

Roksana Licow

Implementacja metod analitycznych przetwarzania sygnałów wibroakustycznych do oceny infrastruktury kolejowej

Gdańsk 2025

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTORKA SERII

Joanna Żukowska

RECENZENCI

Rafał Burdzik

Grzegorz Szymański

REDAKCJA JĘZYKOWA

Joanna Niezgoda

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

Ireneusz Jelonek

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta tytułowa Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://sklep.pg.edu.pl/>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2025

ISBN 978-83-7348-942-4 (wersja papierowa)

ISBN 978-83-7348-944-8 (wersja elektroniczna)

Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów	7
1. Wprowadzenie	9
2. Przegląd badań w zakresie diagnostyki nawierzchni kolejowej	11
2.1. Wprowadzenie	11
2.2. Zarządzanie utrzymaniem linii kolejowych	13
2.3. Systemy i metody monitorowania stanu konstrukcji kolejowych	16
2.4. Metody monitorowania stanu konstrukcji nawierzchni kolejowej	18
2.5. Metody predykcji uszkodzeń elementów nawierzchni kolejowej	21
2.6. Implementacja metod predykcji uszkodzeń elementów nawierzchni kolejowej przez zarządców kolejowych	26
2.7. Podsumowanie	29
3. Problem badawczy i naukowy	32
3.1. Wprowadzenie	32
3.2. Analiza problemu badawczego	33
3.3. Cele i zadania badawcze	35
3.4. Podsumowanie	37
4. Metody analiz sygnałów na przykładzie sygnału odpowiedzi dynamicznej pociągu	39
4.1. Wprowadzenie	39
4.2. Parametry sygnałów przyspieszeń drgań	40
4.3. Metody analiz sygnałów przyspieszeń drgań	46
4.3.1. Klasyfikacja metod i narzędzi analitycznych	46
4.3.2. Przykłady analiz w dziedzinie czasu	47
4.3.3. Przykłady analiz w dziedzinie częstotliwości	53
4.3.4. Przykłady analiz w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej	58
4.3.5. Wybrane analizy z grupy metod parametrycznych	60
4.3.6. Wybrane analizy z grupy metod nieparametrycznych	62
4.4. Filtrowanie i oknowanie sygnału przyspieszeń drgań	63
4.5. Podsumowanie	67
5. Analiza powtarzalności charakterystyk sygnałów przyspieszeń drgań	69
5.1. Wprowadzenie	69
5.2. Metodyka badań	70
5.3. Analiza wyników badań	73
5.4. Synteza wyników badań	96

6. Analiza składowych sygnału drgań w odniesieniu do stanu technicznego linii kolejowej z wykorzystaniem sygnatury wibroakustycznej pojazdu szynowego	98
6.1. Wprowadzenie	98
6.2. Metodyka badań	99
6.3. Analiza wyników badań	103
6.4. Synteza wyników badań	117
7. Wykorzystanie sygnałów drganiowych do identyfikacji rodzaju przejazdów kolejowo-drogowych	118
7.1. Wprowadzenie	118
7.2. Metodyka badań	119
7.2.1. Aparatura pomiarowa	119
7.2.2. Obiekty badań – charakterystyka przejazdów kolejowo-drogowych	122
7.2.3. Procedura rejestracji danych i ich przetwarzania	125
7.3. Analiza wyników badań	126
7.4. Synteza wyników badań	139
8. Implementacja metod analiz sygnałów wibroakustycznych w systemach transportu kolejowego	140
8.1. Wprowadzenie	140
8.2. Koncepcja systemu monitoringu i zarządzania danymi	140
8.2.1. Opis systemu monitoringu oraz procedury zbierania danych	140
8.2.2. Analiza ryzyka i trybów awarii (FMECA) na podstawie danych z IoT i systemów diagnostycznych	143
8.3. Implementacja i zastosowanie metod w systemach kolejowych	146
8.4. Podsumowanie	147
9. Podsumowanie i wnioski końcowe	149
Literatura	153
Streszczenie w języku polskim	180
Streszczenie w języku angielskim	181

Badania, których wyniki przedstawiono w niniejszej monografii, zostały sfinansowane ze środków pochodzących z realizowanych przez autorkę projektów:

- Argentum Triggering Research Grants – w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” Politechniki Gdańskiej, grant nr DEC-3/1/2022/IDUB/I3b/Ag;
- Plutonium Supporting Student Research Teams – w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” Politechniki Gdańskiej, grant nr DEC-5/1/2022/IDUB/III.4a/Pu.

Wykaz ważniejszych skrótów

AI (*artificial intelligence*) – sztuczna inteligencja

ARMA (*autoregressive moving average*) – model autoregresyjny średniej ruchomej

CER – Community of European Railways

CNN (*convolutional neural network*) – splotowa sieć neuronowa

CPSD (*cross power spectral density*) – wzajemna gęstość widmowa mocy

CRM (*customer relationship management*) – zarządzanie relacjami z klientami

CTM (*continuous track monitoring*) – ciągłe monitorowanie toru

CWT (*continuous wavelet transform*) – ciągła transformata falkowa

DFT (*discrete Fourier transform*) – dyskretna transformata Fouriera

DNN (*deep neural network*) – głęboka sieć neuronowa

DT (*digital twin*) – cyfrowy bliźniak

FFT (*fast Fourier transform*) – szybka transformata Fouriera

FMEA (*failure modes and effects analysis*) – analiza rodzajów i skutków awarii

FMECA (*failure modes, effects and criticality analysis*) – analiza rodzajów, krytyczności i skutków awarii

FSI (*functional significant items*) – kluczowe elementy systemu

FTA (*fault tree analysis*) – analiza drzewa błędów

GRU (*gated recurrent unit*) – modele rekurencyjne z bramkami

HRI – Holland Rail Industry

IFFT (*inverse fast Fourier transform*) – odwrotna transformata Fouriera

IIR (*infinite impulse response*) – nieskończona odpowiedź impulsowa

IoT (*internet of things*) – internet rzeczy

LCC (*life cycle cost*) – koszt cyklu życia

LPV-AR (*linear parameter-varying autoregressive*) – model autoregresyjny ze zmiennymi parametrami liniowymi

LSTM (*long short-term memory*) – długotrwała pamięć krótkoterminowa

MAE (*mean absolute error*) – średni błąd bezwzględny

OBM (*on-board monitoring*) – monitorowanie diagnostyczne z pokładu pojazdu szynowego

PSD (*power spectral density*) – gęstość widmowa mocy

RAMS (*reliability, availability, maintainability and safety*) – niezawodność, dostępność, łatwość utrzymania i bezpieczeństwo

RCM (*reliability centered maintenance*) – utrzymanie skoncentrowane na niezawodności

ResNet (*residual network*) – resztkowe sieci neuronowe

RF (*random forest*) – las losowy

RIA – Railway Industry Association

RMS (*root mean square*) – wartość skuteczna

RMSE (*root mean squared error*) – błąd średniokwadratowy

RNN (*recursive neural network*) – rekurencyjna sieć neuronowa

RPN (*risk priority number*) – wskaźnik ryzyka

SHM (*structural health monitoring*) – monitorowanie stanu konstrukcji

STFT (*short-time Fourier transform*) – krótkoczasowa transformata Fouriera

TDR (*track decay rate*) – współczynnik tłumienia drgań w szynie

UAV (*unmanned aerial vehicle*) – bezzałogowe statki powietrzne

UIC – International Union of Railways

UITP – International Association of Public Transport

UNIFE – Union of European Railway Industries

WVD (*Wigner–Ville distribution*) – transformata Wignera–Ville’a

1. Wprowadzenie

Transport kolejowy pełni kluczową rolę w systemach transportowych na całym świecie, stanowiąc jedno z najefektywniejszych rozwiązań w zakresie przewozu osób i towarów. Ze względu na niezawodność, efektywność oraz relatywnie niewielki wpływ na środowisko w porównaniu z innymi gałęziami transportu transport kolejowy jest coraz częściej wykorzystywany w przewozach pasażerskich i towarowych. Intensywna eksploatacja infrastruktury kolejowej powoduje jednak jej degradację, co wymaga skutecznego monitorowania stanu technicznego i wdrażania odpowiednich działań diagnostycznych. W tym kontekście diagnostyka nawierzchni kolejowej stanowi istotny element zapewnienia bezpieczeństwa ruchu oraz racjonalnego wykorzystania środków finansowych przeznaczonych na utrzymanie infrastruktury. Zachowanie linii kolejowych w wymaganych standardach jakościowych, zarówno w zakresie geometrii, jak i diagnostyki elementów nawierzchni, jest kluczowe dla spełnienia obowiązujących wymagań bezpieczeństwa oraz zapewnienia pasażerom odpowiedniego poziomu komfortu podróży.

Coraz większe znaczenie w systemach monitorowania infrastruktury zyskują procesy wykorzystujące informacje pozyskiwane z sygnałów wibroakustycznych. Analiza sygnałów przyspieszeń drgań oraz sygnałów akustycznych generowanych podczas ruchu pociągu umożliwia uzyskanie informacji zarówno o stanie technicznym pojazdu, jak i elementach infrastruktury kolejowej. Wykorzystanie metod analizy sygnałów wibroakustycznych łączy dziedziny transportu kolejowego, mechaniki i budowy maszyn, cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz informatyki. W warunkach eksploatacyjnych, w których standardowe metody diagnostyczne mogą być zawodne, czasochłonne lub trudne do wdrożenia, techniki oparte na rejestracji i interpretacji sygnałów drganiowych oraz akustycznych mogą pełnić rolę uzupełniającą, a w niektórych przypadkach nawet kluczową w detekcji uszkodzeń, ocenie zużycia elementów toru oraz przewidywaniu awarii urządzeń sterowania ruchem kolejowej.

Niniejsza monografia koncentruje się na identyfikacji i zaawansowanej analizie sygnałów wibroakustycznych generowanych w warunkach rzeczywistej eksploatacji taboru kolejowego, z uwzględnieniem ich zastosowania w nieniszczącej diagnostyce stanu technicznego elementów infrastruktury i taboru. Przeprowadzono szczegółowy przegląd metod przetwarzania sygnałów czasowo-częstotliwościowych w celu ich implementacji oraz oceny możliwości ekstrakcji cech diagnostycznych i klasyfikacji nietypowych stanów eksploatacyjnych nawierzchni kolejowej.

W pracy wytypowano metody analizy sygnałów wibroakustycznych w celu ich zastosowania w diagnostyce infrastruktury kolejowej, zarówno liniowej, jak i punktowej. Pomimo ograniczonej liczby opracowań naukowych bezpośrednio dotyczących

tego zagadnienia dobór metod oparto na dostępnych źródłach literaturowych oraz wstępnych wynikach analiz eksperymentalnych. Takie podejście umożliwia uzyskanie miarodajnych wyników oraz zwiększa potencjał automatyzacji analizy danych w systemach diagnostycznych stosowanych w polskim transporcie kolejowym.

Dokonano przeglądu stosowanych metod diagnostyki infrastruktury kolejowej wykorzystywanych przez zarządców infrastruktury w warunkach eksploatacyjnych. Metody te obejmują m.in. pomiary geometrii toru za pomocą toromierzy i drezyn pomiarowych, analizę obrazu (np. w zakresie skrajni taboru) oraz ultradźwiękowe techniki oceny stanu szyn. Wskazano również ograniczenia tych rozwiązań, co uzasadnia rozwój komplementarnych metod diagnostycznych umożliwiających szybką ocenę stanu technicznego toru na podstawie danych pozyskiwanych bezpośrednio z pojazdów w trakcie normalnej eksploatacji z wykorzystaniem metod analizy sygnałów wibroakustycznych.

Monografia składa się z dziewięciu rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki pracy, przedstawia główne cele oraz planowane rezultaty. W rozdziale drugim zaprezentowano tło teoretyczne oraz przegląd literatury dotyczący analizy sygnałów wibroakustycznych w transporcie kolejowym, a także potencjał ich wykorzystania w diagnostyce i utrzymaniu linii kolejowych. Rozdział trzeci poświęcono problemowi badawczemu i naukowemu analizowanemu w niniejszej monografii. Rozdział czwarty zawiera charakterystyki metod stosowanych do oceny stanu nawierzchni kolejowej na podstawie sygnałów przyspieszeń drgań. W rozdziałach piątym, szóstym i siódmym przedstawiono metody oceny stanów diagnostycznych infrastruktury kolejowej liniowej i punktowej na podstawie rzeczywistych sygnałów wibroakustycznych pozyskanych w trakcie eksploatacji pojazdów kolejowych. Rozdział ósmy stanowi syntezę pracy wraz ze wskazaniem możliwości zastosowania zaproponowanych metod w systemach transportu kolejowego. Rozdział dziewiąty zawiera podsumowanie oraz wnioski końcowe pracy.

Prezentowane badania mają charakter nowatorski zarówno w aspekcie metodologicznym, jak i aplikacyjnym. Wnoszą oryginalny wkład w rozwój diagnostyki infrastruktury kolejowej dzięki opracowaniu kompleksowych procedur pozyskiwania, analizy i interpretacji sygnałów wibroakustycznych, a także nowoczesnemu podejściu do monitorowania stanu infrastruktury z wykorzystaniem zjawisk wibroakustycznych, w tym odpowiedzi dynamicznej eksploatowanego pojazdu. Potencjalne zastosowania wyników obejmują rozwój systemów predykcyjnego utrzymania infrastruktury, co przyczyni się do podniesienia poziomu bezpieczeństwa przewozów kolejowych oraz optymalizacji kosztów utrzymania infrastruktury.