

Zastosowanie punktowych charakterystyk sygnałów drganiowych w wykrywaniu uszkodzeń szyn kolejowych

Adrianna ŁOMŻYŃSKA¹, Malwina Magdalena NOWAK², Klaudia STRUGAREK³,
Aleksander Władysław LUDWICZAK⁴, Mikołaj Jarosław KLEKOWICKI⁵, Grzegorz Marek SZYMAŃSKI⁶

Streszczenie

W artykule opisano badania dotyczące zastosowania charakterystyk sygnałów drganiowych do wykrywania uszkodzeń torów kolejowych. Analiza koncentruje się na drganiach generowanych przez układ wózka podczas pokonywania odcinków torów w dwóch różnych stanach technicznych. Przedstawiono kompleksowy przegląd infrastruktury kolejowej i metodologii jej utrzymania, podkreślając wykorzystanie zaawansowanych narzędzi diagnostycznych przez organizacje zajmujące się utrzymaniem torów. W badaniach wykorzystano punktową analizę wymiarowych i bezwymiarowych cech sygnałów drganiowych. Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność wykorzystania sygnałów drganiowych, zarejestrowanych z poruszającego się pojazdu, do identyfikacji uszkodzeń torów, które mogą powodować skrócenie okresu eksploatacji pojazdu.

Słowa kluczowe: wibroakustyka, trakcja kolejowa, analiza statystyczna, analiza bezwymiarowa, uszkodzenia kolejowe

1. Wprowadzenie

Wczesne wykrywanie wad w infrastrukturze kolejowej ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa i wydajności. Identyfikacja problemów w elementach o krytycznym znaczeniu, takich jak szyny, podkłady lub mocowania, umożliwia szybkie podjęcie działań naprawczych, zanim drobne wady przerodzą się w poważne problemy. Takie podejście pozwala utrzymać wysoki standard techniczny infrastruktury oraz zminimalizować ryzyko poważnych awarii.

Postęp technologiczny umożliwia wdrażanie innowacyjnych metod diagnostyki i utrzymania systemów kolejowych. Systematyczna analiza danych w czasie rzeczywistym umożliwia monitorowanie poziomu zużycia poszczególnych elementów infrastruktury, a precyzyjne narzędzia diagnostyczne ułatwiają bardziej efektywne zarządzanie utrzymaniem. Środki te mają kluczowe znaczenie dla zwiększenia niezawodności elementów, wydłużenia ich żywotności i poprawy ogólnej wydajności systemu.

Szyny, podkłady i mocowania, narażone na obciążenia dynamiczne, to najczęściej uszkodzane elementy. Problemy z tymi elementami mogą zakłócać organizację transportu kolejowego. Rosnące wymagania nowoczesnych systemów transportowych, które wiążą się z projektowaniem pojazdów zdolnych do osiągania dużych prędkości, wymuszają dostosowanie infrastruktury do zwiększonych obciążeń przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia elementów krytycznych. W związku z tym, monitorowanie stanu technicznego i poziomu zużycia elementów stało się istotnym aspektem zarządzania infrastrukturą kolejową, obejmującym zarówno logistykę, jak i produkcję taboru kolejowego.

2. Infrastruktura kolejowa

2.1. Elementy infrastruktury kolejowej

Infrastruktura kolejowa to złożony system, który jest podstawą transportu kolejowego, umożliwiając sprawną i bezpieczną przewóz pasażerów i towarów.

¹ Mgr inż.; Poznański Instytut Technologiczny; e-mail: adrianna.lomzynska@pit.gov.pl.

² Inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Chemicznej; e-mail: malwina.nowak.1@student.put.poznan.pl.

³ Inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu; e-mail: klaudia.strugarek@student.put.poznan.pl.

⁴ Inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu; e-mail: aleksander.ludwiczak@student.put.poznan.pl.

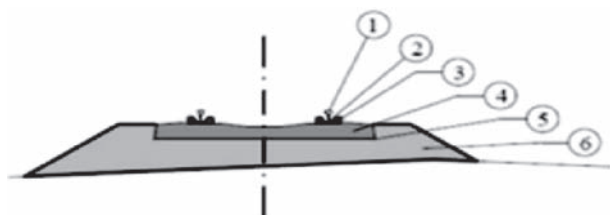
⁵ Inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu; e-mail: mikołaj.klekowicki@student.put.poznan.pl.

⁶ Dr hab. inż. prof. PP; Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu; e-mail: grzegorz.m.szymanski@put.poznan.pl.

Składa się ze zintegrowanych elementów, które wspólnie zapewniają stabilność torów i chronią przed czynnikami środowiskowymi. Kluczowe elementy infrastruktury obejmują [5, 27, 28]:

- **Tory:** podstawowym elementem torów są szyny wykonane z trwałych materiałów, takich jak stal. Są one mocowane do podkładów za pomocą specjalistycznych elementów mocujących, które tłumią drgania i redukują hałas.
- **Podkłady:** przenoszą obciążenia z szyn na podsypkę, zapewniając stabilność torów i odpowiednie odprowadzanie wody. Nowoczesne technologie często wykorzystują podkłady betonowe, które są trwalsze od drewnianych.
- **Podsyпка:** utrzymuje stabilność toru, ułatwia wyrównanie i zapewnia skuteczne odprowadzanie wody deszczowej.
- **Systemy sterowania ruchem kolejowym (srk):** urządzenia takie jak sygnalizatory i zwrotnice wspomagają bezpieczną organizację ruchu kolejowego.
- **Obiekty inżynierskie:** mosty, tunele i wiadukty umożliwiają pokonywanie przeszkód terenowych, pozwalając zachować ciągłość trasy.

Nowoczesne systemy kolejowe coraz częściej wykorzystują rozwiązania przyjazne dla środowiska, takie jak sieci trakcyjne, które wspierają elektryfikację transportu i zmniejszają szkodliwe emisje [29]. Infrastruktura kolejowa jest złożonym systemem, który stanowi podstawę transportu kolejowego, umożliwiając sprawny i bezpieczny przewóz pasażerów i towarów. Składa się ze zintegrowanych elementów, które wspólnie zapewniają stabilność torów i chronią przed czynnikami środowiskowymi [4, 23]. Kluczowe elementy infrastruktury przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura nawierzchni kolejowej obejmuje: 1) szyna, 2) przekładka podszynowa, 3) złączki mocujące szynę, 4) podkład, 5) przekładka podpodkładowa, 6) podsyпка [20]

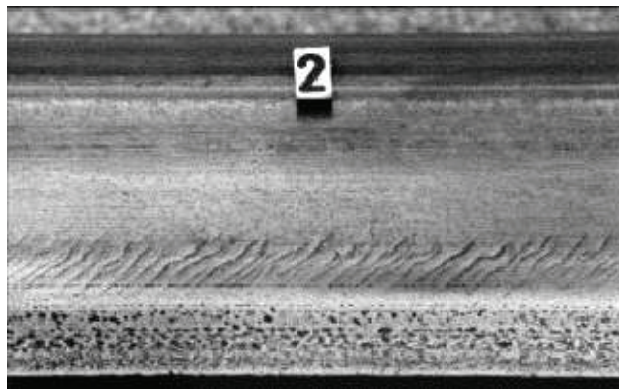
2.2. Uszkodzenia infrastruktury kolejowej

Eksploatacja infrastruktury kolejowej powoduje naturalne zużycie jej elementów. W ramach utrzymania przeprowadzane są regularne kontrole mające na celu zapobieganie poważniejszym problemom [12]. Do najczęstszych uszkodzeń należą [1]:

- **Pęknięcia na główce szyny** (rysy na główce): mikropęknięcia, które są spowodowane obciążeniami

dynamicznymi i zmęczeniem materiału (rys. 2). Występują głównie w obszarach intensywnego kontaktu koła z szyną [10].

- **Odkształcenia powierzchniowe szyn** (zagłębienia): nierównomierny rozkład obciążenia prowadzi do wybrzuszeń na powierzchni szyny, które nie wykryte wcześniej, mogą powodować poważne awarie (rys. 3) [19].



Rys. 2. Przykład wady „rysy na główce” [15]

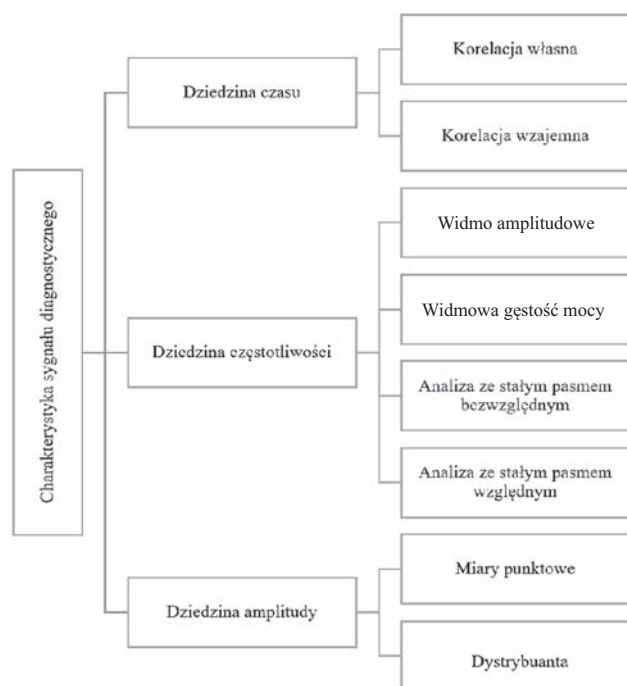


Rys. 3. Przykład wady „zagłębienia” [16]

Jeśli takie wady nie zostaną zidentyfikowane i usunięte, mogą spowodować awarie torów i potencjalne kolizje. Uszkodzenia mocowań szyn destabilizują tory, stwarzając zagrożenie dla bezpieczeństwa. Podkłady betonowe są podatne na pęknięcia, złamania i odpryski powierzchniowe, podczas gdy podkłady drewniane mogą być narażone na degradację związaną z działaniem wilgoci i temperatury, w tym na rozwój grzybów, co zagraża stabilności torów i powoduje konieczność wymiany podczas inspekcji [7, 13, 30].

2.3. Drgania generowane na styku koło – szyna

Drgania powstające w wyniku interakcji koła z szyną dostarczają kluczowych informacji na temat stanu technicznego torów. Ich analiza umożliwia ocenę ogólnego stanu infrastruktury kolejowej oraz identyfikację potencjalnych wad. Kluczowe wskaźniki drgań obejmują amplitudę, częstotliwość, zawartość harmonicznych i charakterystykę impulsową (rys. 4).



Rys. 4. Wybrane charakterystyki sygnału drgań stosowane w diagnostyce [opracowanie własne]

Czujniki piezoelektryczne wykrywają te drgania, przekształcając ruch mechaniczny w sygnały elektryczne. Przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym pozwala na ciągłe monitorowanie, umożliwiając wczesną identyfikację segmentów torów wymagających konserwacji przed wystąpieniem poważnych uszkodzeń.

Drgania torów odzwierciedlają zmiany w ich stanie technicznym, takie jak nadmierne zużycie, pęknięcia lub odkształcenia. Analiza porównawcza tych sygnałów z wartościami referencyjnymi uwiadamia odchylenia świadczące o potencjalnych wadach. Zaawansowane narzędzia pomiarowe ułatwiają zarówno zapobieganie poważnym awariom, jak i optymalizację działań związanych z utrzymaniem [18, 22].

3. Diagnostyka infrastruktury kolejowej

3.1. Kontrola przy użyciu wózka pomiarowego

Wózki pomiarowe są niezbędne do monitorowania infrastruktury kolejowej. Te pojazdy są wyposażone w zaawansowane technologie, takie jak laserowe systemy pomiarowe i narzędzia do akwizycji danych, umożliwiające precyzyjną kontrolę geometrii torów, profili szyn i stanu podkładów.

Pojazdy diagnostyczne, zgodne ze standardami Europejskiego Systemu Sterowania Pociągami (ETCS) poziomu 2, zapewniają kompatybilność z europejskimi systemami zarządzania ruchem kolejowym. Na przykład pojazd diagnostyczny PKP PLK (rys. 5) z napędem

spalinowym może osiągać prędkość do 120 km/h, umożliwiając szybką kontrolę rozległych odcinków torów przy minimalnym zakłóceniu rozkładu jazdy pociągów.

Wózki pomiarowe monitorują również sieci trakcyjne, diagnozując stan elementów krytycznych, takich jak przewody, podpory i zasilacze. Scentralizowane systemy monitorowania otrzymują dane pomiarowe w czasie rzeczywistym, umożliwiając szybkie podejmowanie decyzji dotyczących niezbędnych napraw lub utrzymania [8, 24].



Rys. 5. Kolejowa drezyna pomiarowa [3]

3.2. Kontrole i oceny techniczne infrastruktury

Regularne kontrole mają zasadnicze znaczenie dla utrzymania funkcjonalności i bezpieczeństwa infrastruktury kolejowej. Wszystkie elementy systemu, w tym szyny, podkłady, mocowania, obiekty inżynierijne, systemy sygnalizacji oraz mosty i tunele, są poddawane ocenie przez przeszkolony personel przy użyciu zaawansowanych technologii pomiarowych.

Kontrole skupiają się na stanie torów, ponieważ uszkodzenia szyn mogą prowadzić do poważnych awarii. Oceniana jest geometria szyn, zużycie i stabilność podkładów oraz funkcjonalność mocowań. Systemy sygnalizacji są również rutynowo sprawdzane w celu wykrycia i rozwiązania problemów, zanim zakłócą one operacje transportowe.

Kontrole są przeprowadzane zgodnie z normami krajowymi i międzynarodowymi. W Polsce przepisy PKP PLK określają częstotliwość kontroli i wymagania dotyczące badań dla różnych odcinków torów. Szczególną uwagę zwraca się na obszary narażone na duże zużycie, takie, jak tory o ciśniejszych łukach, które mogą wymagać częstszych kontroli i szczegółowych analiz [11, 21].

3.3. Badania defektoskopowe

Badania defektoskopowe są jedną z najważniejszych metod identyfikacji ukrytych wad na torach

kolejowych oraz powiązanych z nimi elementach. Techniki nieniszczące są stosowane do oceny stanu technicznego torów bez ich demontażu. Umożliwiają one precyzyjną identyfikację nieprawidłowości, takich jak pęknięcia, korozja, wtrącenia lub inne wady, które mogą zagrażać bezpieczeństwu. Do najpopularniejszych metod badań defektoskopowych należą:

- **Ultrasonografia:** wykorzystuje fale dźwiękowe do przenikania przez materiał torów, wykrywając w ten sposób wewnętrzne wady, takie jak pęknięcia, wtrącenia lub puste przestrzenie. Technika ta jest szczególnie skuteczna w identyfikacji mikropęknięć, które mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń, jeśli nie zostaną wykryte.
- **Magnetoskopia:** wykorzystuje pola magnetyczne do analizy szyn i innych elementów metalowych, skutecznie identyfikując wady powierzchniowe, takie jak mikropęknięcia i zniekształcenia, które mogą zostać przeoczone podczas oględzin.
- **Radiografia:** wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie lub promieniowanie gamma do obrazowania wewnętrznych struktur szyn. Ujawnia wady niewidoczne na powierzchni, takie jak ukryte pęknięcia lub nieprawidłowości materiału, umożliwiając szczegółową ocenę integralności konstrukcji.
- **Termografia:** umożliwia monitorowanie zmian temperatury powierzchni torów w celu identyfikacji anomalii termicznych spowodowanych nadmiernym tarciem lub uszkodzeniami mechanicznymi. Metoda ta jest szczególnie skuteczna w diagnozowaniu problemów na powierzchni, które mogą przerodzić się w jeszcze większe problemy.

Badania defektoskopowe (rys. 6) przeprowadza się regularnie, przy czym częstotliwość zależy od eksploatacji toru i prędkości pociągów. Tory przeznaczone do dużych prędkości (powyżej 160 km/h) są poddawane kontroli cztery razy w roku, tory przeznaczone do prędkości 120–160 km/h – trzy razy w roku, a tory przeznaczone do prędkości poniżej tej wartości są rzadziej kontrolowane, przy czym w przypadku najwolniejszych tras kontrole przeprowadzane są raz w roku [18, 31].



Rys. 6. Defektoskop do kontroli pojedynczych szyn [17]

3.4. Wyzwania związane z diagnostyką infrastruktury kolejowej

Diagnostyka infrastruktury kolejowej, w szczególności z wykorzystaniem analizy drgań i innych zaawansowanych metod pomiarowych, jest złożonym procesem wiążącym się z licznymi wyzwaniami. Monitorowanie stanu technicznego w czasie rzeczywistym wymaga specjalistycznego sprzętu pomiarowego oraz zaawansowanych algorytmów analizy danych. Jednym z głównych wyzwań jest dokładna analiza sygnałów drganiowych, na które mogą mieć wpływ czynniki zewnętrzne, takie jak warunki pogodowe. Na przykład deszcz, śnieg lub wysokie temperatury mogą zmieniać charakterystyki drgań, co wymaga uwzględnienia tych zmiennych podczas analizy.

Nowoczesne technologie diagnostyczne gromadzą dane dotyczące drgań w czasie rzeczywistym, umożliwiając bieżącą analizę i wczesne wykrywanie wad. Wymaga to jednak precyzyjnej kalibracji sprzętu pomiarowego w celu zapewnienia dokładnych wyników. Niezbędne są również zaawansowane algorytmy matematyczne, które filtrują szумы i skutecznie analizują sygnały, wykrywając nawet drobne wady.

Kolejnym istotnym wyzwaniem jest różnorodność materiałowa i konstrukcyjna elementów infrastruktury kolejowej. Różnice w materiałach szyn, podkładów i mocowań, a także różnice w ich nośności, mają wpływ na sposób generowania drgań, więc metody analityczne muszą być dostosowane do specyfiki każdego typu torów.

Pomimo tych wyzwań, technologie diagnostyczne, takie jak analiza drgań, pozostają jednymi z najskuteczniejszych narzędzi oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej. Regularne monitorowanie za pomocą nowoczesnych czujników i systemów analizy danych umożliwia wczesne wykrywanie wad, zmniejszając ryzyko poważnych awarii i zwiększając bezpieczeństwo transportu kolejowego [6].

4. Metodyka

4.1. Metodyka pomiarów i zakres badań

Badanie miało na celu analizę drgań generowanych przez pociągi poruszające się po różnych odcinkach torów, umożliwiającą precyzyjną ocenę stanu technicznego infrastruktury. Porównano dwa odcinki torów: jeden był zidentyfikowany jako uszkodzony na podstawie oględzin i drugi, bez widocznych uszkodzeń lub odkształceń, służył jako punkt odniesienia.

Pomiary przeprowadzono w jednakowych warunkach aby wyeliminować zmienne, które mogłyby wpłynąć na jakość danych. Pojazd diagnostyczny poruszał się ze stałą prędkością 10 km/h, zapewniając

stabilność gromadzenia danych. Zarejestrowane sygnały przeanalizowano pod względem parametrów takich jak amplituda, częstotliwość i czas trwania drgań, dostarczając szczegółowych informacji na temat stanu torów.

Aby zapewnić dokładność analizy, dane zostały znormalizowane w dziedzinie czasu⁷ (ang. *time domaine*), co umożliwiło porównanie sygnałów z różnych odcinków torów. Parametry takie jak amplituda sygnału i stosunki amplitud zostały zbadane w celu wykrycia różnic między segmentami odniesienia i uszkodzonymi.

Metodyka ta pozwoliła uzyskać kompleksowy obraz stanu torów, umożliwiając wczesne wykrywanie wad, które pozostawione bez reakcji, mogłyby doprowadzić do poważniejszych uszkodzeń [2, 14, 16].

4.2. Sprzęt pomiarowy

Do badań wykorzystano specjalistyczne pojazdy diagnostyczne wyposażone w zaawansowane przyrządy pomiarowe, których dane techniczne przedstawiono w tablicy 1. Kluczowymi elementami wyposażenia były czujniki piezoelektryczne zainstalowane w dwóch strategicznych miejscach pojazdu (na ramie wózka i podłodze pojazdu):

- **Czujniki na ramie wózka** (tablica 2, rys. 7): rejestrowały drgania generowane przez tor, umożliwiając identyfikację mikropełnięć i innych odkształceń.
- **Czujniki na podłodze pojazdu** (tablica 3, rys. 8): rejestrowały drgania wpływające na komfort pasażerów, co umożliwiło ocenę skuteczności systemów tłumienia drgań.

Tablica 1

Podstawowe dane techniczne pojazdu⁸

Właściwość	Wartość
Skrajnia	Zgodnie z normą PN-EN 15273-2:2013+A1:2017-03, profil G2
Układ osi	2'Bo'+Bo'2'
Rozstaw torów	1435 mm
Całkowita długość	53 652 mm
Minimalny promień łuku	150 m
Masa własna	112 500 kg
Średnica koła	850 mm
Maksymalna prędkość	160 km/h

Tablica 2

Specyfikacja techniczna przetwornika MEAS EGCS-A2-5-/C [25]

MEAS EGCS-A2-5-/C	
Parametry	Do 4000 [Hz]
Właściwości mechaniczne	
Materiał podstawy czujnika	Anodowane aluminium
Osie czujnika	Jednoosiowy
Masa czujnika	50 g [1,75 uncji]
Mocowanie mechaniczne	
Typ mocowania	Śruba
Warunki eksploatacyjne	
Zakres temperatur pracy	-40°C do +120°C
Inne cechy	
Czułość	5 [mV/g]
Nieliniowość	±1 [%FSO]



Rys. 7. Przetwornik piezoelektryczny MEAS EGCS-A2-5-/C [25]

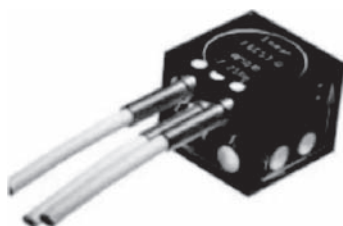
Tablica 3

Specyfikacja techniczna przetwornika MEAS EGCS3-A [26]

MEAS EGCS3-A	
Parametry	Do 4000 [Hz]
Właściwości mechaniczne	
Materiał podstawy czujnika	Anodowane aluminium
Osie czujnika	Trójosiowy
Masa czujnika	50 g [1,75 uncji]
Mocowanie mechaniczne	
Typ mocowania	Śruba
Warunki eksploatacyjne	
Zakres temperatur pracy	-40°C do 120°C
Inne cechy	
Czułość	5 [mV/g]
Nieliniowość	±1 [%FSO]

⁸ Dziedzina dotyczy nazwy zmiennej, względem której dokonywane są obliczenia np. uśrednienia, obliczenia miar punktowych (według: S. Niziński, R. Michalski, R.B. Randall).

⁸ Na podstawie DTR pojazdu DP-560.00.



Rys. 8. Przetwornik piezoelektryczny MEAS EGCS3-A [26]

W tablicy 2 i 3 przedstawiono szczegółowe dane techniczne przetworników piezoelektrycznych wykorzystywanych do pomiaru drgań, zapewniających wysoką czułość i dokładność. Dane diagnostyczne, gromadzone i analizowane za pomocą oprogramowania LabVIEW⁹, umożliwiły monitorowanie w czasie rzeczywistym i szczegółową ocenę zarówno stanu torów, jak i komfortu pasażerów.

4.3. Lokalizacja punktów pomiarowych

Precyzyjne rozmieszczenie punktów pomiarowych miało kluczowe znaczenie dla uzyskania wiarygodnych wyników o wysokiej jakości. Czujniki piezoelektryczne zostały strategicznie zamontowane w dwóch miejscach:

1. **Na ramie wózka** (rys. 9): czujnik umieszczony w tym miejscu rejestrował drgania generowane przez tor (zwłaszcza w punktach styku koła z szyną), w celu oceny stanu technicznego torów, w tym mikropęknięć i odkształceń.
2. **Na podłodze pojazdu** (rys. 10): czujnik w tym miejscu mierzył drgania wpływające na komfort pasażerów, rejestrując skuteczność systemów tłumienia drgań.

Lokalizacje te odpowiadały różnym potrzebom diagnostycznym w zakresie oceny stanu torów i komfortu pasażerów, dzięki czemu możliwe było przeprowadzenie kompleksowego badania. Właściwe umiejscowienie czujnika ułatwiło również porównanie danych z różnych odcinków torów, zapewniając zintegrowaną ocenę stanu technicznego i jakości podróży.

Strategiczne rozmieszczenie czujników umożliwiło uzyskanie reprezentatywnych wyników i dogłębne zrozumienie zarówno stanu infrastruktury, jak i jakości operacyjnej w różnych scenariuszach.



Rys. 9. Punkt pomiarowy 1 zlokalizowany na wózku pociągu [fot. A. Łomżyńska]

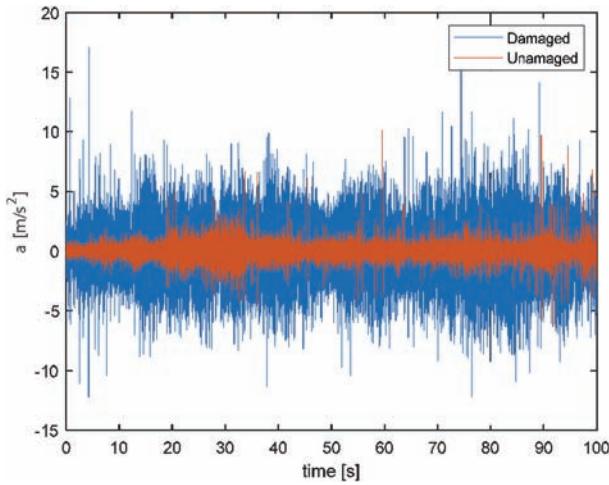


Rys. 10. Punkt pomiarowy 2 zlokalizowany na podłodze pociągu [fot. A. Łomżyńska]

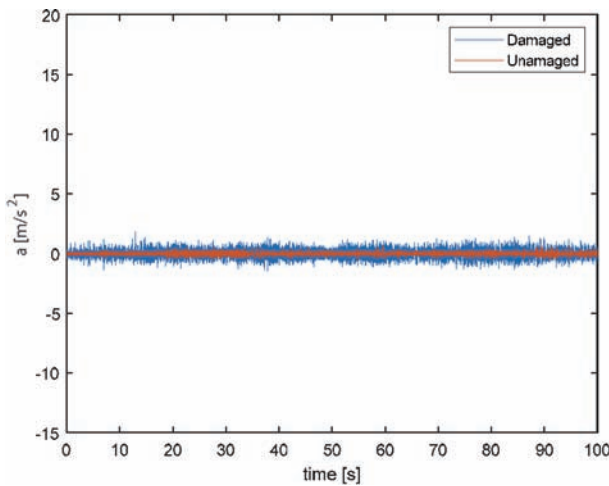
5. Analiza danych

Wartości przyspieszeń drgań dla pionowego kierunku Z (na wózku i na podłodze pojazdu), zarejestrowane podczas eksploatacji obiektu poruszającego się z prędkością $v = 10$ km/h na bocznicy kolejowej poddano dalszej analizie. Początkowo porównano wartości amplitud sygnałów w dziedzinie czasu w celu ustalenia wstępnych różnic. Odpowiednie przebiegi drgań przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

⁹ LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) – graficzne środowisko programistyczne wykorzystywane w ośrodkach badawczych (m.in. CERN i NASA), przy testach w przemyśle oraz pomiarach i analizie pobieranych danych.



Rys. 11. Porównanie przebiegów w dziedzinie czasu dla torów uszkodzonych i nieuszkodzonych w przypadku pomiarów na wózku [opracowanie własne]



Rys. 12. Porównanie przebiegów w dziedzinie czasu dla torów uszkodzonych i nieuszkodzonych w przypadku pomiarów na podłodze [opracowanie własne]

Z rysunków 11 i 12 wynika, że wartości amplitudy drgań dla sygnału mierzonego na podłodze są stosunkowo niższe niż dla sygnału mierzonego na wózku.

Następnym etapem badań była analiza wymiarowych miar punktowych, współczynników bezwymiarowych i wartości kurtozy dla danych. Są one wyrażone w równaniach 1–10:

- Amplituda średnia – obliczana jako średnia wartość amplitudy chwilowej w danym okresie w równym stopniu uwzględnia każdą wartość amplitudy, zapewniając ogólną reprezentację sygnału:

$$S_{AVERAGE} = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)| dt \quad (1)$$

- Amplituda skuteczna (RMS) – jest to pierwiastek kwadratowy ze średniej kwadratów amplitud

chwilowych. Nadaje większą wagę wyższym wartościom amplitudy, czyniąc ją proporcjonalną do mocy procesu i powszechnie stosowaną w diagnostyce:

$$S_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^2 dt} \quad (2)$$

- Amplituda pierwiastkowa – ten parametr nadaje większą wagę mniejszym wartościom amplitudy chwilowej:

$$S_{SQUARE} = \left[\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^4 dt} \right]^2 \quad (3)$$

- Amplituda szczytowa – najwyższa wartość amplitudy chwilowej w sygnale. Przydatna do analizy procesów impulsowych, takich jak luzy lub uderzenia:

$$S_{PEAK} = \left[\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s(t)^{\infty} dt} \right]^{\frac{1}{\infty}} \quad (4)$$

- Współczynnik kształtu – reprezentuje stosunek amplitudy skutecznej do amplitudy średniej, dostarczając informacji na temat ogólnego kształtu przebiegu i rozkładu energii w stosunku do jego średniej:

$$K = \frac{S_{RMS}}{S_{AVERAGE}} \quad (5)$$

- Współczynnik szczytu – miara, zdefiniowana jako stosunek amplitudy szczytowej do amplitudy skutecznej, wskazuje ostrość szczytów sygnału i pomaga zidentyfikować impulsowe lub skokowe zdarzenia w sygnale drganiowym:

$$C = \frac{S_{PEAK}}{S_{RMS}} \quad (6)$$

- Współczynnik impulsowości – obliczany jako stosunek amplitudy szczytowej do amplitudy średniej, podkreśla obecność impulsów o wysokiej intensywności i krótkim czasie trwania, typowych dla uszkodzonych struktur lub systemów:

$$I = \frac{S_{PEAK}}{S_{AVERAGE}} \quad (7)$$

- Współczynnik luzu – współczynnik jako stosunek amplitudy szczytowej do amplitudy pierwiastkowej, jest wykorzystywany do wykrywania usterek

mechanicznych przez analizę zmian amplitudy w stosunku do niższych poziomów energii przebiegu:

$$L = \frac{S_{PEAK}}{S_{SQUARE}} \quad (8)$$

- Zakres międzyszczytowy – ta miara odzwierciedla różnicę między maksymalnymi i minimalnymi wartościami sygnału, rejestrując zakres wahań amplitudy i stanowiąc bezpośredni wskaźnik zmienności sygnału:

$$S_{PK-PK} = \max[s(t)] - \min[s(t)] \quad (9)$$

- Kurtoza – miara opisująca stopień koncentracji wartości sygnału wokół średniej. Służy do identyfikacji procesów losowych lub rzadkich zdarzeń:

$$\beta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T s(t)^4 dt}{\left[\frac{1}{T} \int_0^T s(t)^2 dt \right]^2} \quad (10)$$

gdzie:

T – przedział czasu,

$s(t)$ – wartość chwilowa sygnału drganiowego.

Porównanie punktów pomiarowych dla toru uszkodzonego i nieuszkodzonego wykazało wyraźne różnice w zależności od miejsca pomiaru. Obliczone wartości dla danych zebranych z wózka przedstawiono w tablicy 4, a wartości zebrane z punktu na podłodze w tablicy 5.

Różnice między obliczonymi wartościami dla obu torów są wizualizowane oddzielnie dla wymiarowych miar punktowych i współczynników bezwymiarowych. Wyniki dla wózka przedstawiono na rysunkach 13 i 14, a dla podłogi na rysunkach 15 i 16.

Miary punktowe dla wózka

Tablica 4

Współczynnik	Uszkodzony	Nieuszkodzony	Dynamika
$S_{average}$	129 dB	113 dB	9 dB
S_{rms}	126 dB	117 dB	9 dB
S_{sqr}	121 dB	112 dB	9 dB
S_{peak}	145 dB	140 dB	5 dB
S_{pk-pk}	149 dB	144 dB	5 dB
K	1,41	1,43	-1%
C	8,57	14,90	-42%
I	12,11	21,45	-44%
L	15,66	26,61	-41%
Kurtoza	5,25	10,83	-52%

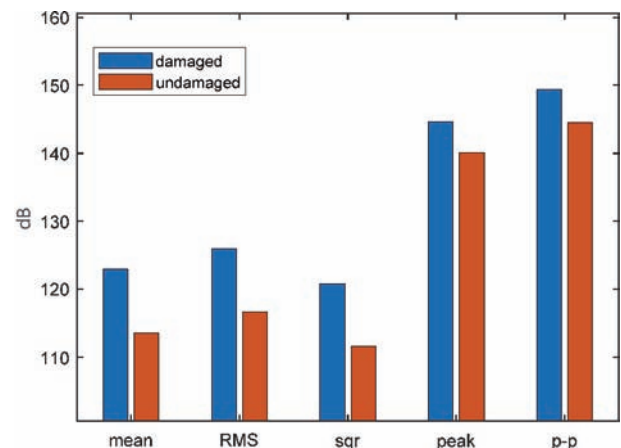
[Opracowanie własne].

Miary punktowe dla podłogi

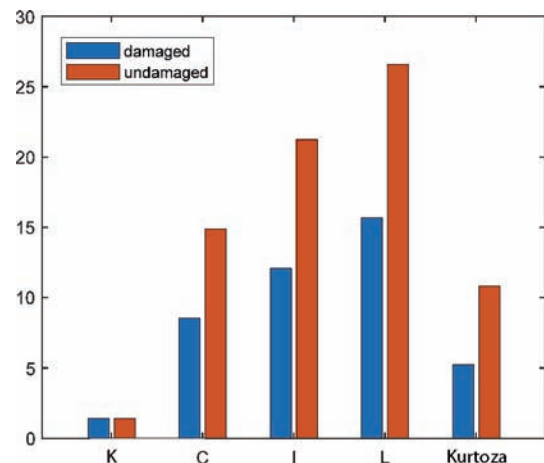
Tablica 5

Współczynnik	Uszkodzony	Nieuszkodzony	Dynamika
$S_{average}$	106 dB	98 dB	8 dB
S_{rms}	109 dB	100 dB	9 dB
S_{sqr}	104 dB	95 dB	9 dB
S_{peak}	125 dB	117 dB	8 dB
S_{pk-pk}	130 dB	123 dB	7 dB
K	1,35	1,38	-2%
C	6,51	6,84	-5%
I	8,83	9,49	-7%
L	11,02	12,32	-11%
Kurtoza	4,27	4,49	-5%

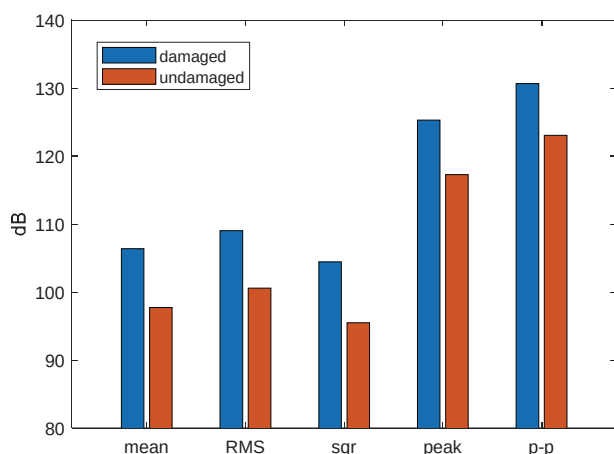
[Opracowanie własne].



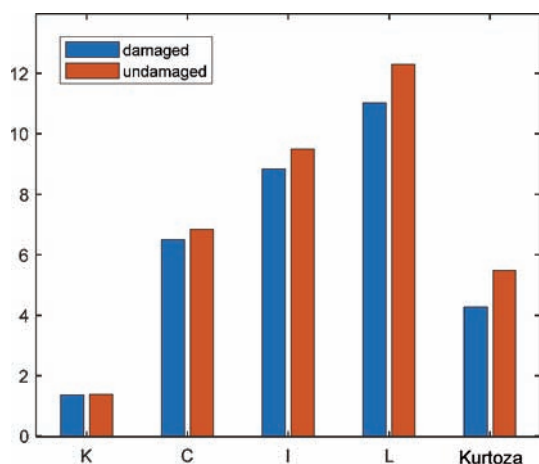
Rys. 13. Porównanie wymiarowych miar punktowych dla toru uszkodzonego i nieuszkodzonego w przypadku pomiarów na wózku [opracowanie własne]



Rys. 14. Porównanie współczynników bezwymiarowych i kurtozy dla toru uszkodzonego i nieuszkodzonego w przypadku pomiarów na wózku [opracowanie własne]



Rys. 15. Porównanie wymiarowych miar punktowych dla toru uszkodzonego i nieuszkodzonego w przypadku pomiarów na podłodze [opracowanie własne]



Rys. 16. Porównanie współczynników bezwymiarowych i kurtozy dla toru uszkodzonego i nieuszkodzonego w przypadku pomiarów na podłodze [opracowanie własne]

Jak można zauważyć, różnica między trzema miarami (tj. $S_{average}$, S_{rms} , S_{sq}) przekracza 6 dB, podczas gdy różnica między pozostałymi miarami (S_{peak} , S_{pk-pk}) zbliża się do 6 dB. Wskazuje to na zmianę stanu technicznego pojazdu.

Wartości współczynników bezwymiarowych, takich jak współczynnik szczytu (C), współczynnik impulsu (I) i współczynnik luzu (L) wykazały wyraźne zmniejszenie w stanie uszkodzonym, odpowiednio o: -42%, -44% i -41%. Wartość kurtozy zmniejszyła się o 52%, wskazując na zmiany w impulsowości i koncentracji energii sygnału.

Podobna sytuacja dotyczy przypadku pomiarów na podłodze, jednak w tym przypadku różnica we wszystkich pomiarach przekracza 6 dB, jednoznacznie wskazując na zmianę stanu technicznego obiektu.

Porównanie pomiarów punktowych (pomiędzy wózkiem a podłogą) ujawnia różnice we wrażliwości na uszkodzenia torów. Obie lokalizacje wykazują identyczny wzrost amplitudy średniej, amplitudy

skutecznej i amplitudy pierwiastkowej, co wskazuje na porównywalny wzrost ogólnego poziomu energii drgań. Jednak amplituda szczytowa i zakres międzyszczytowy wykazują większe różnice na poziomie podłogi (odpowiednio 8 dB i 7 dB) niż na wózku (5 dB dla obu pomiarów). Sugeruje to, że miejscowe uderzenia i zmienność amplitudy są bardziej widoczne na podłodze z powodu interakcji z konstrukcyjnym systemem tłumienia pojazdu.

Zmniejszenia współczynników bezwymiarowych są bardziej wyraźne w przypadku wózka (np. współczynnik szczytu: -42%) w porównaniu z podłogą (np. współczynnik szczytu: -5%). Pokazuje to, że wózek doświadcza gwałtowniejszych zmian w charakterystykach drgań, podczas gdy podłoga, ze względu na system tłumienia, rejestruje łagodniejsze zmiany.

Kurtoza zmniejsza się znacznie bardziej w przypadku wózka (-52%) niż podłogi (-5%), odzwierciedlając zwiększoną wrażliwość wózka na rzadkie zdarzenia wibracyjne o wysokiej intensywności w stanie uszkodzonym. Z kolei pomiary na podłodze wykazują bardziej równomierny rozkład energii drgań, co jest prawdopodobnie wynikiem skutecznego tłumienia drgań. Podobnie, współczynniki bezwymiarowe, takie jak współczynnik szczytu i współczynnik impulsowości, wykazują większe zmniejszenia w przypadku wózka, wskazując na gwałtowniejsze zmiany w charakterystykach drgań w porównaniu z łagodniejszymi zmianami obserwowanymi na poziomie podłogi.

5. Wnioski

Badania wykazały, że sygnały przyspieszeń drgań zarejestrowane podczas eksploatacji pojazdów kolejowych dostarczają istotnych informacji na temat stanu infrastruktury kolejowej. Analiza zarówno charakterystyk wymiarowych, jak i bezwymiarowych ujawniła wyraźne rozróżnienie między stanami toru uszkodzonego i nieuszkodzonego, co podkreśla potencjał diagnostyczny tego rozwiązania.

Pomiary uzyskane z czujnika zamontowanego na układzie wózka wykazały znacznie wyższe wartości amplitudy dla stanu uszkodzonej szyny, wskazując na podwyższone poziomy energii w sygnałach drganiowych. Dodatkowo, zmniejszenie kurtozy i współczynników bezwymiarowych podkreśliło zmiany w impulsowym charakterze sygnału, co prawdopodobnie można przypisać nieprawidłowościom toru lub elementów konstrukcyjnych. Porównywalne trendy zaobserwowano w sygnałach zarejestrowanych przez czujnik umieszczony na podłodze pojazdu, choć skala zmian była mniej wyraźna ze względu na wpływ tłumienia drgań przez układ zawieszenia pojazdu.

Wyniki badań podkreślają wartość diagnostyczną analizy sygnałów drganiowych w kontekście utrzymania infrastruktury kolejowej. W szczególności czujniki umieszczone na układzie wózka okazały się bardzo skuteczne w wykrywaniu wczesnych uszkodzeń, co zapewnia kluczową przewagę w proaktywnych strategiach utrzymania. Przedstawione dane i odpowiadające im wizualizacje dodatkowo potwierdzają te wnioski ukazując skuteczność opisanej metody w identyfikacji i kwantyfikacji uszkodzeń w systemach kolejowych.

Podziękowania

Badania zostały przeprowadzone w ramach dotacji badawczej SBAD: 0416/SBAD/0007 w 2025 roku.

Literatura

1. Cichowicz D., Kwaśny J., Publikacja: *Analiza przyczyn i skutków uszkodzeń szyn kolejowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2021.
2. Dwojak J., Rzepiela M.: *Diagnostyka i obsługa techniczna łożysk tocznych*, Wydawnictwo Biuro Gamma mgr Bogusław Osuchowski, Warszawa, 2003.
3. Gazeta Wrocławska, <https://gazetawroclawska.pl/mobilne-laboratorium-bedzie-sprawdzac-stan-torow-kolejowych-na-dolnym-slasku-zdjecia/ga/13972538/zd/34515756> [dostęp: 10.12.2023].
4. Garlikowska M., Karasiewicz I.: *Zagrożenia związane z nawierzchnią kolejową*, Instytut Kolejnictwa, Warszawa, 2017.
5. Grulkowski S. et.al.: *Drogi szynowe*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013.
6. Grulkowski S., Kędra Z., Zariczny J.: *Problemy diagnostyki szyn kolejowych w torach i rozjazdach*, Inżynieria Morska i Geotechnika, Politechnika Gdańska, 2014.
7. Heyder R.: *Nowy katalog UIC uszkodzeń szyn*, ITT Technika transportu Szynowego, 2002.
8. Janowiec F., Leśniak A.: *Analiza usterek występujących podczas budowy linii kolejowych*, Przegląd Budowlany, Politechnika Krakowska, PRK Wrocław, 2022.
9. Kapturek Ł., Piegat A., Urbanek P.: *Raport „Analiza uszkodzeń na torach kolejowych”*, Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2018.
10. Katz D.: *Modelowanie wykrywania wad kontaktowo-zmęczeniowych w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową*, Badania Nieniszczące i Diagnostyka, Warszawa, 2023.
11. Katalog Uszkodzeń Szyn UIC 712 Międzynarodowego Związku Kolei (UIC).
12. Katalog Wad w szynach PKP Polskie Linie Kolejowe, Warszawa, 2005.
13. Kowalczyk D.: *Badania kolejowych podkładów strunobetonowych z zastosowaniem emisji akustycznej*, Problemy Kolejnictwa, 2022, z. 197.
14. Koradecka D. et.al.: *Drgania mechaniczne (wibracje)*, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 1999.
15. Kukulski J.: *Badania symulacyjne i doświadczalne elementów taboru i infrastruktury kolejowej w aspekcie bezpieczeństwa i eksploatacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2018.
16. Licow R.: *Ocena uszkodzeń powierzchni tocznej szyn kolejowych za pomocą zjawisk wibroakustycznych*, Politechnika Poznańska, Poznań, 2018.
17. PCB Service, <https://pcb.com.pl/products/defektoskop-do-inspekcji-pojedynczych-szyn-8-kanalow-ets2-77/> [dostęp 10.12.2023].
18. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Instrukcja badań defektoskopowych szyn, spoin i zgrzein w torach kolejowych Id-10 (D-16), Warszawa, 2005.
19. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Instrukcja diagnostyki nawierzchni kolejowej Id-8, Warszawa, 2005.
20. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Załącznik nr 1 do uchwały Nr 251/2021 Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 20 kwietnia 2021 r., https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Akty_prawne_i_przepisy/Standardy_tekniczne/21.04.2021/ST-T1-A8_WCAG.PDF [dostęp z dnia 03.01.2023].
21. Port Gdańsk, Instrukcja wewnętrzna określająca warunki techniczne oraz zasady i wymagania dotyczące utrzymania infrastruktury kolejowej obejmująca: – utrzymanie podtorza, torów i rozjazdów – utrzymanie urządzeń srk, Gdańsk, 2021.
22. Pawlaczyk K., Perkowski J., Górecki P.: *Raport „Ocena uszkodzeń szyn kolejowych”*, Instytut Kolejnictwa.
23. PN-EN 13481-1: Kolejnictwo – Tor – Wymagania eksploatacyjne systemów przytwierdzeń – Część 1: Definicje, 07.04.2017.
24. Rynek Kolejowy <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/pkp-plk-zaprezentowaly-najnowszy-pojazd-do-diagnostyki-infrastruktury-zdjecia-91047.html> [dostęp: 10.12.2023].
25. TE Connectivity, <https://as.fitpacific.com/upload/as/obj/files/accelerometers/EGCS-A2%20B2.pdf> [dostęp: 11.03.2024].
26. TE Connectivity, <https://www.te.com/usa-en/product-EGCS3-JJJ-C20003.html> [dostęp: 11.03.2024].
27. Teraz środowisko, <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/zuzyte-podklady-kolejowe-kolej-pkp-rakotworcze-8330.html> [dostęp: 10.12.2023].
28. Transport szynowy. <https://www.transportszynowy.pl/Kolej/torykolpodkladyrodz> [dostęp: 10.11.2023].
29. Urząd Transportu Kolejowego, <https://utk.gov.pl/pl/aktualnosci/6291,Kontrola-Prezesa->

- UTK-wskazala-nieprawidlowosci-w-zakresie-utrzymania-infrastrukt.html [dostęp: 10.11.2023].
30. Urząd Transportu Kolejowego, <https://utk.gov.pl/pl/dostep-do-infrastruktur/dostep-do-infrastruktu/zarzadzanie-infrastrukt/18675,Zarzadzanie-infrastruktura-kolejowa.html> [dostęp: 03.01.2024].
31. Zastosowania elektroniki, Poradnik inżyniera, Badania nieniszczące [praca zbiorowa], Wydawnictwo Naukowo-Techniczne WNT, 1975, s. 321–399.