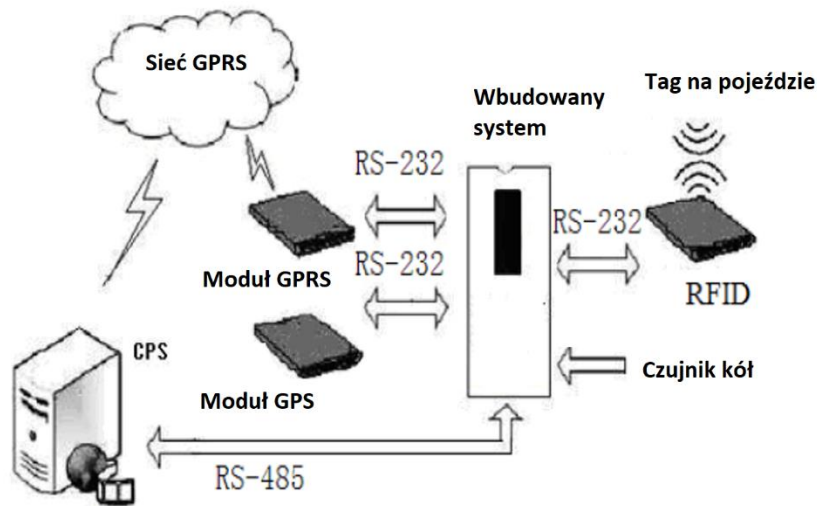
Rysunek 9. Istniejący system ATIS-RFID i jego architektura. Źródło: [151].

Technologia RFID jest szeroko stosowana w automatyce przemysłowej, automatyce biznesowej, kontroli i zarządzaniu transportem, bezpieczeństwie i wielu innych dziedzinach. Autorzy w [56] mieli na celu ulepszenie systemu poprzez wykorzystanie przemysłu 4.0 i jednego z jego filarów – Internetu Rzeczy. Na podstawie analizy ATIS wyróżnia się cztery moduły: funkcjonalny, aplikacyjny, szkielet fizyczny systemu, szkielet oprogramowania systemowego. System ten nie został zaadaptowany do chińskiej sieci ze względu na braki integracyjnie wewnętrznych systemów i ich właściwych opisów w bazach danych. Istnieje tylko podstawowy system ATIS bez modułu 4.0- rysunek 10.



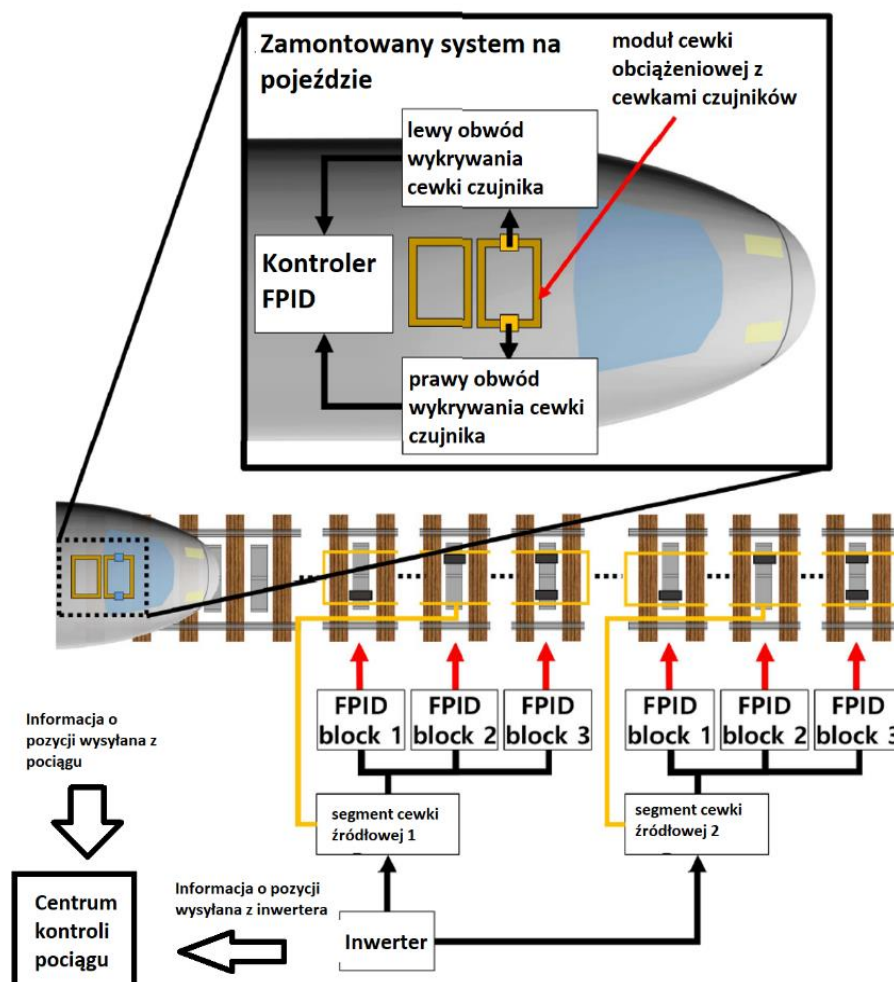
Rysunek 10. Propozycja podłączenia systemu ATIS do Internetu Rzeczy w ramach działania przemysłu 4.0 z usługą rejestracji obrazu i identyfikacji numerów pojazdu. Źródło: opracowanie własne na podstawie [151]

System odpowiadający funkcjami i działaniem przedstawionemu w [56] zaprezentowano już w roku 2009 w artykule [148]. Użyto w nim czujnika RFID, jednak dodano moduły komunikacji RS 232 czy systemy GPS/GPRS połączone do sieci Internet. Schemat działania tego systemu przedstawiono na rysunku 11.



Rysunek 11. Schemat działania systemu „Wireless 24 Intelligent train identification system (WITIS)”.  
Źródło: [148].

Autorzy w artykule [60] zaproponowali rozwiązanie mające na celu identyfikowanie składów, zwłaszcza ich pozycji, na podstawie systemu WPT (Wireless Power Transfer) i jego modyfikacji w postaci FPID (Ferrite Position Identification). Nowy system dostarcza informacji o położeniu pociągu za pomocą wbudowanych cewek. Składa się też z czujników, bloków ferrytowych oraz detektora. Proponowany system wdrożono za pomocą cewki źródłowej i cewek WPT. Informacje o względnej pozycji pociągu uzyskuje się poprzez wykrywanie bloków ferrytowych rozmieszczonych w segmencie cewki źródłowej. Informacje o położeniu pociągu dostarczane przez komponenty ferrytowe są wykrywane przez pokładowe cewki czujników i detektor. Proponowany ferrytowy system identyfikacji pozycji (FPID) dostarcza dokładnych informacji o położeniu pociągu i jest odporny na zakłócenia elektromagnetyczne. System FPID testowano za pomocą symulacji i eksperymentów. Konceptyjny schemat działania systemu jest przedstawiony na rysunku 12. System ten potrafi określić położenie pociągu i może stanowić jedynie dodatek, pomoc do systemu identyfikacji składu, jednak nie może go zastąpić.



Rysunek 12. Konceptyjny schemat blokowy przedstawiający działanie systemu śledzenia położenia pociągu z systemem FPID. Źródło: [60].

Wadą tego systemu w tej postaci jest brak możliwości zidentyfikowania rodzaju składu, a jedynie jego dokładnej lokalizacji na torowisku.

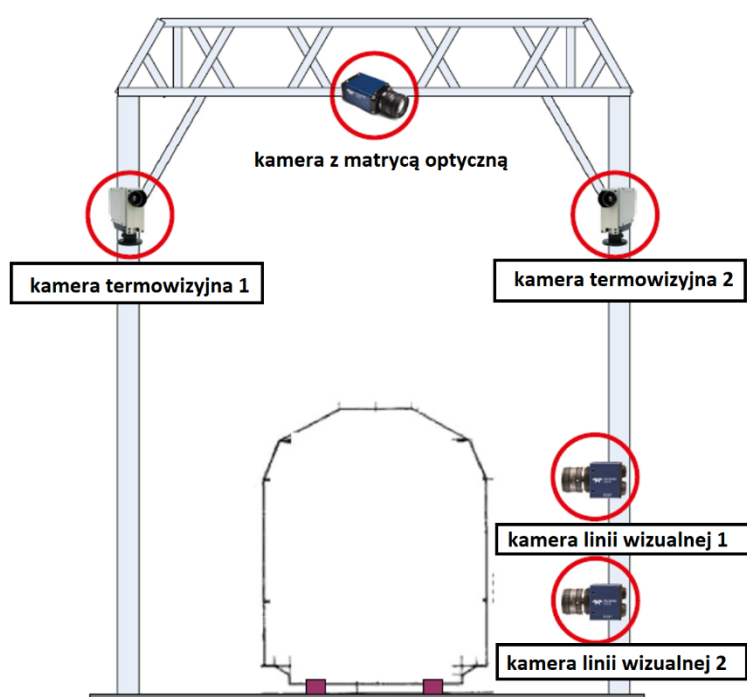
W artykule [85] przedstawiono system monitorowania wizyjnego „RANSAC”, który skutecznie rejestruje obraz, analizuje i prezentuje dane wizualne pozyskiwane z kolejowej bramownicy wyposażonej w kilka kamer. To rozwiązanie ma na celu poprawę bezpieczeństwa i identyfikację składów kolejowych poprzez:

- oszacowanie rodzaju składu przy użyciu algorytmów, które mogą przetwarzać obraz w pełnym zakresie;
- pomoc maszynistom poprzez przekazywanie informacji o możliwej awarii składu odpowiednim służbom.

System wykorzystuje wysokiej jakości kamery widzialne i termowizyjne, które rejestrują pociąg przejeżdżający pod suwnicą kolejową. System wizji maszynowej składa się z trzech zasadniczych modułów:

- systemu automatycznej identyfikacji wagonów, rozpoznającego identyfikator wagonu zgodnie z klasyfikacją UIC taboru kolejowego,
- systemu wykrywania i lokalizacji pantografu pociągu,
- systemu monitorowania temperatury.

Te trzy moduły analizy wizualnej dokonują rejestracji poruszających się składów pociągów, następnie poprzez analizę porównawczą spreparowanych wcześniej informacji wejściowych o rodzajach składów identyfikują je, a jej wyniki są wyświetlane operatorowi na interfejsie użytkownika (rysunek 13)



Rysunek 13. „Portal” z zamontowanymi kamerami z matrycą optyczną, termowizyjną oraz śledzeniem linii. Źródło: [85].

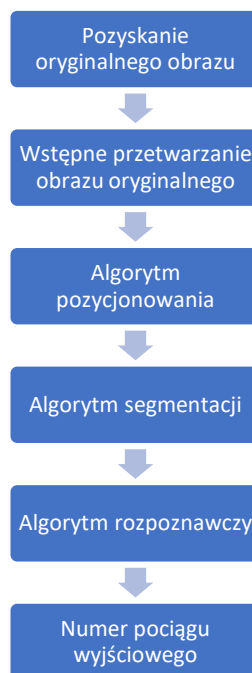
Bramownica, zwana dalej portalem, wyposażona jest w ramach identyfikacji składów kolejowych w trzy rodzaje kamer: termowizyjną, optyczną oraz śledzenia linii. Kamera matrycowa (HM-640) znajduje się na górze pośrodku bramownicy, dwie kamery termowizyjne (256L) są umieszczone po obu stronach portalu, a dwie wizyjne kamery liniowe (Spyder 4K) są umieszczone po tej samej stronie bramy jedna nad drugą. Na rysunku 14 przedstawiono przykład

odczytu przez system kamer znaków z wagonów w celu ich dalszej identyfikacji. Jest to system, który jest najbliższy tych stosowanych w transporcie drogowym w ramach systemu ANPR.



Rysunek 14. Przykłady segmentacji obszaru tekstu na dwóch różnych wagonach. Na zielono ramka graniczna podzielona na segmenty po udoskonaleniu RANSAC. Źródło: [85].

Połączeniem systemu zastosowanego w [85], opartego o kamery wizyjne oraz tego z [56], opartego o ATIS-RFID jest zastosowany w [147]. Wykorzystuje on algorytm automatycznego odczytu znaków z pojazdu w celu ich dalszej identyfikacji oraz systemy uczenia maszynowego na podstawie zarejestrowanych sygnałów oraz obrazów (rysunek 15).



Rysunek 15. Schemat procesu przetwarzania obrazu w celu identyfikacji numeru pociągu. Źródło: opracowanie własne na podstawie [147].

W ramach działania przemysłu 4.0 w Republice Czeskiej w latach 2020 [80] i 2021 [81] przedstawiono system identyfikacji pociągów na rozjazdach i przejazdach kolejowych z wykorzystaniem zaawansowanych metod uczenia maszynowego. Autorzy podeszli koncepcyjnie do Systemu Identyfikacji Pociągu (TIS) wspomaganego sztuczną inteligencją, będącego elementem systemu autodiagnostycznego dla S&C (Switches and Crossing), wykorzystując rzeczywiste dane o przyspieszeniu składów na linii kolejowej TEN-T w Republice Czeskiej.

Badania te były częścią projektu S-CODE, którego ogólnym celem były zbadanie, rozwój, walidacja i wstępna integracja nowych koncepcji dla S&C z potencjałem zwiększenia ich zdolności, niezawodności i bezpieczeństwa, przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów inwestycyjnych i operacyjnych. System ten opierał się na rejestracji drgań przy pomocy akcelerometrów zamocowanych na podkładzie kolejowym. W artykule [80] autorzy skupili się na identyfikacji lokomotyw elektrycznych czterech typów: 151, 362, 380 i Leo Express.

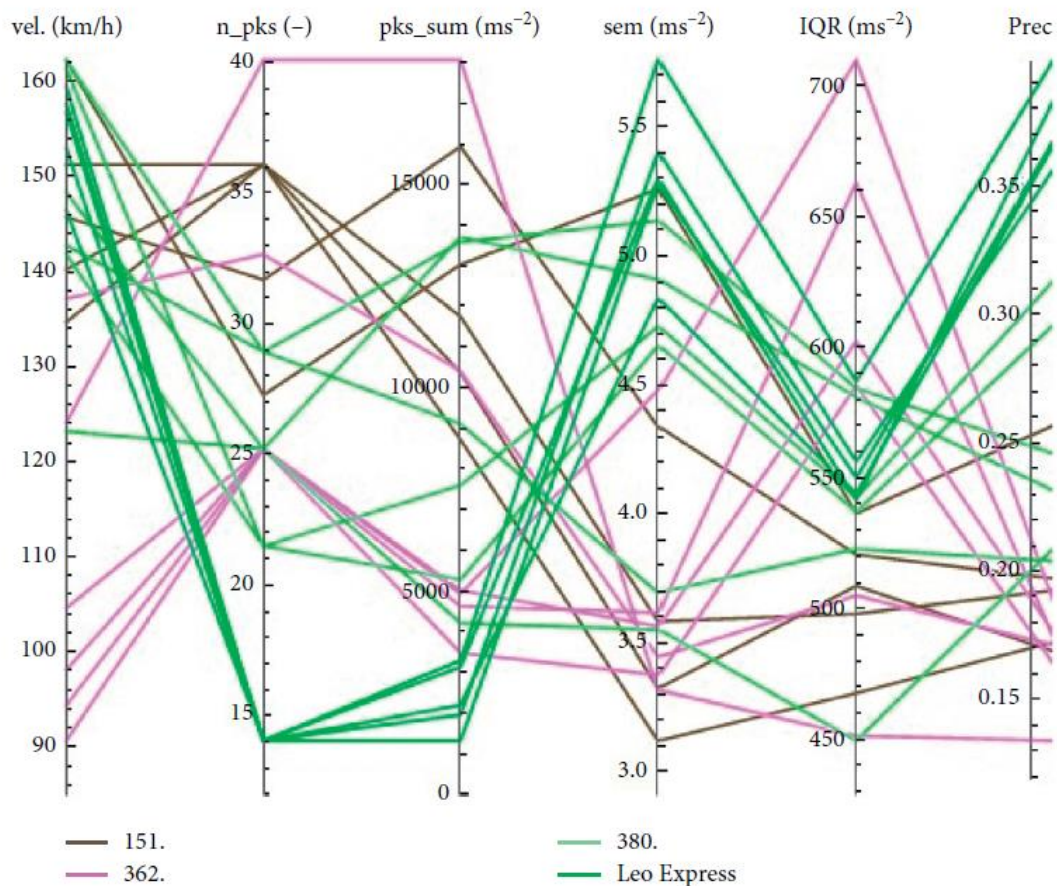
Na rysunku 16 zamieszczono wizualizację cech prędkościowych i skalarnych, które zostały wybrane do opisu poszczególnych przejazdów pociągów. Dane są posortowane według typu pociągu. Można zauważyć, że wartości cech skalarnych niektórych klas są skorelowane z typem pociągu, a więc grupują się, podczas gdy inne klasy mają wartości szeroko rozproszone. Z tego powodu autorzy zdecydowali o potrzebie posiadania więcej niż jednej cechy skalarnej, aby poprawnie sklasyfikować sygnał. Jednak wykorzystanie wszystkich 27 cech skalarnych nie jest korzystne nie tylko ze względu na duże wymagania obliczeniowe, ale również ze względu na zjawisko krzywej wymiarowości. Prędkość nie została uwzględniona dla uczenia maszynowego, ponieważ jest wtórnie uwzględniona w pozostałych cechach i dla niektórych S&C może być silnie uzależniona od położenia składu na szlaku, a nie od typu pociągu.

Do opisu przejścia pociągu przez wybrany punkt wybrano następujące cechy skalarne:

- $N_{\text{peaks}}$ : liczba pików wykrytych podczas okienkowania wariancji. Do detekcji wykorzystano funkcję `findpeaks` języka R. Liczba ta reprezentuje liczbę osi w pociągu.
- $\text{peaks}_{\text{sum}}$ : suma maksymalnych wartości wykrytych  $n_{\text{peaks}}$ . W pewnym stopniu wyraża to bezwzględną ilość energii dynamicznej przekazywanej do podkładu,
- $\text{sem}$ : proces losowego pobierania próbek opisany za pomocą błędu standardowego średniej. Zmienność pomiarów opisuje się za pomocą odchylenia standardowego danych z próbki.  $\text{sem}$  jest probabilistycznym twierdzeniem, które opisuje, biorąc pod uwagę centralne twierdzenie graniczne, w jaki sposób wielkość próby zapewni lepszą granicę dla oszacowań średniej populacji,

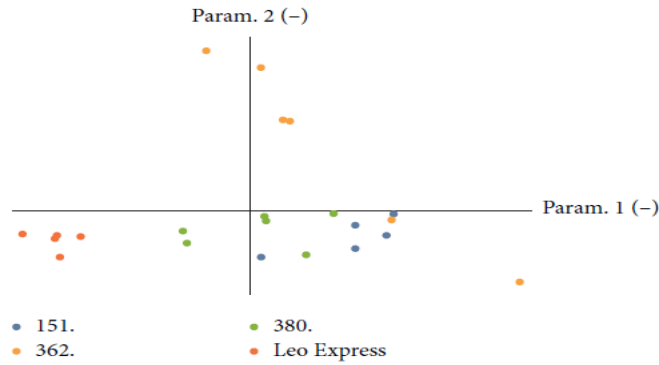


- IQR: przedział międzykwartylowy, który jest również znany jako midspread lub środkowe 50% (lub technicznie H-spread), jest miarą rozproszenia statystycznego, które jest równe różnicy między górnym i dolnym kwartylem lub między 75. i 25. percentylem. Wartość IQR reprezentuje szerokość pasma energii przekazywanej na podkład,
- prec: precyzja częstotliwościowa widma.



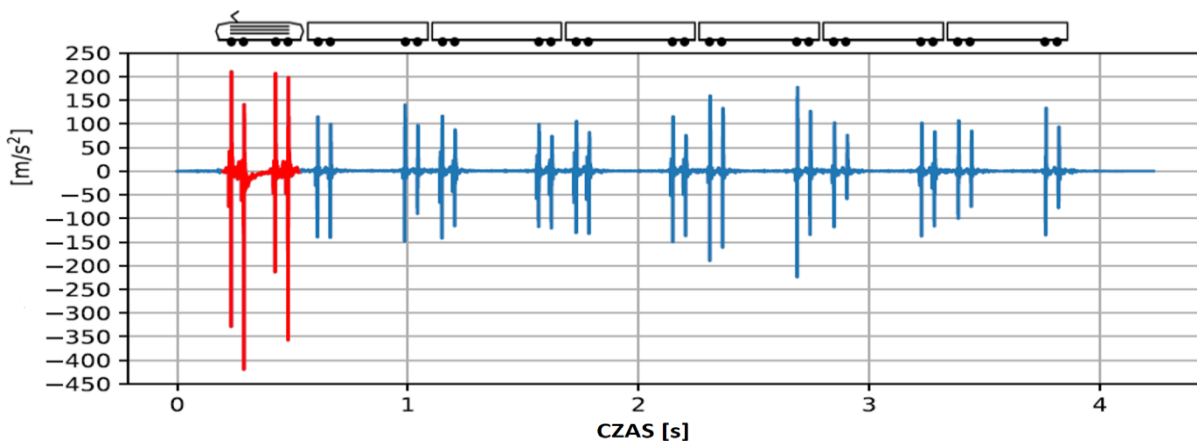
Rysunek 16. Wizualizacja grupowania cech skalarnych dla poszczególnych przejazdów pociągów posortowanych według typu pociągu. Źródło: [80].

Na rysunku 16 przedstawiono wizualizację wszystkich przejazdów pociągów używanych do uczenia maszynowego. Każdy z tych fragmentów zawiera 5 cech skalarnych, które zostały rzutowane na dwuwymiarową przestrzeń za pomocą zintegrowanej funkcji "DimensionReduce" w programie Mathematica. Klasa 362 posiada dwa kontury, które mogą wprowadzić klasyfikator w błąd, jeśli zostaną wybrane do podzbioru uczącego lub zostaną fałszywie sklasyfikowane podczas walidacji. Ponadto, można zauważyć, że nie istnieje wyraźna granica między klasami 151 i 380. Jednakże, przy większej liczbie próbek, rozdzielenie grup mogłoby być bardziej oczywiste.



Rysunek 17. Wizualizacja grupowania cech skalarnych dla poszczególnych przejazdów kolejowych według typu pociągu. Źródło: [80].

Cyfrowe przetwarzanie sygnałów obejmuje szereg technik, których celem jest przygotowanie surowych danych zarejestrowanych przez czujniki in-situ dla modeli klasyfikacji [77, 81, 92, 145]. Podstawowe przetwarzanie wstępne danych obejmuje lokalizację części lokomotywy w sygnale akcelerometru oraz normalizację tego sygnału w kierunku zarówno X, jak i Y w celu zapewnienia porównywalności dla różnych prędkości i wagi. Filtrowanie surowych danych w celu zmniejszenia szumu i poprawy dokładności klasyfikacji stanowi kolejną realną opcję, zwłaszcza dla danych o niższej jakości z niedrogich czujników. Możliwe jest kodowanie szeregów czasowych 1D w obrazy 2D i klasyfikacji przez komputerowe modele wizyjne. Przetwarzanie wstępne musi być dostosowane do wybranego modelu klasyfikacji oraz ograniczeń sprzętowych urządzeń in-situ. W pierwszym kroku wyodrębniana jest część sygnału lokomotywy. Autorzy w [81] stwierdzili w swoich badaniach, iż lokomotywy cechują się mniejszą wariancją, oszacowaną przez producenta masą całkowitą, znanym rozkładem masy czy sztywnością zawieszenia. Dlatego też uznają oni lokomotywy za preferowane do identyfikacji typów pociągów. Przykład sygnału z akcelerometru jest pokazany na rysunku 18.



Rysunek 18. Przykład sygnału akcelerometru generowanego przez pociąg z lokomotywą klasy 380 jadący z prędkością 162 km/h podczas przejazdu przez rozjazd kolejowy. Źródło: [81].

Podsumowując, autorzy artykułów [15, 80, 81, 98, 99] określili, iż identyfikacja typu pociągu z danych z akcelerometru mierzonych bezpośrednio w S&C jest możliwa, pomimo z natury złożonego zachowania w porównaniu do toru prostego. Generalizacja problemu i możliwość przeniesienia wstępnie wytrenowanych modeli uczenia maszynowego do różnych lokalizacji jest również możliwa. Część sygnału dotycząca lokomotywy powinna być preferowana zarówno dla identyfikacji typu pociągu, jak i oceny odpowiedzi dynamicznej. Minimalną częstotliwość próbkowania akcelerometrów można ustalić na 4 kHz, aby zapewnić wystarczającą liczbę punktów danych dla ocenianych typów lokomotyw i prędkości do 200 km/h. Zalecaną architekturą bazową są konwolucyjne sieci neuronowe. Automatyczne rozpoznawanie wzorców i ekstrakcja cech prezentowanych przez warstwy konwolucyjne umożliwiają przyjęcie strategii uczenia się end-to-end i zapewniają największą dokładność klasyfikacji dla danych szeregów czasowych. Wykorzystuje to system identyfikacji pociągu (TIS), stanowiący jeden modułowy element bardziej rozbudowanego systemu monitorowania stanu S&C. Proponowany przepływ zadań TIS zawiera kilka kroków od wykrycia zbliżającego się pociągu do identyfikacji typu lokomotywy i oceny odpowiedzi dynamicznej S&C.

W tabeli 3 przedstawiono podsumowanie porównujące istniejące systemy identyfikujące pojazdy szynowe stosowane na światowym rynku. Dokonano rozróżniania według nazwy systemu, krótkiego opisu zasad działania w kraju, w którym został zaimplementowany, lokalizacji w infrastrukturze kolejowej oraz informacji o ograniczeniach systemu. Łącznie przedstawiono osiem niezależnych systemów, przy czym sześć z nich ma możliwość rozróżniania rodzaju pociągu, a niektóre z nich są dalej w fazie testowania. Każdy z przedstawionych systemów ma pewne ograniczenia wpływające na wynik identyfikacji. Część z nich jak np. KarTrak czy RFID to starsze generacje istniejących systemów takich jak kody QR czy ATIS-RFID.

Tabela 3 Tabela porównująca zaprezentowane metody w podrozdziale 1.2. Źródło: Opracowanie własne.

Nazwa systemu	Zasada działania	Kraj	Lokalizacja w infrastrukturze	Czy rozróżnia rodzaj pociągu?	Ograniczenia
IIS	Wprowadzone na wzór ITS – optymalizacja wykorzystania infrastruktury kolejowej	Globalne	Głównie stacje kolejowe	Nie	Systemy oparte tylko na optymalizacji wykorzystania infrastruktury
RFID	Radiowy odczyt tagów zamontowanych na składzie	Globalne	System mobilny, możliwość zastosowania przy szlaku	Tak	Identyfikacja możliwa tylko wtedy, gdy zamontowany jest nadajnik i odbiornik sygnału i są zakodowane dane w tagu
KarTrak	Odczyt pasków na wzór wczesnych kodów QR	USA	Naklejone oznaczenia na składzie, odczyt wizyjny przy szlaku	Tak	Projekt wycofany ze względu na częste uszkodzenia naklejki z kodem
ATIS-RFID	Zautomatyzowany ulepszony system RFID	Chiny	Na podkładach szlaków kolejowych	Tak	Projekt w fazie dostosowywania do przemysłu 4.0 i internetu rzeczy. Nie jest on mobilną wersją standardowego systemu RFID
WITIS	System podobny do ATIS-RFID – koncepcyjny	Globalne	Czujnik kół, tag RFID na pojeździe, moduł GPRS i GSM	Tak	Wymaga większej liczby urządzeń odczytujących oraz przesyłających dane, nie jest systemem mobilnym
FPID	Informacje o położeniu pociągu dostarczane przez komponenty ferrytowe są wykrywane przez pokładowe cewki czujników i detektor	Globalne	Wykorzystanie bloków ferrytowych na torowisku oraz cewek	Nie	System określi z dużą dokładnością położenie składu, ale bez informacji o typie i rodzaju, konieczne zastosowanie dodatkowego systemu do identyfikacji
RANSAC	Wykorzystanie kamer trzech typów: termowizyjnych, optycznych oraz matrycowych	Włochy	Lokalizacja na bramownicach kolejowych	Tak	W przypadku nieczytelnego kodu EVN problem z identyfikacją, natomiast system ten potrafi wykryć uszkodzenia składu.
TIS	Wykorzystanie danych z akcelerometru i sygnałów pochodzących z przejazdu lokomotywy, wykorzystanie uczenia maszynowego.	Republika Czeska	Szlak kolejowy	Tak – tylko lokomotywy	Uczenie maszynowe potrafi zidentyfikować tylko kilka rodzajów lokomotyw poruszających się na czeskich szlakach kolejowych

## ROZDZIAŁ 2. ANALIZA MECHANIZMÓW GENEROWANIA HAŁASU I DRGAŃ PRZEZ PORUSZAJĄCY SIĘ POJAZD SZYNOWY

### 2.1 ANALIZA HAŁASU GENEROWANEGO PRZEZ SKŁADY KOLEJOWE

Analizując zagadnienie generowanego przez poruszające się składy kolejowe hałasu, należy wskazać główne jego źródła. W artykule [153] wyodrębniono następujące źródła hałasu zewnętrznego emitowanego przez tabor kolejowy:

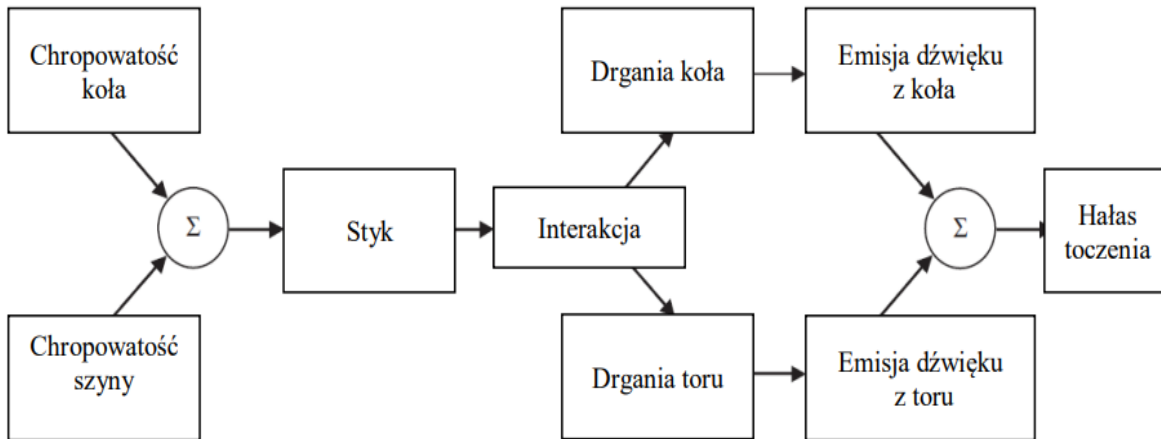
- pierwotny – hałas podczas ruchu taboru,
- podstawowy – spowodowany toceniem się koła po szynie,
- inne czynniki – hałas maszyn trakcyjnych i pomocniczych, zawirowania powietrza, hałas wytwarzany przez pantografy oraz drgania poszczególnych części pojazdów.

Natomiast w [129] precyzyjnie zdefiniowano główne źródła hałasu poruszającego się składu. Należy zauważyć, że większość światowej literatury skupia się na tematyce Kolei Dużych Prędkości, tzw. KDP. Utworzenie tego typu składów w krajach azjatyckich czy Europy Zachodniej spowodowało już w latach 60. wzrost zainteresowania wpływem hałasu i drgań na otoczenie (wprowadzenie składów typu TGV we Francji).

Na podstawie składów typu Shinkansen, TGV, ICE i MAGLEV autorzy w [129] zdefiniowali następujące źródła hałasu podczas poruszania się tych składów:

- pantograf,
- podstawa pantografu,
- wolne odstępy między wózkami,
- wózki (kontakt koło-szyna),
- czoło składu,
- powierzchnie boczne (w tym drzwi przedziałów),
- żaluzje silnika,
- wentylatory zamontowane na części napędowej składu.

Zjawisko powstania hałasu toczenia przedstawiono na rysunku 20. W formie schematu blokowego pokazano na nim, co jest bezpośrednią przyczyną powstania hałasu toczenia, czyli efekt kontaktu koło-szyna. Drgania będące źródłem emisji dźwięku są tematem analizy w podrozdziale 2.2.

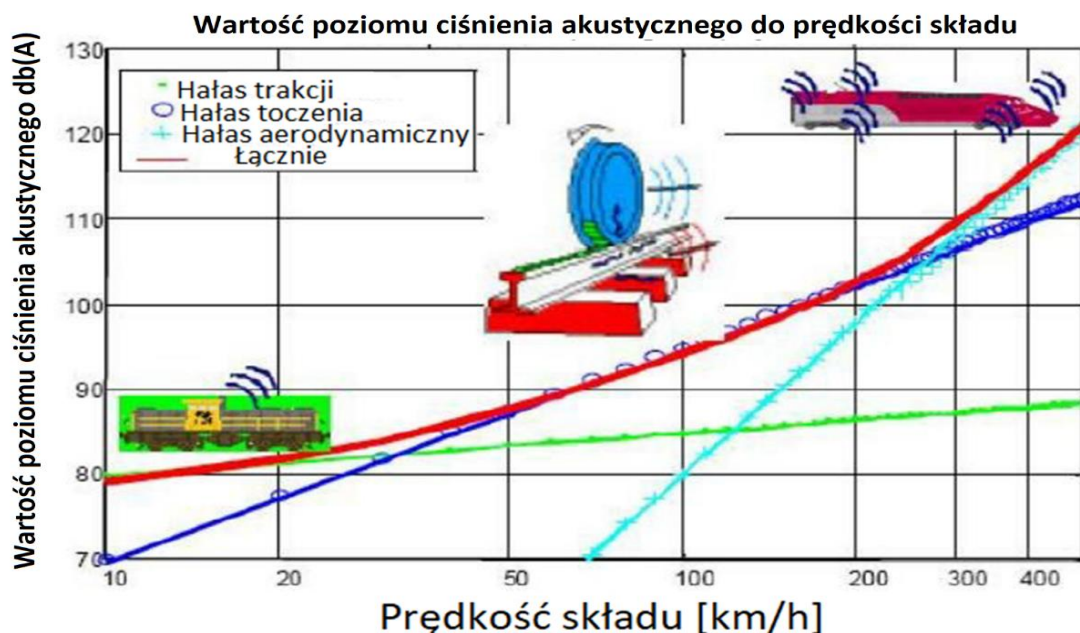


Rysunek 19. Schemat blokowy powstawania dźwięku toczenia przy uwzględnieniu chropowatości koła i szyny. Źródło:[129].

Powszechnym i często spotykanym zjawiskiem jest tzw. zużycie faliste główki szyny, które sprawia, że powierzchnia toczna główki szyny przybiera falisty kształt, charakteryzujący się kolejnymi zagłębieniami i grzbietami. Zjawisko to występuje zwłaszcza w miejscach, gdzie składy nabierają prędkości lub na długich prostych odcinkach. Uważa się, że głównym czynnikiem powodującym powstawanie zużycia falistego jest poślizg wzdłużny kół względem szyn oraz, na przykład, nieprawidłowo wykonana infrastruktura torowa. Aby przeciwdziałać zużyciu falistemu, można regularnie szlifować szyny, co powoduje wygładzenie powierzchni tocznych szyn.

Poniższy wykres, stworzony na podstawie [138], ilustruje wpływ prędkości składu na wartość hałasu – rysunek 20. Przedstawiono na nim wartość ciśnienia akustycznego względem prędkości poruszającego się składu kolejowego w zależności od hałasu generowanego przez trakcję, hałasu toczenia się składu po szynach oraz wpływu aerodynamiki.





Rysunek 20. Wartości ciśnienia akustycznego do prędkości poruszającego się składu kolejowego w zależności od hałasu trakcji (np. silników), toczenia, aerodynamiki pojazdu. Kolorem zielonym oznaczono hałas trakcyjny, niebieskim toczenia, błękitnym aerodynamiczny a łączny kolorem czerwonym. Źródło: [138].

Na rysunku 20 zaznaczono także trzy podstawowe kategorie źródeł hałasu poruszających się składów kolejowych: hałas trakcyjny – oznaczony kolorem zielonym, hałas toczenia – oznaczony kolorem niebieskim oraz hałas aerodynamiczny – zaznaczony na kolor błękitny. Kolorem czerwonym natomiast zaznaczono hałas łączny. Przy prędkości składu dochodzącego do 30 km/h największe znaczenie ma hałas emitowany przez sam pojazd np. pracujący silnik wysokoprężny oraz hałas toczenia. Od 30km/h do 200km/h głównym źródłem hałasu staje się ten wywołany przez toczenie. Natomiast dopiero powyżej 200km/h, czyli dla składów pasażerskich typu KDP, hałas aerodynamiczny stanowi główne źródło. Poniżej około 70 km/h hałas aerodynamiczny stanowi poniżej 70 dB(A).

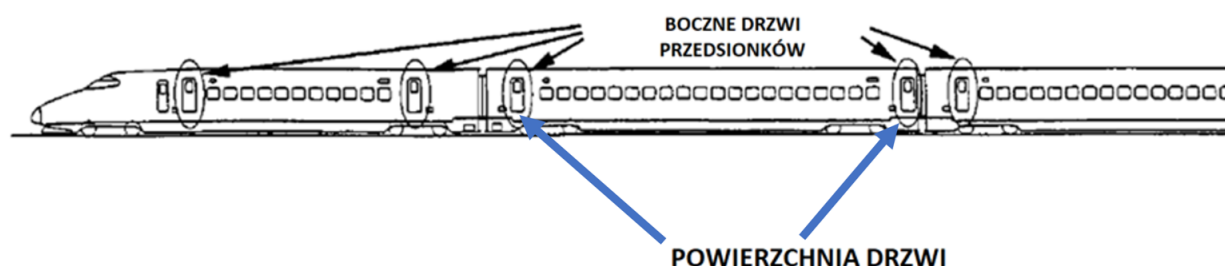
W przypadku pojazdów szynowych, które są źle utrzymywane lub pociągów, które korzystają z infrastruktury kolejowej w złym stanie, poziom hałasu toczenia jest zazwyczaj wyższy. Dla linii kolejowych z wysokimi prędkościami szlakowymi istotny jest hałas aerodynamiczny. W większości przypadków stosuje się środki zapobiegające hałasowi, takie jak ekrany dźwiękochłonne, ale są zazwyczaj zbyt niskie, aby zminimalizować hałas generowany przez pantograf.

Hałas trakcyjny jest najwyższy przy niższych prędkościach, do około 30 km/h. Przy prędkościach powyżej 30 km/h istotny jest hałas toczenia, a hałas aerodynamiczny – przy

prędkościach powyżej 200 km/h. Hałas toczenia, który dotyczy wszystkich rodzajów pociągów, jest najważniejszym źródłem hałasu.

Środowiskowy aspekt hałasu stanowi jedynie część badań nad zastosowaniem rozwiązań akustycznych na kolei. Wzrasta ich znaczenie zarówno dla konwencjonalnego transportu szynowego jak i KDP. Konieczność pogłębienia wiedzy na temat źródeł hałasu generowanych przez KDP zauważono przede wszystkim w krajach azjatyckich oraz Zachodniej Europy. Przykładowo, w 2000 roku w artykułach [116, 129] podjęto tematykę hałasu pochodzącego ze składów dużych prędkości (KDP), jak również z hałasu dochodzącego z drzwi bocznych przedsiionka i konieczności przeprowadzenia modyfikacji w tego typu składach.

Aerodynamiczne źródła hałasu z bocznych drzwi przedsiionka na powierzchni pociągu dużych prędkości obliczane były przez połączenie analizy niestabilnego, nieściśliwego przepływu płynu i analizy akustycznej. W celu zweryfikowania wyników mierzono wahania ciśnienia na powierzchni drzwi bocznych przedsiionka [116]. Stwierdzono, iż hałas aerodynamiczny jest emitowany głównie podczas pokonywania zakrętu, gdzie wiry wyrzucane z przedniej części silnie oddziałują z powierzchnią pociągu. Spowodowane to było nierówną powierzchnią boczną składu (rysunek 21).

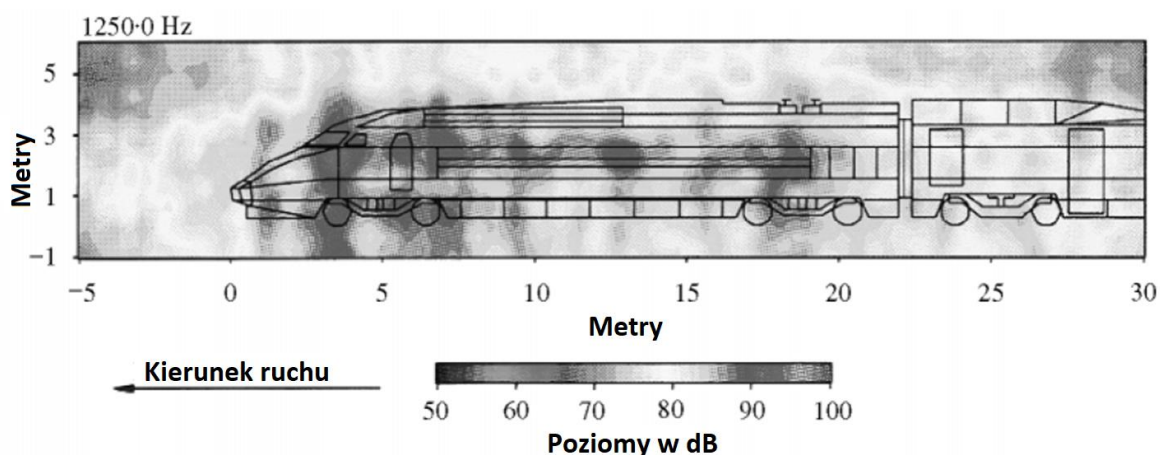


Rysunek 21. Konstrukcja powierzchni bocznej składu, w którym hałas aerodynamiczny pochodzi z przedsiionka. Źródło: [116].

Uciążliwość spowodowana hałasem kolejowym jest szczególnie ważna przy projektowaniu nowych szlaków dla KDP. Badania przeprowadzone w [116] wykazały, że hałas aerodynamiczny jest znaczący powyżej 300 km/h i może zacząć dominować w momencie mniejszej dominacji hałasu toczenia, co potwierdza wcześniejsze założenia przedstawione w niniejszym rozdziale. Autorzy stwierdzają, iż nie można osiągnąć dalszej redukcji hałasu pociągów dużych prędkości bez zminimalizowania hałasu aerodynamicznego. W artykule [116] dokonano krytycznego przeglądu literatury na temat hałasu. Pierwszym krokiem badaczy była identyfikacja jego źródeł. W artykule opisano różne zjawiska akustyczne, które są reprezentatywne dla pociągów dużych prędkości, oraz metodologie stosowane do



scharakteryzowania tych zjawisk. Na podstawie eksperymentów w tunelu aerodynamicznym, badań teoretycznych lub symulacji numerycznych opracowano specjalne narzędzia w celu scharakteryzowania różnych źródeł. Przedstawiono również metody globalnego modelowania emisji hałasu dla KDP. Na rysunku 22 przedstawiono źródła hałasu generowanego przez pojazd TGV zarejestrowane przez kamerę akustyczną. Widać na nim, które miejsca składu odpowiadają za wzrost poziomu hałasu. Tymi elementami są wózki, szyba czołowa oraz kratki wentylacyjne urządzeń trakcyjnych.

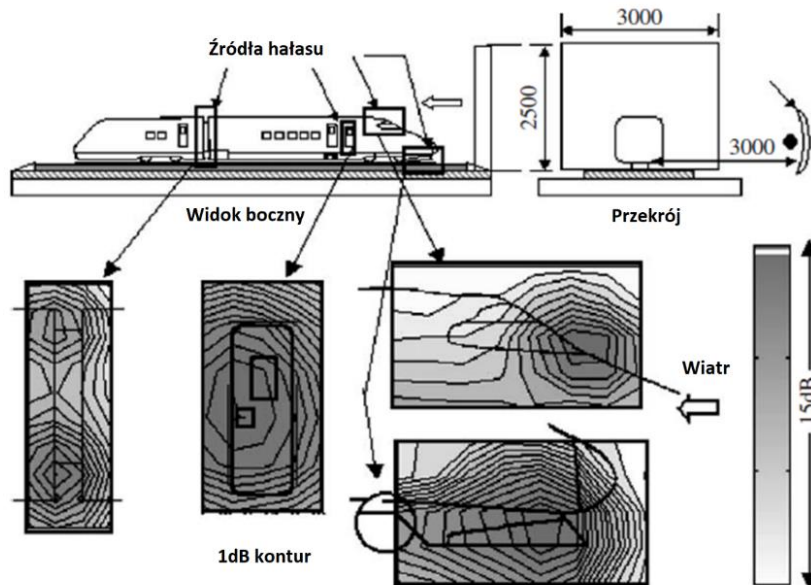


Rysunek 22. Źródła hałasu emitowanego przez pojazd typu TVG zarejestrowane przez kamerę akustyczną. Źródło: [116].

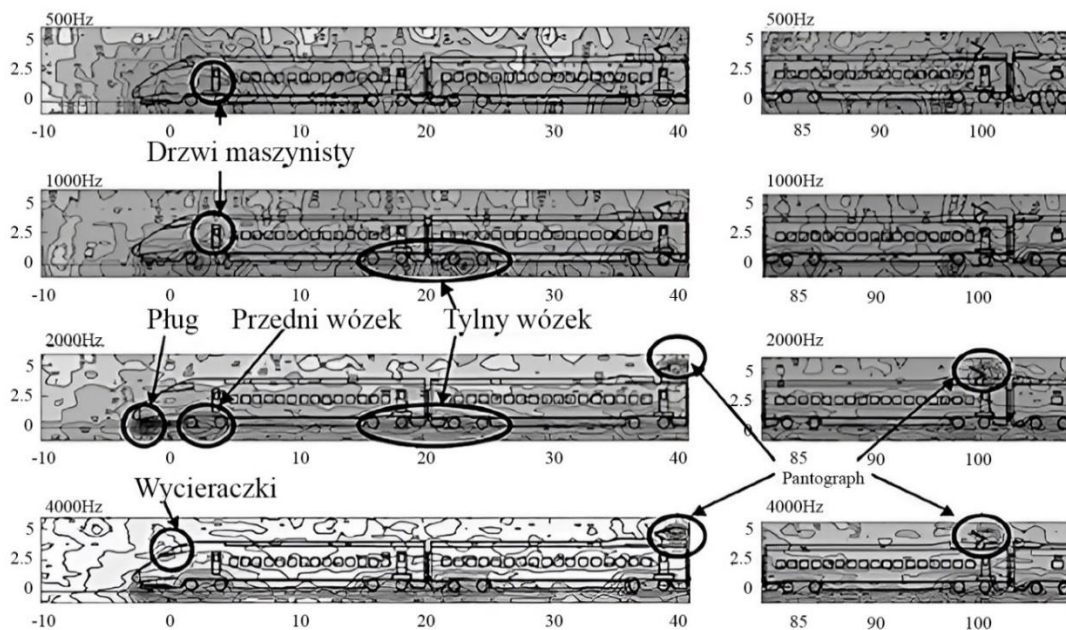
Badania hałasu generowanego przez KDP pogłębiono w 2006 roku [95]. Analizie poddano hałas pochodzący z japońskich składów Shinkansen. Składał się on z różnych źródeł, takich jak hałas toczenia, hałas konstrukcji mostu betonowego, po którym poruszał się skład oraz hałasu aerodynamicznego. Zdaniem autorów badania hałas aerodynamiczny był najważniejszy, zwłaszcza przy prędkościach powyżej 270 km/h. Konieczna była dokładna charakterystyka tego źródła hałasu w celu jego dalszej redukcji. W artykule przeprowadzono testy w tunelu aerodynamicznym z wykorzystaniem modelu pociągu Shinkansen w skali 1:5. Jako urządzenie pomiarowe wybrano kamerę akustyczną. Przedstawiono rozkład aerodynamicznych źródeł hałasu w niniejszym modelu. Pojawił się tam również rozkład źródeł hałasu realnego składu Shinkansen w terenie.

Na rysunku 23 i 24 zaprezentowano wyniki testu terenowego. Użyto w nim pociągu podobnego w konstrukcji do Shinkansena. Hałas na przednim wózku pojazdu był znacznie silniejszy niż na pozostałych. Natomiast drgania szyny zmierzone w tym samym teście na przednim wózku wagonu prowadzącego były prawie takie same jak na innych wózkach. Stwierdzono zatem, że hałas aerodynamiczny na przednim wózku składu jest wyższy niż hałas z

koła/szyny. Hałas aerodynamiczny z dolnej części pierwszego składu, prawdopodobnie generowany przez warstwę ścinającą przy pługu śnieżnym, jest wyższy niż hałas z przedniego wózka o częstotliwości 2 kHz lub większej. Drzwi do kabiny maszynisty są źródłem dużego hałasu o częstotliwościach 500-1000 Hz. Głowica pantografu jest najbardziej dominującym źródłem hałasu na przednim pantografie [112, 142]. Z drugiej strony, na niektórych częstotliwościach w tylnym pantografie najbardziej dominuje kolano ramy. Wycieraczki emitują hałas o częstotliwości na poziomie 4 kHz.

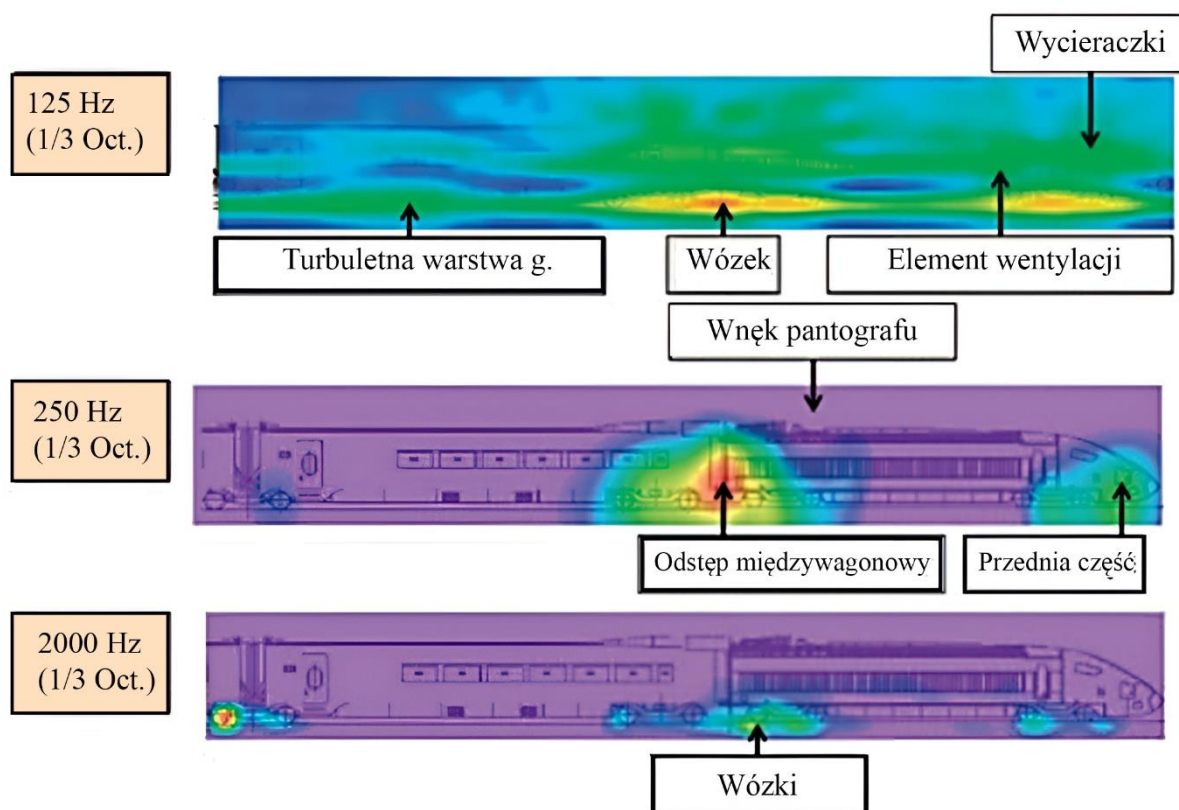


Rysunek 23. Rozkład źródeł hałasu modelu pociągu Shinkansen w skali 1/5, mierzony za pomocą lustra akustycznego (pasmo 1 kHz (odpowiednik pełnej skali)). Źródło: [95].



Rysunek 24. Rozkład źródła hałasu uzyskany przez pomiar z użyciem kamery akustycznej. Źródło: [95].

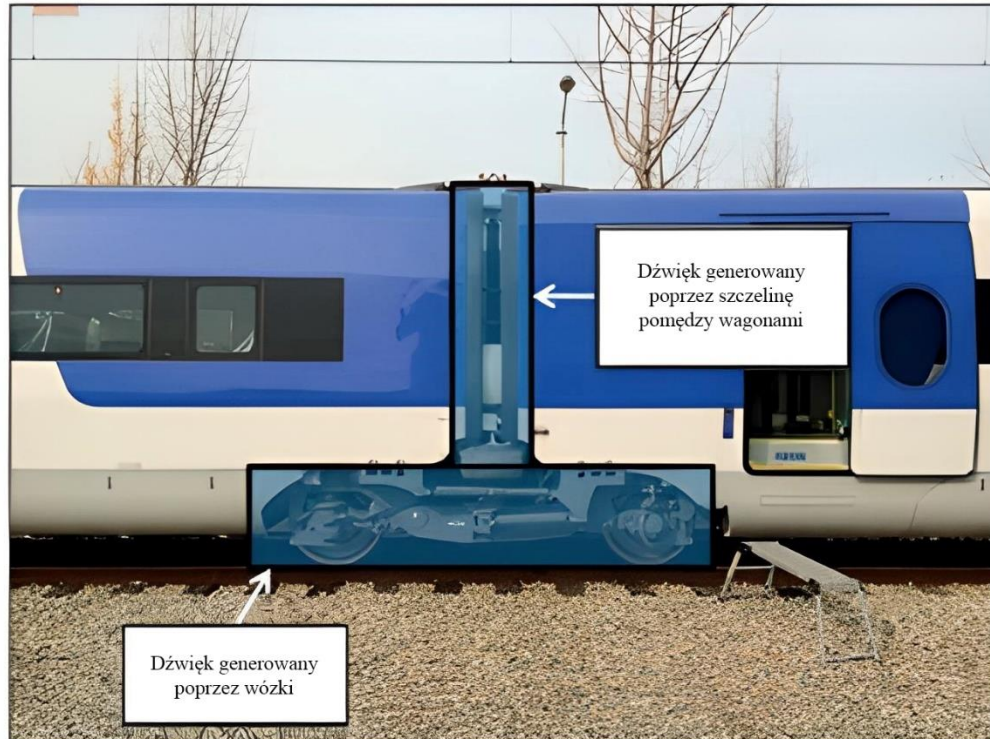
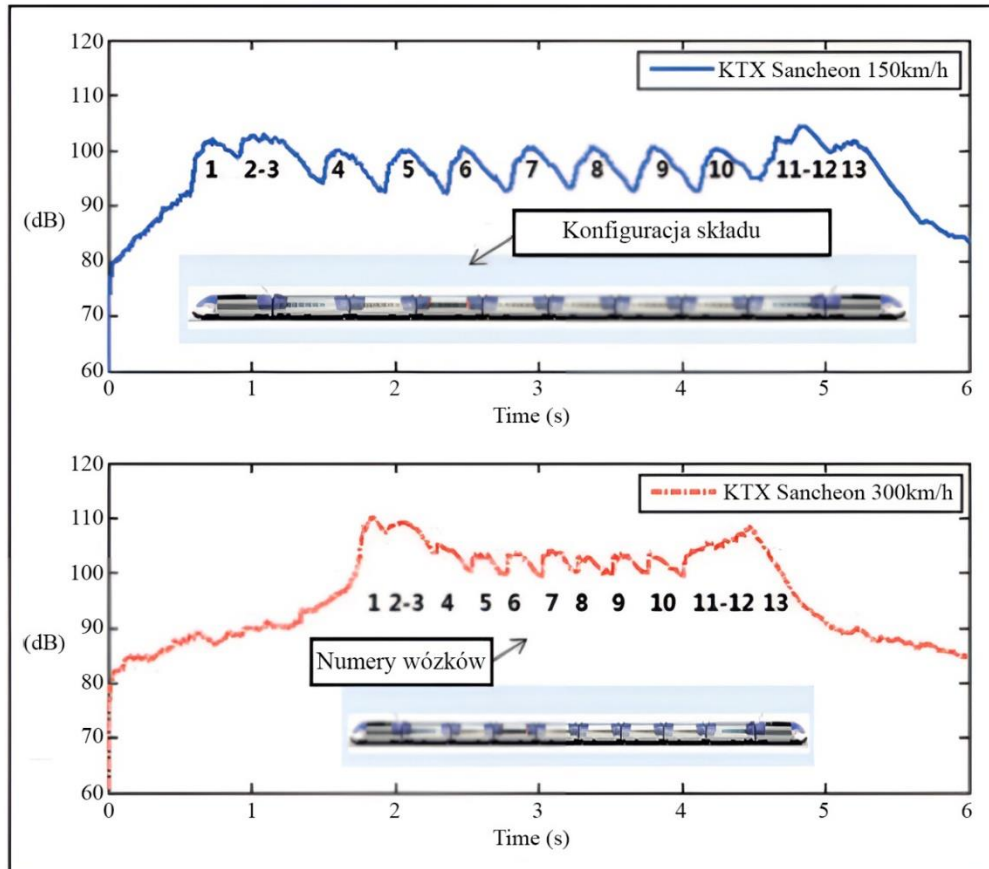
Zewnętrzne źródła hałasu w pociągach dużych prędkości omówiono także w artykule [96]. Ponieważ pociągi dużych prędkości wytwarzają złożony zestaw dźwięków, bardzo trudno jest określić poszczególne źródła hałasu. W badaniu przeprowadzonym w [96] wykorzystano w tym celu matryce mikrofonowe- rysunek 25. Nowa metoda opierała się na kamerze akustycznej składającej się z 96 mikrofonów, zaprojektowanej do pomiaru hałasu wytwarzanego przez KDP. Wyniki tego badania są o siedem lat nowsze w porównaniu do [95] i posłużą do porównania obu koncepcji na temat źródeł hałasu.



Rysunek 25. Źródła hałasu generowane przez poruszający się skład KDP. Źródło: [96].

Na rysunku 26 przedstawiono wyniki pomiarów dźwięków emitowanych przez koreańskie szybkie pociągi poruszające się z prędkością od 150 do 300 km/h. Następnie stworzono mapy dźwiękowe przy użyciu techniki formowania wiązki. Badania wykazały, że większość hałasu wytwarzanego przez pociągi dużych prędkości pochodzi z przedniej części pojazdu, wózka i odstępów między wagonami. W mniejszym stopniu z wnętrza pantografu. Na podstawie tych wyników określono aerodynamiczną charakterystykę głównych źródeł hałasu w pociągach dużych prędkości. Wyniki badania potwierdzają słuszność koncepcji na temat źródeł hałasu KDP w poprzednio przytoczonych artykułach.





Rysunek 26. Wartość natężenia dźwięku podczas przejazdu koreańskich pojazdów dużej prędkości (po lewej) oraz główne źródła hałasu (po prawej). Źródło: [96].

Ciekawe są również wyniki pomiarów wykonanych przez badaczy niemieckich [66]. Celem badań była analiza wpływu układu hamulcowego. Podzielili oni pojazdy szynowe na poszczególne podgrupy, takie jak: ICE (odpowiednik Intercity/KDP), lokomotywy elektryczne, spalinowe oraz wagony pasażerskie i towarowe. Autorzy zwrócili uwagę na istotną rolę układu hamulcowego i jego wpływu na hałas podczas poruszania się składu i wytracania prędkości.

W tabeli 4 przedstawiono przedziały średnich poziomów ciśnienia akustycznego poruszających się składów ze względu na użyty typ hamulca. Mierzono je w odległości 25 m od środka toru i na wysokości 3,5 m nad główką szyny (na podstawie [66]). Pomiary wykonano w Niemczech i analizowano tabor należący do przewoźnika Deutsche Bahn AG (Koleje Niemieckie). Podano również prędkość składów.

Tabela 4. Średnie zakresy poziomu hałasu przejazdu pojazdów szynowych kolei niemieckiej ze względu na użyty typ hamulca (DB AG). Źródło: [66].

Pojazd/seria	Typ hamulca	v [km/h]	Poziomy ciśnienia akustycznego (dBA)						
			75	80	85	90	95	100	
ICE 401/801...804	Tarczowy	280				85-90			
Electric-locomotive 103, 111, 120	Żeliwny hamulec klockowy	160				85-95			
Electric-locomotive 101	Tarczowy	220					90-95		
Electric-locomotive 145, 152	Tarczowy	120		75-80					
Electric-locomotive 141, 150, 143	Żeliwny hamulec klockowy	110				85-90			
Electric power car 420, 423, 472	Tarczowy	120		75-85					
Diesel locomotive 232, 218	Żeliwny hamulec klockowy	120				85-90			
Diesel power car 614, 627, 628	Tarczowy	120			80-85				
Wagon pasażerski Bm	Żeliwny hamulec klockowy	120				85-90			
Wagon pasażerski Avm, Bpm	Tarczowy	200				85-90			
Wagon pasażerski Bx	Tarczowy	140		75-80					
Wagon towarowy	Żeliwny hamulec klockowy	100				85-95			
Wagon towarowy	Tarczowy	100		75-80					

Z analizy wynika, że najwyższy poziom ciśnienia akustycznego osiąga lokomotywa elektryczna serii 103, 111, 120 przy prędkości około 160 km/h, natomiast najniższy lokomotywa

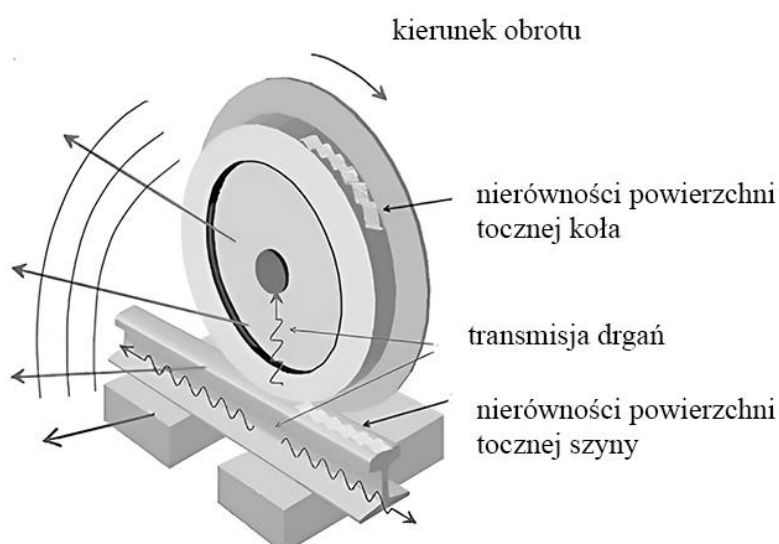
elektryczna serii 145, 152. Skład KDP, oscylujący w okolicy 85-90 dBA, poruszał się z prędkością 280 km/h i była to najwyższa zarejestrowana wartość. Najniższą prędkość osiągnęła lokomotywa serii 141. Należy zauważyć, że niższymi wartościami poziomu ciśnienia akustycznego cechowały się składy z hamulcem tarczowym.

## 2.2 ANALIZA DRGAŃ GENEROWANYCH PRZEZ SKŁADY KOLEJOWE

Według [31, 94, 122] drgania wszystkich środków transportu klasyfikuje się jako drgania parasejsmiczne o charakterze losowym, niestacjonarnym. Drgania w pojazdach szynowych powodowane są przez zmienne siły między zestawami kołowymi poruszającymi się po torze, zależne od wielu czynników: nierówności geometrycznych toru, dyskretnego podparcia szyn w rozumieniu podkładów kolejowych, właściwości sprężystych szyn oraz w oddziaływaniu dynamicznym w układzie koło-szyna [14].

W przypadku drgań szyny problematyka jest odmienna niż w przypadku drgań koła. Szyna ma inną charakterystykę, w której fala podtrzymywana jest i rozprzestrzenia się na całej jej długości- rysunek 27. Podsumowując, z punktu widzenia eksploatacji środków transportu do najważniejszych źródeł drgań należą [94]:

- zjawiska kontaktowe w układzie koło-szyna,
- praca jednostki napędowej,
- drgania powietrza podczas ruchu pojazdu,
- efekty niewyważenia części mechanicznych w pojeździe.



Rysunek 27. Schematyczny diagram przedstawiający, w jaki sposób hałas toczenia jest generowany przez interakcję koło/szyna i promieniowany przez koło, szynę i podkłady Źródło: [5].

Różnice w powierzchniach toczyń szyn i kół skutkują przesunięciami jednych względem drugich podczas jazdy, a stopień tego przesunięcia zależy od ich elastyczności mechanicznej (zdolność do odkształcenia w odpowiedzi na siłę). [11]

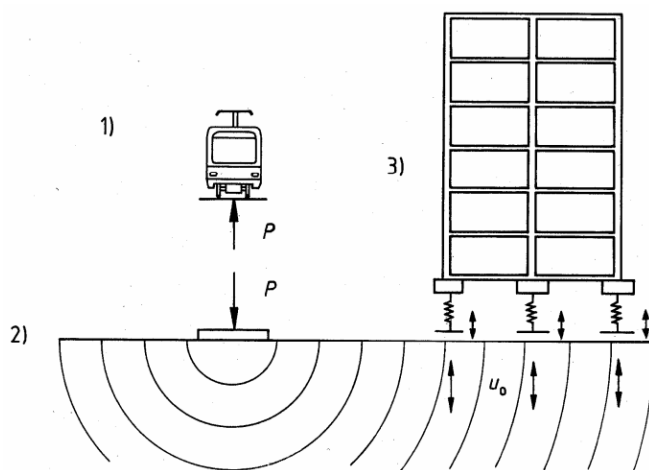
Nierówności wywołują sinusoidalną falę drganiową o częstotliwości zależnej od długości fali, nierówności szyn i kół, a także prędkości pojazdu [131]. Zgodnie z równaniem, drgania te mają określoną częstotliwość:

$$f_f = \frac{V}{\lambda} \quad (1)$$

, gdzie:

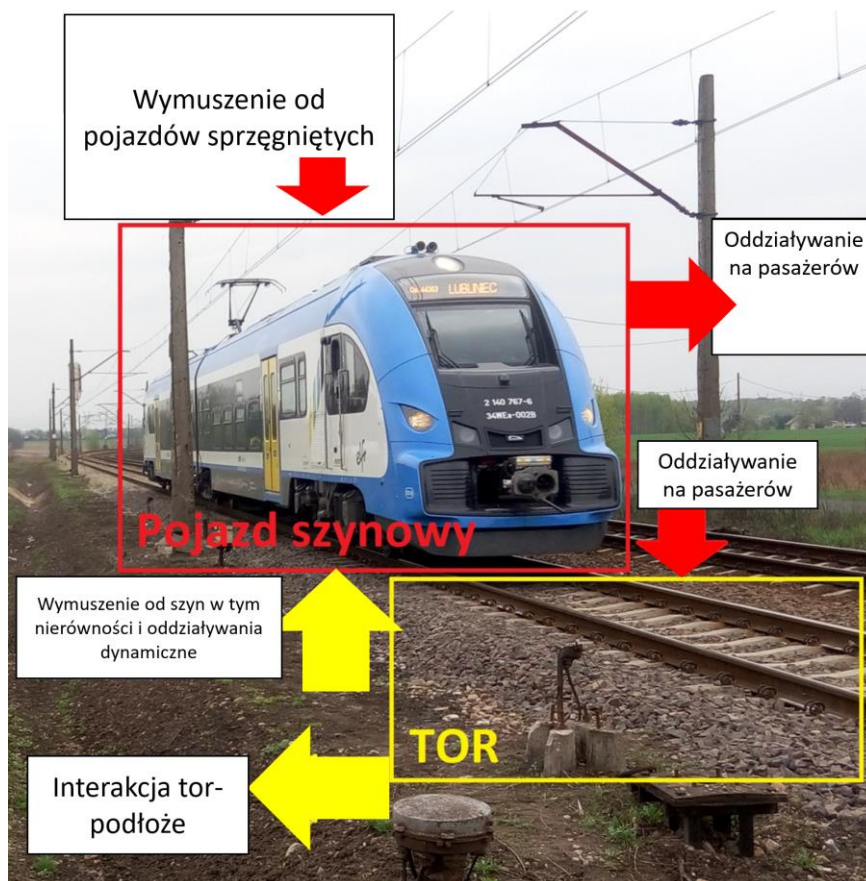
- $f_f$  – częstotliwość wzbudzenia sił [Hz],
- $V$  – prędkość pojazdu [m/s],
- $\lambda$  – długość fali [m].

Drgania powstające w punkcie styku koła z szyną rozchodzą się na poszczególne elementy torowiska. Następnie, w wyniku oddziaływania na grunt, generowane są drgania parasejsmiczne (rysunek 28). Drgania te są przekazywane do środowiska zewnętrznego przez podłoże gruntowe i mają negatywny wpływ na ludzi oraz budynki poprzez oddziaływanie na ich konstrukcję. Rozchodzenie się drgań parasejsmicznych w gruncie jest zjawiskiem falowym, jak opisano w [113]. Przeprowadzone badania i analizy przedstawione w publikacjach [102] oraz [76] wskazują, że przy obecnych ograniczeniach prędkości na polskich torach, wpływ drgań na ludzi podróżujących składem typu szynobus jest zgodny z normą PN-B-02171:2017-06. Dla wyższych prędkości próg komfortu został przekroczony w pojedynczych przypadkach. W konstrukcji toru podczas pomiarów nie zastosowano wibroizolacji. W przypadku zwiększenia prędkości do 250 km może być konieczne zainstalowanie wibroizolacji w torze w celu zapewnienia komfortu ludziom w budynkach znajdujących się w pobliżu linii kolejowej. Przedstawione schematycznie na rysunku 28 obszary zawierają emisje poprzez wzbudzenie wymuszeniem dynamicznym, transmisję poprzez propagację fali w gruncie oraz emisję przez przeniesienie drgań z gruntu na budynek.



Rysunek 28. Wzbudzenie drgań przez pojazdy szynowe: 1) emisja: wzbudzenie wymuszeniem dynamicznym, 2) transmisja: propagacja fali w gruncie, 3) emisja: przeniesienie drgań z gruntu na budynek. Źródło: [113].

Siły oddziałujące w dynamicznym systemie pojazd szynowy-tor, a także poziom i charakter generowanych drgań i hałasu, są uzależnione od wielu czynników związanych zarówno z pojazdem szynowym, jak i z nawierzchnią torowiska [38, 100, 136]. Czynniki te są ze sobą powiązane w układzie sprzężenia zwrotnego, co wpływa na wartości oddziaływań siłowych w tym systemie. Układ ten składa się następujących elementów (rysunek 29).



Rysunek 29. Schemat układu pojazd-tor. Źródło: opracowanie własne.



Sygnaly odpowiadajace losowym zjawiskom fizycznym nie moga byc opisane dokladnymi zaleznosciami matematycznymi, poniewaz wynik kazdej obserwacji jest nieodtwarzalny. Pojedyncza funkcja czasu opisujaca zjawisko losowe nazywa sie funkcja losowa lub realizacja, a przy skonczonym przedziale czasu – sygnalem obserwowanym.

Do opisanja glownych wlasciwosci sygnalow losowych stosuje sie cztery funkcje statystyczne:

- wartosc sredniokwadratowa,
- funkcje gestosci prawdopodobienstwa,
- funkcje autokorelacji,
- funkcje widmowej gestosci mocy.

Najwieksze drgania wystepuja w przypadku, gdy czestotliwosc wymuszen jest bliska czestotliwosci drgan wlasnych ukladu pojazd szynowy-tor [41, 49, 65, 84, 90, 141]. Dominujacym zrodlem halasu i drgan poruszajacego sie skladu jest obracajace sie koło wózka na szynie, a precyzyjniej – mechanizm kontaktu koło-szyna, który zalezy od prędkosci i nierownosci powierzchni tocznych lub uszkodzen.

Z punktu widzenia dalszych analiz wazna jest charakterystyka aglomeracji miejskich z liniowymi zabudowaniami wzdluz linii kolejowych. Ściezke propagacji drgan dla dowolnego podloza geologicznego, w dowolnej odleglosci od punktu pomiarowego, przy uwzględnieniu tłumienia geometrycznego i wskaźnika absorbcji gruntu można wyznaczyc wykorzystujac przyblizona amplitude fali drganiowej [146]. W tym celu stosuje sie uproszczona zaleznosc opisujaca tłumienie fali powierzchniowej [14]:

$$a_r = a_0 \left( \frac{r_0}{r_r} \right)^w e^{-a(r_r - r_0)} \quad (2)$$

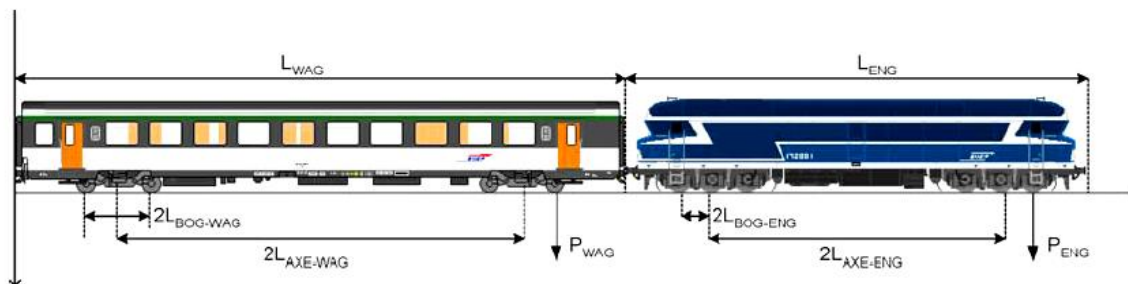
, gdzie:

- $a_0$  – amplituda drgan w referencyjnym punkcie pomiarowym,
- $r_0$  – odleglosc punktu referencyjnego od zrodla drgan,
- $a_r$  – amplituda drgan zamierzonych w punkcie,
- $r_r$  – odleglosc punktu referencyjnego od zrodla drgan,
- $w$  – wspolczynnik tłumienia geometrycznego i absorbcji gruntu,
- $a$  – wspolczynnik definiujacy rodzaj podloza geologicznego.

Do pomiarów drgań pochodzących z poruszających się składów kolejowych wykorzystuje się akcelerometry [3]. Wykrywanie i klasyfikowanie zdarzeń pociągu za pomocą czujnika przyspieszenia zasugerowano również w [10]. Wykorzystanie akcelerometru w artykule [139] wdrożono w celu wykrywania deformacji szyn podczas ruchu. Innymi typami czujników stosowanych na kolei są układy elektromagnetyczne używane do wykrywania i liczenia kół, jak pokazano w [50]. Używa się również metod opartych na przesyłaniu danych sieciami bezprzewodowymi, co zaprezentowano w [1]. Ma to na celu zwiększenie bezpieczeństwa i poprawę efektywności. Można stosować tę metodę również dla akcelerometrów.

Podobnie jak w przypadku analizy hałasu, tak w przypadku analizy drgań sporą część uwagi naukowcy poświęcają badaniom nad tematyką wpływu KDP. W artykułach [42] w [2] podjęto tematykę dotyczącą roli monitorowania poruszających się składów kolejowych typu KDP. Proces ten jest prowadzony za pomocą środków i technik wibroakustycznych. W celu opracowania systemów monitorowania i oceny trwałego odkształcenia oraz naprężeń dróg kolejowych wykonano modelowanie procesu propagacji drgań przejeżdżającego pociągu. Przyczynia się to również do oceny wpływu drgań na infrastrukturę przydrożną i środowisko. Jedną z głównych elementów drogi kolejowej jest leżące pod nią podtorze i jego wpływ na pomiary. Praca badawcza opisana w [2] bada interakcję między różnymi stałymi parametrami drogi i przemieszczeniami powierzchni kolejowej w pobliżu torowiska. Podstawą tego opracowania jest modelowanie matematyczne problemu generowania drgań przez pojazdy szynowe.

Z uwagi na ograniczenie dotyczące ingerencji w skrajnię kolejową, większość badań oparta jest na rejestracji drgań z gruntu w pobliżu torowiska. W artykule [108] zawarto model predykcyjny i diagnostykę drgań w pobliżu toru. Na podłożu warstwowym zbudowano model toru kolejowego i poddano go działaniu poruszającego się pociągu. Do obliczeń wykorzystano transformatę Fouriera. Obejmowały one wszystkie elementy torowiska i umożliwiły analizę parametryczną poszczególnych elementów oraz ocenę przemieszczenia pionowego w zależności od prędkości, masy i składu każdego pociągu. Diagnozę przeprowadzono za pomocą pomiarów in situ. Efektami tych badań były odczyty parametrów gruntu wykonane za pomocą pomiarów sejsmicznych. Pomiary tego typu dają informację o przyspieszeniu poprzecznym i pionowym na powierzchni gleby i fragmentach toru. W przypadku pociągów dużych prędkości i towarowych przemieszczenia te sięgały ponad 10 mm. Pomiary te wykonywano we Francji, a analizowany skład przedstawiono na rysunku 30 i tabela 5.

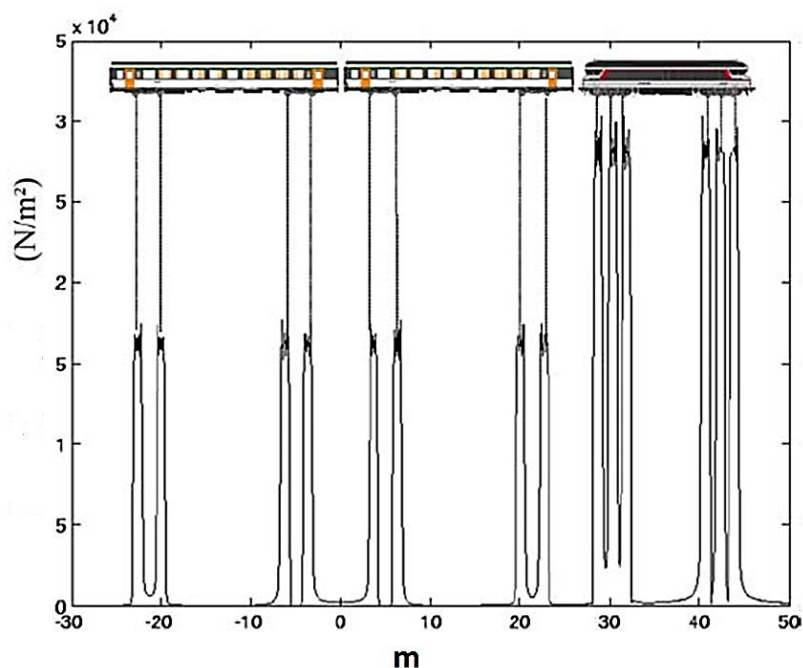


Rysunek 30. Typowe parametry techniczne lokomotywy z wagonem osobowym francuskiej SNCF. Źródło: [108].

Tabela 5 Typowe parametry techniczne lokomotywy z wagonem osobowym francuskiej SNCF. Źródło: [108].

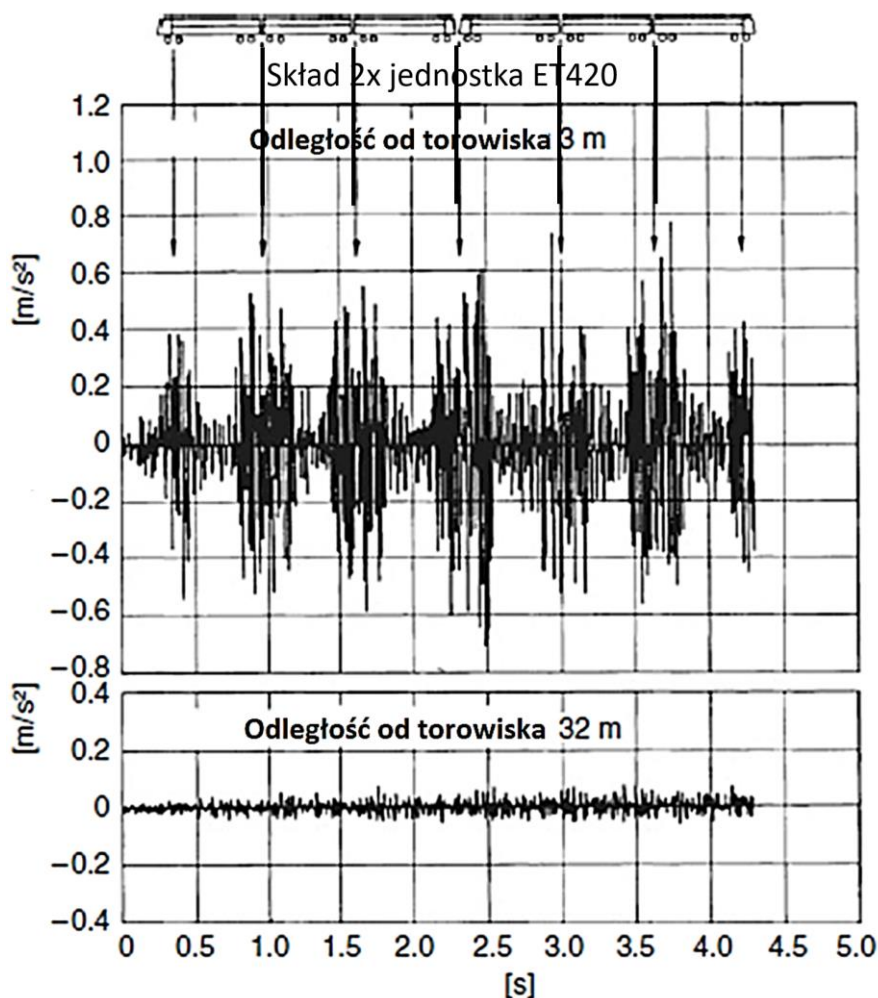
	$P_{ENG}$ (kN) (nacisk osi lokomotywy)	$P_{wag}$ (kN) (nacisk osi wagonu)	$L_{BOG-ENG}$ (m) (odległość między wózkami lokomotywy)	$L_{BOG-WAG}$ (m) (odległość między wózkami wagonu)	$L_{AXE-ENG}$ (m) (odległość między osiami lokomotywy)	$L_{AXE-WAG}$ (m) (odległość między osiami wagonu)
Autorail (Lokomotywa)	108	78	2,5	2,5	15,2	15,4
Corail (wagon osobowy)	180	103	1,6	2,56	11,99	16,3

Autorzy w [108] rozważali tylko dwa wagony (rysunek 31). Rysunek ten opisuje naprężenie Cauchy'ego w dziedzinie rzeczywistej i zgodnie z rys. 30. Wielkość tego naprężenia zależy od masy każdej osi i powierzchni styku koła z szyną.



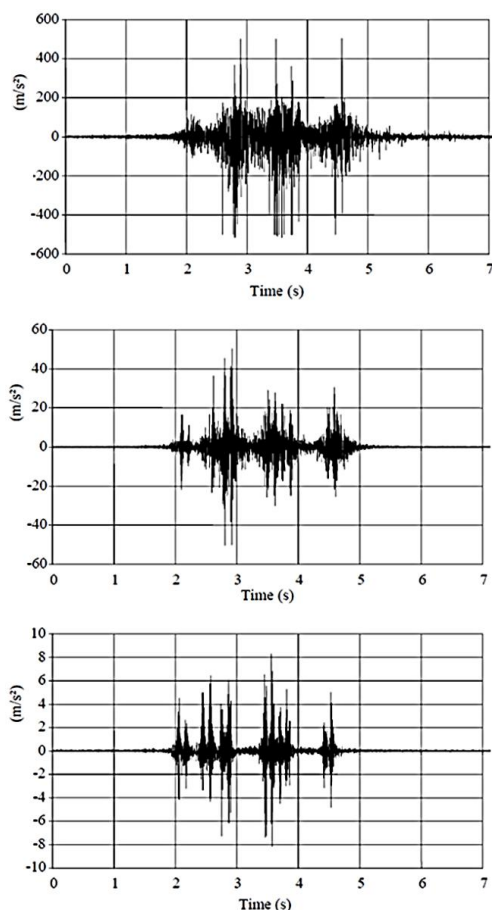
Rysunek 31. Naprężenie Cauchy'ego w polu rzeczywistym. Źródło: [108].

Dla porównania na rysunku 32 pokazano sygnaturę czasową wartości szczytowej przyspieszenia drgań w gruncie, mierzoną w pobliżu i oddali od linii kolejowej podczas przejazdu pociągu trakcyjnego klasy ET 420 z prędkością 120 km/h [143].



Rysunek 32. Sygnatura czasowa wartości szczytowej przyspieszenia drgań w gruncie, mierzona w pobliżu (3 m) i w odległości 32 m od linii kolejowej podczas przejazdu pociągu trakcyjnego klasy ET 420 z prędkością 120 km/h. Źródło: [143].

Z rysunków 32 i 33 wynika, że przy pomocy akcelerometrów istnieje możliwość rejestracji składów kolejowych poruszających się w bliskiej odległości, natomiast nie ma możliwości dokładnej rejestracji drgań w przypadku oddalonego punktu pomiarowego (32 m od torowiska).



Rysunek 33. Drgania generowane przez poruszający się skład z prędkością 75 km/h (od góry do dołu: szyna, podkład, podsypka). Źródło: [143].

Porównując rysunek 33 z rysunkiem 34 można zauważyć, że zastosowanie akcelerometru bezpośrednio na szynie daje najlepsze wyniki dotyczące pojemności informacyjnej sygnału drganiowego. Z kolei zamontowanie akcelerometru na podsypce daje efekt odfiltrowania sygnału – zauważyć można wyraźnie osie zestawu kołowego składu kolejowego.

Podsumowując, na podstawie [108] zauważono, że analiza czasowa i częstotliwościowa stwarza największe możliwości identyfikacji zaburzeń w korelacji z czasem ich występowania. Daje to duże możliwości lokalizacji na tej podstawie podzespołów pojazdu, które są źródłem zaburzeń. Dokładność identyfikacji czasowej i częstotliwościowej jest w znacznym stopniu uzależniona od parametrów rejestracji przebiegów. Sygnały pochodzące od typowych źródeł zaburzeń charakteryzują się znaczną zmiennością w zależności od częstotliwości, co wymaga dużej dynamiki układu pomiarowego. Ponadto, konieczność stosowania wysokich częstotliwości próbkowania, pozwalających na uzyskanie odpowiednio szerokiego zakresu częstotliwości charakterystyk widmowych, prowadzi do ogromnej ilości danych, których przetwarzanie, w szczególności w czasie rzeczywistym, wymaga dużych zasobów sprzętowych. Realizacja tego

zadania bez specjalistycznych układów optymalizujących potrzebne zasoby sprzętowe i czasowe jest trudna, dlatego zaleca się analizę ograniczyć do częstotliwości 100 kHz, co też autorzy uczynili w publikacji [108].

### 2.3 ZASTOSOWANIE SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH W TRANSPORCIE

Metody wibroakustyczne stosowane są w coraz szerszym zakresie. Głównym problemem jest zdefiniowanie takich miar wibroakustycznych, których zmiany w najlepszy sposób modelowałyby analizowane zjawiska fizyczne [69]. Nowoczesne instrumenty wspierające kreację obiektów technologicznych korzystają m.in. z wniosków płynących z badania modyfikacji procesów fizycznych związanych z użytkowaniem, zwłaszcza procesów wibroakustycznych [67]. Analiza sygnałów wibroakustycznych jest w praktyce często wykorzystywana na kolei [6, 39, 79, 106, 125, 152,] Dzięki niej możliwe jest między innymi wykrywanie i identyfikowanie uszkodzeń, które występują w różnych elementach torowisk, taboru kolejowego oraz innych urządzeń związanych z transportem szynowym.

Analiza sygnałów wibroakustycznych umożliwia kontrolę stanu technicznego poszczególnych elementów taboru, takich jak koła, łożyska, hamulce czy amortyzatory. Pozwala to na wczesne wykrycie uszkodzeń, co minimalizuje ryzyko poważniejszych awarii i przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa na kolei.

Analiza sygnałów wibroakustycznych pozwala na wykrywanie i identyfikowanie uszkodzeń, takich jak nierówności powierzchni, defekty szyn czy podkłady kolejowe. Dzięki temu możliwe jest przeprowadzenie niezbędnych napraw i modernizacji torów, co wpływa na poprawę komfortu i bezpieczeństwa podróży, a także na zwiększenie efektywności transportu.

Wnioski płynące z analizy sygnałów wibroakustycznych są nieocenione dla zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa transportu szynowego oraz dla zwiększenia jego efektywności [55, 58, 86, 109,]. Poniżej zaprezentowano kilka przykładów dotyczących praktycznego zastosowania analizy sygnałów wibroakustycznych w transporcie kolejowym.

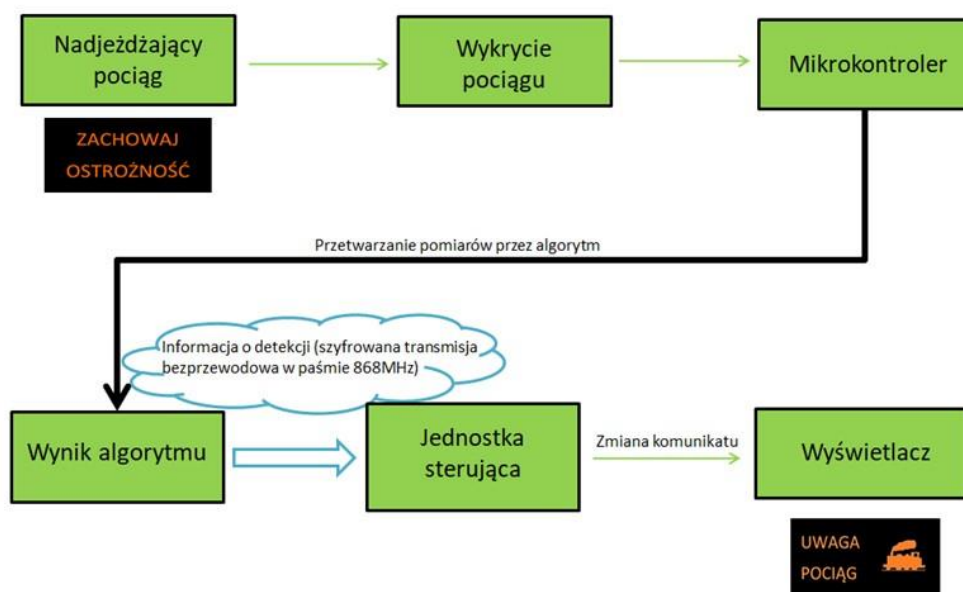
Przykład przedstawiony w [75] odnosi się do monitorowania stanu technicznego składów metra. System monitoringu drgań został zainstalowany w budynkach sąsiadujących z metrem w celu identyfikacji zmian w nominalnych poziomach drgań poruszających się składów metra. Wyniki pomiarów są również wykorzystywane do oceny wpływu drgań na osoby przebywające w budynkach poprzez wskaźnik WODL (współczynnik percepcji wibracji przez człowieka). Przekroczenie określonych poziomów wskaźnika WODL jest podstawą do wszczęcia procedury kontroli i ewentualnej naprawy składów. Dane poddano analizie statystycznej, co pozwoliło na

przedstawienie trendów w poszczególnych okresach pomiarowych. Dzięki wdrożeniu systemu monitoringu i określeniu progów wskaźnika WODL można lepiej planować koszty związane z naprawą i wymianą kół taboru, gdzie występuje duże bicie promieniowe. W wyniku wprowadzonych procedur monitorowania liczba skarg mieszkańców zmniejszyła się, a ich komfort życia uległ poprawie.

W publikacjach [12, 16, 37, 46, 62, 126, 127] skupiono się na analizie progów drgań szyny podczas przejazdu pociągu. Progi te wykorzystywane są w procesie detekcji przyjazdu kolei w drganiowym systemie zapadkowym. Próg węzła sensorowego ma na celu przesłanie informacji do dyżurnego ruchu o konieczności zamknięcia rogatki. Badania zrealizowane w ramach publikacji [127] miały na celu wykazanie i scharakteryzowanie drgań występujących w momencie przejazdu składu, jak również zjawisk występujących podczas postoju składu.

Czujniki cyfrowe stanowią ostatni postęp w technologii wykrywania, zwiększający korzyści płynące z monitorowania drgań w przemyśle kolejowym. Czujniki te przetwarzają analogowy sygnał drgań na sygnał cyfrowy wewnątrz obudowy czujnika, a następnie przesyłają cyfrowe dane drgań, zmniejszając potrzebę wysokiej częstotliwości próbkowania i redukując hałas z pobliskiego sprzętu zasilającego. Co najważniejsze, cyfrowa transmisja danych może być kompatybilna z istniejącymi platformami wykorzystywanymi w branży kolejowej, takimi jak ESRI GIS Solutions (system informacji geograficznej). Stan eksploatacyjny lokomotyw jest wówczas dostępny dla maszynisty w pociągu oraz dla służb wsparcia i utrzymania odpowiedzialnych za niezawodność działania w branży kolejowej.

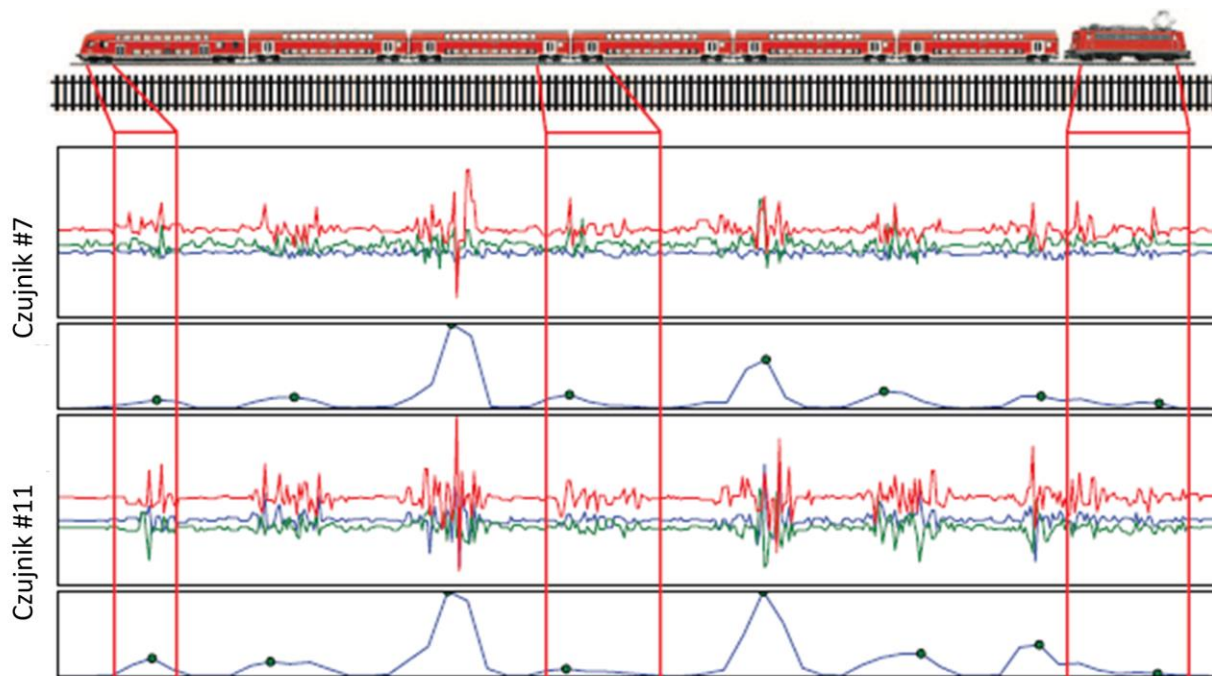
Ciekawym systemem opisanym w [17] to System Identyfikacji Pojazdu Szynowego (w skrócie: IPS) jest to system informacyjny przeznaczony do informowania uczestników ruchu drogowego na przejazdach kolejowo-drogowych kat. D. System IPS informuje o fakcie zbliżania się do przejazdu kolejowo-drogowego pojazdu szynowego reszty uczestników ruchu. Schemat działania tego systemu przedstawiono na rysunku 34. System działa na podstawie ciągłych pomiarów drgań, które są rejestrowane na szynie, a także wykorzystuje autorski czujnik, numer patentu: 237 398.



Rysunek 34 Schemat działania systemu IPS. Źródło: drtech.pl

Część artykułów zajmuje się tematyką rozmieszczenia bezprzewodowej sieci czujników na torach kolejowych w celu monitorowania i analizowania wzorców drgań powodowanych przez przejeżdżające pociągi [35, 43, 72, 74, 123, 134, 135]. W publikacji [9] omówiono szczególnie rozproszoną sieć czujników, które indywidualnie zbierają dane związane z przejeżdżającymi składami i przesyłają je do systemu posiadającego odpowiednie algorytmy, wyodrębniają cechy i klasyfikują na podstawie wcześniejszych analiz. Systemy rozproszone, według publikacji [8], mają przewagę nad złożonymi. Pojedyncze czujniki zamontowane na sieci kolejowej spełniają swoją rolę, a nie wymagają drogich analizatorów. Opisano tam również studium wykonalności na surowych danych uzyskanych z rzeczywistego wdrożenia na jednym z najbardziej ruchliwych odcinków kolejowych w Europie, wraz z adnotacjami, w tym nagraniami wideo i zawierającymi wzorce drgań 186 pociągów. Pociągi te zostały podzielone na sześć typów za pomocą różnych metod, a dokładność wyniosła 97%. Ponadto, długość analizowanych pociągów wraz z wagonami została oszacowana z błędem średniokwadratowym wynoszącym 3,98. Wstępne wyniki zawarte w [9] pozwalają na wykorzystanie ich do analizy prędkości poruszających się składów, a także do wykrywania uszkodzeń kół. Przykład zastosowania systemu pojedynczych czujników – systemu rozproszonego zaprezentowano na rysunku 35.





Rysunek 35. Miniaturowe sensory przymocowane do torów kolejowych wychwytyują drgania emitowane przez przejeżdżające pociągi. Źródło: [9].

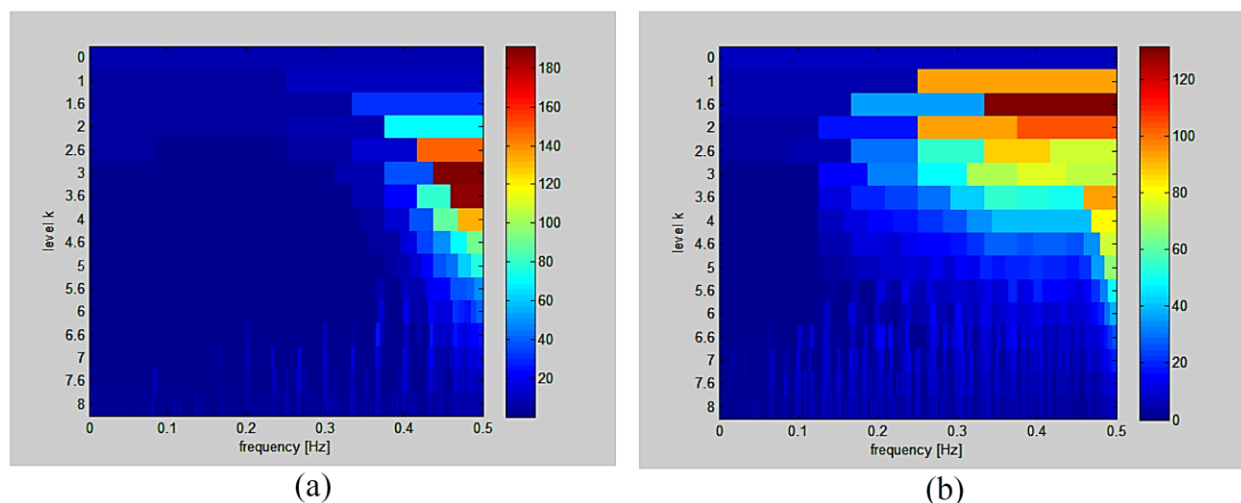
Na rysunku 35 przedstawiono wyniki pomiarów z zamocowanych miniaturowych czujników przymocowanych do torów kolejowych rejestrujących wibracje powodowane przez przejeżdżające pociągi. Z surowych danych tych zjawisk (górne wykresy) można wyodrębnić cechy, które są wystarczająco charakterystyczne, aby można je było wykorzystać do klasyfikacji pociągów (dolne wykresy).

Należy zauważyć, że nowoczesne metody diagnostyki i analizy sygnałów bez względu na źródło ich pochodzenia korzystają z sygnału zarejestrowanego w postaci cyfrowej [8, 45, 73, 101, 138, 150]. Różnorodność urządzeń technologicznych umożliwia stosowanie wielu metod i analizowanie sygnałów na różne sposoby. Należy zauważyć, że nie wszystkie metody nadają się do analizowania wszystkich sygnałów. Metodę dobiera się po wstępnej weryfikacji, biorąc pod uwagę rodzaj sygnału, warunki, w których taki sygnał został zarejestrowany i cel analizy [96].

W artykule [89, 90, 91, 111, 128, 144] analizowano sygnały wibroakustyczne metodą autokorelacji oraz kurtozy. Celem była weryfikacja eksperymentalnej metody polegającej na wykrywaniu anomalii w sygnałach zarejestrowanych przy pomocy akcelerometrów.

Wykorzystanie kartogramu w celu analizy sygnałów niestacjonarnych opisano również w artykule [40, 44, 82, 87, 88, 133] Kurtoza widmowa wyznaczana była wielokrotnie dla sygnału odfiltrowanego filtrem pasmowo-przepustowym o różnych częstotliwościach środkowych tak, aby przy zadanej rozdzielczości częstotliwościowej (szerokości pasma) wyznaczyć rozkład kurtozy w

funkcji częstotliwości. Sygnał informacyjny był maskowany przez zakłócenia o wielokrotnie wyższych amplitudach, zatem wyznaczanie kurtozy bezpośrednio z sygnału w dziedzinie czasu było nieuzasadnione. Na potrzeby diagnostyki i detekcji Antoni i Randall zaproponowali rozszerzenie pojęcia kurtozy do tzw. kurtozy widmowej (ang. spectral kurtosis, SK). Przykład zastosowania kurtogramu w celu przedstawienia zmian/anomalii przestawiono na rysunku 36.



Rysunek 36. Wykorzystanie kurogramu w analizie sygnałów niestacjonarnych. Źródło:[90].

W artykule [36] przedstawiono możliwości zastosowania metod wibroakustycznych w monitorowaniu komfortu oraz bezpieczeństwa pojazdów. Do przetwarzania sygnału użyto Analizatora Sygnałów Wibroakustycznych (WSA) [14], który jest autorskim programem autorów z przyjaznym interfejsem użytkownika. Jest to przykład nowatorskiego podejścia do tworzenia oprogramowania analizującego sygnały wibroakustyczne w środowisku MATLAB, wykorzystującego ciągłą transformatę falkową.

Kurtoza oraz transformaty falkowe to niektóre z metod analizy sygnałów niestacjonarnych. Do innych metod, wymienionych np. w [133] czy [115], można zaliczyć wykorzystanie analizy STFT, Falki Debouschiego, metody EMD (Empirical Mode Decomposition) oraz metodę bispektralną dla sygnałów niestacjonarnych.

Tematykę wyjaśniającą problematykę transformaty falkowej opisano w [71], gdzie przedstawiono teoretyczne zagadnienia związane z transformatą ciągłą i dyskretną. W artykule obalono zasadność stosowania transformaty Fouriera dla sygnałów niestacjonarnych, ponieważ podczas transformacji następuje zmiana dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości, co powoduje utratę informacji czasowej. Jest to poważna wada w przypadku analizy sygnałów niestacjonarnych, gdzie informacja o czasie trwania i chwili wystąpienia danego zjawiska jest

bardzo istotna. „Z tego względu transformata Fouriera jest skuteczna jedynie dla sygnałów periodycznych, regularnych i stacjonarnych.”

Tematyką porównywalną do [14] jest zaproponowana w [117] metoda tworzenia nowatorskich metod, w tym skryptów analizy sygnałów wibroakustycznych (w tym wypadku badań ciernych i kolejowego hamulca tarczowego) przeprowadzonych na stojaku hamulcowym. Przedstawiono jednoczesne zastosowanie metod amplitudowych i częstotliwościowych w analizie sygnałów wibroakustycznych generowanych przez okładziny hamulcowe. Zaproponowano autorski algorytm analizujący sygnały przyspieszenia drgań poprzez analizę amplitudy dla niskich prędkości hamowania oraz analizę spektralną dla średnich i wysokich prędkości hamowania.

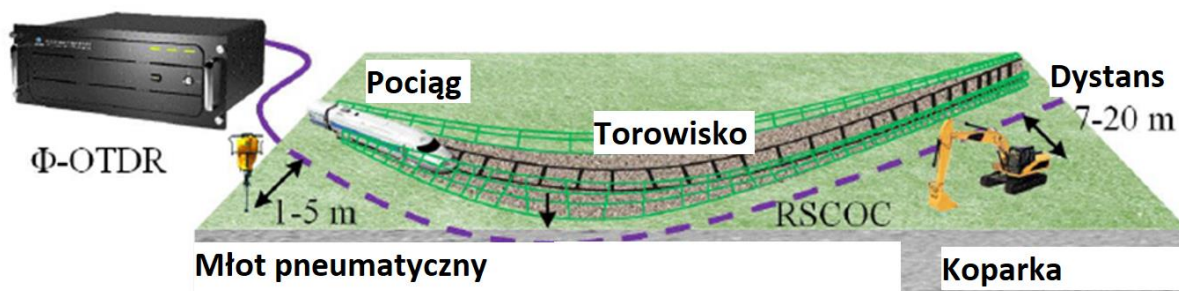
W artykule [7] omówiono klasyfikację pojazdów istotną dla automatyzacji pomiaru ruchu na drodze. Te ważne parametry, wraz z wymiarami akustycznymi, są mierzone podczas badań wibroakustycznych. Do działania systemów pomiarowych potrzebne są pomiary liczby osi, odległości między osiami i wymiarów liniowych pojazdu. Jednakże, przetworniki pomiarowe są kosztowne i często trzeba je instalować w drodze, co utrudnia wykorzystanie ich w przenośnych systemach pomiarowych umieszczonych w wybranych miejscach. Dlatego proponuje się klasyfikowanie pojazdów na podstawie pomiarów drgań podłoża, z wykorzystaniem czułych przetworników drgań instalowanych w gruncie poza obszarem drogi. Oczekiwanym efektem takiego rozwiązania jest możliwość instalowania na większości dróg i niskie koszty systemu pomiarowego. W badaniach wykorzystano klasyczny model rozpoznawania obrazów, składający się z ekstraktora cech i klasyfikatora. Klasyfikacja pojazdów opierała się na ich konstrukcji mechanicznej i masie. Przebadano drgania gruntu generowane przez samochody, a baza danych pomiarowych zawierała 223 zapisy. Opracowano metodę ekstrakcji cech charakterystycznych z sygnałów drganiowych, wykorzystując analizę falkową do stworzenia wektora cech charakterystycznych.

Badanie parametrów poruszania się na drodze w określonym przekroju można przeprowadzić przy użyciu różnych technik. Pomiar można przeprowadzić za pomocą zakresu światła widzialnego, dźwięków lub drgań. Większość drgań na drodze generują pojazdy poruszające się w strumieniu ruchu. W artykule zaprezentowano uproszczoną metodę pomiaru natężenia strumienia ruchu poprzez analizę drgań powierzchni jezdni, wywoływanych przez pojazdy [13]

W artykule omówiono wyniki badań z poszczególnych etapów opracowywania algorytmu ekstrakcji cech, takich jak wybór rodzaju falki, liczby poziomów dekompozycji sygnałów drganiowych i sposobu obliczania wartości danej cechy. Wybór algorytmu klasyfikatora był dokonywany eksperymentalnie. Przebadano trzy algorytmy NN, kNN i MN z wykorzystaniem

metod minimalno-odległościowych. Algorytmy testowano w trybie offline, a najskuteczniejszy został wybrany do zastosowania. Prace programistyczne zostały wykonane przy użyciu platformy programowej MATLAB.

Urządzenia kolejowe eksploatowane w środowisku kolejowym powinny spełniać określone normy dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej EMC (ElectroMagnetic Compatibility) [103, 104]. Jednym z przykładów dotyczących Kolei Dużych Prędkości (KDP) opartej na systemach elektronicznych jest praca zespołu z Chin, która została przedstawiona w [140]. Autorzy stwierdzają, że KDP to branża, która szybko się rozwija, a aspekt bezpieczeństwa, w tym infrastruktura i eksploatacja pociągów, ma kluczowe znaczenie. W artykule tym przedstawiono schemat monitorowania drgań podtorza kolejowego w oparciu o czuły system  $\Phi$ -OTDR. Oprogramowanie to rejestruje drgania podłoża. W celu identyfikacji sygnałów poruszających się pociągów oraz elementów znajdujących się w skrajni kolejowej zaproponowano kompleksową analizę (MDCA- multiple-criteria decision analysis). Był to pierwszy system monitorowania drgań podtorza. Skuteczność tego systemu potwierdzają testy terenowe, w ramach których śledzono poruszające się pociągi w czasie rzeczywistym i monitorowano działania wzdłuż linii kolejowej. System przedstawiony w [140] jest nowym, pasywnym i rozproszonym sposobem monitorowania drgań podtorza, który działa w każdych warunkach pogodowych.



Rysunek 37. Schemat struktury testu terenowego. Źródło: [140].

Podsumowując, system  $\Phi$ -OTDR służy do monitorowania drgań podłoża kolejowego i został zweryfikowany na dwudziestokilometrowym odcinku w teście terenowym. Wykorzystano MDCA i wielowymiarowe informacje. Sygnały jadącego pociągu można było zidentyfikować jako niewykrywalne dla czujników obecności w skrajni, a system właściwie identyfikował niebezpieczne sytuacje. Udowodniono, że  $\Phi$ -OTDR nadaje się do monitorowania niezarejestrowanych wkroczeń w skrajnię oraz monitorowania bezpieczeństwa infrastruktury kolejowej. Jednocześnie system ten może dostarczyć informacji o jadącym pociągu, jego prędkości i długości składu.

Dla dowolnego sygnału pomiarowego, który jest przedstawiany jako uogólniony sygnał  $x(t)$ , możliwe jest określenie miar (estymatorów), które numerycznie charakteryzują te sygnały i umożliwiają ich porównanie z wartościami odniesienia. Poniżej przedstawiono poszczególne estymatory generowane przez moduł wraz z ich matematycznym opisem.

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów można w dziedzinie czasu wyznaczyć przykładowe miary [107]:

- wartość średnia  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt \quad (3)$$

, gdzie:

—  $x(t)$  – analizowany sygnał,

—  $t$  – czas;

- wartość szczytowa  $x_{peak}$ :

$$x_{peak} = \max_{0 < t \leq T} (|x(t)|) \quad (4)$$

- wartość międzyszczytowa  $x_{P-P}$ :

$$x_{P-P} = \left| \max_{0 < t \leq T} (x(t)) - \min_{0 < t \leq T} (x(t)) \right| \quad (5)$$

- wartość średniokwadratowa  $x_e$ :

$$x_e = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt \quad (6)$$

wartość skuteczna  $x_{RMS}$ :

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \quad (7)$$

- wariancja  $V$ :

$$v = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt \quad (8)$$

- odchylenie standardowe:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt} \quad (9)$$

- skośność S:

$$S = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^3 dt}{\left[ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt \right]^{\frac{3}{2}}} dt \quad (10)$$

- kurtoza K:

$$K = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^4 dt}{\left[ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt \right]^2} \quad (11)$$

- energia sygnału  $E_x$ :

$$E_x = \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt \quad (12)$$

Aby dokonać transformacji z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości, można wykorzystać przekształcenie Fouriera. Przekształcenie to opiera się na założeniu, że każdy sygnał, który spełnia tzw. warunki Dirichleta (są one spełnione przez wszystkie funkcje ciągłe) można przedstawić jako sumę szeregu sygnałów o różnych częstotliwościach:

$$x(t) = \frac{1}{2} \cdot A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) + B_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t)] \quad (14)$$

Sygnały można przekształcić z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości za pomocą dyskretnej transformacji Fouriera, w której operacje sumowania zastępują operacje całkowania, zdefiniowana jest wzorem:

$$\hat{s}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)w^{kn} \quad (15)$$

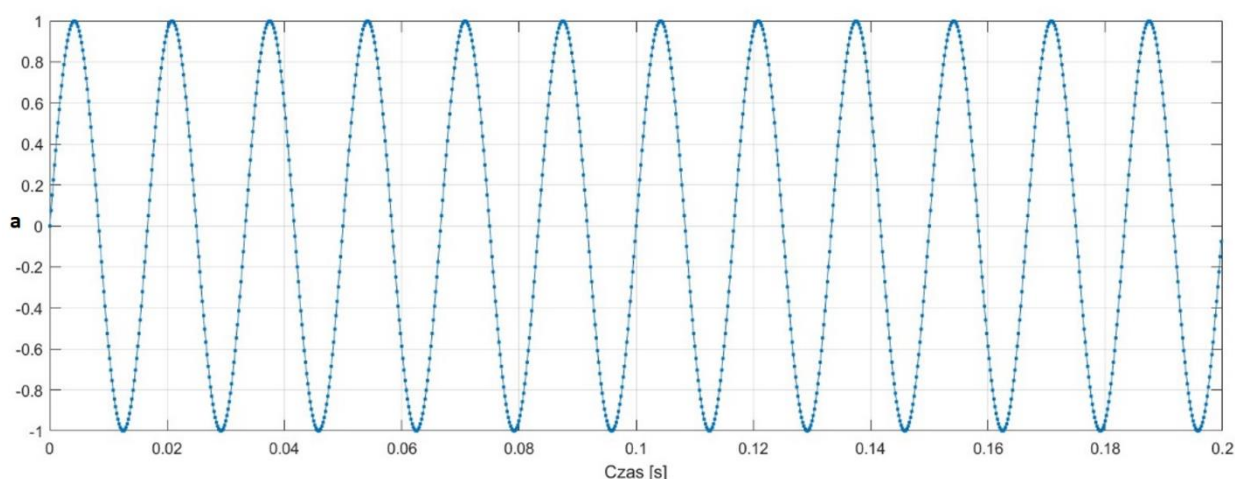
, gdzie:

—  $w = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$

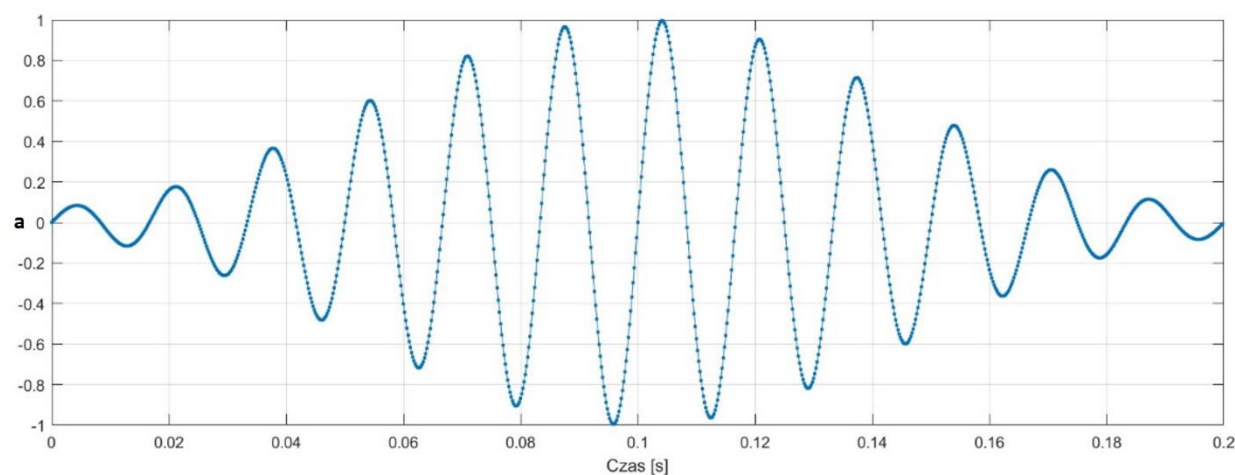
— k jest numerem wiersza

— n- numerem kolumny

Transformata Fouriera zawiera informacje o dwóch rodzajach wielkości: amplitudzie i fazie, i zawsze jest zespolona. Aby dokonać analizy DFT, należy wybrać fragment sygnału czasowego (liczbę próbek) i przeprowadzić jego przekształcenie do dziedziny częstotliwości za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera. Prostokątne okno jest najprostszym sposobem wycięcia fragmentu sygnału, ale prowadzi do przecieku widma, w którym słabsze prążki są maskowane tylko na krawędzi przez silniejsze. Aby zminimalizować ten efekt, stosuje się różne typy okien, m.in. Hanninga, Hamminga, trójkątne, Czebyszewa czy Blackmana. Te okna są dobrane tak, aby wartości próbek na początku i końcu przedziału były gładko zmniejszane do wartości minimalnej (rysunki 38 i 39).



Rysunek 38. Sygnał wejściowy. Źródło: źródło własne



Rysunek 39. Sygnał po okienkowaniu (Hamminga). Źródło: źródło własne

Podczas analizy sygnałów wibroakustycznych często zachodzi potrzeba poznania wartości sygnału w określonym paśmie częstotliwości. Aby dokonać takiej analizy, wymagana jest filtracja sygnału z wykorzystaniem odpowiednio dobranych filtrów. Istnieje kilka podstawowych typów filtrów:



- dolnoprzepustowy (tłumiący sygnały o częstotliwościach wyższych niż częstotliwość graniczna),
- górnoprzepustowy (tłumiący sygnały o częstotliwościach niższych niż częstotliwość graniczna),
- pasmowoprzepustowy (tłumiący sygnały o częstotliwościach innych niż zdefiniowane pasmo),
- pasmowozaporowy (tłumiący sygnały o częstotliwościach takich jak zdefiniowane pasmo).

Filtry pasmowoprzepustowe i pasmowozaporowe buduje się poprzez odpowiednie połączenie filtrów dolno- i górnoprzepustowych. Najważniejszymi parametrami filtrów są częstotliwość graniczna i stromość nachylenia charakterystyki filtra poza pasmem przepustowym. Częstotliwość graniczna określana jest najczęściej dla punktu charakterystyki, w którym tłumienie sygnału osiąga wartość 3 dB.

## 2.4 PODSUMOWANIE PODROZDZIAŁU – WSKAZANIE CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA DRGANIA I HAŁAS PORUSZAJĄCYCH SIĘ POJAZDÓW SZYNOWYCH

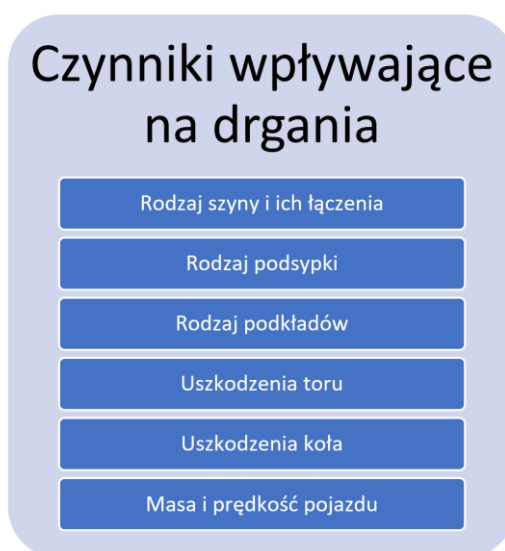
Drgania i hałas generowane przez poruszające się pojazdy szynowe są wynikiem różnych czynników. Ich wybór jest istotny, ponieważ bezpośrednio wpływają na poziom drgań i hałasu. Czynniki, które wpływają na drgania to:

- rodzaj szyny – różne rodzaje szyn, np. stalowe lub kompozytowe, mają różne właściwości dynamiczne i elastyczne, co może prowadzić do różnic w generowanych drganiach,
- sposób łączenia szyn, np. spawanie lub używanie łączników elastycznych może również mieć wpływ na drgania,
- rodzaj podsypki, czyli materiału stosowanego pod torami, np. żwir czy kruszywo, ponieważ każdy materiał ma różne właściwości tłumienia drgań i może wpływać na ich intensywność,
- podkłady, czyli elementy zamocowania torów do podłoża, które mogą być np. gumowe lub betonowe, mają różne właściwości tłumienia drgań,
- uszkodzenia torów i kół, nierówności, pęknięcia czy niespójności w geometrii mogą prowadzić do większej generacji drgań,
- masa i prędkość pojazdu szynowego.

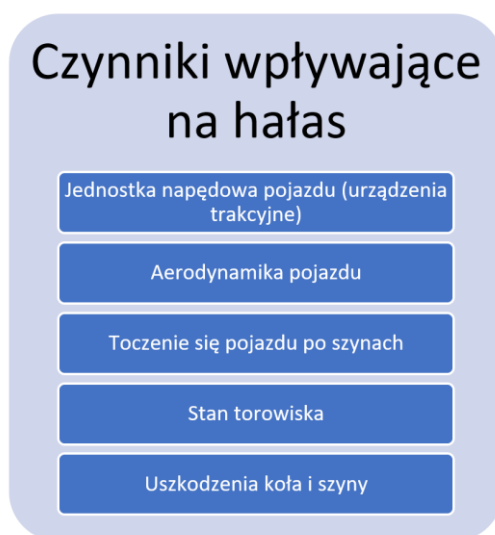


Istnieje kilka czynników, które należy wziąć pod uwagę, analizując hałas generowany przez pojazdy szynowe. Głównym jest rodzaj jednostki napędowej pojazdu szynowego. Zarówno silniki spalinowe, jak i elektryczne generują hałas podczas pracy. Drugim ważnym czynnikiem jest aerodynamika pojazdu, która odgrywa dużą rolę w generowaniu hałasu, szczególnie przy większych prędkościach. Toczenie się pojazdu oraz stan torowiska, w tym nierówności, uszkodzenia czy luzy, ma bezpośredni wpływ na generowany hałas. Dodatkowy hałas mogą powodować także uszkodzenia kół i szyn.

Czynniki wpływające bezpośrednio na drgania i hałas poruszających się pojazdów szynowych zostały zaprezentowane w formie grafiki (rysunek 40 i 41).



Rysunek 40 Czynniki wpływające bezpośrednio na drgania poruszających się pojazdów szynowych. Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 41 Czynniki wpływające bezpośrednio na hałas poruszających się pojazdów szynowych. Źródło: opracowanie własne.

Podsumowując, analiza czynników wpływających na drgania i hałas poruszających się pojazdów szynowych jest kluczowy dla oceny tych zjawisk. Poprzez uwzględnienie tych czynników można dążyć do redukcji drgań i hałasu pojazdów szynowych, co ma znaczenie dla komfortu pasażerów, bezpieczeństwa oraz ochrony środowiska.

Wymienione czynniki mogą mieć duże znaczenie dla wykonywanych pomiarów i wyników badań prezentowanych w pracy, dlatego w celu zniwelowania tych czynników wybierano lokalizacje pomiarowe spełniające te same kryteria.

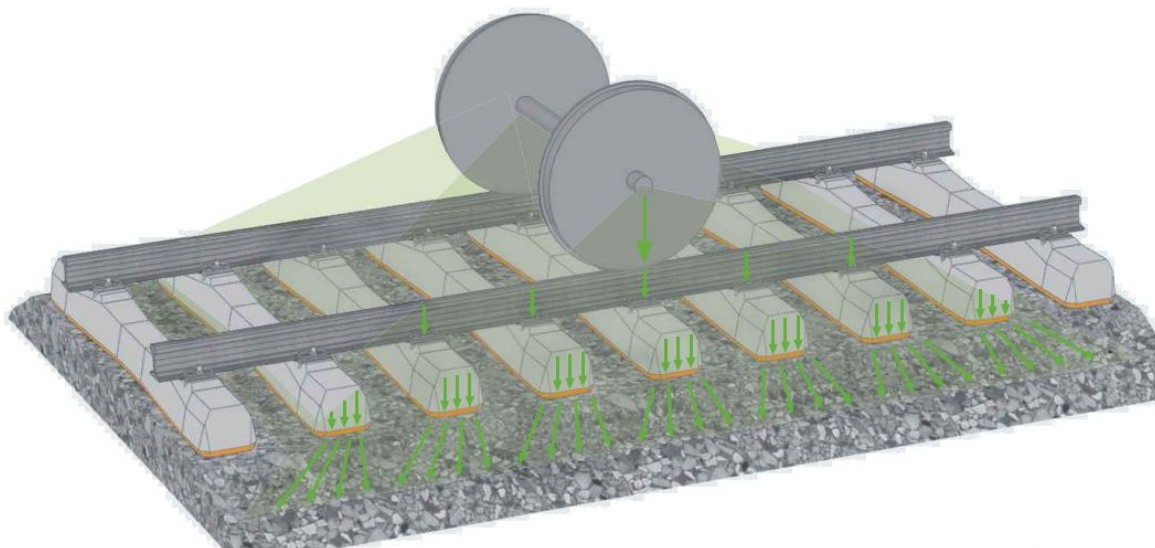
## ROZDZIAŁ 3 TRANSPORT KOLEJOWY- SPECYFIKACJA TECHNICZNA

Specyfikacja techniczna transportu kolejowego jest konieczna, aby móc zrozumieć zjawiska, które mogą towarzyszyć problematyce identyfikacji pojazdów na szlakach kolejowych [15, 20, 31, 119, 122]. Transport kolejowy odgrywa istotną rolę w systemie globalnej komunikacji i handlu. Infrastruktura kolejowa, wraz z infrastrukturą drogową, wodną i lotniczą, stanowi kluczowy element w zapewnianiu efektywnego i bezpiecznego przemieszczania się towarów i osób. Jednakże, infrastruktura i suprastruktura kolejowa nie są pozbawione pewnych wad, z którymi trzeba się zmierzyć. Jednym z problemów związanych z tą infrastrukturą jest wpływ na generowane hałas i drgania.

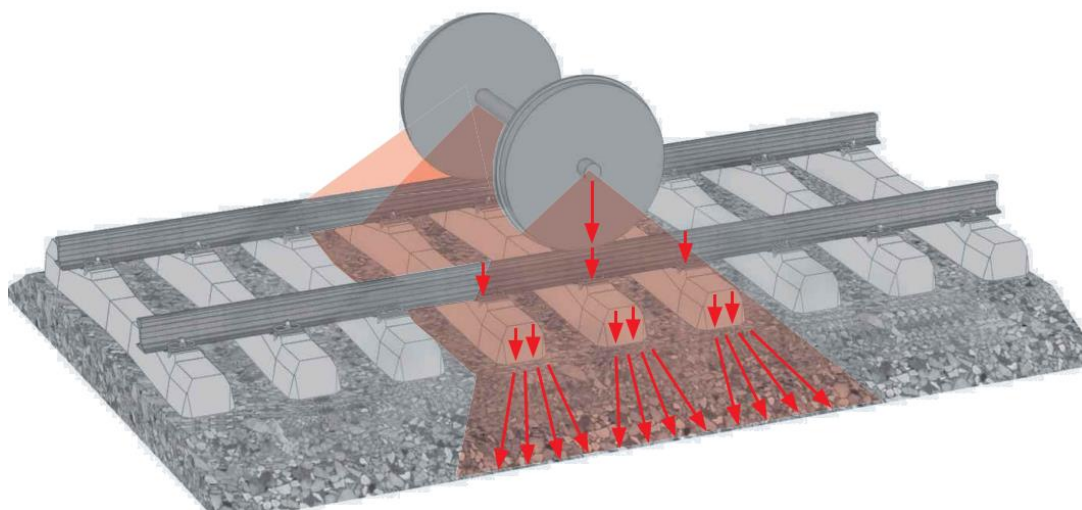
Infrastruktura kolejowa obejmuje tory, podkłady, mosty, tunele i inne elementy, które są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania systemu kolejowego. Drgania są efektem oddziaływania pociągów na torowisko i jego otoczenie. Powstający hałas i drgania mogą wpływać na jakość życia mieszkańców wokół tras kolejowych oraz na zdrowie i komfort podróżujących.

Rodzaj toru i podkładu ma kluczowe znaczenie dla generowanych drgań. Nowoczesne konstrukcje, takie jak sprężysty element pośredniczący pomiędzy podkładem a podsypką (rysunek 42), mogą znacznie zmniejszyć przenoszenie drgań do otoczenia. Odpowiednio zaprojektowane tory i podkłady mogą pomóc w ograniczeniu drgań. W Polsce, w przypadku przytwierdzenia typu K, stosuje się "podkładki podszynowe" wykonane np. z gumy, wprowadzane pomiędzy szynę a płytę żebrową, a dopiero potem szynę mocuje się do podkładu drewnianego. W przypadku podkładów betonowych stosuje się "wkładkę izolacyjną" – tworzywa sztucznego, które pełni także funkcję izolacyjną, chroniącą przed prądami błądzącymi. Wkładka izolacyjna jest umieszczana między płytą żebrową a podkładem betonowym.

W przypadku stosowania podkładów strunobetonowych stosuje się przytwierdzenie sprężyste np. SB-3. Pomiedzy stopą szyny a podkładem i kotwami stosuje się "przekładkę podszynową", która stanowi izolację elektryczną i amortyzuje szynę od podkładu.



Rysunek 42 Rozkład masy ze sprężystymi podporami podkładów. Źródło: Getzner.com



Rysunek 43 Rozkład masy bez sprężystych podpór podkładów. Źródło: Getzner.com

Stan infrastruktury kolejowej również ma duże znaczenie w propagacji drgań. Uszkodzone tory (głównie nierówności powierzchni szyn), lub zły stan mostów i tuneli mogą prowadzić do wzrostu generowanych drgań. Regularne utrzymanie, modernizacja i naprawa infrastruktury są kluczowe dla minimalizacji drgań. Inwestycje w infrastrukturę kolejową mają na celu poprawę stanu technicznego i zwiększenie bezpieczeństwa, co przekłada się również na redukcję propagacji drgań.

Tabor kolejowy, również przyczynia się do generowania hałasu. Starsze pojazdy mogą generować większy poziom hałasu. Nowoczesne lokomotywy i wagony są projektowane z myślą o minimalizacji hałasu, wykorzystując np. tłumiki drgań oraz wstawki hamulcowe nie żeliwne, lecz kompozytowe, które redukują hałas hamowania oraz hałas toczenia kół po szynach.

Innowacyjne rozwiązania technologiczne odgrywają również istotną rolę w ograniczaniu generowanego hałasu i drgań przez infrastrukturę i suprastrukturę kolejową. Kontynuowanie badań i rozwoju w dziedzinie kolejowych technologii tłumienia drgań i hałasu może prowadzić do wprowadzenia bardziej efektywnych i cichszych systemów transportu kolejowego.

Ponadto, istotne jest monitorowanie i ocena poziomów drgań i hałasu generowanych przez transport. Regularne badania poziomów hałasu i drgań pomagają identyfikować obszary wymagające modernizacji i poprawy. Monitoring pozwala na skuteczną kontrolę i dostosowanie środków zaradczych w celu ograniczenia wpływu hałasu i drgań na otoczenie.

### 3.1 INFRASTRUKTURA KOLEJOWA

Poniżej zdefiniowano podstawowe pojęcia związane z nawierzchnią, torem, rodzajem szyn, konstrukcją toru oraz rodzajem stosowanych podkładów.

Droga dla pojazdów szynowych nazywana nawierzchnią kolejową to kompleksowa konstrukcja składająca się z:

- toru kolejowego lub rozjazdu, po którym poruszają się pojazdy szynowe,
- elementów podparcia, takich jak podkłady lub podrozdne,
- elementów łączących i przytwierdzających, takich jak złączki oraz śruby.

Nawierzchnia ta jest przeznaczona do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych na podtorze, podobnie jak w przypadku konstrukcji budowlanych.

Według definicji: tor kolejowy to dwa toki szynowe ułożone w określonej odległości od siebie, stanowiące podstawowy układ nośny nawierzchni kolejowej. [61] Konfiguracja geometryczna tego obszaru jest odpowiednio dostosowana do zapewnienia bezpiecznego poruszania się pociągów przy określonych prędkościach oraz obciążeniach, które są określone przez parametry techniczno-eksploatacyjne. Te parametry ustala dla linii kolejowej zarządca infrastruktury, czyli podmiot odpowiedzialny za zarządzanie infrastrukturą kolejową na zasadach określonych w ustawie o transporcie kolejowym.

W zależności od konstrukcji stosuje się różne nawierzchnie kolejowe. Wyróżnia się między innymi nawierzchnie podsypkowe, stosowane najczęściej oraz nawierzchnie bezpodsypkowe, stosowane głównie w tunelach oraz na mostach i wiaduktach.

Według UTK (Urzędu Transportu Kolejowego) nawierzchnia kolejowa składa się z:

- szyn,
- systemu przytwierdzeń szyn do podkładów,
- łączny szynowych i złączek,
- podkładów,
- podsypki.

Głównym elementem toru kolejowego są szyny. Ich zadaniem jest przenoszenie sił pionowych i poprzecznych i wzdłużnych z kół pojazdów szynowych na podkłady [21, 30, 32, 120, 121]. Szyny odpowiadają za prowadzenie dla zestawów kołowych, umożliwiając im prawidłowy kierunek jazdy. Ponadto są wykorzystywane do przewodzenia prądu zasilającego pojazdy trakcyjne na liniach zelektryfikowanych i są elementem systemu sterowania ruchem kolejowym poprzez stosowanie odcinków izolowanych. Obecnie praktycznie wszyscy zarządcy infrastruktury wykorzystują szyny o szerokostopowym kształcie przekroju, w którym wyróżnia się główkę, szyjkę oraz stopkę.

W Polsce stosowane są trzy rodzaje szyn kolejowych: S42, S49 (49E1) oraz UIC60 (60E1).

*Tabela 6 Charakterystyka techniczna typów szyn. Źródło: poradnik dla komisji kolejowych „Tory, rozjazdy i skrzyżowania torów” UTK 2017.*

Parametr	Jednostka	Typ szyn		
		S49	S42	UIC 60
Masa	kg/m	49,43	42,48	60,34
Wysokość	mm	149	140	172
Standardowe długości	m	30, 25, 15	30, 18, 15	25 120, 90, 60
Szerokość stopki	mm	125	125	150
Szerokość główki	mm	67	68	72
Grubość szyjki	mm	14	13	16,5
Średnica otworów łukowych	mm	30	34	30

Konstrukcja toru kolejowego może przybierać postać klasyczną lub bezстыkową. W przypadku toru klasycznego szyny o standardowej długości są trwale połączone za pomocą złączek i przymocowane do podkładów. Natomiast tor bezстыkowy składa się z kolejnych szyn, połączonych ze sobą trwale przez zgrzewanie elektrooporowe, spawanie termitowe lub łukowe. Długość odcinka toru bezстыkowego nie ma ograniczeń. Odcinki toru z szynami spawanymi lub

zgrzewanymi o długości powyżej 180 m uważa się za tor bezстыkowy. W celu budowy toru bezстыkowego na głównych trasach kolejowych stosuje się szyny długie zgrzewane stacjonarnie [18, 19, 22, 25, 33] Łączenie szyn długich oraz szyn w innych torach powinno być wykonywane za pomocą zgrzewania, spawania termitowego lub inną metodą dopuszczoną przez zarządcę infrastruktury.

W konwencjonalnym ruszcie torowym (zbudowany z podkładów i szyn) szyny opierają się na podkładach, które pełnią funkcję przeniesienia sił nacisku z szyn na podsypkę. Dodatkowo podkłady utrzymują szyny w odpowiedniej szerokości i pochyleniu poprzecznym. Zabezpieczają je także przed przesunięciami podłużnymi i poprzecznymi toru w podsypce. W praktyce kolejowej stosuje się podkłady drewniane, betonowe i (w mniejszym stopniu) stalowe.

Podkłady drewniane wytwarzane są z miękkiego (przede wszystkim sosnowego) lub twardego drewna (dębowego i bukowego). Aby zapewnić długą trwałość, podkłady są impregnowane. W celu zminimalizowania ryzyka pęknięcia podkładów wykonanych z drewna twardego stosuje się opaski z taśmy stalowej.

Podkłady betonowe można podzielić na dwie kategorie:

- podkłady jednoczęściowe o kształcie belki,
- podkłady dwuczęściowe, czyli podkłady żelbetowe złożone z dwóch elementów połączonych ze sobą za pomocą łączników stalowych lub rur z tworzyw sztucznych wypełnionych betonem.

Podkłady jednoczęściowe dzielą się na:

- podkłady żelbetowe wykonane z betonu zbrojonego,
- podkłady strunobetonowe, które również są wykonane z betonu zbrojonego, ale do ich produkcji wykorzystuje się beton z wstępnie naprężonymi prętami stalowymi.

Wpływ torowiska, w tym podsypki i szyn, na emisję drgań jest istotnym aspektem w kontekście infrastruktury kolejowej. Zarówno jakość materiałów, jak i projektowanie torowiska mają wpływ na generowane drgania. Podsypka pełni kluczową rolę w zapewnieniu stabilności torowiska i tłumieniu drgań. Właściwie dobrana i utrzymana podsypka może zmniejszyć przenoszenie drgań na otaczające tereny. Istnieje kilka rodzajów podsypek stosowanych w infrastrukturze kolejowej, takich jak:

- tłuczeń- głównie stosowany,
- żużel wielkopiecowy,
- żwir rzeczny,



- pospółka,
- kliniec.

Szyny kolejowe również mają istotny wpływ na generowane drgania. Dobrej jakości szyny o odpowiedniej sztywności mogą ograniczać przenoszenie drgań na otoczenie. Niektóre czynniki, które wpływają na emisję drgań przez szyny to jej masa oraz profil.

W celu redukcji drgań stosuje się również różnego rodzaju wibroizolatory. Rozróżnia się w rodzaje: STM (Slab Track Mats) oraz SBM (Sub Ballast Mats). Są to elementy zaprojektowane do izolacji drgań i redukcji hałasu generowanego przez infrastrukturę kolejową. Przykład stosowanych wibroizolatorów:

- Wibroizolatory gumowe: To elastyczne komponenty umieszczone między szyną a podkładem, które zmniejszają przenoszenie drgań na podsypkę i otoczenie. Wibroizolatory gumowe skutecznie tłumią drgania, chroniąc przy tym strukturę torowiska.
- Wibroizolatory sprężynowe: Stosuje się je w celu izolacji drgań w miejscach, gdzie występuje szczególnie duża emisja drgań, na przykład w mostach czy tunelach. Wibroizolatory sprężynowe absorbują drgania, zapewniając ochronę konstrukcji i otoczenia. Istnieją trzy typy wibroizolatorów sprężynowych: GSI, EBS, KY2 [83]
- Wibroizolatory typu mata antywibracyjna np. piankowo- gumowa zgodna z DIN 45673-7. Przykładową matę tego typu zaprezentowano na rysunku 45.



Rysunek 44 Wibroizolator piankowo- gumowy firmy DAMTEC-lewy górny róg i maty typu SBM firmy TINES-prawy górny róg, producenta Chemix- lewy dolny róg oraz typu USM- prawy dolny róg.



Stosowanie wibroizolatorów ma na celu ograniczenie wpływu generowanych drgań na otoczenie oraz poprawę komfortu podróżujących. Ich wybór i zastosowanie zależą od specyfiki danego obszaru i warunków eksploatacyjnych.

Konstrukcje przejazdów kolejowych, które stanowią jednopoziomowe skrzyżowania dla transportu szynowego (kolej, tramwaj) i samochodowego (kolejowego, tramwajowego), nie spełniają aktualnych wymagań współczesnego transportu. Wymagania te obejmują konieczność ograniczenia prędkości dla obu rodzajów transportu oraz zmniejszenie negatywnych skutków oddziaływania na otoczenie, takich jak hałas i drgania, generowane przez pojazdy szynowe i samochodowe. Ponadto, istnieje problem związany z przemieszczaniem się płyt betonowych, co prowadzi do degradacji technicznej przejazdu, gdy płyty ulegają przesunięciu i zmieniają się punkty podparcia płyt [130].

Podsumowując, torowisko, w tym podsypka i szyny, ma znaczący wpływ na generowane drgania. Odpowiednio zaprojektowane i utrzymane torowisko może ograniczyć emisję drgań na otaczające tereny. Ponadto, stosowanie wibroizolatorów, takich jak wibroizolatory gumowe i sprężynowe, jest ważnym narzędziem w redukcji drgań i poprawie komfortu podróżujących oraz jakości życia mieszkańców wokół tras kolejowych.

### 3.2 SUPRASTRUKTURA TRANSPORTU KOLEJOWEGO W ASPEKcie PODZIAŁU POCIĄGÓW TOWAROWYCH

Drugim czynnikiem bezpośrednio odpowiedzialnym za emisję wibroakustyczną są pojazdy szynowe. Rozróżniając rodzaje pociągów towarowych, uwzględnia się przede wszystkim typy lokomotyw i wagonów. Rodzaje pociągów towarowych charakteryzujemy ze względu na ładunek (wielkość, masę), zasięg (lokalny, międzynarodowy) oraz rodzaj użytych lokomotyw. Najczęściej wyróżnia się następujące rodzaje pociągów towarowych [24, 26, 27, 149, 118]:

- do przewozu ładunków niemasowych (TN) – Kolejowe transporty ładunków niemasowych odnoszą się do składów z drobnicowym towarem. W większości sytuacji korzysta się z wagonów typu platforma przystosowanych do przewozu kontenerów.
- do przewozu ładunków masowych (TM) – są istotne dla funkcjonowania przewozów towarowych i kluczowe pod względem ilości przewożonego ładunku. Podstawowym wagonem stosowanym w tego typu przewozach jest czteroosiowy wagon – węglarka budowy normalnej. Jest wykorzystywany do transportu węgla, ale także żwiru, piasku, materiałów sypkich, rolnych plonów, maszyn i urządzeń, oraz innych pojedynczych jednostek ładunkowych. Do kategorii ładunków masowych można również zaliczyć ciecze, gazy oraz płynne materiały przewożone w zbiornikach;

- bezpośrednie (TOB) – Najpowszechniej spotykane na polskiej sieci kolejowej są konwoje składające się z identycznych typów wagonów ładunkowych, których celem jest transport jednorodnych ładunków w dużych ilościach.;
- grupowe (pośrednie, TOP) – różnią się kilkoma czynnikami od pociągów bezpośrednich. Przede wszystkim istnieje w tym przypadku pojęcie zgrupowania wagonów według miejsca ich przeznaczenia;
- zbiorowe (TZ) – pociągi te są uruchamiane po przybyciu na stację manewrową lub rozrządową, mając na celu dostarczenie ładunku na wagonach do poszczególnych odbiorców;
- zdawcze w obrębie węzła (TKW) i na linii (TKL) – Są uruchamiane w zależności od zapotrzebowania, harmonogramu kursów oraz przepustowości trasy;
- bocznicowe (TB) – obsługują bocznicę szlakowe;
- kopalniane (TK) – mają za zadanie dowózkę surowców z kopalń do rejonów stacji rozrządowych;
- do przewozów intermodalnych – Często opisywane jako transport drobnicowy, co wynika z typowego wykorzystania kontenerów jako jednostek ładunkowych. Dodatkowo, istotnym aspektem jest zdolność do przewozu przyczep samochodowych lub całych ciężarówek.


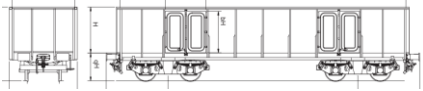
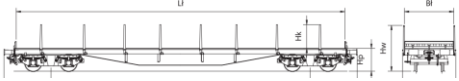
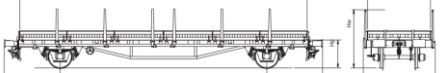
Zgodnie z definicją podaną w Katalogu Wagonów PKP CARGO [67], wagon towarowy to pojazd kolejowy stworzony do przewozu ładunków. Każdy wagon towarowy ma inną budowę nadwozia, podwozia oraz możliwość poruszania się po szynach o odmiennych rozstawach. Te cechy tworzą zbiór parametrów, które definiują rodzaje wagonów towarowych. Wagony są klasyfikowane w serie według ich właściwości techniczno-użytkowych. W obrębie jednej serii mogą występować wagony o odmiennych typach konstrukcyjnych, czyli wykonane zgodnie z tą samą dokumentacją techniczną. Różnią się one od innych serii szczegółami konstrukcyjnymi oraz zastosowaniem odmiennych materiałów. Katalog ten podaje również podział wagonów ze względu na ich rodzaj:

- wagony kryte o typie standardowym (G) – są to wagony z zamkniętymi nadwoziami w formie skrzyni, wyposażone w drzwi ładunkowe oraz otwory do ładowania i wentylacji. Służą one do transportu ładunków wrażliwych na wpływy atmosferyczne, takich jak drobnica, meble, paletyzowane ładunki oraz inne towary, które muszą być przewożone w zamkniętym wagonie;

- wagony węglarki o typie standardowym (E) – to wagony z otwartymi nadwoziami w formie skrzyni, wyposażone w drzwi w bocznych ścianach i czasami w odchylnych ścianach czołowych. Są one przeznaczone do przewozu materiałów sypkich, takich jak węgiel, ruda, żwir, ziemniaki, buraki itp., a także maszyn, urządzeń oraz innych jednostkowych ładunków;
- wagony platformy typu normalnego (R i K) – wagony o dużych rozmiarach powierzchni ładunkowej, bez ścian bocznych, z niskimi burtami i kłonicami. Są przeznaczone do transportu towarów takich jak dłużycy (rury, profile hutnicze, drewno itp.), ładunków paletowych, maszyn itp.

W tabeli 7 przedstawiono najczęściej używane rodzaje wagonów:

*Tabela 7 Podział wagonów towarowych o budowie normalnej wg kategorii oraz najczęściej występującej jednostce. Źródło: opracowanie własne na podstawie Katalogu Wagonów PKP CARGO 2019*

Rodzaj (seria)	Długość [mm]	Masa [kg]	Rozstaw osi czopów skrętu [mm]	Rysunek poglądowy
Gbs (G)	14020	15000	8500	
Eaos (E) – 430Wa	14040	21200	8500	
Rs (R)	19900	23500	14600	
Kgns (K)	13860	14500	9000	

Wagony z budową przystosowaną do specjalistycznych zastosowań:

- platformy typu specjalnego (S) – wagony o specjalnej konstrukcji przystosowane do przewozu kontenerów, pojazdów, szyn kolejowych oraz dłużyc;
- chłodnie (I) – wagony z hermetycznie zamkniętym pudłem, izolowane termicznie i zwykle wyposażone w urządzenia chłodzące. Są przeznaczone do transportu łatwo psujących się produktów spożywczych oraz innych towarów wymagających przewozu w niskiej temperaturze;
- specjalne (U) – wagony o bardzo zróżnicowanych typach nadwozia, w tym: z otwieranym dachem, cysterny do przewozu płynów (takich jak produkty naftowe,

produkty chemiczne, płynna siarka, skroplone gazy), do przewozu materiałów sypkich oraz wagony do przewozu ładunków o przekroczonej skrajni;

- kryte o typie specjalnym (H) – to wagony z zamkniętymi nadwoziami w formie skrzyni, wyposażone w wewnętrzne przegrody, przeznaczone do przewozu drobnicy i ładunków na paletach lub w pojemnikach;
- węglarki o typie specjalnym (F) – to wagony w formie otwartej skrzyni z urządzeniami do wyładunku grawitacyjnego.

W tabeli 8 przedstawiono najczęściej występujące rodzaje wagonów z wyżej wymienionych kategorii:

*Tabela 8 Podział wagonów towarowych o budowie specjalnej wg kategorii oraz najczęściej występującej jednostce. Źródło: opracowanie własne na podstawie Katalogu Wagonów PKP CARGO 2019.*

Rodzaj (seria)	Długość [mm]	Masa [kg]	Rozstaw osi czopów skrzętu [mm]	Rysunek poglądowy
Smms (S)	12340	20000	7000	
Ihs (I)	11740	16500	6600	
Ugpps (U)	12340	13500	8200	
Habills (H)	19900	30000	14860	
Falns (F)	13500	25500	8160	

### 3.3 SUPRASTRUKTURA TRANSPORTU KOLEJOWEGO – PODZIAŁ POCIĄGÓW PASAŻERSKICH

Od 1989 roku rodzaje pociągów pasażerskich używanych w Polsce uległy znaczącej zmianie. Uwolnienie rynku kolejowego dla przewoźników innych niż PKP spowodowało restrukturyzację w funkcjonowaniu spółek kolejowych, co zaowocowało powstaniem nie tylko prywatnych przewoźników oferujących usługi przewozowe, ale również różnych podpodziałów wewnątrz tych spółek. Kiedy jest mowa o rodzajach pociągów pasażerskich, zazwyczaj mamy na myśli potoczne podziały na regionalne i pospieszne, jednak sytuacja na kolei jest znacznie bardziej skomplikowana.

Tradycyjny podział pociągów pasażerskich:

- EuroCity (IC), InterCity (ICC) – tzw. pociągi ekspresowe,
- pospieszne (D – dawniej P i M),
- osobowe (O) oraz osobowe przyspieszone.

Dodatkowo, zgodnie z regulaminem PKP S.A. z 2016 roku, poruszający się po infrastrukturze PKP PLK skład musi należeć do następujących kategorii:

- EC – EuroCity,
- EN – EuroNight,
- EI – InterCity Express,
- EX – Ekspresowy,
- MP – międzywojewódzki pospieszny,
- MM – międzynarodowy pospieszny,
- RP – wojewódzki krajowy pospieszny,
- RO – wojewódzki krajowy osobowy.

Z uwagi na charakter kursowania, pociągi pasażerskie dzielą się na:

- pociągi stałe, kursujące zgodnie z ustaleniami w służbowym rozkładzie jazdy,
- pociągi niestałe, do których należą pociągi dodatkowe (przewidziane w rozkładzie jazdy, uruchamiane w razie konieczności) oraz nadzwyczajne (nieprzewidziane w rozkładzie jazdy, uruchamiane według specjalnego rozkładu).

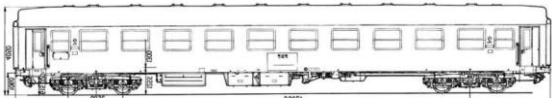
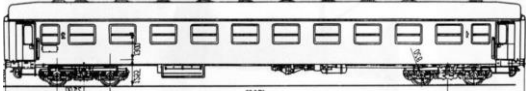
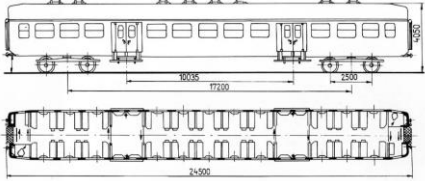

Ze względu na mnogość stosowanych wagonów pasażerskich na polskich torach (często użytkowane są również wagony pochodzenia zagranicznego) poniżej przytoczono przykładowe zestawienia składów poruszających się po liniach kolejowych aglomeracji Śląskiej – ponieważ badania odbywały się w jej obrębie:

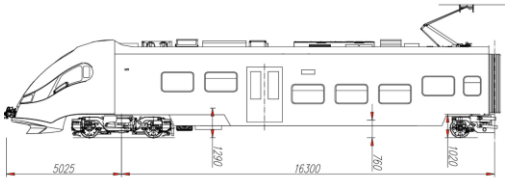
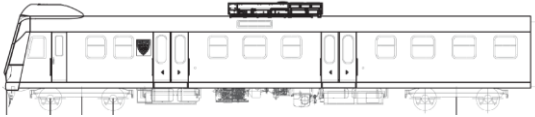

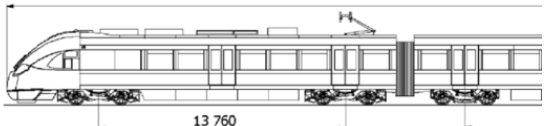
Tabela 9. Zestawienia składów na podstawie pociągów obsługiwanych przez PKP Intercity na rok 2022/2023 oraz danych z PKP.PL. Dostęp IV. 2023

Nazwa	Lokomotywa	Wagony
Moravia (IC- EI)	EU07	Admn-145A, Wrmouz 406A, Bdmnu 154A
Silesia (IC-EI)	EP09	Bmz (CD), Bdpee (CD), Admn-145A
Galicja (TLK- RP)	EU07	Bmz (CD), AB(CD),
Roztocze (TLK-RP)	EU07	B (CD), AB(CD),
Hetman (IC-EI)	EP09	Bdmnu (Z2B), Anouz 112A
RO -KŚ		EN76
EIP		ED250
RO- KŚ		35WE 'impuls'
PKP-IC		ED161
RO- KD		ED78
RO-KD		48We
RO-Polregio		ED72

W tabeli 10 zawarto najczęściej występujące rodzaje wagonów pasażerskich oraz elektrycznych zespołów trakcyjnych zestawionych w Polsce:

Tabela 10. Przykłady reprezentatywne wagonów pasażerskich oraz EZT Źródło: opracowanie własne.

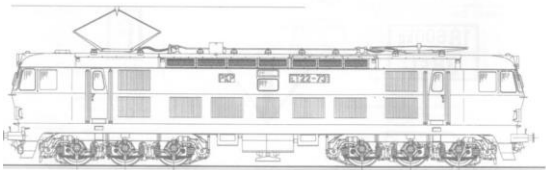
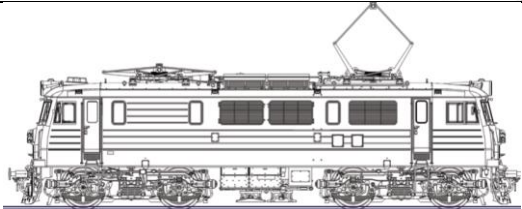
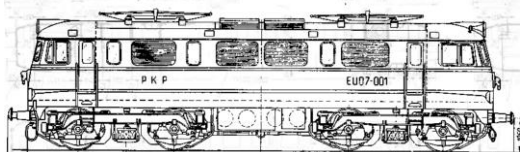
Rodzaj (seria)	Długość [mm]	Masa [kg]	Rozstaw osi czopów skreću [mm]	Rysunek poglądowy
111A i modernizacje	24500	39500	17200	
112A	24500	33500	17200	
120A	24500	39500	17200	
HCP Z2 (144A itp.)	26400	45000	17200	

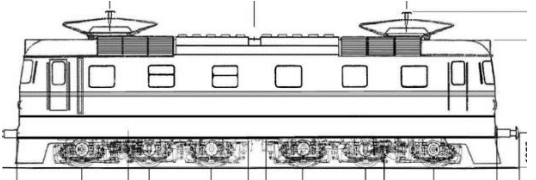
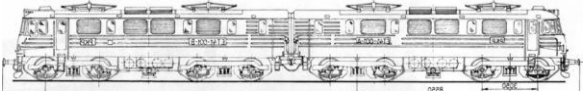
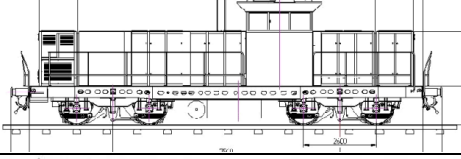
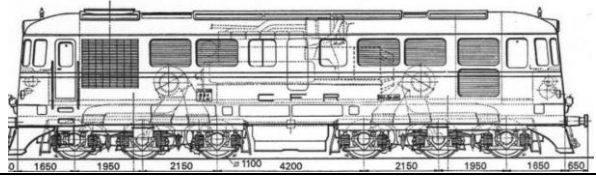
EN76	75250	134500	16300	
EN57	64970	12600	14900	
ED72A	86840	11600	15040	
20WE	126000	240000	13760	

### 3.4 SUPRASTRUKTURA TRANSPORTU KOLEJOWEGO - PODZIAŁ LOKOMOTYW

Zgodnie z opracowaniem „PKP – Tabor Kolejowy 2019”, operatorzy transportu pasażerskiego mieli w roku 2019 do zagospodarowania 423 lokomotywy oraz 1442 zespoły trakcyjne. Wagonów z miejscami siedzącymi było trochę powyżej 2000. W przypadku przewoźników towarowych, liczba lokomotyw na prąd wynosiła 2146, natomiast zasilanych paliwem 1509. Najwięcej było węglarek – prawie 61,5 tysiąca. W tabeli 7 przedstawiono najczęściej stosowane i zestawiane lokomotywy elektryczne oraz spalinowe w Polsce:

Tabela 11. Przykłady reprezentatywne lokomotyw używanych na polskiej sieci dróg kolejowych. Źródło: opracowanie własne.

Rodzaj (seria)	Długość [mm]	Masa [kg]	Rozstaw Osi czopów skrzytu [mm]	Rysunek poglądowy
ET22	19240	120000	8550	
EU07	15915	80000	8550	
EP07	15915	83000	8550	

ET23 (CD 181)	18800	124000	8000	
ET41	31860	167000	8550 (27215)	
SM42	14240	70000	7500	
ST44	17550	116500	8500	

Należy zauważyć, że przedstawiono najczęściej spotykane jednostki poruszające się po polskich torach. Jednak w ostatnich latach, ze względu na wzrost liczby nowo powstałych prywatnych spółek przewozowych, można zauważyć importowany tabor kolejowy z krajów sąsiadujących oraz krajów Beneluksu.



## ROZDZIAŁ 4. PROBLEM BADAWCZY, CEL, TEZA I ZAKRES PRACY.

Pozycjonowanie badań własnych na temat identyfikacji poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych obejmuje trzy główne obszary tematyczne: identyfikację pojazdów, badania wibroakustyczne oraz badania dotyczące porównania sygnałów drganiowych i hałasu.

Jako problem badawczy zdefiniowano zagadnienie możliwości zidentyfikowania pojazdu szynowego na podstawie charakterystycznych drgań i hałasu, generowanych podczas jego ruchu. W związku z powyższym przyjęto następujące hipotezy badawcze:

1. Synchroniczna rejestracja sygnałów drganiowych i akustycznych poszerza ilość użytecznych informacji wspomagających proces klasyfikacji.
2. W sygnałach wibroakustycznych znajdują się składowe informacyjne umożliwiające identyfikację i klasyfikację poruszającego się pojazdu szynowego.

Umożliwiło to postawienie następującej tezy pracy: **istnieje możliwość rozpoznania rodzaju przejeżdżającego pojazdu szynowego na podstawie analizy obrazów sygnałów wibroakustycznych.**

W konsekwencji zdefiniowano następujący cel pracy: **opracowanie metody identyfikacji rodzaju przejeżdżającego pojazdu szynowego przy wykorzystaniu sygnałów drganiowych i akustycznych.**

Zakres badań obejmował:

1. opracowanie koncepcji planu badań i skompletowanie toru pomiarowego,
2. opracowanie badań wstępnych dotyczących porównania sposobu mocowania akcelerometrów do szyny,
3. wykonanie pomiarów próbnych w warunkach rzeczywistych oznaczonych kolejno w pracy jako pomiary C i D,
4. wykonanie pomiarów właściwych w warunkach rzeczywistych oznaczonych kolejno w pracy jako pomiary A i B,
5. opracowanie metody przetwarzania sygnałów wibroakustycznych,
6. analiza wyników badań,
7. skompletowanie wyników i przygotowanie koncepcji metody identyfikacji pojazdów szynowych,
8. walidację metody.

Całość badań prowadzona była w okresie czasowym 5 lat.

## ROZDZIAŁ 5. METODA BADAŃ, ZAŁOŻENIA I PLAN BADAŃ

### 5.1 UZASADNIENIE METODY BADAŃ

Metoda naukowa jest strategią badawczą, która cechuje się jednocześnie konkretnymi czynnościami procesowymi (procedurą badawczą) oraz wykorzystaniem odpowiednich narzędzi badawczych. Kluczowym aspektem metody naukowej jest harmonizacja sposobu postępowania z zamierzonym celem badań.

Według informacji podanych [97], metoda badawcza musi spełniać poniższe kryteria:

- jasności,
- jednoznaczności,
- ukierunkowania na cel,
- skuteczności dążącej do określonego celu,
- płodności, czyli być korzystna dla nauki,
- niezawodności poprzez osiągnięcie zamierzonego celu
- ekonomiczności w minimalizowaniu zasobów i czasie.

Zastosowana w niniejszej rozprawie doktorskiej metoda badawcza spełnia wszystkie powyższe wymogi:

- **Metoda badawcza jest jasna.** Wytyczne do pomiarów określono na początku realizacji pracy. Badania obejmowały pomiar drgań w trzech osiach oraz pomiar hałasu przejeżdżającego pojazdu w ściśle określonych warunkach pogodowych i środowiskowych.
- **Metoda badawcza jest jednoznaczna.** Nie stosowano innych rodzajów pomiarów ani nie zmieniano warunków pomiarowych w trakcie badania – chyba że zostało to zaznaczone w analizowanym przypadku.
- **Metoda jest ukierunkowana na konkretny cel.** Realizacja pomiarów służyła analizie sygnałów wibroakustycznych w celu identyfikacji przejeżdżających pojazdów.
- **Metoda jest skuteczna.** Zamierzona metoda badawcza przyniosła satysfakcjonujące efekty w postaci licznych wyników.
- **Metoda jest owocna.** Dzięki przeprowadzonym badaniom zauważono dodatkowe możliwości zastosowania wybranej metody w przemyśle oraz w usprawnieniu i rozbudowaniu istniejących systemów pomiarowych. Może ona także posłużyć do innych celów niż identyfikacja przejeżdżającego pojazdu, np. identyfikacji uszkodzeń w pojeździe kolejowym.

- **Metoda jest niezawodna.** Dokonane pomiary odbywały się w różnych warunkach pogodowych i lokalizacjach (z uwzględnieniem początkowych wytycznych), dzięki czemu uzyskano rezultaty nieodznaczające się negatywnym wynikiem w postaci niezrealizowanego celu.
- **Metoda jest ekonomiczna.** System pomiarowy opierał się na gotowych elementach dostępnych na rynku bez konieczności tworzenia nowego systemu pomiarowego. Uniwersalność metody pozwala na swobodne stosowanie różnego rodzaju akcelerometrów trójosiowych lub jednoosiowych z odpowiednią przystawką oraz mikrofonów rejestrujących hałas.

Na podstawie definicji [4] można wyróżnić metody obserwacyjne, eksperymentalne, monograficzne, badania dokumentów, indywidualnych przypadków, sondażu diagnostycznego, analizy i krytyki piśmiennictwa, analizy i konstrukcji logicznej, statystycznej, heurystycznej oraz symulacji komputerowej. Autor wykorzystał kilka z wymienionych wyżej metod badawczych:

- **Metodę obserwacyjną** – rejestrowano określone fakty i ujmowano je w związki oraz wzajemne zależności, które następnie poddawano interpretacji. Proces ten był ciągły i celowy.
- **Metodę eksperymentalną** – celowo dokonywano analizy sygnałów wibroakustycznych przy pomocy różnych dostępnych metod badawczych oraz obserwowano zachodzące zmiany i wyciągano z nich hipotezy robocze oraz dokonywano na bieżąco ustaleń co do dalszych kierunków zmian.
- **Metody krytyki piśmiennictwa** – poprzez ciągły przegląd aktualnego stanu wiedzy na przyjęty w niniejszej pracy temat dokonywano analizy literaturowej i odnoszono się do istniejących metod badawczych.
- **Metody analizy i konstrukcji logicznej oraz statystycznej** – dzielono problem badawczy na czynniki szczegółowe i dokonywano ich analizy indywidualnie, ostatecznie porządkując informacje oraz dane poprzez łączenie i formułując nowe, optymalne rozwiązanie danego problemu badawczego.
- **Metoda symulacji komputerowej** – wynika bezpośrednio z wykorzystanego oprogramowania MATLAB, które umożliwiało wspomaganie komputerowe.
- **Metoda heurystyczna** – w niniejszej pracy szukano niewykorzystywanych dotychczas metod do osiągnięcia celu. Ujawniono przy tym nowe fakty i związki zachodzące między nimi w rzeczywistości.

Autor opracował dwie metody pomiarowe: stacjonarną, która polega na skontrolowaniu wpływu mocowania czujników na wyniki pomiarów, oraz niestacjonarną, która stanowiła główną część badań. Celem tej drugiej było dokonanie pomiarów przejeżdżającego pojazdu szynowego. W tym celu opracowano specjalną metodę badawczą, która zakładała synchroniczną rejestrację sygnałów akustycznych w bezpośrednim sąsiedztwie toru oraz drgań w trzech kierunkach, bezpośrednio na szynie. Sygnały zostały zarejestrowane w środowisku LabVIEW i przetworzone w oprogramowaniu MATLAB.

## 5.2 ZAŁOŻENIA METODY BADAWCZEJ

Założenia do metody badawczej oparto na trzech filarach: synchronicznym pomiarze sygnałów drganiowych i akustycznych, systemie pomiarowym, który nie powinien wpływać na bezpieczeństwo ruchu kolejowego oraz opracowanej metodzie badań, gwarantującej powtarzalność wyników. Uznano, że są one kluczowe dla przeprowadzenia skutecznych badań związanych z identyfikacją poruszających się pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych.

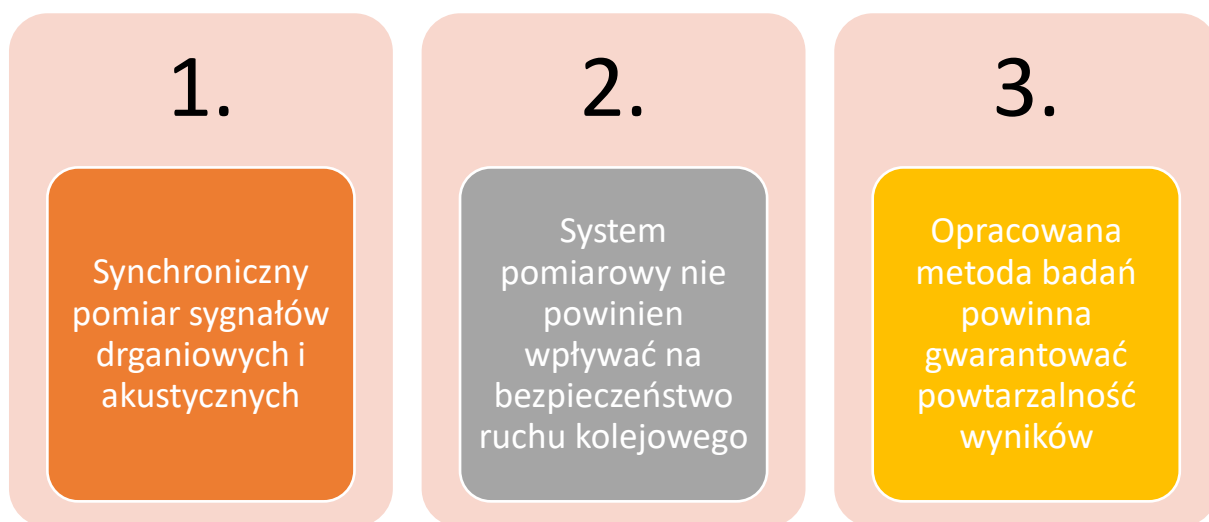
Pierwsze założenie, dotyczące synchronicznego pomiaru sygnałów drganiowych i akustycznych, jest bardzo istotne dla uzyskania dokładnych wyników identyfikacji pojazdów w aspekcie pojemności informacyjnej sygnału. W celu uzyskania synchronicznych pomiarów konieczne jest zastosowanie odpowiedniego systemu pomiarowego, który pozwoli na jednoczesny odczyt sygnałów z różnych źródeł.

Drugie założenie, odnoszące się do systemu pomiarowego, który nie powinien wpływać na bezpieczeństwo ruchu kolejowego, jest arcyważne dla zapewnienia bezpieczeństwa zarówno pracowników kolejowych, jak i pasażerów, a także ciągłości przewozów bez konieczności ingerowania w infrastrukturę. W tym celu konieczne jest zastosowanie systemu pomiarowego, który nie wpłynie na pracę urządzeń i systemów bezpieczeństwa kolejowego.

Trzecie założenie, mówiące o powtarzalności wyników, jest strategiczne dla zapewnienia jakości badań oraz możliwości ich porównywania. Dla osiągnięcia tego założenia bardzo ważne jest zastosowanie precyzyjnego systemu pomiarowego oraz skrupulatnej analizy danych, w tym dokonywanie pomiarów w różnych punktach pomiarowych, z zachowaniem odpowiednio wcześniej przygotowanych reguł.

Powyższe założenia są ściśle ze sobą powiązane i muszą być spełnione w celu uzyskania prawidłowych wyników badań związanych z identyfikacją poruszających się pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych. Metoda badawcza oparta na tych założeniach pozwala

uzyskać dokładne i powtarzalne wyniki, co jest niezwykle ważne w kontekście dalszego rozwoju tej metody badawczej oraz możliwości wykorzystania wyników badań w praktyce.



Rysunek 45. Założenia metody badawczej. Źródło: opracowanie własne.

### 5.3 PLAN BADAŃ

Plan badań identyfikacji poruszających się pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych uwzględniał wiele czynników, takich jak wybór odpowiedniego miejsca pomiarowego, sprzętu pomiarowego oraz dokładnych procedur badawczych. Przykładowe fotografie z miejsc pomiarowych przedstawiono na rysunkach 48-53.



Rysunek 46. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne.

Jednym z kluczowych elementów planowania badań był wybór właściwego miejsca pomiarowego, spełniającego określone wymagania. Miejsce pomiarowe powinno spełniać kilka

ważnych kryteriów, które wpłyną na jakość uzyskanych wyników badań. Po pierwsze, miejsce to powinno zapewniać odpowiednią przepustowość szlaku kolejowego, pozwalającą na uzyskanie odpowiedniej ilości danych potrzebnych do przeprowadzenia identyfikacji pojazdów.



*Rysunek 47. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne.*

Po drugie, miejsce to powinno znajdować się odpowiednio daleko od zabudowań oraz zieleni, aby zapewnić niski poziom szumu tła pomiarowego. W przypadku badań związanych z identyfikacją poruszających się pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych, szum tła może wpłynąć na wyniki badań i je zniekształcić.



*Rysunek 48. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne.*

Po trzecie, miejsce pomiarowe powinno umożliwiać uzyskanie powtarzalności wyników, wynikającej z takich samych podkładów oraz typu łączenia szyn oraz dobrego stanu technicznego



torowiska. Powtarzalność wyników jest kluczowa dla uzyskania dokładnych i wiarygodnych wyników.



Rysunek 49. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne.

Ważne jest także, aby miejsce pomiarowe spełniało wymagania dotyczące bezpieczeństwa pomiarów, nie stanowiąc niebezpieczeństwa na kolei dla osoby wykonującej pomiary oraz dla sprzętu pomiarowego.

Wszystkie te czynniki muszą być uwzględnione w planie, aby zapewnić odpowiednie warunki do przeprowadzenia skutecznych i wiarygodnych badań dotyczących tematu pracy.

Tabela 12. Wykonane serie pomiarów próbnych. Źródło: opracowanie własne.

	<b>Pomiar C</b>	<b>Pomiar D</b>
Data	19.03.2018 r.	16.04.2018 r.
Miejsce	Imielin	Chełm Śląski
Warunki pogodowe [°C]	-5 stopni Celsjusza, brak opadów	+20 stopni, brak opadów
Czy zastosowano akcelerometr i wykonano pomiary drgań w trzech osiach?	NIE (jedna oś)	TAK
Czy zamontowano mikrofon i dokonano pomiarów hałasu?	TAK	NIE
Czy pomiary były wykonywane synchronicznie?	NIE	NIE

Tabela 13. Wykonane serie pomiarów docelowych. Źródło: opracowanie własne.

	Pomiar A	Pomiar B
Data	24.11.2017 r.	4.06.2018 r.
Miejsce	Opole-Żerków	Imielin
Warunki pogodowe [°C]	+6, brak opadów	+20, brak opadów
Czy zastosowano akcelerometr i wykonano pomiary drgań w trzech osiach?	TAK	TAK
Czy zamontowano mikrofon i dokonano pomiarów hałasu?	TAK	TAK
Czy pomiary były wykonywane synchronicznie?	TAK	TAK

Rejestracja pomiarów odbywała się zgodnie z wcześniej ustalonym schematem postępowania i harmonogramem. W pierwszej kolejności należało ustalić miejsce pomiarowe spełniające wyżej wymienione warunki i założenia. Potem konieczne było uzyskanie zgody zarządcy infrastruktury na wkroczenie w skrajnię kolejową i ustawienie przyrządów pomiarowych. Zgody wydawane są tylko w pojedynczych przypadkach, co wymusiło zawężenie możliwości pomiarowych do kilku prób. Udało się zrealizować dwa pełne i dwa niepełne cykle pomiarowe na wybranych odcinkach szlaków kolejowych.



Rysunek 50. Okolice miejsca pomiarowego A. Źródło: Google Maps. lokalizacja: SSP km 104.230 .

Plan badań obejmował rejestrację pojazdów szynowych na działających szlakach kolejowych wraz z synchroniczną rejestracją hałasu i drgań. Obejmowało to zamontowanie akcelerometru trójosiowego do szynki szyny oraz mikrofonu w skrajni kolejowej. Szczegółowy opis zastosowanego systemu pomiarowego znajduje się w rozdziale 5.4.





Rysunek 51. Miejsce pomiarów B i C. Źródło: opracowanie własne.

Podczas pomiarów nawiązywano łączność z dyżurnym ruchu, któremu sygnalizowano wkroczenie na skrajnię oraz meldowano moment wejścia i zejścia z punktu pomiarowego.

#### 5.4 SYSTEM POMIAROWY – ZAŁOŻENIA I DOBÓR DOCELOWYCH ELEMENTÓW SYSTEMU

Na etapie prac wstępnych przeanalizowano wpływ sposobu mocowania czujnika na rejestrowane sygnały drgań. Zbadane sposoby montażu akcelerometrów do szyny było istotne z punktu widzenia dalszych analiz oraz założeń dotyczących konfiguracji toru pomiarowego. Zestawy akcelerometrów zwykle umożliwiają dwa sposoby montażu – za pomocą magnesu zawartego w zestawie lub połączenia gwintowanego. Nie zaleca się montażu za pomocą kleju i wosku pszczelego, ale brakuje jasnych instrukcji dotyczących ich użycia z nowoczesnymi czujnikami.

Czujniki można zamontować na powierzchni za pomocą:


- śruby gwintowanej,
- wosku pszczelego,
- kleju,

- śrub izolacyjnych,
- magnezu.

W ramach badań wstępnych porównano trzy sposoby mocowania: wosk, klej i mocowanie magnetyczne.

Do pomiarów testowych zastosowano dwa zsynchronizowane moduły akwizycji danych: Dewesoft Sirius 8-kanałowy rejestrator danych High Speed łączący ze sobą wysokie pasmo pomiarowe wraz z akwizycją danych dochodzącą do 1 MS/sek (mega próbek/sekundę) przy 16 bitach.

*Tabela 14. System pomiarowy Sirius. Źródło: opracowanie własne na podstawie dewesoft.com.*

Nazwa	SIRIUS
Typ DAC	24-bitowy delta-sigma
Częstotliwość próbkowania	jednocześnie 200 kS/sek
Ilość kanałów	8
Szerokość pasma wyjścia analogowego	40 kHz
Dokładność	$\pm 0,1\%$ odczytu $\pm 0,02\text{ V}$
Pełna skala	$\pm 10\text{V}$
Zdjęcie poglądowe	

Do pomiarów wykorzystano następujące urządzenia pomiarowe: trójosiowy akcelerometr Endevco 65-10R o czułości 10 mV/g oraz młotek impulsowy Dytran 5800B3 z trzema różnymi nasadkami.

Tabela 15. System pomiarowy Sirius. Źródło: opracowanie własne na podstawie endevco.com.

Nazwa	Endevco 65-10R	Dytran 5800B3
Typ wyjścia	Napięcie (IEPE)	IEPE
Czułość	10 mV/g   1.02 mV/(m/sec <sup>2</sup> )	11 mV/N
Maksymalny zakres pomiarowy	500 g pk   4905 m/sec <sup>2</sup> pk	448 N
Maksymalna częstotliwość	(±5%) 10 kHz	75 kHz (częstotliwość rezonansowa)
Waga [g]	5	100
Liczba osi	3	-
Zdjęcie poglądowe		

Jak pokazano na rysunku 52, czujniki zostały zamontowane na głowce szyny (rysunek 53). Zastosowano trzy różne sposoby montażu – воск, klej i mocowanie na magnes.



Rysunek 52. Akcelerometry Endevco zamontowane na oczyszczonej bocznej ścianie głowki szyny. Kolejno (od lewej): montaż na klej cyjanoakrylowy, воск pszczeli i fabryczne akcesorium czujników – magnes. Źródło: opracowanie własne.

Zamontowane czujniki znajdują się na krawędzi szyny, a uderzenia młotkiem modalnym nastąpiły w trzech miejscach na badanym odcinku szyny. Pierwszy znajdował się 6 cm od czujników, na szczycie głowki szyny, kolejne odpowiednio 15 i 30 cm. Dołączone do zestawu z młotkiem modalnym końcówki o różnej charakterystyce twardości – z gumy, plastiku i stopu metali pozwoliły uzyskać łącznie ponad 90 wyników.

Podsumowując wyniki badań, można zauważyć znaczne różnice w przebiegach czasowych zarejestrowanych sygnałów w zależności od sposobu montażu czujnika. Różnice w wartościach  $P_{max}$  do kilkudziesięciu procent, największe przy zastosowaniu twardej końcówki na każdą oś.



Podczas analizy wartości  $P_{\max}$  zauważalna jest tendencja do rezonansu czujnika zamontowanego z magnesem przy nacisku twardą końcówką młotka, w szczególności w kierunku osi pomiarowej Z. Wykazano również różnice wartości RMS sięgające kilkudziesięciu procent.

W przypadku osi X i Y klej wykazuje anomalie dla najsilniejszych wymuszeń. W przypadku osi Y zarówno dla analiz RMS, jak i  $P_{\max}$  wartości są porównywalne. Oś Z charakteryzuje się odmiennymi wartościami dla mocowania magnesem od pozostałych i tendencją do pojawiania się zjawiska rezonansu przy najsilniejszych wymuszeniach. Montaż z wykorzystaniem wosku charakteryzuje się najwyższą odpornością na zakłócenia sygnału. Nie ma istotnych różnic w maksymalnych pikach dla żadnego z analizowanych obiektów badawczych. Należy zaznaczyć, że testy przeprowadzono w temperaturze pokojowej.



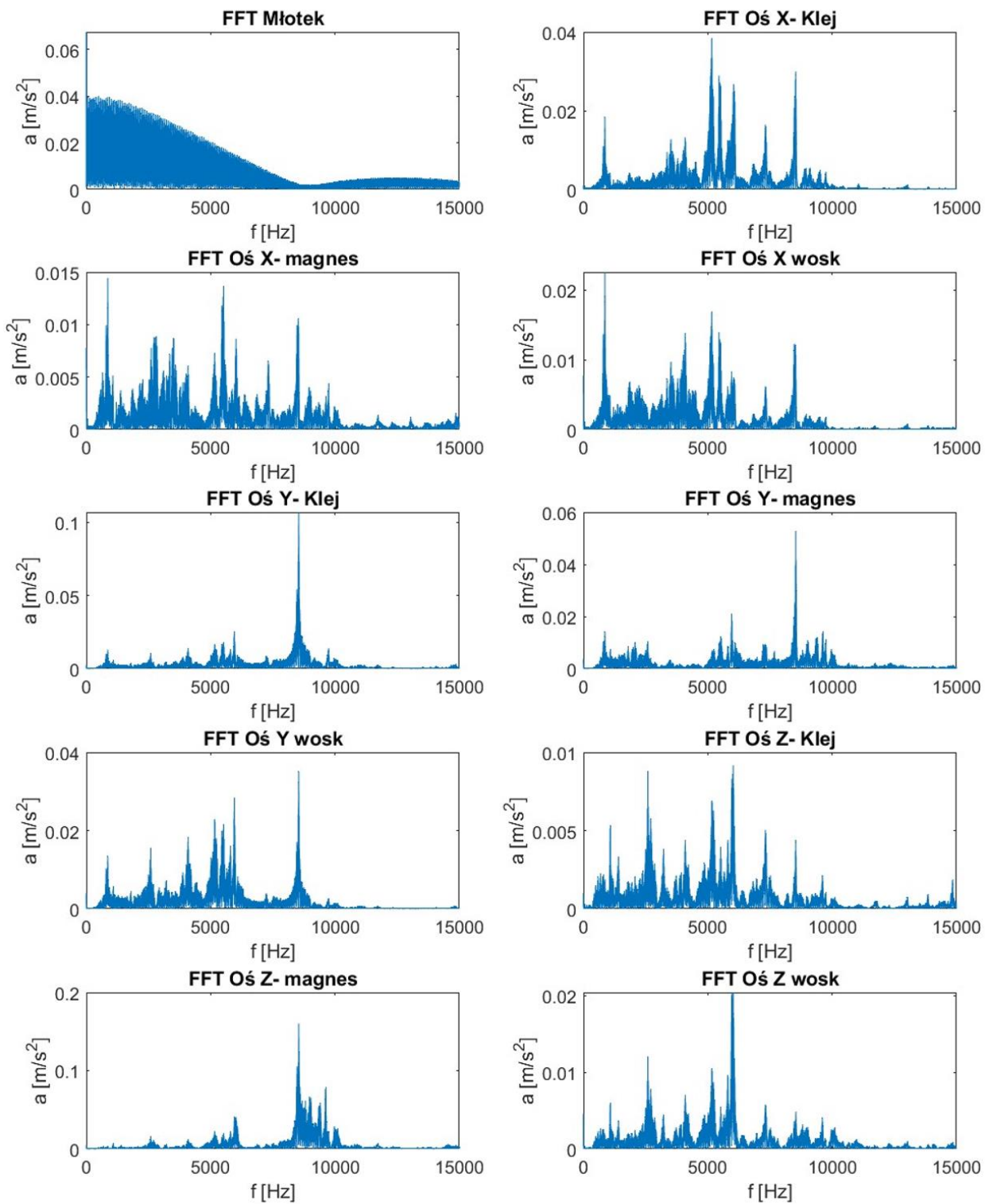
Rysunek 53 Stanowisko badawcze.

W przypadku montażu woskowego pasmo o najwyższej energii sygnału pokrywa się z pasmem energii wzbudzenia. Sposób montażu akcelerometru powinien uwzględniać nie łatwość montażu, ale również górne pasmo przenoszenia. Nawiązując do artykułu [51] w którym przedstawiono, iż najbardziej sztywną formę połączenia można osiągnąć poprzez zastosowanie mocowania kołkowego, podczas gdy najmniejszą sztywność można uzyskać przy mocowaniu magnetycznym. Metody mocowania i klejenia wosku zajmują położenie pomiędzy najsłabszymi i najbardziej elastycznymi warstwami, przy zachowaniu optymalnych parametrów. Potwierdza to tezę o wpływie sposobu montażu na wyniki pomiarów.



Rysunek 54 Kierunek osi pomiarowych zamontowanych czujników przyspieszenia.

Mimo braku oficjalnych zaleceń dotyczących montażu przetworników przyspieszenia za pomocą kleju cyjanoakrylowego i wosku, z powodzeniem można go stosować jako alternatywę dla montażu za pomocą magnesu. Ponadto, utrwalenie za pomocą wosku jest bardziej odporne na rezonans przy wyższych częstotliwościach wzbudzenia. Najbardziej uniwersalną metodą jest mocowanie na magnes. Przykładowa przeprowadzona analiza FFT w środowisku matlab została zaprezentowana na rysunku 55. Przedstawiono przebiegi drgań dla mocowania na klej, wosk i magnes przy twardej końcówce młotka. Punkt uderzenia znajdował się 30 cm od punktu pomiarowego. Częstotliwość próbkowania 50 kHz.



Rysunek 55 Przebieg oraz analiza FFT dla mocowania na magnes w odległości 30cm.

## 5.5 SYSTEM POMIAROWY – KONFIGURACJA FINALNA

Założeniem opracowanej metody badawczej była synchroniczna rejestracja sygnałów akustycznych w bezpośrednim sąsiedztwie toru oraz drgań w trzech kierunkach rejestrowanych bezpośrednio na szynie. Pomiar drgań polegał na rejestracji sygnałów w trzech kierunkach: X, Y oraz Z. Sygnały rejestrowano za pomocą oprogramowania Lab-VIEW.


Zastosowano mikrofon PCB 130F20- tabela 16. Sygnały rejestrowano w polu bliskim. Bliskie pole akustyczne to obszar bezpośrednio wokół źródła dźwięku, w którym charakterystyka pola akustycznego jest inna niż w dalszej odległości od źródła. W tym obszarze fale dźwiękowe są mniej rozproszone i bardziej złożone, ponieważ rozchodzą się bezpośrednio ze źródła dźwięku, bez odbić od powierzchni je otaczających. W praktyce bliskie pole akustyczne jest często definiowane jako obszar oddalony od źródła dźwięku o mniej niż połowę długości fali dźwiękowej. W tym obszarze dźwięk jest zwykle silniejszy, a charakterystyka pola akustycznego jest bardziej związana z cechami samego źródła dźwięku niż z jego otoczeniem.

W przestrzeni otwartej, w odróżnieniu od zamkniętej, nie ma powierzchni, o które fale dźwiękowe mogłyby uderzyć i odbić się, tworząc pogłos. W takiej przestrzeni dźwięk rozchodzi się bez przeszkód, bez odbić od powierzchni, a jedynym ograniczeniem jest rozpraszanie i absorpcja dźwięku. W przestrzeni otwartej może występować zjawisko podobne do pogłosu, nazywane echem. Echo to odbicie dźwięku od powierzchni, której odległość od źródła jest wystarczająco duża, aby czas pomiędzy emisją dźwięku a jego odbiciem był zauważalny. Echo może powodować powtarzające się odbicia dźwięku, co utrudnia zrozumienie mowy i słyszalność muzyki, podobnie jak w przypadku pogłosu. W opracowanej metodzie to zjawisko nie występuje.

Intensywność echa w przestrzeni otwartej zależy od odległości między źródłem dźwięku a powierzchnią odbijającą dźwięk, a także od rodzaju powierzchni. Im większa odległość, tym większe opóźnienie między emisją dźwięku a jego odbiciem, co zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia echa. Rodzaj powierzchni ma także wpływ na intensywność echa – powierzchnie twardsze odbijają dźwięk lepiej niż miękkie, dlatego echo występuje częściej w środowiskach miejskich, gdzie dominują twarde powierzchnie, takie jak beton i szkło.



Tabela 16. Dane techniczne mikrofonu PCB Piezoelectric, model 130F20. Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji dostarczonej przez producenta.


Nazwa	PCB Piezoelectric model 130F20
Typ	TEDS
Czułość	45mV/Pa
Maksymalny zakres pomiarowy	10-20000 Hz
Szum wewnętrzny	29dB
Waga [g]	25
Zakres pracy	-10 do +50 °C
Zdjęcie poglądowe	

Sygnały drgań rejestrowane były przy pomocy akcelerometrów marki Endevco 65-10R, których parametry przedstawiono w tabeli 14.

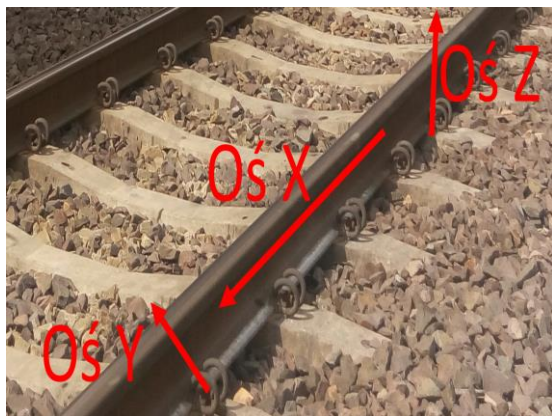
W tabeli 17 przedstawiono zastosowany moduł akwizycji danych NI9233, który został wybrany ze względu na jego dane techniczne oraz takie aspekty jak:

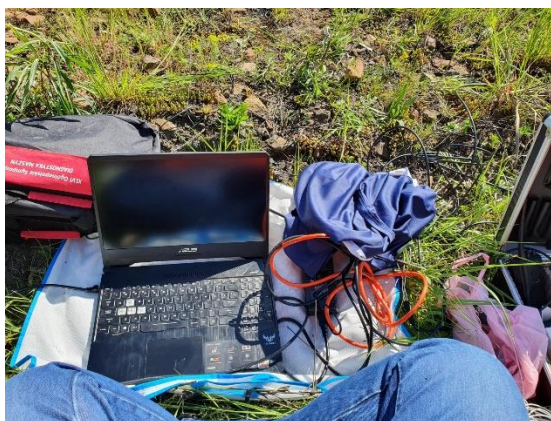
- kompaktowość- moduł jest kieszonkowych rozmiarów oraz zasilanie odbywa się przez złącze USB z komputera rejestrującego i nie wymaga innego zewnętrznego źródła zasilania,
- posiada 4 analogowe wejścia co w przypadku pomiarów w trzech osiach i ciśnienia akustycznego jest wystarczające,
- częstotliwość próbkowania wynosi 50 kHz co spełnia warunek dwukrotności pasma słyszalności ucha ludzkiego.

Tabela 17. Dane techniczne dla National Instruments NI9233. Źródło własne na podstawie dokumentacji dostarczonej przez producenta.

Lista kanałów	4 analogowe kanały wejściowe
Rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego	24 bity
Typ przetwornika analogowo-cyfrowego	Delta-Sigma
Tryb próbkowania	Synchroniczne
Typ złącza	BNC
Częstotliwość próbkowania	50 kHz na kanał
Zakres sygnału wejściowego	+/- 5V
Sygnał wejściowy	IEPE
Zdjęcie poglądowe	

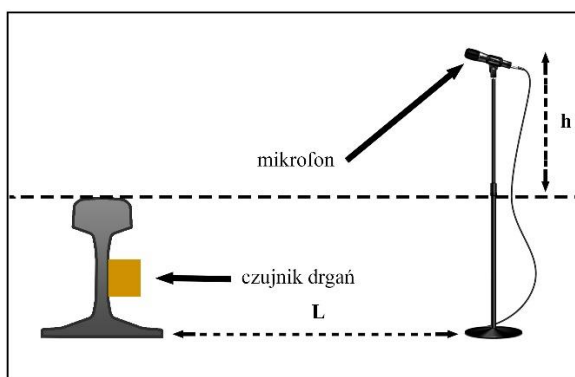
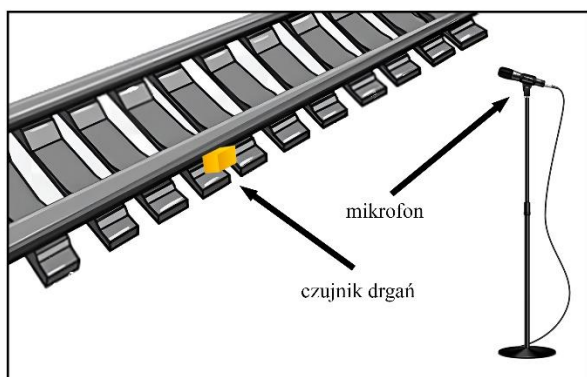
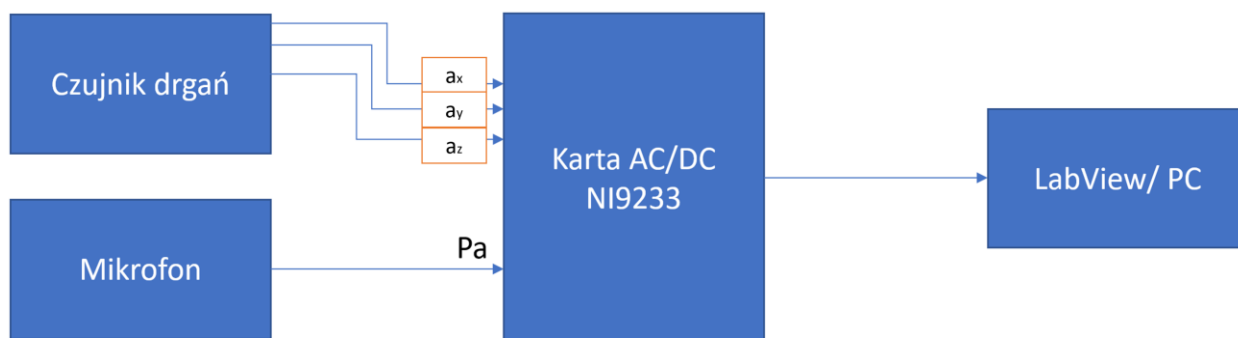
Fotografie z zamontowanym systemem pomiarowym zaprezentowano na rysunku 56, zawierającej fotografie z miejsc wykonywanych pomiarów oraz zaznaczonymi osiami.





Rysunek 56 Fotografie z miejsc pomiarów z uwzględnieniem ekspozycji na czujniki oraz stanowisko pomiarowe. Źródło: opracowanie własne.

Schemat zastosowanego toru pomiarowego zaprezentowano na rysunku 57.

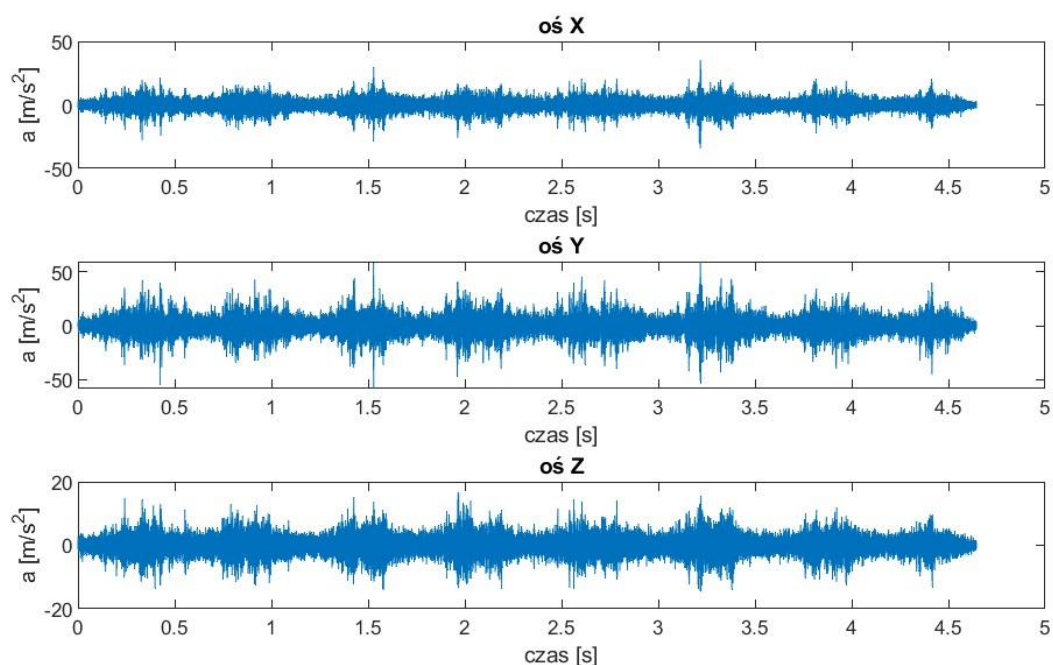


Rysunek 57 Schemat toru pomiarowego stosowanego w pomiarach A wraz z ustawieniem mikrofonu oraz czujnika drgań względem torowiska, gdzie  $L= 165\text{ cm}$  a  $h=50\text{ cm}$ . Źródło: opracowanie własne.



## ROZDZIAŁ 6. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

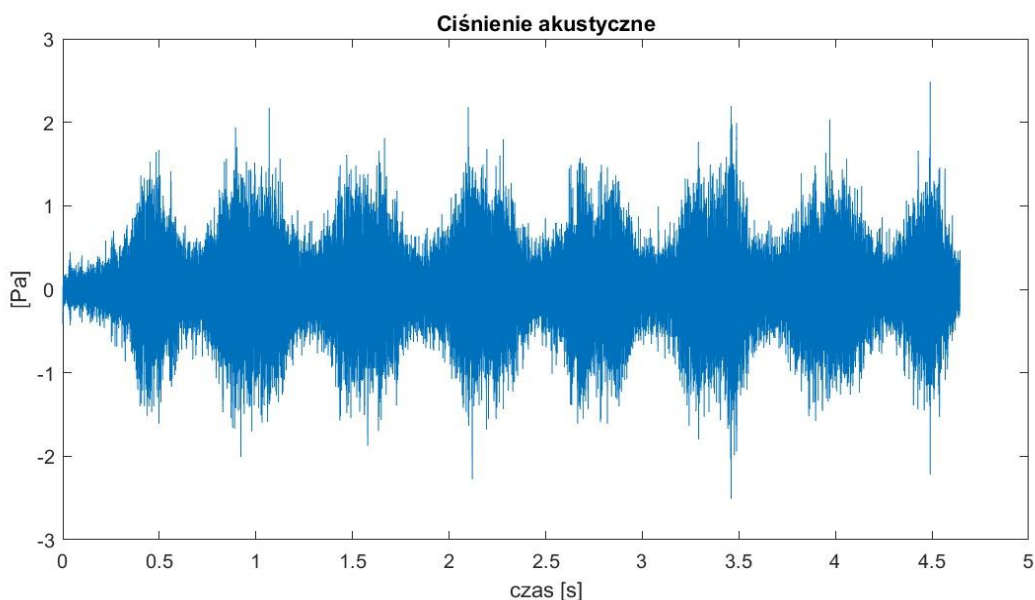
W wyniku przeprowadzonych badań zarejestrowano kilkadziesiąt przejazdów pojazdów szynowych. Badania wykonano w czterech punktach pomiarowych oznaczonych kolejno w pracy jako A, B, C, D. Do pełnej analizy wykorzystano pomiary A i B. Badania oznaczone jako A wykonano na szlaku prowadzącym do stacji Opole Zachodnie na zmodernizowanej linii kolejowej E30. Rejestrowano tam kilkanaście składów różnego typu. Badania oznaczone jako B wykonano w Imielinie, na szlaku prowadzącym do stacji kolejowej Imielin Główny. W każdym przypadku rejestrowano drgania szyny kolejowej w trzech ortogonalnych osiach, hałas oraz odczyt prędkości składów. Rejestrowano przejazdy składów kolejowych różnego typu poruszających się z różną prędkością, w różnych warunkach atmosferycznych (zima, lato). Miało to na celu oszacowanie wpływu warunków zewnętrznych na wyniki badań. Jako przykład, na rysunku 58 i 59 oraz tabeli 18 i 19 przedstawiono wyniki uzyskane podczas przejazdu pociągu typu KDP (Kolei Dużych Prędkości tj. w tym wypadku składu KD250) dla prędkości 160 km/h.



Rysunek 58 Przykład sygnałów drgań przejazdu pojazdu szynowego typu KDP z zastosowanym oknem wycinającym.

Tabela 18 Przykład estymatorów drgań przejazdu pojazdu szynowego typu KDP. Źródło: opracowanie własne.

	Peak to Peak	RMS
Drgania na osi X	69,34	3,98
Drgania na osi Y	117,65	8,09
Drgania na osi Z	31,01	2,56



Rysunek 59 Przykład sygnału ciśnienia akustycznego podczas przejazdu pojazdu szynowego typu KDP

Tabela 19 Przykład estymatora ciśnienia akustycznego podczas przejazdu pojazdu szynowego typu KDP z uwzględnieniem podstawowych danych statystycznych. Źródło: opracowanie własne.

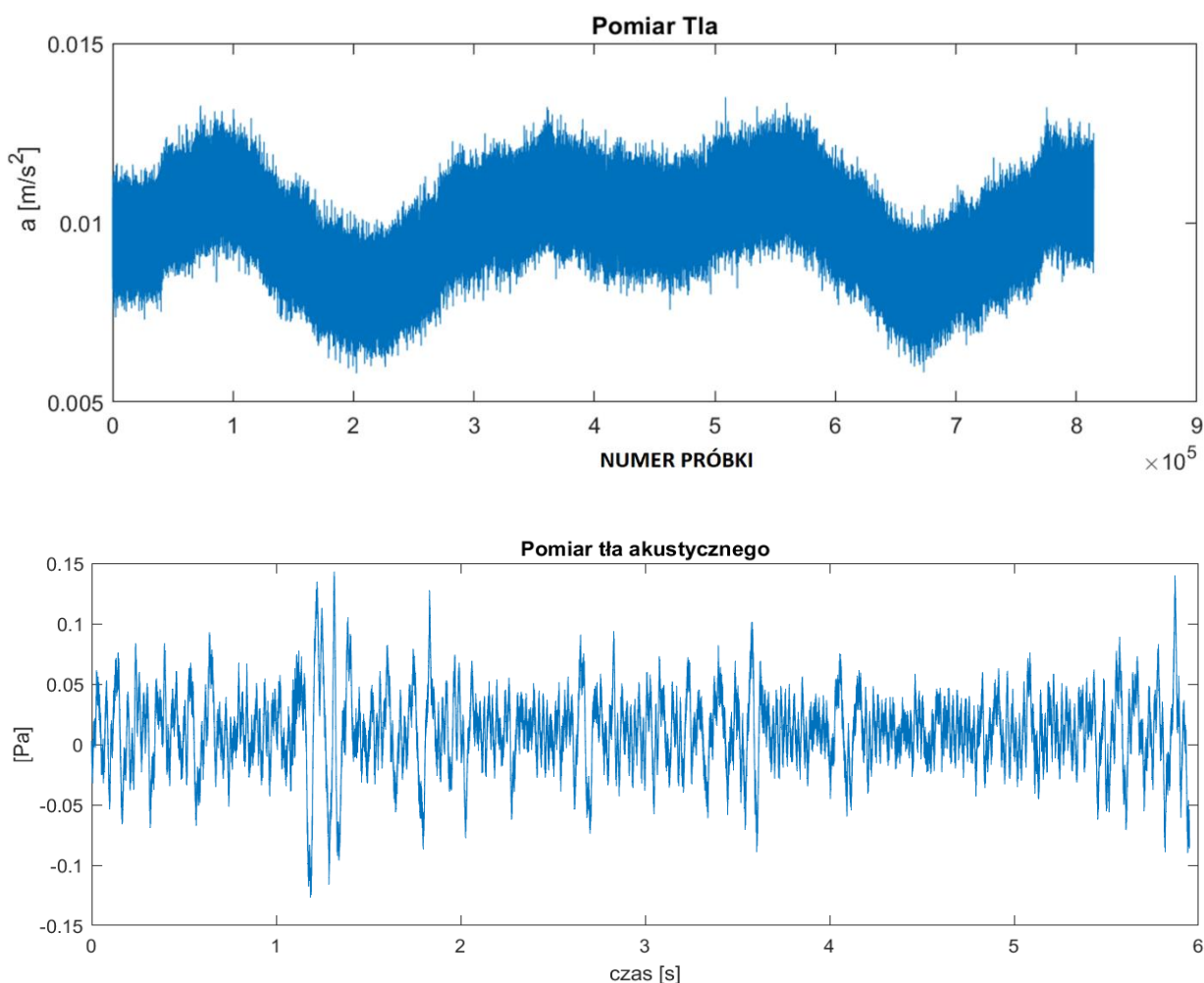
	Peak to Peak	RMS
Ciśnienie akustyczne	4,98	0,39

Jest kilka powodów, dla których pomiar tła akustycznego jest bardzo ważny w przypadku analizy hałasu poruszających się składów kolejowych. Po pierwsze, poziom tła akustycznego to poziom hałasu w danym miejscu bez uwzględnienia hałasu związanego z ruchem składów kolejowych. Określenie poziomu tła akustycznego jest więc niezbędne do oceny wpływu hałasu kolejowego na środowisko akustyczne. Dzięki temu można zidentyfikować źródła hałasu kolejowego i określić, w jakim stopniu uczestniczą w całkowitym poziomie hałasu.

Po drugie, pomiar tła akustycznego jest ważny w celu określenia poziomu hałasu powodowanego przez składy kolejowe w różnych porach dnia. Poziom tła akustycznego zmienia się w zależności od pory dnia, dlatego pomiar tła akustycznego jest niezbędny do określenia poziomu hałasu składów kolejowych w danym czasie. Na przykład, w nocy poziom tła akustycznego jest zazwyczaj niższy, co oznacza, że hałas poruszającego się składu kolejowego będzie łatwiej zauważalny i bardziej uciążliwy dla osób w pobliżu.

Po trzecie, pomiar tła akustycznego umożliwia określenie poziomu hałasu pochodzącego z innych źródeł, takich jak ruch uliczny czy przemysł, które mogą przyczyniać się do całkowitego poziomu hałasu. Dzięki temu można dokładniej ocenić wpływ hałasu kolejowego na środowisko akustyczne i podjąć odpowiednie kroki w celu jego ograniczenia.

W związku z powyższym, pomiar tła akustycznego (rysunek 60 oraz tabela 20) jest niezbędny w przypadku analizy hałasu poruszających się składów kolejowych, ponieważ umożliwia dokładniejszą ocenę wpływu hałasu kolejowego na środowisko akustyczne oraz podjęcie odpowiednich działań w celu jego ograniczenia. Jak można zauważyć na rysunku 60, zarejestrowane drgania nie przekraczają wartości  $0,015 \text{ m/s}^2$ , co jest wartością znikomą w porównaniu do przejeżdżających składów kolejowych. W przypadku pomiaru tła akustycznego nie przekraczają  $0,15 \text{ Pa}$ , co również jest wartością znikomą w dalszych analizach.

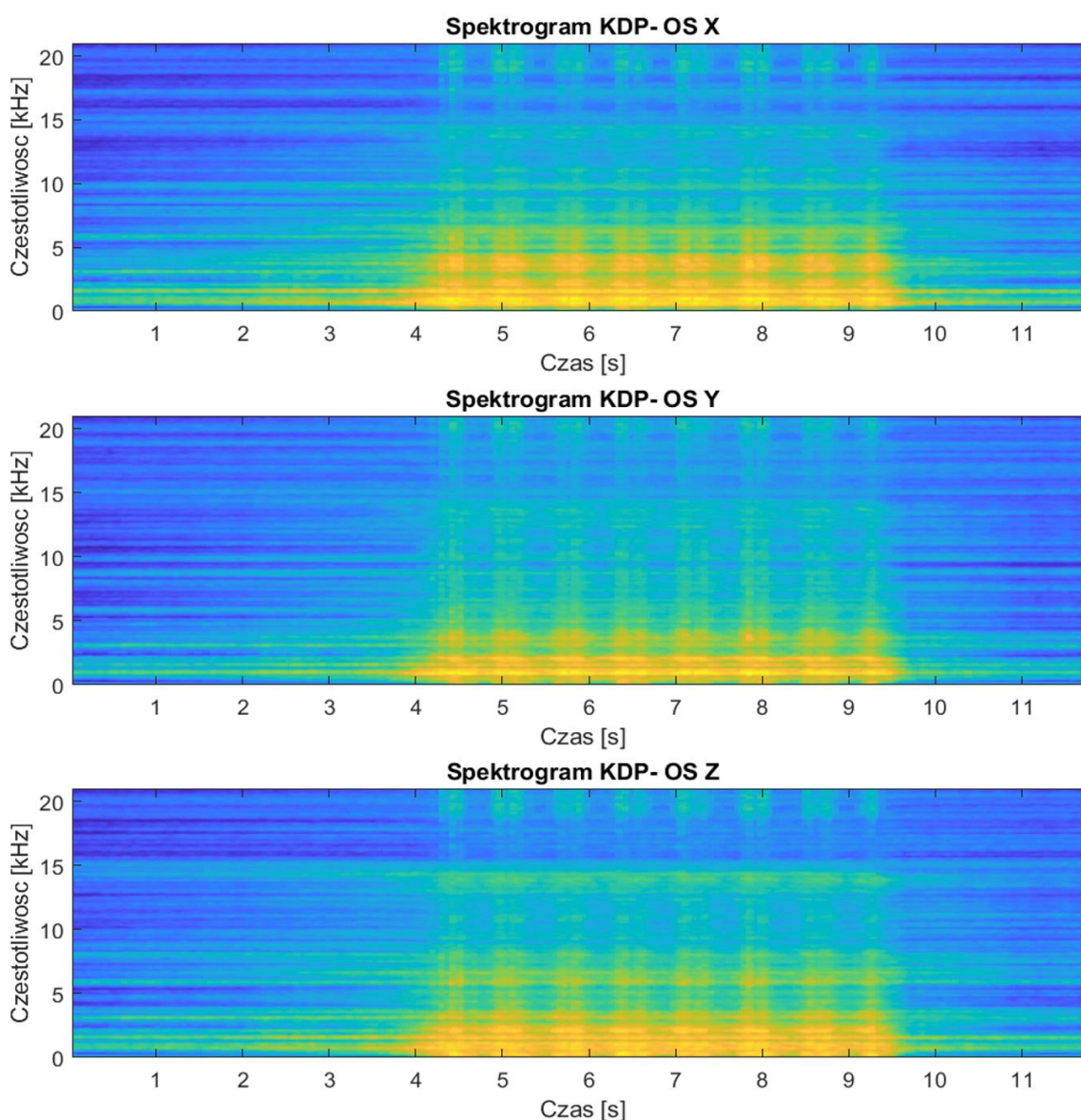


Rysunek 60 Przykład sygnału drgań torowiska w momencie, w którym nie poruszał się po nim żaden skład kolejowy wraz z pomiarem tła akustycznego

Tabela 20 Przykład estymatora drgań torowiska w momencie, w którym nie poruszał się po nim żaden skład kolejowy wraz z pomiarem akustycznym wraz z danymi tabelarycznymi. Źródło: opracowanie własne.

	Peak to Peak	RMS
Ciśnienie akustyczne	0,27	0,032

Na rysunku 61 przedstawiono przykładową analizę czasowo-częstotliwościową dla składu typu KDP dla osi X, Y, Z. Dominująca częstotliwość tylko dla tego przypadku jest pomiędzy 4000-5000 Hz (zwłaszcza w osi X).



Rysunek 61. Przykład zastosowania spektrogramu dla przejazdu pojazdu szynowego, w tym wypadku składu typu KDP dla osi X, Y, Z (od góry). Źródło: opracowanie własne.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono na poniższych rysunkach, analizując cztery różne grupy składów kolejowych, które będą badane w kolejnych rozdziałach pracy. Wyniki zostały

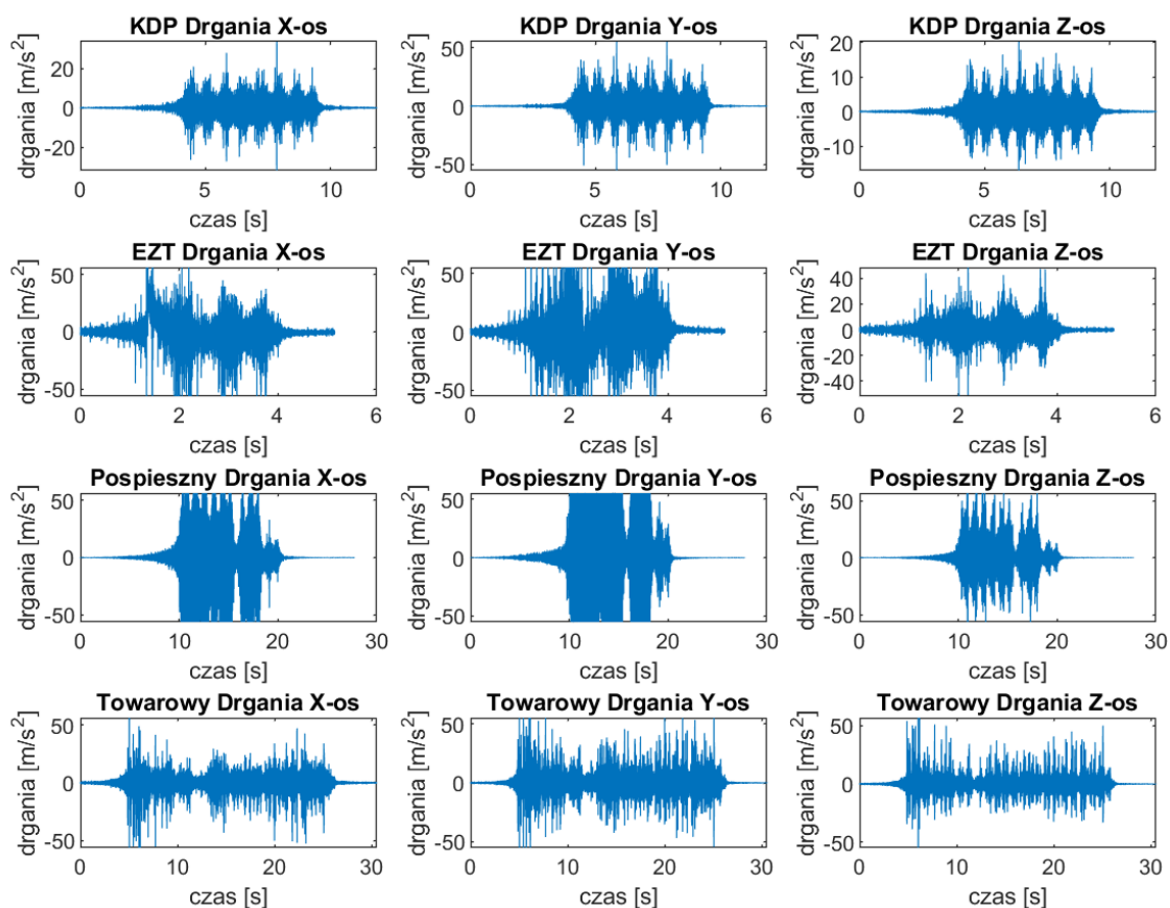


zarejestrowane w tym samym punkcie pomiarowym i tych samych warunkach atmosferycznych podczas jednego cyklu pomiarowego (pomiar A).

Zaprezentowane składy to:

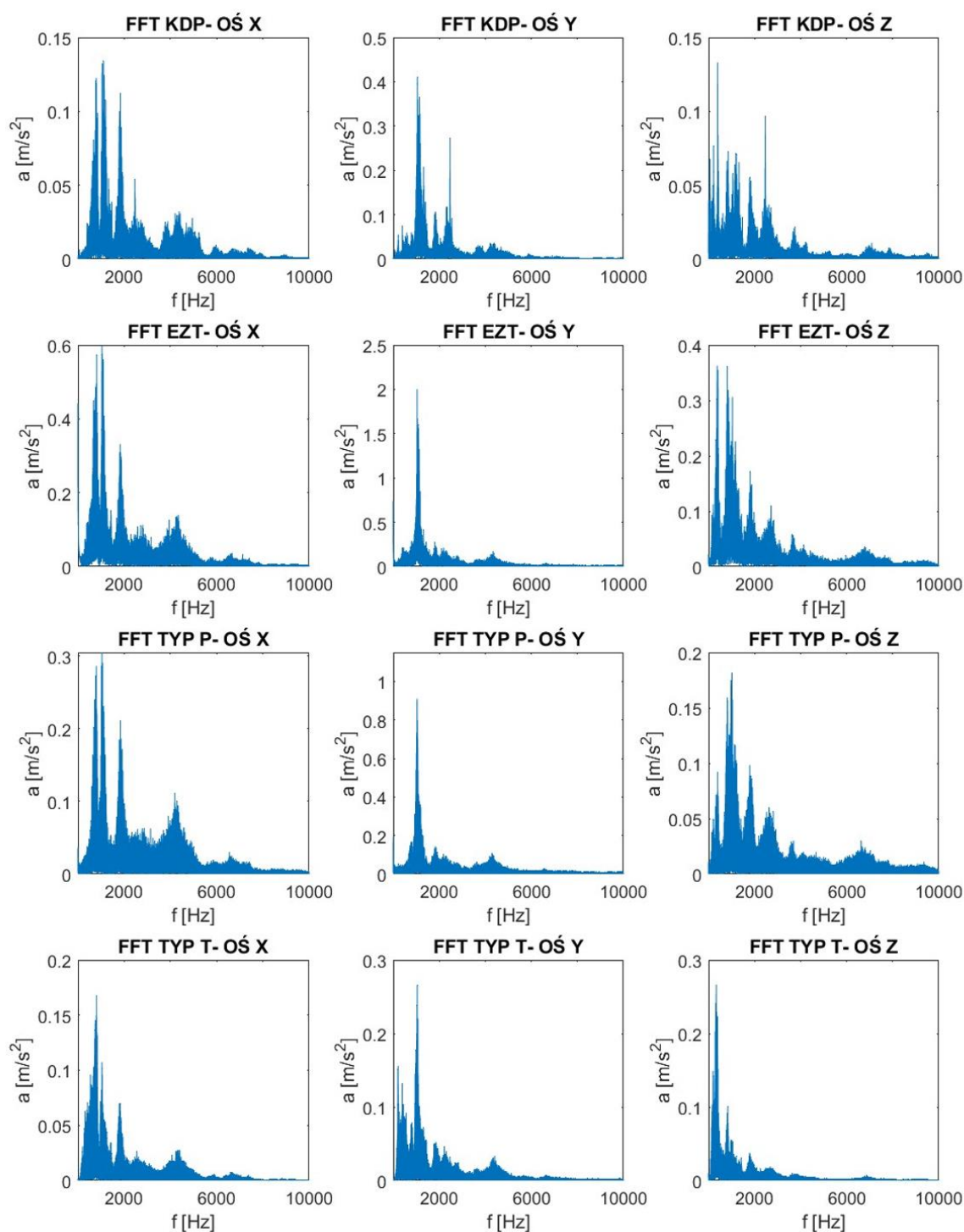
- KDP – Kolej Dużych Prędkości (ED250),
- EZT – Elektryczny Zespół Trakcyjny,
- pociąg osobowy (w pracy zwany dalej „pośpieszny”) – skład składający się z lokomotywy elektrycznej oraz standardowych wagonów osobowych,
- pociąg towarowy (w pracy zwany dalej „towarowy”) – skład składający się z lokomotywy elektrycznej (lub spalinowej, rzadko występującej w pomiarach) oraz wagonów towarowych (najczęściej węglarki typu otwartego).

Na przebiegach na rysunku 62 zauważyć można znaczące różnice w długości sygnału, co ma związek z różną prędkością poruszających się pojazdów oraz ich długością



Rysunek 62. Przykładowe przebiegi drgań dla czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pośpiesznego, elektrycznego zespołu trakcyjnego oraz składu towarowego. Źródło: opracowanie własne.

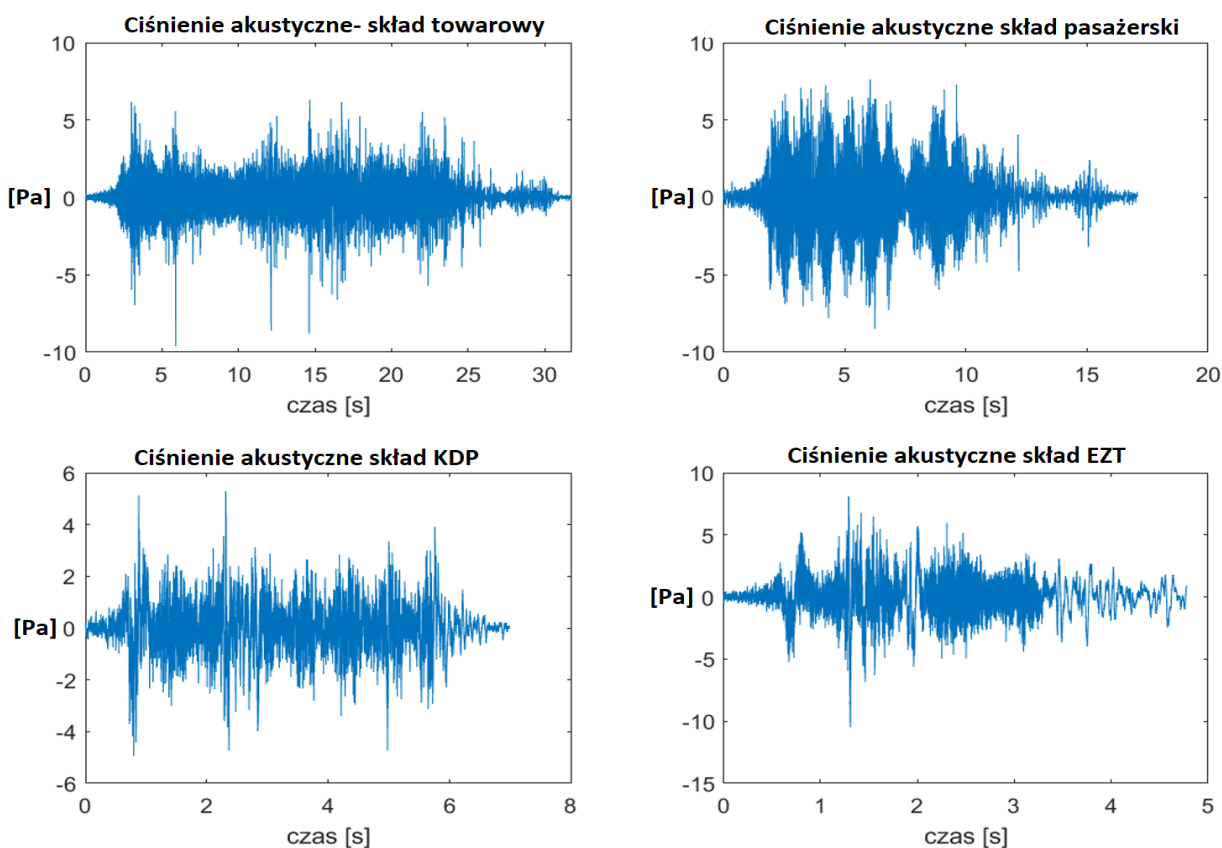
Znaczące różnice pomiędzy zarejestrowanymi przebiegami drgań wskazują na potrzebę dalszych badań i potwierdza to słuszność identyfikacji pojazdów szynowych na podstawie analizy drganiowej.



Rysunek 63. Analiza FFT – reprezentatywne dla czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pasażerskiego (typ P), elektrycznego zespołu trakcyjnego (EZT) oraz składu towarowego (typ T). Źródło: opracowanie własne.

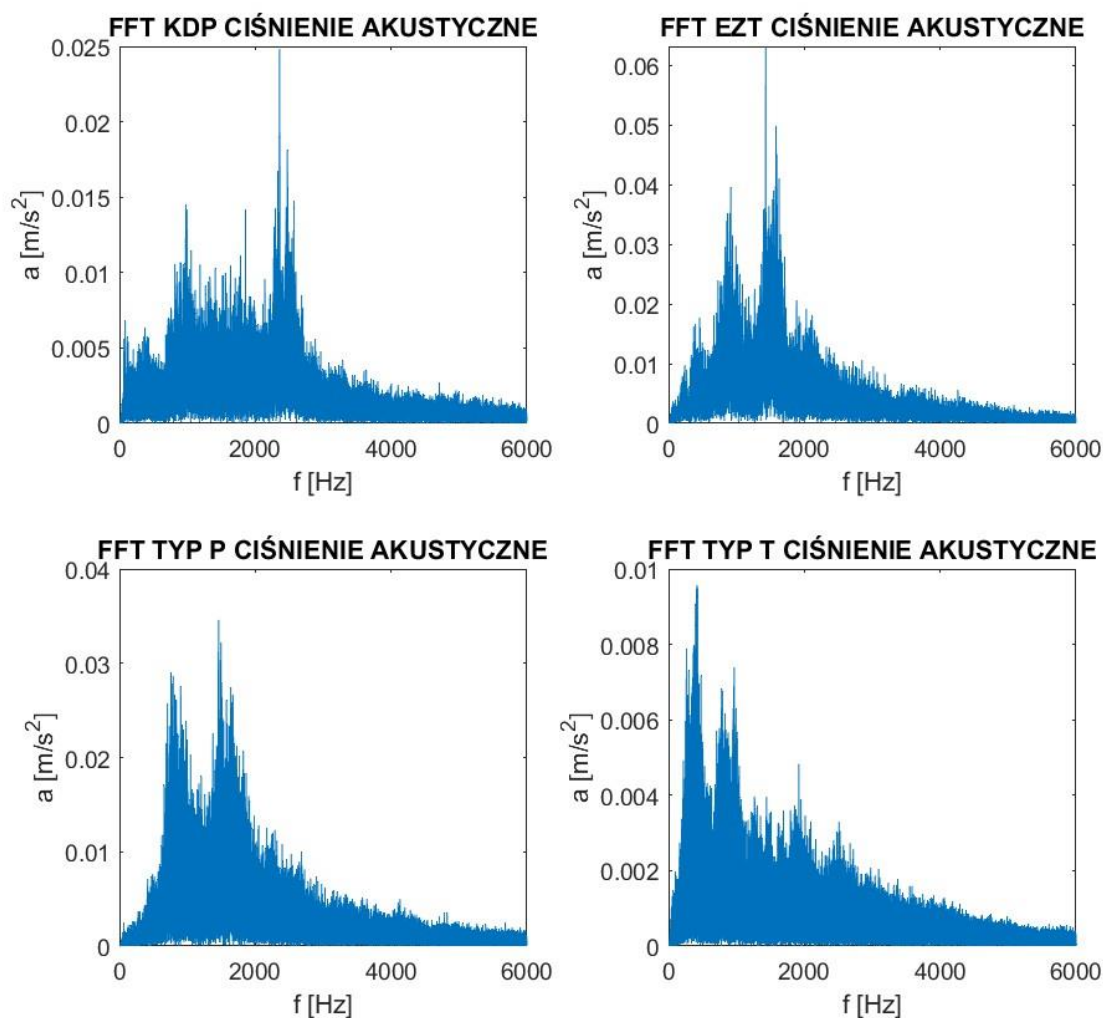
Według [81], badanie spektrum Fouriera sygnałów jako superpozycja funkcji sinus i cosinus, jest obecnie prawie wszędzie obecne w dziedzinie identyfikacji i analizy pomiarowych sygnałów. Bardziej lub mniej zaawansowane strategie cyfrowego przetwarzania i analizy sygnałów są obecnie nieodzownym elementem modułów programowych każdego instrumentu pomiarowego. Na podstawie wyników FFT dla trzech różnych osi można wnioskować o dalszej potrzebie analizy konkretnych osi w celu identyfikacji pojazdów szynowych. Dla każdego z przedstawionych składów największe wzmocnienia występują pomiędzy 50 Hz a 1000 Hz, powyżej tej wartości różnice dla danych typów są znaczące. Zwłaszcza wzmocnienia w okolicach 4000 Hz oraz 2000 Hz pojawiające się w niektórych przypadkach mogą być ciekawym punktem odniesienia do dalszych analiz.

Analiza ciśnienie akustycznego przeprowadzana razem z analizą drgań poruszających się pojazdów stanowiła element służący do potwierdzenia słuszności stosowania metody wibroakustycznej w dalszej części niniejszej rozprawy. Rysunki przebiegów w niniejszym podrozdziale przedstawiają analizę zarejestrowanego ciśnienia akustycznego podczas poruszania się reprezentatywnych składów kolejowych (rysunek 64). Jednak dla wyników dotyczących poziomu ciśnienia akustycznego zazwyczaj nie przekraczają wartości 5 Pa. Różnią się natomiast czasem rejestracji (ze względu na długość składów i ich prędkości).



Rysunek 64. Przebiegi ciśnienia akustycznego dla przykładowych czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pośpiesznego, elektrycznego zespołu trakcyjnego oraz składu towarowego. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 65 widać, że największe wzmocnienia dla wszystkich pojazdów występują w okolicach 1000 Hz. Jednak różnice wynikające ze wzmocnień w innych częstotliwościach dają szansę na różnicowanie ich również za pomocą hałasu jako części sygnału wibroakustycznego.



Rysunek 65. Transformata Fouriera dla przykładowych czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pasażerskiego (typ P), elektrycznego zespołu trakcyjnego oraz składu towarowego (typ T). Źródło: opracowanie własne.

Analiza wstępnych wyników badań potwierdziła dużą pojemność informacyjną sygnałów wibroakustycznych oraz możliwość identyfikacji i klasyfikacji przyjętych rodzajów poruszających się pojazdów szynowych. Dodatkowo możliwości te są większe w przypadku synchronicznie rejestrowanych sygnałów drgań i hałasu. Potwierdza to przyjęte w pracy hipotezy badawcze.

## ROZDZIAŁ 7. WPŁYW EFEKTU DOPPLERA NA PROWADZONE BADANIA

W przypadku stosowania dźwięku jako składowej sygnału wibroakustycznego do rozpoznania poruszającego się pojazdu należy uwzględnić wpływ zjawiska Dopplera.

Efekt Dopplera jest obserwowany w przypadku fal elektromagnetycznych i dźwiękowych, gdy źródło fali i obserwator poruszają się względem siebie. W przypadku poruszających się składów kolejowych ten efekt ma znaczenie w kontekście sygnałów dźwiękowych.

Efekt Dopplera w odniesieniu do kolei podaje się najczęściej na przykładzie sygnału dźwiękowego emitowanego przez syrenę pociągu. Kiedy pociąg zbliża się do obserwatora, dźwięk syreny staje się wyższy, a kiedy pociąg zaczyna się oddalać, dźwięk się obniża. Dzieje się tak dlatego, że fale dźwiękowe wyemitowane przez syrenę rozchodzą się we wszystkich kierunkach. Jeśli pociąg porusza się w kierunku obserwatora, fale dźwiękowe propagują do niego z większą częstotliwością, co powoduje wyższą tonację dźwięku. Gdy pociąg oddala się od obserwatora, fale dźwiękowe docierają do niego z mniejszą częstotliwością, a obserwator słyszy dźwięk w niższej tonacji.

W analizowanej przypadku źródło dźwięku (skład kolejowy) porusza się, a obserwator (mikrofon umieszczony na skrajni kolejowej) jest nieruchomy, rejestrowana przez niego częstotliwość w tym układzie jest równa:

$$f_0 = f_s \left( \frac{v}{v - v_s} \right) \quad (16)$$

, gdzie:

- $f_0$  jest częstotliwością rejestrowaną przez mikrofon (obserwatora),
- $f_s$  jest częstotliwością sygnału poruszającego się składu kolejowego (źródło),
- $v$  jest prędkością dźwięku [340 m/s],
- $v_s$  jest stałą prędkością, z jaką porusza się źródło dźwięku, znak minus oznacza skład przybliżający się do mikrofonu, znak plus oddalający się. [m/s]

Znając częstotliwość  $f_0$  dzięki rejestracji chwilowej sygnału dźwiękowego i analizie FFT, możemy ustalić częstotliwość  $f_s$  poruszającego się składu. W tym układzie wzór na wartość  $f_s$  przedstawia się następująco (w przypadku przybliżania się):

$$f_{s_1} = f_{01} \left( \frac{v - v_s}{v} \right) \quad (17)$$

Oraz w przypadku oddalania:

$$f_{s_2} = f_{02} \left( \frac{v + v_s}{v} \right) \quad (18)$$

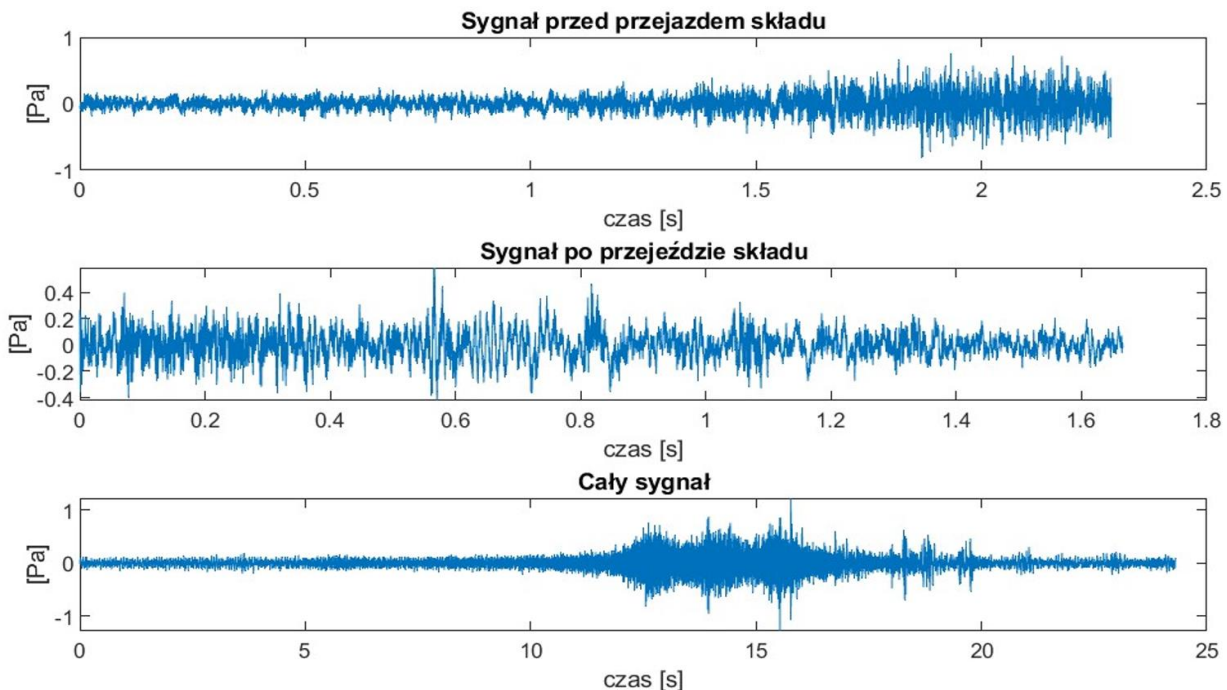
, gdzie:

- $f_{01}$  jest częstotliwością rejestrowaną przez mikrofon (obserwatora) w momencie przybliżania się składu,
- $f_{02}$  jest częstotliwością rejestrowaną przez mikrofon (obserwatora) w momencie oddalania się składu,
- $f_{s1}$  jest częstotliwością sygnału przybliżającego się składu kolejowego (źródło),
- $f_{s2}$  jest częstotliwością sygnału oddalającego się składu kolejowego (źródło).

W celu analizy wpływu efektu Dopplera na wyniki badania, wprowadzono dodatkowy wskaźnik korekcji:

$$\frac{f_{01}}{f_{02}} = \frac{v + v_s}{v - v_s} \quad (19)$$

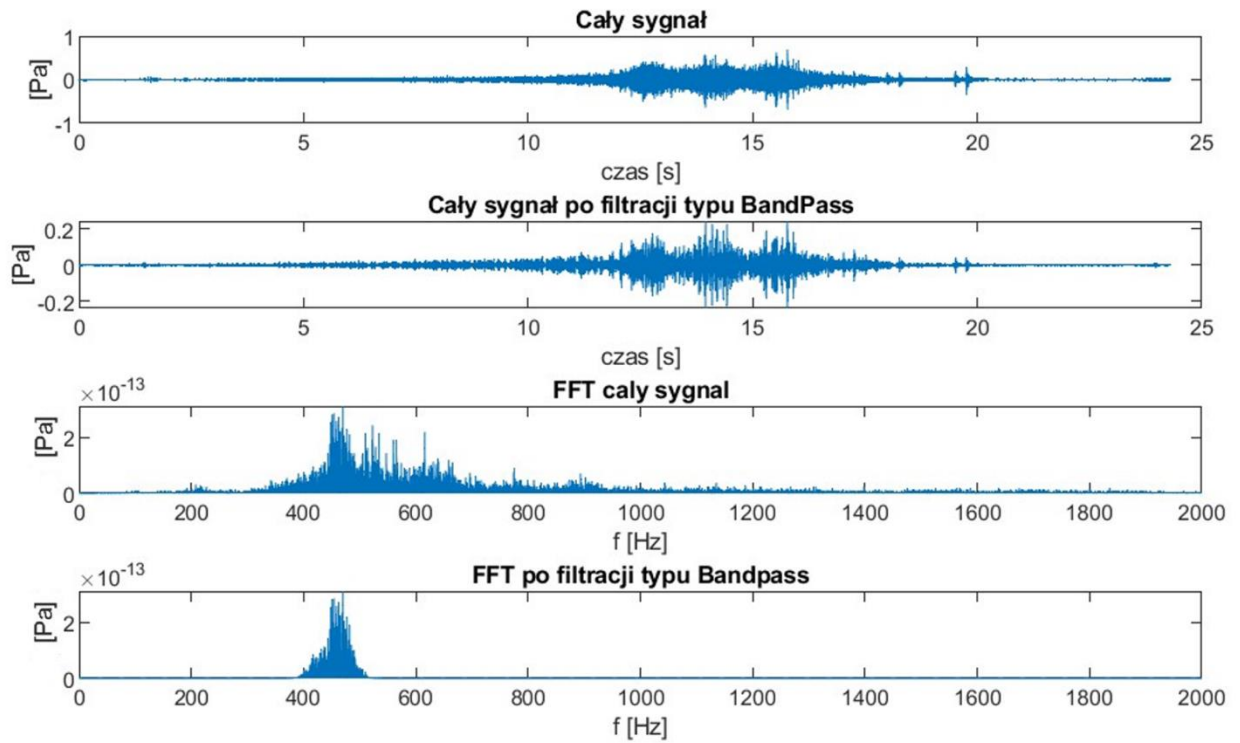
Na Rysunku 66 przedstawiono ciśnienie akustyczne wybranego składu kolejowego z wyciętymi fragmentami przed oraz po przejeździe składu przez punkt, w którym znajdował się punkt pomiarowy.





Rysunek 66. Przebiegi przykładowego sygnału drganiowego i ciśnienia akustycznego składu kolejowego. Źródło: opracowanie własne.

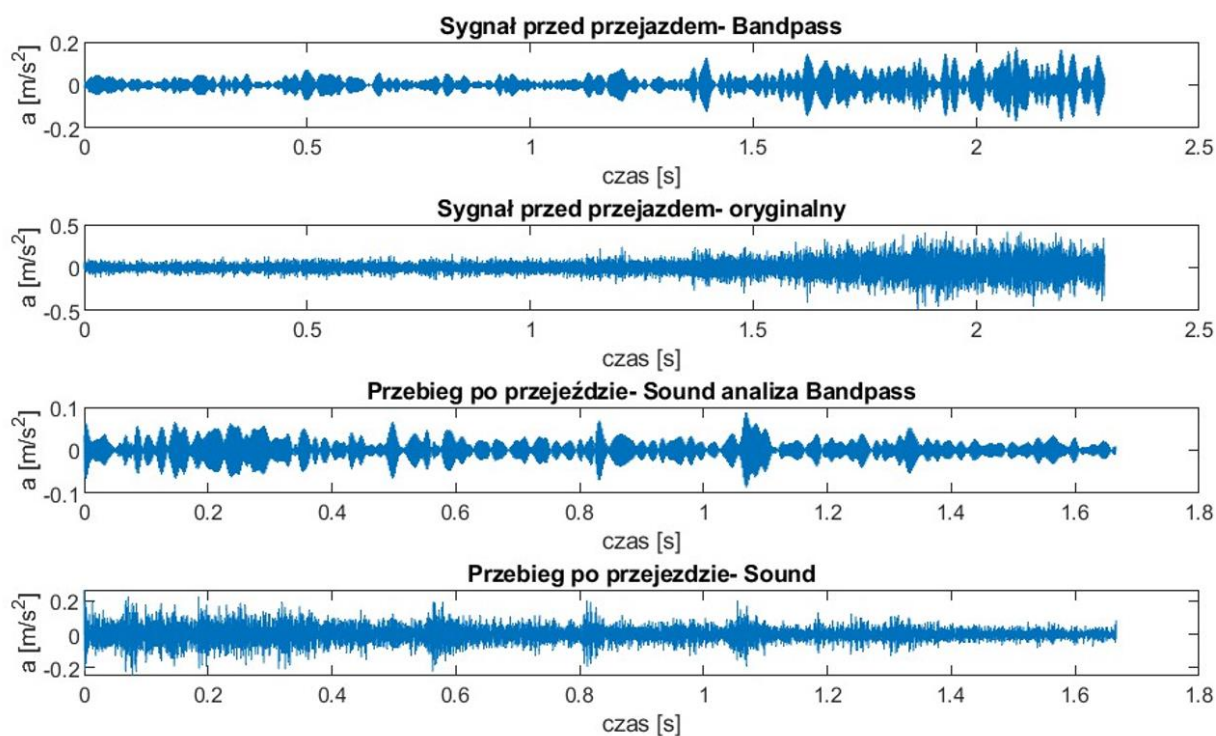
Wykonaną analizę FFT wybranych fragmentów przedstawiono na rysunku 68.



Rysunek 67. Przykładowe ciśnienie akustyczne składu kolejowego i jego analiza FFT wraz z filtrem typu Bandpass. Źródło: opracowanie własne.

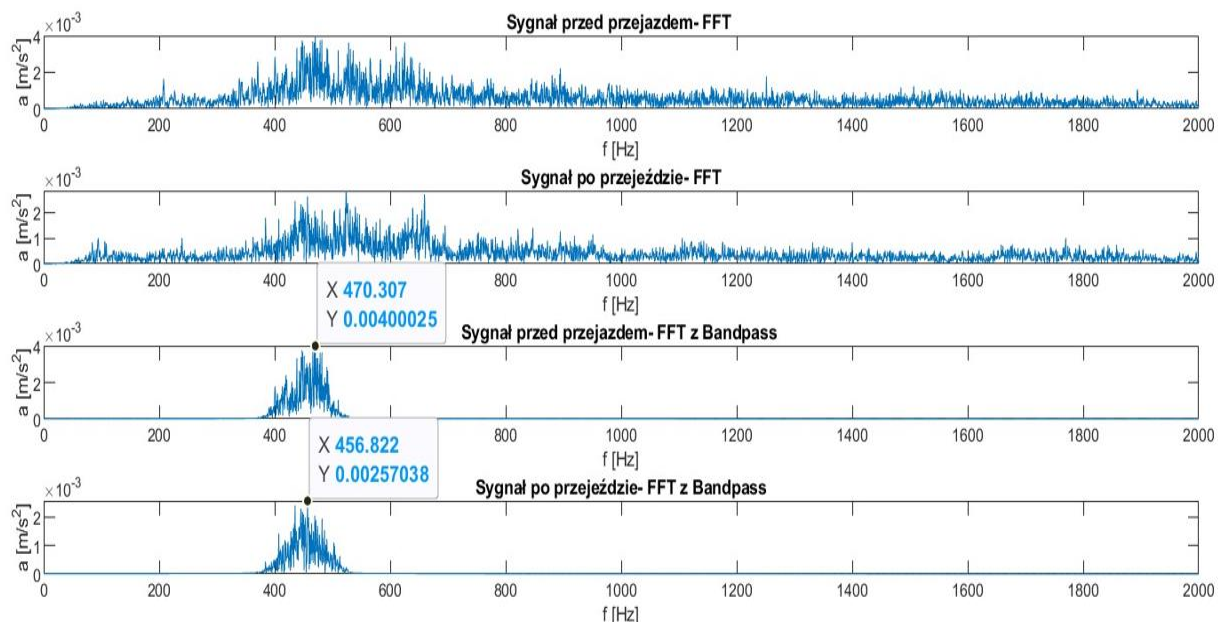
Wybrano jedną częstotliwość, która będzie analizowana przed i po przejeździe składu kolejowego przez punkt pomiarowy. Poszukiwano charakterystycznej składowej częstotliwości, dlatego zdecydowano się na użycie filtru typu bandpass w zakresach 430- 470 Hz i odfiltrowano cały sygnał w tym konkretnym paśmie, co widać na rysunku 68.





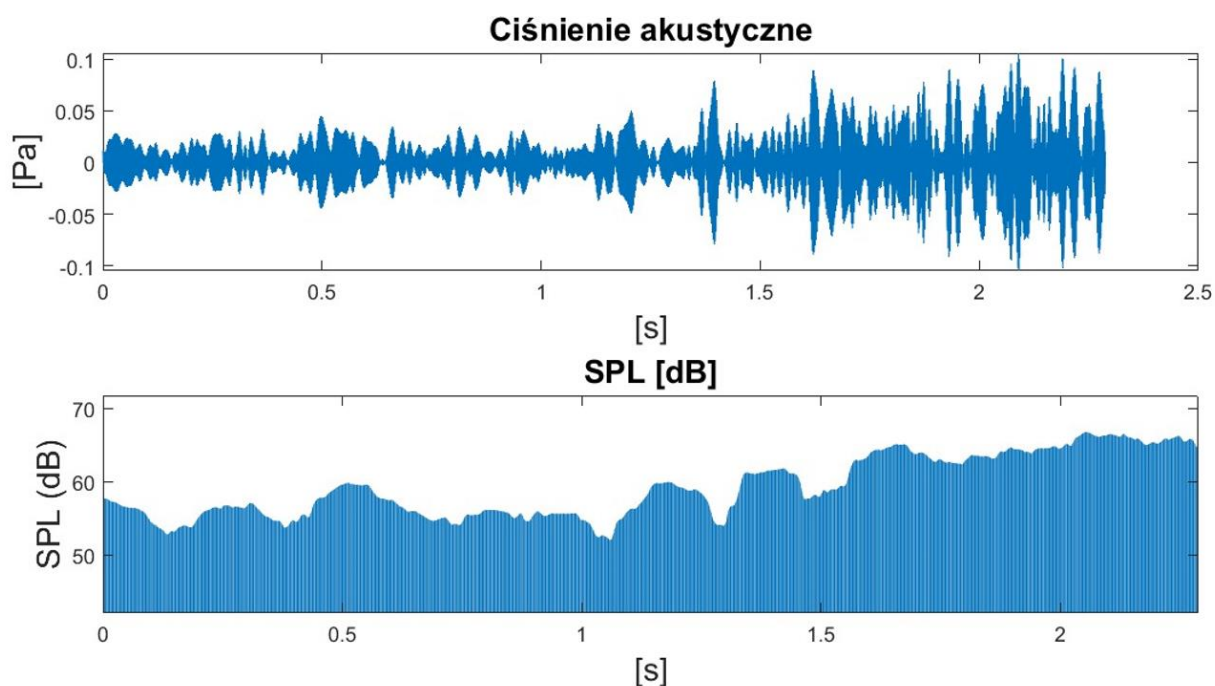
Rysunek 68. Przykładowe ciśnienie akustyczne składu kolejowego i jego analiza FFT wraz z filtrem typu Bandpass. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 69 zaprezentowano powiększone przebiegi przed i po przejeździe przez punkt rejestrujący z i bez zastosowania filtracji Bandpass. Analiza pokazuje niewielki wpływ efektu Dopplera na częstotliwość przed i po przejeździe składu przez punkt pomiarowy.  $Peak_{max}$  przy filtracji 430- 470 Hz filtrem bandpass i analizie FFT ukazuje podobną wartość 470 i 456 Hz. Przy niniejszej próbie zachowano należyłą ostrożność przy doborze odpowiedniego składu. W tym przypadku analizowany był skład typu EZT, charakteryzujący się takim samym czołem z obu stron składu. Poruszał się on z prędkością 11 m/s, co przy odwołaniu się do wzoru 17 i 18, w którym wynikiem wartości  $f_{01}/f_{02}$  byłby przy niniejszej prędkości współczynnik korekcji na poziomie 1,0669, można przyjąć, że nie ma bezpośredniego, znaczącego wpływu na analizowane później wyniki.

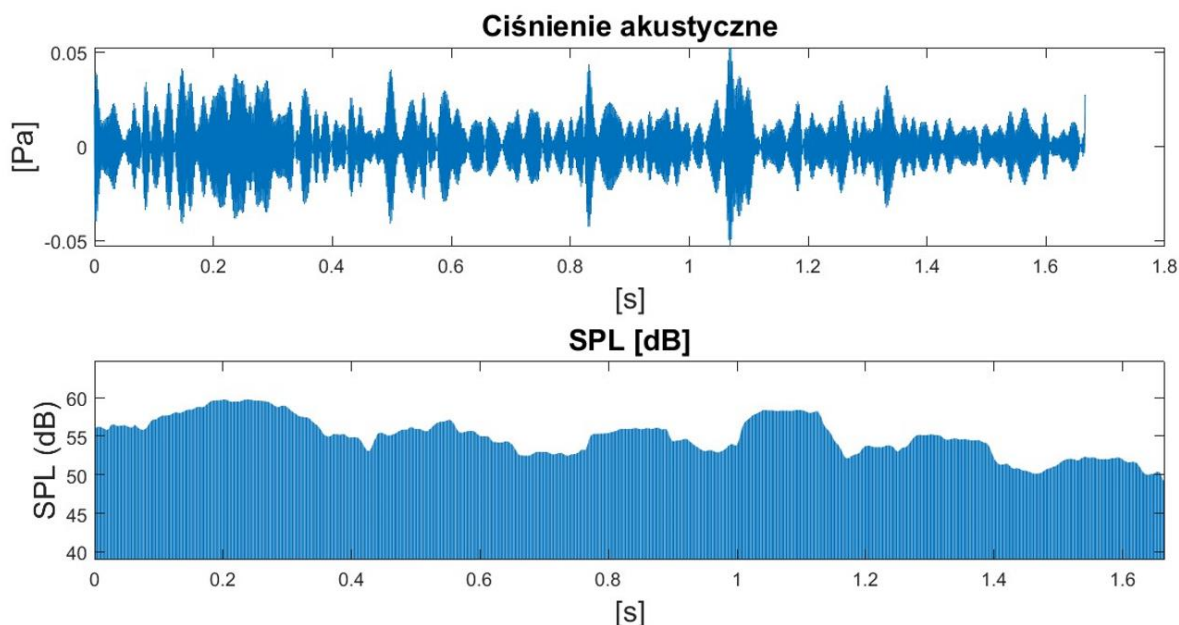


Rysunek 69. Przykładowe ciśnienie akustyczne składu kolejowego i jego analiza FFT wraz z filtrem typu Bandpass. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunkach 70 i 71 przedstawiono natomiast analizę SPL (Sound Pressure Level) sygnałów po filtracji typu bandpass przed oraz po przejeździe przez punkt pomiarowy.



Rysunek 70. Analiza SPL przed przejazdem nad punktem pomiarowym. Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 71. Analiza SPL po przejeździe przez punkt pomiarowy. Źródło: opracowanie własne.

Należy także zastrzec, że w kolejnych analizowanych punktach niniejszej rozprawy, w ramach minimalizacji wpływu efektu Dopplera, podczas analizy sygnału wycięto fragmenty sprzed i po najjeździe składu na punkt pomiarowy, czyli analizowane są jedynie sygnały pochodzące od momentu najazdu składu pierwszym kołem na miejsce zamontowania akcelerometru do ostatniego koła składu kolejowego. W tabeli 21 ukazano współczynniki przesunięcia według wzoru 19 dla różnych prędkości. Jak można zauważyć dopiero przy najwyższych prędkości około 200km/h znaczenie efektu Dopplera jest bardzo istotne.

Tabela 21 Zastosowanie współczynnika korekcji dla różnych prędkości

Prędkość [m/s]	Prędkość [km/h]	Współczynnik przesunięcia
2	7,20	1,012
5	18	1,030
10	36	1,061
15	54	1,092
20	72	1,125
25	90	1,159
30	108	1,194
35	126	1,230
40	144	1,267
45	162	1,305
50	180	1,345
55	198	1,386

=

## ROZDZIAŁ 8. KONCEPCJA METODY IDENTYFIKACJI I KLASYFIKACJI PORUSZAJĄCYCH SIĘ POJAZDÓW SZYNOWYCH

Metoda identyfikacji pojazdów szynowych składa się z ośmiu etapów, które pozwalają na uzyskanie precyzyjnej i wiarygodnej informacji o przebiegu drgań i hałasie emitowanym przez pojazdy takie jak składy kolejowe.

Pierwszym etapem jest rejestracja drgań w trzech osiach: X, Y, Z oraz rejestracja hałasu. Następnie wycinane są okna sygnału przejazdowego. Dzięki temu można wyodrębnić sygnał, który jest związany tylko z ruchem pojazdu, co znacznie ułatwia proces analizy. Trzecim etapem jest wyznaczenie wybranych miar otrzymanego sygnału. Analiza ta pozwala na uzyskanie informacji o różnych parametrach sygnału, co jest pomocne w określaniu charakterystyki pojazdu. Kolejnym krokiem jest dobór odpowiedniej falki przy metodzie MODWT. Metoda ta pozwala na dekompozycję sygnału na składowe falkowe o różnej częstotliwości, co umożliwi bardziej szczegółową analizę. Piątym etapem jest wykonanie analizy Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform oraz przedstawienie analizy STFT sygnałów zrekonstruowanych. Metoda MODWT pozwala na uzyskanie informacji o częstotliwościach, które nie są dostępne w przypadku tradycyjnych metod, natomiast STFT pozwala na analizę sygnałów w dziedzinie częstotliwości i czasu. Następnie zostaje utworzona nowa baza danych, zawierająca informacje o poziomach energii relatywnej po wykonaniu MODWT. Baza ta umożliwi porównywanie różnych składów kolejowych pod względem charakterystyki drgań i hałasu. Siódmym etapem jest wyznaczenie cech charakterystycznych odróżniających składy kolejowe pod względem pojemności informacyjnej przebiegu drgań i hałasu. Analiza tych cech pozwala na określenie charakterystyki pojazdu, co jest niezbędne do ich identyfikacji. W ostatnim kroku realizowana jest klasyfikacja pojazdu.

Zaproponowana metoda ma charakter eksperymentalny i w takiej formie nie była wcześniej stosowana w analizie sygnałów pochodzących z przejazdu pojazdów szynowych. Metoda ta wykorzystuje szereg narzędzi, m.in. metodę MODWT oraz analizę statystyczną składów kolejowe. Ze względu na charakter eksperymentalny tej metody, istnieje potrzeba dalszych badań i weryfikacji jej skuteczności w praktyce. Jednakże, metoda ta ma duży potencjał i może znaleźć zastosowanie w analizie sygnałów wibroakustycznych w wielu dziedzinach, takich jak przemysł, transport czy medycyna. Ważnym aspektem tej metody jest także fakt, że pozwala ona na uzyskanie informacji o pojazdach na podstawie charakterystyki emitowanego przez nie hałasu i drgań.

Poniżej przedstawiono schemat postępowania w celu identyfikacji poruszającego się pojazdu przy pomocy metody wibroakustycznej. Podpunkty te podzielono na osiem kroków kolejno:

1. Rejestracja sygnałów w trzech ortogonalnych osiach X, Y, Z wraz z rejestracją hałasu.
2. Wycięcie okna sygnału przejazdowego.
3. Wyznaczenie estymatorów sygnałów.
4. Dobór odpowiedniej falki przy wybranej metodzie MODWT.
5. Analiza falkowa – Wykonanie analizy Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform (MODWT), by poznać zawierający najwyższy poziom energii relatywnej i aproksymacji.
6. Aktualizacja bazy danych – Utworzenie bazy danych w formie tabel zawierających informację o energii relatywnej po wykonaniu MODWT.
7. Wyznaczenie cech w celu uzyskania miar charakterystycznych dla poruszających się składów.
8. Identyfikacja i klasyfikacja pojazdów.

### 8.1.1 REALIZACJA METODY IDENTYFIKACJI- ANALIZA WYNIKÓW

W kolejnych rozdziałach niniejszej pracy posłużono się skrótami, które oznaczają:

- X, Y, Z – oś X, Y lub Z w zarejestrowanych sygnałach drganiowych,
- Dźwięk– ciśnienie akustyczne zarejestrowane podczas pomiarów wibroakustycznych,
- sygnatury zawierające zaimki E, P, T lub L oznaczają kolejno: składy EZT, Pośpieszne-Pasażerskie, Towarowe, Lokomotywa pojedyncza-Lokomotywa.
- P2P – metoda analizy sygnałów, która polega na pomiarze różnicy amplitudy między dwoma skrajnymi punktami sygnału,
- fk – analiza falkowa z wykorzystaniem falki Feyer-Korokvin,
- coif –analiza falkowa z wykorzystaniem falki Coiflet.

Poniższe działy podzielono zgodnie z zamieszczonym w rozdziale 8 schematem postępowania w przypadku analizy i weryfikacji wyników uzyskanych w niniejszej pracy doktorskiej.

## 8.1.2 ZAREJESTROWANE SYGNAŁY

Poniżej przedstawiono zestawienie sygnałów zarejestrowanych podczas pomiarów A i B, przedstawionych w tabeli 22.

Tabela 22 Zestawienie zarejestrowanych sygnałów pomiarów A.

Kategoria	Nazwa	Typ składu	Dodatkowe informacje
P	P1	Pasażerski	Prędkość 120km/h
P	P2	Pasażerski	4 wagony pasażerskie i lokomotywa 4 osiowa
T	T1	Towarowy	32 wagony towarowe, 2 lokomotywy 4 osiowe
T	T2	Towarowy	42 wagony towarowe, 2 lokomotywy 4 osiowe
P	P3	Pospieszny	7 wagonów, lokomotywa 4 osiowa
E	E1	EZT	2 członowy zestaw EZT
T	T3	Towarowy	22 wagony towarowe, lokomotywa 6 osiowa
P	P4	Pasażerski	4 wagony, lokomotywa 4 osiowa
P	P5	Pasażerski	10 wagonów, lokomotywa 4 osiowa
P/KDP	P6	KDP	Prędkość 160km/h

W pomiarach A wykonano rejestrację ciśnienia akustycznego i drgań w trzech osiach. Zarejestrowano sześć składów pasażerskich (P) w tym jednego typu KDP, trzech składów towarowych (T) oraz jednego składu EZT (E). Dane dotyczące obu lokalizacji A i B przedstawiono w tabeli 23.

Tabela 23 Zestawienie zarejestrowanych sygnałów pomiarów B.

Kategoria	Nazwa	Typ składu	Dodatkowe informacje	Prędkość [km/h]
T	T4	Towarowy	40 wagonów towarowych	37
T	T5	Towarowy	28 wagonów towarowych	37
L	L1	Lokomotywa		40
T	T6	Towarowy	42 wagony typ EOS, 2 lokomotywy EU07	40
L	L2	Drezyna		40
P	P7	Pasażerski	3 wagony	40
T	T7	Towarowy	32 wagony towarowe	37
L	L3	Lokomotywa		42
E	E2	EZT	EN57	30
E	E3	EZT	Elf-2	38
T	T8	Towarowy	Wagony cysterny	44
T	T9	Towarowy	18 wagonów węglarek	40
L	L4	Lokomotywa		40
E	E4	EZT	Elf-2	40
E	E5	EZT	EN57	40
T	T10	Towarowy	24 wagony i 2 lokomotywy manewrowe	40
T	T11	Towarowy	39 wagonów cystern	35
E	E6	EZT	ELF-2	40
T	T12	Towarowy	30 wagonów typu FALS (towarowych)	35



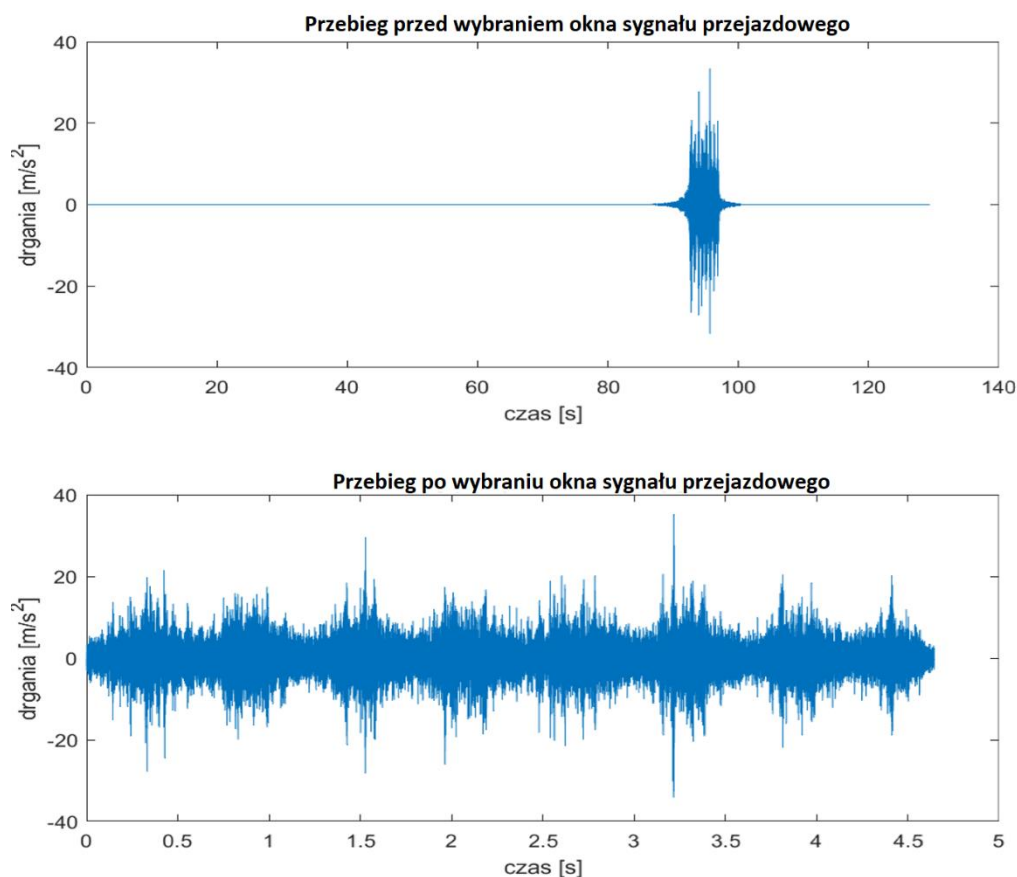
W pomiarach B wykonano rejestrację ciśnienia akustycznego i drgań w trzech osiach. Zarejestrowano jeden skład typu osobowy/pasażerski (P), dziewięciu składów towarowych (T), pięciu składów typu EZT (E) oraz czterech luźno poruszających się lokomotyw/drezyn (L). Lokalizacja mikrofonu: 1,65m od szyny i 0,5m nad główką szyny.

Łączna liczba: 29 składów, w tym:

- 7 składów typu P,
- 12 składów typu T,
- 6 składów typu E.

## 8.2 OKNA SYGNAŁU PRZEJAZDOWEGO

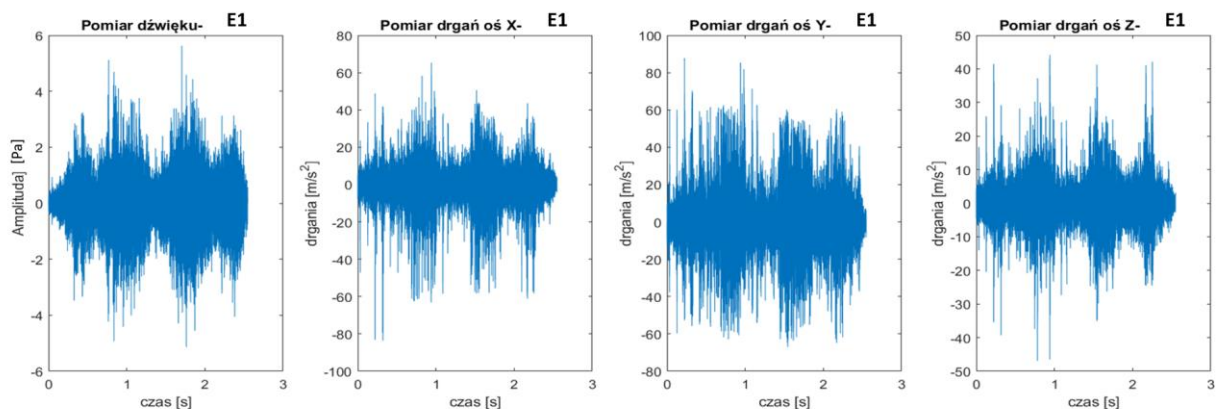
W następnym kroku wykonano ograniczenie sygnału do okna przejazdu, przykład na rysunku 72. W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki z punktów pomiarowych oznaczonych jako A i B. Sygnały zazwyczaj trwały kilka minut i były rejestrowane kilka minut przed i po przejechaniu danego składu przez punkt pomiarowy. Analizie poddano tylko sygnały zawierające sam przejazd składu, tj. po wycięciu fragmentów zawierających moment przejazdu.



Rysunek 72 Przebieg przed i po dokonaniu wycięcia fragmentu przejazdu składu. Źródło: opracowanie własne.

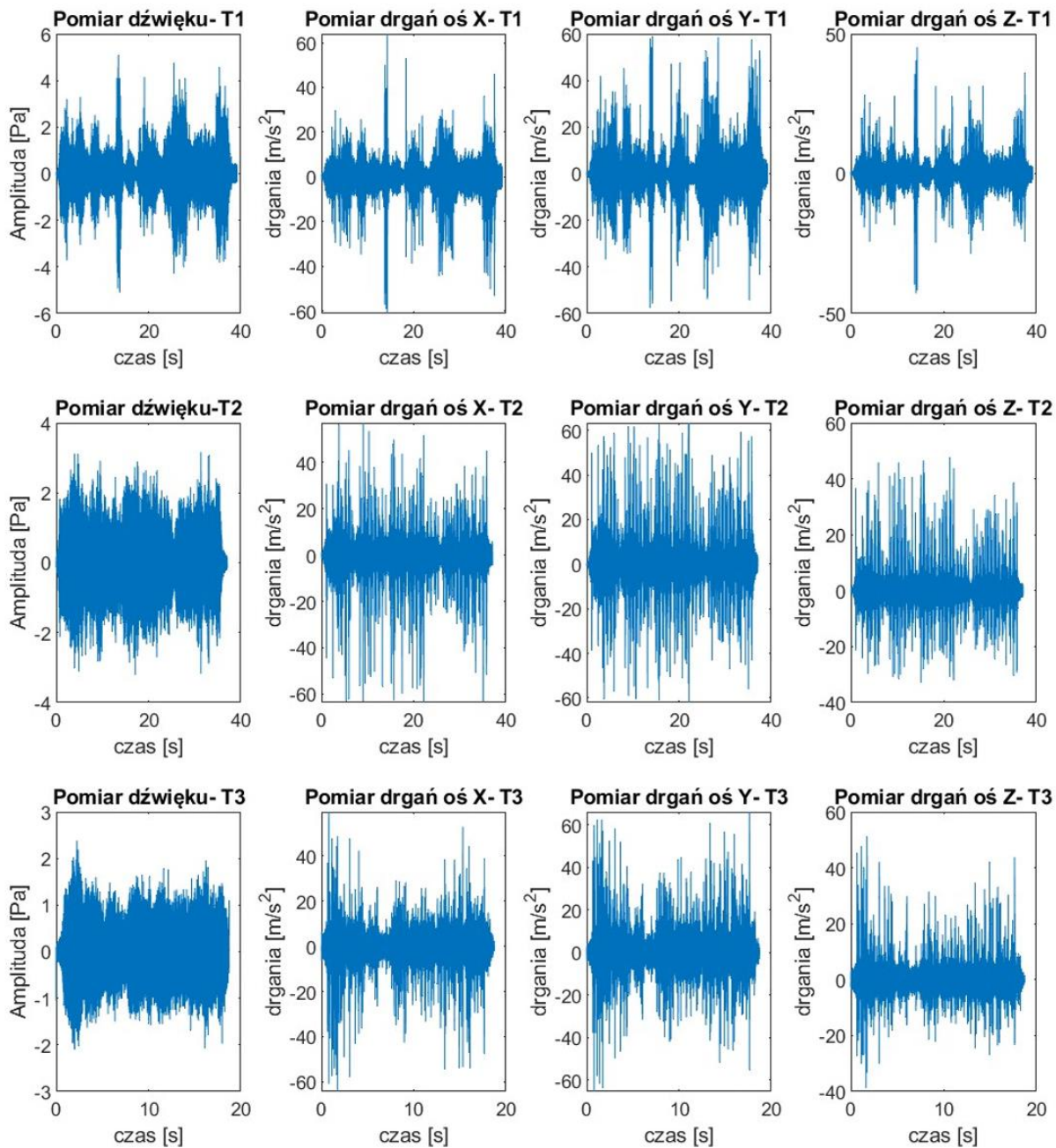


Poniżej przedstawiono przebiegi sygnałów wibroakustycznych, które zostały zarejestrowane w punktach pomiarowych A i B. W pierwszej kolejności zaprezentowano pomiary z punktu A, gdzie zarejestrowano przejazdy trzech rodzajów składów kolejowych: towarowych (T), elektrycznych zespołów trakcyjnych (EZT) oraz składów pasażerskich (P). Na rysunku 73 przedstawiono pojedynczy skład zarejestrowany w punkcie pomiarowym A, oznaczony jako E-E1 (elektryczny zespół trakcyjny).



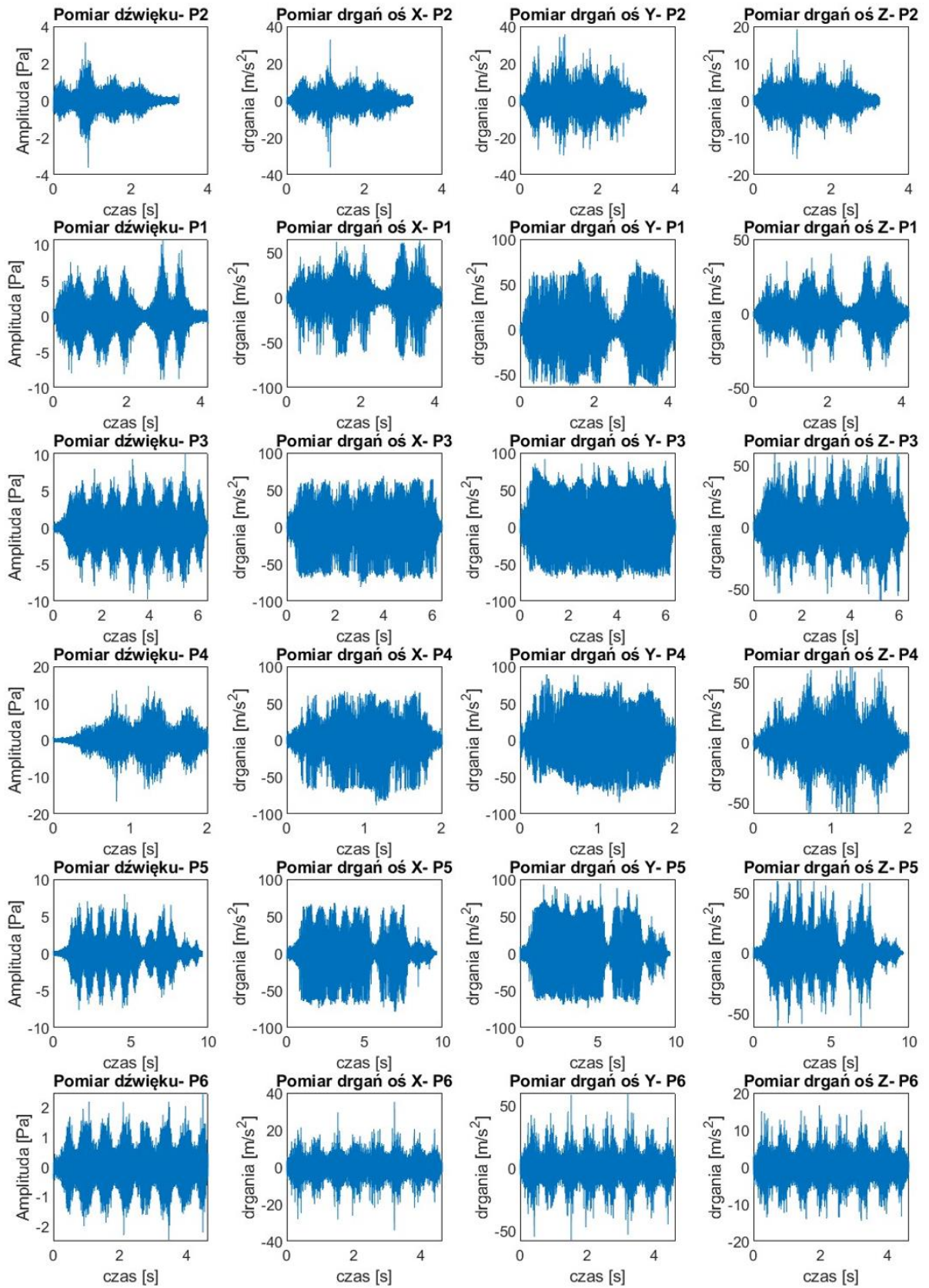
Rysunek 73 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar A, skład typ E.

Na rysunku 74 przedstawiono składy zarejestrowane w punkcie pomiarowym A oznaczone jako T1, T2 oraz T3. Są to składy towarowe.



Rysunek 74 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar A, skład typ T.

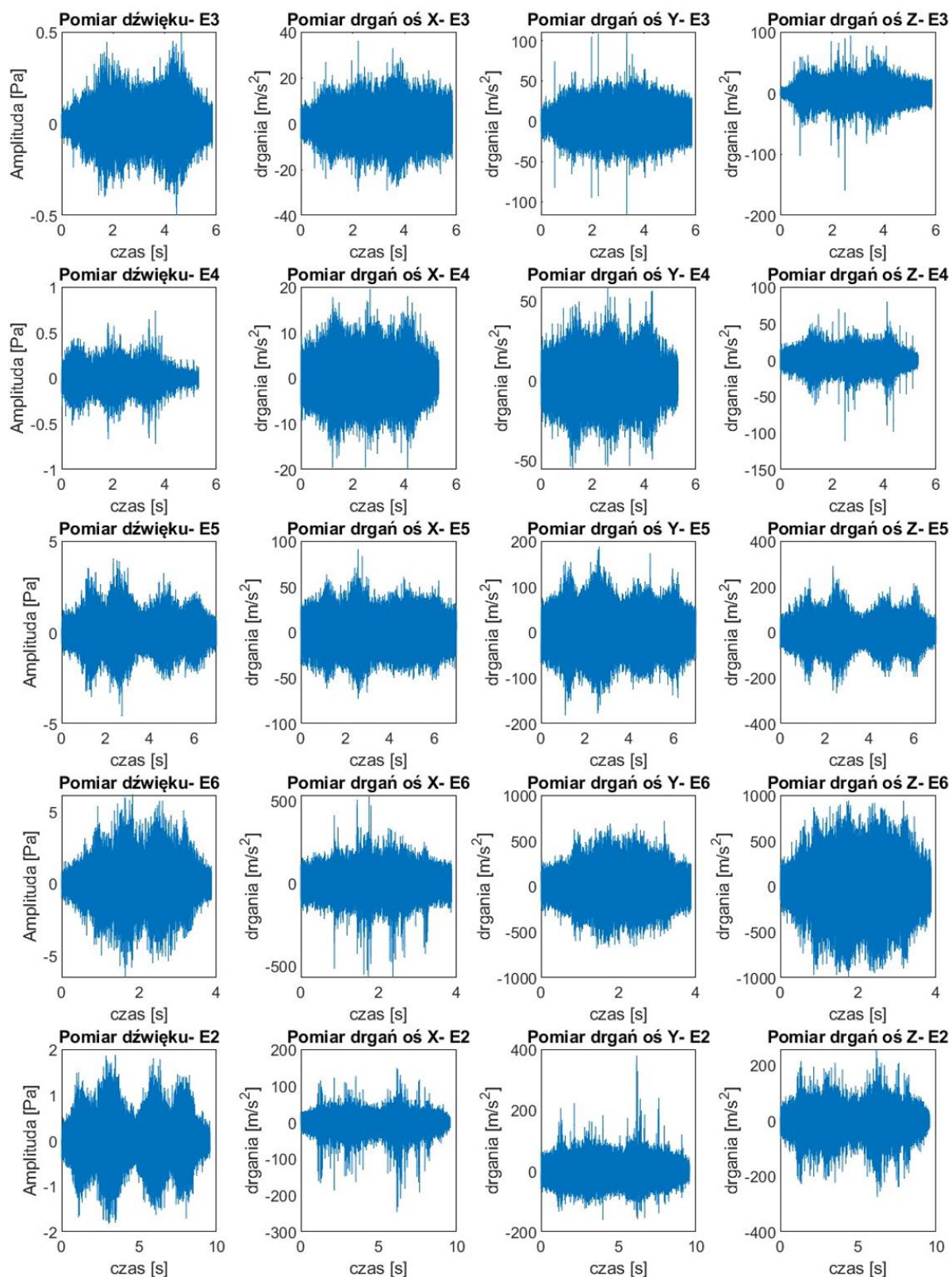
Najliczniejszą grupą zarejestrowaną w punkcie pomiarowym A były składy oznaczone jako P-pasażerskie osobowe, były to składy oznaczone jako E1, P1, P3, P4, P5 oraz P6- Rysunek 75.



Rysunek 75 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar A, skład typ P.

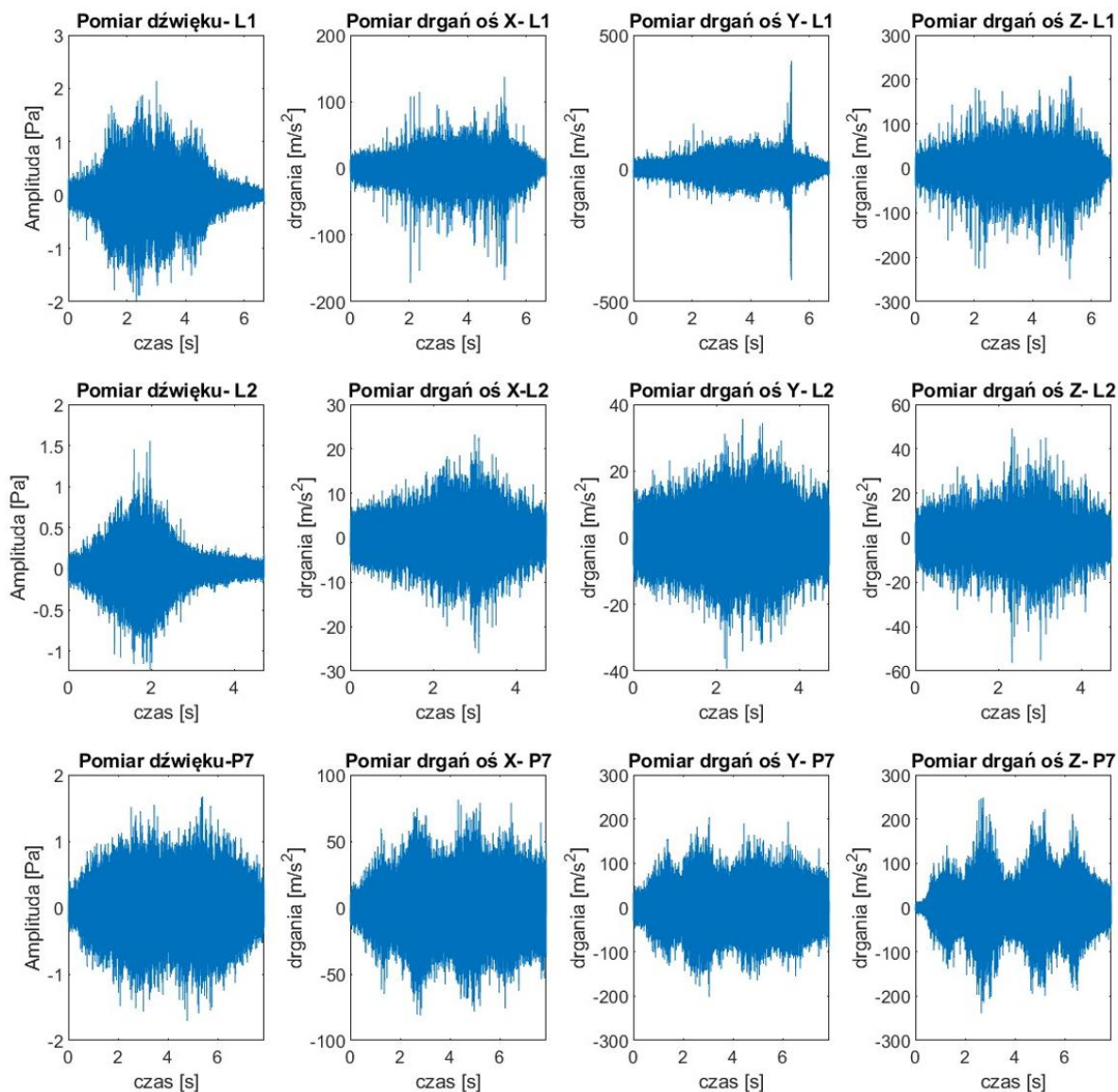


Na rysunku 76 przedstawiono zarejestrowane składy oznaczone jako EZT (E), grupa ta zawiera pięć zarejestrowanych pojazdów szynowych oznaczonych jako E3,E4, E5, E6 oraz E2.



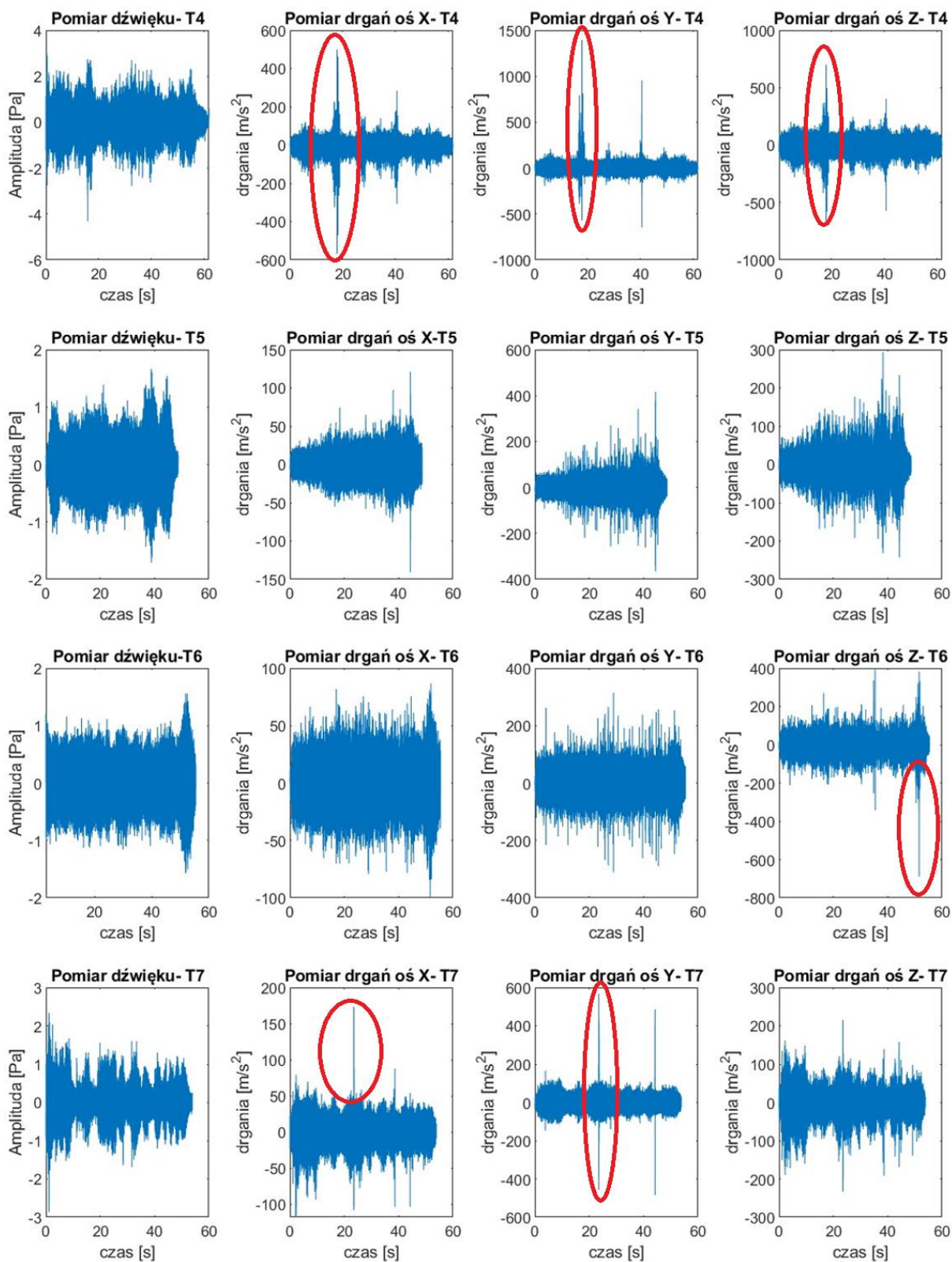
Rysunek 76 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ E.

Na rysunku 77 przedstawiono przebiegi pojazdów szynowych typu pasażerskie osobowe (P) oznaczone jako P7, oraz pojedynczych dwóch lokomotyw (L) oznaczone jako L1 oraz L1.



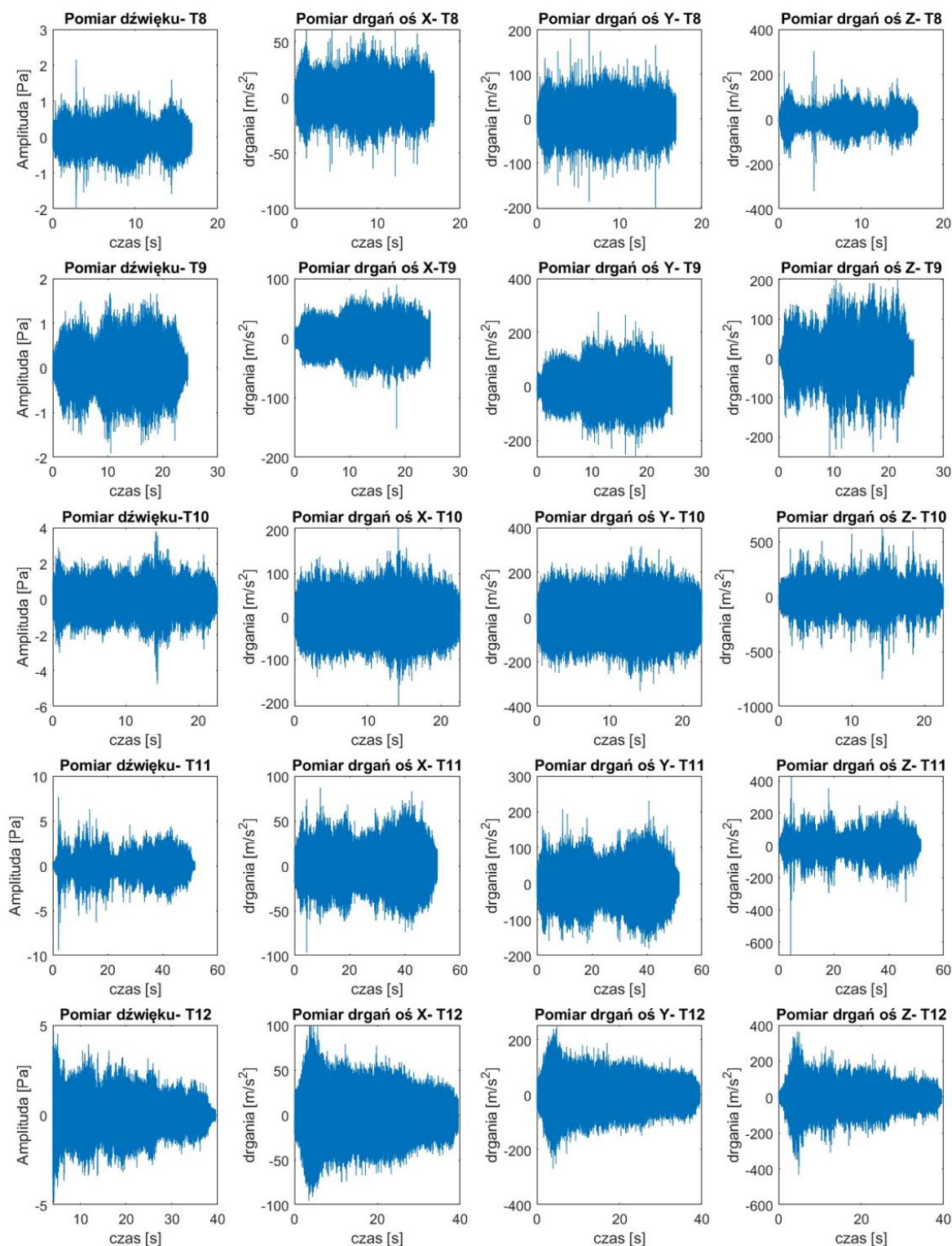
Rysunek 77 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ P i L.

Na rysunku 78 oraz 79 przedstawiono zarejestrowane składy towarowe zarejestrowane w punkcie pomiarowym B oznaczone jako T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11 oraz T12.



Rysunek 78 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ T część 1.





Rysunek 79 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ T część 2.

### 8.3 ANALIZA ESTYMATORÓW SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH I CIŚNIENIA AKUSTYCZNEGO

Podstawowej analizie estymatorów sygnałów drganiowych w trzech ortogonalnych osiach oraz ciśnienia akustycznego dokonano w celu przedstawienia wybranych cech sygnałów. W pierwszej kolejności zaprezentowano wyniki analizy w punkcie pomiarowym A, następnie w punkcie B.

W tabeli 24 przedstawiono analizę estymatorów pomiarów drgań dokonanych w punkcie pomiarowym A. Najwyższe wartości dla danego pomiaru zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 24 Zestawienie estymatorów z przebiegów drgań z punktu pomiarowego „A”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T- towarowy, P-pasażerski, E-EZT.

Sygnatura	Kategoria	OŚ	P2P	RMS
T1	T	X	112,79	3,84
		Y	110,67	<b>5,24</b>
		Z	<b>113,03</b>	3,89
T2	T	X	108,07	4,42
		Y	<b>119,67</b>	<b>5,96</b>
		Z	98,96	5,64
T3	T	X	<b>112,79</b>	4,68
		Y	110,67	<b>6,07</b>
		Z	111,12	5,24
P1	P	X	<b>112,79</b>	9,96
		Y	110,67	<b>17,99</b>
		Z	83,40	5,51
P2	P	X	<b>67,01</b>	3,11
		Y	65,72	<b>5,38</b>
		Z	41,52	2,50
P6	P	X	69,34	3,98
		Y	<b>117,66</b>	<b>8,08</b>
		Z	31,01	2,25
P3	P	X	112,79	16,44
		Y	110,67	<b>25,40</b>
		Z	<b>113,03</b>	9,64
P4	P	X	112,79	14,66
		Y	110,67	<b>23,42</b>
		Z	<b>113,03</b>	8,92
P5	P	X	112,79	13,49
		Y	110,67	<b>22,17</b>
		Z	<b>113,03</b>	7,91
E1	E	X	<b>112,79</b>	10,89
		Y	110,67	<b>16,29</b>
		Z	100,11	5,85

W tabeli 25 przedstawiono analizę pomiarów ciśnienia akustycznego dokonanych w punkcie pomiarowym A.

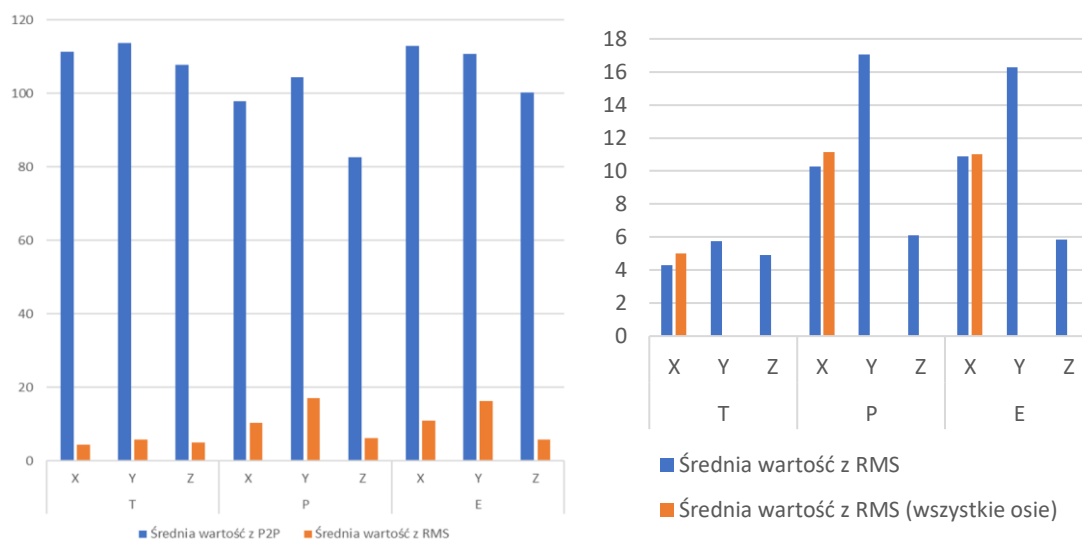
Tabela 25 Zestawienie estymatorów z zarejestrowanych sygnałów dźwiękowych z punktu pomiarowego „A”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T- towarowy, P-pasażerski, E-EZT.

Sygnatura	Kategoria	P2P	RMS
T1	T	10,13	0,54
T2	T	6,36	0,52
T3	T	4,48	0,37
P1	P	19,63	1,44
P2	P	6,73	0,32
P3	P	19,87	1,56
P4	P	30,98	2,27
P5	P	15,44	1,12
P6	P	4,98	0,38
E1	E	10,75	0,88

W tabeli 26 i na rysunku 80 przedstawiono uśrednione wyniki wartości P2P, RMS dla pomiarów drganiowych w punkcie pomiarowym A. Uśrednienie to dotyczy podziału na docelowe kategorie T, P i E z podziałem na osie X, Y oraz Z. Dla analizy P2P wynika z nich, iż sygnały drganiowe zawierają się pomiędzy 82,50 a 113,67. Najniższe wartości mają składy typu P, a najwyższymi cechują się składy typu T i E. W przypadku RMS wyniki wskazują na najwyższe wartości dla składów typu P, a najniższe dla składów typu T.

Tabela 26 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 24 dla pomiarów w punkcie pomiarowym A. (wyniki dla drgań).

Kategoria	Oś	Średnia wartość z P2P	Średnia wartość z RMS	Średnia wartość z RMS (wszystkie osie)
T	X	111,21	4,31	4,99
	Y	113,67	5,75	
	Z	107,70	4,92	
P	X	97,91	10,27	11,15
	Y	104,34	17,07	
	Z	82,50	6,12	
E	X	112,79	10,89	11,01
	Y	110,67	16,29	
	Z	100,11	5,85	

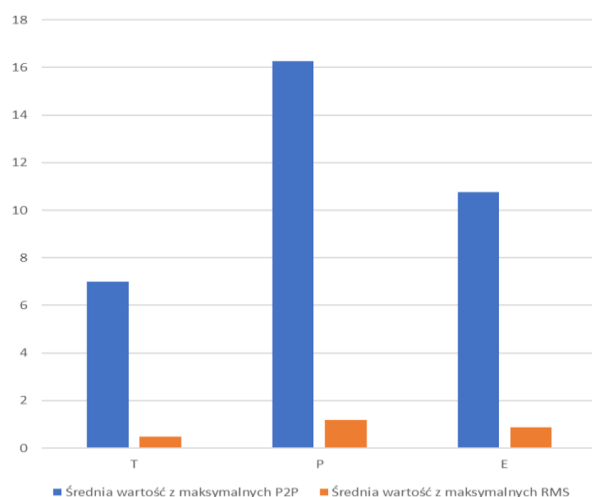


Rysunek 80 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 26 dla pomiarów w punkcie pomiarowym A. (wyniki dla drgań).

W tabeli 27 i na rysunku 81 przedstawiono uśrednione wyniki wartości P2P oraz RMS dla pomiarów akustycznych w punkcie pomiarowym A. Uśrednienie to dotyczy podziału na docelowe kategorie T, P i E. Dla analizy P2P wynika, iż sygnały akustyczne zawierają się pomiędzy 6,99 a 16,27. Najniższe wartości mają składy typu T, a najwyższą cechuje się skład typu P. W przypadku RMS wyniki wskazują także na najwyższe wartości dla składów typu P, a najniższe dla składów typu T.

Tabela 27 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 25. dla pomiarów w punkcie pomiarowym A (wyniki dla ciśnienia akustycznego).

Rodzaj składu	Średnia wartość z maksymalnych P2P	Średnia wartość z maksymalnych RMS
T	6,99	0,47
P	16,27	1,18
E	10,75	0,88



Rysunek 81 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 25. dla pomiarów w punkcie pomiarowym A (wyniki dla ciśnienia akustycznego).

Analogicznie przeanalizowano wyniki dla pomiarów B. Zestawienia przedstawiono w tabelach 28-32.

W tabeli 28 i 29 przedstawiono analizę pomiarów drgań dokonanych w punkcie pomiarowym B. Najwyższe wartości P2P oraz RMS dla danego pomiaru zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 28 Zestawienie estymatorów z przebiegów drgań z punktu pomiarowego „B”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: P-pasażerski, E-EZT, L-lokomotywa.

Sygnatura	Kategoria	OŚ	P2P	RMS
E2	E	X	394,94	19,40
		Y	<b>536,61</b>	25,49
		Z	532,05	<b>44,24</b>
E3	E	X	65,32	5,26
		Y	227,76	<b>13,08</b>
		Z	<b>251,76</b>	11,95
E4	E	X	39,63	3,21
		Y	114,35	<b>9,32</b>
		Z	<b>189,60</b>	9,31
E5	E	X	162,63	12,96
		Y	369,30	29,85
		Z	<b>558,66</b>	<b>44,24</b>
E6	E	X	1100,7	64,65
		Y	1386,6	137,32
		Z	<b>1937,2</b>	<b>243,93</b>
L1	L	X	309,46	16,24
		Y	<b>820,22</b>	25,55
		Z	457,79	<b>35,05</b>
L2	L	X	49,26	3,76
		Y	74,75	6,00
		Z	<b>105,15</b>	<b>8,41</b>
P7	P	X	162,50	14,19
		Y	405,17	31,85
		Z	<b>486,93</b>	<b>35,22</b>

Tabela 29 Zestawienie estymatorów z przebiegów drgań z punktu pomiarowego „B”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T-Towarowy.

Sygnatura	Kategoria	OŚ	P2P	RMS
T4	T	X	1062	19,73
		Y	<b>2035,8</b>	26,99
		Z	1358,6	<b>43,86</b>
T5	T	X	262,07	10,07
		Y	<b>782,48</b>	<b>24,80</b>
		Z	535,59	24,52
T6	T	X	185,81	11,92
		Y	<b>625,33</b>	<b>28,37</b>
		Z	1087,4	26,99
T7	T	X	290,32	10,88
		Y	<b>1048,4</b>	21,42
		Z	455,45	<b>21,60</b>

T8	T	X	131,64	9,89
		Y	404,59	23,67
		Z	<b>622,42</b>	<b>25,01</b>
T9	T	X	240,68	14,28
		Y	<b>538,39</b>	<b>36,91</b>
		Z	455,97	34,03
T10	T	X	415,72	28,27
		Y	646,70	53,37
		Z	<b>1383,1</b>	<b>80,99</b>
T11	T	X	182,30	12,13
		Y	408,61	28,87
		Z	<b>1111,2</b>	<b>39,34</b>
T12	T	X	195,74	14,18
		Y	522,12	32,12
		Z	<b>796,35</b>	<b>43,91</b>

W tabeli 30 przedstawiono analizę pomiarów ciśnienia akustycznego dokonanych w punkcie pomiarowym B.

Tabela 30 Zestawienie estymatorów z zarejestrowanych sygnałów dźwiękowych z punktu pomiarowego „B”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T- towarowy, P-pasażerski, E-EZT.

Sygnatura	Kategoria	P2P	RMS
E2	E	3,68	0,3491
E3	E	0,98	0,0865
E4	E	1,44	0,1049
E5	E	8,59	0,6993
E6	E	12,74	1,2574
L1	L	4,12	0,3137
L2	L	2,79	0,1764
P7	P	3,36	0,3164
T4	T	7,35	0,4283
T5	T	3,36	0,2492
T6	T	4,43	0,2738
T7	T	5,17	0,2600
T8	T	4,14	0,2534
T9	T	3,60	0,3122
T10	T	8,52	0,5898
T11	T	17,01	0,7623
T12	T	11,08	0,7256

W tabeli 31 i rysunku 82 przedstawiono uśrednione wyniki wartości P2P oraz RMS dla pomiarów drgań w punkcie pomiarowym B. Uśrednienie to dotyczy podziału na docelowe kategorie T, P, E i L z podziałem na osie X, Y oraz Z. Wynika z nich, dla analizy P2P, iż sygnały drganiowe zawierają się pomiędzy 162,50 a 867,34. Najniższe wartości osiągają składy typu L (średnia 302),

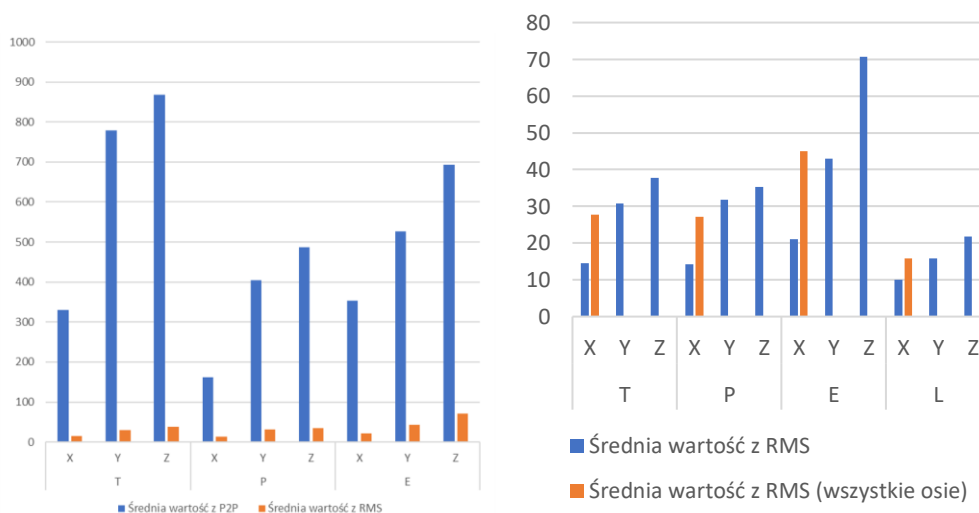


a najwyższe cechują składy typu T (średnia 658). W przypadku RMS wyniki wskazują na najwyższe wartości dla składów typu E, a najniższe dla składów typu L.

Istotną kwestią jest zaznaczenie występowania bardzo wysokich wartości P2P w tabelach 28 oraz 29. Wiąże się to z pojedynczymi szczytowymi wartościami. Celowo nie wykonano filtracji dolnoprzepustowej w celu zaprezentowania przebiegów niefiltrowanych. Przykłady takich anomalii zaznaczono na rysunku 78 czerwonymi okręgami. W celu częściowej eliminacji należałoby zastosować filtr dolnoprzepustowy 10 kHz. Jednak istniejące pojedyncze wartości peak utrudniają identyfikację i fałszują wyniki pojedynczych estymatorów P2P.

Tabela 31 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 28 i 29. (wyniki dla drgań). Punkt pomiarowy B.

Kategoria	OŚ	Średnia wartość z P2P	Średnia wartość z RMS	Średnia wartość z RMS (wszystkie osie)
T	X	329,59	14,59	27,7
	Y	779,16	30,72	
	Z	867,34	37,81	
P	X	162,50	14,19	27
	Y	405,17	31,85	
	Z	486,93	35,22	
E	X	352,64	21,10	44,95
	Y	526,92	43,01	
	Z	693,85	70,73	
L	X	179,36	10,00	15,84
	Y	447,49	15,78	
	Z	281,47	21,73	



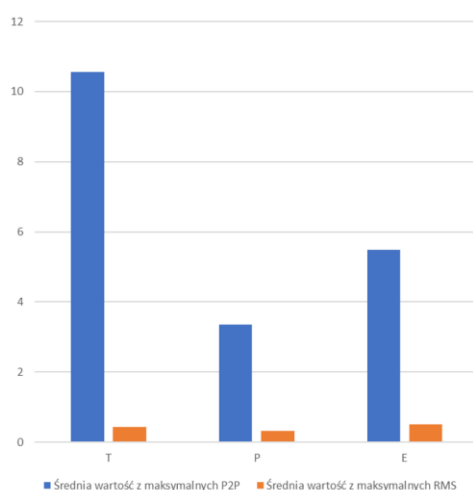
Rysunek 82 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 31. (wyniki dla drgań). Punkt pomiarowy B

W tabeli 32 i na rysunku 83 przedstawiono uśrednione wyniki wartości P2P, RMS dla pomiarów akustycznych w punkcie pomiarowym B. Uśrednienie to dotyczy podziału na docelowe

kategorię T, P, E i L. Wynika z nich, dla analizy P2P, iż sygnały akustyczne zawierają się pomiędzy 3,36 a 10,56. Najwyższe wartości mają składowe typu T, a najniższą wartością cechuje się skład typu P. W przypadku RMS wyniki wskazują na najwyższe wartości dla składów typu E, a najniższe dla składów typu L.

Tabela 32 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 30. (wyniki dla ciśnienia akustycznego). Punkt pomiarowy B.

Rodzaj składu	Średnia wartość z maksymalnych P2P	Średnia wartość z maksymalnych RMS
T	10,56	0,44
P	3,36	0,32
E	5,49	0,50
L	3,46	0,25



Rysunek 83 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 30. (wyniki dla ciśnienia akustycznego). Punkt pomiarowy B

Ze względu na niejednoznaczności w identyfikacji pojazdu na podstawie estymatorów sygnałów konieczne było zastosowanie zaawansowanych metod, takich jak analiza falkowa, co zostało przedstawione w dalszej części pracy.

## 8.4 ANALIZA FALKOWA METODA MODWT

Transformacja falkowa to matematyczna metoda przetwarzania sygnałów, polegająca na rozkładzie sygnału na składowe fale o różnej skali i częstotliwości. W transformacji falkowej sygnał jest przemnażany przez funkcje falkowe, które są przesuwane i skalowane, a następnie sumowane w celu otrzymania informacji o składowych falowych sygnału. Metoda ta znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach, w tym w analizie obrazów, dźwięków, kompresji danych i rozpoznawaniu wzorców oraz diagnostyce technicznej [71, 89, 133].

Wykorzystana w badaniach metoda Maximal Overlap Discrete Wavelet Decomposition (MODWT) jest liniową operacją filtrującą, która przekształca sygnał na współczynniki związane z wahaniami w zbiorze skal. Stosuje się ją do kontroli zachowań sygnału zależnych od skali. MODWT jest metodą niezmienniczą w czasie, co oznacza, że translacja w sygnale powoduje translację współczynników falkowych o tę samą wielkość. W porównaniu z DWT, MODWT ma kilka zalet, m.in. poprawia wyrównanie zdekomponowanych współczynników falkowych i skalujących na każdym poziomie z oryginalnym szeregiem czasowym. Jest to transformata, która wyrównuje współczynniki falkowe w każdym przedziale czasowym z oryginalnym sygnałem. Łatwo jest więc analizować zlokalizowaną zmienność sygnału względem skali i czasu. MODWT może być użyta do uzyskania dekompozycji addytywnej opartej na skali i dekompozycji energetycznej opartej również na skali [57].

Funkcja  $f(x)$  jest kombinacją liniową funkcji skalującej i funkcji falkowej, gdzie  $j_0$  jest liczbą poziomów dekompozycji. Wyjściem jest kombinacja współczynników szczegółowych i skalujących. Szczegółowe współczynniki są wytwarzane przez transformację na każdym poziomie, ale współczynniki skalowania są wytwarzane na poziomie końcowym.

Dane wejściowe są próbkami funkcji  $f(x)$  oszacowanymi w  $N$  punktach czasowych. Funkcja ta może być wyrażona jako liniowa kombinacja funkcji skalowania  $\phi(x)$  i falki  $\psi(x)$  w różnych skalach i translacjach.

$$f(x) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k 2^{-\frac{j_0}{2}} \phi(2^{-j_0}x - k) + \sum_{j=1}^{j_0} f_j(x) \quad (20)$$

, gdzie:

—  $j_0$  to liczba poziomów dekompozycji falkowej.

$$f_j(x) = \sum_{k=0}^{N-1} d_{j,k} 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}x - k) \quad (21)$$

MODWT zwraca  $N$ -wiele współczynników  $\{c_k\}$  i  $(j_0 \cdot N)$  wiele szczegółowych współczynników  $\{d_{j,k}\}$  rozwinięcia. MODWT dzieli energię na współczynniki skalowania i różne skale.

$$\|X\|^2 = \sum_{j=1}^{j_0} \|W_j\|^2 + \|V_{j_0}\|^2 \quad (22)$$

, gdzie:

—  $x$  to dane wejściowe,

—  $w_j$  to współczynniki szczegółowości przy skali  $j$ ,

—  $v_{j_0}$  to współczynniki skalowania poziomu końcowego.

W ramach wstępnej analizy zastosowano następujące rodziny falek:

- sym - Symlets
- coif - Coiflet
- db - falki Daubechiesa
- fk - falki Fejera-Korowkina

Wykorzystano je w ramach eksperymentu porównawczego w celu dobrania odpowiedniej falki. Zastosowano przykładowe sygnały trzech poruszających się różnych składów kolejowych. Przemieszczały się one z tą samą prędkością, w tym samym punkcie pomiarowym.

Przeanalizowano zarejestrowane ciśnienie akustyczne oraz drgania w jednej osi (wykorzystano do porównania oś Y). W czterech dobranych falkach zastosowano te same wartości wyjściowe: rodzaj (4) oraz poziom (8). Wynikało to z wykonanego porównania poziomów – poniżej poziomu 8 liczba poziomów dekompozycji mogłaby być niewystarczająca, natomiast powyżej 8 liczba dekompozycji była zbyt duża. w tabeli 33 przedstawiono wybrane zakresy poziomów częstotliwości wraz z poziomami dekompozycji dla czterech wybranych analiz falkowych. Zauważono, iż przy dekomponowania sygnału metodą MODTW, przy częstotliwości próbkowania 50 kHz, zakresy różnią się od siebie w zależności od dobranej falki. Te same poziomy zachowane są jedynie w przypadku falki sym oraz db. Należy również zauważyć, że poziomy pomiędzy dobranymi falkami są zbieżne przynajmniej częściowo. W poziomach dekompozycji rozbieżności dochodzą do kilkudziesięciu herców, zwłaszcza w wyższych poziomach.

*Tabela 33 Zakresy pasm częstotliwości wraz z poziomami dekompozycji dla czterech wybranych analiz falkowych.*

	Częstotliwości			
Poziomy dekompozycji	Sym [Hz]	Db [Hz]	Fk [Hz]	Coif [Hz]
1	12500-25000	12500-25000	12500-25000	12500-25000
2	6030-13000	6030-13000	5280-14600	6220-12600
3	3020-6460	3020-6460	2590-7090	3110-6280
4	1510-3230	1510-3230	1290-3530	1550-3140
5	754-1620	754-1620	645-1760	777-1570
6	377-808	377-808	322-881	389-785
7	188-404	188-404	161-441	194-393
8	94,2-202	94,2-202	80,6-220	97,2-196
aproxymacja	0-97,3	0-97,3	0-91,4	0-97,6

W tabelach 34, 35, 36 przedstawiono zestawienie przykładowych poziomów dekompozycji metodą MODTW, w celu wybrania najlepiej dopasowanej falki dla późniejszego jej stosowania w przedstawionej metodzie. przypadku składu 1 (E-E4) oraz 3 (T-T4) zauważono dominację najwyższych wartości danych poziomów dla falki fk, natomiast dominująca zarejestrowana wartość stanowiła odpowiedź dekompozycji falki coif. W przypadku składu 2 falka fk oraz coif stanowiły większość wybranych dominujących poziomów, natomiast najwyższe wartości pojedynczej falki stanowiła dekompozycja coif, tak jak w składach 1 i 3. Zdecydowano się zatem na zastosowanie podwójnej analizy, zawierającej dane z falki fk oraz coif.

Dokonano wyboru falek fk oraz coif na podstawie danych o najwyższym poziomie energii relatywnej w wybranych poziomach dekompozycji oraz w najwyższym wyniku ze wszystkich wskazanych w tabelach 34-36. Reasumując najwyższe poziomy energii relatywnej w zadanych poziomach od 1-8 + A prezentowały się następująco:

- falka sym- 8 razy najwyższy poziom wśród 54 wyników,
- falka db- 8 razy najwyższy poziom wśród 54 wyników,
- falka fk- 34 razy najwyższy poziom wśród 54 wyników,
- falka coif 12 razy najwyższy poziom wśród 54 wyników w tym najwyższe poziomy ze wszystkich analizowanych.

*Tabela 34 Poziomy dekompozycji metodą MODTW składu 1 „Ew14”. Kolorem zielonym zaznaczono najwyższy poziom w [%] energii relatywnej falki natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono najwyższy poziom ze wszystkich zarejestrowanych.*

Poziomy	Skład 1 „E4”- ciśnienie akustyczne				Skład 1- „E4”- drgania			
	sym	db	fk	coif	sym	db	fk	coif
1	0,02	0,02	0,37	0,01	7,15	7,15	17,74	2,44
2	0,45	0,45	1,59	0,32	65,83	65,83	51,49	72,75
3	3,45	3,45	5,71	3,07	15,39	15,39	17,9	13,3
4	12,51	12,51	14,63	12,52	5,61	5,61	6,82	5,39
5	23,8	23,8	26,23	21,9	3,26	3,32	3,43	3,27
6	46,77	46,77	36,65	50,94	2,25	2,25	1,93	2,45
7	10,84	10,84	11,67	9,19	0,48	0,48	0,59	0,38
8	1,69	1,69	2,33	1,58	0,02	0,02	0,07	0,01
apx	0,47	0,47	0,81	0,46	0	0	0,02	0

Tabela 35 Poziomy dekompozycji metodą MODTW składu 1 „Lw3”. Kolorem zielonym zaznaczono najwyższy poziom w [%] energii relatywnej falki natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono najwyższy poziom ze wszystkich zarejestrowanych.

	Skład 2- „L1” ciśnienie akustyczne				Skład 2-„L1”- drgania			
	sym	db	fk	coif	sym	db	fk	coif
1	0,06	0,06	0,55	0,04	11,8	11,8	16,1	12,27
2	0,73	0,73	2,26	0,54	31,6	31,6	32,96	28,88
3	5,58	5,58	7,88	5,01	37,89	37,89	33,6	39,85
4	17,45	17,45	17,53	17,54	10,7	10,7	9,38	11,13
5	21,77	21,77	21,75	21,76	5,97	5,97	5,81	5,82
6	24,78	24,78	22,4	25,58	1,28	1,28	1,3	1,31
7	19,55	19,55	17,56	19,63	0,69	0,69	0,71	0,67
8	8,1	8,1	7,66	8,02	0,08	0,08	0,12	0,07
aproxymacja	1,97	1,97	2,41	1,87	0	0	0,03	0

Tabela 36 Poziomy dekompozycji metodą MODTW składu 1 „TT4”. Kolorem zielonym zaznaczono najwyższy poziom w [%] energii relatywnej falki natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono najwyższy poziom ze wszystkich zarejestrowanych.

	Skład 3- „T4” ciśnienie akustyczne				Skład 3-„T4”- drgania			
	sym	db	fk	coif	sym	db	fk	coif
1	0,04	0,04	0,46	0,02	1,33	1,33	7,37	0,78
2	0,65	0,65	1,93	0,48	28,32	28,32	30,04	25,45
3	4,69	4,69	6,6	4,36	47,75	47,75	41,58	50,89
4	12,87	12,87	14,64	13	12,97	12,97	11,54	13,35
5	22,99	22,99	24,37	21,46	7,88	7,88	7,53	7,78
6	38,37	38,37	31,7	40,71	1,28	1,28	1,34	1,31
7	13,2	13,2	12,9	12,63	0,41	0,41	0,48	0,39
8	6,67	6,67	6,03	6,64	0,05	0,05	0,09	0,05
aproxymacja	0,83	0,83	1,36	0,71	0,01	0,01	0,03	0

W celu prezentacji wyników wykorzystano tzw. „energię relatywną” lub inaczej względną energią falkową. Energia relatywna (ang. relative energy) w analizie falkowej to miara stopnia dopasowania fali do sygnału. W analizie falkowej sygnał jest dekomponowany na składowe fale o różnych częstotliwościach i amplitudach. Energia relatywna określa, jaka część całkowitej energii sygnału jest skoncentrowana w danej składowej fali w porównaniu do innych falek tej samej dekompozycji.

Energia relatywna jest szczególnie przydatna w analizie falkowej, ponieważ umożliwia określenie, które składowe fale są dominujące dla danego sygnału. Wysoka energia relatywna odpowiada za występowanie charakterystycznych wzorców w sygnale, co może pomóc w identyfikacji.

Energia relatywna może być wyrażana w procentach lub w innych jednostkach, np. dB (decybele). Analiza energii relatywnej jest często stosowana w biologii, medycynie, akustyce, geologii i innych dziedzinach, w których zachodzi potrzeba analizy sygnałów o złożonej strukturze. Energia ta może służyć jako narzędzie do wykrywania i charakteryzowania



określonego zjawiska w płaszczyznach czasu i częstotliwości [48]. W niniejszym wypadku służy do analizowania cech charakterystycznych poruszających się składów kolejowych.

## 8.5 WYNIKI ANALIZY FALKOWEJ METODĄ MODWT

W rozdziałach 8.5.1 oraz 8.5.2 zaprezentowano wyniki metody MODWT. Poniżej przedstawiono zestawienie poziomów dekompozycji oraz pasm częstotliwości przy próbkowaniu wynoszącym 50 kHz – tabela 37.

*Tabela 37 Zestawienie poziomów dekompozycji dla falek fk oraz coif przy próbkowaniu 50000Hz dla falek nr 4 poziomu 8.*

Poziomy	fk (nr 4, poziom 8) [Hz]	coif (nr 4, poziom 8) [Hz]
1	12500-25000	12500-25000
2	5280-14600	6220-12600
3	2590-7090	3100-6280
4	1290-3530	1550-3140
5	645-1760	777-1570
6	322-881	389-785
7	161-441	194-393
8	80,6-220	97,2-196
Aproksymacja	0-91,4	0-97,6

Jak można zauważyć, poziomy 1-8 oraz aproksymacja występują w przypadku analizy typu fk oraz coif. Poziom 1 jest taki sam dla obu falek, natomiast reszta na siebie „nachodzi”. Można zauważyć, że w przypadku falki fk nachodzenie pomiędzy poziomami jest większe i widoczne, podczas gdy nachodzenie poziomów częstotliwościowych falki coif nie jest duże i stanowi maksymalnie 100 Hz dla poziomu pomiędzy 1 a 2.

### 8.5.1 WYNIKI ANALIZY FALKOWEJ METODĄ MODWT- PRZY UŻYCIU FALKI TYPU COIFLET (coif)

Niniejszy rozdział zawiera zestawienie wyników energii relatywnej (podanej w „%”) wszystkich przeanalizowanych składów w osi X, Y, Z oraz ciśnienia akustycznego z uwzględnieniem średniej oraz odrzuceniem 10% skrajnych wyników falki coif. Podczas wyliczania średniej dane są uporządkowywane według rosnącej kolejności, odrzucany jest niewielki odsetek najbardziej skrajnych obserwacji na obu końcach (najmniejsze i największe wartości w próbie), a następnie oblicza się średnią z pozostałych pomiarów.

W tabeli 38 przedstawiono wyniki z analizy osi X składów towarowych wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 38 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ X												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,00	0,00	0,00	0,13	0,66	0,17	0,56	0,13	0,16	0,09	0,23	0,21	0,20
	2	0,20	0,50	0,50	1,88	28,04	27,15	4,05	25,89	29,60	16,42	15,02	15,02	13,69
	3	4,65	9,42	8,14	16,22	34,35	34,65	21,03	29,40	34,67	21,57	23,24	24,20	21,80
	4	17,24	21,01	18,79	61,11	5,29	5,30	61,05	5,54	5,49	8,09	20,09	22,51	20,96
	5	45,56	41,35	41,95	17,97	22,27	24,48	12,07	30,21	22,01	41,57	23,03	24,08	28,88
	6	31,38	25,96	29,28	2,60	8,92	7,84	1,11	8,44	7,48	12,07	17,90	13,60	13,88
	7	0,95	1,70	1,32	0,07	0,43	0,40	0,11	0,38	0,55	0,18	0,48	0,37	0,58
	8	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,02
	a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

W tabeli 39 przedstawiono wyniki z analizy osi Y składów towarowych wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 2 dekompozycji.

Tabela 39 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Y												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,01	0,02	0,02	0,78	0,75	0,69	5,46	0,6	0,61	1,06	1,66	1,66	1,11
	2	0,16	0,44	0,44	25,45	65,49	65,76	35,45	64,6	67,86	62,89	61,26	62,06	42,66
	3	2,82	6,52	5,76	50,89	22,39	23,27	45,76	20,09	20,86	17,37	14,53	14,65	20,41
	4	12,28	16,72	15,44	13,35	4,9	4,39	7,17	5,66	3,72	7,02	9,92	10,21	9,23
	5	76,92	64,45	65,77	7,78	4,11	3,67	3,96	6,18	3,28	8,52	6,88	7,31	21,57
	6	5,97	7,69	9,62	1,31	1,58	1,51	1,17	2,01	1,99	2,62	4,3	3,31	3,59
	7	1,76	3,86	2,76	0,39	0,73	0,64	0,94	0,82	1,59	0,52	1,42	0,79	1,35
	8	0,08	0,3	0,2	0,05	0,06	0,06	0,08	0,03	0,1	0,01	0,02	0,02	0,08
	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00

W tabeli 40 przedstawiono wyniki z analizy osi Z składów towarowych wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 40 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Z												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,01	0,01	0,01	0,09	0,94	0,71	1,29	0,96	0,96	0,28	0,3	0,28	0,49
	2	0,24	0,42	0,45	1,48	6,4	5,18	4,56	6,77	6,97	2,09	4,28	4,28	3,59
	3	2,19	2,62	2,72	1,15	35,99	35,76	1,51	33,02	44,62	15,48	28,49	31,63	19,60
	4	13,58	13,19	13,34	39,75	13,56	11,66	47,72	16,45	14,23	11,98	11,04	13,73	18,35
	5	34,1	25,7	26,27	45,14	15,78	20,73	40,5	19,75	14,19	33,36	21,42	23,46	26,70
	6	25,06	23,83	27,88	11,21	23,87	23,12	3,23	21,27	15,64	35,17	31,12	24,25	22,14
	7	23,98	32,56	28,37	1,13	3,39	2,77	1,11	1,76	3,25	1,62	3,28	2,31	8,79
	8	0,82	1,63	0,96	0,05	0,07	0,06	0,1	0,02	0,13	0,02	0,07	0,06	0,33
	a	0,01	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00

W tabeli 41 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego składów towarowych wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 6 dekompozycji.

Tabela 41 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów ciśnienia akustycznego- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA CIŚNIENIE AKUSTYCZNE												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,01
	2	0,43	0,43	0,5	0,39	0,32	0,1	0,39	0,37	0,3	0,19	0,25	0,22	0,32
	3	5	5	5,74	4,28	4,85	2,15	5,46	4,22	4,53	2,67	2,9	2,78	4,13
	4	16,35	16,35	19,75	13,19	17,49	7,89	15,11	15,73	15,77	10,42	10,44	12,7	14,27
	5	21,52	21,52	27,94	20,37	21,88	21,71	20,2	28,97	18,5	37,33	24,52	28,61	24,42
	6	32,91	32,91	25,78	42,88	34,4	60,89	25,34	34,3	31,29	44,26	42,22	37,21	37,03
	7	20,71	20,71	18,73	12,05	18,3	5,77	22,98	14,79	27,43	4,95	15,66	13,88	16,33
	8	2,45	2,45	1,31	5,92	2,24	1,19	9,33	1,18	1,93	0,13	3,2	3,71	2,92
	a	0,62	0,62	0,23	0,54	0,51	0,23	1,17	0,43	0,25	0,05	0,82	0,88	0,53

W tabeli 42 przedstawiono wyniki z analizy osi X lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 4 dekompozycji.

Tabela 42 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów L. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ X		
		L1	L2	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,73	0,04	0,39
	2	2,09	3,48	2,79
	3	15,89	20,96	18,43
	4	65,01	64,92	64,97
	5	15,33	9,42	12,38
	6	0,83	1,17	1,00
	7	0,11	0,27	0,19
	8	0,00	0,01	0,01
	a	0,00	0,00	0,00

W tabeli 43 przedstawiono wyniki z analizy osi Y lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 3 dekompozycji.

Tabela 43 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów L. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Y		
		L1	L2	średnia
Poziomu dekompozycji	1	12,27	0,78	6,53
	2	28,88	36,58	32,73
	3	39,85	48,31	44,08
	4	11,13	10,23	10,68
	5	5,82	3,31	4,57
	6	1,31	0,53	0,92
	7	0,67	0,24	0,46
	8	0,07	0,02	0,05
	a	0,00	0,00	0,00

W tabeli 44 przedstawiono wyniki z analizy osi Z lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 4 dekompozycji.

Tabela 44 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów L. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Z		
		L1	L2	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,78	0,42	0,60
	2	2,33	3,95	3,14
	3	1,00	1,02	1,01
	4	48,38	64,26	56,32
	5	44,27	28,86	36,57
	6	2,58	1,27	1,93

	7	0,54	0,20	0,37
	8	0,04	0,03	0,04
	a	0,00	0,00	0,00

W tabeli 45 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

*Tabela 45 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów ciśnienia akustycznego - kategoria składów L. Wartości podane w %.*

		POMIARY CIŚNIENIE AKUSTYCZNE		
		L1	L2	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,02	0,01	0,02
	2	0,46	0,33	0,40
	3	4,37	4,18	4,28
	4	17,39	23,37	20,38
	5	20,54	39,70	30,12
	6	27,72	20,29	24,01
	7	21,78	8,35	15,07
	8	6,52	2,41	4,47
	a	1,20	1,36	1,28

W tabeli 46 przedstawiono wyniki z analizy osi X składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

*Tabela 46 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów P. Wartości podane w %.*

		ANALIZA OŚ X							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	PW6	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,00	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	0,08	0,02
	2	0,47	0,33	1,12	1,57	1,15	0,89	23,91	4,20
	3	11,55	6,25	18,46	23,65	18,44	11,14	29,41	16,98
	4	20,36	21,23	26,67	31,21	28,24	31,57	6,33	23,65
	5	58,37	54,01	38,91	37,89	40,61	46,46	30,23	43,78
	6	9,15	17,95	14,73	5,58	11,46	9,86	9,38	11,15
	7	0,09	0,23	0,08	0,05	0,07	0,07	0,62	0,17
	8	0,00	0,01	0	0	0	0	0,02	0,00
	a	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0

W tabeli 47 przedstawiono wyniki z analizy osi Y składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 47 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów P. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Y							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,02	0,00	0,07	0,1	0,07	0,01	0,47	0,10
	2	0,24	0,12	0,83	1,04	0,72	0,23	60,49	9,09
	3	3,55	2,54	7,38	8,45	6,46	4,45	23,04	7,98
	4	10,04	9,91	12,57	14,47	11,08	23,71	6,42	12,6
	5	84,06	84,06	74,95	73,54	78,46	70,02	5,62	67,2
	6	2,03	2,91	4,13	2,31	3,14	1,45	2,42	2,62
	7	0,06	0,44	0,07	0,07	0,07	0,12	1,48	0,33
	8	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,018
	a	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0

W tabeli 48 przedstawiono wyniki z analizy osi Z składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 4 dekompozycji.

Tabela 48 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów P. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Z							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,03	0,01	0,09	0,15	0,1	0,05	0,47	0,12
	2	0,90	0,37	2,48	3,54	2,66	1,3	3,6	2,12
	3	6,41	5,36	8,34	9,84	7,41	7,94	28,08	10,48
	4	24,66	21,32	26,5	29,27	27,23	41,08	15,51	26,51
	5	55,69	46,30	52,44	51,09	53,29	37,94	23,08	45,6
	6	10,02	17,32	9,2	5,58	8,39	8,93	27,04	12,3
	7	2,23	8,70	0,93	0,51	0,89	2,57	2,18	2,57
	8	0,03	0,61	0,02	0,02	0,03	0,19	0,04	0,13
	a	0,00	0,00	0	0	0	0,01	0	0,00

W tabeli 49 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 4 dekompozycji.



Tabela 49 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów ciśnienia akustycznego - kategoria składów P

		ANALIZA CIŚNIENIE AKUSTYCZNE							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,06	0,01	0,021
	2	0,53	0,92	0,32	0,35	0,47	1,26	0,3	0,59
	3	6,60	7,48	4	4,6	4,78	9,29	5,05	5,97
	4	41,49	23,90	40,39	50,2	35,55	53,27	21	37,97
	5	35,82	36,90	44,93	37,55	46,76	26,85	17,41	35,1
	6	9,13	23,27	9,99	3,51	11,96	5,97	32,83	13,80
	7	2,80	5,55	0,27	2,01	0,38	2,22	22,46	5,09
	8	2,70	1,29	0,05	1,47	0,06	0,74	0,83	1,02
	a	0,92	0,67	0,04	0,31	0,02	0,33	0,1	0,34

W tabeli 50 przedstawiono wyniki z analizy osi X składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 50 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów E. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ X						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,01	0,01	0,18	0,73	0,14	0,14	0,20
	2	0,71	1,36	3,3	33,69	11,79	10,64	10,24
	3	12,23	17,02	33,53	24,26	20,23	21,94	21,53
	4	23,82	60,85	4,29	23,57	17,96	9,71	23,36
	5	47,65	19,76	24,13	11,31	30,96	38,2	28,66
	6	15,35	0,91	4,07	6,03	17,77	19,21	10,55
	7	0,23	0,07	0,49	0,4	1,1	0,15	0,40
	8	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01
	a	0,00	0,00	0	0	0	0	0

W tabeli 51 przedstawiono wyniki z analizy osi Y składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 2 dekompozycji.

Tabela 51 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y - kategoria składów E. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Y						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,03	0,50	0,74	2,44	1,06	0,56	0,88
	2	0,35	24,85	71,39	72,75	44,1	49,99	43,90
	3	4,17	45,75	20,54	13,3	13,68	21,36	19,8
	4	11,29	16,15	2,59	5,39	13,23	10,24	9,81
	5	81,04	10,41	3	3,27	10,32	15,69	20,62
	6	2,92	1,51	1,16	2,45	13,71	1,97	3,95
	7	2,92	0,78	0,55	0,38	3,83	0,19	1,44
	8	0,20	0,05	0,03	0,01	0,07	0	0,06
	a	0,00	0,00	0	0	0	0	0

W tabeli 52 przedstawiono wyniki z analizy osi Z składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 52 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Z - kategoria składów E. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Z						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,16	0,04
	2	0,32	0,45	0,27	0,28	0,25	1,63	0,53
	3	4,31	4,94	3,66	2,84	3,07	17,08	5,98
	4	35,86	20,08	14,33	10,65	9,95	23,06	18,98
	5	47,95	19,16	33,09	20,43	18,1	40,82	29,92
	6	9,49	38,60	33,32	55,52	37,24	16,93	31,85
	7	1,77	14,23	13,28	9,17	20,57	0,32	9,89
	8	0,23	2,19	1,52	0,9	8,73	0	2,26
	a	0,05	0,34	0,5	0,19	2,09	0	0,52

W tabeli 53 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 6 dekompozycji.

Tabela 53 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów E. Wartości podane w %.

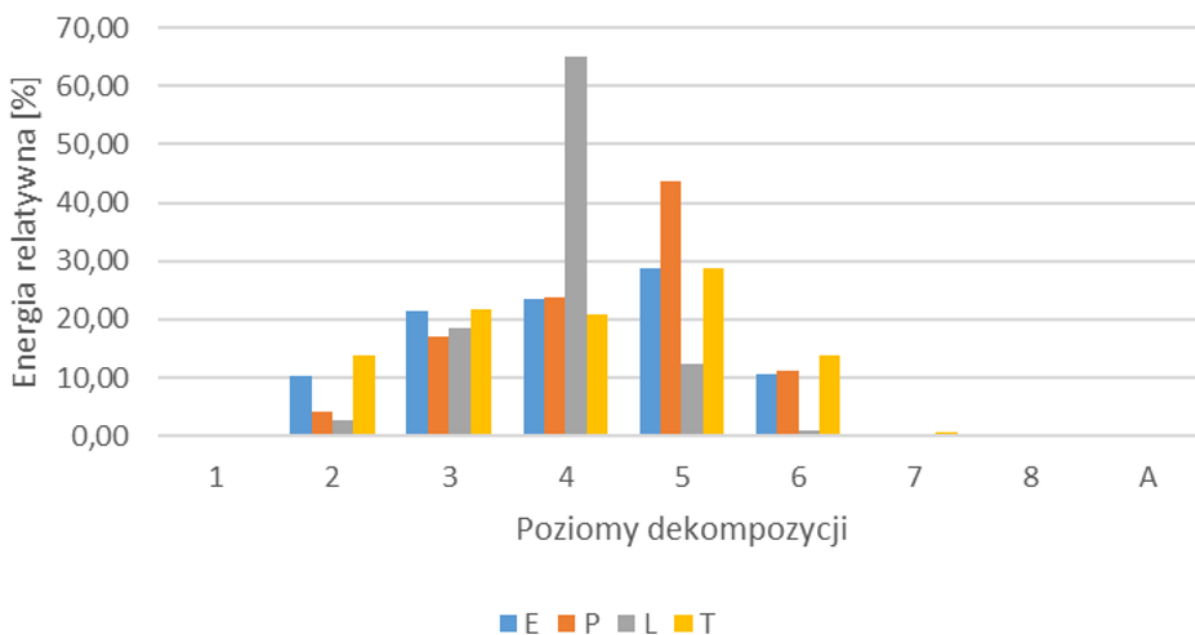
		ANALIZA CIŚNIENIE AKUSTYCZNE						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziomu dekompozycji	1	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0	0,01
	2	0,32	0,45	0,27	0,28	0,25	0,13	0,28
	3	4,31	4,94	3,66	2,84	3,07	2,23	3,50
	4	35,86	20,08	14,33	10,65	9,95	14,82	17,61
	5	47,95	19,16	33,09	20,43	18,1	50,32	31,50
	6	9,49	38,60	33,32	55,52	37,24	31,1	34,21
	7	1,77	14,23	13,28	9,17	20,57	1,38	10,06
	8	0,23	2,19	1,52	0,9	8,73	0,01	2,26
	a	0,05	0,34	0,5	0,19	2,09	0	0,52

W tabeli 54 przedstawiono wyniki z analizy osi X wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji coif. Poziomem dominującym dla E jest poziom 5, dla P poziom 5, dla L poziom 4 a dla T poziom 5.

Tabela 54 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla osi X wszystkich analizowanych składów dla falki coif. Wartości podane w %.

Podsumowanie- Zestawienie średnia - oś X				
Poziomy dekompozycji coif	E	P	L	T
1	0,20	0,02	0,39	0,20
2	10,25	4,21	2,79	13,69
3	21,54	16,99	18,43	21,80
4	23,37	23,66	64,97	20,96
5	28,67	43,78	12,38	28,88
6	10,56	11,16	1,00	13,88
7	0,41	0,17	0,19	0,58
8	0,02	0,00	0,01	0,02
A	0,00	0,00	0,00	0,00

Na rysunku 84 przedstawiono wyniki z analizy osi X wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji coif.



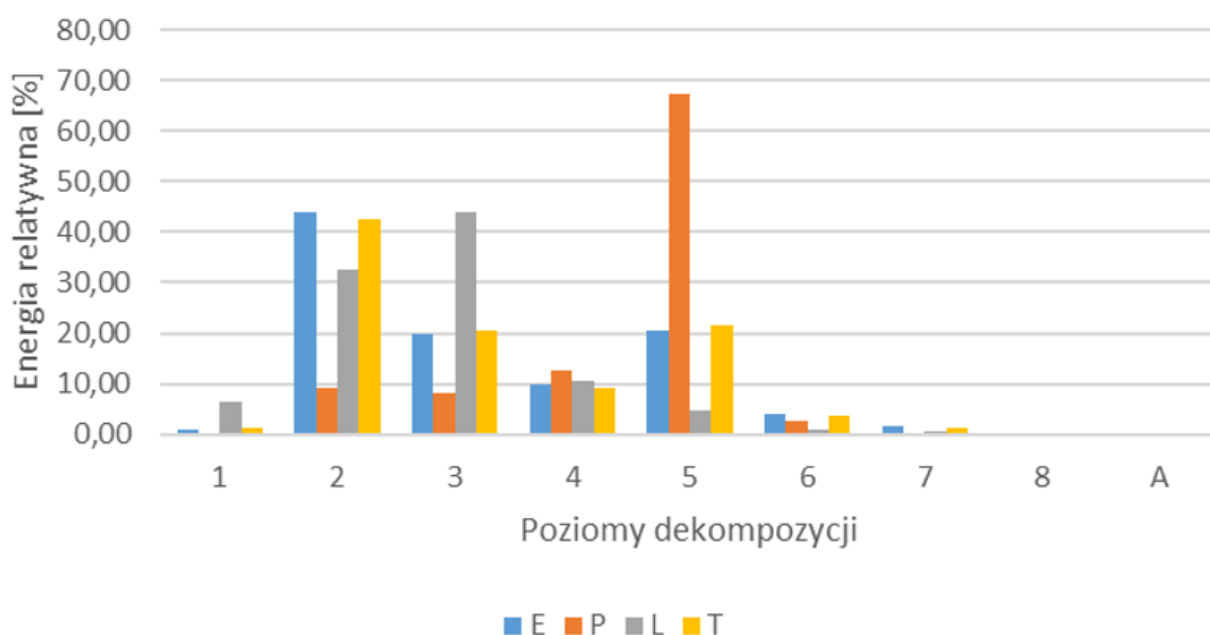
Rysunek 84 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla osi X.

W tabeli 55 przedstawiono wyniki z analizy osi Y wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji coif. Poziomem dominującym dla E jest poziom 2, dla P poziom 5, dla L poziom 4 a dla T poziom 2.

Tabela 55 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla osi Y wszystkich analizowanych składów dla falki coif. Wartości podane w %.

Podsumowanie - Zestawienie średnia - Oś Y				
Poziomy dekompozycji coif	E	P	L	T
1	0,89	0,11	6,53	1,11
2	43,91	9,10	32,73	42,66
3	19,80	7,98	44,08	20,41
4	9,82	12,60	10,68	9,23
5	20,62	67,24	4,57	21,57
6	3,95	2,63	0,92	3,59
7	1,44	0,33	0,46	1,35
8	0,06	0,02	0,05	0,08
A	0,00	0,00	0,00	0,00

Na rysunku 85 przedstawiono wyniki z analizy osi Y wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji coif.



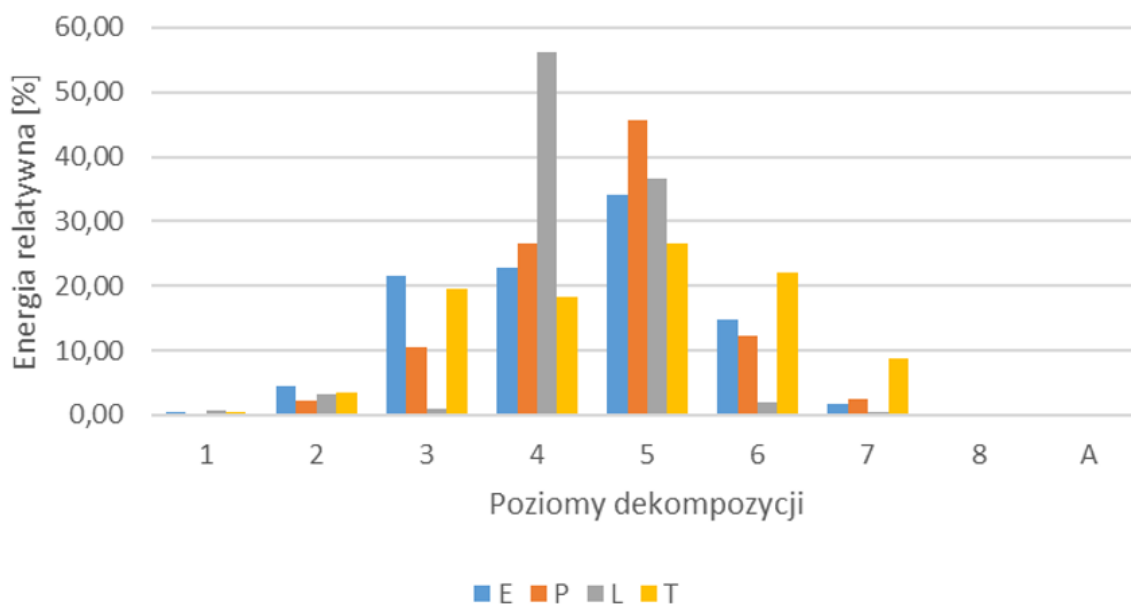
Rysunek 85 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla osi Y. Wartości podane w %.

W tabeli 56 przedstawiono wyniki z analizy osi Z wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji coif. Poziomem dominującym dla E jest poziom 5, dla P poziom 5, dla L poziom 4 a dla T poziom 5.

Tabela 56 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla osi Z wszystkich analizowanych składów dla falki coif. Wartości podane w %.

Podsumowanie- Zestawienie średnia - Oś Z				
Poziomy dekompozycji coif	E	P	L	T
1	0,50	0,13	0,60	0,49
2	4,41	2,12	3,14	3,59
3	21,47	10,48	1,01	19,60
4	22,89	26,51	56,32	18,35
5	34,11	45,69	36,57	26,70
6	14,84	12,35	1,93	22,14
7	1,76	2,57	0,37	8,79
8	0,03	0,13	0,04	0,33
A	0,00	0,00	0,00	0,00

Na rysunku 86 przedstawiono wyniki z analizy osi Z wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla danego poziomu dekompozycji coif.



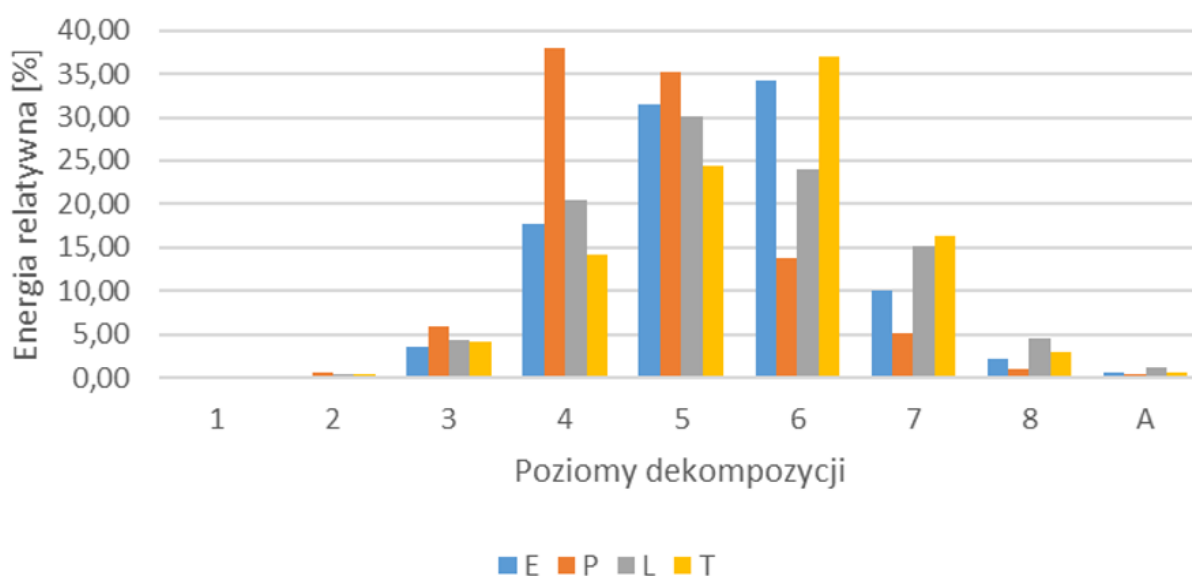
Rysunek 86 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla osi Z.

W tabeli 57 przedstawiono wyniki z ciśnienia akustycznego wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T dla osi X po zestawieniu estymatora średniej dla danego poziomu dekompozycji coif. Poziomem dominującym dla E jest poziom 6, dla P poziom 4, dla L poziom 6 a dla T poziom 6.

Tabela 57 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla ciśnienia akustycznego wszystkich analizowanych składów dla falki. Wartości podane w %.

Podsumowanie- Zestawienie średnia -Ciśnienie akustyczne				
Poziomy dekompozycji coif	E	P	L	T
1	0,02	0,02	0,02	0,01
2	0,28	0,59	0,40	0,32
3	3,51	5,97	4,28	4,13
4	17,62	37,97	20,38	14,27
5	31,51	35,17	30,12	24,42
6	34,21	13,81	24,01	37,03
7	10,07	5,10	15,07	16,33
8	2,26	1,02	4,47	2,92
A	0,53	0,34	1,28	0,53

Na rysunku 87 przedstawiono wyniki z ciśnienia akustycznego wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T dla osi X po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji coif.



Rysunek 87 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla ciśnienia akustycznego.

Wyniki te posłużą w rozdziale 8.6 do określenia wartości charakterystycznych poziomów częstotliwości w celu utworzenia koncepcji metody identyfikacji pojazdów szynowych.

### 8.5.2 WYNIKI ANALIZY FALKOWEJ METODĄ MODWT- PRZY UŻYCIU FALKI TYPU FEYER-KOROKVIN (fk)

Analogicznie do poprzedniego podrozdziału, niniejszy zawiera zestawienie wyników energii relatywnej (podanej w %) wszystkich przeanalizowanych składów w osi X, Y, Z oraz ciśnienia akustycznego z uwzględnieniem średniej wewnętrznej (ucinanej) z odrzuceniem 10% skrajnych wyników dla wyników falki fk.



W tabeli 58 przedstawiono wyniki z analizy osi X składów towarowych wraz z wynikami średniej ucinanej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 58 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ X												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średni a
Poziom dekompozycji	1	0,48	0,75	0,68	1,73	6,96	6,34	2,66	5,88	6,74	3,97	4,08	4,11	3,70
	2	2,13	3,39	3,06	7,33	26,72	26,25	10,01	24,29	27,81	16,39	16,03	16,30	14,98
	3	8,11	11,70	10,53	24,81	30,65	30,72	28,70	27,29	31,23	21,04	22,81	23,95	22,63
	4	21,18	23,23	21,58	45,05	9,21	9,67	43,61	10,54	9,30	15,66	19,51	21,39	20,83
	5	38,83	35,51	36,16	17,80	16,71	17,82	12,72	21,44	16,33	30,12	21,77	21,84	23,92
	6	26,44	21,88	25,06	2,85	8,23	7,73	1,78	9,01	7,14	10,96	13,91	10,84	12,15
	7	2,20	2,89	2,35	0,28	1,19	1,18	0,38	1,22	1,17	1,37	1,33	1,10	1,39
	8	0,47	0,49	0,44	13,00	0,28	0,25	0,09	0,26	0,23	0,44	0,48	0,40	1,40
	a	0,16	0,15	0,14	0,03	0,05	0,05	0,03	0,07	0,06	0,06	0,08	0,07	0,08

W tabeli 59 przedstawiono wyniki z analizy osi Y składów towarowych wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 2 dekompozycji.

Tabela 59 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Y												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,43	0,66	0,62	7,37	12,91	12,97	12,21	12,58	13,11	13,33	14,47	14,47	9,59
	2	1,86	2,86	2,68	30,04	46,49	46,91	36,32	45,48	47,55	44,51	44,13	44,13	32,75
	3	7,32	10,1	9,44	41,58	28,81	29,26	38,95	27,27	28,03	23,34	19,58	19,58	23,61
	4	23,56	24,59	23,83	11,54	5,09	4,74	6,21	5,84	4,17	8,15	10,64	10,64	11,58
	5	50,46	44,02	44,81	7,53	4,14	3,82	3,95	5,54	3,63	7,41	6,86	6,86	15,75
	6	12,2	12,09	13,51	1,34	1,7	1,51	1,35	2,35	1,91	2,49	3,23	3,23	4,74
	7	3,52	4,67	4,27	0,48	0,71	0,66	0,86	0,81	1,38	0,64	0,95	0,95	1,66
	8	0,52	0,84	0,7	0,09	0,11	0,11	0,12	0,11	0,18	0,12	0,11	0,11	0,26
	a	0,13	0,16	0,13	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06

W tabeli 60 przedstawiono wyniki z analizy osi Z składów towarowych wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 60 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Z												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,34	0,37	0,38	0,8	3,86	3,33	2,33	3,89	4,31	1,46	2,39	2,52	2,17
	2	1,43	1,56	1,6	3,02	11,69	10,67	5,62	11,55	13,54	4,93	8,99	9,69	7,02
	3	5,63	5,62	5,71	9,55	25,71	25,27	11,14	24,6	30,94	13,57	21,43	23,95	16,93
	4	16,31	14,81	14,98	35,88	18,61	18,27	38,99	20,78	20,18	18,44	16,2	18,5	21,00
	5	28,69	23,66	24,5	39,89	16,91	19,51	36,94	19,03	14,27	30,13	22,16	22,3	24,83
	6	28,71	26,26	28,19	8,94	18,41	18,84	3,39	17,02	12,69	27,51	23,61	19,13	19,39
	7	19,12	24,52	22,63	1,48	4,04	3,39	1,24	2,52	3,47	2,85	4,21	3,1	7,71
	8	1,26	2,37	1,5	0,35	0,63	0,58	0,29	0,51	0,46	0,98	0,84	0,66	0,87
	a	0,51	0,84	0,51	0,09	0,15	0,14	0,08	0,11	0,12	0,14	0,16	0,13	0,25

W tabeli 61 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego składów towarowych wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 6 dekompozycji.

Tabela 61 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiaru ciśnienia akustycznego- kategoria składów T. Wartości podane w %.

		ANALIZA CIŚNIENIE AKUSTYCZNE												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,62	0,49	0,58	0,43	0,47	0,27	0,48	0,46	0,43	0,34	0,33	0,35	0,44
	2	2,64	2,12	2,49	1,87	2,07	1,18	2,11	1,99	1,89	1,46	1,44	1,5	1,90
	3	9,39	7,62	8,99	6,59	7,8	4,48	7,61	7,38	7,1	5,63	5,29	5,75	6,97
	4	21,06	16,64	19,81	14,73	17,59	12,55	15,51	17,6	15,87	15,92	13,43	15,43	16,35
	5	30,51	22,84	25,54	24,32	23,62	30,29	20,2	27,58	20,59	34,97	26,05	27,85	26,20
	6	25,37	27,87	24,22	32,84	28,81	43,1	23,8	29,31	27,84	34,96	33,9	30,92	30,25
	7	7,8	17,5	15,64	12,47	15,83	5,4	20,14	12,89	22,87	5,15	14,53	13,01	13,60
	8	1,92	3,72	2,07	5,57	2,79	2,08	8,25	1,97	2,47	1,27	3,79	3,92	3,32
	a	0,69	1,2	0,67	1,17	1,02	0,66	1,89	0,81	0,94	0,29	1,25	1,27	0,99

W tabeli 62 przedstawiono wyniki z analizy osi X lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 4 dekompozycji.

Tabela 62 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów L. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ X		
		L1	L2	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,73	0,04	0,39
	2	2,09	3,48	2,79
	3	15,89	20,96	18,43
	4	65,01	64,92	64,97
	5	15,33	9,42	12,38
	6	0,83	1,17	1,00
	7	0,11	0,27	0,19
	8	0,00	0,01	0,01
	a	0,00	0,00	0,00

W tabeli 63 przedstawiono wyniki z analizy osi Y lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 3 dekompozycji.

*Tabela 63 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów L. Wartości podane w %.*

		ANALIZA OŚ Y		
		L1	L2	średnia
Poziom dekompozycji	1	12,27	0,78	6,53
	2	28,88	36,58	32,73
	3	39,85	48,31	44,08
	4	11,13	10,23	10,68
	5	5,82	3,31	4,57
	6	1,31	0,53	0,92
	7	0,67	0,24	0,46
	8	0,07	0,02	0,05
	a	0,00	0,00	0,00

W tabeli 64 przedstawiono wyniki z analizy osi Z lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 4 dekompozycji.

*Tabela 64 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów L. Wartości podane w %.*

		ANALIZA OŚ Z		
		L1	L2	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,78	0,42	0,60
	2	2,33	3,95	3,14
	3	1,00	1,02	1,01
	4	48,38	64,26	56,32
	5	44,27	28,86	36,57
	6	2,58	1,27	1,93
	7	0,54	0,20	0,37
	8	0,04	0,03	0,04
	a	0,00	0,00	0,00

W tabeli 65 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego lokomotyw (solo) wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 65 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów L. Wartości podane w %.

		ANALIZA CIŚNIENIE AKUSTYCZNE		
		L1	L2	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,02	0,01	0,02
	2	0,46	0,33	0,40
	3	4,37	4,18	4,28
	4	17,39	23,37	20,38
	5	20,54	39,70	30,12
	6	27,72	20,29	24,01
	7	21,78	8,35	15,07
	8	6,52	2,41	4,47
	a	1,20	1,36	1,28

W tabeli 66 przedstawiono wyniki z analizy osi X składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 66 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów P. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ X							średnia
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
Poziom dekompozycji	1	0,85	0,62	1,25	1,59	1,28	1	5,51	1,73
	2	3,86	2,78	5,65	7,15	5,77	4,49	23,11	7,54
	3	13,58	10,18	18,4	22,5	18,69	14,98	27,14	17,92
	4	26,14	25,43	26,93	29,74	28,03	30,49	11,35	25,44
	5	41,60	41,44	32,01	29,66	32,57	36,71	21,87	33,69
	6	11,97	17,48	14,51	8,04	12,29	10,62	8,88	11,97
	7	1,71	1,67	0,97	1,08	1,12	1,45	1,78	1,40
	8	0,19	0,29	0,2	0,18	0,19	0,18	0,26	0,21
	a	0,09	0,11	0,08	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08

W tabeli 67 przedstawiono wyniki z analizy osi Y składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 67 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów P.

		ANALIZA OŚ Y							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,48	0,41	0,79	0,91	0,72	0,62	11,82	2,25
	2	2,04	1,75	3,2	3,62	2,93	2,7	43,59	8,55
	3	7,67	6,99	10,26	11,27	9,5	10,92	28,72	12,19
	4	23,79	24,01	23,88	24,75	23,41	30,77	6,47	22,44
	5	53,82	54,23	49,07	47,88	50,72	46,33	5,5	43,94
	6	9,41	9,41	10,36	9,13	10,14	6,15	2,35	8,14
	7	2,38	2,73	2	2	2,12	2,22	1,34	2,11
	8	0,32	0,35	0,34	0,34	0,36	0,21	0,17	0,30
	a	0,11	0,12	0,09	0,09	0,09	0,07	0,04	0,09

W tabeli 48 przedstawiono wyniki z analizy osi Z składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 68 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów P. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Z							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,77	0,58	1,18	1,5	1,2	1,05	2,49	1,25
	2	3,25	2,48	4,75	5,85	4,71	4,36	8,32	4,82
	3	11,38	9,61	13,25	14,97	12,79	15,65	21,45	14,16
	4	27,81	24,52	28,27	29,53	28,63	35,6	20,25	27,80
	5	39,59	35,26	37,65	35,82	38,26	29,55	22,52	34,09
	6	13,42	17,97	12,73	10,53	12,23	9,85	21,32	14,01
	7	3,26	8,66	1,77	1,36	1,79	3,44	2,91	3,31
	8	0,37	0,73	0,33	0,37	0,33	0,42	0,6	0,45
	a	0,13	0,19	0,08	0,07	0,08	0,09	0,14	0,11

W tabeli 69 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego składów pasażerskich wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 4 dekompozycji.

Tabela 69 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów P. Wartości podane w %.

		ANALIZA CIŚNIENIE AKUSTYCZNE							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,80	0,78	0,67	0,77	0,7	1,22	0,5	0,78
	2	3,49	3,33	2,87	3,31	2,97	5,11	2,21	3,33
	3	13,53	11,07	11,77	13,81	11,54	18,81	8,57	12,73
	4	34,94	24,40	35,59	40,59	33,16	40,87	18,97	32,65
	5	30,99	31,70	37,33	32,56	38,03	22,4	20,27	30,47
	6	9,60	19,97	10,49	5,02	12,21	7,92	27,87	13,30
	7	3,23	6,41	0,89	2,15	0,98	2,42	19,36	5,06
	8	2,34	1,53	0,28	1,41	0,3	0,85	1,63	1,19
	a	1,07	0,81	0,11	0,39	0,11	0,4	0,62	0,50

W tabeli 70 przedstawiono wyniki z analizy osi X składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 70 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów E. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ X						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,93	1,54	7,32	8,14	3,3	3,1	4,055
	2	4,19	6,90	30	28,61	13,35	12,7	15,95
	3	14,22	25,40	31,23	26,9	20,28	19,93	22,99
	4	26,16	46,11	8,68	19,1	19,79	15,49	22,55
	5	37,25	18,31	16,82	11,03	26,43	29,68	23,25
	6	15,45	1,40	4,56	5,26	14,2	17,82	9,78
	7	1,46	0,24	1,21	0,74	2,11	0,83	1,09
	8	0,23	0,08	0,13	0,16	0,44	0,34	0,23
	a	0,10	0,03	0,04	0,04	0,11	0,1	0,07

W tabeli 71 przedstawiono wyniki z analizy osi Y składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 2 dekompozycji.



Tabela 71 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów E. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Y						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,54	6,79	13,88	17,74	10,17	10,19	9,88
	2	2,27	28,19	49,8	51,49	32,13	36,97	33,47
	3	8,21	38,89	28,13	17,9	17,96	26,22	22,88
	4	24,18	14,15	3,25	6,82	13,14	11,25	12,13
	5	52,47	9,54	3,15	3,43	11,44	12,2	15,37
	6	9,42	1,51	1,09	1,93	10,09	2,66	4,45
	7	2,52	0,79	0,6	0,59	4,68	0,45	1,60
	8	0,29	0,10	0,07	0,07	0,27	0,09	0,14
	a	0,10	0,03	0,02	0,02	0,12	0,02	0,05

W tabeli 72 przedstawiono wyniki z analizy osi Z składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 72 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów E. Wartości podane w %.

		ANALIZA OŚ Z						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,85	0,75	7,13	3,09	1,85	1,39	2,51
	2	3,48	2,93	18,95	11,36	7,25	5,25	8,20
	3	10,97	10,23	31,72	26,23	19,78	17,4	19,38
	4	26,09	39,79	19,14	22,11	19,05	27,14	25,55
	5	36,73	41,71	12,39	21,68	26,37	31,06	28,32
	6	16,15	3,63	8,62	12,77	22,08	15,92	13,19
	7	5,27	0,72	1,76	2,26	2,85	1,35	2,36
	8	0,33	0,17	0,22	0,39	0,62	0,38	0,35
	a	0,13	0,07	0,07	0,1	0,14	0,1	0,10

W tabeli 73 przedstawiono wyniki z analizy ciśnienia akustycznego składów typu EZT wraz z wynikami średniej z odrzuceniem 10% skrajnych wyników. Największą wartość średniej zauważa się w poziomie 5 dekompozycji.

Tabela 73 Wyniki analizy MODWT (fk dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów E. Wartości podane w %.

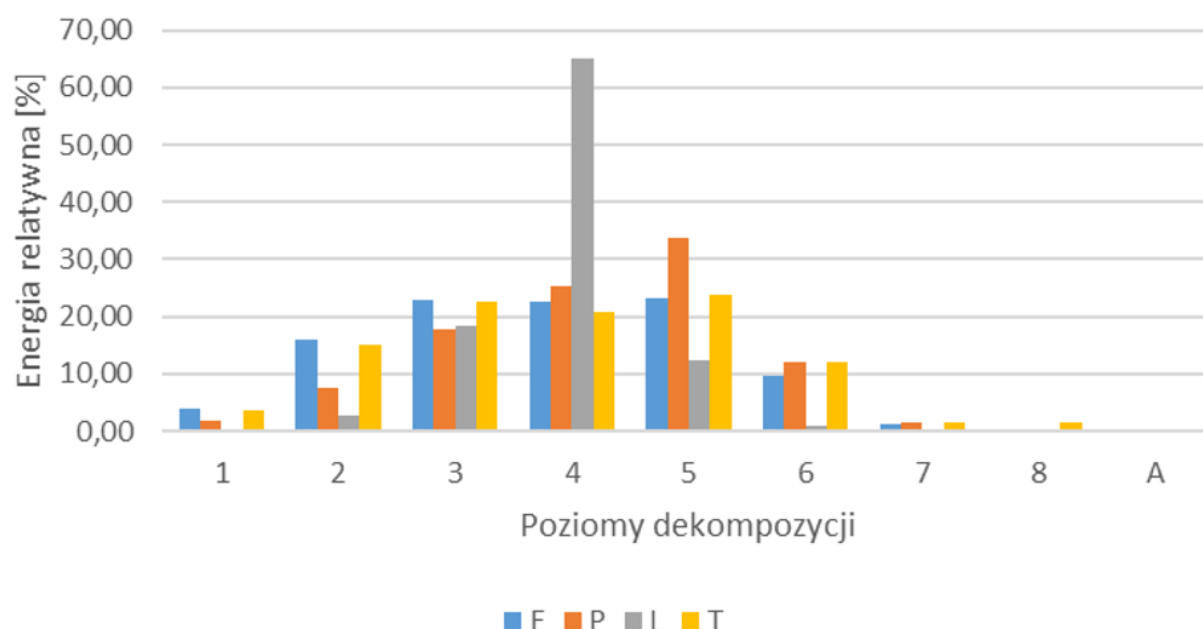
		ANALIZA CIŚNIENIE AKUSTYCZNE						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	średnia
Poziom dekompozycji	1	0,65	0,53	0,43	0,35	0,32	0,36	0,44
	2	2,80	2,30	1,77	1,45	1,39	1,56	1,87
	3	11,31	8,47	6,82	5,23	5,06	6,43	7,22
	4	34,00	18,97	17,02	13,3	11,8	20,47	19,26
	5	38,35	22,41	28,98	25,72	20,76	40,75	29,49
	6	10,12	29,50	29,23	39,31	30,8	27,67	27,77
	7	2,10	14,37	13,03	12,24	19,34	2,05	10,52
	8	0,52	2,72	1,76	1,83	7,65	0,55	2,505
	a	0,15	0,74	0,97	0,58	2,88	0,16	0,913

W tabeli 54 przedstawiono wyniki z analizy osi X wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji fk. Poziomem dominującym dla E jest poziom 5, dla P poziom 5, dla L poziom 4 a dla T poziom 5.

Tabela 74 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla osi X wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.

Podsumowanie- Zestawienie średnia - Oś X				
Poziomy fk	E	P	L	T
1	4,06	1,73	0,39	3,70
2	15,96	7,54	2,79	14,98
3	22,99	17,92	18,43	22,63
4	22,56	25,44	64,97	20,83
5	23,25	33,69	12,38	23,92
6	9,78	11,97	1,00	12,15
7	1,10	1,40	0,19	1,39
8	0,23	0,21	0,01	1,40
A	0,07	0,08	0,00	0,08

Na rysunku 88 przedstawiono wyniki z analizy osi X wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji fk.



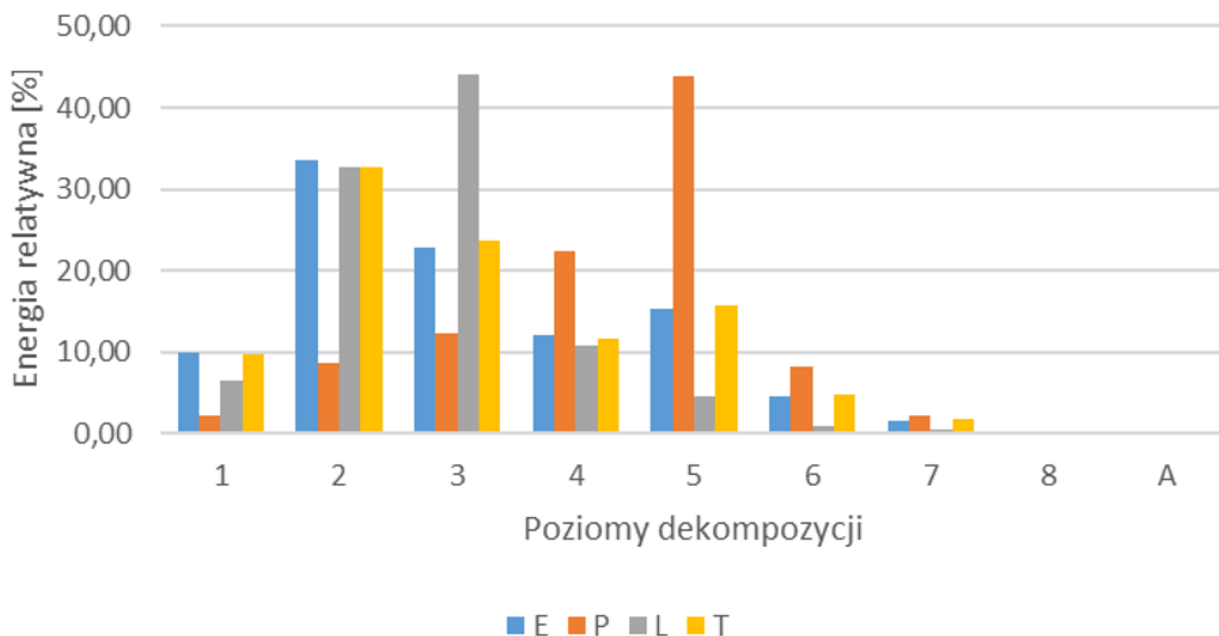
Rysunek 88 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla osi X.

W tabeli 75 przedstawiono wyniki z analizy osi Y wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji fk. Poziomem dominującym dla E jest poziom 2, dla P poziom 5, dla L poziom 3 a dla T poziom 2.

Tabela 75 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla osi Y wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.

Podsumowanie- Zestawienie średnia- Oś Y				
Poziomy fk	E	P	L	T
1	9,89	2,25	6,53	9,59
2	33,48	8,55	32,73	32,75
3	22,89	12,19	44,08	23,61
4	12,13	22,44	10,68	11,58
5	15,37	43,94	4,57	15,75
6	4,45	8,14	0,92	4,74
7	1,61	2,11	0,46	1,66
8	0,15	0,30	0,05	0,26
A	0,05	0,09	0,00	0,06

Na rysunku 89 przedstawiono wyniki z analizy osi Y wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji fk.



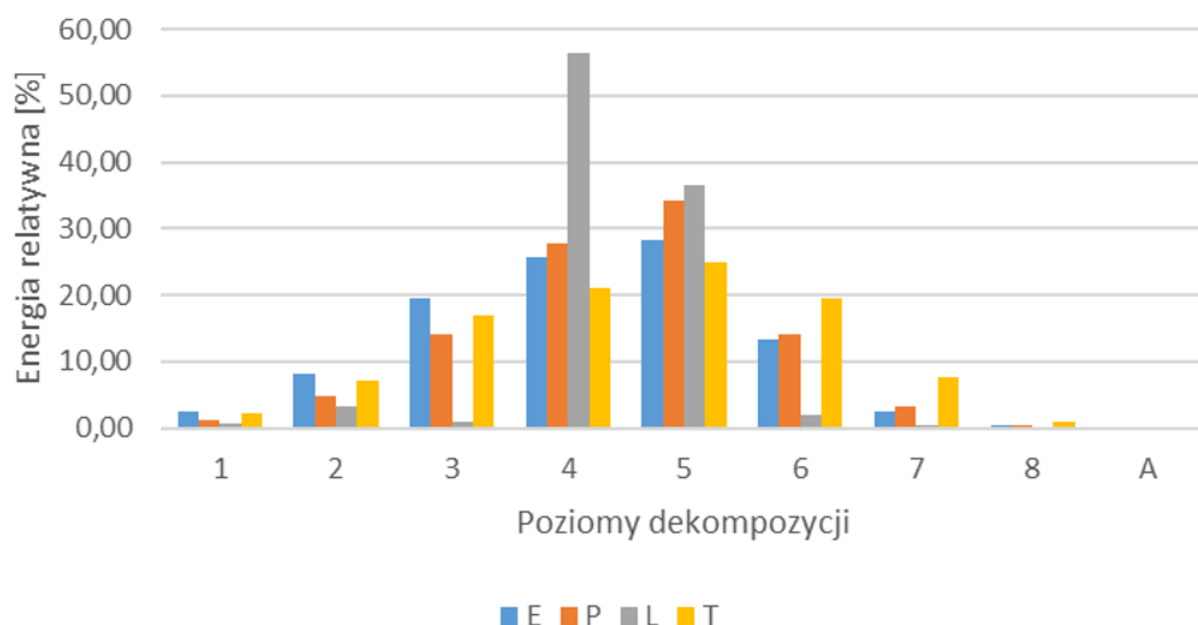
Rysunek 89 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla osi Y.

W tabeli 76 przedstawiono wyniki z analizy osi Z wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji fk. Poziomem dominującym dla E jest poziom 5, dla P poziom 5, dla L poziom 4 a dla T poziom 5.

Tabela 76 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla osi Z wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.

Podsumowanie- Zestawienie średnia- Oś Z				
Poziomy fk	E	P	L	T
1	2,51	1,25	0,60	2,17
2	8,20	4,82	3,14	7,02
3	19,39	14,16	1,01	16,93
4	25,55	27,80	56,32	21,00
5	28,32	34,09	36,57	24,83
6	13,20	14,01	1,93	19,39
7	2,37	3,31	0,37	7,71
8	0,35	0,45	0,04	0,87
A	0,10	0,11	0,00	0,25

Na rysunku 90 przedstawiono wyniki z analizy osi Z wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji fk.



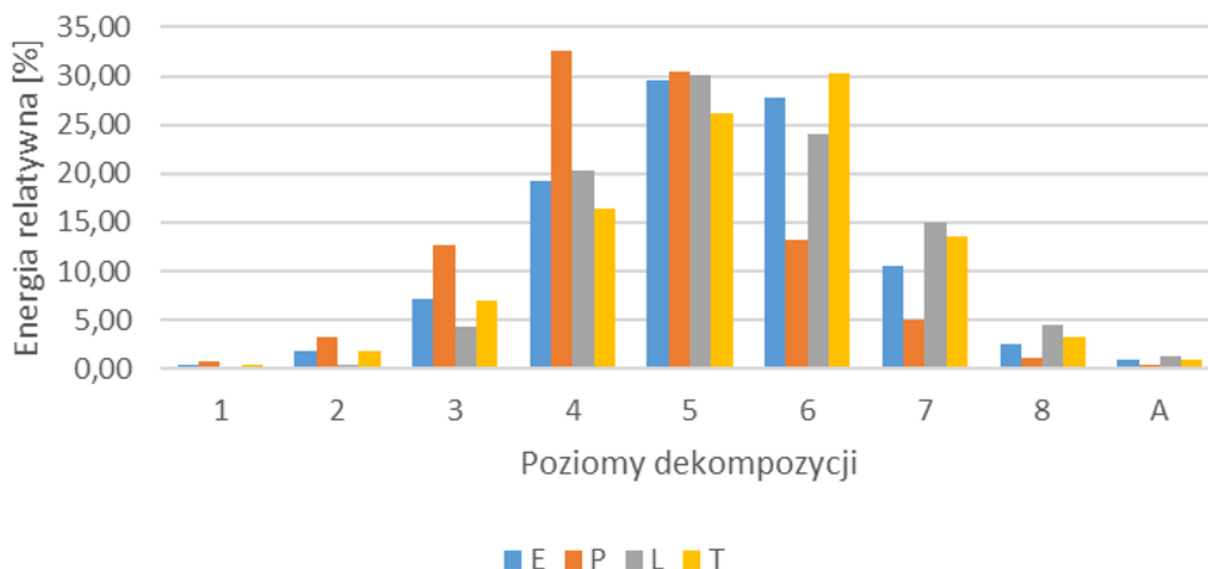
Rysunek 90 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla osi Z.

W tabeli 57 przedstawiono wyniki z ciśnienia akustycznego wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T dla osi X po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji coef. Poziomem dominującym dla E jest poziom 5, dla P poziom 4, dla L poziom 6 a dla T poziom 6.

Tabela 77 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla ciśnienia akustycznego wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.

Podsumowanie- Zestawienie średnia- Ciśnienie akustyczne				
Poziomy fk	E	P	L	T
1	0,44	0,78	0,02	0,44
2	1,88	3,33	0,40	1,90
3	7,22	12,73	4,28	6,97
4	19,26	32,65	20,38	16,35
5	29,50	30,47	30,12	26,20
6	27,77	13,30	24,01	30,25
7	10,52	5,06	15,07	13,60
8	2,51	1,19	4,47	3,32
A	0,91	0,50	1,28	0,99

Na rysunku 87 przedstawiono wyniki z ciśnienia akustycznego wszystkich składów, czyli E, P, L oraz T dla osi X po zestawieniu estymatora średniej dla zadanego poziomu dekompozycji fk.



Rysunek 91 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla ciśnienia akustycznego.

Wyniki te posłużą w rozdziale 8.6 do określenia wartości charakterystycznych poziomów częstotliwości w celu utworzenia koncepcji metody identyfikacji pojazdów szynowych.

## 8.6 WYZNACZENIE WARUNKÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH POZIOMÓW CZĘSTOTLIWOŚCI DLA POJAZDÓW SZYNOWYCH NA PODSTAWIE ENERGII RELATYWNEJ UZYSKANEJ Z ANALIZY MODWT

Po wykonaniu niezbędnych analiz i określeniu poziomów energii relatywnej w zadanych poziomach dekompozycji wyznaczono proponowane poziomy identyfikujące charakterystyczne składowe. Przedstawiono je w procentach i nazwano w dalszej części pracy warunkami. Określono je na podstawie wyników zaprezentowanych w rozdziale 8.5 osobno dla falki  $coif$  i  $fk$ . Na rysunku 92 przedstawiono przykład określania jednego z trzech warunków dla składu typu P dla wyników z pomiarów ciśnienia akustycznego dla analizy  $fk$  na podstawie wyników analiz zawartych w rozdziale 8.5.2. W tym wypadku wartość ciśnienia akustycznego była zawsze wyższa niż 20% przy czwartym poziomie dekompozycji dla falki  $fk$  niż dla pozostałych analizowanych składów.



Warunki przy stosowaniu falki fk (nr 4 poziom 8)				
Nazwa składu/ Poziom dekompozycji	Oś X	Oś Y	Oś Z	Ciśnienie akustyczne
1				
2				
3				
4	>35%	>30%	>15%	>20%
5	>20%	>15%	>35%	>20%
6				>20%
7				>2%
8				
Aproksymacja				



Rysunek 92 Przykład określenia jednego z warunków dla składu typu P.

W celu ułatwienia odczytu danych warunków zastosowano zunifikowany system kolorystyczny, przedstawiony na rysunku 93.

Oznaczenia kolorystyczne stosowane w pracy			
Skład Pasażerski (P)	Lokomotywa/ Drezyna (L)	Skład Towarowy (T)	Skład EZT (E)

Rysunek 93 Oznaczenia kolorystyczne stosowane w pracy.

Zaprezentowano zestawienie tabelaryczne (tabele 78 i 79) przedstawiające zaproponowane warunki (1, 2 lub 3) dla czterech analizowanych kategorii składów kolejowych.

Na podstawie tabeli 78 (falka coif) ustalono następującą ilość warunków:

- dla składów typu P: 3 warunki (oś X poziom 5 >25%; oś Y poziom 5 >25%; ciśnienie akustyczne poziom 4 >20%),
- dla składów typu L: 3 warunki (oś X poziom 4 >50%; oś Y poziom 3 >20%; oś Z poziom 4 >40%),
- dla składów typu T: 2 warunki (oś Z poziom 6 >10%; oś Z poziom 7 >1%),
- dla składów typu E: 1 warunek (oś Z poziom 3 >20%).

Na podstawie tabeli 79 (falka fk) ustalono następującą ilość warunków:

- dla składów typu P: 3 warunki (oś X poziom 5 >20%; oś Y poziom 5 >15%; ciśnienie akustyczne poziom 4 >20%),
- dla składów typu L: 3 warunki (oś X poziom 4 >35%; oś Y poziom 3 >30%; oś Z poziom 4 >35%),
- dla składów typu T: 2 warunki (oś Z poziom 7 >2%; ciśnienie akustyczne poziom 6 >25%),
- dla składów typu E: 1 warunek (oś Z poziom 3 >15%).

Proponowane zestawienie jest wynikiem analizy wyników średniej wewnętrznej (średniej –z odrzuceniem skrajnych 10%) podsumowującej zestawienia składów dla sygnału wibroakustycznego. Jest to propozycja kategoryzowania składów kolejowych na podstawie

charakterystycznych wartości energii relatywnej, zawierającej się w danych skalach poziomów dekompozycji metodą MODWT

Tabela 78 Zaproponowane warunki w % na podstawie wyników ze średniej z odrzuceniem 10% dla falki coif.

Warunki przy stosowaniu falki coif (nr 4 poziom 8)				
Nazwa składu/ Poziom dekompozycji	Oś X	Oś Y	Oś Z	Ciśnienie akustyczne
1				
2				
3		>20%	>20%	
4	>50%		>40%	>20%
5	>30%	>25%		
6			>10%	
7			>1%	
8				
Aproksymacja				

Tabela 79 Zaproponowane warunki w % na podstawie wyników ze średniej z odrzuceniem 10% dla falki fk.

Warunki przy stosowaniu falki fk (nr 4 poziom 8)				
Nazwa składu/ Poziom dekompozycji	Oś X	Oś Y	Oś Z	Ciśnienie akustyczne
1				
2				
3		>30%	>15%	
4	>35%		>35%	>20%
5	>20%	>15%		
6				>25%
7			>2%	
8				
Aproksymacja				

Podczas analizy wyników i tworzenia warunków (na podstawie danych przedstawionych w rozdziałach 8.5.1 oraz 8.5.2) zauważono problem z rozpoznaniem składów typu T oraz E, ze względu na zbliżone poziomy energii relatywnej w tych samych poziomach dekompozycji. Problem ten wyeliminowano dzięki utworzeniu dodatkowych warunków, które muszą być spełnione przez analizowane sygnały wibroakustyczne podczas kategoryzowania. (zaproponowano więc trzy warunki zamiast jednego). We wszystkich przypadkach nie bierze się pod uwagę poziomów dekompozycji: 1, 2, 8 oraz aproksymacji, ponieważ brakuje w nich charakterystycznych poziomów wyróżniających analizowane składy w sposób znaczący.

Zaproponowany algorytm należy analizować od składów zawierających najwięcej warunków do spełnienia, kończąc na posiadających ich najmniej. Podczas klasyfikacji składu kolejowego powinno się postępować w następującej kolejności:

1. Klasyfikowanie w pierwszej kolejności do składów spełniających trzy warunki, czyli P lub L.
2. Jeżeli skład nie spełnił trzech warunków, przejść do próby klasyfikacji składu dla kategorii T z dwoma warunkami.
3. W przypadku niespełnienia powyższych warunków przejść do kategorii E, gdzie klasyfikowany sygnał musi spełnić jeden warunek.
4. W momencie, gdy analizowany sygnał nie spełnia wszystkich warunków lub spełnia je w kilku kategoriach należy przyjąć zasadę nadawaniu priorytetów składom najpierw z trzema, potem z dwoma warunkami.
5. Gdy analizowany sygnał spełnił trzy lub dwa warunki dla składów P, L lub T, nie analizuje się go dla przypadku kategorii E.

## 8.7 KONCEPCJA METODY IDENTYFIKACJI POJAZDÓW SZYNOWYCH

Pozytywne wyniki identyfikacji i klasyfikacji pojazdów szynowych na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych przedstawionych w rozdziale 8.6 pozwoliły na opracowanie koncepcji metody identyfikacji pojazdów szynowych.

Opracowano koncepcję metody identyfikacji pojazdów szynowych na podstawie zdefiniowanych warunków charakterystycznych poziomów częstotliwości dla pojazdów szynowych na podstawie energii relatywnej uzyskanej z analizy metodą MODWT.

Koncepcja algorytmu identyfikacji pojazdów szynowych analizy MODWT jest następująca:

1. Rejestracja hałasu i przyspieszeń drgań szyny w trzech osiach.
2. Dobór okna analizy. Okno analizy to fragment sygnałów weryfikujących przejazd pojazdu szynowego.
3. Dobór falki  $f_k$  lub  $coif$  (nr 4 poziomu 8). Możliwe opcje to falka  $f_k$  (Feyer-Korokvin) lub falka  $coif$  (Coiflet).
4. Przetwarzanie sygnału metodą MODWT. Ta transformacja pozwala na analizę sygnału w różnych skalach częstotliwościowych.
5. Analiza wartości energii relatywnej.

6. Porównanie wyników do wcześniej określonych warunków. Porównuje się odczytane wartości energii relatywnej z wcześniej określonymi warunkami. Warunki określono w tabelach 78 i 79.
7. Zachowanie kolejności określania typów składów zaczynając od tych z największą ilością warunków według zasady określonej w podrozdziale 8.6: algorytm uwzględnia kolejność określania typów składów, zaczynając od tych, które mają ich najwięcej. Dzięki temu możliwe jest bardziej precyzyjne i efektywne przypisanie składu kolejowego do odpowiedniej grupy.
8. Klasyfikacja składu kolejowego do jednej z wcześniej ustalonych grup.

Zaproponowana koncepcja metody identyfikacji pojazdów szynowych na podstawie analizy MODWT umożliwia klasyfikowanie typów składów na podstawie energii relatywnej sygnału wibroakustycznego. Na rysunku 94 zaprezentowano algorytm metody w formie schematu.



Rysunek 94 Zaproponowana metoda identyfikacji pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych przy pomocy metody MODWT. Źródło: opracowanie własne, Grafika: DALL-E

## 8.8 WALIDACJA METODY

Z uwagi na znaczny potencjał aplikacyjny opracowanej metody identyfikacji pojazdów szynowych przeprowadzono dodatkowe testy walidacyjne. W tym celu przeprowadzono eksperymenty analityczne przy pomocy 10 wybranych losowo zarejestrowanych sygnałów poruszających się składów kolejowych.

W obu próbach przy wybranych falkach typu fk oraz coif wykorzystano te same sygnały składów kolejowych, oznaczone kolejno jako: ew10, tw2, tw4, T4, o21a, o18a, o20a, lw3, pw6, ew9.

W pierwszej kolejności utworzono tabelę z warunkami i kategoriami składów – tabela 80. Warunki, według których kategoryzowano składy, przedstawiono w tabelach 78 – dla falki coif oraz 79 – dla falki fk.

Tabela 80 Schemat tabeli w celu wizualizacji metody.

Kategoria	Warunek 1	Warunek 2	Warunek 3
L	Istnieje	Istnieje	Istnieje
P	Istnieje	Istnieje	Istnieje
T	Istnieje	Istnieje	Nie występuje
E	Istnieje	Nie występuje	Nie występuje

Następnie dokonano analizy MODWT według wytycznych zaproponowanych w koncepcji metody identyfikacji pojazdów szynowych. Odczytano wartości energii relatywnej i dokonano porównania wyników do wcześniej określonych warunków.

Wyniki walidacji dla falki coif są następujące;

- Dla falki typu coif zakwalifikowane poprawnie składy; ew10, tw2, tw4, T4, o21a, o18a, o20a, lw3. (8 na 10 składów).
- Dla falki typu coif zakwalifikowane błędne składy: pw6, ew9 (2 na 10 składów)- tabela 82.

Wyniki te przedstawiono w tabeli 81, w której kolorem zielonym zaznaczono składy spełniające warunki, a czerwonym składy, które nie spełniły wszystkich warunków lub powielają się (w przypadku kategorii E).

Tabela 81 Wyniki klasyfikacji 10 wybranych losowo składów zakwalifikowane do wybranych typów kategorii dla fali coif.

Kategoria	Warunek 1				Warunek 2						Warunek 3					
	tw2	tw4	ew10	pw6												
E																
T	tw2	tw4	pw6	T4	T4	tw2	tw4	ew1 0	o21 a	pw 6						
P	o21 a	o18 a	pw6	o20 a	o21 a	o18 a	o20 a					ew 9	o21 a	o18 a	pw 6	o20 a
L	T4	ew9	lw3		T4	Tw2	Tw4	ew1 0	Ew9	lw3	pw 6	ew 9	lw3	o21 a		

Tabela 82 Składy błędnie zakwalifikowane, lecz spełniające warunki- falka coiř.

Kategoria	Warunek 1				Warunek 2						Warunek 3			
E														
T			pw5							pw6				
P														
L		ew9							ew9		ew9			

Wyniki walidacji dla falki fk są następujące;

- Dla falki typu fk zakwalifikowane poprawnie składy: ew10, tw2, tw4, o20a, o21a, o18a, lw3 (7 na 10 składow).
- Dla falki typu fk zakwalifikowane błędnie składy: T4, pw6, ew9 (3 na 10 składow) (tabela 84).
- Dla falki typu fk zakwalifikowane podwójnie składow: T4.

Wyniki te przedstawiono w tabeli 82, w której kolorem zielonym zaznaczono składy spełniające warunki, a czerwonym składy, które nie spełniły wszystkich warunków lub się powiały (w przypadku kategorii E).

Tabela 83 Wyniki klasyfikacji 10 wybranych losowo składow zakwalifikowane do wybranych typów kategorii dla fali fk.

Kategoria	Warunek 1					Warunek 2					Warunek 3		
E	tw2	tw4	ew10	o21a	pw6								
T	T4	tw2	tw4	o21a	pw6	T4	tw2	tw4	ew9	pw6			
P	o20a	o21a	pw6	o18a		o20a	o21a	o18a			o20a	o21a	o18a
L	T4	ew9	lw3			T4	ew9	lw3			T4	ew9	lw3

Tabela 84 Składy błędnie zakwalifikowane, lecz spełniający warunki- falka fk.

Kategoria	Warunek 1					Warunek 2					Warunek 3		
E													
T	T4				pw6	T4				pw6			
P													
L	T4	ew9				T4	ew9				T4	ew9	



Prawidłowość zastosowania falki typu coif wynosi na próbie 10 składów 80% natomiast dla falki fk 70%.

Podczas walidacji metody oceniano skuteczność identyfikacji przy użyciu dwóch różnych falek: typu coif i fk. Wyniki uzyskane z analizy 10 różnych składów kolejowych wykazały, że skuteczność klasyfikacji przy stosowaniu falki typu coif wynosiła 80%, a falki fk 70%. Potwierdza to potencjał aplikacyjny opracowanej metody identyfikacji pojazdów szynowych. Przeprowadzenie dodatkowych testów walidacyjnych pozwoliło ocenić i potwierdzić efektywność opracowanej metody identyfikacji. Dalsze badania i doskonalenie metody mogą przynieść jeszcze lepsze rezultaty i zapewnić solidną podstawę do praktycznego zastosowania tej metody w identyfikacji pojazdów szynowych.

## 9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych jest zagadnieniem niezwykle skomplikowanym i interesującym poznawczo. Zaawansowane metody analizy sygnałów wibroakustycznych generowanych ruchem pojazdu posiadają duży potencjał naukowy i aplikacyjny.

Opracowana metoda daje realne możliwości wykorzystania jej jako dodatkowego lub niezależnego systemu identyfikacji pojazdów szynowych. System pomiarowy (do pomiaru sygnałów wibroakustycznych) zastosowany w niniejszej pracy umożliwia montaż bezpośrednio do szynki szyny torowiska (pomiar drgań), na którym dokonuje się pomiaru metodami nieniszczącymi. Pomiar hałasu powinien odbywać się w bliskiej odległości torowiska, lecz w odległości nie wpływającej na prawidłowe funkcjonowanie ruchu kolejowego, czyli bez ingerencji w skrajnię kolejową. W pracy stosowano odległość: 165cm od torowiska oraz 50cm nad główką szyny.

W pracy osiągnięto założony cel. Opracowano metodę identyfikacji pojazdów przy pomocy sygnałów wibroakustycznych. Zaproponowano system pomiarowy oraz koncepcję metody identyfikacji pojazdów szynowych. Zweryfikowano i oceniono skuteczność identyfikacji na podstawie zarejestrowanych pomiarów pochodzących z różnych grup pojazdów szynowych w warunkach rzeczywistych. Należy nadmienić, iż rejestracja odbywała się in situ przy pełni funkcjonującej infrastrukturze kolejowej.

Otrzymane wyniki potwierdzają zasadność tezy pracy. Potwierdzono, na podstawie badań eksperymentalnych i analitycznych, że istnieje możliwość identyfikacji pojazdów szynowych na podstawie zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych.

Uzyskane wyniki pozwoliły sformułować następujące wnioski główne:

1. Postawiona teza: „Opracowanie metody identyfikacji rodzaju przejeżdżającego pojazdu szynowego przy wykorzystaniu sygnałów drganiowych i akustycznych” została potwierdzona poprzez utworzenie autorskiego systemu kategoryzowania składów przy pomocy analizy MODWT i wykorzystaniu informacji o skalach w energii relatywnej sygnału wibroakustycznego.
2. Postawiony w pracy cel: „Istnieje możliwość rozpoznania rodzaju przejeżdżającego pojazdu szynowego na podstawie analizy obrazów sygnałów wibroakustycznych” – został osiągnięty. Zaproponowano algorytm identyfikacji pojazdów szynowych. W wyniku testów walidacyjnych skuteczność klasyfikacji, która w przypadku wyboru falki coif wynosi 80%, a w przypadku falki fk 70%.

3. Pierwsza postawiona hipoteza: „Synchroniczna rejestracja sygnałów drganiowych i akustycznych poszerza ilość użytecznych informacji wspomagających proces klasyfikacji” została potwierdzona w wyniku analizy synchronicznie rejestrowanych sygnałów wykorzystanych w metodzie identyfikacji.

4. Druga postawiona teza: „W sygnałach wibroakustycznych znajdują się składowe informacyjne umożliwiające identyfikacje i klasyfikacje poruszającego się pojazdu szynowego” została potwierdzona przez utworzenie bazy danych zawierających charakterystyczne cechy sygnałów drganiowych i akustycznych

W obecnym etapie opracowania metoda identyfikacji posiada pewne ograniczenia. Może być wrażliwa i nieskuteczna wtedy, gdy dokona się zmiany w torze pomiarowym lub lokalizacji czujników pomiarowych. Skuteczność metody jest zależna od ilości zarejestrowanych składów i średniej wyznaczonej na podstawie całej puli wyników energii relatywnej. Wyznaczone warunki będą nieskuteczne w momencie zmiany próbkowania lub zastosowania innego rodzaju falki.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki umożliwiają rozpoczęcie dalszych badań i implementacji zaproponowanej metody do użycia w sektorze transportu kolejowego. Autor wraz z promotorem przez wiele lat realizowali działalność badawczą w sektorze transportu kolejowego, zwłaszcza w zakresie bezpieczeństwa, czego wynikiem są liczne wspólne publikacje, wystąpienia na krajowych i międzynarodowych konferencjach oraz wspólne badania o charakterze wdrożeniowym.

W ramach dalszych badań planuje się wykonać kolejne pomiary z uwzględnieniem większej liczby składów kolejowych w Polsce i za granicą. Opracowana metoda identyfikacji pojazdów szynowych ma znaczny potencjał aplikacyjny, jednak istnieje wiele innych kierunków badań naukowych, które mogą poszerzyć naszą wiedzę na ten temat oraz poprawić skuteczność i wszechstronność tej metody. Kilka z tych kierunków badań obejmuje:

- analizę wpływu zjawiska Dopplera- analiza tego efektu może pomóc w identyfikacji, uwzględniając zmiany częstotliwości sygnałów wynikające z ruchu pojazdów,
- analizę wpływu prędkości i stanu technicznego pojazdów na klasyfikację składów kolejowych. Badania nad tymi czynnikami mogą pozwolić na identyfikację zależności między nimi a cechami sygnałów,
- badania wpływu stanu infrastruktury kolejowej. Badania nad tym wpływem mogą pomóc zidentyfikować czynniki zakłócające lub wpływające na analizę sygnałów

Podsumowując, opracowana metoda identyfikacji pojazdów szynowych posiada znaczny potencjał aplikacyjny, jednak dalsze badania naukowe mogą przyczynić się do jej usprawnienia i doskonalenia. Analiza wpływu zjawiska Dopplera, prędkości i stanu technicznego pojazdów oraz stanu infrastruktury kolejowej może dostarczyć cennych informacji, które mogą być wykorzystane do udoskonalenia algorytmów identyfikacji i poprawy skuteczności tej metody.

## Spis ilustracji

Rysunek 1. System ANPR polskiego producenta zamontowany na szlabanie drogowym w celu identyfikacji pojazdów. Źródło: <a href="http://www.szymkowiak.pl">www.szymkowiak.pl</a> .....	11
Rysunek 2. Instalacja urządzeń systemu RFID na skrzyżowaniu drogowym. Źródło: [59]. .....	13
Rysunek 3 Przykładowe schematy procesu klasyfikacji hierarchicznej pojazdów. Źródło: [53]	14
Rysunek 4. Algorytm klasyfikacji pojazdów samochodowych do klasy pojazdów ciężarowych typu TIR. Źródło [54]. .....	15
Rysunek 5. Schemat poglądowy budowy i działania stacji WIM. Źródło: <a href="http://judico.co.kr">judico.co.kr</a> na podstawie [98]. .....	17
Rysunek 6. Przykład implementacji systemu RFID RFU630 przez producenta SICK. Źródło: <a href="http://sick.com">sick.com</a> .....	20
Rysunek 7. Przykład niestosowanego już systemu kodowania KarTrak, który uznaje się za prekursora obecnie stosowanych systemów znakowania kodami kreskowymi. Projekt porzucony w latach 70. ze względu na problemy techniczne. Źródło: <a href="http://Ceros.com">Ceros.com</a> . .....	20
Rysunek 8. Przykładowe identyfikatory pojazdów kolejowych. Źródło: Tabor Kolejowy 2019 UTK [34]. .....	22
Rysunek 9. Istniejący system ATIS-RFID i jego architektura. Źródło: [151].....	22
Rysunek 10. Propozycja podłączenia systemu ATIS do Internetu Rzeczy w ramach działania przemysłu 4.0 z usługą rejestracji obrazu i identyfikacji numerów pojazdu. Źródło: opracowanie własne na podstawie [151].....	23
Rysunek 11. Schemat działania systemu „Wireless Intelligent train identification system (WITIS)”. Źródło: [148]. .....	24
Rysunek 12. Konceptyjny schemat blokowy przedstawiający działanie systemu śledzenia położenia pociągu z systemem FPID. Źródło: [60]. .....	25
Rysunek 13. „Portal” z zamontowanymi kamerami z matrycą optyczną, termowizyjną oraz śledzeniem linii. Źródło: [85]. .....	26
Rysunek 14. Przykłady segmentacji obszaru tekstu na dwóch różnych wagonach. Na zielono ramka graniczna podzielona na segmenty po udoskonaleniu RANSAC. Źródło: [85]. .....	27
Rysunek 15. Schemat procesu przetwarzania obrazu w celu identyfikacji numeru pociągu. Źródło: opracowanie własne na podstawie [147]. .....	27
Rysunek 16. Wizualizacja grupowania cech skalarnych dla poszczególnych przejazdów pociągów posortowanych według typu pociągu. Źródło: [80]. .....	29
Rysunek 17. Wizualizacja grupowania cech skalarnych dla poszczególnych przejazdów kolejowych według typu pociągu. Źródło: [80]. .....	30
Rysunek 18. Przykład sygnału akcelerometru generowanego przez pociąg z lokomotywą klasy 380 jadący z prędkością 162 km/h podczas przejazdu przez rozjazd kolejowy. Źródło: [81]. ....	30
Rysunek 19. Schemat blokowy powstawania dźwięku toczenia przy uwzględnieniu chropowatości koła i szyny. Źródło:[129]. .....	34
Rysunek 20. Wartości ciśnienia akustycznego do prędkości poruszającego się składu kolejowego w zależności od hałasu trakcyjny (np. silników), toczenia, aerodynamiki pojazdu. Kolorem zielonym oznaczono hałas trakcyjny, niebieskim toczenia, błękitnym aerodynamiczny a łączny kolorem czerwonym. Źródło: [138]. .....	35
Rysunek 21. Konstrukcja powierzchni bocznej składu, w którym hałas aerodynamiczny pochodzi z przedsonka. Źródło: [116]. .....	36
Rysunek 22. Źródła hałasu emitowanego przez pojazd typu TVG zarejestrowane przez kamerę akustyczną. Źródło: [116]. .....	37
Rysunek 23. Rozkład źródeł hałasu modelu pociągu Shinkansen w skali 1/5, mierzony za pomocą lustra akustycznego (pasmo 1 kHz (odpowiednik pełnej skali). Źródło: [95]. .....	38
Rysunek 24. Rozkład źródła hałasu uzyskany przez pomiar z użyciem kamery akustycznej. Źródło: [95]. .....	38

Rysunek 25. Źródła hałasu generowane przez poruszający się skład KDP. Źródło: [96].....	39
Rysunek 26. Wartość natężenia dźwięku podczas przejazdu koreańskich pojazdów dużej prędkości (po lewej) oraz główne źródła hałasu (po prawej). Źródło: [96]. ....	40
Rysunek 27. Schematyczny diagram przedstawiający, w jaki sposób hałas toczenia jest generowany przez interakcję koło/szyna i promieniowany przez koło, szynę i podkłady Źródło: [5].....	42
Rysunek 28. Wzbudzenie drgań przez pojazdy szynowe: 1) emisja: wzbudzenie wymuszeniem dynamicznym, 2) transmisja: propagacja fali w gruncie, 3) emisja: przeniesienie drgań z gruntu na budynek. Źródło: [113]. ....	44
Rysunek 29. Schemat układu pojazd-tor. Źródło: opracowanie własne.....	44
Rysunek 30. Typowe parametry techniczne lokomotywy z wagonem osobowym francuskiej SNCF. Źródło:[108].....	47
Rysunek 31. Naprężenie Cauchy'ego w polu rzeczywistym. Źródło: [108]. ....	47
Rysunek 32. Sygnatura czasowa wartości szczytowej przyspieszenia drgań w gruncie, mierzona w pobliżu (3 m) i w odległości 32 m od linii kolejowej podczas przejazdu pociągu trakcyjnego klasy ET 420 z prędkością 120 km/h. Źródło: [143]. ....	48
Rysunek 33. Drgania generowane przez poruszający się skład z prędkością 75 km/h (od góry do dołu: szyna, podkład, podsypka). Źródło: [143]. ....	49
Rysunek 34 Schemat działania systemu IPS. Źródło: drtech.pl .....	52
Rysunek 35. Miniaturowe sensory przymocowane do torów kolejowych wychwytyują drgania emitowane przez przejeżdżające pociągi. Źródło: [9]. ....	53
Rysunek 36. Wykorzystanie kurogramu w analizie sygnałów niestacjonarnych. Źródło:[90]. ....	54
Rysunek 37. Schemat struktury testu terenowego. Źródło: [140]. ....	56
Rysunek 38. Sygnał wejściowy. Źródło: źródło własne.....	59
Rysunek 39. Sygnał po okienkowaniu (Hamminga). Źródło: źródło własne.....	59
Rysunek 40 Czynniki wpływające bezpośrednio na drgania poruszających się pojazdów szynowych. Źródło: opracowanie własne.....	61
Rysunek 41 Czynniki wpływające bezpośrednio na hałas poruszających się pojazdów szynowych. Źródło: opracowanie własne.....	61
Rysunek 42 Rozkład masy ze sprężystymi podporami podkładów. Źródło: Getzner.com .....	64
Rysunek 43 Rozkład masy bez sprężystych podpór podkładów. Źródło: Getzner.com .....	64
Rysunek 44 Wibroizolator piankowo- gumowy firmy DAMTEC-lewy górny róg i maty typu SBM firmy TINES-prawy górny róg, producenta Chemix- lewy dolny róg oraz typu USM-prawy dolny róg.....	68
Rysunek 45. Założenia metody badawczej. Źródło: opracowanie własne.....	81
Rysunek 46. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne. ....	81
Rysunek 47. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne. ....	82
Rysunek 48. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne. ....	82
Rysunek 49. Wybrane miejsca pomiarowe. Źródło: własne. ....	83
Rysunek 50. Okolice miejsca pomiarowego A. Źródło: Google Maps.lokalizacja: SSP km 104.230 .....	84
Rysunek 51. Miejsce pomiarów B i C. Źródło: opracowanie własne. ....	85
Rysunek 52. Akcelerometry Endevco zamontowane na oczyszczonej bocznej ścianie głowki szyny. Kolejno (od lewej): montaż na klej cyjanoakrylowy, wosk pszczeli i fabryczne akcesorium czujników – magnes. Źródło: opracowanie własne. ....	87
Rysunek 53 Stanowisko badawcze.....	88
Rysunek 54 Kierunek osi pomiarowych zamontowanych czujników przyspieszenia. ....	89
Rysunek 55 Przebieg oraz analiza FFT dla mocowania na magnes w odległości 30cm.....	90
Rysunek 56 Fotografie z miejsc pomiarów z uwzględnieniem ekspozycji na czujniki oraz stanowisko pomiarowe. Źródło: opracowanie własne.....	94

Rysunek 57 Schemat toru pomiarowego stosowanego w pomiarach A wraz z ustawieniem mikrofonu oraz czujnika drgań względem torowiska, gdzie $L=165$ cm a $h=50$ cm. Źródło: opracowanie własne.....	94
Rysunek 58 Przykład sygnałów drgań przejazdu pojazdu szynowego typu KDP z zastosowanym oknem wycinającym.....	95
Rysunek 59 Przykład sygnału ciśnienia akustycznego podczas przejazdu pojazdu szynowego typu KDP.....	96
Rysunek 60 Przykład sygnału drgań torowiska w momencie, w którym nie poruszał się po nim żaden skład kolejowy wraz z pomiarem tła akustycznego.....	97
Rysunek 61. Przykład zastosowania spektrogramu dla przejazdu pojazdu szynowego, w tym wypadku składu typu KDP dla osi X, Y, Z (od góry). Źródło: opracowanie własne.....	98
Rysunek 62. Przykładowe przebiegi drgań dla czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pośpiesznego, elektrycznego zespołu trakcyjnego oraz składu towarowego. Źródło: opracowanie własne.....	99
Rysunek 63. Analiza FFT – reprezentatywne dla czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pasażerskiego (typ P), elektrycznego zespołu trakcyjnego (EZT) oraz składu towarowego (typ T). Źródło: opracowanie własne.....	100
Rysunek 64. Przebiegi ciśnienia akustycznego dla przykładowych czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pośpiesznego, elektrycznego zespołu trakcyjnego oraz składu towarowego. Źródło: opracowanie własne.....	102
Rysunek 65. Transformata Fouriera dla przykładowych czterech typów pojazdów szynowych: KDP, pociągu pasażerskiego (typ P), elektrycznego zespołu trakcyjnego oraz składu towarowego (typ T). Źródło: opracowanie własne.....	102
Rysunek 66. Przebiegi przykładowego sygnału drganiowego i ciśnienia akustycznego składu kolejowego. Źródło: opracowanie własne.....	105
Rysunek 67. Przykładowe ciśnienie akustyczne składu kolejowego i jego analiza FFT wraz z filtrem typu Bandpass. Źródło: opracowanie własne.....	105
Rysunek 68. Przykładowe ciśnienie akustyczne składu kolejowego i jego analiza FFT wraz z filtrem typu Bandpass. Źródło: opracowanie własne.....	106
Rysunek 69. Przykładowe ciśnienie akustyczne składu kolejowego i jego analiza FFT wraz z filtrem typu Bandpass. Źródło: opracowanie własne.....	107
Rysunek 70. Analiza SPL przed przejazdem nad punktem pomiarowym. Źródło: opracowanie własne.....	107
Rysunek 71. Analiza SPL po przejeździe przez punkt pomiarowy. Źródło: opracowanie własne.....	108
Rysunek 72 Przebieg przed i po dokonaniu wycięcia fragmentu przejazdu składu. Źródło: opracowanie własne.....	112
Rysunek 73 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar A, skład typ E.....	113
Rysunek 74 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar A, skład typ T.....	114
Rysunek 75 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar A, skład typ P.....	115
Rysunek 76 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ E.....	116
Rysunek 77 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ P i L. ..	117
Rysunek 78 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ T część 1.....	118
Rysunek 79 Przebiegi pomiarów ciśnienia akustycznego i drgań, pomiar B, skład typ T część 2.....	119
Rysunek 80 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 26 dla pomiarów w punkcie pomiarowym A. (wyniki dla drgań).....	122
Rysunek 81 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 25. dla pomiarów w punkcie pomiarowym A (wyniki dla ciśnienia akustycznego).....	122



Rysunek 82 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 31. (wyniki dla drgań). Punkt pomiarowy B .....	125
Rysunek 83 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 30. (wyniki dla ciśnienia akustycznego). Punkt pomiarowy B .....	126
Rysunek 84 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla osi X. ....	139
Rysunek 85 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla osi Y. Wartości podane w %. ....	140
Rysunek 86 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla osi Z. ....	141
Rysunek 87 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej dla ciśnienia akustycznego. ....	142
Rysunek 88 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla osi X. ....	151
Rysunek 89 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla osi Y. ....	152
Rysunek 90 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla osi Z. ....	153
Rysunek 91 Wykres przedstawiający podsumowanie zestawienia średniej wewnętrznej 10% dla ciśnienia akustycznego. ....	154
Rysunek 92 Przykład określenia jednego z warunków dla składu typu P. ....	155
Rysunek 93 Oznaczenia kolorystyczne stosowane w pracy. ....	155
Rysunek 94 Zaproponowana metoda identyfikacji pojazdów na podstawie sygnałów wibroakustycznych przy pomocy metody MODWT. Źródło: opracowanie własne, Grafika: DALL-E. ....	159

## Spis tabel

Tabela 1 Klasy pojazdów. Źródło: PFU GDDIK. ....	9
Tabela 2 Kategorie pojazdów. Źródło: COST 323. ....	16
Tabela 3 Tabela porównująca zaprezentowane metody w podrozdziale 1.2. Źródło: Opracowanie własne. ....	32
Tabela 4. Średnie zakresy poziomego hałasu przejazdu pojazdów szynowych kolei niemieckiej ze względu na użyty typ hamulca (DB AG). Źródło: [66]. ....	41
Tabela 5 Typowe parametry techniczne lokomotywy z wagonem osobowym francuskiej SNCF. Źródło:[108]. ....	47
Tabela 6 Charakterystyka techniczna typów szyn. Źródło: poradnik dla komisji kolejowych „Tory, rozjazdy i skrzyżowania torów” UTK 2017. ....	66
Tabela 7 Podział wagonów towarowych o budowie normalnej wg kategorii oraz najczęściej występującej jednostce. Źródło: opracowanie własne na podstawie Katalogu Wagonów PKP CARGO 2019. ....	71
Tabela 8 Podział wagonów towarowych o budowie specjalnej wg kategorii oraz najczęściej występującej jednostce. Źródło: opracowanie własne na podstawie Katalogu Wagonów PKP CARGO 2019. ....	72
Tabela 9. Zestawienia składów na podstawie pociągów obsługiwanych przez PKP Intercity na rok 2022/2023 oraz danych z PKP.PL. Dostęp IV. 2023. ....	74
Tabela 10. Przykłady reprezentatywne wagonów pasażerskich oraz EZT Źródło: opracowanie własne. ....	74
Tabela 11. Przykłady reprezentatywne lokomotyw używanych na polskiej sieci dróg kolejowych. Źródło: opracowanie własne. ....	75
Tabela 12. Wykonane serie pomiarów próbnych. Źródło: opracowanie własne. ....	83
Tabela 13. Wykonane serie pomiarów docelowych. Źródło: opracowanie własne. ....	84
Tabela 14. System pomiarowy Sirius. Źródło: opracowanie własne na podstawie dewesoft.com. ....	86
Tabela 15. System pomiarowy Sirius. Źródło: opracowanie własne na podstawie endevco.com. ....	87
Tabela 16. Dane techniczne mikrofonu PCB Pizelectronic, model 130F20. Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji dostarczonej przez producenta. ....	92
Tabela 17. Dane techniczne dla National Instruments NI9233. Źródło własne na podstawie dokumentacji dostarczonej przez producenta. ....	93
Tabela 18 Przykład estymatorów drgań przejazdu pojazdu szynowego typu KDP. Źródło: opracowanie własne. ....	96
Tabela 19 Przykład estymatora ciśnienia akustycznego podczas przejazdu pojazdu szynowego typu KDP z uwzględnieniem podstawowych danych statystycznych. Źródło: opracowanie własne. ....	96
Tabela 20 Przykład estymatora drgań torowiska w momencie, w którym nie poruszał się po nim żaden skład kolejowy wraz z pomiarem akustycznego wraz z danymi tabelarycznymi. Źródło: opracowanie własne. ....	98
Tabela 21 Zastosowanie współczynnika korekcji dla różnych prędkości. ....	108
Tabela 22 Zestawienie zarejestrowanych sygnałów pomiarów A. ....	111
Tabela 23 Zestawienie zarejestrowanych sygnałów pomiarów B. ....	111
Tabela 24 Zestawienie estymatorów z przebiegów drgań z punktu pomiarowego „A”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T- towarowy, P-pasażerski, E-EZT. ....	120
Tabela 25 Zestawienie estymatorów z zarejestrowanych sygnałów dźwiękowych z punktu pomiarowego „A”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T- towarowy, P-pasażerski, E-EZT. ....	121

Tabela 26 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 24 dla pomiarów w punkcie pomiarowym A. (wyniki dla drgań).....	121
Tabela 27 Wyznaczone wartości średnie z najwyższych wartości z tabeli 25. dla pomiarów w punkcie pomiarowym A (wyniki dla ciśnienia akustycznego).....	122
Tabela 28 Zestawienie estymatorów z przebiegów drgań z punktu pomiarowego „B”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: P-pasażerski, E-EZT, L-lokomotywa. ....	123
Tabela 29 Zestawienie estymatorów z przebiegów drgań z punktu pomiarowego „B”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T-Towarowy. ....	123
Tabela 30 Zestawienie estymatorów z zarejestrowanych sygnałów dźwiękowych z punktu pomiarowego „B”, pogrubionym tekstem zaznaczono najwyższe wartości. Oznaczenia: T-towarowy, P-pasażerski, E-EZT.....	124
Tabela 31 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 28 i 29. (wyniki dla drgań). Punkt pomiarowy B. ....	125
Tabela 32 Wyznaczone wartości średnie z maksymalnych zaznaczonych wartości z tabeli 30. (wyniki dla ciśnienia akustycznego). Punkt pomiarowy B. ....	126
Tabela 33 Zakresy pasm częstotliwości wraz z poziomami dekompozycji dla czterech wybranych analiz falkowych. ....	128
Tabela 34 Poziomy dekompozycji metodą MODTW składu 1 „Ew14”. Kolorem zielonym zaznaczono najwyższy poziom w [%] energii relatywnej falki natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono najwyższy poziom ze wszystkich zarejestrowanych. ....	129
Tabela 35 Poziomy dekompozycji metodą MODTW składu 1 „Lw3”. Kolorem zielonym zaznaczono najwyższy poziom w [%] energii relatywnej falki natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono najwyższy poziom ze wszystkich zarejestrowanych. ....	130
Tabela 36 Poziomy dekompozycji metodą MODTW składu 1 „TT4”. Kolorem zielonym zaznaczono najwyższy poziom w [%] energii relatywnej falki natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono najwyższy poziom ze wszystkich zarejestrowanych. ....	130
Tabela 37 Zestawienie poziomów dekompozycji dla falek fk oraz coif przy próbkowaniu 50000Hz dla falek nr 4 poziomu 8. ....	131
Tabela 38 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów T. Wartości podane w %. ....	132
Tabela 39 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów T. Wartości podane w %. ....	132
Tabela 40 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów T. Wartości podane w %. ....	133
Tabela 41 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów ciśnienia akustycznego- kategoria składów T. Wartości podane w %. ....	133
Tabela 42 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów L. Wartości podane w %. ....	134
Tabela 43 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów L. Wartości podane w %. ....	134
Tabela 44 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów L. Wartości podane w %. ....	134
Tabela 45 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów ciśnienia akustycznego - kategoria składów L. Wartości podane w %. ....	135
Tabela 46 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów P. Wartości podane w %. ....	135
Tabela 47 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów P. Wartości podane w %. ....	136

Tabela 48 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów P. Wartości podane w %.	136
Tabela 49 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów ciśnienia akustycznego - kategoria składów P.	137
Tabela 50 Wyniki analizy MODWT (coif) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów E. Wartości podane w %.	137
Tabela 51 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Y - kategoria składów E. Wartości podane w %.	137
Tabela 52 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiarów drgań w osi Z - kategoria składów E. Wartości podane w %.	138
Tabela 53 Wyniki analizy MODWT(coif) dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów E. Wartości podane w %.	138
Tabela 54 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla osi X wszystkich analizowanych składów dla falki coif. Wartości podane w %.	139
Tabela 55 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla osi Y wszystkich analizowanych składów dla falki coif. Wartości podane w %.	140
Tabela 56 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla osi Z wszystkich analizowanych składów dla falki coif. Wartości podane w %.	141
Tabela 57 Podsumowanie zestawienia wyników średniej dla ciśnienia akustycznego wszystkich analizowanych składów dla falki. Wartości podane w %.	142
Tabela 58 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów T. Wartości podane w %.	143
Tabela 59 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów T. Wartości podane w %.	143
Tabela 60 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów T. Wartości podane w %.	144
Tabela 61 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiaru ciśnienia akustycznego- kategoria składów T. Wartości podane w %.	144
Tabela 62 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów L. Wartości podane w %.	144
Tabela 63 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów L. Wartości podane w %.	145
Tabela 64 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów L. Wartości podane w %.	145
Tabela 65 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów L. Wartości podane w %.	146
Tabela 66 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów P. Wartości podane w %.	146
Tabela 67 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów P.	147
Tabela 68 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów P. Wartości podane w %.	147
Tabela 69 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów P. Wartości podane w %.	148
Tabela 70 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi X- kategoria składów E. Wartości podane w %.	148
Tabela 71 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Y- kategoria składów E. Wartości podane w %.	149
Tabela 72 Wyniki analizy MODWT (fk) dla pomiarów drgań w osi Z- kategoria składów E. Wartości podane w %.	149

Tabela 73 Wyniki analizy MODWT (fk dla pomiaru ciśnienia akustycznego - kategoria składów E. Wartości podane w %.....	150
Tabela 74 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla osi X wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.....	150
Tabela 75 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla osi Y wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.....	151
Tabela 76 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla osi Z wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.....	152
Tabela 77 Podsumowanie zestawienia wyników średniej wewnętrznej 10% dla ciśnienia akustycznego wszystkich analizowanych składów dla falki fk. Wartości podane w %.....	153
Tabela 78 Zaproponowane warunki w % na podstawie wyników ze średniej z odrzuceniem 10% dla falki coif. ....	156
Tabela 79 Zaproponowane warunki w % na podstawie wyników ze średniej z odrzuceniem 10% dla falki fk. ....	156
Tabela 80 Schemat tabeli w celu wizualizacji metody.....	160
Tabela 81 Wyniki klasyfikacji 10 wybranych losowo składów zakwalifikowane do wybranych typów kategorii dla fali coif.....	160
Tabela 82 Składy błędnie zakwalifikowane, lecz spełniające warunki- falka coif. ....	161
Tabela 83 Wyniki klasyfikacji 10 wybranych losowo składów zakwalifikowane do wybranych typów kategorii dla fali fk. ....	161
Tabela 84 Składy błędnie zakwalifikowane, lecz spełniający warunki- falka fk.....	161

## Bibliografia

- [1] Aboelela, E. & Edberg, W. & Papakonstantinou, C. & Vokkarane, V. *Wireless sensor network based model for secure railway operations*. IPCCC. 2006.
- [2] Abraham, A. & Kovalev, S. & Tarassov, V. & Snasel, V. & Vasileva, M. & Sakhanov, A. *Proceedings of the second international scientific conference "Intelligent information technologies for industry" (IITI'17) V2*. Springer. 2018.
- [3] Angrisani, L. & Grillo, D. & Moriello, R. & Filo, G. Automatic detection of train arrival through an accelerometer. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2010.
- [4] Apanowicz J.(2002) *Metodologia ogólna*. Wyższa Szkoła Administracji i Biznesu, Gdynia, s. 60-77
- [5] Arteaga, L. Rolling noise in road and rail transportation systems. w: *Proceedings of International Congress on Noise Control Engineering - INTERNOISE 2019*. Madrid: Spanish Acoustical Society SEA. 2019.
- [6] Barai, B.V. & Pandey, P.C. *Vibration signature analysis using artificial neural networks*. Journal of computing in civil engineering, 1995.
- [7] Bartmański, C. Klasyfikacja pojazdów samochodowych w ruchu na podstawie generowanych przez nie sygnałów drganiowych. *Prace naukowe GIG – kwartalnik* 3/2009. 2009.
- [8] Bąkowski, H. & Posmyk, A. & Krawczyk, J. *Archives of metallurgy and materials*, V 56, 2011.
- [9] Berlin, E. & Van Laerhoven, K. *Sensor networks for railway monitoring: detecting trains from their distributed vibration footprints*, IEEE. 2013.
- [10] Berlin, E. & Van Laerhoven, K. *Trainspotting: Combining fast features to enable detection on resource-constrained sensing devices*. Conf. on Networked Sensing Systems (INSS). 2012.
- [11] Bouvet, P. & Vincent, N. & Coblenz, A. & Demilly, F. Optimization of resilient wheels for rolling noise control. *Journal of Sound and Vibration*. nr 231(3). 2000. s. 765–777. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2561
- [12] Bryja, D. & Popiołek, A. Analiza drgań pojazdów kolejowych w trakcie ich przejazdu przez nierówność progową toru, *Drogi Kolejowe* 9/2015.
- [13] Burdzik R., Celiński I., *Szacowanie natężenia strumienia ruchu z wykorzystaniem pomiaru drgań powierzchni jezdni*. *Drogi i Mosty* 21 (2022) 151-165.
- [14] Burdzik, R. & Konieczny, Ł. *Application of Vibroacoustic Methods for Monitoring and Control of Comfort and Safety of Passenger Cars*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014.
- [15] Burdzik, R. & Konieczny, Ł. Od diagnostyki technicznej przez wibroakustykę do innowacyjnych badań w transporcie. W: *Diagnostyka Maszyn XLIX*. Politechnika Śląska. 2023.
- [16] Burdzik, R. & Nowak, B. *Identification of the vibration environment of railway infrastructure*. Elsevier. 2017.
- [17] Burdzik, R. & Nowak, B. Koncepcja systemu predykcji drganiowej zbliżającego się pojazdu szynowego. W: *Diagnostyka Maszyn XLVIII*. Politechnika Śląska 2022.
- [18] Burdzik, R. & Słowiński, P. & Juzek, M. Dependence of damage to the running surface of the railway rail on the vibroacoustic signal of a passing passenger train. *Vibroengineering Procedia*. 2018. vol. 19. s. 226-229.
- [19] Burdzik, R. & Słowiński, P. & Rozmus, J. Analiza obrazów wibroakustycznych generowanych przejazdem pociągu o dużej prędkości. W: *Niezawodność systemów*

- technicznych: Materiały XLVI Zimowej Szkoły Niezawodności. Szczyrk. 7-13 stycznia 2018. Warszawa.*
- [20] Burdzik, R. & Słowiński, P. Aktualny stan wiedzy z zakresu sygnatury wibroakustycznej w kontekście identyfikacji poruszających się pojazdów. W: *Diagnostyka Maszyn XLVIII*. Politechnika Śląska. 2022.
- [21] Burdzik, R. & Słowiński, P. Analiza czasowo-częstotliwościowa w aspekcie identyfikacji poruszającego się pojazdu kolejowego. W: *Diagnostyka maszyn: XLVI Ogólnopolskie sympozjum*, Wisła. 3.03. - 7.03.2019 r.
- [22] Burdzik, R. & Słowiński, P. Analiza hałasu generowanego przez wybrane pojazdy szynowe. W: *Diagnostyka maszyn: XLV Ogólnopolskie sympozjum*, Wisła, 4.03. - 8.03.2018 r. Streszczenia/Konieczny Łukasz, Peruń Grzegorz (red.). 2018. Politechnika Śląska.
- [23] Burdzik, R. & Słowiński, P. *Application of pass-band step filtering method for identification the vibration-acoustic signature of a moving train*. Springer. 2022.
- [24] Burdzik, R. & Słowiński, P. Badania wstępne obrazów sygnałów wibroakustycznych w kontekście identyfikacji przejeżdżającego pojazdu szynowego. W: *Systemy logistyczne: Teoria i praktyka. X Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna. Warszawa. 25-27 czerwca 2018*. SMART CITY - Innowacje w transporcie krokiem do miast przyszłości. Logistics systems. Theory and practice. Xth International scientific and technical conference. 2018.
- [25] Burdzik, R. & Słowiński, P. Badania wstępne obrazów sygnałów wibroakustycznych w kontekście identyfikacji przejeżdżającego pojazdu szynowego. *WUT Journal of Transportation Engineering* z. 121. s. 3-40. 2018
- [26] Burdzik, R. & Słowiński, P. et al. Analysis of acoustic spectra of rail vehicles with different speed. W: *XXIII Konferencja Naukowa "Pojazdy Szynowe 2018"*. 22-25 maja 2018 roku. Katowice-Chorzów-Szczyrk. In: *23th Scientific Conference "Rail Vehicles 2018"*.
- [27] Burdzik, R. & Słowiński, P. et al. Analysis of transverse vibration and acoustic signal generated by the train passage. W: *XXIII Konferencja Naukowa "Pojazdy Szynowe 2018"*. 22-25 maja 2018 roku. Katowice-Chorzów-Szczyrk. In: *23th Scientific Conference "Rail Vehicles 2018"*.
- [28] Burdzik, R. & Słowiński, P. Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych. Streszczenia. W: *Diagnostyka Maszyn XLIX*. Politechnika Śląska 2023.
- [29] Burdzik, R. & Słowiński, P. *Images of vibrations of a passing railway vehicle*. Springer. 2020.
- [30] Burdzik, R. & Słowiński, P. Images of vibrations of a passing railway vehicle. W: *TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology: Proceedings of the International Conference TRANSBALTICA*. May 2-3. 2019. Vilnius.
- [31] Burdzik, R. & Słowiński, P. Kategoryzowanie pojazdów szynowych przy pomocy średniej kwadratowej iloczynu sygnałów drganiowych. W: *vibroacoustic and diagnostics machinery, deviced and structures. Proceedings of 2nd scientific conference VibDiag*. Poznań 2021.
- [32] Burdzik, R. & Słowiński, P. Metody przetwarzania sygnałów w celu identyfikacji pojazdów szynowych. W: *Diagnostyka Maszyn: XLVII Ogólnopolskie Sympozjum*. Wisła. 1.03-5.03. 2020. Streszczenia / Peruń, G. & Konieczny, Ł. (red.). Katowice 2020.
- [33] Burdzik, R. & Słowiński, P. Porównanie drgań szyny kolejowej wywołanych przejazdem pojazdu szynowego i samochodowego. W: *WibroTech 2019: XX Konferencja Naukowa Wibroakustyki i Wibrotechniki. XV Ogólnopolskie*



*Seminarium Wibroakustyka w Systemach Technicznych*. Kraków-Zawiercie. 14-15 listopada 2019.

- [34] Burdzik, R. & Słowiński, P. *Research on vibroacoustic signals recorded during the passage of rail vehicles*. Intertechdoc – Politechnika Śląska. 2021.
- [35] Burdzik, R. *Analysis of rail vibration signal time and frequency structures generated by different mechanism*. Springer Nature. 2018.
- [36] Burdzik, R. Implementation of multidimensional identification of signal characteristics in the analysis of vibration properties of an automotive vehicle's floor panel. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014. 16 (3). s. 458–464.
- [37] Burdzik, R. *Multidimensional identification of resonances analysis of strongly nonstationary signals, case study: Diagnostic and condition monitoring of vehicle's suspension system*. Elsevier. 2017.
- [38] Cai, G. & Zhao, J. & Song, Q. & Zhou, M. *System architecture of a train sensor network for automatic train safety monitoring*. Elsevier. 2018.
- [39] Cempel, C. Diagnostyka techniczna – spojrzenie syntetyczne. *Diagnostics and structural health monitoring*. 1(57)/2011.
- [40] Cempel, C. *Metody analizy sygnałów wibroakustycznych*. Zeszyty Instytutu Konstrukcji. Wibroakustyka Stosowana PWN. 1989.
- [41] Cerullo, M. & Fazio, G. & Fabbri et al. *Acoustic Signal Processing to Diagnose Transiting Electric Trains*, IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2005.
- [42] Connolly, D.P. & Galvin, P. *A 2,5D time-frequency domain model for railway inducted soil-building vibration due to railway defects*. Elsevier. 2019.
- [43] Connolly, D.P. & Kauroussis, G. *Benchmarking railway vibrations – track, vehicle, ground and building effects*. Elsevier. 2014.
- [44] Connolly, D.P. & Kauroussis, G. *Field testing and analysis of high speed rail vibrations*. Elsevier. 2014.
- [45] Connolly, D.P. & Marecki, G. *The growth of railway ground vibration problems – A review*, Elsevier. 2015.
- [46] Craven, N. *Railway induced vibration-state of the art report*. International Union of Railways. 2017.
- [47] Dąbrowski, Z. & Klekot, G. *Management system in laboratory – An opportunity or an obstacle for vibroacoustic research?*. 16th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2009.
- [48] Daud, S.M. & Yunus, J. *Relative wavelet energy as a tool to select suitable wavelet for artifact removal in EEG*. IEEE. 2005.
- [49] Ding, Y. & Zhao, J. & Liu J. et al. *Pantograph Vibration Interference Signal Recognition Based on SVM Classification*. IEEE. 2020.
- [50] Donato, P. & Urena, J. & Mazo, M. et al. *Electromagnetic sensor array for train wheel detection*. Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. 2004.
- [51] Dumont, M. & Cook, A. & Kinsley, N. *Acceleration Measurement Optimization: Mounting Considerations and Sensor Mass Effect*. Kistler Instrument Corp.
- [52] Englehard, J. & Wardecki, W. & Zalewski P. *Transport kolejowy – organizacja, gospodarowanie, zarządzanie*. Kolejowa Oficyna Wydawnicza. 1995.
- [53] Gajda, J. & Sroka, R. & Stencel, M. & Żegleń, T. *Metody klasyfikacji pojazdów samochodowych w ruchu*. PAK 4/2000.
- [54] Gajda, J. & Sroka, R. & Stencel, M. & Żegleń, T. *Selektywna klasyfikacja pojazdów samochodowych z wykorzystaniem pętli indukcyjnych*. ResearchGate. 2013.

- [55] Genesh, A. & Bonda, Y. & Nanda, B.K. & Jonnalgadda, S. *Vibration signature based stability studies in internal turning with wavelet denoising preprocessor*. Elsevier. 2020.
- [56] Gong, C. & Fan, W. *A new automatic train identification system based on RFID*. WISE 2010. Springer Berlin 2011.
- [57] Gurumoorthy, S. & Muppalaneni, N. *EEG Signal Denoising Using Haar Transform and Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform (MODWT) for the Finding of Epilepsy*. Epilepsy. IntechOpen. 2021.
- [58] Hardy, A.E.J. Measurement and assessment of noise within passenger trains. *Journal of Sound and Vibration* 231(3). 2000.
- [59] Hua Li, C. *Automatic vehicle identification (AVI) system based on RFID*. IEEE. 2010.
- [60] Hwang, K. & Cho, J. et al. *Ferrite position identification system operating with wireless power transfer for intelligent train position detection*. IEEE. 2018.
- [61] Id -1 (D-1) WARUNKI TECHNICZNE - PKP PLK
- [62] Iwnicki, S. *Handbook of railway dynamics*. Taylor&Francis. 2006.
- [63] Jacyna, M. *System Logistyczny Polski – Uwarunkowania techniczno-technologiczne komodalności transportu*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 2012.
- [64] Jeong, D. & Choi, H.S. & Cho, Y.J. *Measuring Acoustic Roughness of a Longitudinal Railhead Profile Using a Multi-Sensor Integration Technique*. Sensors. 2019.
- [65] Ju, S.H. & Lin, H.T. & Huang, H.Y. Dominant frequencies of train-induced vibrations, Science Direct. *Journal of Sound and Vibration*. Volume 319. Issues 1–2, 9 January 2009. pp. 247-259.
- [66] Ju, S.H. & Lin, H.T. & Huang, J.Y. *Dominant frequencies of train-induced vibrations*. Elsevier. 2008.
- [67] Katalog Wagonów PKP CARGO
- [68] Kearney, A.T. *Prognoza rozwoju polskiego rynku kolejowych przewozów towarowych na lata 2012-2020*. 2013.
- [69] Klekot G., Indicator of Vibroacoustic Energy Propagation as a Selection Criterion of Design Solution. *Archives of Acoustics*. 38(4). 2013.
- [70] Klekot, G. Analiza propagacji energii wibroakustycznej elementem procesu konstruowania i eksploatacji. *Przegląd Mechaniczny*. SIGMA- NOT. 11/2014.
- [71] Klemiata, M. *Zastosowanie Transformaty Falkowej w nadzorowaniu*, AGH Katedra Automatyki i Robotyki. Dostęp czerwiec 2022.
- [72] Kogut, J. Propagacja w podłożu drgań generowanych przez koleje dużych prędkości. *Zeszyty naukowo-techniczne SITK RP* oddział w Krakowie, nr 2(102, 2013).
- [73] Kostek, R. *Problemy główne diagnostyki drganiowej*. *Techniki wirtualne w badaniach stanu, zagrożeń bezpieczeństwa i środowiska eksploatowanych maszyn*. projekt nr WND-POIG.01.03.01-00-212/09. Bydgoszcz 2012.
- [74] Kouroussis, G. & Vogatzis K.E. & Connolly D.P. *A combined numerical/experimental prediction method for urban railway vibration*. Elsevier. 2017.
- [75] Kowalska-Koczwara, A. & Pachla, F. & Stecz, P. *Vibration-based damage identification and condition monitoring of metro trains: Warsaw metro case study*, Hindawi. 2018.
- [76] Kowalska-Koczwara, A. & Stypuła, K. A comparative analysis of two methods for determining the influence of vibrations on people in buildings. *Technical Transactions*. Vol. 114. Issue 1. 2017.

- [77] Kozma, R. & Wang, L. & Iftekharuddin, K. *A Radar-Enabled Collaborative Sensor Network Integrating COTS Technology for Surveillance and Tracking*. MDPI. 2012.
- [78] Koźlak, A. *Ekonomia transportu. Teoria i praktyka gospodarcza*. Gdańsk: Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego. 2007.
- [79] Kratochvilova, M. & Podrouzek, J. & Apeltauer, J. *Train type identification at S&C*, Hindawi. 2020.
- [80] Kratochvilova, M. & Podrouzek, J. et al. *Train type identification at S&C*. Wiley-Hindawi. Volume. 2020.
- [81] Krc, R. *Train identification system at railway switches and crossings using advanced machine learning methods*, Threatisse on doctoral thesis, Brno University of Technology. 2021.
- [82] Krylov, V.V. *Generation of ground vibrations by superfast trains*. Elsevier. 1995.
- [83] Kwiatkowska, E. *Wibroizolatory sprężynowe w nawierzchni torowej*. *Zeszyty naukowo techniczne SITK*. nr 1. Kraków 2017.
- [84] Li, G. & Zhang, J. & Li, C. Signal process technology of train vibration. *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*. 2016.
- [85] Lisanti, G. & Karaman, S. et al. A multi-camera image processing and visualization system for train safety assessment. *Springer Science+ Bussiness Media*. New York 2017.
- [86] Lorieux, L. *Analysis of train-induced vibrations on a single-span composite bridge, KTH Architecture and the Build Environment*, Szwecja 2008.
- [87] Łuszcz, J. & Buława, M. Analiza zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez pojazdy szynowe. *Problemy Kolejnictwa*. z. 168. 2015.
- [88] Madej, H. Metody przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w diagnozowaniu silników spalinowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport*. z. 69. 2010.
- [89] Maheswari, R. Uma & Umamaheswari R. *Trends in non-stationary signal processing techniques applied to vibration analysis of wind turbine drive train – A contemporary survey*, Elsevier. 2016.
- [90] Majkut, L. & Olszewski R. Wykorzystanie kurtogramu do detekcji uszkodzeń przekładni zębatych. *Logistyka* 6/2011.
- [91] Martini, A. & Rivola, A. & Troncossi, M. *Autocorrelation Analysis of Vibro-Acoustic Signals Measured on a Test Field for Water Leak Detection*, Applied sciences. MDPI 2018.
- [92] Mey, O. & Schneider, A. & Enge-Rosebnlatt, O. *Condition Monitoring of Drive Trains by Data Fusion of Acoustic Emission and Vibration Sensors*. MDPI. 2021.
- [93] Muhammad, H. & Farooq, U. et al. Vehicle detection and shape recognition using optical sensors: a review. *Secound International Conference on Machine Learning and Computing*. IEEE. Computer Society. 2010.
- [94] Nader, M. *Drgania i hałas w transporcie – wybrane zagadnienia*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2016.
- [95] Nagakura, K. *Localization of aerodynamic noise source of Shinkansen trains*. Elsevier. 2006.
- [96] Noh, H.M. & Choi, S. & Hong, S. & Kim, S.W. *Investigation of noise sources in high-speed trains*. SAGE. 2014.
- [97] Nowak E. (2013) *Teoretyczne metody badawcze w naukach społecznych*. *Obronność, Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania i Dowodzenia Akademii Obrony Narodowej* nr 2(6), 136-146, s. 143
- [98] Nowakowski, K. Preselekcyjne ważenie pojazdów. *Drogownictwo* 10/2019.

- [99] Nowakowski, T. *Opracowanie metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju w oparciu o pomiary przytorowe*. Praca doktorska zrealizowana na Politechnice Poznańskiej Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu w roku 2020.
- [100] Ono, K. & Yamada, M. Analysis of railway track vibration. *Journal of Sound and Vibration*. 1988.
- [101] Orgen, M. & Gidlof-Gunnarsson, A. *Comprasion of annoyance from railway noise and vibration*. MDPI. 2017.
- [102] Pachla, F. The impact of the passenger train speed on the comfort of humans in a building close to the railway. *Vibroengineering PROCEDIA*. Vol. 19. pp. 147-152. Sep. 2018.
- [103] Paś, J. & Białek, K. Analiza występowania zaburzeń przewodzonych w wybranych urządzeniach kolejowych – wpływ obciążenia na wyniki pomiaru. *Biuletyn WAT* Vol. LXVIII. Nr 2. 2019.
- [104] Paś, J. & Białek, K. Analysis of the electromagnetic environment on a large railway area. *Biuletyn WAT*. 67. 1. 2018.
- [105] Patel, C. & Shan, D. & Patel, A. *Automatic number plate recognition ANPR: A survey*. International journal of computer applications. 2013.
- [106] Patent – Railway system using acoustic monitoring PCT/GB/2010/051467. 2009.
- [107] Peruń G., Hornik A., *Wibroakustyczna weryfikacja stanu technicznego łożysk tocznych*. Eksploatacja i testy. Autobusy 12/2016.
- [108] Picoux, B. & Le Houedec, D. *Diagnosis and prediction of vibration from railway trains*. Elsevier. 2005.
- [109] Prospekt Wilcoxon Sensing Technologies. *Vibration monitoring solutions for the rail industry*. USA, dostęp czerwiec 2022.
- [110] Pustokhina, I. V. & Pustokhin, D.A. et al. *Automatic vehicle license plate recognition using optimal K-means with convolutional neural network for intelligent transportation systems*. IEEE. Access 2017.
- [111] Pyra, J. & Kłaczyński, M. Vibroacoustic measurments and analysis of blasting works, *Journal of Vibroengineering* V21. Issue 2. 2019.
- [112] Rajkumar, R.I. & Sankaranarayanan, P.E. & Sundari G. *GPS and Ethernet based Real Time Train Tracking System*. ICEAS. 2013.
- [113] Rucker, W. & Auersch, L. *A user friendly prediction tool for railway induced ground vibrations: emission-transmission-immision*. Noise and Vibration Mitigation. NNFM 99. Springer. Berlin 2008.
- [114] Rudd, M. J. Wheel/Rail noise-part II: wheel squeal. *Journal of Sound and Vibration* 46(3). 1976.
- [115] Saidi, L. & Ali, J.B. & Fnaiech F. *Bi-spectrum based-EMD applied to the non-stationary vibration signals for bearing faults diagnosis*. Elsevier. 2014.
- [116] Sassa, T. & Sato, T. & Yatsui, S. Numerical analysis of aerodynamic noise radiation from a high-speed train surface. *Journal of Sound and Vibration* 247(3). 2001.
- [117] Sawczuk, W. & Ulbrich, D. & Kowalczyk, J. & Merkisz-Guranowska, A. *Evaluation of Wear of Disc Brake Friction Linings and the Variability of the Friction Coefficient on the Basis of Vibroacoustic Signals*, Sensors MDPI. 2021.
- [118] Słowiński P. *Logistyka w aspekcie technologii transportu kolejowego*. Praca inżynierska. Wyższa Szkoła Bankowa w Poznaniu, 2015.
- [119] Słowiński, P. & Juzek, M. Porównanie sposobów mocowania akcelerometru a poprawność uzyskanych wyników w badaniach nieniszczących na przykładzie szyny kolejowej. W: *vibroacoustic and diagnostics machinery, deviced and structures. Proceedings of 2nd scientific conference VibDiag*. Poznań 2021.

- [120] Słowiński, P. & Juzek, M. Research on vibroacoustic signals recorded during the passage of rail vehicle. W: *Interdyscyplinarne Badania Młodych Naukowców: InterTechDoc2021* / Bonek, M. & Barteczko, N. & Balon, B. (red.). Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Politechnika Śląska. 2021.
- [121] Słowiński, P. Badania sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych podczas przejazdu pojazdów. W: *XVIII Studencka Sesja Naukowa Wydziału Transportu i Inżynierii Lotniczej Politechniki Śląskiej*. Katowice 19 czerwca 2020 Online.
- [122] Słowiński, P. Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych. W: *XX studencka sesja naukowa wydział transportu i inżynierii lotniczej*. Politechnika Śląska 2022.
- [123] Smith, M.G. & Croy, I. Physiological effects of railway vibration and noise on sleep. *The journal of the Acoustical Society of America* 141. 3262. 2017.
- [124] Sowiński, A. *Cyfrowa technika pomiarowa*. Warszawa: WKiŁ. 1976.
- [125] Sprawozdanie Urzędu Transportu Kolejowego – Tabor kolejowy 2019.
- [126] Suharjono, A. & Wardihani, E. D. & Febrayana, Y. & Hardani, K. IEEE. 2017.
- [127] Suharjono, A. & Wardihani, E.D. & Febrayana, Y. & Hardani K. *Analysis of the vibration signal detection for rail train arrival*. IEEE. 2017.
- [128] Szydło, K. & Maciąg, P. & Longwic, R. & Lotko, M. *Analysis of vibroacoustic signals recorded in the passenger lift cabin*. Advances in Science and Technology 2016.
- [129] Talotte, C. Aerodynamic noise: a critical survey. *Journal of sound and vibration*. 2000.
- [130] Targosz, J. Wibroizolacja dróg kolejowych oraz rozkład energetyczny oddziaływań dynamicznych na środowisko. *Transport Problems* Volume 4 Issue 3. 2009.
- [131] Thompson, D.J. & Iglesias, E.L. et al. Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains. *International Journal of Rail Transportation*. 2015.
- [132] Timofiejczuk, A. *Metody Analizy Sygnałów Niestacjonarnych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. 2004.
- [133] Titova, L.L. & Chernik Yu, M. & Gumenyuk Yu, O. & Korobko, M.M. *Research of Daubechies Wavelet spectrum of vibroacoustic signals for diagnostic of diesel engines of combine harvesters*. Agritech IOP Publishing. 2020.
- [134] Tsai, H.C. & Wang, C.Y. & Huang, N.E. et al. Railway track inspection based on the vibration response to a scheduled train and the Hilbert-Huang transform. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Part F. 2014.
- [135] Tsunashima, H. *Condition monitoring of railway tracks from car-body vibration using machine learning technique*. applied sciences. MDPI 2019.
- [136] Unterhuber, A. & Iliev, S. & Biebl, E. *Estimation Method for High-Speed Vehicle Identification with UHF RFID Systems*. IEEE. 2020.
- [137] Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym. Dz. U. z 2003 r. Nr 86, poz. 789.
- [138] Van Blokland, G. & Kuijpers, A. & Thompson, D. & Dittrich, M. *Railway noise*. Muller-BBM Gruppe. Dostęp czerwiec 2022.
- [139] Wang, C. On-line vibration source detection of running trains based on acceleration measurement. *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (RSJ 2006)*.
- [140] Wang, Z. & Lu, B. & Zheng, H. *Novel railway-subgrade vibration monitoring technology using phase-sensitive OTDR*. SPIE vol 10323. 2017.
- [141] Wei, Z. & Yang, S. & Xie, Y. et al. *SVSV: Online handwritten signature verification based on sound and vibration*. Information Sciences Elsevier. 2021.

- [142] Wenlong, P. & Zhiguo, L. & Shaohuang P. et al. Access Point research in rail train safety monitoring sensor network. *Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation*. 2012.
- [143] Wettschureck, R.G. & Hauck, G. & Diehl, R.J. & Willenbrik L. *Noise and vibration from railroad traffic*, Berlin: Springer-Verlag 2013.
- [144] Wilk, A. & Madej, H. & Łazarz B. Zastosowanie analizy czasowo-częstotliwościowej w diagnozowaniu lokalnych uszkodzeń przekładni zębatych. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*. (14) nr 1. 2001.
- [145] Wu, T.X. & Thomson D.J. Vibration analysis of railway track with Multiple wheels on the rail. *Journal of Sound and Vibration*. Volume 239. Issue 1. January 2001. P. 69-97.
- [146] Xi, J. & Feng, Z. & Wang, G. & Wang F. *Vibration and noise source identification methods for diesel engine*. Springer 2014.
- [147] Yang, S. & Xu, R. et al. A rail train number identification algorithm based on image processing. *Springer Nature*. Singapore. April 2020.
- [148] Ye, J. & Shi, L. & He, H. *Design of wireless intelligent train identification system based on GPS/GPRS*. IEEE. 2009.
- [149] Zalewski, P. & Siedlecki, P. & Drewnowski, A. *Technologia Transportu Kolejowego*. WKŁ. Warszawa 2013.
- [150] Zhang Z. C., Lin J.H. *Non-stationary random vibration analysis of three-dimensional train-bridge systems*, Taylor&Francis 2009.
- [151] Zhang Z., *Applications of Fast-Moving RFID Tags in High-speed Railway Systems*. International Journal of Engineering Business Management, Vol. 3, No. 1 (2011), pp. 27-31
- [152] Zhulai V. A. *Identifying diagnostic characteristics in the vibroacoustic signal of a gear transmission*, Allerton Press, 2007.
- [153] Zvolensky P., Grecik J., Pultznerova A., Kasiar L. *Research of noise emission sources in railway transport and effective ways of their reduction*. MATEC Web of Conferences 107, 00073, 2017.