

Jarosław BEDNARZ

## METODOLOGIA BADANIA DRGAŃ GRUNTU POWODOWANYCH RUCHEM POJAZDÓW SZYNOWYCH

### Streszczenie

W artykule przedstawiona została metodologia oceny drgań gruntu powodowanych ruchem pojazdów szynowych. Przedstawiono opis badań eksperymentalnych ich wyniki oraz ocenę zagrożeń związanych z ruchem pojazdów szynowych na przejeździe drogowo-tramwajowym zlokalizowanym na Śląsku. Proponowana metoda oceny zagrożeń oparta jest na analizie czasowo-częstotliwościowej sygnałów oraz wyznaczeniu histogramów rozkładu wartości amplitud sygnałów.

### WSTĘP

W obecnych czasach ze względu na bardzo dużą gęstość zabudowy w miastach coraz częściej budynki mieszkalne i przemysłowe zlokalizowane są w pobliżu szlaków kolejowych i tramwajowych. Takie umiejscowienie niesie ze sobą problemy związane z propagacją fali drganiowej w gruncie wywołanej przejazdami pojazdów szynowych, co może prowadzić do powstawania uszkodzeń budynków oraz znacznie zmniejszać komfort ich użytkowania [1,2].

W związku z tym istnieje konieczność opracowania metodologii oceny zagrożeń dynamicznych od ruchu pojazdów szynowych na istniejąca i planowaną infrastrukturę mieszkalno-przemysłową. W artykule przedstawiono wykorzystanie opracowanej przez autora metodologii badania propagacji fal drganiowych w gruncie opartą o analizę wyników rejestracji przyspieszenia drgań gruntu w dziedzinie czasu i częstotliwości. Przedstawiono również opis badań eksperymentalnych, których wyniki posłużyły do zaprezentowania opracowanej metodologii badań drgań gruntu.

### 1. OPIS METODOLOGII OCENY DRGAŃ GRUNTU

Opracowana metodologia oceny zagrożeń dynamicznych powodowanych ruchem pojazdów szynowych opiera się na wykorzystaniu normy PN-85/B-02170 [3]. Zgodnie z punktem 4.3. tej normy wpływ drgań przekazywanych przez podłoże na zabudowania mieszkalne oraz obiekty przemysłowe można pominąć w tych przypadkach, gdy udział tego obciążenia konstrukcji jest znikomy i orientacyjnie można przyjąć, że amplituda przyspieszeń ruchu podłoża w miejscu posadowienia budynku spełnia warunek:

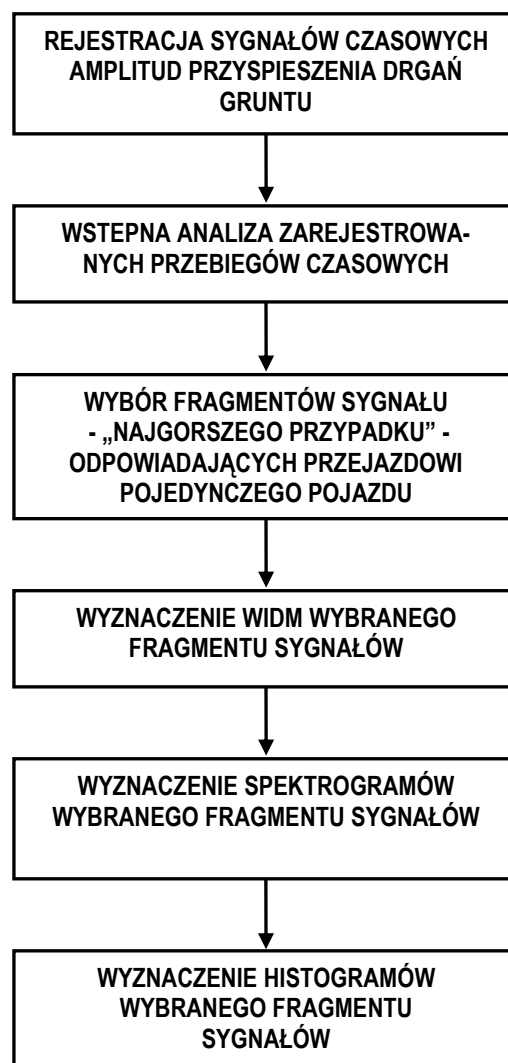
$$a_p < 0,005 [g] = 0,05 \frac{m}{s^2} \quad (1)$$

W związku z tym jednym z kluczowych elementów proponowanej metodologii badań drgań gruntu jest wyznaczenie histogramu rozkładu wartości bezwzględnych amplitud przyspieszenia drgań gruntu. Histogram umożliwia stwierdzenie jak często występują ewentualne przekroczenia dopuszczalnej wartości przyspieszenia  $a_p$ .

Dodatkowo w proponowanej metodologii badań wyznaczane są również widma zarejestrowanych sygnałów oraz ich spektrogramy. Wyznaczenie widm sygnałów oraz ich spektrogramów umożliwia podjęcie decyzji o zastosowaniu układu wibroizolacji torowiska [4]

ponieważ zastosowanie takiego układu ma sens tylko w przypadku drgań o częstotliwościach poniżej 50 [Hz] [5].

Na rysunku 1 przedstawiono schemat opracowanej metodologii analizy drgań gruntu wywołanych ruchem pojazdów szynowych.



Rys. 5. Schemat opracowanej metodologii oceny drgań gruntu.

Pierwszym krokiem opracowanej metodologii badania propagacji fal drganiowych w gruncie jest rejestracja sygnałów czasowych

przyspieszenia drgań gruntu w kilku punktach pomiarowych. Pomiar powinien być wykonany dwukrotnie:

1. pomiar tła, w celu sprawdzenia poziomów amplitud drgań gruntu powodowanych ruchem pieszych, samochodów i drgań sejsmicznych,
2. pomiar drgań w trakcie przejazdów pojazdów szynowych wzdłuż odcinka pomiarowego.

Drugim krokiem jest wstępna analiza zarejestrowanych sygnałów - wyznaczenie widm sygnałów oraz wybranie wszystkich fragmentów sygnałów odpowiadających przejazdowi pojedynczego pojazdu szynowego wzdłuż odcinka pomiarowego.

Trzecim krokiem jest wybór spośród wybranych w drugim kroku analizy fragmentów sygnałów, które odpowiadają przejazdowi pojedynczego pojazdu szynowego wzdłuż odcinka pomiarowego jednego, dla którego wartości amplitudy przyspieszenia drgań gruntu są największe - w przypadku analizy drgań gruntu w celu oceny zagrożeń najlepszym wyborem jest właśnie analiza najgorszego przypadku.

Kolejnymi krokami prowadzonej analizy jest wyznaczenie widm oraz spektrogramów wybranego fragmentu zarejestrowanych sygnałów - wykonanie tych analiz pozwala na ocenę możliwości zastosowania układów wibroizolacji.

Ostatnim krokiem jest wyznaczenie histogramów wybranego fragmentu zarejestrowanych sygnałów. Analiza ta pozwala na określenie możliwości występowania zagrożeń dynamicznych i podjęcie działań związanych z ich eliminacją jeżeli takie zagrożenia występują.

Zastosowanie proponowanej metodologii oceny drgań gruntu dla przejazdów tramwajów wraz z opisem badań eksperymentalnych zostało przedstawione w kolejnych rozdziałach.

## 2. OPIS BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

### 2.1. Charakterystyka ogólna badań

Raport dotyczy analizy wpływu przejazdów tramwajów na parametry drgań gruntu na przejeździe tramwajowo-drogowym zlokalizowanym w Będzinie przy Alei Hugona Kołłątaja (rys. 2).



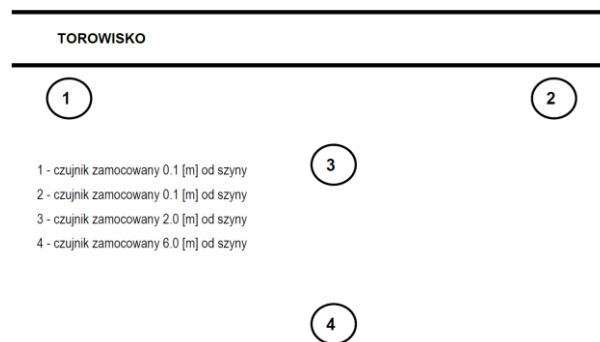
Rys. 1. Lokalizacja przejazdu tramwajowo-drogowego.

Celem badań było uzyskanie informacji o amplitudzie i częstotliwościach drgań gruntu. Zakres przeprowadzonych badań obejmował:

3. rejestrację przebiegów czasowych drgań gruntu w trakcie przejazdu tramwajów,
4. wyznaczenie maksymalnej amplitudy przyspieszenia drgań gruntu dla każdego punktu i kierunku pomiarowego
5. wyznaczenie widm zarejestrowanych sygnałów,
6. opracowanie wyników badań.

### 2.2. Opis przeprowadzonych badań

Badania przeprowadzono w siatce 4 punktów pomiarowych rozmieszczonych zgodnie z rysunkiem 3. Przyjęty układ współrzędnych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 2. Siatka punktów pomiarowych.



Rys. 3. Przyjęty układ współrzędnych.

W trakcie badań wykorzystano następujący sprzęt pomiarowy:

1. komputer pomiarowy,
2. rejestrator sygnałów Teac Gx-01,
3. 4 trójosiowe akcelerometry piezoelektryczne typu PCB 356A16,
4. 3 jednoosiowe sejsmiczne akcelerometry piezoelektryczne typu PCB 393A03.

We wszystkich punktach pomiarowych przebiegi czasowe drgań rejestrowano z wykorzystaniem trójosiowych akcelerometrów piezoelektrycznych typu PCB 356A16 zamocowanych na stalowych tarczach położonych na ziemi (rys. 4). Dodatkowo w punktach 1, 2 oraz 3 przebiegi czasowe drgań rejestrowano z wykorzystaniem jednoosiowych akcelerometrów piezoelektrycznych typu PCB 393A03 (rys. 4).



Rys. 5. Sposób mocowania czujników drgań.

Przyjęto następujące nazwy punktów pomiarowych, które stosowane są konsekwentnie w całym raporcie:

1. PS:(nr):Z - pomiar z wykorzystaniem akcelerometru typu PCB 393A03 w punkcie o numerze (nr) w kierunku Z,
2. PP:(nr):(kier) - pomiar z wykorzystaniem akcelerometru typu PCB 356A16 w punkcie o numerze (nr) w kierunku (kier).

Poniżej zestawiono najważniejsze cechy przeprowadzonych badań:

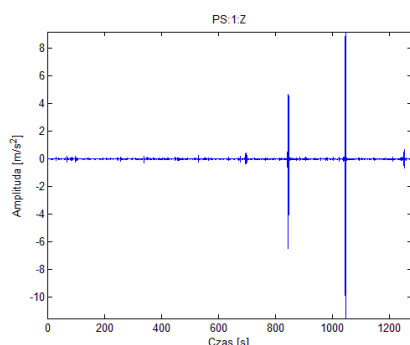
1. rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszenia drgań sygnałów odpowiedzi w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach z wykorzystaniem akcelerometrów typu PCB 356A16 w wszystkich czterech punktach pomiarowych,
2. rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszenia drgań sygnałów odpowiedzi w kierunku „Z” z wykorzystaniem akcelerometrów typu PCB 393A03 w punktach pomiarowych numer 1, 2 i 3,
3. częstotliwość próbkowania ustalono na 500 [Hz],
4. zastosowano filtrację dolnoprzepustową rejestrowanych sygnałów o częstotliwości odcięcia 200 [Hz],
5. na podstawie mierzonych sygnałów pomiarowych wyznaczono maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań dla każdego punktu i kierunku pomiarowego,

6. na podstawie mierzonych sygnałów pomiarowych wyznaczono widma sygnałów przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla każdego punktu i kierunku pomiarowego,
7. na podstawie mierzonych sygnałów pomiarowych wyznaczono histogramy rozkładu wartości bezwzględnych amplitud przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla każdego punktu i kierunku pomiarowego.

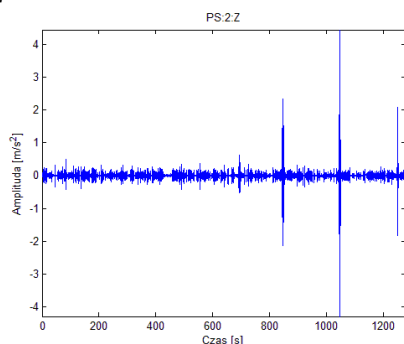
### 3. ZASTOSOWANIE PROPONOWANEJ METODOLOGII ANALIZY DRGAŃ GRUNTU

#### 3.1. Wstępna analiza zarejestrowanych przebiegów czasowych i wybór fragmentu sygnału do dalszej analizy

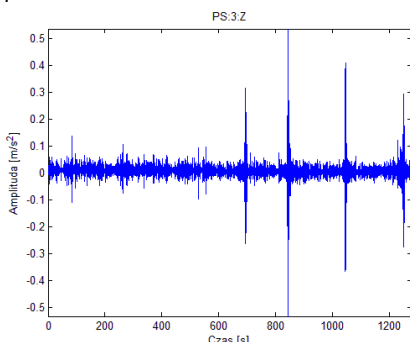
Pierwszym krokiem proponowanej metodologii badań nad propagacją fal drganiowych w gruncie jest rejestracja i analiza całych zarejestrowanych przebiegów czasowych drgań gruntu. W niniejszej pracy skupiono się jedynie na analizie sygnałów czasowych zarejestrowanych w punktach 1,2 i 3 (rys. 2) dla kierunku Z (rys. 3) z wykorzystaniem akcelerometrów sejsmicznych typu PCB 393A03. Na rysunkach 6a÷6c przedstawiono przebiegi zarejestrowanych sygnałów czasowych, a na rysunkach 7a÷7c wykresy widm wyznaczonych na ich podstawie.



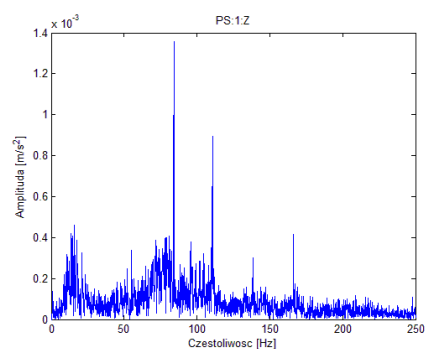
Rys. 6a. Sygnał czasowy amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowany w punkcie PS:1:Z



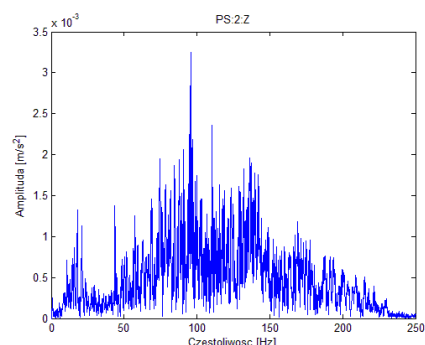
Rys. 6b. Sygnał czasowy amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowany w punkcie PS:2:Z.



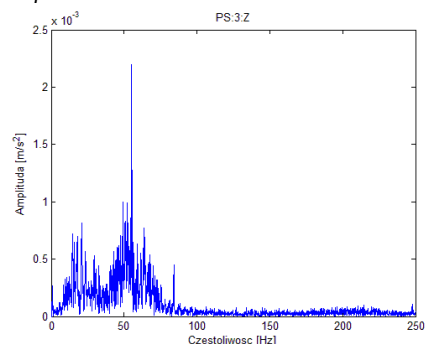
Rys. 6c. Sygnał czasowy amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowany w punkcie PS:3:Z.



Rys. 7a. Widmo sygnału amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:1:Z



Rys. 7b. Widmo sygnału amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:2:Z

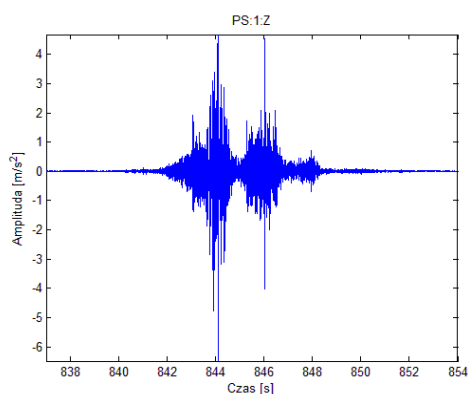


Rys. 7c. Widmo sygnału amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:3:Z

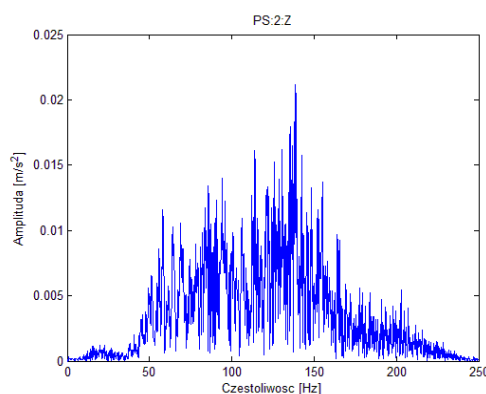
Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 6a÷6c oraz 7a÷7c jest znacznie utrudniona - trudno jest określić jakie są dominujące częstotliwości drgań gruntu oraz jak znaczne są przekroczenia dopuszczalnej amplitudy drgań gruntu  $a_p$ . Dlatego też do dalszej analizy wybrano fragment sygnału od 837 do 854 sekundy - dla tego fragmentu występują największe wartości amplitudy sygnału drgań w punkcie pomiarowym PS:3:Z, który jest położony w odległości 2 [m] od źródła wymuszenia. W dwóch pozostałych punktach rejestrowana jest amplituda źródła wymuszenia (ruch pojazdu szynowego) i punkty te nie mogą być brane pod uwagę przy ocenie propagacji fali drganiowej w gruncie.

#### 3.2. Wyznaczenie widm wybranego fragmentu zarejestrowanych sygnałów czasowych

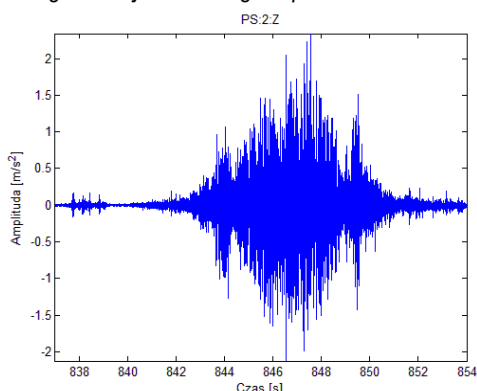
Kolejnym krokiem proponowanej metodologii badań nad propagacją fal drganiowych w gruncie jest wyznaczenie widm wybranych w poprzednim kroku fragmentów zarejestrowanych sygnałów czasowych. Na rysunkach 8a÷8c przedstawiono wykresy wybranych fragmentów zarejestrowanych sygnałów czasowych, a na rysunkach 9a÷9c wykresy widm wyznaczonych na ich podstawie.



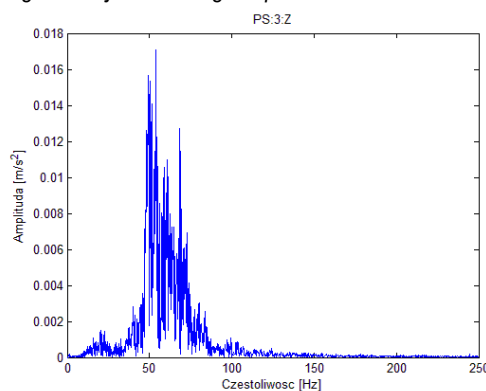
Rys. 8a. Wybrany fragment sygnału czasowego amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:1:Z



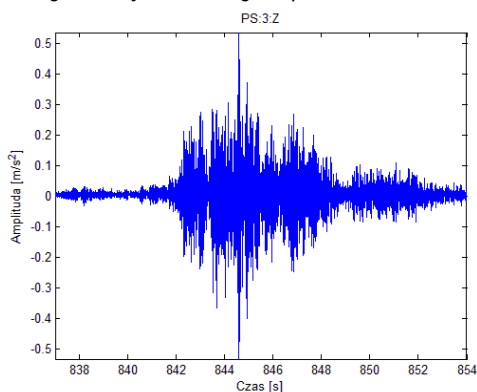
Rys. 9b. Widmo wybranego fragmentu sygnału amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:2:Z



Rys. 8b. Wybrany fragment sygnału czasowego amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:2:Z



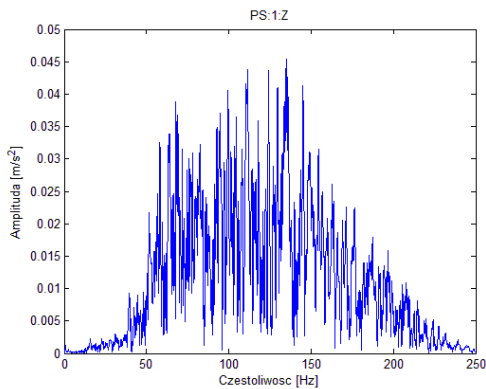
Rys. 9c. Widmo wybranego fragmentu sygnału amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:3:Z



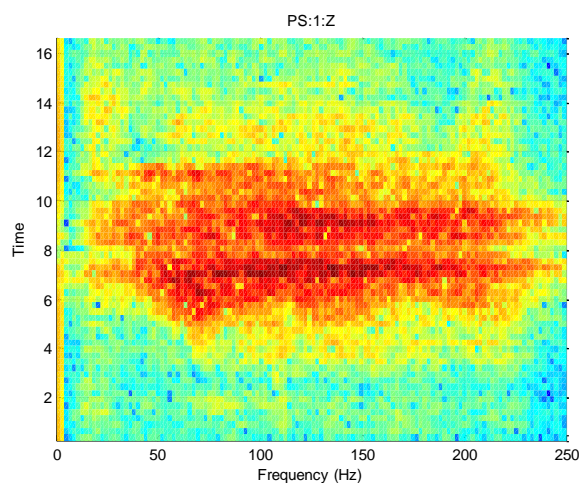
Rys. 8c. Wybrany fragment sygnału czasowego amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:2:Z

### 3.3. Wyznaczenie spektrogramów wybranego fragmentu zarejestrowanych sygnałów czasowych

Kolejnym krokiem proponowanej metodologii badań nad propagacją fal drganiowych w gruncie jest wyznaczenie spektrogramów przyspieszenia drgań dla wybranych w poprzednim kroku fragmentów zarejestrowanych sygnałów czasowych. Na rysunkach 10a÷10c przedstawiono spektrogramy wyznaczone na podstawie wybranych fragmentów zarejestrowanych w trakcie badań sygnałów czasowych.

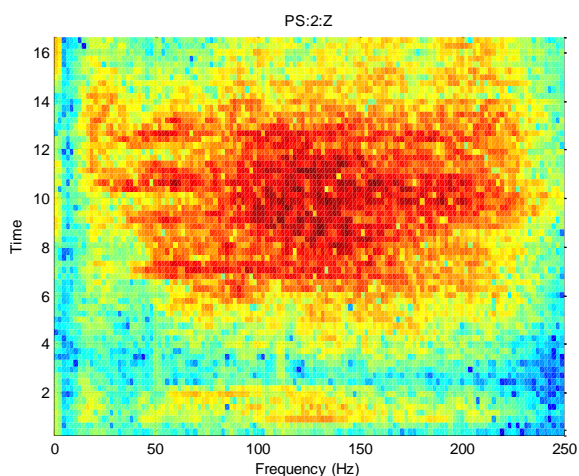


Rys. 9a. Widmo wybranego fragmentu sygnału amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:1:Z

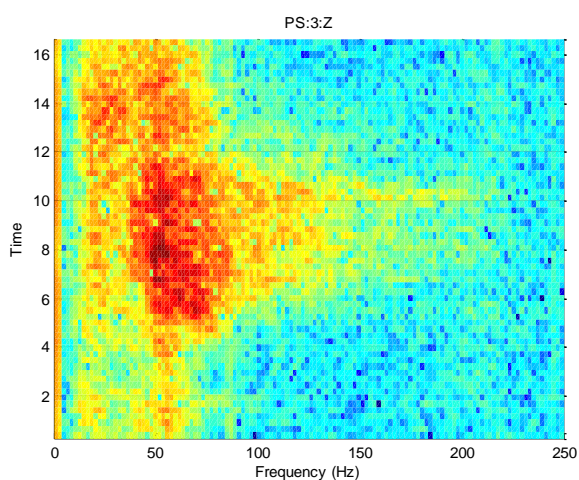


Rys. 10a. Spektrogram wyznaczony na podstawie fragmentu sygnału czasowego amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:1:Z





**Rys. 10b.** Spektrogram wyznaczony na podstawie fragmentu sygnału czasowego amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:2:Z



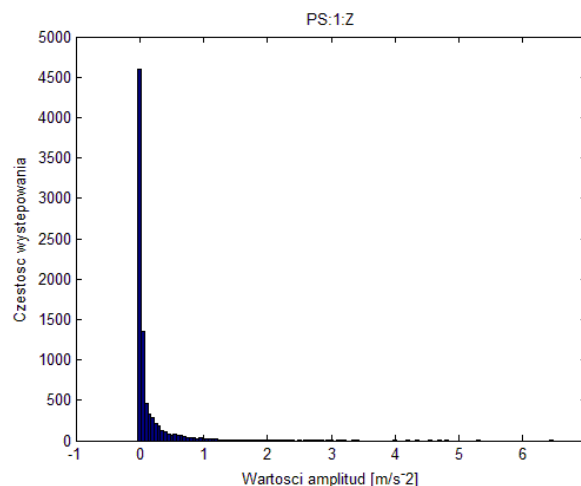
**Rys. 10c.** Spektrogram wyznaczony na podstawie fragmentu sygnału czasowego amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowanego w punkcie PS:3:Z

Analiza spektrogramów przedstawionych na rysunkach 10a÷10c pozwala stwierdzić, że w gruncie, w miejscu usytuowania przejazdu drogowo-szynowego występują drgania podłoża o niskiej częstotliwości z zakresu od około 0,1 [Hz] do około 5,0 [Hz] przez cały czas prowadzonych badań. Drgania te mogły być spowodowane ruchem pojazdów samochodowym w okolicy przejazdu. Na podstawie wyznaczonych spektrogramów można również zaobserwować, że przejazd pojazdu szynowego powoduje powstanie fali drganiowej w gruncie o wyższych częstotliwościach powyżej 10 [Hz]. Bezpośrednio przy torowisku powstająca fala drganiowa ma składowe częstotliwości od około 10 [Hz] do około 220÷240 [Hz] natomiast parametry gruntu, a zwłaszcza jego współczynnik tłumienia powodują, że już w odległości 2 [m] od torowiska sygnał drganiowy ma częstotliwości z zakresu od 10 do około 100 [Hz].

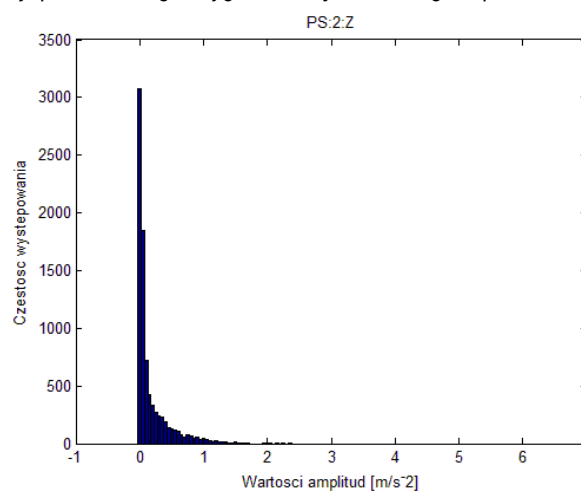
### 3.4. Wyznaczenie histogramów wybranego fragmentu zarejestrowanych sygnałów czasowych

Kolejnym krokiem proponowanej metodologii badań nad propagacją fal drganiowych w gruncie jest wyznaczenie histogramów rozkładu wartości bezwzględnych amplitud przyspieszenia drgań dla wybranych w poprzednim kroku fragmentów zarejestrowanych sygnałów czasowych. Na rysunkach 11a÷11c przedstawiono histogramy rozkładu wartości bezwzględnych amplitud przyspieszenia

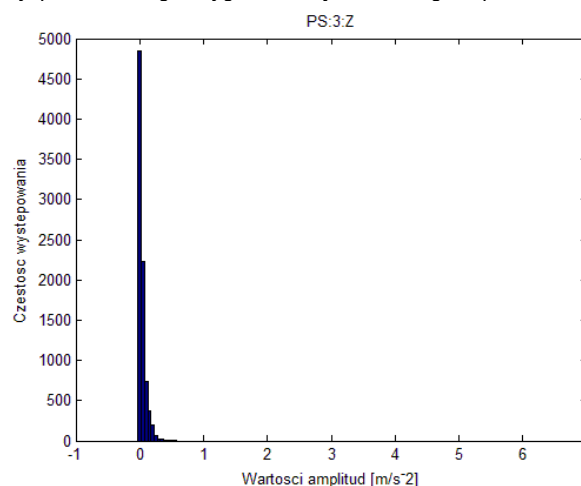
drgań dla wybranych fragmentów zarejestrowanych w trakcie badań sygnałów czasowych.



**Rys. 11a.** Histogram rozkładu wartości bezwzględnych amplitud przyspieszenia drgań sygnału zarejestrowanego w punkcie PS:1:Z



**Rys. 11b.** Histogram rozkładu wartości bezwzględnych amplitud przyspieszenia drgań sygnału zarejestrowanego w punkcie PS:2:Z



**Rys. 11c.** Histogram rozkładu wartości bezwzględnych amplitud przyspieszenia drgań sygnału zarejestrowanego w punkcie PS:3:Z

Na podstawie wyznaczonych histogramów można wyznaczyć wskaźnik  $W_H$ , który określa stosunek ilości wartości amplitudy przyspieszenia drgań nieprzekraczających wartości dopuszczalnej  $a_p$  do ilości wartości amplitudy przyspieszenia drgań przekraczających wartość dopuszczalną  $a_p$  na podstawie zależności:

$$W_H = \frac{N_1}{N_2} \quad (2)$$

gdzie:

$N_1$  - ilość wartości amplitudy przyspieszenia drgań nieprzekraczających wartości dopuszczalnych,

$N_2$  - ilość wartości amplitudy przyspieszenia drgań przekraczających wartość dopuszczalną.

Wartość wskaźnika  $W_H$  powyżej jedności wskazuje na sporadyczne występowanie przekroczeń wartości dopuszczalnej amplitudy przyspieszenia  $a_p$  w trakcie przejazdu pojazdu szynowego. Dla wybranych fragmentów sygnałów wartości wskaźnika wynoszą:

1. dla punktu PS:1:Z -  $W_H=2,33$ ,
2. dla punktu PS:2:Z -  $W_H=1,37$ ,
3. dla punktu PS:3:Z -  $W_H=4,96$ .

Analiza wartości wskaźnika  $W_H$  pozwala stwierdzić, że najazd tramwaju dla danego fragmentu sygnału nastąpił w kierunku od punktu PS:1:Z do PS:2:Z - wskazuje na to wyższa wartość wskaźnika dla punktu PS:1:Z. Związane jest to z rozpędzaniem się tramwaju wzdłuż odcinka pomiarowego - im wyższa prędkość pojazdu tym oddziaływania dynamiczne związane z falą drganiową w gruncie są większe. Dodatkowo na podstawie wartości wskaźnika  $W_H$  w punkcie PS:3Z można stwierdzić, że grunt w miejscu przejazdu drogowo-szynowego ma wysoki współczynnik tłumienia - wartość wskaźnika w tym punkcie jest ponad dwukrotnie większa niż w punkcie PS:1:Z i prawie trzykrotnie większa niż w punkcie PS:2:Z.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiona w artykule metodologia badania drgań gruntu oraz oceny zagrożeń dynamicznych dla otoczenia związanych z ruchem pojazdów szynowych może być z powodzeniem stosowana w analizie propagacji fal drganiowych w gruncie oraz przy ocenie konieczności stosowania układów wibroizolacji torowisk.

Proponowana metodologia w łatwy i szybki sposób pozwala na ocenę zagrożeń dynamicznych dla otoczenia bez konieczności wykonywania długiego i skomplikowanego modelowania gruntu, torowiska oraz jego bezpośredniego otoczenia np. z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Proponowana przez autora metodologia badań może być również z powodzeniem stosowana przy ocenie konieczności stosowania układów wibroizolacji zarówno istniejących jak i nowoprojektowanych dróg transportu szynowego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bednarz J., Targosz J., *Finite elements method in analysis of propagation of vibrations wave in the soil*. Journal of KONES: Powertrain and Transport, vol. 18 no. 3, s. 19–25, 2011.
2. Bednarz J., *Experimental verification of the developed soil model describing the propagation of vibration wave in the ground*. Journal of KONES : Powertrain and Transport, vol. 19 no. 3, s. 31–39, 2012.
3. Polska norma PN-85/B-02170 - *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
4. Bednarz J., *Przykład systemu wibroizolacji podtorzy kolejowych*. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, nr 3, s. 1601–1609, 2013.
5. Targosz J., *Układy wibroizolacji w transporcie szynowym i samochodowym*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2007.

## RESEARCH METHODOLOGY OF GROUND VIBRATIONS CAUSED BY THE RAILWAY VEHICLES MOVEMENT

### Abstract

*A methodology for assessing the ground vibrations caused by the movement of rail vehicles is presented in the paper. A description of the results of experimental studies and assessment of the risks associated with the operation of rail vehicles on the road and tram crossing located in Silesia is also presented. The proposed method of assessing risks is based on the time-frequency analysis of signals and the estimation of a histogram of the distribution of amplitude signals.*

Autor:

dr inż. **Jarosław Bednarz** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Robotyki i Mechatroniki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Tel: +48 12 617 35 11, Fax: +48 12 634 35 05, E-mail: bednarz@agh.edu.pl