PROBLEMY KOLEJNICTWA
RAILWAY REPORT Zeszyt 184 (wrzesień 2019)
DOI: 10.36137/1858P
ISSN 0552-2145 (druk) ISSN 2544-9451 (on-line)

Identyfikacja wad powierzchni tocznej szyn za pomocą sygnału wibroakustycznego

Roksana LICOW[1], Franciszek TOMASZEWSKI[2]

Streszczenie
W artykule przedstawiono koncepcję metody identyfikacji najczęściej występujących wad powierzchni tocznej szyn za pomocą sygnałów wibroakustycznych. Opisano badane wady szyn take, jak: *squat*, *head checking* oraz wybuksowanie. Przedstawiono metodykę prowadzonych badań oraz wyniki analiz zarejestrowanych sygnałów dla warunków techniczno-eksploatacyjnych panujących na liniach kolejowych nr 213 Reda – Hel oraz nr 131 Chorzów Batory – Tczew. Wyniki badań drgań i hałasu dotyczą zarejestrowanych sygnałów dla odcinków toru z wadą oraz dla odcinków toru referencyjnego. Synteza wyników badań potwierdza zasadność rozwijania metody z wykorzystaniem sygnałów drganiowych do prowadzenia diagnostyki powierzchni tocznych szyn, jak również wskazuje na możliwość wykorzystania sygnałów wibroakustycznych do oceny innych elementów nawierzchni kolejowej.

Słowa kluczowe: wibroakustyka, sygnały drganiowe, wady szyn

1. Wstęp

Wady powierzchni tocznej są istotnym problem wpływającym na bezpieczeństwo prowadzenia ruchu kolejowego. Co roku na czynnych liniach kolejowych w Polsce wzrasta liczba odnotowanych złamań i pęknięć szyn. Skuteczna diagnostyka powierzchni tocznych szyn jest elementem składowym czynników wpływających na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa przewozów transportem kolejowym.

W artykule przedstawiono koncepcję możliwości wykorzystania sygnałów wibroakustycznych w celu określenia stanu powierzchni tocznej szyny wraz z możliwością identyfikacji występującej wady (uszkodzenia). Badania przeprowadzono na dwóch liniach kolejowych: nr 213 Reda – Hel oraz nr 131 Chorzów Batory – Tczew, w ośmiu punktach pomiarowych. Analizie poddano trzy najczęściej występujące wady powierzchni tocznej szyn.

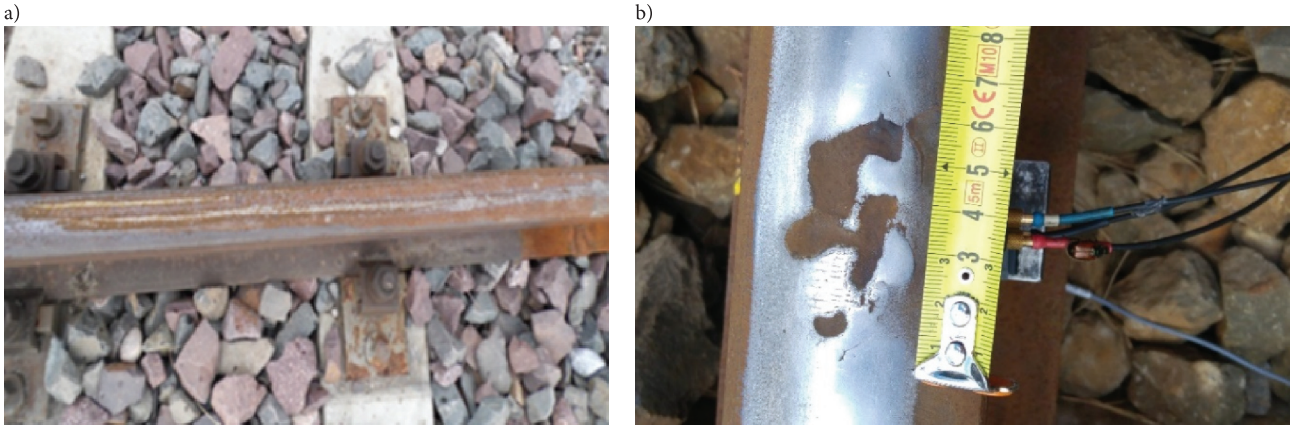
Analizę sygnałów drganiowych przeprowadzono dla następujących uszkodzeń powierzchni tocznej: wybuksowanie pojedyncze (wada nr 2251), *squat* (wada nr 227) oraz wada nr 221 – wada powierzchni tocznej.

Wybuksowanie pojedyncze jest uszkodzeniem powierzchni tocznej szyn, całkowicie spowodowanym eksploatacją toków szynowych (rys. 1a). Wybuksowanie pojedyncze wyglądem przypomina „wytarcie" wzdłużne powierzchni tocznej szyny, osiągające długość do 1,5 m. Jego identyfikacja jest powiązana z miejscami newralgicznymi występującymi w układach torowych, np. przed semaforem wjazdowym, gdzie następuje gwałtowne hamowanie lub rozruch ciężkich pociągów towarowych, jak również przed przejazdami kolejowo-drogowymi oraz przed rozjazdami. Wybuksowanie występuje na obu tokach szynowych [4].

Według „Katalogu wad w szynach", wydanego przez spółkę PKP PLK S.A. [4], wada *squat* nr 227, jest definiowana jako pęknięcie i miejscowe zagłębienie powierzchni tocznej szyny, występujące poza końcami szyn. *Squat* najczęściej występuje na prostych odcinkach oraz na wzniesieniach o pochyleniu do 4,0‰ (rys. 1b) [5]. W pierwszych fazach rozwoju, *squat* objawia się jako ciemny punkt o półkolistym kształcie, często jeszcze bez pęknięć. W kolejnych fazach rozwoju wady następuje łuszczenie i pękanie materiału. Brak odpowiedniej diagnostyki toków szynowych oraz między innymi brak ich obserwacji i stosowania środków zaradczych, może doprowadzić do całkowitego pęknięcia szyny oraz wykolejenia pociągu. Przyczyny powstawania tego typu wad nie są do końca poznane, stąd ważne jest prowadzenie pra-

[1] Dr inż.; Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; e-mail: roksana.licow@pg.edu.pl.
[2] Prof. dr hab. inż.: Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu; e-mail: Franciszek.tomaszewski@put.poznan.pl.

a) b)



Rys. 1. Wada wybuksowanie (a) i wada *squat* (b) [fot. autorów]

widłowej diagnostyki, polegającej między innymi na prawidłowej, wizualnej ocenie wady [5].

Ostatnią wadą poddaną analizie jest wada powierzchni tocznej szyny nr 221 według „Katalogu wad w szynach" (rys. 2). Wada nr 221 jest wadą pochodzenia hutniczego, powstaje na główce szyny w trakcie eksploatacji toru kolejowego. Najczęściej objawia się łuszczeniem blaszkowatym powierzchni tocznej, rysami lub pęknięciami w kształcie rowka.

Rys. 2. Wada 221 – uszkodzenie powierzchni tocznej [fot. autorów]

Uszkodzenia nr 221 są najczęściej wykrywane za pomocą badań wizualnych. W zależności od stopnia rozwoju wady, zaleca się obserwację szyny, szlifowanie lub jej napawanie.

Identyfikacja wady z określeniem jej stopnia degradacji oraz dalszych zaleceń bardzo często zależy od doświadczenia i wiedzy diagnosty, często subiektywnej oceny oraz warunków, w których są prowadzone badania diagnostyczne szyn. Wykorzystanie sygnałów wibroakustycznych mogłoby umożliwić szybszą oraz bardziej skuteczną i jednoznaczną ocenę powierzchni tocznych, jak również ocenę poszczególnych elementów nawierzchni. Wykorzystując zjawiska wibroakustyczne, będące odpowiedzią dynamiczną szyn podczas przejazdu pociągu, można ocenić stan ich powierzchni tocznej, złączy, przytwierdzeń, podkładów, jak również podsypki [9].

2. Metodyka badań

2.1. Lokalizacja miejsc pomiarowych

Badania prowadzono na dwóch liniach kolejowych zarządzanych przez spółkę PKP PLK S.A., na terenie Zakładu Linii Kolejowych w Gdyni. Zakres badań z lokalizacją, kilometrażem oraz z rodzajem nawierzchni przedstawiono w tablicy 1. Pierwszą z analizowanych jest linia kolejowa numer 213 Reda – Hel, położona w województwie pomorskim. Jest linią znaczenia regionalnego, niezelektryfikowaną, której rewitalizacja trwała w latach 2011–2015. Długość linii kolejowej nr 213 wynosi 62,827 km.

Drugą, przyjętą do badań, jest linia kolejowa nr 131 Chorzów Batory – Tczew, najbardziej obciążona ruchem towarowym linia w Polsce, dawniej zwana magistralą węglową. Długość linii kolejowej nr 131 wynosi 493,391 km, a roczne obciążenie wynosi około 30 Tg.

Badania przeprowadzono w ośmiu punktach pomiarowych na dwóch wymienionych liniach kolejowych. W każdym punkcie wykonano co najmniej dziesięć pomiarów drgań i hałasu dla różnych typów pociągów.

2.2. Zakres badań

Do pomiaru drgań zastosowano układ pomiarowy składający się z dwóch przetworników: trójosiowego przetwornika drgań typu 4504A oraz przetwornika jednoosiowego drgań typu 4513-B-001. Przetwornik trójosiowy zamontowano na szyjce szyny, natomiast przetwornik jednoosiowy zamontowano pod stopką szyny (rys. 3). Przetwornik trójosiowy rejestrował sygnały w trzech kierunkach: X – zgodnie z ruchem pociągów, Y – poprzecznie do kierunku ruchu pociągów, Z – prostopadle do kierunku ruchu pociągów.

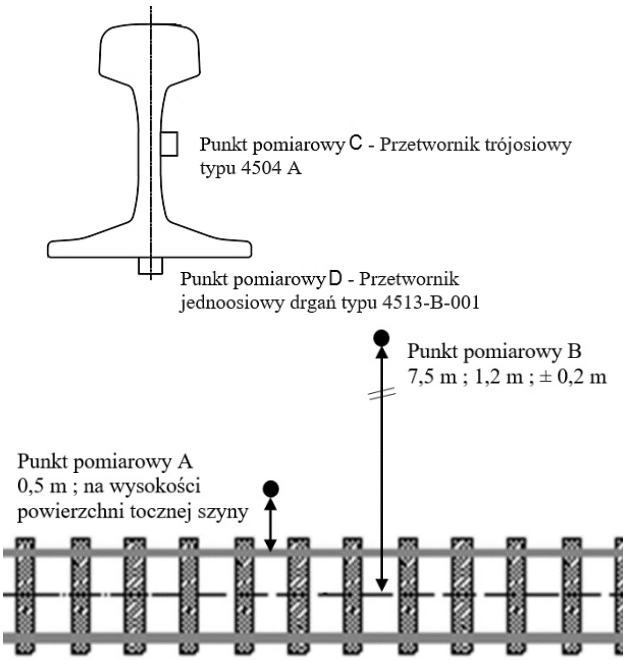
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Tablica 1

Punkty pomiarów sygnałów wibroakustycznych na liniach kolejowych nr 213 oraz 131

Nazwa punktu pomiarowego	Data badania	Liczba pomiarów	Badana wada / uszkodzenie	Nawierzchnia
213 – Referencyjny KM 30.900 LT	24. 06. 2017	10	odcinek toru referencyjnego	szyna typu S49, przytwierdzenia SB-3, podkład PS – 93
213 – 227 *Squat* KM 38.760 LT	26. 06. 2017	10	*squat*	
213 – 2252 Wybuksowanie KM 11.500 LT	27. 06. 2017	10	wybuksowanie	
213 – 221 Wada powierzchni tocznej KM 16.100 PT	1. 07. 2017	10	wada powierzchni tocznej	
131 – Referencyjny KM 458.900 PT	9.07.2017	14	odcinek toru referencyjnego	szyna typu 60E1 (2010 r.), SB – 3, podkład PS – 93
131 – 227 *Squat* KM 466.150 LT	10.07. 2017	11	*squat*	
131 – 2252 Wybuksowanie KM 458.750 PT	11. 07. 2017	12	wybuksowanie	
131 – 221 Wada powierzchni tocznej KM 458.880 PT	13. 07. 2017	10	wada powierzchni tocznej	

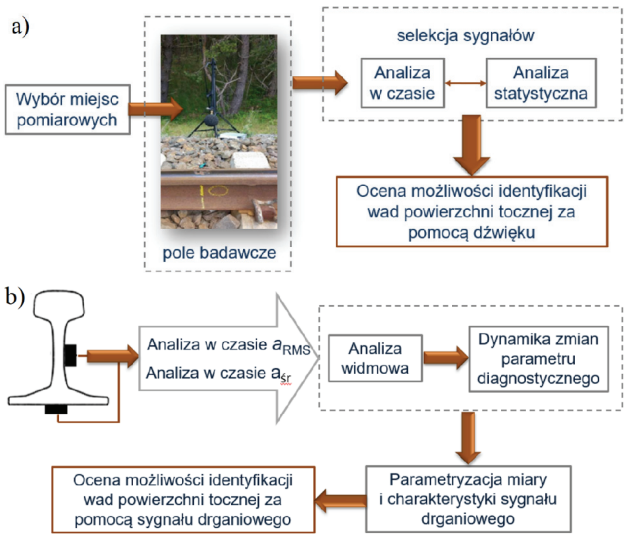
[Opracowanie autorów].



Rys. 3. Metodyka rozmieszczenia punktów pomiaru drgań i hałasu [rysunek autorów]

Pomiary hałasu przeprowadzono w dwóch punktach pomiaru. Punkt A znajdował się w odległości 0,5 m od skrajnego toku kolejowego, na wysokości powierzchni tocznej, natomiast punkt pomiarowy B umiejscowiono w odległości 7,5 m od osi toru kolejowego na wysokości 1,2 m (rys. 3). Pomiary hałasu przeprowadzono zgodnie z [8, 11]. W badaniach pomiaru poziomów hałasu użyto mikrofonów pojemnościowych, przekazujących informację do modułu rejestrującego, który przetwarzał dane pojedynczego zdarzenia akustycznego.

Pierwszą przeprowadzoną analizą wyników poziomów dźwięku była analiza w dziedzinie czasu. Następnie przeprowadzono analizę statystyczną miar punktowych. Do dalszych analiz wytypowano analizę w dziedzinie czasu poszczególnych przebiegów z uwzględnieniem występującego tła akustycznego (rys. 4).



Rys. 4. Schematy procedur analizy sygnałów wibroakustycznych w procesie identyfikacji uszkodzeń powierzchni tocznej: a) analiza akustyczna, b) analiza drganiowa [rysunek autorów]

Po wstępnej selekcji sygnałów, wyniki uzyskane z pomiarów drgań z czujnika trójosiowego oraz czujnika jednoosiowego przeanalizowano w dziedzinie czasu oraz dziedzinie częstotliwości [2, 3]. Analizę w dziedzinie czasu przeprowadzono dla przyspieszeń, prędkości oraz przemieszczeń za pomocą oprogramowania PULSE Reflex 21. Wyniki tych analiz umożliwiły wyznaczenie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wartości aRMS, jako najlepszego nośnika informacji o stanie technicznym powierzchni tocznej szyny.

Wyniki analiz opisano na podstawie poszczególnych wykresów średnich wartości skutecznych przyspieszeń drgań w funkcji czasu dla każdego punktu pomiarowego z uwzględnieniem każdego przejazdu pociągu. Kolejnym krokiem była analiza częstotliwościowa przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera uśrednionych wartości aRMS oraz analiza statystyczna miar punktowych [3].

Ze względu na specyfikę przetwornika oraz sposób montażu przetwornika do szyny, uśrednione przebiegi sygnałów poddano filtracji w zakresie 20–10 000 Hz, zgodnie z zaleceniem producenta użytych przetworników drgań. W kolejnym etapie przeprowadzono analizę widmową, która polegała na porównaniu przebiegu każdego uszkodzenia z torem referencyjnym, a następnie odszukaniu największych różnic wartości przyspieszeń pomiędzy uszkodzeniem i torem referencyjnym. Znalezione maksymalne wartości różnic dla określonego uszkodzenia były porównywane do częstotliwości, w której mogło występować wyłącznie badane uszkodzenie [1].

3. Analiza wyników pomiarów

3.1. Analiza wyników pomiarów hałasu

Wyniki analizy poziomów dźwięku w czasie wykazały, że w każdym z punktów pomiarowych, z rozróżnieniem odległości 0,5 m i 7,5 m, zarejestrowano zbliżone wartości dźwięku. Umożliwiło to uśrednienie przebiegów czasowych i wskazanie średniego poziomu dźwięku podczas przejazdu pociągu dla określonego punktu pomiaru (rys. 5). Zbliżone wartości przebiegów umożliwiły również stwierdzenie, że wyniki zarejestrowanych poziomów hałasu nie zależały od składu pociągu lub prędkości w stosunku do liczby przejazdów wykonanych w danych punkcie pomiarowym [7].

Podczas najechania koła pociągu na wadę *squat*, w punkcie pomiarowym znajdującym się 0,5 m od szyny, wzrastał poziom hałasu o około 13 dB. Największe wartości zarejestrowano dla referencyjnego odcinku toru (odległość 0,5 m), natomiast najniższe wartości hałasu zarejestrowano na odcinku toru z wybuksowaniem (odległość 7,5 m) [6].

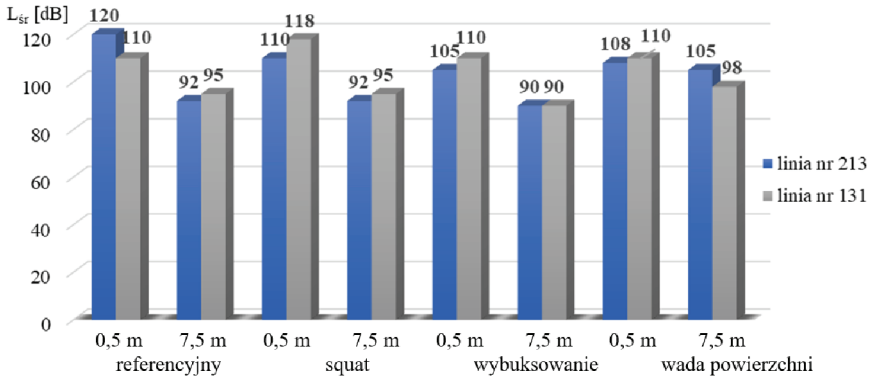
3.2. Analiza wyników pomiarów drgań

Analizę wyników pomiarów drgań przeprowadzono dla dwóch miejsc pomiaru drgań: na szyjce i pod stopką szyny. Wyniki przeanalizowano w dziedzinie czasu i częstotliwości. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy wynik analizy częstotliwości dla wartości skutecznych przyspieszeń drgań, na linii nr 213 w kierunku Y – kierunek poprzeczny do kierunku ruchu pociągu, dla czujnika trójosiowego umiejscowionego na szyjce szyny dla poszczególnych wad [6]. Zgodnie z zaleceniem producenta, analizę widma dla każdego przebiegu przeprowadzono w zakresie częstotliwości 300–10 000 Hz.

Na podstawie analizy widma wszystkich zarejestrowanych przebiegów, opracowano tablicę 2, podając wartości częstotliwości, w których występuje największa różnica pomiędzy aRMS w punkcie z określoną wadą i aRMS w punkcie toru referencyjnego. Zestawienie wartości częstotliwości umożliwiło zauważenie ścisłej zależności pomiędzy kierunkami sygnału drganiowego i uzyskanymi wynikami zakresu częstotliwości występowania określonego uszkodzenia.

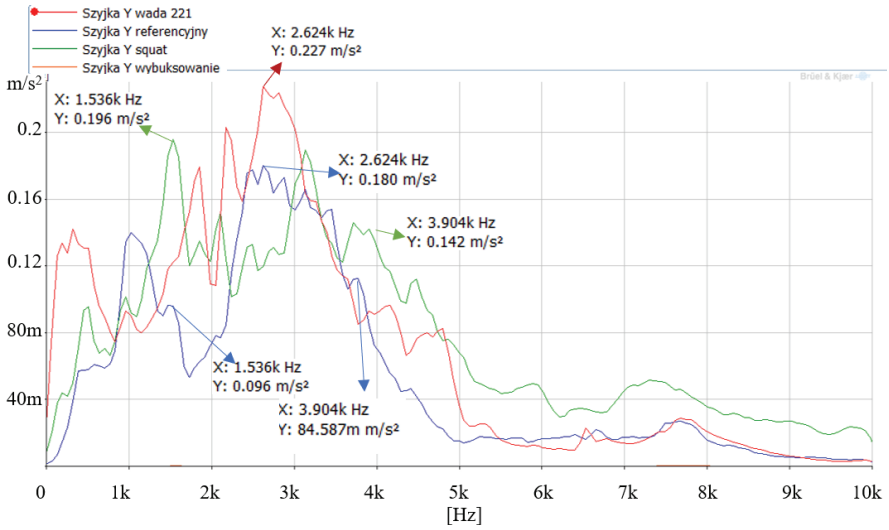
Uszkodzenia *squat* można zidentyfikować na czujniku trójosiowym w zakresie częstotliwości 3,7–4,5 kHz a wybuksowanie w częstotliwości 5,6 kHz. Identyfikacja wady powierzchni tocznej nr 221 jest zadaniem trudnym ze względu na charakterystykę sygnału uzyskanego z pomiarów tej wady.

Jednym z dodatkowych sposobów opisu sygnałów przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań są miary punktowe, które umożliwiają scharakteryzowanie sygnału drganiowego za pomocą jednej liczby. Miary punktowe są stosowane w diagnostyce wibroakustycznej (DWA) w celu określenia zmian w sygnale wibroakustycznym [12].



Rys. 5. Wyniki średnich wartości poziomów dźwięków zarejestrowanych na liniach nr 213 oraz 131 dla różnych wad w dwóch miejscach pomiaru – 0,5 m i 7,5 m [opracowanie autorów]

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6. Przebiegi wartości skutecznych przyspieszeń drgań w funkcji częstotliwości dla osi Y czujnika trójosiowego na linii nr 213 [opracowanie autorów]

Tablica 2

Zestawienie wartości częstotliwości w celu możliwości identyfikacji wybranych uszkodzeń powierzchni tocznej szyn

Nazwa uszkodzenia	Przetwornik trójosiowy			Przetwornik jednoosiowy
	oś X [kHz]	oś Y [kHz]	oś Z [kHz]	oś Z [kHz]
Linia kolejowa nr 213 Reda – Hel				
***squat* 227**	3,7	3,9	3,8	1,2 oraz 6,7
wybuksowanie 2251,2252	1–7,2 oraz 8–9	4,2–6,9	brak	4,1–6,7
wada 221	7,6	2,6	1,2	6
Linia kolejowa nr 131 Chorzów Batory – Tczew				
wada nr 221	4,5	3,9	0,832	7,5
***squat* 227**	7,5	brak	5,6	8,8
wybuksowanie 2251, 2252	0,7–1,2	0,704	0,640	5,2
***head checking* 2223**	brak	2,8	1,08	1,2

[Opracowanie autorów].

Obliczenie miar punktowych wartości skutecznych przyspieszeń drgań analizowanych przebiegów, umożliwiło określenie dynamiki zmian parametru diagnostycznego. Przedstawiona w artykule dynamika zmian parametru diagnostycznego (DZPD) [dB] jest stosunkiem miary punktowej odcinka toru z uszkodzeniem do miary punktowej odcinka toru referencyjnego zgodnie ze wzorem (1) [3].

$$DZPD = 20\log_{10}\left(\frac{\mu_u}{\mu_R}\right), \qquad (1)$$

gdzie:

μ_R – miara punktowa toru referencyjnego,

μ_u – miara punktowa toru z uszkodzeniem (wadą).

Parametryzacja wybranych miar sygnałów drganiowych umożliwiła przeprowadzenie selekcji i odrzucenie kierunków drgań o najmniejszej informacji o wadzie szyn (tabl. 3). Punktami pomiaru drgań pod względem najwyższej dynamiki zmian parametru diagnostycznego wykazały się punkty z czujnika trójosiowego w osi X – kierunek zgodny z kierunkiem ruchu pojazdów szynowych oraz osi Z – kierunek prostopadły do kierunku ruchu pojazdów szynowych.

Na podstawie wyników przedstawionych w tablicy 3 określono kierunek sygnału drganiowego o największej dynamice zmian parametru diagnostycznego, jakim jest kierunek Z, prostopadły do kierunku ruchu pojazdów szynowych z punktu umiejscowionego na szyjce szyny. Kierunek ten zawiera najwięcej informacji już na etapie analizy przebiegów czasowych sygnałów [6].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Tablica 3

Dynamika zmian parametru diagnostycznego (DZPD) w zależności od kierunku drgań

Nazwa uszkodzenia	DZPD [dB] Oś X	DZPD [dB] Oś Y	DZPD [dB] Oś Z	DZPD [dB] Stopka
Linia kolejowa nr 213 Reda – Hel				
wada nr 221	46,60	2,02	4,11	1,92
***squat* 227**	4,31	1,58	1,85	1,94
wybuksowanie 2251, 2252	31,04	54,94	49,27	56,04
Linia kolejowa nr 131 Chorzów Batory – Tczew				
wada nr 221	7,42	9,42	8,15	5,84
***squat* 227**	3,99	10,88	9,81	8,02
wybuksowanie 2251, 2252	0,56	0,37	1,67	0,30
***head checking* 2223**	1,86	3,87	6,06	0,42

[Opracowanie autorów].

4. Podsumowanie

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że jest możliwa ocena stanu powierzchni tocznej szyny za pomocą parametrów drganiowych, szczególnie drgań mierzonych na szyjce szyny. Analiza uzyskanych sygnałów wibroakustycznych wykazała, że typ pojazdu szynowego oraz jego prędkość nie mają wpływu na mierzone wartości sygnałów drganiowych. Zatem ocena stanu powierzchni tocznej szyny może odbywać się podczas przejazdu różnych typów pociągów z różnymi prędkościami. Dalsze kierunki badań zjawisk wibroakustycznych, w kontekście identyfikacji wad powierzchni tocznej szyny, powinny być ukierunkowane na rozszerzenie bazy danych pomiarowych o dodatkowe linie kolejowe i nawierzchnie wraz z uwzględnieniem nawierzchni niekonwencjonalnych [10]. Ostatecznie, ocena powierzchni tocznej szyny za pomocą zjawisk wibroakustycznych powinna być oceną wykorzystującą informację sygnału drganiowego obudowy łożyska zestawu kołowego pojazdu oceniającego stan szyn, np. drezyny pomiarowej.

Literatura

1. Cempel C., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*, Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom, 1992.
2. Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn,* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1982.
3. Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1978.
4. Katalog wad w szynach, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2005.
5. Li Z.: *Squats on railway rails*, In R. Lewis & U. Olofsson (Eds.), Wheel-rail interface handbook (pp. 409–436), Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2009.
6. Licow R., Tomaszewski F., Urbaniak M.: *Badania wstępne możliwości oceny stanu powierzchni tocznej szyn za pomocą zjawisk wibroakustycznych*, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, tom 25, s. 255–265, 2017.
7. Lipowczan A.: *Podstawy pomiarów hałasu,* Wyd. 1, Główny Instytut Górnictwa, Katowice – Warszawa, 1987.
8. PN-EN ISO 3095: 2013-12: Akustyka – Kolejnictwo – Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe.
9. Remington P.J.: *Wheel/rail squeal and impact noise: What do we know? What don't we know? Where do we go from here?* Journal of Sound and Vibration, 1985, 116 (2), pp. 339–353.
10. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1304/2014 w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Tabor kolejowy – hałas", Dz.U. UE L 356, Pl, 12.1.2014.
11. 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.
12. Tomaszewski F., Szymański G. M.: *Wpływ luzu zaworowego na poziomy miar punktowych sygnału drganiowego w aspekcie diagnostycznym*, Diagnostyka 3(43)/2007.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl