

Monitorowanie przebiegu drgań toru kolejowego w warunkach eksploatacyjnych

Monitoring of railway track vibration signals under in-service conditions



Piotr Chrostowski

Dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska,
Katedra Inżynierii Transportowej

piotr.chrostowski@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5454-026X



Sławomir Judek

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział
Elektrotechniki i Automatyki, Katedra
Inżynierii Elektrycznej Transportu

slawomir.judek@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-4620-8416



Michał Michna

Dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Wydział
Elektrotechniki i Automatyki,
Katedra Energoelektroniki i Maszyn
Elektrycznych

michal.michna@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9683-7459



Krzysztof Karwowski

Dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Wydział
Elektrotechniki i Automatyki, Katedra
Inżynierii Elektrycznej Transportu

krzysztof.karwowski@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1662-6051

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane wyniki prac badawczych, których głównym celem było opracowanie systemu pomiarowego przeznaczonego do monitorowania i oceny oddziaływań wibroakustycznych na liniach kolejowych. Zastosowanie wielu sensorów – zarówno różnych typów, jak i licznych czujników tego samego rodzaju – pozwala na uzyskanie pełnego i wiarygodnego obrazu tych oddziaływań, co jednocześnie wymagało opracowania centralnego, zautomatyzowanego systemu zarządzania pomiarami, odpowiedzialnego m.in. za inicjację, synchronizację i zakończenie rejestracji. Opracowane rozwiązania obejmują zarówno część sprzętową, jak i algorytmy analizy danych, a ich skuteczność zweryfikowano w warunkach laboratoryjnych oraz podczas pomiarów terenowych prowadzonych na torach kolejowych. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z pomiarem i interpretacją drgań toków szynowych wynikających z dynamicznych oddziaływań na styku koła i szyny. Prezentowane rezultaty odnoszą się do prac badawczych prowadzonych w ramach projektu InfraNoise – Wspólne Przedsięwzięcia NCBR i PKP PLK S.A. pn. „Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej – BRIK2”.

Słowa kluczowe: Infrastruktura transportu kolejowego; Tabor kolejowy; Hałas kolejowy; Badania środowiskowe; Drgania i hałas; Obszarowa sieć sensorowa

Abstract: This article presents selected results of research aimed at developing a measurement system designed for monitoring and assessing vibroacoustic interactions on railway lines. The application of multiple sensors - both of different types and numerous sensors of the same type enables the acquisition of a comprehensive and reliable picture of these interactions, which in turn required the development of a central, automated measurement management system responsible for, among other tasks, the initiation, synchronization, and termination of data acquisition. The proposed solutions include both hardware components and data analysis algorithms, whose effectiveness was verified under laboratory conditions as well as during field measurements conducted on railway tracks. Particular attention is devoted to issues related to the measurement and interpretation of rail vibration induced by dynamic wheel-rail interaction. The presented results refer to research carried out within the InfraNoise project, implemented under the joint initiative of the National Centre for Research and Development (NCBR) and PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., entitled “Research and Development in Railway Infrastructure – BRIK2”.

Keywords: Railway transport infrastructure; Rolling stock; Railway noise; Environmental studies; Vibrations and noise; Spatial sensor network

Wstęp

Monitorowanie oddziaływań transportu kolejowego na środowisko stanowi istotne zagadnienie związane z zarządzaniem infrastrukturą i taboru kolejowym [8,9,22,25,29].

Zjawiska wibroakustyczne związane z ruchem kolejowym zależą od wielu czynników, a w związku z tym określenie wpływu różnorodnej struktury ruchu na generowane drgania i hałas jest zadaniem złożonym, badanym przez wielu autorów [19,21,24].

Problem ten zyskuje na znaczeniu zwłaszcza w kontekście dynamicznie rozwijającego się rynku pojazdów, ale również w związku ze zmianami wynikającymi z modernizacji infrastruktury torowej, w tym sukcesywnym wdrażaniu systemu Kolei Dużych

Prędkości [24]. Ponadto dynamiczne oddziaływanie kół pojazdów na infrastrukturę niesie ryzyko przyspieszonej degradacji elementów nawierzchni [1,3,18,20,31], włącznie z pęknięciami toków szynowych, a w skrajnych przypadkach nawet złamaniami szyny.

Jako że oddziaływania na styku pojazd-tor oraz propagacja wibracji w bezpośrednim sąsiedztwie dróg kolejowych mają wpływ nie tylko na sam tabor i infrastrukturę, ale również na ludzi przebywających w pobliżu linii kolejowych [26], to monitorowanie powyższych zjawisk powinno odbywać się regularnie. Pomiar hałasu i drgań stanowi standardową czynność w zarządzaniu infrastrukturą kolejową. Trudniejsze jest jednak oszacowanie czynników mających bezpośredni wpływ na wielkość i charakter zjawisk wibroakustycznych, zwłaszcza w przypadku zróżnicowanej struktury eksploatacyjnej [1,2,26,27]. Wymaga to podejścia metodycznego, które umożliwi monitorowanie i wykrywanie stanów wysokiego ryzyka w ścisłym powiązaniu ze strukturą pojazdu, z dokładnością identyfikacji źródła do pojedynczych osi jezdnych lub co najmniej wózków, niezależnie od prędkości przejazdu.

W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia – spośród szerokiego zakresu przeprowadzonych (w projekcie InfraNoise) prac badawczych [4-6] – dotyczące monitoringu drgań toków szynowych podczas przejazdów pojazdów szynowych przez strefę pomiarową. Zagadnienie to ma istotne znaczenie, ponieważ umożliwia obserwację bezpośredniego wpływu toczenia kół osi jezdnych oraz analizę wartości i zmienności amplitudy sygnałów, wynikających z dynamicznego charakteru oddziaływań na styku koła i szyny.

W ramach prac badawczych przyjęto, że pomiar drgań powinien obejmować odcinek o długości zbliżonej do obwodu koła pojazdu. Założenie

to wynika z faktu, że wszelkie imperfekcje elementów styku – zarówno na powierzchni tocznej kół, jak i na głowce szyny – mogą powodować niejednorodność kontaktu, która objawia się zróżnicowaniem amplitudy i charakteru rejestrowanych drgań na obwodzie pełnego obrotu koła.

Prowadzony w konsorcjum Politechniki Gdańskiej i Politechniki Wrocławskiej projekt badawczy pt. „System precyzyjnego monitorowania oddziaływania ruchu kolejowego na środowisko z uwzględnieniem informacji o danych ruchowych, technicznych i środowiskowych” o akronimie InfraNoise, ma na celu opracowanie i testowanie prototypu systemu pomiarowo-informatycznego. System ten realizuje funkcje monitorowania w szerokim zakresie obejmując archiwizację, przetwarzanie oraz raportowanie wyników w ramach interaktywnej aplikacji bazodanowej [6]. Prowadzone badania koncepcyjne, laboratoryjne oraz testy w warunkach eksploatacyjnych doprowadziły do powstania pierwszej wersji prototypu systemu. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z powyższym systemem, jego strukturą i funkcjonalnością, a następnie zaprezentowano wyniki dotyczące pomiaru drgań toków szynowych na przykładzie wybranych studiów przypadku.

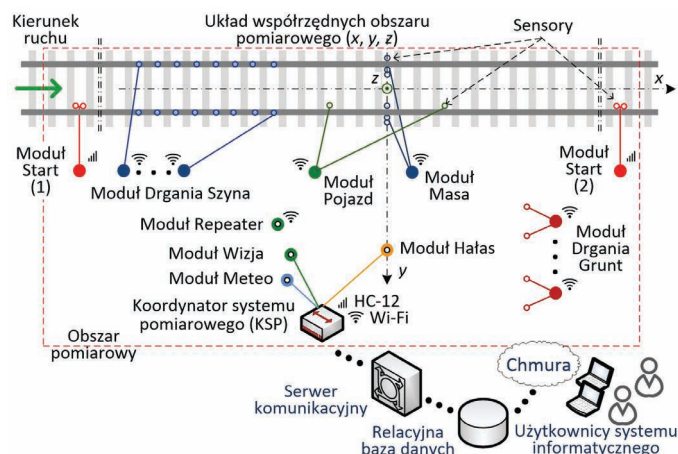
Modułowa struktura systemu pomiarowego

Projekt InfraNoise swoim zakresem objął szereg parametrów identyfikujących zróżnicowane warunki eksploatacyjne na liniach kolejowych. Ogólne założenia dotyczące komponentu pomiarowego oraz informatycznego systemu zostały przedstawione w pracy [6]. Na podstawie wskazanych założeń zaprojektowano i zrealizowano prototyp systemu pomiarowego w strukturze modułowej. Takie podejście umożliwiło integrację niezależnych pomiarów, które w sposób istotny, wynikający ze specyfiki bada-

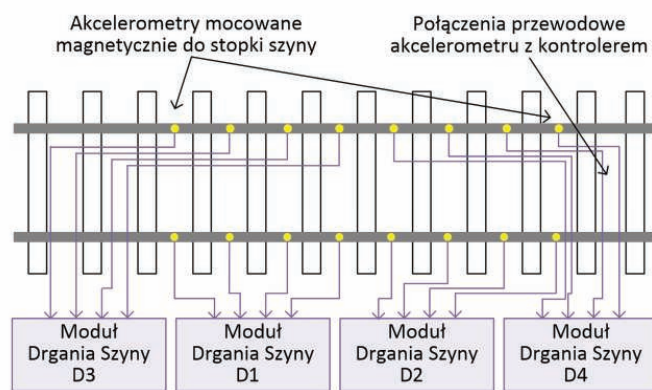
nych zjawisk, różnią się zarówno zastosowaną aparaturą, jak i przyjętym formatem archiwizowanych danych. W systemie zintegrowano następujące moduły pomiarowe (w nawiasach podano użyte symbole poszczególnych modułów):

- Moduł Hałas (H) – przeznaczony do pomiaru hałasu w bliskiej odległości od opomiarowanego toru,
- Moduł Meteo (W) – realizujący pomiar parametrów meteorologicznych w strefie centralnej obszaru pomiarowego,
- Moduł Wizja (K) – służący wykonaniu zdjęć pojazdów poruszających się po opomiarowanych torach,
- Moduł Repeater (R) – przeznaczony do uruchomienia w obszarze pomiaru sieci komunikacji bezprzewodowej,
- Moduł Start (S) – przeznaczony do zdefiniowania strefy pomiarowej oraz do realizacji funkcji sterowania procesem pomiarowym,
- Moduł Pojazd (P) – przeznaczony do identyfikacji parametrów kinematycznych w dowiązaniu do poszczególnych członów składu pociągu.
- Moduł Drgania Szyna (D) – przeznaczony do pomiarów przyspieszeń drgań stopki szyny,
- Moduł Drgania Grunt (G) – przeznaczony do pomiarów przyspieszeń drgań (w trzech kierunkach x, y, z) w gruncie oraz na obiektach budowlanych w bezpośrednim sąsiedztwie strefy pomiarowej (linii kolejowej),
- Moduł Masa (M) – przeznaczony do pomiarów odkształceń i przemieszczeń toków szynowych,
- Moduł Akustyka (A) – przeznaczony do pomiarów akustycznych w bliskim polu oddziaływania koło-szyna.

W ramach każdego modułu wykonano lub skonfigurowano odpowiednią liczbę zestawów pomiarowych (np. S1,...,S4, D1,...,D8), obejmujących w



1. Schemat modułowej struktury systemu pomiarowego InfraNoise dla jednego toru linii kolejowej z wybranymi modułami pomiarowymi, źródło: opracowanie własne



2. Schemat rozmieszczenia sensorów na tokach szynowych i ich połączenia do modułów Drgania Szyny (D1-D4); punktami oznaczono miejsca montażu sensorów, poszczególne bloki reprezentują moduły pomiarowe sieci sensorowej, źródło: opracowanie własne

najprostszym ujęciu – kontroler pomiarowy oraz zestaw odpowiednich sensorów (np.: D1s1, D1s2,...,D8s4). Moduły Hałas, Meteo, Wizja i Repeater skonfigurowano z wykorzystaniem odpowiednio wysokiej klasy urządzeń pomiarowych. Przykładowo, moduł Hałas realizuje pomiar za pomocą stacji monitoringu hałasu, spełniając przy tym wymogi przedstawione w dokumentach [16,23].

Koordynacją pracy modułów pomiarowych steruje nadrzędna jednostka – Koordynator Systemu Pomiarowego (KSP) – będąca komputerem wyposażonym w specjalistyczne, autorskie oprogramowanie odpowiedzialne za inicjację i zakończenie pomiarów oraz obsługę procesów systemowych.

Przyjętą strukturę modułową przedstawiono na rysunku 1.

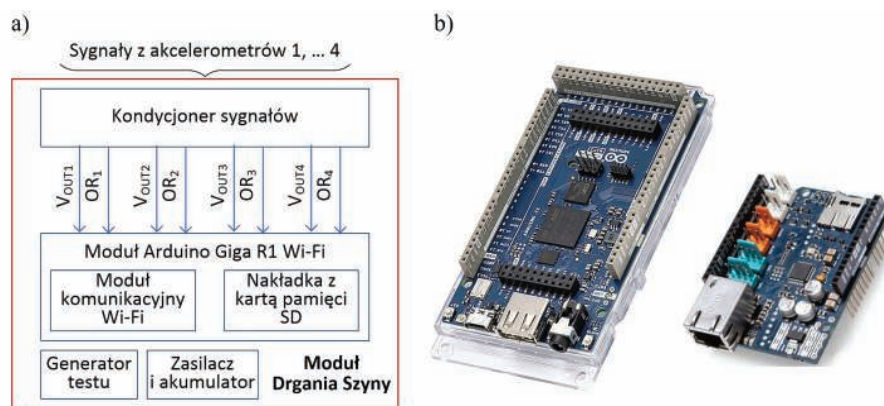
Aparatura pomiarowa i sterowanie procesem pomiarowym

Badania drgań infrastruktury kolejowej najczęściej prowadzone są na drodze pomiaru amplitudy przyspieszeń prowadzonego z wykorzystaniem akcelerometrów, choć wykonywane są również pomiary prędkości drgań za pomocą geofonów, a także pomiary z użyciem wibrometrów (również z poziomu pojazdu) [35]. Pomiary drgań na elementach infrastruktury kolejowej (również bezpo-

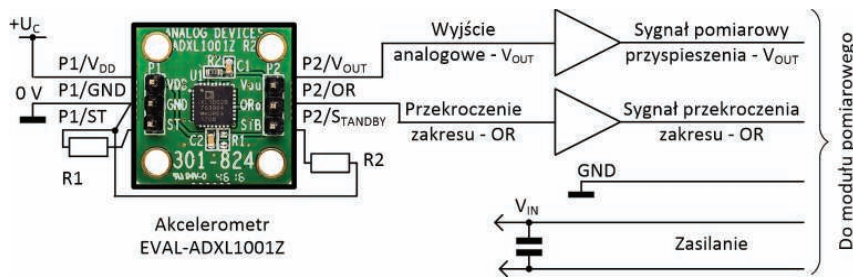
średnio na szynie) były przedmiotem licznych badań, a łączenie pomiaru drgań i hałasu często prowadzi do rozwoju technik diagnostyki zarówno toru, jak również elementów układu biegowego pojazdów szynowych [7,10-13,17,20,28,31-34]. Miały one na celu rozpoznanie poziomów amplitud oraz zakresu częstotliwościowego generowanej fali mechanicznej. Z uwagi na warunki eksploatacyjne, często pomiary te wykonywane są w warunkach kontrolowanych przejazdów pociągów lub drezyn z niewielką prędkością, jednak literatura podaje również zakresy amplitud generowanych przejazdami pociągów dużej prędkości [24,30]. Należy uwzględnić fakt, że wynik pomiaru zależy od takich czynników jak: montaż sensora (klej, uchwyt magnetyczny), lokalizacji sensora na szynie (stopka, sztyka, główka), lokalizacji

względem węzłów przytwierdzenia szyny do podkładu (przęsło, nad podkładem) oraz stanu naprężenia szyn. Typ, parametry, warunki ruchu pojazdu i stan techniczny układu jezdni są istotnymi czynnikami generującymi drgania szyn. Zagadnienie to jest, zatem stosunkowo złożone i badania powyższych zjawisk wymagają przyjęcia pewnych założeń, które ustalą możliwie jak największą liczbę warunków. Punktem wyjścia było założenie, że odcinek pomiarowy powinien być dłuższy niż obwód standardowego koła stosowanego w pojazdach kolejowych. W celu zapewnienia możliwości rejestracji oddziaływań odpowiadających pełnemu obrotowi koła zaprojektowano układ ośmiu akcelerometrów rozłożonych między kolejnymi podkładami na długości około 4,2 m.

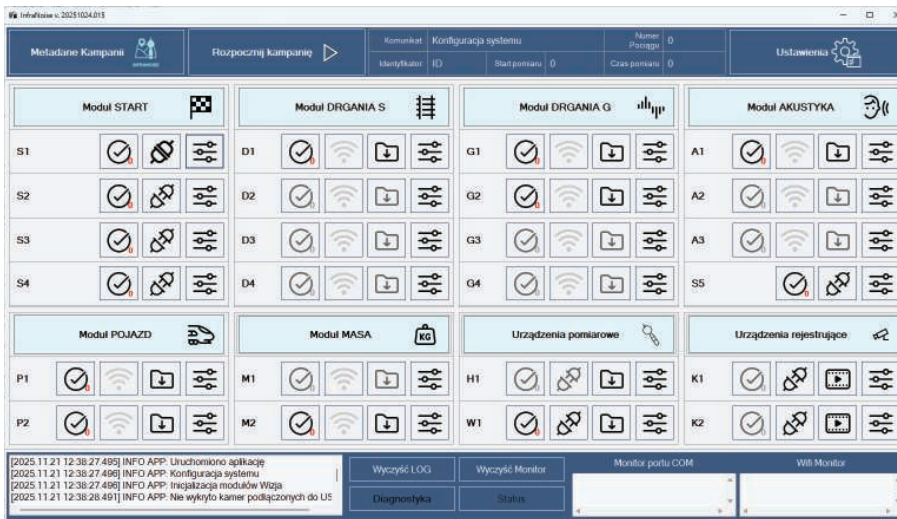
Schemat bazy pomiarowej przed-



3. Moduł Drgania Szyny: a) schemat blokowy modułu pomiarowego; b) widok zestawu uruchomieniowego Arduino Giga R1 z nakładką z interfejsem i czytnikiem kart micro SD, źródło: opracowanie własne na podstawie [14]



4. Poglądowy schemat ideowy jednego toru pomiarowego z jednoosiowym (z) akcelerometrem ADXL1001Z, źródło: opracowanie własne na podstawie [15]



5. Okno aplikacji Koordynatora Systemu Pomiarowego, źródło: opracowanie własne

stawiono na rysunku 2.

Układ pomiarowy modułu Drgania Szyna opracowano z wykorzystaniem nowoczesnej i uniwersalnej płytki deweloperskiej Arduino Giga R1 WiFi [14]. Platforma ta oparta jest na dwurdzeniowym, 32-bitowym mikrokontrolerze STM32H747XI, integrującym rdzenie ARM Cortex-M7 (480 MHz) oraz ARM Cortex-M4 (240 MHz). Do płytki dołączono również moduł Arduino Ethernet Shield 2, wyposażony w interfejs Ethernet oraz czytnik kart micro SD.

Wybór tej platformy wynikał zarówno z jej stosunkowo wysokiej mocy obliczeniowej, bogatej biblioteki oprogramowania, jak i z relatywnie niskiego kosztu, co czyni ją rozwiązaniem szczególnie korzystnym na etapie szybkiego prototypowania systemów pomiarowych.

Do pomiarów przyspieszeń drgań toków szynowych wykorzystano czujniki wykonane na bazie układów MEMS, fabrycznie zamontowa-

nych na płycie drukowanej – typu EVAL-ADXL1001Z/1002Z [15]. Na rysunku 3 przedstawiono przyjęty do wykonania układ. Akcelerometry wybranego typu oprócz analogowego wyjścia sygnałowego generują sygnał przekroczenia zakresu pomiarowego, co ułatwia identyfikację wystąpienia oddziaływań wykraczających poza przyjęty zakres amplitud. W badaniach zastosowano akcelerometry o nominalnym zakresie do 50 g (ADXL1002Z) oraz do 100 g (ADXL1001Z). Przekroczenie granicznego progu przyspieszeń – o podwojonej wartości nominalnej – prowadzi do generowania impulsowego sygnału OR (rysunek 4), który rejestrowany jest, jako sygnał logiczny wskazujący na czas wystąpienia przekroczenia progu w sygnale analogowym. Zarejestrowane rekordy pomiarowe przyspieszeń powinny być w postprocessingu analizowane w powiązaniu z sygnałem OR.

Sensory zamieszczono w obu-

dowie z aluminium zapewniając szczelność i ochronę przed wilgocią i pyłem na poziomie IP68. Uchwyt magnetyczny zapewnia szybki montaż sensorów na szynie kolejowej.

Nadrzędną rolę w systemie pełni Koordynator Systemu Pomiarowego (KSP), obsługiwany z wykorzystaniem funkcji zdalnego pulpitu. Jednostka ta odpowiada za pełną automatyzację procesu pomiarowego, w tym komunikację z modułami pomiarowymi (za pośrednictwem łączy HC-12 oraz Wi-Fi), zapis konfiguracji modułów, inicjację i zakończenie pomiarów oraz tworzenie odpowiedniej struktury katalogów. Proces pomiarowy zorganizowano w postaci kampanii pomiarowych, definiowanych przez czas i miejsce prowadzenia badań oraz konfigurację systemu pomiarowego, obejmującą dobór modułów, ich typów i liczby, a także lokalizację ich montażu. W ramach każdej kampanii rejestrowane są zdarzenia odpowiadające przejazdowi pociągów przez strefę pomiarową.

Sterowanie procesem pomiarowym zostało zaprojektowane w sposób umożliwiający rejestrację wyłącznie przejazdów pociągów przez strefę pomiarową. Wyjątek stanowią pomiary ciągłe obejmujące hałas i warunki meteorologiczne, których analiza prowadzona jest w postprocesie na podstawie okien czasowych synchronizowanych ze zdarzeniami zarejestrowanymi przez KSP. Struktura danych przyporządkowanych poszczególnym zdarzeniom tworzona jest automatycznie. Interfejs aplikacji KSP przedstawiono na rysunku 5.

Pomiar drgań toków szynowych – poligon doświadczalny

W ramach projektu InfraNoise przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych, które stopniowo prowadziły do konfiguracji systemu pomiarowego zwłaszcza w kontekście automatyzacji procesu. Pomiary w warunkach eksploatacyjnych prowadzono równolegle z licznymi

pracami laboratoryjnymi oraz badaniami w warunkach kontrolowanych (tory stacyjne), wykonywanymi z wykorzystaniem pojazdów drezynowych. Całość zrealizowanych prac doprowadziła do opracowania funkcjonalnego, modułowego prototypu systemu, który finalnie został zainstalowany na relatywnie mocno obciążonej linii magistralnej. Umożliwiło to weryfikację wielu założeń konstrukcyjnych i konfiguracyjnych, a także potwierdzenie poprawnego działania algorytmów sterowania podczas wielogodzinnych pomiarów ciągłych.

Jak zaznaczono, system charakteryzuje się rozproszoną strukturą pomiarową, obejmującą przestrzenną sieć sensorów połączonych bezprzewodowo z jednostką zarządzającą, tj. Koordynatorem Systemu Pomiarowego (KSP). Na rysunku 6 przedstawiono widok układu elementów sieci sensorów i kontrolerów na tle zdjęć terenu. Obszar pomiarowy uwzględnia warunki terenowe, a jego wybór poprzedzony jest ich analizą, włącznie z przeprowadzeniem wizji lokalnej. Opracowany system jest skalowalny, w pełnej skali składa się ze 106 elementów w ramach jednej strefy pomiarowej dwutorowej linii kolejowej, a jego konfiguracja oraz liczba sensorów może być dostosowana do potrzeb. Montaż i układ sensorów/kontrolerów charakteryzuje się wysokim poziomem uniwersalności uwzględniającym dostępność terenu. Prezentowane wyniki badań pochodzą z pomiarów zrealizowanych w październiku 2025 r. Na rysunku 7 przedstawiono rozmieszczenie i zamocowanie sensorów przyspieszeń na tokach szynowych oraz kontrolerów ustawionych w ławie torowiska.

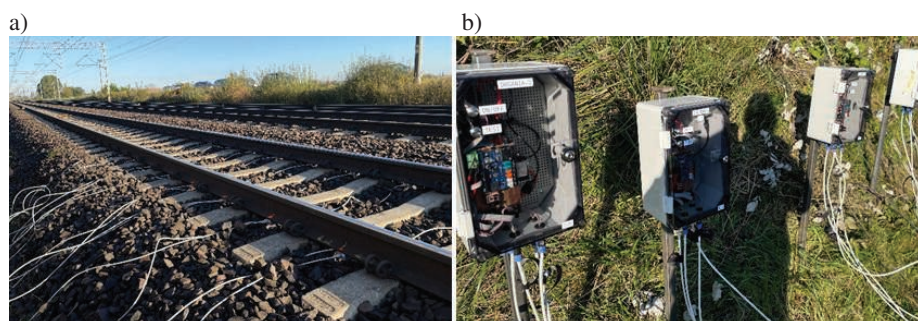
Wybrane wyniki kampanii pomiarowych

System pomiarowy zarządzany z poziomu KSP tworzy hierarchiczną strukturę danych, którą uporządko-

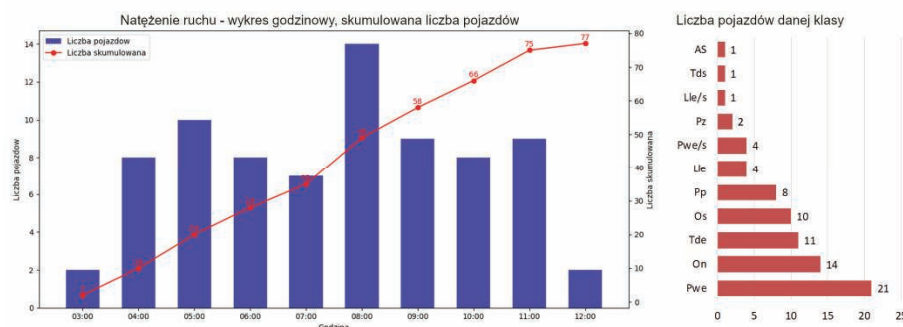


PL-2000				
Lp.	Kod	X (North)	Y (East)	H Amsterdam
1	H1			
2	S4			
3	S1			
4	M2s1			
5	M2s4			
6	D5s4			
7	D5s3			
8	D5s2			
9	D5s2			
10	D6s4			
11	D6s3			
12	D6s2			
...	...			
30	M2s5			
31	M2s6			
32	M2s1			
33	M2s2			
34	M2s3			
35	P1k			
36	M2k			
37	P2k			
38	H2			
39	S3			
40	S2			
41	S2k			
42	S3k			
43	P1s2			
44	P1s1			
45	K2			
46	W1			
47	K1			
48	A3k			
49	A4k			
50	G1			
51	G2			
52	G3			
53	A3s1			
54	A3s2			
55	A4s1			
56	A4s2			

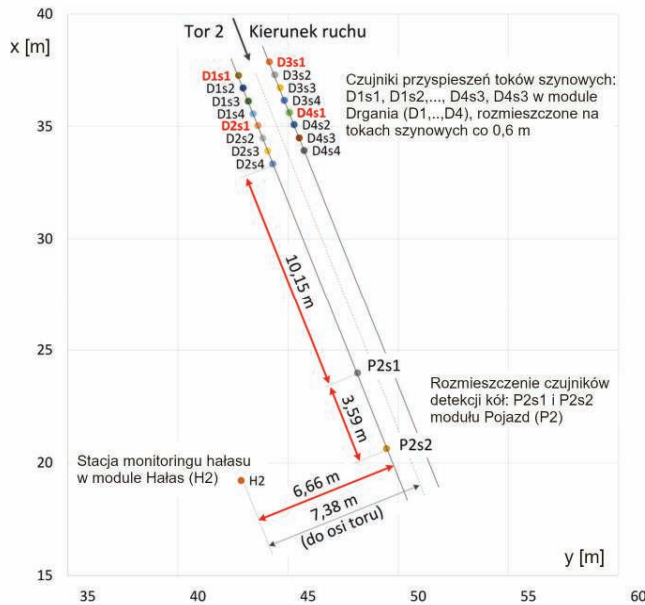
6. Rozmieszczenie elementów sieci sensorowej w pomiarach połowych na linii kolejowej; punkty oznaczają umiejscowienie elementów sieci sensorowej (kontrolery i sensory); w tabeli przedstawiono listę 56 współpracujących elementów (pomiar październik 2025), opracowanie własne z wykorzystaniem narzędzia Google Earth Pro



7. Baza pomiarowa sensorów przyspieszeń drgań toków szynowych a) sensory przymocowane do stopki szyny na obydwu tokach; b) kontrolery modułu Drgania Szyny ustawione w ławie torowiska (pomiar październik 2025), źródło: opracowanie własne



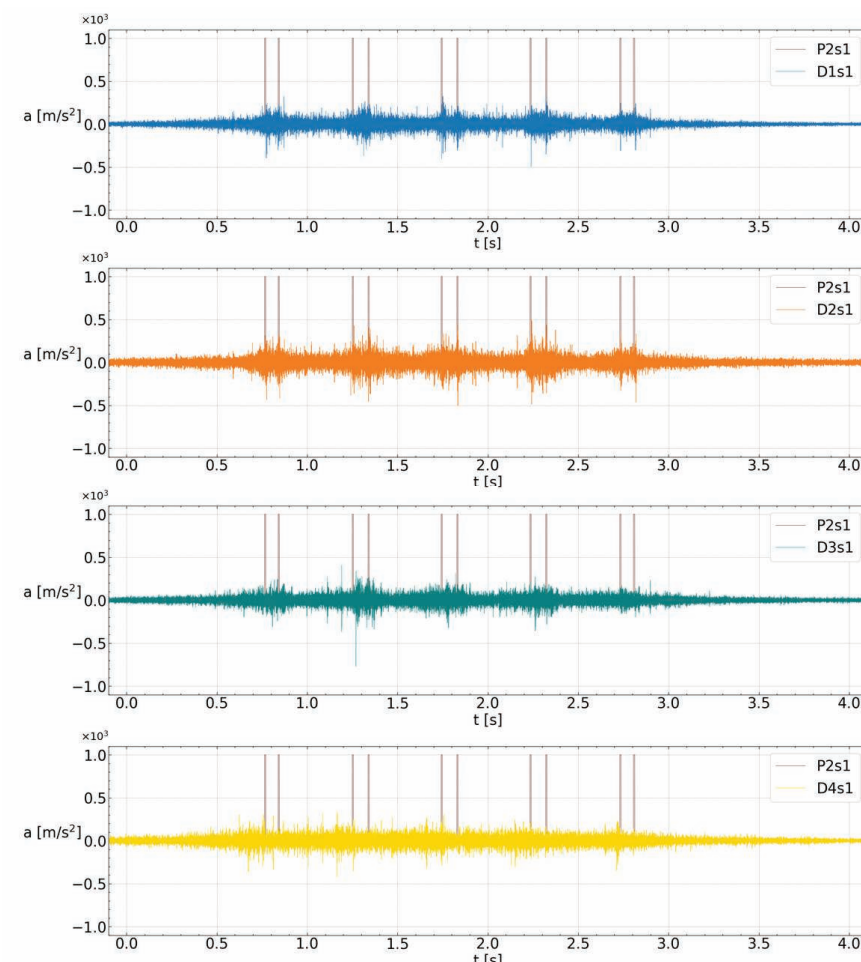
8. Statystyki przeprowadzonych kampanii pomiarowych – pomiar październik 2025, Pws/e – pociągi pociągowe nieintegrowane z lokomotywą spalinową/elektryczną, AS – autobusy szynowe, Tds/e – pociągi towarowe długie z lokomotywą spalinową/elektryczną, Lle/s – lokomotywy elektryczne/spalinowe luzem, Pp – pociągi dużych prędkości, Os – pociągi osobowe starego typu, On – pociągi osobowe nowego typu, źródło: opracowanie własne



9. Rozmieszczenie wybranych czujników systemu pomiarowego we współrzędnych układu lokalnego y (East), x (North), źródło: opracowanie własne



10. Widok na czoło pociągu – fotografie dostarczane przez moduł Wizja, źródło: opracowanie własne



11. Przebiegi przyspieszeń zarejestrowane przy pomocy wybranych czujników Modułu Drgania Szyny na tle impulsów reprezentujących osie pojazdu – przypadek 1, źródło: opracowanie własne

wano według określonego porządku. Nadrzędnym jej elementem jest kampania pomiarowa, rozumiana jako zestaw informacji dotyczących lokalizacji prowadzonego monitoringu oraz konfiguracji sieci sensorowej, obejmującej liczbę i typ zastosowanych modułów, przyporządkowanie sensorów do poszczególnych modułów oraz jednoznaczna identyfikację ich położenia na linii i torach kolejowych. Kampania może być przygotowana przed rozpoczęciem pomiarów i w razie potrzeby aktualizowana zgodnie z bieżącymi warunkami technicznymi, stanowiąc kluczowy etap organizacji procesu pomiarowego.

Z drugiej strony kampania definiuje również strukturę danych, w której KSP zapisuje wyniki rejestracji. W ramach uruchomionej kampanii KSP inicjuje, kontroluje i zamyka procesy pomiarowe, tworząc odpowiednią strukturę katalogów i plików. Dane dzielone są na zdarzenia, odpowiadające poszczególnym przejazdom pociągów przez strefę pomiarową.

W zaimplementowanych rozwiązaniach technicznych sieci sensorowej uzyskano relatywnie niewielkie rozbieżności czasowe rzędu ~100 ms (pomiędzy modułami pomiarowymi), co należy uznać za stosunkowo dobry wynik i wystarczający do identyfikacji oddziaływań na poziomie poszczególnych wózków, a nawet pojedynczych osi pojazdu.

Dokładność synchronizacji jest dodatkowo poprawiona na etapie post-processingu. W tym celu uwzględnia się znane długości zarejestrowanych przebiegów w modułach oraz odległości przestrzenne pomiędzy sensorami, określone na podstawie precyzyjnych współrzędnych geodezyjnych lokalizacji czujników. Dodatkowym parametrem wykorzystywanym w procesie synchronizacji jest prędkość pociągów mierzona w module Pojazd.

Procedura ta umożliwia skuteczne porównywanie wyników z różnych modułów i analizę zależności pomię-

dzy wybranymi parametrami rejestrowanego ruchu i oddziaływań.

Dodatkową funkcjonalnością systemu pomiarowego jest identyfikacja typu pojazdu. W tym celu zaimplementowany algorytm analizuje wyniki modułu Pojazd, przetwarzając je na informacje o odległościach pomiędzy osiami jezdny, liczbie wózków, liczbie członów/wagonów. Na tej podstawie pojazdy klasyfikowane są do określonych kategorii, zdefiniowanych przez zestaw charakterystycznych cech technicznych i eksploatacyjnych. Na rysunku 8 zaprezentowano statystyki pomiarów przeprowadzonych w październiku br. Pomiary składały się z 3 kampanii pomiarowych, w których zarejestrowano komplet 77 zdarzeń (przejazdy pojazdów).

Wyniki pomiaru przyspieszeń drgań toków szynowych zaprezentowano w kontekście wyników uzyskiwanych w innych modułach sieci sensorowej. W niniejszym artykule ograniczono się do synchronizacji wyników modułu Drgania Szyny z informacją o przejeżdżających osiach pojazdów z modułu Pojazd oraz z przebiegiem ciśnienia akustycznego rejestrowanego modułem Hałas. Synchronizacja ta ma na celu prezentację funkcjonalności systemu pomiarowego integrującego dane z różnych modułów pomiarowych.

Na rysunku 9 przedstawiono rozmieszczenie czujników, z których sygnały poddano analizie, w lokalnym układzie współrzędnych geodezyjnych, spośród szesnastu sygnałów przyspieszeń do wizualizacji wybrano po dwa z każdego toku szynowego – na rysunku 9 wybrane sensory oznaczono kolorem czerwonym, wybrano pierwszy oraz środkowy czujnik z danego toku szynowego, patrząc od kierunku, z którego nadjeżdża badany pojazd.

W artykule zaprezentowano wyniki pomiaru trzech charakterystycznych zdarzeń:

- przypadek 1: lekki pociąg pasażerski jadący z prędkością (w

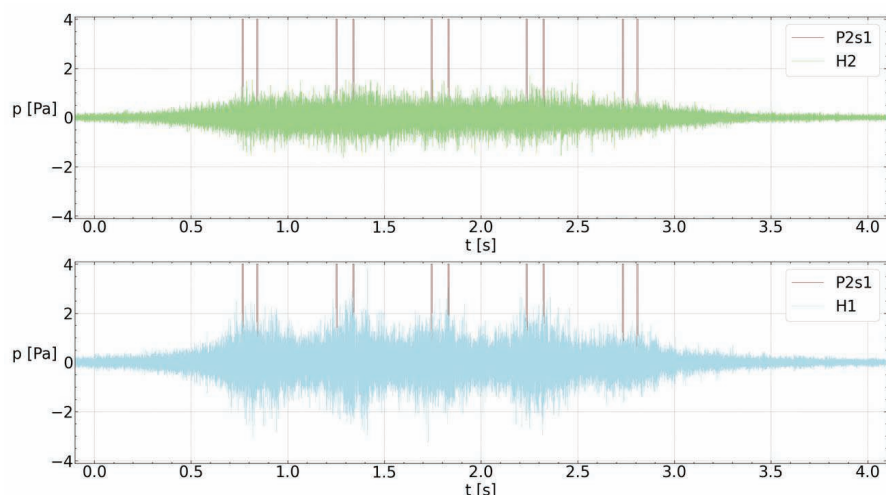
przybliżeniu) $v_1=120$ km/h,

- przypadek 2: pociąg towarowy jadący z prędkością $v_2=95$ km/h,
- przypadek 3: szybki pociąg pasażerski jadący z prędkością $v_3=175$ km/h.

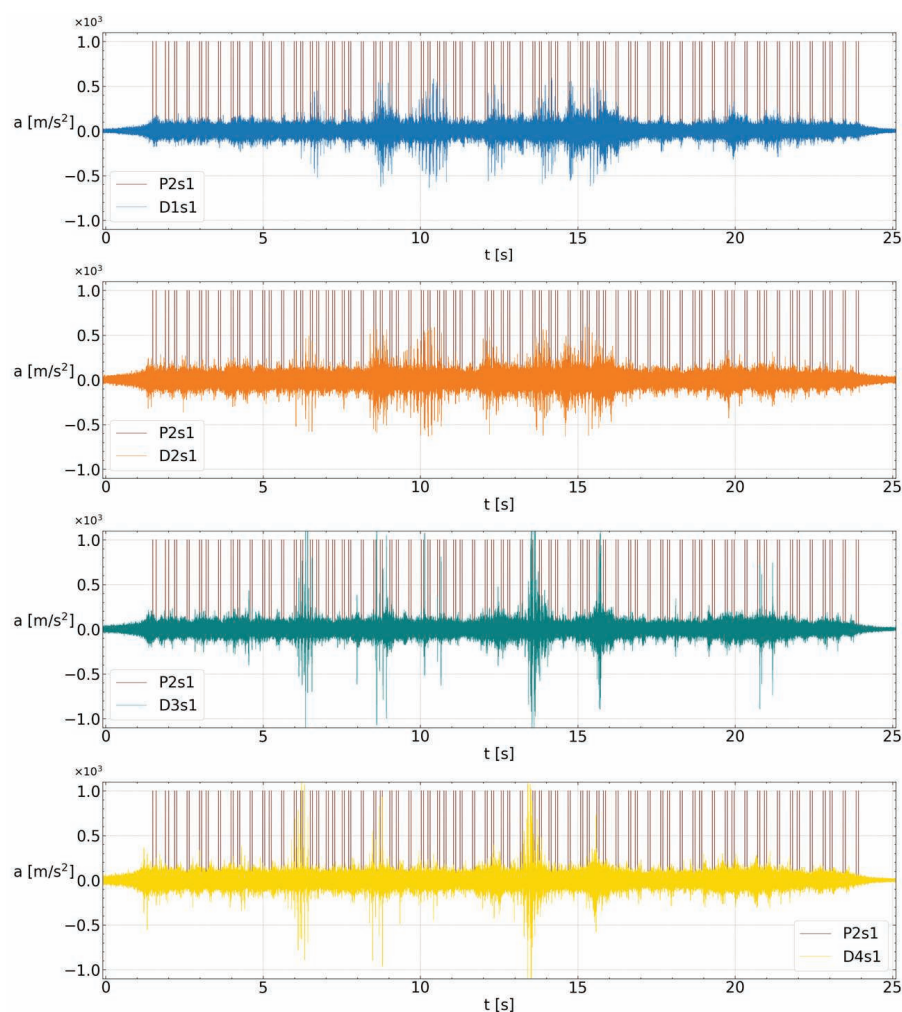
Fotografie czoł pociągów zarejestrowanych przez kamery modułu Wizja przedstawia rysunek 10.

Przypadek 1: Lekki pojazd pasażerski (EZT)

Podczas przejazdu lekkiego pojazdu



12. Ciśnienie akustyczne zarejestrowane przez moduł Hałas (H2 i H1) – przypadek 1, źródło: opracowanie własne



13. Przebiegi przyspieszeń zarejestrowane przy pomocy wybranych czujników Modułu Drgania Szyny na tle impulsów reprezentujących osie pojazdu – przypadek 2, źródło: opracowanie własne

pasażerskiego (EZT) zarejestrowano dane z modułu Pojazd, modułów Drgania Szyny oraz modułów Hałas. Na podstawie analizy sygnałów pochodzących z modułu Pojazd otrzymano liczbę osi $N = 10$, prędkość średnia wyniosła $v_{sr} = 119,25$ km/h, a odchylenie standardowe $\sigma_v = 0,02$

km/h. Długość pojazdu jako odległość pomiędzy skrajnymi osiami wyniosła $L = 67,64$ m.

Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych zarejestrowane przez akcelerometry modułu Drgania Szyny. Sygnał reprezentujący osie pojazdów

został przesunięty w czasie o interwał odpowiadający odległości pomiędzy czujnikiem P2s1 a danym akcelerometrem (rys. 9), z wykorzystaniem informacji o prędkości pojazdu.

Na rysunku 12 przedstawiono przebiegi ciśnienia akustycznego zarejestrowanego przez moduł Hałas. Do oceny wskaźników hałasu zastosowanie ma przebieg z modułu H2, z uwagi, że zdarzenie dotyczy przejazdu pociągu po torze nr 2. Natomiast przebieg zarejestrowany przez stację monitoringu hałasu H1 stanowi informację dodatkową – jest to stacja wykorzystywana w ocenie przejazdów po torze nr 1. Większe wartości amplitudy ciśnienia akustycznego z stacji H1 wynikają z mniejszej odległości tego modułu od toru nr 2.

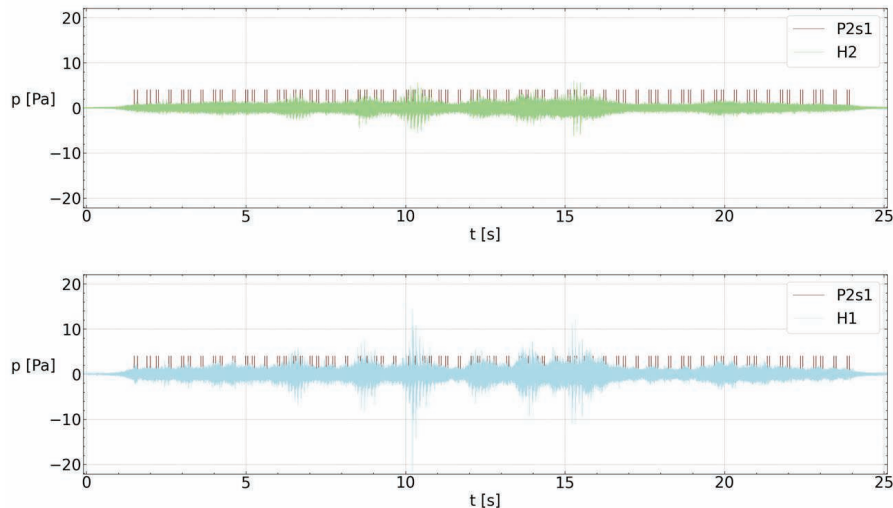
Z przedstawionych przebiegów można wnioskować, że metoda pomiaru i integracji sygnałów (synchronizacji) daje dobrą korelację drgań i hałasu względem osi pojazdu. Poziom przyspieszeń jest relatywnie jednorodny w odniesieniu do wszystkich członów pociągu. W sposób wyraźny w przebiegach amplitud zarysowują się wózki wagonów.

Przypadek 2: Elektryczna lokomotywa czteroosiowa z wagonami towarowymi

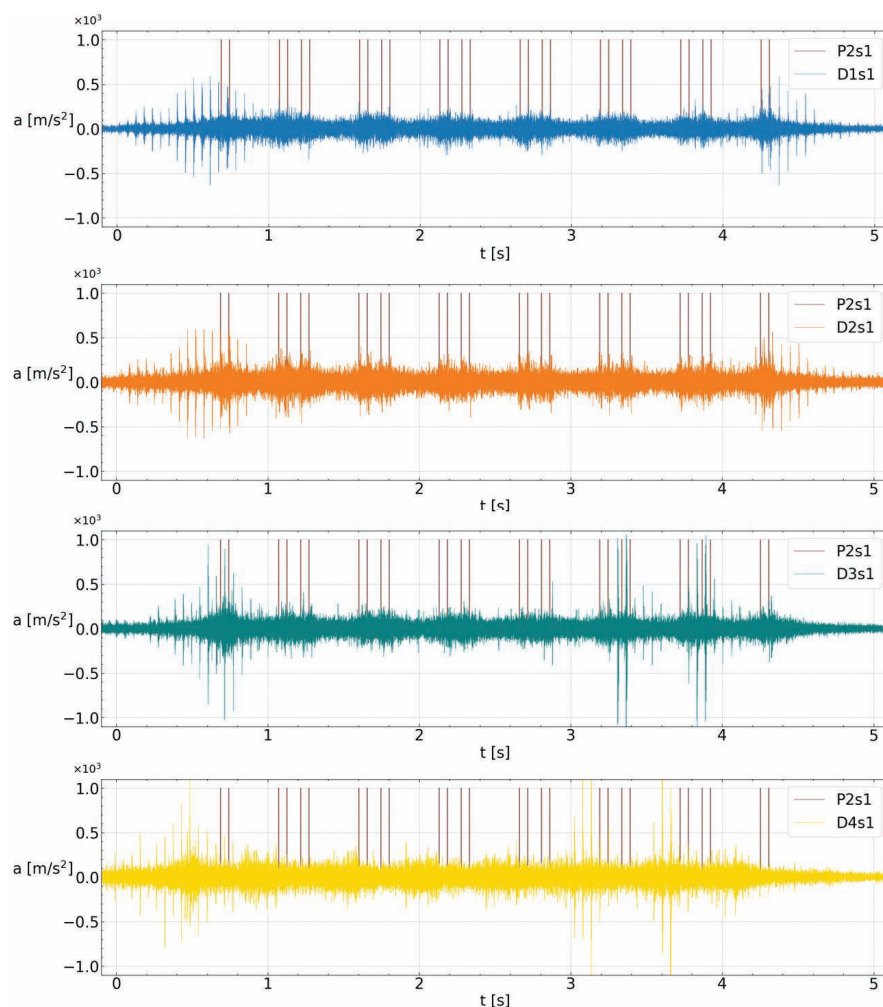
Analogicznie jak w przypadku 1 na podstawie analizy sygnałów pochodzących z modułu Pojazd uzyskano następujące dane: liczba osi $N = 142$, prędkość średnia wyniosła $v_{sr} = 94,79$ km/h, odchylenie standardowe $s_v = 1,31$ km/h, długość pojazdu jako odległość pomiędzy skrajnymi osiami wyniosła $L = 590,16$ m.

Na rysunku 13 i 14 przedstawiono odpowiednio przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych oraz przebiegi ciśnienia akustycznego – analogicznie jak w przypadku 1.

Przedstawione przebiegi przyspieszeń oraz ciśnienia akustycznego wskazują na wyższy stopień zróżnicowania amplitud względem przypadku 1. Tym razem można zaobser-



14. Ciśnienie akustyczne zarejestrowane przez moduł Hałas (H2 i H1) – przypadek 2, źródło: opracowanie własne



15. Przebiegi przyspieszeń zarejestrowane przy pomocy wybranych czujników Modułu Drgania Szyny na tle impulsów reprezentujących osie pojazdów – przypadek 3, źródło: opracowanie własne

wować, że niektóre wózki oddziałują znacznie bardziej na tle całego składu. Również obserwowalne są różnice pomiędzy stronami osi jezdnych (tok szynowy lewy/prawy).

Przypadek 3: Szybki pociąg pasażerski

Dane uzyskane na podstawie analizy sygnałów pochodzących z modułu Pojazd: liczba osi $N = 28$, prędkość średnia $v_{sr} = 177,90$ km/h, odchylenie standardowe $s_v = 0,11$ km/h.

Długość pojazdu jako odległość pomiędzy skrajnymi osiami wyniosła $L = 178,84$ m.

Na rysunku **15** i **16** przedstawiono odpowiednio przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych oraz przebiegi ciśnienia akustycznego – analogicznie jak w przypadku 1 i 2.

Przypadek 3 charakteryzuje się nietypowym (względem przypadków 1 i 2) cyklicznym pojawianiem się pików amplitudy przyspieszeń, skoncentrowanych zwłaszcza wokół skrajnych wagonów składu pociągu. Charakterystyka ta uwidacznia się zarówno na przebiegach przyspieszeń toków szynowych jak i na przebiegach ciśnienia akustycznego. Również w tym przypadku sensory na obydwu tokach szynowych wskazują zróżnicowany poziom amplitud.

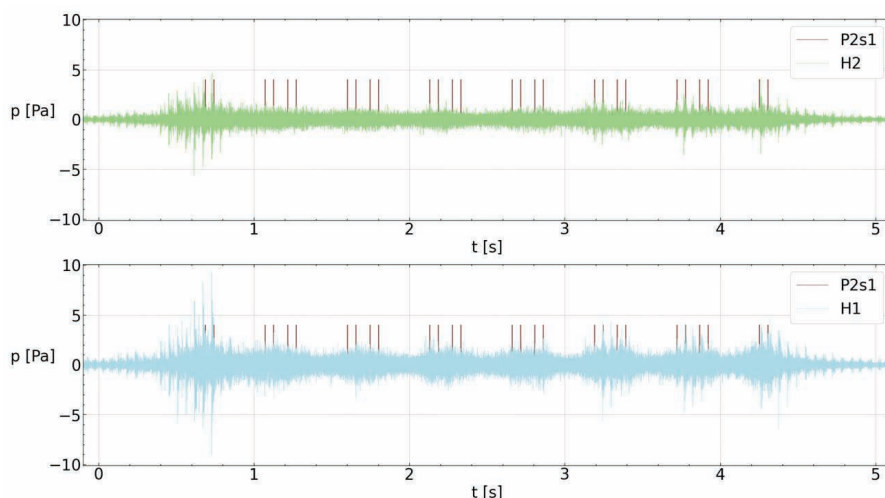
Na podstawie powyżej przedstawionych przypadków można wyciągnąć wnioski ogólne, które wynikają z różnic w charakterystyce analizowanych zdarzeń. Zróżnicowanie to jest konsekwencją m.in. parametrów eksploatacyjnych i technicznych poszczególnych pociągów, takich jak masa i naciski osi, długość składu, rozstaw osi, stan techniczny taboru oraz prędkość przejazdu. Z tego względu porównywanie przebiegów pomiarowych wymaga ich grupowania w odpowiednie klasy, w których parametry te są uwzględnione i rozróżniane. Pomiar prędkości chwilowych osi pojazdu pozwala na wyznaczenie z dużą dokładnością odległości między osiami, co pozwala na identyfika-

cję typu pojazdu.

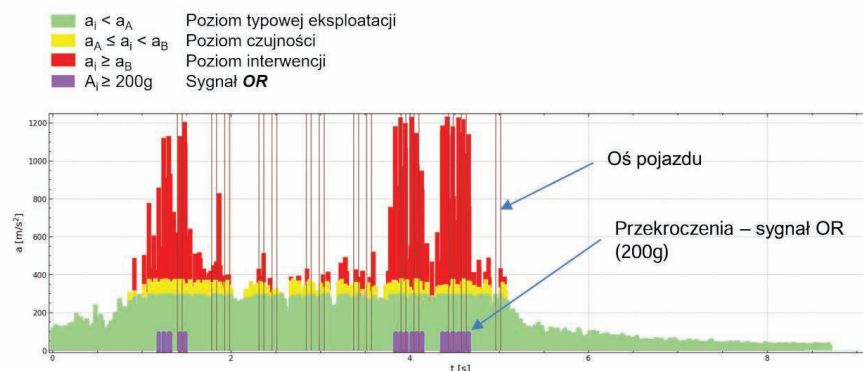
Dodatkowym aspektem w ocenie przebiegów przyspieszeń drgań – jest analiza zróżnicowania amplitud w ramach poszczególnych zdarzeń. W niniejszym artykule zaproponowano analizę progową przebiegów drgań osobno w każdym zdarzeniu (przedstawione przypadki 1-3). Proces ten ma na celu zróżnicowanie wyników pod względem generowanej przez poszczególne osie jezdne amplitudy przyspieszeń. Integracja przebiegów przyspieszeń z układem osi jezdnych (dane z modułu Pojazd) umożliwia ocenę oddziaływania w odniesieniu do poszczególnych wózków jezdnych pociągu. Przypisanie takie może być istotną informacją w ocenie oddziaływań różnych typów pojazdów na tory szynowe. W dłuższym okresie obserwacji (monitoringu) wyłonić się mogą pewne typowe poziomy, które przy uwzględnieniu prędkości przejazdu (istotnie wpływającej na

poziom amplitudy) mogą być oceniane w celu wychwycenia anomalii, przekroczeń stanów granicznych lub mogą być wykorzystywane do planowania redukcji oddziaływań na drodze procesów technologicznych utrzymania linii kolejowych i taboru. Analiza taka wymaga jednak obszernej bazy danych wyników. Projektowany w ramach projektu InfraNoise prototyp umożliwi realizację tego typu analiz.

Zaprezentowane podejście progowe, które poprzez zliczanie rekordów w określonych poziomach amplitudy, umożliwia identyfikację syntetyczną, jak również pozwala opisać zmienność oddziaływań w odniesieniu do składu (oddziaływania w otoczeniu czasowym poszczególnych wózków). Na rysunku **17** pokazano ideę progowania wartości z zastosowaniem 4 poziomowej skali zdefiniowanej poprzez progi: typowej eksploatacji a_A , czujności a_B , interwencji oraz próg



16. Ciśnienie akustyczne zarejestrowane przez moduł Hałas (H2 i H1) – przypadek 3, źródło: opracowanie własne



17. Analiza progowa sygnału przyspieszeń drgań toku szynowego – oznaczenie zakresów próbek w określonych poziomami granicznymi progach, źródło: opracowanie własne

przekroczenia zakresu pomiarowego. Ostatni z wymienionych progów nie-
sie o tyle istotną informację, że wska-
zuje na występowanie istotnych, tj.
znaczących względem założonego
zakresu przekroczeń. Zastosowany w
przeprowadzonych badaniach układ
pomiarowy ogranicza miarodajność
wyników do poziomu 100 g, powy-
żej tej wartości rejestrowana ampli-
tuda przetwarzana jest w nieliniowy
sposób, a w związku z tym nie jest
możliwe poprawne odczytanie war-
tości, natomiast powyżej 200 g, układ
zwraca wartości przekroczeń (OR),
które prezentowane są jako wartości
logiczne (wystąpiło przekroczenie).

Ustawione w analizie wartości zde-

finiowanych progów, na tym etapie
badań nie nawiązują do poziomów
obiektywnych, ich określenie wy-
maga bowiem – jak wspomniano
– statystycznej oceny przeprowa-
dzonej na istotnej próbie przejazd-
dów. Analiza literatury nie dostarcza
wystarczającej informacji, ponieważ
wyniki silnie warunkowane są takimi
parametrami jak sposób i lokaliza-
cja montażu (szyjka, stopka, przęsło,
podpora itp.), niepewność pomiaru
(klasa urządzeń pomiarowych), typ
nawierzchni, stan naprężeń, tempe-
ratura itp.

Wyniki progowania sygnałów
trzech prezentowanych zdarzeń
(przypadki 1-3) pokazano na rysun-

kach **18-20**. Założono progi $a_A=30$ g
i $a_B=38$ g.

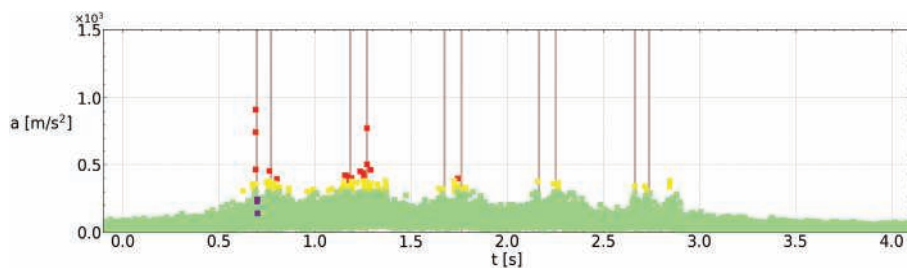
Analizując przedstawione wyni-
ki można wskazać na istotne róż-
nice poziomów w poszczególnych
progach. Najwyższymi poziomami
charakteryzuje się przebieg pokaza-
ny na rysunku 20. Wynika to przede
wszystkim z wysokiej (relatywnie
do pozostałych) prędkości pociągu
(przypadek 3). Skrajne względem
długości składu człony – to człony
z osiami napędnymi. Generują one
relatywnie do innych osi wyższe po-
ziomy amplitudy drgań. W przebiegu
przedstawionym na rysunku **19** moż-
na zaobserwować pewne anomalie
poziomu w środku składu. Poziomy
te wynikają z nadmiernego oddzia-
ływania konkretnych osi składu po-
ciągu, identyfikowanych impulsami
modułu Pojazd.

Najmniejszym poziomem ampli-
tudy charakteryzuje się przebieg z
rysunku **18**, obrazujący oddziaływanie
lekkiego pociągu pasażerskiego.

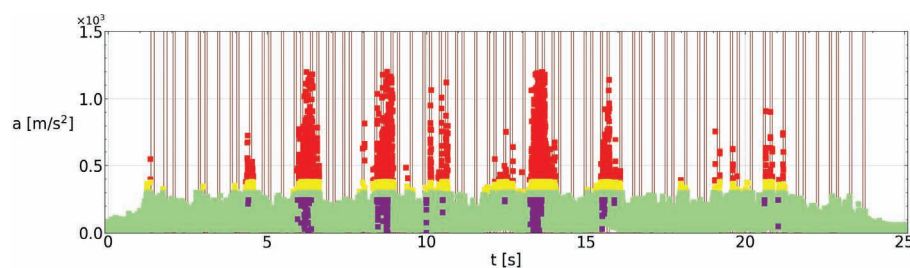
W tabeli **1** przedstawiono wyniki
analizy przykładowych przebiegów
drgań. Analiza wartości maksimów
amplitudy potwierdza opisane po-
wyżej różnice jakościowe poziomów,
dające się w prosty sposób odczytać
z wykresów generowanych przez
system pomiarowo-informatyczny
InfraNoise. Wskaźnik przekroczeń de-
finiowany jest jako stosunek liczby
przekroczeń do sumy analizowanych
próbek.

Podsumowanie

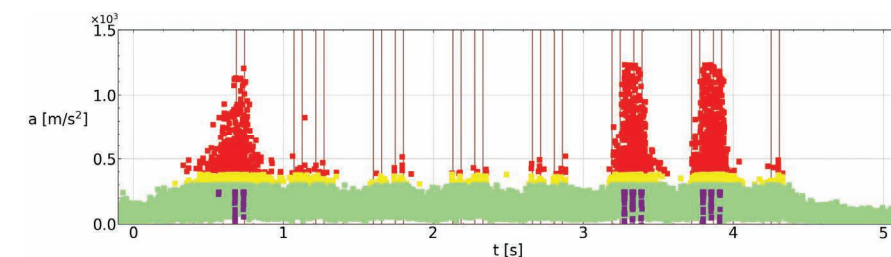
W artykule przedstawiono ogólną
charakterystykę systemu pomia-
rowego zaprojektowanego oraz
zbudowanego na potrzeby moni-
torowania szeregu parametrów tech-
nicznych, ruchowych oraz środowi-
skowych, związanych z przejazdami
pociągów (oraz innych pojazdów
szynowych) oraz ich oddziaływaniem
na infrastrukturę torową. W celu za-
prezentowania wybranego zakresu
funkcjonalności opracowywanego
systemu, przedstawione i omówione



18. Analiza progowa kompletu sygnałów (z modułów D1-D4) przyspieszeń drgań toków szynowych – przypadek 1, źródło: opracowanie własne



19. Analiza progowa kompletu sygnałów (z modułów D1-D4) przyspieszeń drgań toków szynowych – przypadek 2, źródło: opracowanie własne



20. Analiza progowa kompletu sygnałów (z modułów D1-D4) przyspieszeń drgań toków szynowych – przypadek 3, źródło: opracowanie własne

Tab. 1. Wyniki analizy progowej przebiegów drgań toków szynowych prezentowanych przypadków

Przypadek	Poziom typowej eksploatacji [%]	Poziom czułości [%]	Poziom interwencji [%]	Wskaźnik przekroczeń [-]	Wartość maksymalna [m/s²]	Otoczenie osi nr
Zdarzenie 1	99,91	0,08	0,01	0,003	914,2	1
Zdarzenie 2	98,88	0,49	0,63	0,05	1199,7	81
Zdarzenie 3	97,49	0,99	1,52	0,24	1232,9	25

zostały (na tle impulsów osi jezdnych oraz ciśnienia akustycznego) przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych. Jak wykazano, przebiegi te stanowią charakterystyczną informację o interakcji pomiędzy pojazdem a torem. Zróżnicowane wartości syntetyczne oraz podstawowe statystyki mają zastosowanie w ocenie przejazdów w określonej kategorii, uwzględniającej takie parametry jak długość pojazdu, jego masę oraz prędkość. Oprócz tego każdy pojedynczy przebieg charakteryzuje dany pojazd i umożliwia identyfikację przekroczeń pewnych poziomów przyspieszeń z możliwością przypisania tych wartości do poszczególnych członów pojazdu. Zastosowana metodyka pomiarowa zapewnia analizę poziomów przyspieszeń z dokładnością do pojedynczej osi oraz strony toru (z uwzględnieniem kierunku ruchu). Integracja wybranych parametrów stanowi podstawę do opracowania skutecznej metody monitorowania wpływu ruchu pociągów na oddziaływanie środowiskowe. ◀

Materiały źródłowe

[1] Alemi A., Corman F., Lodewijks G.: Condition monitoring approaches for the detection of railway wheel defects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* 2016;231(8):961-981. doi:10.1177/0954409716656218

[2] Alsina-Pagès R.M., Bellucci P., Zambon G.: Smart Wireless Acoustic Sensor Network Design for Noise Monitoring in Smart Cities. *Sensors* 2020, 20. <https://doi.org/10.3390/s20174765>

[3] Bałuch, M. (2009). Graniczne wartości nadwyżek dynamicznych przy wykrywaniu przez urządzenia detekcji taboru płaskich miejsc na

kołach. *TTS*, (7 8), s. 71 76.

[4] Chrostowski P., Karwowski K., Licow R., Michna M., Szafrński M., Wilk A., Jarzębowicz L., Skibicki J., Judek S., Grulkowski S., et al: System for Monitoring Motion, Technical, and Environmental Parameters in Railway Traffic Using a Sensor Network. *Appl. Sci.* 2025, 15, 11276. <https://doi.org/10.3390/app152011276>

[5] Chrostowski P., Wilk A., Grulkowski S., Licow R., Michna M., Jarzębowicz L., Skibicki J., Judek S., Karwowski K., Szafrński M., et al: Zintegrowany system monitoringu oddziaływania kolei na środowisko. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 101 NR 3/2025, doi:10.15199/48.2025.03.37

[6] Chrostowski, P., Wilk, A., Karwowski, K., Grulkowski, S., Licow, R., Rafajłowicz, W., Ratajczak, A., Idzikowski, R., Szafrński, M., Widerski, T., Dąliga, K., Skibicki, J., Jarzębowicz, L., Michna, M., Judek, S., Karkosińska-Brzozowska, N., & Omilianowicz, J. (2023). *Zintegrowany system monitoringu oddziaływań transportu kolejowego na środowisko*, ISBN 978-83-63492-20-5, Kraków, Polska

[7] Dingcheng Zhang, Min Xie, Moussa Hamadache, Mani Entezami, Edward Stewart: An Adaptive Graph Morlet Wavelet Transform for Railway Wayside Acoustic Detection, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 529, 2022, 116965, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116965>

[8] Diyar Khan, Rafał Burdzik: Measurement and analysis of transport noise and vibration: A review of techniques, case studies, and future directions, *Measurement*, Volume 220, 2023, 113354, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113354>

[9] Diyar Khan, Rafał Burdzik: Noise and vibration as environmental impacts of transportation: comprehensive review, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Volume 34, 2025, 101578, ISSN 2590-1982, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101578>

[10] Fernández-Bobadilla H. A., Martín U.: Modern Tendencies in Vehicle-Based Condition Monitoring of the Railway Track, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-44, 2023, Art no. 3507344, doi: 10.1109/TIM.2023.3243673

[11] Fu W., He Q., Feng Q., Li J., Zheng, F., Zhang B.: Recent Advances in Wayside Railway Wheel Flat Detection Techniques: A Review. *Sensors* 2023, 23, 3916. <https://doi.org/10.3390/s23083916>

[12] George Lederman, Siheng Chen, James Garrett, Jelena Kovačević, Hae Young Noh, Jacobo Bielak: Track-monitoring from the dynamic response of an operational train, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 87, Part A, 2017, Pages 1-16, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.041>

[13] Guiming Mei, Guangxiong Chen: Slip of wheels on rails: The root cause for rail undulant wear, *Wear*, Volume 523, 2023, 204727, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204727>

[14] <https://docs.arduino.cc/hardware>, dostęp 12.12.2025

[15] <https://www.analog.com/en/products/adxl1001.html>, dostęp 12.12.2025

[16] International Organization for Standardization. (2013). *EN ISO 3095:2013 Acoustics - Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles (ISO 3095:2013)*. International Organi-

- zation for Standardization
- [17] Lian, Yanxin, Zhang, Yan, A1 Gao, Tianci, Liu, Xiaozhou: A feature extraction framework for metro rail corrugation detection using onboard vibration and noise monitoring data, *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2025, <https://doi.org/10.1093/iti/liaf010>
- [18] Licow R.: Ocena uszkodzeń powierzchni tocznej szyn kolejowych za pomocą zjawisk wibroakustycznych. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2018
- [19] Mańka A., Ćwiek J.: Ilościowa i jakościowa ocena informacji o pojeździe kolejowym na podstawie pomiaru drgań szyny kolejowej. Monografia pod redakcją S. Grulkowskiego: Wybrane zagadnienia budowy, projektowania i eksploatacji dróg szynowych. Wyd. Politechniki Gdańskiej 2025, ISBN: 978-83-7348-940-0
- [20] Mihăilescu I., Popa G., Tudor E., Vasile I., Ghet M.A.: Experimental Study of Wheel-to-Rail Interaction Using Acceleration Sensors for Continuous Rail Transport Comfort Evaluation. *Sensors* 2023, 23, 8064. <https://doi.org/10.3390/s23198064>
- [21] Nowakowski T.: Opracowanie metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju w oparciu o pomiary przytorowe. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Poznań 2020
- [22] Orinaite U., Burdzik R., Ranjan V., Ragulskis M.: Prediction of approaching trains based on H-ranks of track vibration signals, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (2025), 40, 614–631, <https://doi.org/10.1111/mice.13349>
- [23] PKN. (2024). PN-EN IEC 61672-1:2024 Elektroakustyka — Mierniki poziomu dźwięku — Część 1: Wy-maganie. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny
- [24] Polak K.: Ocena wpływu hałasu generowanego przez pojazdy kolejowe zwiększonych prędkości na otoczenie. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska 2022
- [25] Rafał Burdzik, Diyar Khan: An overview of the current state of knowledge and technology on techniques and procedures for signal processing, analysis, and accurate inference for transportation noise and vibration, *Measurement*, Volume 252, 2025, 117314, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117314>
- [26] Shao Z., Bai W., Dai J., Yu H., Tong Y.: Monitoring and analysis of railway-induced vibration and structure-borne noise in a transit oriented development project, *Structures*, Volume 57, 2023, 105097, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105097>
- [27] Słowiński P.: Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Katowice 2023
- [28] Tao Xin, Sen Wang, Liang Gao, Hailong Huo, Yu Ding, Pengsong Wang, Peng Chen, Penghui Liu: Field measurement of rail corrugation influence on environmental noise and vibration: A case study in China, *Measurement*, Volume 164, 2020, 108084, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108084>
- [29] Thompson D.: Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modeling and Means of Control, Elsevier 2024. ISBN: 9780128219799
- [30] Wang K, Zheng K, Cai Y. Study of the spatial distribution of vertical and longitudinal acceleration and sensor installation position of ballast track based on wheel-rail coupling model. *PLoS One*. 2025 Mar 24;20(3):e0319803. doi: 10.1371/journal.pone.0319803. PMID: 40127079; PMCID: PMC11932475
- [31] Wróbel J., Bury P., Zając M., Kierkowski A., Tubek S., Blaut J.: Fault Detection and Diagnostic Methods for Railway Systems – A Literature Survey, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(6), 361–391. <https://doi.org/10.12913/22998624/191762>
- [32] Xinwen Yang, Zhiang Sun, Yingjie Zhang: A machine learning approach to identify rail corrugation and wheel polygon with the vehicle's vibration and noise signals, *Tribology International*, Volume 211, 2025, 110876, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110876>
- [33] Yang Wang, Hong Xiao, Shaolei Wei, Xiubo Liu, Jiafu Cai, Weize Zhao, Characterization and warning criteria of metro rail corrugation based on vibration and noise data fusion, *Applied Acoustics*, Volume 235, 2025, 110686, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110686>
- [34] Zelin Chen, Xiaopei Cai, Xueyang Tang, Meng Wang, Weibin Liu: A sensitive wavelength-enhanced reconstruction algorithm for track quality assessment based on measured data and vehicle dynamics, *Measurement*, Volume 240, 2025, 115627, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115627>
- [35] Zeng, Y., Núñez, A., & Li, Z. (2024). Railway sleeper vibration measurement by train-borne laser Doppler vibrometer and its speed-dependent characteristics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/mice.13150>