



Wojciech SAWCZUK

## KONCEPCJA WYKORZYSTANIA WYBRANYCH CHARAKTERYSTYK AMPLITUDOWYCH SYGNAŁU DRGANIOWEGO DO DIAGNOZOWANIA KOLEJOWEGO HAMULCA TARCZOWEGO

### *Streszczenie*

*Dążenie do podnoszenia prędkości pojazdów wymusza stosowanie większych mocy hamowania a więc układów hamulcowych szybko przejmujących i rozpraszających nagromadzoną energię cieplną. Dla zachowania wysokiej sprawności układu hamulcowego w całym procesie eksploatacji, konieczne jest kontrolowanie stanu pary ciernej tarcza-okładzina jeszcze przed osiągnięciem dopuszczalnego zużycia w szczególności okładzin ciernych.*

*Celem artykułu jest wykorzystanie sygnału drganiowego generowanego przez obsady okładzin do oceny zużycia okładzin ciernych hamulca tarczowego, wyznaczając charakterystyki w dziedzinie amplitud, podczas badań na bezwładnościowym stanowisku hamulcowym.*

### WSTĘP

Złożoność układów hamulcowych oraz ich późniejsza eksploatacja sprawia, że zmiana stanu układu rozumiana zużyciem elementów szczególnie pary ciernej układu hamulcowego oraz emisja sygnałów diagnostycznych jest procesem losowym. W praktyce rzadko występują zależności funkcyjne z uwagi na niemierzalność zakłóceń, które w procesie eksploatacji hamulca podlegają ciągłym zmianą oraz ze względu na występowanie strat w postaci zużycia elementów pary ciernej hamulca. Z reguły występujące zależności są zależnościami stochastycznymi tzn. niejednoznaczными. W diagnozowaniu układów hamulcowych dąży się znalezienia relacji pomiędzy stanem układu a sygnałem diagnostycznym na podstawie równania (1) [8, s. 11]:

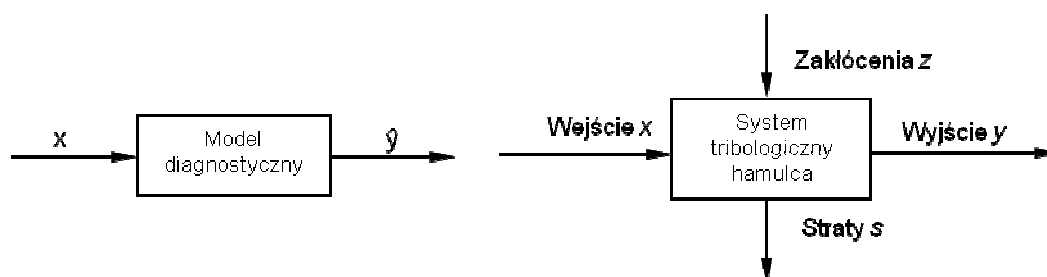
$$s(\Theta) = \Phi[X(\Theta), Y(\Theta)] + Z(\Theta) \quad (1)$$

gdzie:  $S(\Theta) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  - wektor sygnału diagnostycznego,  
 $X(\Theta) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  - wektor parametrów stanu,  
 $Y(\Theta) = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  - wektor sterowania,  
 $Z(\Theta) = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$  - wektor zakłóceń,  
 $\Theta$  - eksploatacyjna miara starzenia (czasu lub przebiegu),  
 $\Phi$  - operator przyporządkowania.

Do opisu wektora sygnału  $S(\Theta)=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  określającego stan technicznego układu hamulcowego, wykorzystuje się parametry procesów roboczych oraz towarzyszących. Uzyskanie modelu diagnostycznego (rys. 1) umożliwia np. metoda analizy regresyjnej, gdzie proponowany model diagnostyczny wykorzystuje parametry sygnału diagnostycznego do określenia parametrów stanu zgodnie z zależnością (2) [6, s. 138]:

$$\hat{y}_n = \hat{f}_n(x_1, x_2, \dots, x_m, a_0, a_1, \dots, a_j) \quad (2)$$

gdzie:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – parametry sygnałów diagnostycznych,  
 $a_0, a_1, \dots, a_j$  – współczynniki (parametry) równań regresji.



Rys. 1. Model diagnostyczny i system tribologiczny hamulca

W diagnostyce technicznej zgodnie z [6, s. 138] bardzo często wykorzystuje się jednowymiarowe modele liniowe o jednym wejściu i jednym wyjściu na podstawie obserwacji systemu tribologicznego hamulca zgodnie z zależnością (3):

$$\hat{y}_n = a_0 + a_i \cdot x_i \quad (3)$$

lub wykorzystuje się modele jednowymiarowe nieliniowe, co przedstawiają zależności (4) i (5):

$$\hat{y}_n = \beta \cdot a^{x_i} \quad (4)$$

$$\hat{y}_i = a \cdot x_i^y \quad (5)$$

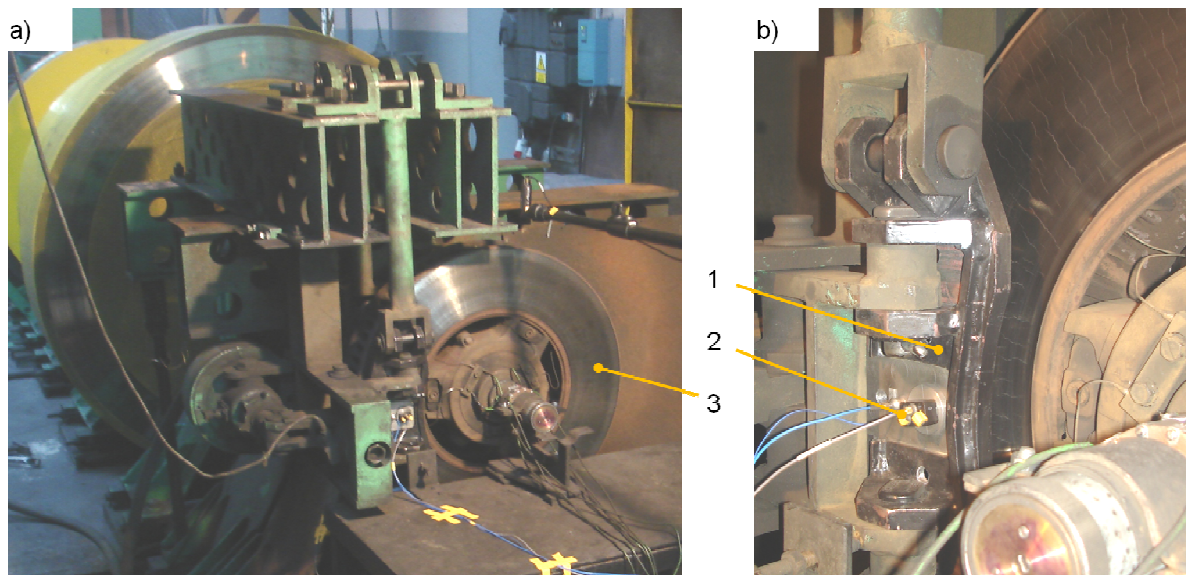
gdzie:  $a, \beta, y$  – parametry regresyjnego modelu diagnostycznego

Układ hamulca tarczowego jako przedmiot badań, charakteryzuje się jednoczesnym występowaniem różnych procesów takich jak: procesy mechaniczne, cieplne, chemiczne, fizyczne, aerodynamiczne i hydromechaniczne. Jednak układ ten jest złożonym obiektem diagnostycznym, ze względu na trudności rozdzielenia sygnału diagnostycznego, związanego ze stanem poszczególnych elementów układu hamulcowego oraz procesów fizycznych, które w nim zachodzą.

Celem badań jest przedstawienie możliwości wykorzystania sygnału drganiowego generowanego przez obsady hamulcowe wykorzystując wybrane charakterystyki amplitudowe. Badania diagnostyczne określające przydatność drgań elementów ciernych do oceny zużycia okładzin ciernych hamulca tarczowego przeprowadzono podczas symulowanych hamowań ze stałą mocą (hamowanie na spadku).

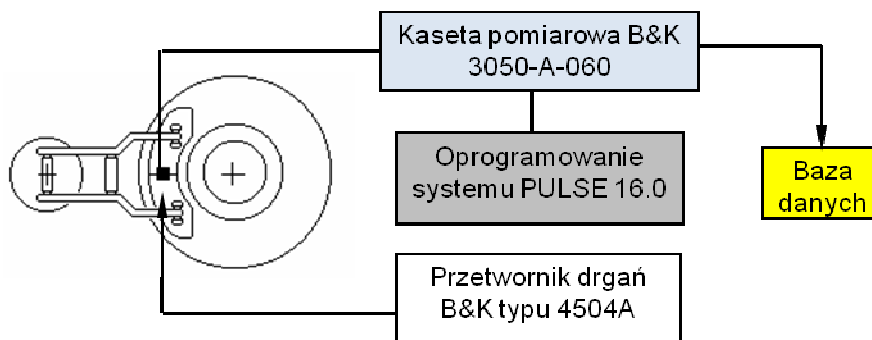
# 1. METODYKA BADAŃ

Badania diagnostyczne przeprowadzone zostały w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców klockowych i tarczowych pojazdów szynowych. Obiektem badań była tarcza hamulcowa typu 640×110 z wentylującymi łopatkami firmy BSI oraz 3 komplety okładzin typu 200 FR20H.2 firmy Frenoplast. Pierwszy komplet okładzin - nowy o grubości 35 mm oraz 2 komplety zużyte do grubości 25 mm i 15 mm.



**Rys. 2.** 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

Do badań wykorzystano program badawczy 2B1 zgodnie z załącznikiem C.2 zawartym w Kodeksie UIC 541-3. Dla wspomnianego programu przeprowadzono hamowanie ze stałą mocą hamowania wynoszącą 55kW [5, s. 23]. Jest to symulacja zjazdu pociągu ze stałą prędkością przy włączonym układzie hamulcowym. Prędkość zjazdu  $v=80\text{km/h}$ , nacisk okładziny na tarczę  $N=28\text{kN}$ , całkowity symulowany czas zjazdu pociągu  $t=10\text{min}$ . Masa hamująca przypadająca na jedną tarczę wyniosła w czasie badań  $M=6,7\text{t}$ . Na jednej z obsad hamulcowych zamocowano przetwornik drgań co przedstawia rysunek 2b przykręcony do obsady za pośrednictwem płytki mocującej [2, s. 16].



**Rys. 3.** 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 czarnej tarczy hamulcowej. Do akwizycji sygnałów drgań zastosowano zestaw pomiarowy składający się z: piezoelektrycznego przetwornika przyspieszeń drgań, kasyety pomiarowej typu B&K 3050-A-060 wraz z oprogramowaniem systemu PULSE 16.0. Tor pomiarowy przedstawiono na rysunku 3.

Przetworniki drgań typu 4504 firmy Brüel&Kjær wybrano na podstawie wytycznych zawartych w pracy [1, s. 2], 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 hamująca i czas hamowania. Równocześnie obserwowano zmiany zachodzące w amplitudzie chwilowych przyspieszeń drgań.

## 2. WYNIKI BADAŃ

Dokonując analiz wartości chwilowych przyspieszeń drgań w dziedzinie amplitud najczęściej wykorzystuje się miary punktowe [7, s. 355-361] stosowane zarówno do opisu sygnałów przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń drgań. Zaletą ich jest scharakteryzowanie sygnału drganiowego przy pomocy jednej liczby, przez co łatwo można określić zmiany w sygnale wibroakustycznym, będące wynikiem zmiany stanu technicznego badanego obiektu.

Wykorzystywane miary punktowe w diagnostyce wibroakustycznej, zgodnie z pracą [7, s. 355-361], dzieli się na wymiarowe i bezwymiarowe. Do diagnostyki zużycia okładzin ciernych kolejowego hamulca tarczowego zastosowano następujące miary punktowe (wymiarowe):

- amplituda średnia, co przedstawia zależność:

$$A_{AVERAGE} = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)| dt \quad (6)$$

gdzie:  $T$  – czas uśredniania [s],

$s(t)$  – wartość chwilowa przyspieszeń drgań [m/s<sup>2</sup>].

- amplituda skuteczna, opisana równaniem:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^2 dt} \quad (7)$$

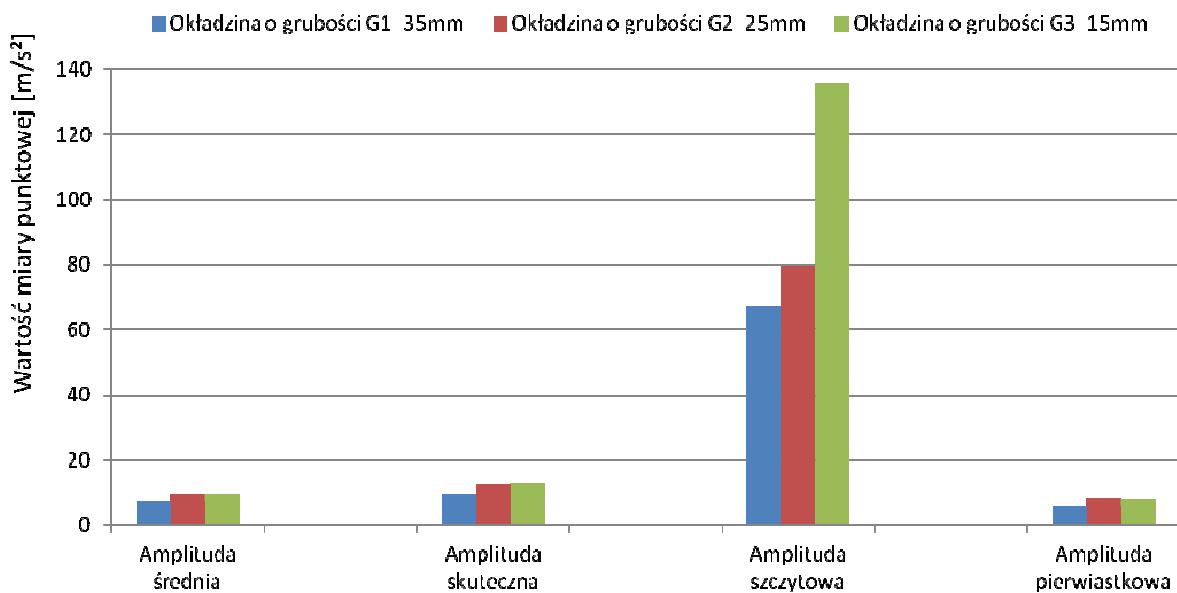
- amplituda pierwiastkowa, co przedstawia zależność:

$$A_{SQUARE} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^{\frac{1}{2}} dt \right]^2 \quad (8)$$

- amplituda szczytowa, opisana równaniem:

$$A_{PEAK} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Analizując zależności (6-9) można stwierdzić za [7, s. 355-361], że amplituda średnia w jednakowym stopniu uwzględnia każdą wartość amplitudy chwilowego sygnału drgań, natomiast amplituda skuteczna w większym stopniu uwzględnia duże wartości amplitudy chwilowej i jest najczęściej stosowana miarą punktową, ponieważ cechuje się proporcjonalnością do mocy procesu. Amplituda pierwiastkowa w większym stopniu uwzględnia małe wartości amplitudy chwilowego sygnału drgań, natomiast miara punktowa opisana amplitudą szczytową jest wykorzystywana przy ocenie procesów o charakterze impulsowym jak np. uderzenia części maszyn spowodowane luzami itp. Zestawienie analizowanych miar punktowych możliwych do wykorzystania w diagnostyce hamulca tarczowego przedstawia rysunek 4.



**Rys. 4.** Zestawienie miar punktowych uzyskanych z sygnałów przyspieszeń drgań generowanych przez obsady z okładzinami w czasie hamowania ze stałą mocą

Wielkości (miary) bezwymiarowe w charakterystykach sygnałów diagnostycznych są ilorazami odpowiednich miar punktowych wymiarowych opisanych zależnościami (6-9). Do najważniejszych tych miar zalicza się [8, s. 41-42]:

- współczynnik kształtu, co przedstawia zależność:

$$K = \frac{A_{RMS}}{A_{AVERAGE}} \quad (10)$$

- współczynnik szczytu, opisany równaniem:

$$C = \frac{A_{PEAK}}{A_{RMS}} \quad (11)$$

- współczynnik impulsowości, wyznaczany zależnością:

$$I = \frac{A_{PEAK}}{A_{AVERAGE}} \quad (12)$$

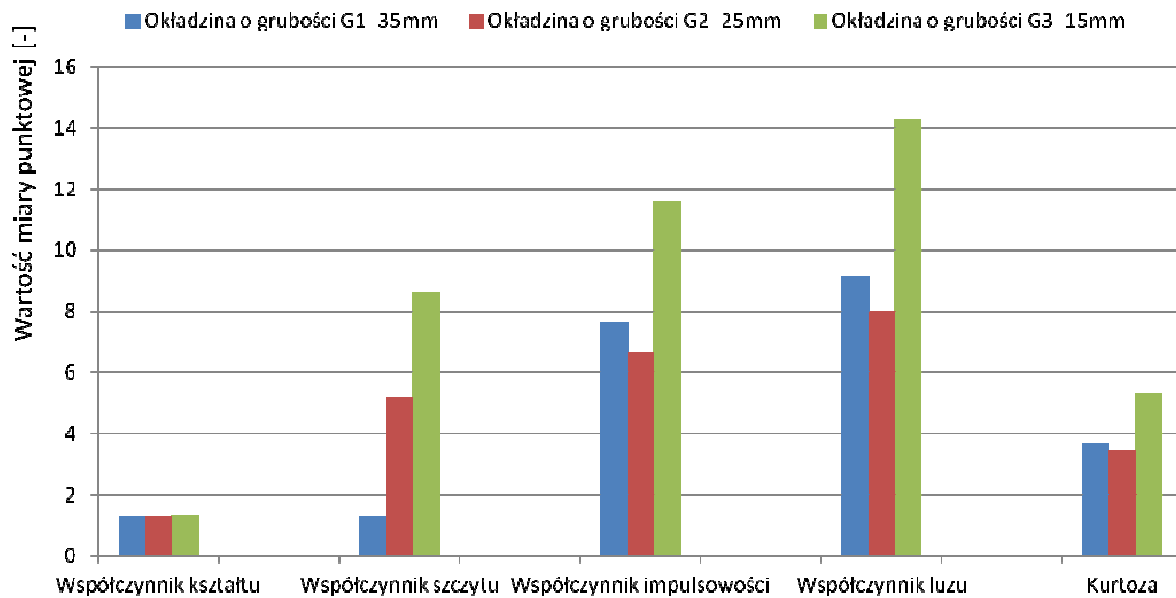
– współczynnik luzu, co przedstawia równanie:

$$L = \frac{A_{PEAK}}{A_{SQUARE}} \quad (13)$$

– kurtoza, opisana zależnością:

$$\beta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^4 dt}{\left[ \frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^2 dt \right]^2} \quad (14)$$

Zestawienie miar punktowych (bezwymiarowych) opisanych zależnościami (10-14) przedstawia rysunek 5.



**Rys. 5.** Zestawienie miar punktowych bezwymiarowych uzyskanych z sygnałów przyspieszeń drgań generowanych przez obsady z okładzinami w czasie hamowania ze stałą mocą

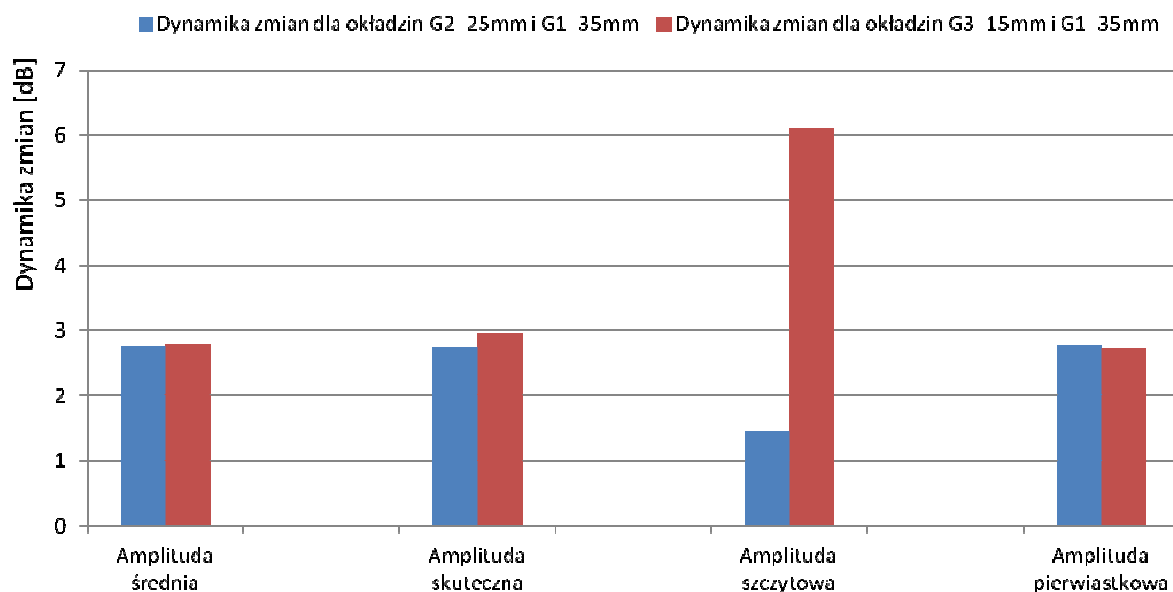
Badania o charakterze diagnostycznym pomiaru przyspieszeń drgań pochodzących z obsad hamulcowych w dziedzinie amplitud wykazały, że niektóre miary punktowe wykazują zmienność na zmianę stanu technicznego rozumianego zmianą grubości okładzin ciernych.

W celu określenia przydatności rozpatrywanych miar punktowych do diagnostyki zużycia okładzin ciernych hamulca tarczowego dokonując pomiaru przyspieszeń drgań z obsad hamulcowych, dodatkowo przedstawiono dynamikę zmian zgodnie z zależnością (15) [4, s. 214], co przedstawiono również na rysunek 6 i 7.

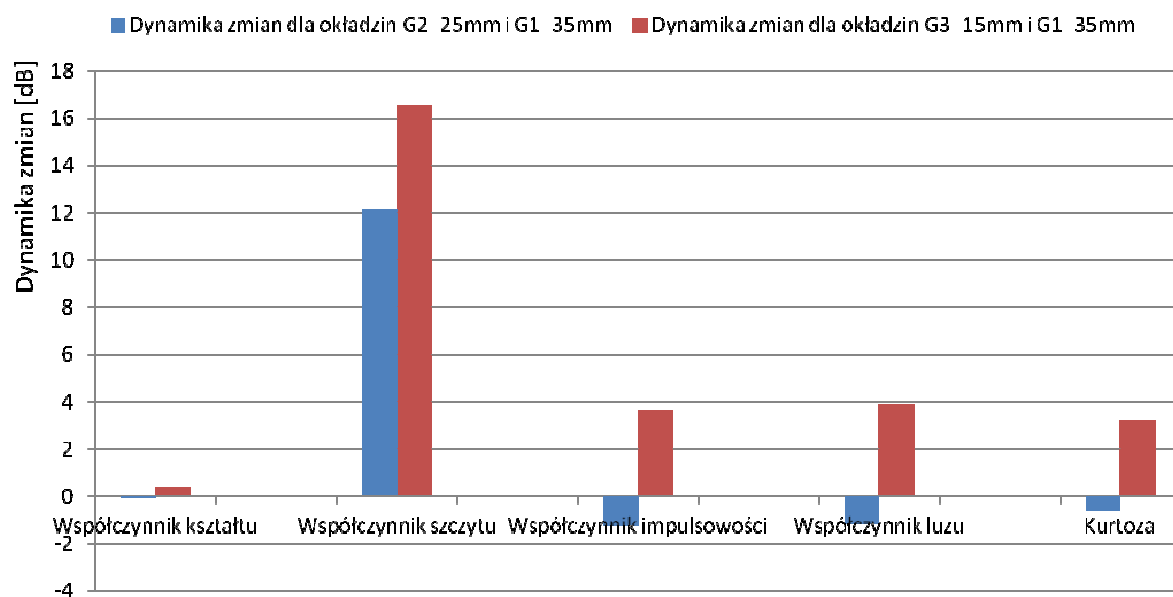
$$D = 20 \lg \left( \frac{s_2}{s_1} \right) \quad (15)$$

gdzie:

- $s_1$  – wartość miary punktowej (np.  $A_{RMS}$ ) wyznaczonej dla okładziny G3 lub G2,
- $s_2$  – wartość tej samej miary punktowej wyznaczonej dla okładziny G1.



**Rys. 6.** Zależność dynamiki zmian rozpatrywanego parametru diagnostycznego dla wąskich pasm częstotliwości widma amplitudowego.



**Rys. 7.** Zależność dynamiki zmian rozpatrywanego parametru diagnostycznego dla wąskich pasm częstotliwości widma amplitudowego.

W diagnostyce wibroakustycznej o wrażliwość danego parametru określa się na podstawie dynamiki zmian opisanej zależnością (15). Wówczas możliwe jest stwierdzenie, czy dany parametr diagnostyczny wykazuje zmienność na zmianę stanu, wynikającą z zużycia okładzin ciernych. Dany parametr diagnostyczny wykazuje zadowalającą wrażliwość na zmianę stanu, jeżeli dynamika zmian otrzymanych symptomów jest powyżej 6dB [4, s. 215]. Wówczas stwierdza się podwójną zmianę wartości zmierzonego parametru diagnostycznego.

Analizując wartości dynamiki zmian do celów diagnostycznych z miar punktowych uzyskanych z analiz wartości chwilowych przyspieszeń drgań w dziedzinie amplitud, należy wykorzystać amplitudę szczytową lub współczynnik szczytu.

## 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 amplitud. Najlepiej wykorzystać dwie miary punktowe tj. amplitudę szczytową i współczynnik szczytu. W przypadku współczynnika szczytu należy do celów diagnostycznych zarejestrować sygnał chwilowych przyspieszeń drgań nie dłuższy niż 20s z pierwszego okresu hamowania. Obie miary punktowe wykazały zadowalającą dynamikę zmian powyżej 6dB. Przeprowadzone badania diagnostyczne dowiodły, że krótkie fragmenty hamowania pociągu na spadku ze stałą prędkością i towarzyszące temu drgania obsad z okładzinami ciernymi mogą dostarczyć informacji o stanie pary ciernej hamulca.

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

## THE CONCEPT OF USING SELECTED AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF VIBRATION SIGNAL TO DIAGNOSE RAILWAY DISC BRAKE

### *Abstract*

*Attempt to raise train speed involves application of greater braking power i.e. braking systems rapidly absorbing and dispersing stored heat energy. To maintain high efficiency of braking system in the whole operational process, it is necessary to control the friction set: brake and pad before reaching limitary wear particularly of friction pads.*

*The purpose of this article is to apply vibration signal generated by pad calipers to assess the wear of friction pads of disc brake by defining characteristics of amplitude during tests at inertial brake station.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Brüel&Kjær.: *Piezoelectric Accelerometer Miniature Triaxial Delta Tron Accelerometer – Type 4504A*. Oferta firmy Brüel & Kjær.
2. Brüel&Kjær.: *Measuring Vibration*. Revision September 1982.
3. Gruszewski M.: *Wybrane zagadnienia eksploatacji hamulca tarczowego*. Technika Transportu Szynowego 1995, nr 6-7, s. 84-86.
4. Gryboś R.: *Drgania maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009, s. 214.
5. Kodek UIC 541-3.: *Hamulec-Hamulec tarczowy I jego zastosowanie. Warunki dopuszczenia okładzin hamulcowych*, Wyd. 6, listopad 2006.
6. Niziński S., Michalski R.: *Diagnostyka obiektów technicznych*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2002.
7. 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.



8. Szymański G.: *Analiza możliwości zastosowania wybranych charakterystyk sygnału drganiowego do diagnostyki silnika spalinowego*. Rozprawa doktorska Politechnika Poznańska, Poznań 2005.

***Autor:***

**Wojciech SAWCZUK**