

ZASTOSOWANIE SZYBKIEJ TRANSFORMATY FOURIERA FFT DO SYGNAŁU DRGANIOWEGO GENEROWANEGO PRZEZ HAMULEC TARCZOWY DO OCENY ZUŻYCIA OKŁADZIN CIERNYCH W CZASIE HAMOWANIA NA SPADKU

WOJCIECH SAWCZUK¹, FRANCISZEK TOMASZEWSKI²

Politechnika Poznańska

Streszczenie

W pojazdach szynowych, ze względu na coraz to większe prędkości jazdy, prowadzi się prace nad udoskonalaniem układów hamulcowych tak, aby zatrzymanie pojazdu odbyło się na możliwie najkrótszej drodze hamowania. Również szereg zalet tego rodzaju hamulca, jak np. stały przebieg współczynnika tarcia w funkcji prędkości w stosunku do tradycyjnego hamulca klockowego, uzasadnia jego stosowanie i to zarówno w pojazdach kolejowych, jak i w pojazdach szynowych komunikacji miejskiej. Mimo wielu zalet układu hamulcowego, zamocowanie tarcz hamulcowych na osi pomiędzy kołami zestawu kołowego znacznie utrudnia kontrolę zużycia pary ciernej tarcza-okładzina. Wymusza ono na obsłudze i pracownikach zakładów naprawczych wchodzenie pod wagon w celu zdiagnozowania układu hamulcowego, sprawdzenia poprawności jego działania, kontroli zużycia oraz przeprowadzenia niektórych napraw bieżących. Brak stałego monitorowania zużycia elementów ciernych hamulca powoduje, że w niektórych przypadkach dochodzi do całkowitego zużycia okładzin ciernych i tarcia obsad hamulcowych o tarczę hamulcową.

Celem artykułu jest wykorzystanie sygnału drganiowego obsad z okładzinami do oceny zużycia okładzin ciernych hamulca tarczowego, wyznaczając charakterystyki w dziedzinie częstotliwości, podczas badań na bezwładnościowym stanowisku hamulcowym.

Słowa kluczowe: kolejowy hamulec tarczowy, diagnostyka hamulca, analiza widmowa

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl, tel. 61 665 20 23

² Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: franciszek.tomaszewski@put.poznan.pl, tel. 61 665 23 55

1. Wprowadzenie

W pojazdach szynowych, ze względu na ciągły wzrost prędkości jazdy w celu uzyskania wymaganej drogi hamowania, stosuje się hamulec tarczowy jako hamulec zasadniczy.

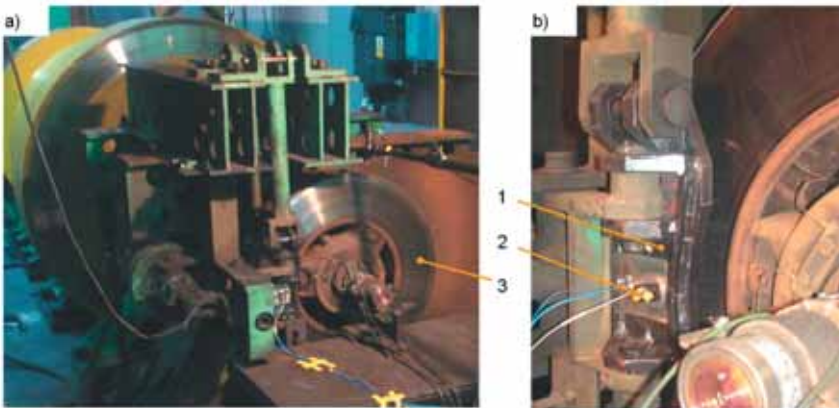
Do niewielu wad hamulca tarczowego zalicza się brak możliwości kontroli stanu pary ciernej tarcza-okładzina w całym procesie eksploatacji. Jest to szczególnie zauważalne w wagonach kolejowych, w których tarcze hamulcowe zamocowane są na osi zestawu kołowego między kołami [3]. W celu sprawdzenia zużycia okładzin ciernych i tarcz hamulcowych, konieczne jest wykorzystanie kanału rewizyjnego dla przeprowadzenia kontroli, a w sytuacji osiągnięcia granicznego zużycia elementów ciernych również ich wymiany.

Celem artykułu jest wykorzystanie sygnału drganiowego obsad z okładzinami do oceny zużycia okładzin ciernych hamulca tarczowego, wyznaczając charakterystyki w dziedzinie częstotliwości, podczas badań na bezwładnościowym stanowisku hamulcowym.

2. Metodyka i obiekt badań

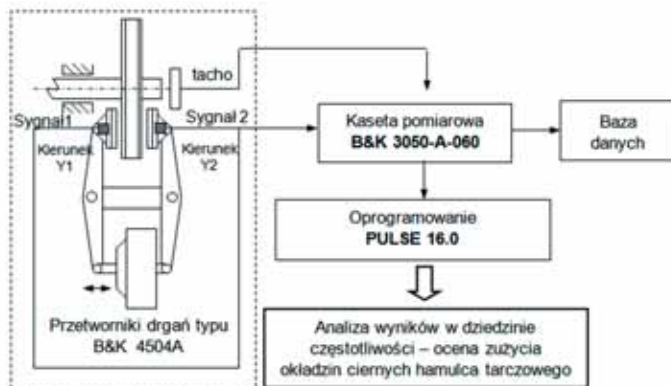
Badania diagnostyczne zostały przeprowadzone w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców klockowych i tarczowych pojazdów szynowych. Obiektem badań była tarcza hamulcowa typu 590×110 z wentylującymi łopatkami oraz 3 komplety okładzin typu 175 FR20H.2 firmy Frenoplast. Pierwszy komplet okładzin – nowy o grubości 35 mm oraz po 2 komplety zużyte do grubości 25 mm i 15 mm.

Do badań został wykorzystany program badawczy 2B1 (II) zgodnie z załącznikiem C.2 zawartym w Kodeksie UIC 541-3. Dla wspomnianego programu przeprowadzono hamowanie



Rys. 1. Stanowisko do badań kolejowego hamulca tarczowego: a) widok stanowiska w czasie badań diagnostycznych, b) widok obsady hamulcowej z przetwornikiem drgań; 1 - obsada hamulcowa, 2 - przetwornik drgań, 3 - tarcza hamulcowa

ze stałą mocą hamowania wynoszącą 45 kW [5]. Jest to symulacja zjazdu pociągu przez przełęcz Świętego Gotarda w Szwajcarii, ze stałą prędkością przy włączonym układzie hamulcowym. Prędkość zjazdu $v=80$ km/h, nacisk okładziny na tarczę $N=25$ kN, całkowity symulowany czas zjazdu pociągu $t=10$ min. Masa do wyhamowania przypadająca na jedną tarczę wyniosła w czasie badań $M=5,7$ t. Na obsadach hamulcowych zamocowano przetworniki drgań, co przedstawia rysunek 1b, przykręcone do obsady za pośrednictwem płytek mocujących [2].



Rys. 2. Schemat toru pomiarowego przyspieszeń drgań generowanych przez obsadę hamulcową z okładzinami w czasie hamowania

Podczas badań rejestrowano sygnały przyspieszeń drgań w jednym kierunku, tj. prostopadłych do powierzchni ciernej tarczy hamulcowej. Do akwizycji sygnałów drgań zastosowano zestaw pomiarowy składający się z: piezoelektrycznego przetwornika przyspieszeń drgań, kasety pomiarowej typu B&K 3050-A-060 wraz z oprogramowaniem systemu PULSE 16.0. Tor pomiarowy przedstawiono na rys. 2.

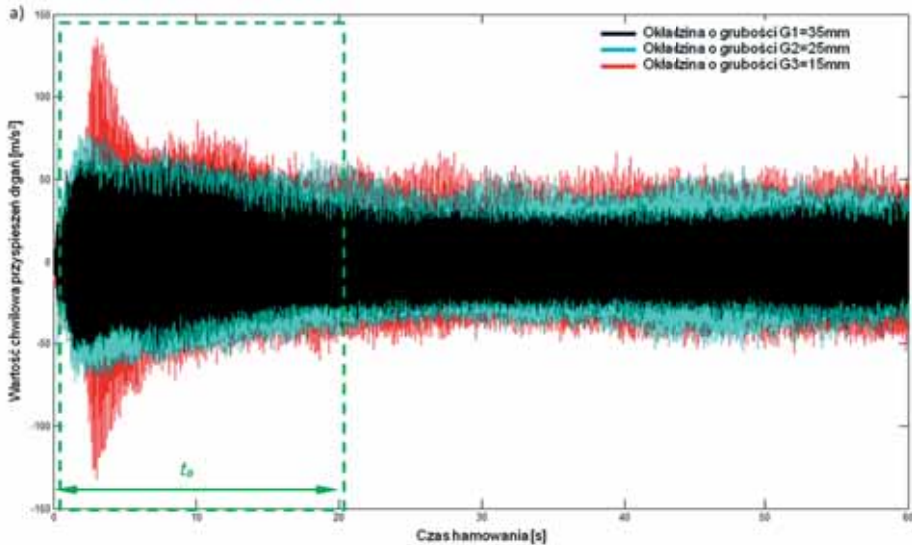
Przetworniki drgań typu 4504 firmy Brüel&Kjær zostały wybrane na podstawie wytycznych zawartych w pracy [1], liniowe pasmo przenoszenia przetworników wyniosło 13 kHz. Częstotliwość próbkowania ustawiono na 131 kHz. Oznacza to, że pasmo poddane analizie zgodnie z zależnością Nyquista wyniosło 65 kHz.

Badania zostały przeprowadzone zgodnie z zasadami eksperymentu czynnego. Po przeprowadzeniu hamowania dla zadanej grubości okładziny zmieniano okładzinę bez zmian pozostałych parametrów hamowania, jak prędkość zjazdu pociągu, docisk okładziny do tarczy czy masa do wyhamowania i czas hamowania. Równocześnie obserwowano zmiany zachodzące w amplitudzie chwilowych przyspieszeń drgań.

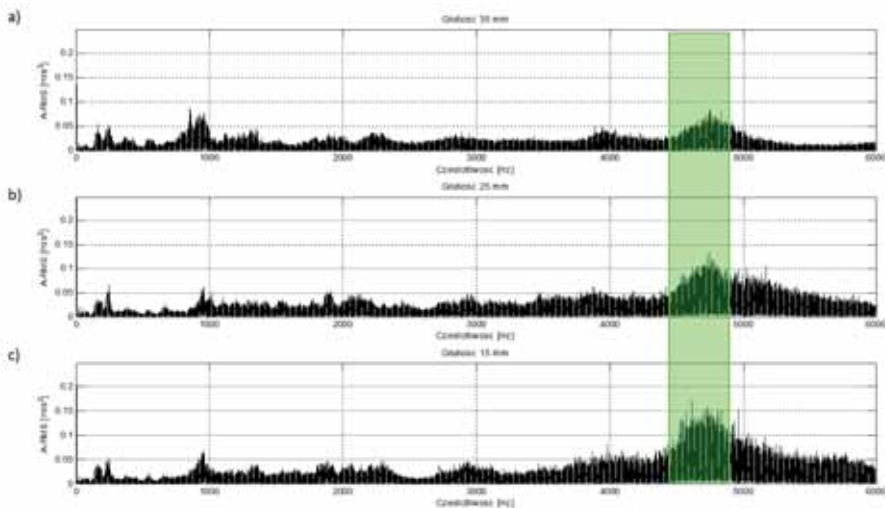
3. Wyniki badań

Celem analizy widmowej sygnałów drgań było wyznaczenie pasm częstotliwości związanych ze zmianą grubości okładziny w czasie pracy układu hamulcowego. Do analizy

widmowej został wykorzystany pierwszy fragment sygnału drganiowego pochodzącego z hamowania hamulcem tarczowym. Analiza czasowych fragmentów chwilowych wartości przyspieszeń drgań wykazała, że do czasu hamowania wynoszącego 20 sekund od początku hamowania jest to okres, w którym widoczna jest największa dynamika zmian



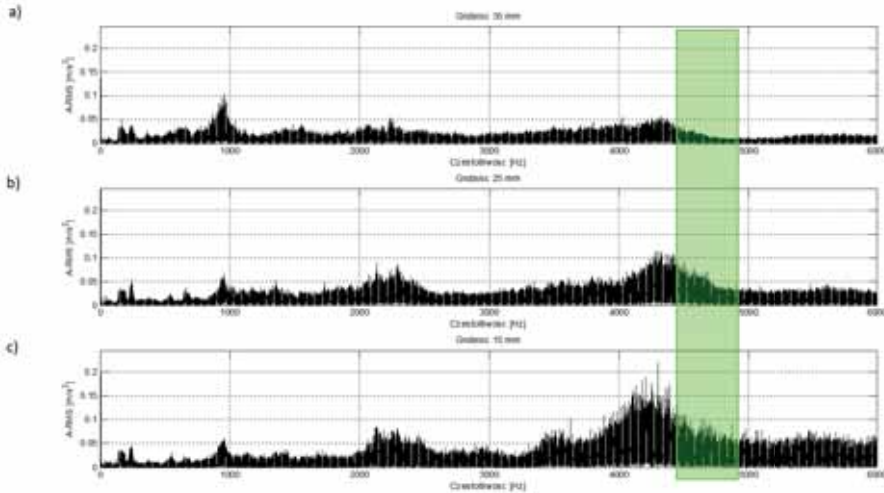
Rys. 3. Wartość chwilowa przyspieszeń drgań w funkcji czasu hamowania podczas hamowania ze stałą mocą dla trzech grubości okładzin ciernych: t_a – fragment sygnału poddany analizie widmowej, $t_a=20s$



Rys. 4. Zależność amplitudy przyspieszeń drgań od częstotliwości dla różnych grubości okładziny przy hamowaniu ze stałą mocą na tarczy typu 590×110, dla kierunku Y ; a) grubość okładziny $G1=35$ mm, b) grubość okładziny $G2=25$ mm, c) grubość okładziny $G3=15$ mm

(zależność (1)) sygnału drganiowego od zużycia okładzin ciernych. Widmo uzyskano przy pomiarze drgań w kierunku prostopadłym po powierzchni cierniej tarczy (kierunek Y_1 i Y_2) na obsadzie od strony obudowy cylindra oraz na obsadzie od strony tłoczyska hamulcowego.

Na rysunku 4 - 5 zostały przedstawione przykładowe widma amplitudowe przyspieszeń drgań dla różnych grubości okładzin uzyskanych przy hamowaniu ze stałą mocą na tarczy o średnicy zewnętrznej 590 mm (w obu kierunkach pomiaru drgań Y_1 i Y_2).



Rys. 5. Zależność amplitudy przyspieszeń drgań od częstotliwości dla różnych grubości okładziny przy hamowaniu ze stałą mocą na tarczy typu 590×110, dla kierunku Y_2 : a) grubość okładziny G1=35 mm, b) grubość okładziny G2=25 mm, c) grubość okładziny G3=15 mm

Badania pomiaru przyspieszeń drgań obsad hamulcowych w dziedzinie częstotliwości wykazały, że możliwe jest znalezienie pasm częstotliwości, w których obserwuje się zależność wartości skutecznej przyspieszeń drgań A_{RMS} (równanie (1)) [6] od różnych grubości okładzin w rozpatrywanym zakresie prędkości podczas zjazdu pociągu z włączonymi hamulcami.

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

gdzie:

T – czas uśredniania,

$s(t)$ – wartość chwilowa amplitudy przemieszczeń drgań.

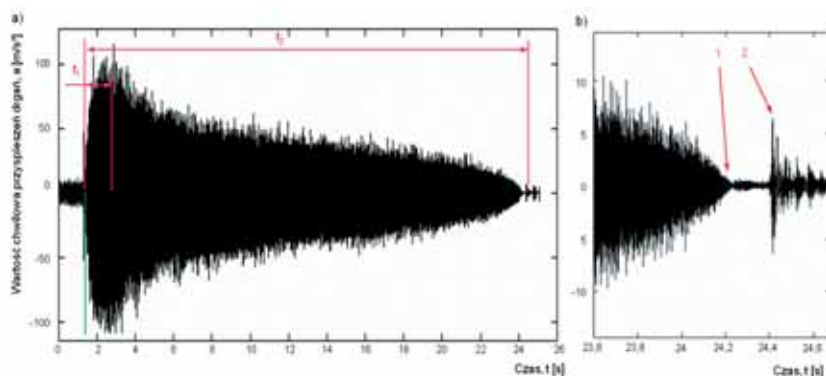
Tabela 1. Zestawienie wyników analizy widmowej sygnałów przyspieszeń drgań obsad hamulcowych z okładzinami ciernymi

Tarcza hamulcowa typu 590×110, pomiar w kierunku Y_1 (pomiar od strony obudowy cylindra)						
Często- tliwość w [Hz]	RMS z pasma częstotliwości w [m/s ²]			Dynamika zmian w [dB]		Wsp. korelacji R
	Dla okładziny o gr. 35 mm	Dla okładziny o gr. 25 mm	Dla okładziny o gr. 15 mm	Dla okładzin o gr. 35 i 25 mm	Dla okładzin o gr. 35 i 15 mm	
4600-4650	0,6975	1,2502	1,8023	5,07	8,24	1,0000
4650-4700	0,7985	1,3527	1,8339	4,58	7,22	0,9992
4700-4750	0,9238	1,4588	1,9910	3,96	6,66	1,0000
4750-4800	0,9319	1,4433	1,8881	3,79	6,13	0,9992
Tarcza hamulcowa typu 590×110, pomiar w kierunku Y_2 (pomiar od strony tłoczyska cylindra)						
4600-4650	0,2842	0,8684	1,1016	9,70	11,76	0,9706
4650-4700	0,2409	0,7895	1,1376	10,31	13,48	0,9918
4700-4750	0,1953	0,6365	1,0719	10,26	14,79	1,0000
4750-4800	0,1647	0,5529	0,9084	10,51	14,82	0,9997

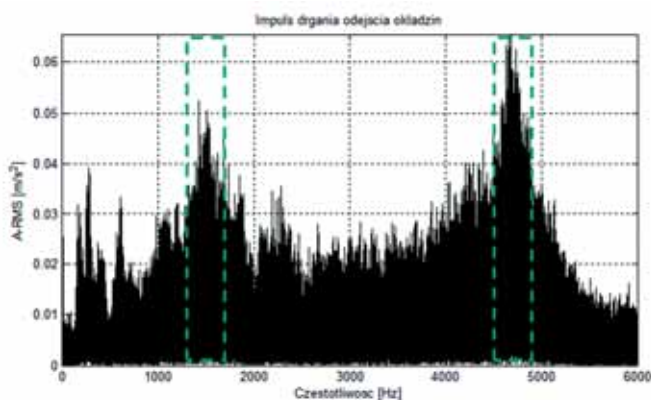
W tabeli 1 przedstawiono zakresy częstotliwości, w których obserwuje się zależność wartości amplitudy przyspieszeń drgań od grubości okładzin i od strony pomiaru drgań (pomiar na obsadzie hamulcowej od strony obudowy (Y_1) oraz na obsadzie od strony tłoczyska hamulcowego (Y_2)). Dodatkowo przedstawiono dynamikę zmian zgodnie z zależnością (2) [4] badanego parametru diagnostycznego dla danego pasma częstotliwości oraz wartości współczynników korelacji dla liniowej zależności wartości amplitudy przyspieszeń drgań od badanych grubości okładzin ciernych.

Badania drganiowe hamulca tarczowego w warunkach stanowiskowych wykazały, że pasma częstotliwości, związane ze zmianą grubości okładziny w czasie hamowania, nie trzeba wyznaczać metodą analizy widmowej sygnału przyspieszeń drgań zarejestrowanych podczas całego procesu hamowania (przy dociśniętych okładzinach do tarczy hamulcowej). Inną, również skuteczną metodą wskazania wspomnianych pasm częstotliwości, jest zarejestrowanie przyspieszeń drgań w ostatniej fazie hamowania, tj. w chwili odejścia okładzin od tarczy przy całkowitym zatrzymaniu ($v=0$ km/h). Na rysunku 6 przedstawiono przebieg czasowy chwilowych przyspieszeń w całym procesie hamowania, z widocznym impulsem związanym z odejściem okładzin od tarczy hamulcowej przy spadku ciśnienia w cylindrze hamulcowym. Natomiast na rysunku 7 przedstawiono widmo amplitudowe z impulsu odsunięcia się okładzin od tarczy.

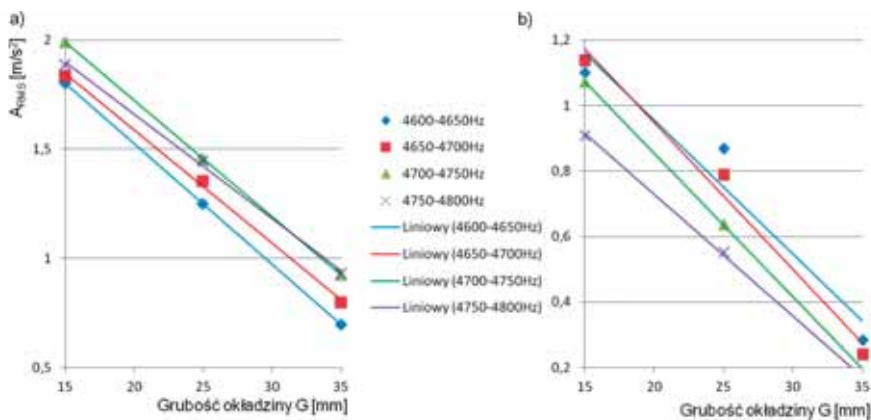
Na rysunku 8 przedstawiono graficzną zależność wartości skutecznej przyspieszeń drgań od grubości okładzin ciernych dla rozpatrywanych pasm częstotliwości.



Rys. 6. Wartość chwilowa przyspieszeń drgań w funkcji czasu hamowania: a) dla całego procesu hamowania, b) dla końca hamowania; t_1 - czas wzrostu docisku okładziny do tarczy, t_2 - czas hamowania 1 - koniec hamowania, $v=0$, 2 - chwilowa wartość przyspieszenia drgań od odejścia obsady z okładziną od tarczy



Rys. 7. Zależność amplitudy przyspieszeń drgań od częstotliwości zarejestrowanej dla chwili odejścia okładzin od tarczy hamulcowej typu 590x110, dla kierunku Y_1



Rys. 8. Zależność wartości skutecznej przyspieszeń drgań ARMS od grubości okładzin ciernych: a) dla tarczy typu 590x110, pomiar drgań w kierunku Y_1 , b) dla tarczy typu 590x110, pomiar drgań w kierunku Y_2

$$D = 20 \lg \left(\frac{s_2}{s_1} \right) \quad (2)$$

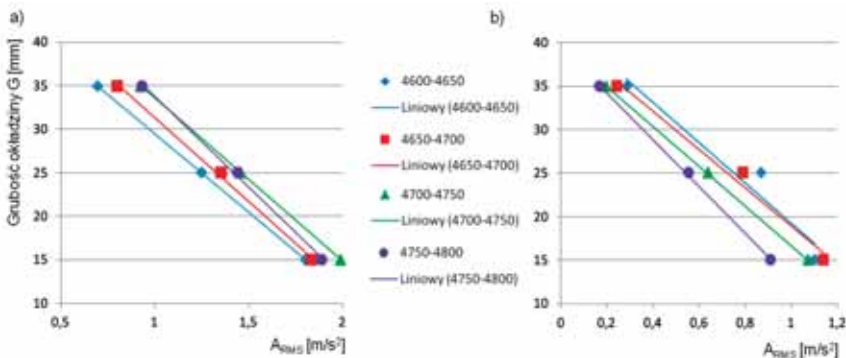
gdzie:

s_1 – wartość miary punktowej wyznaczonej dla okładziny G_3 lub G_2 ,

s_2 – wartość miary punktowej wyznaczonej dla okładziny G_1 .

Na rysunku 9 zostały przedstawione zależności grubości okładzin ciernych hamulca tarczowego G od wartości skutecznej przyspieszeń drgań ARMS w rozpatrywanych pasmach częstotliwości od 4600 do 4800 Hz co 50 Hz. Dla obu analizowanych kierunków pomiarów drgań (tj. dla obsady z okładziną cierną połączonej z dźwignią z obudową cylindra hamulcowego oraz dla obsady połączonej z dźwignią z tłoczyskiem siłownika hamulcowego) dokonano aproksymacji funkcją liniową zależności grubości okładziny od wartości skutecznej przyspieszeń drgań.

Ze względu na współczynnik R_2 aproksymacji zużycia okładzin ciernych względem wartości skutecznej przyspieszeń drgań, wyprowadzono zależności liniowe (3-6) dla oceny zużycia okładzin ciernych na podstawie pomiaru drgań generowanych przez obsadę hamulcową połączonej z dźwignią boczną do obudowy cylindra hamulcowego. W czasie badań stanowiskowych symulowanych hamowań na spadku, najwyższe wartości współczynnika korelacji uzyskano dla pomiaru drgań w kierunku Y_1 , również dla tego kierunku uzyskano dynamikę zmian przekraczającą 6dB już dla okładziny o grubości $G_3=15\text{mm}$ względem okładziny nowej o grubości $G_1=35\text{mm}$.



Rys. 9. Zależność grubości okładzin ciernych w funkcji wartości skutecznej przyspieszeń drgań: a) dla tarczy typu 590x110, pomiar drgań w kierunku Y_1 , b) dla tarczy typu 590x110, pomiar drgań w kierunku Y_2

$$G_{(590 Y_1, 4600-4650)} = -18,103 \cdot A_{RMS(4600-4650)} + 47,629 \quad R^2 = 1 \quad (3)$$

$$G_{(590 Y_1, 4650-4700)} = -19,284 \cdot A_{RMS(4650-4700)} + 50,617 \quad R^2 = 0,99 \quad (4)$$

$$G_{(590 Y_1, 4700-4750)} = -18,741 \cdot A_{RMS(4650-4700)} + 52,321 \quad R^2 = 1 \quad (5)$$

$$G_{(590 Y_1, 4750-4800)} = -20,882 \cdot A_{RMS(4750-4800)} + 54,676 \quad R^2 = 0,99 \quad (6)$$

gdzie:

$G_{(\dots)}$ – grubość okładziny,

$A_{RMS(\dots)}$ – wartość skuteczna przyspieszeń drgań w m/s^2 w kierunku Y_i .

Niedokładność odwzorowania liniowych modeli regresyjnych opisanych zależnościami (3-6) przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Błąd w % odwzorowania regresyjnych modeli liniowych w oszacowaniu rzeczywistej grubości okładzin

Częstotliwość w [Hz]	Tarcza hamulcowa typu 590×110, pomiar w kierunku Y_i		
	Dla okładziny o gr. 35 mm	Dla okładziny o gr. 25 mm	Dla okładziny o gr. 15 mm
4600-4650	0,01	0,01	0,01
4650-4700	0,62	1,87	1,65
4700-4750	0,02	0,07	0,05
4750-4800	0,61	1,85	1,63

Analiza wyników badań w dziedzinie częstotliwości wykazała, że dla poszczególnych pasm częstotliwości możliwe jest diagnozowanie zużycia okładzin ciernych przy znanej wartości skutecznej przyspieszeń drgań. Dynamika zmian wartości skutecznej przyspieszeń drgań dla okładzin G_1 , G_2 i G_3 mieści się, w przedziale 6-8 dB. W celu praktycznego zastosowania przedstawionej w artykule metody diagnozowania zużycia okładzin ciernych, konieczne jest rejestrowanie a tym samym tworzenie bazy danych odnośnie stanu, od chwili zamocowania okładziny nowej aż do osiągnięcia stanu dopuszczalnego a w konsekwencji stanu granicznego zużycia okładzin ciernych po którym należy wymienić okładziny.

4. Podsumowanie

Stanowiskowe badania diagnostyczne wykazały, że możliwe jest diagnozowanie zużycia okładzin ciernych hamulca tarczowego, dokonując analizy wartości chwilowych przyspieszeń drgań obsad z okładzinami w dziedzinie częstotliwości. Do celów diagnostyki zużycia okładzin wystarczające jest zarejestrowanie tylko pierwszego fragmentu hamowania wynoszącego 20 sekund.

Analiza drgań obsad w dziedzinie częstotliwości umożliwia diagnozowanie zużycia okładzin ciernych w paśmie częstotliwości 4600-4800 Hz co 50 Hz w czasie hamowania na spadku.

Zmiany postaci widma amplitudowego przyspieszeń drgań w zależności od zużycia okładzin ciernych hamulca są widoczne niezależnie od zamocowania przetwornika drgań na obsadzie hamulcowej od strony tłoczyska lub od strony obudowy cylindra.

Dla analizy w dziedzinie częstotliwości dynamika zmian wyniosła 6-8dB w zależności od danego pasma częstotliwości. Wykorzystując wartość skuteczną przyspieszeń drgań, możliwe jest wykorzystanie liniowych regresyjnych modeli diagnostycznych do wyznaczenia zużycia okładzin ciernych. Maksymalny błąd w szacowaniu grubości okładziny ciernej dla rozpatrywanych trzech grubości okładzin nie przekracza 2% dla tarczy typu 590×110.

Przeprowadzone stanowiskowe badania o charakterze diagnostycznym wykazały, że wyboru pasma częstotliwości związanego ze zmianą grubości okładzin można również dokonać po przeprowadzeniu testu impulsowego chwili odejścia okładziny od tarczy hamulcowej po hamowaniu. Zarejestrowanie chwilowych przyspieszeń drgań, a następnie przeprowadzenie analizy widmowej z tego fragmentu czasowego również dostarcza informacji o zmianie amplitudy wywołanej zmianą grubości okładzin. W obu przypadkach pełna analiza widmowa procesu hamowania, jak i chwili odejścia okładziny po hamowaniu przy spadku ciśnienia w cylindrze hamulcowym do zera wykazała, że pasmo częstotliwości 4600-4800 Hz może być wykorzystane do diagnostyki zużycia okładzin ciernych niezależnie od kierunku pomiaru drgań (Y1 lub Y2). Test impulsowy dowiódł, że również w paśmie 1600 Hz obserwuje się zmianę amplitudy ARMS w funkcji grubości okładziny, uzyskując zadowalającą dynamikę zmian przekraczającą 6dB, jednak tylko w czasie pomiaru w jednym kierunku, tj. Y_1 .

Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr N N504 644840

Literatura

- [1] Brüel&Kjær: *Piezoelectric Accelerometer Miniature Triaxial Delta Tron Accelerometer* – Type 4504A, oferta firmy Brüel & Kjær, s. 2.
- [2] Brüel&Kjær: *Measuring Vibration*. Revision September 1982, s. 16.
- [3] GRUSZEWSKI M.: *Wybrane zagadnienia eksploatacji hamulca tarczowego*, Technika transportu Szynowego 6-7/1995, s. 84-86.
- [4] GRYBOŚ R.: *Drgania maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009, s. 214.
- [5] KodeksUIC 541-3., *Hamulec-Hamulec tarczowy i jego zastosowanie. Warunki dopuszczenia okładzin hamulcowych*, Wyd. 6, listopad 2006, s. 23.
- [6] SAWCZUK W., TOMASZEWSKI F.: *Assessing the wear of friction pads in disc braking system of rail vehicle by using selected amplitude characteristics of vibration signal*. *Vibration In Physical Systems*, Volume XXIV, s. 335-361.