

Metodyka pomiarów TDR i możliwości jej zastosowania w ocenie właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej

Methodology of TDR Measurements and Their Potential Application in the Evaluation of the Acoustic Properties of Railway Track



Michał Urbaniak

Dr inż.

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

michal.urbaniak@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5296-5184



Roksana Licow

Dr inż.

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

roksana.licow@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4368-0064

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwość stosowania narzędzi analizy modalnej do oceny właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem parametru Track Decay Rate (TDR). Omówiono znaczenie analizy modalnej w badaniach konstrukcji torów oraz podstawy generowania drgań i hałasu toczenia. Przedstawiono również przykłady praktyczne związane z wykorzystaniem tłumików szynowych oraz ich wpływem na modalną odpowiedź toru. Zaprezentowano zasady wyznaczania TDR zgodnie z normą PN-EN 15461:2011, obejmujące rozmieszczenie punktów pomiarowych, dobór młotków modalnych i akcelerometrów oraz wymagania dotyczące rejestracji sygnału, wraz z omówieniem praktycznych aspektów prowadzenia pomiarów. Zwrócono uwagę na ograniczenia metody, w tym szczególną podatność wyników pomiarów i analiz modalnych na doświadczenie osób wykonujących badania oraz analizujących rejestrowane sygnały drganiowe. Analiza literatury potwierdza, że analiza modalna i parametry TDR stanowią efektywne narzędzia diagnostyczne w ocenie stanu toru oraz skuteczności stosowanych środków redukcji hałasu w transporcie szynowym.

Słowa kluczowe: Track Decay Rate; TDR; Hałas środowiskowy; Nawierzchnia szynowa, Transport szynowy

Abstract: This paper presents the potential application of modal analysis tools for evaluating the acoustic properties of railway track surfaces, with a particular focus on the Track Decay Rate (TDR) parameter. The role of modal analysis in the investigation of track structures, as well as the fundamental mechanisms of vibration and rolling noise generation, is discussed. Practical examples illustrating the use of rail dampers and their impact on the track's modal response are also provided. The paper outlines the procedures for determining TDR in accordance with the PN-EN 15461:2011 standard, including the layout of measurement points, the selection of modal hammers and accelerometers, and the requirements for signal acquisition, along with practical considerations for conducting measurements. Attention is drawn to the method's limitations, particularly the sensitivity of measurement and modal analysis results to the experience of the personnel performing the tests and analyzing the recorded vibration signals. A review of the literature confirms that modal analysis and TDR parameters are effective diagnostic tools for assessing track condition and evaluating the effectiveness of noise reduction measures in rail transport.

Keywords: Track Decay Rate; TDR; Environmental noise; Railway track; Rail transport

Wstęp

Pomiary modalne stanowią jedną z podstawowych metod badania charakterystyk dynamicznych obiektów mechanicznych i konstrukcyjnych. Umożliwiają wyznaczenie częstotliwości własnych, postaci drgań oraz poziomów tłumienia, czyli parametrów opisujących odpowiedź konstrukcji na pobudzenia zewnętrzne. Dzięki temu stanowią narzędzie służące do identyfikacji zachowania dynamicznego obiektu oraz oceny

wpływu obciążeń eksploatacyjnych i zmian strukturalnych [1–5]. W literaturze podkreśla się, że analiza modalna jest istotna w projektowaniu, diagnostyce oraz prognozowaniu trwałości układów inżynierskich.

W inżynierii lądowej analiza modalna wykorzystywana jest do oceny stanu technicznego obiektów infrastrukturalnych. Zmiany parametrów modalnych stanowią w tym obszarze wrażliwe wskaźniki degradacji konstrukcji. Techniki modalne stosuje się zarówno w obiektach mostowych w

warunkach eksploatacyjnych z wykorzystaniem metod operacyjnych [6–8], jak i w konstrukcjach o złożonej geometrii, w tym w obiektach zabytkowych wykonanych z drewna i murów. Pozwala to określić współpracę elementów oraz sztywność globalną konstrukcji [9].

Modalna identyfikacja znajduje zastosowanie również w diagnostyce urządzeń energetycznych i systemów poddanych zmiennym obciążeniom. W turbinach wiatrowych metody operacyjne umożliwiają

ocenę zmian tłumienia oraz częstotliwości własnych podczas pracy, co pozwala na wczesne wykrywanie degradacji elementów nośnych. W literaturze szeroko omawia się analizy konstrukcji turbin wiatrowych w środowisku morskim i lądowym, w których modalna identyfikacja odgrywa kluczową rolę w monitoringu stanu konstrukcji [10, 11]. Podobne metody stosuje się w diagnostyce struktur maszynowych, między innymi w wykrywaniu niewyważenia i pęknięć wałów, gdzie zmiany parametrów drganiowych pozwalają na precyzyjne zlokalizowanie uszkodzeń [12].

W inżynierii kolejowej analiza modalna wykorzystywana jest do badania konstrukcji toru oraz propagacji drgań w układzie szyna–podtorze. Modalny opis toru umożliwia określenie podatności elementów oraz zdolności układu do tłumienia fal zginających rozprzestrzeniających się w szynie. W badaniach dotyczących modelowania dynamicznego podtorza stosuje się tzw. modele wielołałowe z zastosowaniem analizy modalnej, które pozwalają na ocenę odpowiedzi systemu torowego na obciążenia eksploatacyjne [13].

W innym obszarze badań analiza modalna służy do oceny skuteczności urządzeń ograniczających drgania i hałas, takich jak tłumiki szynowe. W literaturze przedstawiono analizy parametryczne oceniające ich wpływ na charakterystykę dynamiczną toru [14] oraz badania eksperymentalne dotyczące procedur testowania tych urządzeń [15]. Coraz większą uwagę poświęca się również parametrom Track Decay Rate (TDR), czyli współczynnikowi tłumienia wzdłużnego toru, który jest opisywany jako spadek poziomu drgań wzdłuż szyny w funkcji odległości wyrażony w dB / m. Są one modalnym miernikiem właściwości dynamicznych toru i odgrywają istotną rolę w modelowaniu hałasu toczenia oraz ocenie skuteczności środków ograniczających drgania [16].

Charakterystyka zjawisk wibroakustycznych w transporcie kolejowym

Zjawiska wibroakustyczne generowane przez transport kolejowy wymuszają prowadzenie badań w tym zakresie a na podstawie uzyskiwanych wyników proponowanie rozwiązań mających na celu ich minimalizację oraz ograniczenie niekorzystnego wpływu na środowisko. Badania wibroakustyczne prowadzone są w kontekście analizy komfortu pasażerów, trwałości infrastruktury kolejowej, predykcji uszkodzeń taboru kolejowego czy oddziaływania kolei na otoczenie. Źródłem powstawania sygnałów wibroakustycznych podczas ruchu pojazdów szynowych jest przede wszystkim dynamiczna interakcja zachodząca na styku koło–szyna. Poziom rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych zależy w istotnym stopniu od prędkości przejazdu badanego składu oraz od stanu technicznego infrastruktury kolejowej i taboru.

Nawierzchnia kolejowa, rozumiana jako układ toru wraz z przytwierdzeniami, podkładami i podsypką, pełni kluczową rolę w przenoszeniu oddziaływań dynamicznych generowanych przez ruch pojazdów kolejowych, które następnie poprzez warstwę ochronną przekazywane są do podtorza. Jej sztywność, jednorodność oraz stan techniczny determinują częstotliwości i amplitudy rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych. Drgania propagują zarówno w konstrukcji toru, jak i w gruncie, obejmując szerokie spektrum częstotliwości – od kilku Hz, związanych z interakcją koło–szyna, po kilkanaście kHz, charakterystycznych dla hałasu toczenia. W przypadku nawierzchni z uszkodzoną powierzchnią toczną obserwuje się wyraźny wzrost poziomu drgań i hałasu.

Charakterystyka akustyczna transportu kolejowego zależy również od rodzaju nawierzchni. Tory podsyp-

kowe dzięki elastyczności podtorza częściowo tłumią drgania i zmniejszają hałas przenoszony do gruntu, natomiast tory bezpodsypkowe, o większej sztywności, generują wyższe poziomy dźwięku emitowanego do środowiska. Stan techniczny nawierzchni, w tym chropowatość szyn i stopień zużycia elementów toru, bezpośrednio wpływa na intensywność hałasu toczenia i drgań konstrukcji.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że zjawiska akustyczno-drganiowe w transporcie kolejowym są ściśle powiązane z charakterystyką nawierzchni kolejowej. Jej konstrukcja, sztywność i stan techniczny decydują o sposobie propagacji drgań oraz poziomie hałasu, a odpowiednio zaprojektowane i utrzymane elementy toru mogą istotnie ograniczać ich negatywne skutki zarówno dla pasażerów, jak i otoczenia. Współczesne systemy kolei dużych prędkości oraz transportu miejskiego kładą coraz większy nacisk na projektowanie nawierzchni w sposób minimalizujący emisję hałasu i drgań, co stanowi ważny element zrównoważonego rozwoju transportu szynowego.

Hałas środowiskowy w transporcie szynowym

Hałas w transporcie kolejowym pozostaje jednym z kluczowych wyzwań środowiskowych zarówno w Polsce, jak i na świecie. Najbardziej narażeni są mieszkańcy dużych aglomeracji, gdzie zagęszczenie infrastruktury kolejowej i intensywność ruchu pociągów są największe. Źródła hałasu obejmują m.in. hałas toczenia, hałas trakcyjny oraz aerodynamiczny, który staje się dominujący przy prędkościach powyżej 160 km/h, szczególnie w kolejach dużych prędkości [17]. Na poziom emitowanego hałasu wpływają również czynniki zewnętrzne, takie jak geometria terenu, elementy infrastruktury czy warunki pogodowe. Polska ma jedną z naj-

gęstszych sieci kolejowych w Europie a problem hałasu dotyka zwłaszcza obszarów metropolitalnych, gdzie długotrwała ekspozycja na nadmierne natężenie dźwięku może prowadzić do zaburzeń snu, wzrostu poziomu stresu czy problemów kardiologicznych [18]. Odpowiedzią na potrzebę monitoringu i obniżania poziomów dźwięku generowanych do środowiska jest przeprowadzanie badań środowiskowych w zakresie hałasu [19–22].

Prowadzone badania są realizowane zgodnie z obowiązującymi normatywnymi i polegają na dobowym pomiarze hałasu dla pory nocnej i dziennej. Dodatkowo, oprócz wymaganych pomiarów w dziedzinie czasu, rekomenduje się rozszerzenie analiz w zakresie dominujących częstotliwości w sygnale akustycznym poprzez analizę czasowo-częstotliwościową lub analizę tercji. Zaawansowana analiza pozwala na precyzyjne sformułowanie problemu a następnie prowadzi do zastosowania określonych rozwiązań ograniczających hałas a dokładnie ograniczających zbadane studium przypadku. Metodyka badań jest prowadzona zgodnie z europejskimi metodykami oceny i normami, takimi jak CNOSSOS-EU czy normami dotyczącymi chropowatości szyn i kół [23–26]. W zależności czy studium przypadku dotyczy stanu infrastruktury, położenia linii kolejowej albo typów pojazdów i ich stanu technicznego eksploatujących badaną linię kolejową zarządcy infrastruktury decydują o stosowaniu określonych rozwiązań. Należą do nich ekrany akustyczne (wysokie i niskie), absorbery szynowe, czynności utrzymaniowe takie np. szlifowanie szyn czy wymianę elementów infrastruktury. Te działania wpisują się w realizację zaleceń prawa krajowego i unijnego, w tym dyrektywy 2002/49/WE dotyczącej zarządzania hałasem w środowisku. Coraz większe znaczenie zyskują także systemy monitorowania hałasu w czasie rzeczywistym, po-



1. Przykład stosowanych tłumików szynowych montowanych na szycie szyny. Materiał własny

zwalające na szybkie reagowanie na przekroczenia norm. Dzięki rozwojowi technologii oraz konsekwentnym działaniom modernizacyjnym możliwe staje się stopniowe ograniczanie negatywnego oddziaływania hałasu kolejowego na mieszkańców i środowisko naturalne.

Współczynnik tłumienia wzdłużnego toru (TDR)

Wykorzystanie pomiarów i analizy modalnej do oceny charakterystyki akustycznej nawierzchni kolejowej

Modalna analiza nawierzchni kolejowej stanowi podstawowe narzędzie oceny jej właściwości dynamicznych (modalnych) oraz akustycznych. Parametry modalne, takie jak częstotliwości własne, postacie drgań i współczynniki tłumienia, opisują zdolność toru do propagacji i rozpraszania energii drganiowej generowanej przez koło pojazdu. W kontekście hałasu toczenia szczególne znaczenie ma modalna charakterystyka szyny, determinująca poziom emisji w zakresie od 100 Hz do 5 kHz, czyli w paśmie odpowiedzialnym za główne komponenty hałasu generowanego na styku koło–szyna [8, 27–29].

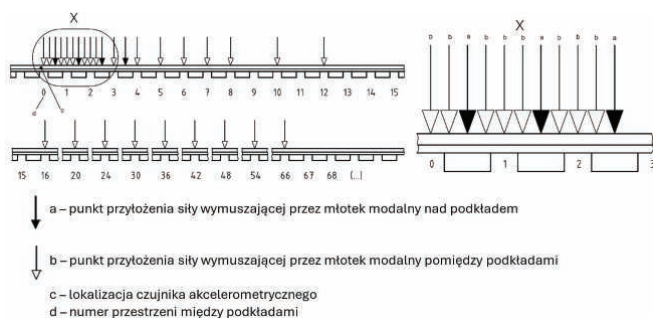
Z modalnego punktu widzenia istotne jest określenie sztywności zginania szyny (bending stiffness of the rail), jej tłumienia oraz sprzężenia z elementami podtorza (podkładami, przytwierdzeniami i podsypką tłuczniową). Parametry te wpływają na warunki propagacji fal zginających w szynie (bending waves) oraz szybkość ich zanikania. W wielu badaniach wykazano, że właściwości modalne szyny mają bezpośredni

związek z poziomem hałasu toczenia i mogą być skutecznie wykorzystywane do oceny efektywności środków redukcji drgań [27, 28, 30, 31]. Modalne pomiary nawierzchni stosuje się również jako dane wejściowe do modeli MES (Metoda Elementów Skończonych) służących do predykcji odpowiedzi dynamicznej toru w warunkach eksploatacyjnych [20].

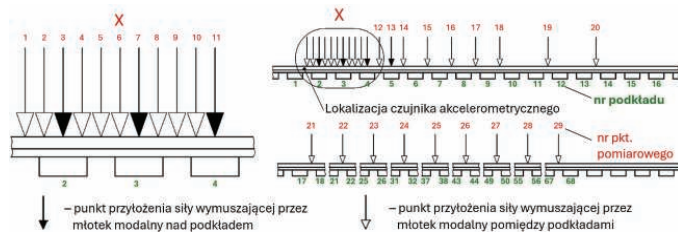
Istotnym obszarem zastosowań analizy modalnej są rozwiązania ograniczające drgania i hałas, takie jak tłumiki szynowe. Urządzenia te, mocowane do szynki szyny (rysunek 1), zwiększają lokalne tłumienie poprzez dodatkową masę i układ sprężysto-tłumiący. W Polsce absorbery szynowe zostały zastosowane m.in. na zmodernizowanej linii kolejowej nr 9 Warszawa–Gdynia na odcinku Pszczółki–Pruszcz Gdański [32, 33].

parametrycznych wykazano, że tłumiki szynowe mogą znacząco wpływać na modalny kształt odpowiedzi szyny oraz na wartości parametrów TDR, czyli szybkości zanikania fal zginających w szynie [14]. Eksperymentalnie potwierdzono również, że odpowiednio dobrane tłumiki zmniejszają poziom energii drgań w paśmie istotnym dla hałasu toczenia, co znajduje odzwierciedlenie w obniżonych wartościach TDR w zakresie średnich i wysokich częstotliwości [15].

Z modalnych pomiarów nawierzchni kolejowej korzystają również zaawansowane modele akustyczne, których celem jest przewidywanie poziomu hałasu toczenia w zależności od stanu toru, rodzaju przytwierdzeń oraz zastosowanych środków tłumienia [28, 31]. W tych modelach



2. Siatka punktów wymuszenia względem ustalonego punktu pomiarowego dla pomiarów TDR w torze kolejowym zgodnie z normą PN-EN 15461:201. Opracowanie własne na podstawie [29]



3. Rekomendowana modyfikacja opisu siatki punktów wymuszenia względem ustalonego punktu pomiarowego dla pomiarów TDR w torze kolejowym. Opracowanie własne na podstawie [29, 34]



a)

4. Młotki modalne wykorzystywane przy pomiarach TDR w torze kolejowym:
a) mały młotek modalny PCB Piezotronics model 086C03,
b) duży młotek modalny PCB Piezotronics model TLD086D20. Materiał własny



b)

Tab. 1. Zestawienie porównawcze specyfikacji technicznej młotków modalnych PCB Piezotronics dla wybranych modeli 086C03 i TLD086D20. Opracowanie własne na podstawie [35, 36]

Parametr	PCB Piezotronics model 086C03	PCB Piezotronics model TLD086D20
Czułość	2,25 mV/N ($\pm 15\%$)	0,23 mV/N ($\pm 15\%$)
Zakres pomiarowy siły	$\pm 2\,224\text{ N pk}$	$\pm 22\,240\text{ N pk}$
Częstotliwość rezonansowa	$\geq 22\text{ kHz}$	$\geq 12\text{ kHz}$
Nieliniowość	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Masa młotka	0,16 kg	1,1 kg
Średnica głowki	1,57 cm	5,1 cm
Średnica końcówki	0,63 cm	5,1 cm
Długość młotka	21,6 cm	37 cm

Metoda pomiarów TDR w transporcie szynowym

Pomiary Track Decay Rate przeprowadza się zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 15461:2011 [29], która definiuje jednolitą procedurę wyznaczania szybkości zanikania drgań zginających szyny w pasmach trzecyjnych. Badania wykonuje się na typowym, jednorodnym odcinku toru o klasycznym rozstawie podkładów wynoszącym zazwyczaj około 0,6 m. Długość sekcji pomiarowej powinna umożliwiać rozmieszczenie punktów pomiarowych na odcinku o długości około 41 metrów, przy zachowaniu ciągłości i jednorodności toru co najmniej 20 metrów przed i za wyznaczonym odcinkiem. Zgodnie z normą punkty są tradycyjnie numerowane według okien między podkładami, a nie samych podkładów, co jest nietypowe w badaniach kolejowych i utrudnia analizę porównawczą (rys-



a)



b)

5. Końcówki młotków modalnych stosowane w pomiarach TDR:
a) stalowa końcówka z zaokrągloną główką zalecana do pomiarów w wysokich częstotliwościach,
b) standardowe końcówki w zestawie do młotka modalnego PCB Piezotronics model 086C03. Materiał własny

wykorzystywane są zarówno pomiary laboratoryjne, jak i terenowe, obejmujące pełną charakterystykę modalną szyn wraz z oceną rozkładu częstotliwości własnych i tłumienia w

warunkach zabudowy torowej.

Tab. 2. Specyfikacja techniczna akcelometru Brüel & Kjær model 4534-B. Opracowanie własne na podstawie [37]

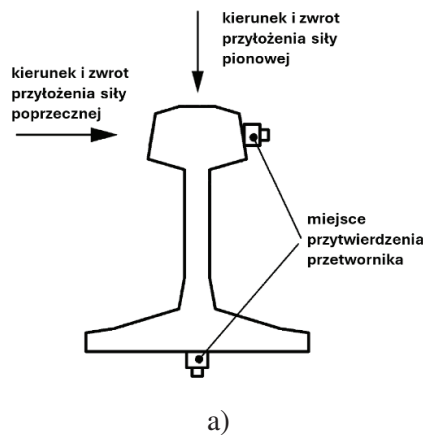
Parametr	Wartość
Zakres częstotliwości	0,2 Hz – 12 800 Hz
Wrażliwość	10 mV · (ms ⁻²) ⁻¹
Masa	8,6 g
Maksymalny poziom operacyjny (szczytowy)	71 g
Rezonansowa częstotliwość	≥ 38 kHz
Poziom własnego szumu (rms)	±130 µg
Zakres temperatur pracy	-55 °C do +125 °C
Montaż (gwint)	10-32 UNF
Złącze	10-32 UNF
Wersja wyjścia	CCLD
TEDS (samozapisujące dane czujnika)	Tak

nek 2).

W oparciu o doświadczenia innych badaczy [34] i własne rekomenduje się wprowadzenie ciągłej numeracji podkładów, a nie okienek między nimi, od nr 1 wzwyż, oraz – jeśli potrzebne – numerację samych punktów pomiarowych umieszczonych na stopce szyny, co zwiększa jednoznaczność i czytelność wyników (rysunek 3).

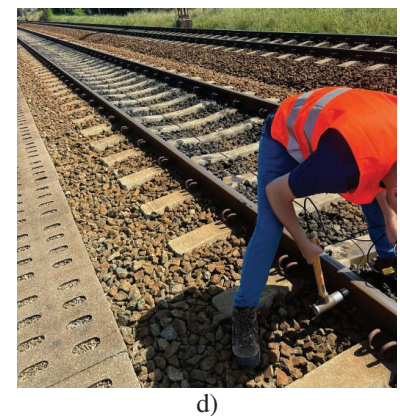
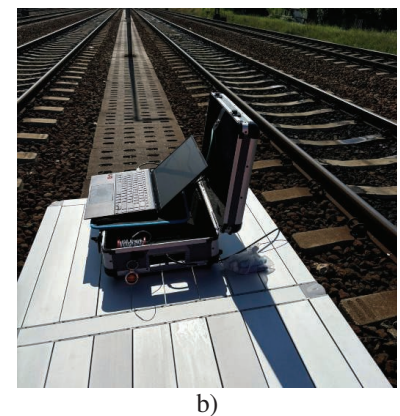
Wymuszenie drgań wprowadzane jest w punktach pomiarowych rozmieszczonych w sposób zgodny z PN-EN 15461:2011 [29], obejmujący zarówno przestrzenie między podkładami, jak i bezpośrednio nad nimi, przy czym wraz ze wzrostem odległości od czujnika rosną odstęp między punktami pomiarowymi. Przykładowa sekwencja pomiarów obejmuje kilka punktów równomiernie rozmieszczonych między pierwszymi podkładami (np. nr 1 i 2), punkty nad kolejnymi podkładami (nr 2–5), a także wybrane miejsca pomiarowe między dalszymi podkładami wzdłuż odcinka toru, tworząc reprezentatywną siatkę pomiarową dla całego badanego fragmentu toru. Takie rozmieszczenie pozwala uchwycić zarówno charakterystyki modalne lokalnych fragmentów szyny, jak i globalną odpowiedź dynamiczną odcinka toru.

Do wzbudzania drgań stosuje się młotki modalne o znanej charakterystyce



6. a) Schemat lokalizacji montażu czujników podczas pomiarów TDR dla dwóch podstawowych punktów mocowania akcelometru pod stopką oraz na powierzchni bocznej główki szyny. Opracowanie własne na podstawie [29]

b) przykład jednoosiowego akcelometru piezoelektrycznego Hottinger Brüel & Kjær model 4534-B wraz z magnetycznym adapterem mocującym wykorzystywanym w pomiarach TDR. Materiał własny



7. Dokumentacja zdjęciowa z przeprowadzonych pomiarów TDR:

a) numeracja punktów pomiarowych, b) stanowisko rejestracji pomiarów, c) pomiar z użyciem małego młotka modalnego, d) pomiar z użyciem dużego młotka modalnego. Materiał własny

stycie siłowej. W zależności od wymaganego pasma częstotliwości rezonansowej używa się młotka małego (400–5000 Hz) lub dużego (50–400 Hz) [34]. Przykładowe modele to PCB 086C03 (mały młotek) i PCB 086D20 (duży młotek) z zestawem wymiennych końcówek o różnej twardości

(rysunek 4).

Specyfikację z charakterystyką techniczną wskazanych młotków modalnych przedstawiono w tabeli 1.

W celu zapewnienia odpowiedniej amplitudy siły w wymaganym paśmie częstotliwości, stosuje się koń-

cówki o najwyższej twardości, co jest szczególnie istotne podczas pomiarów w górnym zakresie częstotliwości. Istotny jest także kształt końcówki młotka — powinien on zapewniać możliwie powtarzalną powierzchnię kontaktu z szyną przy każdym uderzeniu. Z tego względu zaleca się stosowanie stalowej końcówki z zaokrągloną główką, zamiast standardowej końcówki płaskiej (rysunek 5).

Odbiór sygnałów drganiowych realizowany jest przy użyciu akcelorometrów piezoelektrycznych o minimalnej masie własnej, tak aby ich wpływ na lokalną dynamikę szyny był pomijalny. Czujniki mocuje się sztywno — poprzez przykręcenie, przyklejenie lub przytwierdzenie magnetyczne — w dwóch podstawowych lokalizacjach: pod stopką szyny oraz na bocznej powierzchni główki szyny (rys. 6.).

Specyfikację z charakterystyką techniczną przetwornika akcelometrycznego akcelometru Brüel & Kjær model 4534-B przedstawiono w

tabeli 2.

Pomiary wykonuje się w czterech etapach, obejmujących wszystkie kombinacje położenia czujnika i rodzaju młotka: najpierw czujnik pod stopką, pomiar małym młotkiem, następnie dużym; następnie czujnik na główce szyny, również z pomiarem małym i dużym młotkiem. Każdy punkt pomiarowy testuje się co najmniej trzy razy, w praktyce stosuje się pięć uderzeń, aby zwiększyć powtarzalność i stabilność późniejszych analiz i wniosków. Fragment dokumentacji zdjęciowej został przedstawiony na rysunku 7.

Rejestracja sygnału przebiega synchronicznie z częstotliwością próbkowania co najmniej 10 kHz, co zapewnia prawidłową rekonstrukcję odpowiedzi impulsowej i umożliwia wyznaczenie TDR w pasmach tercjowych w zakresie 100–5000 Hz [29]. Przykłady zarejestrowanych odpowiedzi w pierwszym punkcie pomiarowym przedstawiono na rysunku 8.

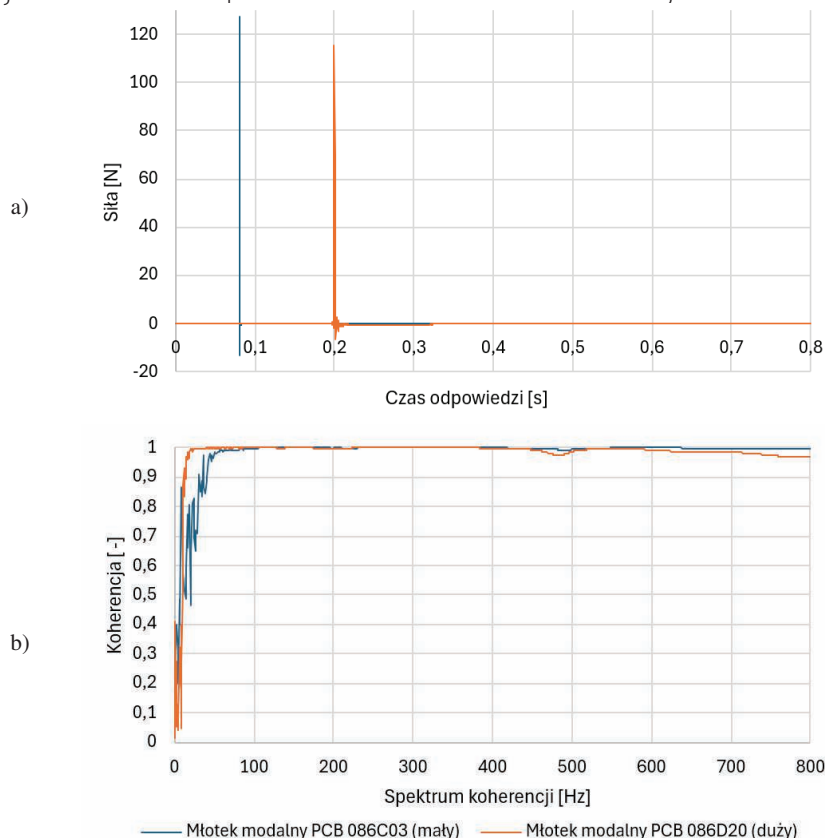
Metoda TDR jest bezinwazyjna i

pozwała na określenie charakterystyki propagacji drgań w szynie rzeczywistego toru kolejowego, a co za tym idzie charakterystyki hałasowej nawierzchni, bez konieczności wprowadzania ruchu pociągów. Jednocześnie umożliwia badanie jedynie reprezentatywnego odcinka toru w krótkim czasie, a nie całego toru, co stanowi ograniczenie. Dodatkowo, metoda napotyka trudności w przypadku konstrukcji torów bezpodsynekowych, gdzie charakterystyki dynamiczne szyny i podtorza różnią się znacząco od standardowych układów podsynekowych i ograniczona jest swoboda w lokalizacji czujników.

Podsumowanie

Przeprowadzone studium literatury potwierdza, że narzędzia analizy modalnej stanowią istotne i efektywne metody oceny właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej. Modalna charakterystyka szyny oraz parametry TDR pozwalają dokładnie opisać dynamikę toru w zakresie częstotliwości istotnych dla hałasu toczenia. Dzięki temu możliwa jest precyzyjna ocena wpływu konstrukcji toru, stanu technicznego nawierzchni oraz zastosowanych środków tłumiących na propagację drgań. Chociaż metodyka pomiarowa opiera się na PN-EN 15461:2011, wprowadzono pewne modyfikacje dotyczące opisu toru pomiarowego, które mogą poprawić powtarzalność badań i umożliwić porównania między różnymi odcinkami linii kolejowych.

Literatura wskazuje również, że odpowiednio dobrane tłumiki szynowe mogą skutecznie obniżyć poziom energii drgań i redukować emisję hałasu toczenia. Należy jednak podkreślić, że pomiary modalne i analiza TDR są wrażliwe na doświadczenie osób prowadzących badania oraz interpretujących sygnały, co może wpływać na jakość i wiarygodność wyników. Dlatego kluczowe jest stosowanie ujednoliconych procedur



8. a) Przebieg czasowy typowego sygnału impulsu generowanego przez uderzenie młotkiem do pomiarów modalnych

b) Charakterystyka spektrum koherencji dla typowego sygnału impulsu generowanego przez uderzenie młotkiem do pomiarów modalnych
Opracowanie własne

oraz odpowiednie przygotowanie zespołów badawczych.

Metoda TDR jest bezinwazyjna i pozwala określić charakterystykę propagacji drgań w szynie rzeczywistego toru kolejowego, a tym samym hałasową charakterystykę nawierzchni, bez konieczności wprowadzania ruchu pociągów. Jednocześnie umożliwia badanie jedynie reprezentatywnego odcinka toru w krótkim czasie, a nie całej linii. W przypadku torów bezpodsypkowych nadal występują ograniczenia związane z warunkami montażu czujników i specyfiką konstrukcji, co stanowi istotne ograniczenie metody.

Podsumowując, analiza modalna stanowi cenne narzędzie wspierające projektowanie, modernizację oraz utrzymanie nawierzchni kolejowej w kontekście ograniczania hałasu środowiskowego. Dalszym etapem prac autorów będzie analiza zebranych wyników oraz przeprowadzenie porównań między odcinkami pomiarowymi o różnej konstrukcji i stanie nawierzchni, co pozwoli na pogłębioną ocenę wpływu parametrów konstrukcyjnych i technicznych na propagację drgań i emisję hałasu. Dodatkowym aspektem, który zostanie podjęty w dalszych analizach będzie również ocena porównawcza różnych metod analizy właściwości akustycznych nawierzchni kolejowych. ◀

Materiały źródłowe

- [1] He, J., Fu, Z.-F. (2001). Modal Analysis. Butterworth-Heinemann. Dostęp online (19.11.2025):
https://www.academia.edu/42009039/Modal_Analysis_Jimin_He_and_Zhi_Fang_Fu_
- [2] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2001). Modal identification from ambient responses using Frequency Domain Decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(1), 81–97. Dostęp online (19.11.2025):
https://vbn.aau.dk/ws/files/12765845/Modal_Identification_from_Ambient_Responses_using_Frequency_Domain_Decomposition
- [3] Peeters, B., De Roeck, G. (2001). Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123(4), 659–667. DOI: 10.1115/1.1410370
- [4] Sun, X., Ilanko, S., Yusuke, M., Tighe, R.C. (2023). A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures. *Vibration*, 6(4), 843–875. DOI: 10.3390/vibration6040051
- [5] Zhao, J., Zhang, L. (2012). Structural Damage Identification Based on the Modal Data Change. *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, 2(4), 59–66. DOI: 10.5815/ijem.2012.04.08
- [6] Hasani, H., Freddi, F. (2023). Operational Modal Analysis on Bridges: A Comprehensive Review. *Infrastructures*, 8(12): 172. DOI: 10.3390/infrastructures8120172
- [7] Kohm, M. (2023). Influence of vehicle traffic on modal-based bridge monitoring. *Structural Monitoring & Maintenance*, 10(3). DOI: 10.1007/s13349-022-00630-z
- [8] Thompson, D. J. (2008). *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-08-045147-3.X0023-0
- [9] Marciniak, P., Pawlak, Z. M., Wyczalek, I. (2024). The Use of Experimental Modal Analysis in Modeling the Complex Timber Structure of a Historical Building. *Applied Sciences*, 14, 8517. DOI: 10.3390/app14188517
- [10] van Vondelen, A. A. W., Navalkar, S. T., Iliopoulos, A., van der Hoek, D. C., van Wingerden, J.-W. (2022). Damping identification of offshore wind turbines using operational modal analysis: a review. *Wind Energy Science*, 7, 161–184. DOI: 10.5194/wes-7-161-2022
- [11] Zhang, P., He, Z., Cui, C., Ren, L., Yao, R. (2022). Operational Modal Analysis of Offshore Wind Turbine Tower under Ambient Excitation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1963. DOI: 10.3390/jmse10121963
- [12] Bednarz, J. (2017). Operational Modal Analysis for Crack Detection in Rotating Blades. *Archives of Acoustics*, 42(1), 105–112. DOI: 10.1515/aoa-2017-0011
- [13] Morais, J., Fortunato, E., Ribeiro, D., Mendes, J. (2024). Railway Substructure Modeling Approach for Modal Analysis Using Multibody Simulation. *Applied Sciences*, 14, 6510. DOI: 10.3390/app14156510
- [14] Fologea, D., Mazilu, T., Gheț, M.-A., Apostol, I.-I. (2024). Parametric Study on the Effect of Rail Dampers on Track Decay Rate. *Applied Sciences*, 14, 9541. DOI: 10.3390/app14209541
- [15] Squicciarini, G., Toward, M. G. R., Thompson, D. J. (2015). Experimental procedures for testing the performance of rail dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 359, 21–39. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.07.007
- [16] Jones, C. J. C., Thompson, D. J., Diehl, R. J. (2006). The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 293, 485–495. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.060
- [17] TSI NOISE – Rozporządzenie wykonawcze (UE) 2023/1694 z dnia 10 sierpnia 2023 r. zmieniające rozporządzenia Komisji: (UE) nr 321/2013, nr 1299/2014, nr 1300/2014, nr 1301/2014, nr

- 1302/2014, nr 1304/2014 oraz rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/777 10. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2024 poz. 54).
- [18] Leśnikowska-Matusiak, I., & Wnuk, A. (2014). Wpływ hałasu komunikacyjnego na stan środowiska akustycznego człowieka. *Transport Samochodowy*, 3, 37–62. Dostęp online (23.11.2025): <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-596b0df2-b1c9-4173-a7a3-f18126abe02a>
- [19] Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 15 października 2013 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. Nr 120, poz. 826).
- [20] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 20 kwietnia 2023 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać mierniki poziomu dźwięku, oraz szczegółowego zakresu badań wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (Dz.U.2023.942).
- [21] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem (Dz.U. 2011 nr 140 poz. 824).
- [22] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 17 stycznia 2003 r. w sprawie rodzajów wyników pomiarów prowadzonych w związku z eksploatacją dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów, które powinny być przekazywane właściwym organom ochrony środowiska, oraz terminów i sposobów ich prezentacji (Dz.U. z 2003 r. Nr 18, poz. 164).
- [23] Dyrektywa Komisji (UE) 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r. ustanawiająca wspólne metody oceny hałasu zgodnie z dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady poczynawszy od 01.01.2019 r.
- [24] Norma EN 15461:2008+A1:2010 Railway applications - Noise emission - Characterisation of the dynamic properties of track sections for pass by noise measurements.
- [25] Norma EN 15610:2019 Railway applications – Acoustics - Rail and wheel roughness measurement related to noise generation.
- [26] Norma PN-EN ISO 3095 Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe.
- [27] Kitagawa, T. (2009). The Influence of Wheel and Track Parameters on Rolling Noise. *Quarterly Report of RTRI*, 50(1), 32–38. DOI: 10.2219/rtrir.50.32
- [28] Thompson, D.J. & Jones, C.J.C. (2000). A review of the modelling of wheel/rail noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 519–536. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2542
- [29] Norma PN-EN 15461:2011 / EN 15461:2008+A1:2012 — Railway applications – Noise emission – Characterisation of the dynamic properties of track sections for passing rolling stock by measuring vibration decay rates.
- [30] Punetha, P., Maharjan, K., Nimbalkar, S. (2021). Finite Element Modeling of the Dynamic Response of Critical Zones in a Ballasted Railway Track. *Frontiers in Built Environment*. DOI: 10.3389/fbuil.2021.660292
- [31] Remington, P.J. (1976). Wheel/rail noise — Part IV: Rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 46(3), 419–436. DOI: 10.1016/0022-460X(76)90864-6
- [32] Kurier Kolejowy. (2025). Absorbery szynowe – cicha rewolucja na polskich torach. Dostęp online (20.11.2025): <https://kurier-kolejowy.pl/aktualnosci/48239/absorbery-szynowe---cicha-rewolucja-na-polskich-torach.html>
- [33] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2025). Mniej hałasu przy torach. PLK wprowadza skuteczne rozwiązania – montaż absorberów na linii kolejowej nr 9. Dostęp online (20.11.2025): <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/mniej-halasu-przy-torach-plk-wprowadza-skuteczne-rozwiazania-11094>
- [34] Müller, C. (2021). Track decay rates and dynamic properties of railway track – measurement, modelling and interpretation. Technische Universität Berlin. Dostęp online (20.11.2025): <https://depositonce.tu-berlin.de/items/4112efe6-8b89-4388-bee7-78ca3de98596>
- [35] Specyfikacja techniczna młotka modalnego PCB Piezotronics model 086C03. Dostęp online (21.11.2025): <https://www.pcb.com/products?m=086c03>
- [36] Specyfikacja techniczna młotka modalnego PCB Piezotronics TLD086D20. Dostęp online (21.11.2025): <https://www.pcb.com/products?m=tld086d20>
- [37] Specyfikacja techniczna przetwornika Hottinger Brüel & Kjær model 4534-B. Dostęp online (21.11.2025): <https://www.bksv.com/ko/transducers/vibration/accelerometers/ccld-iepe/4534-b-001>