

ANALIZA PROPAGACJI DRGAŃ WYWOŁANYCH PRZEJAZDAMI POCIĄGÓW Z ZASTOSOWANIEM FFT I STFT

Tadeusz Tatała

Prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: ttatara@pk.edu.pl

Barbara Kozuch

mgr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: kozuchbm@gmail.com

Streszczenie. W pracy przedstawiono wybrane wyniki pomiarów drgań gruntu wzbudzanych przejazdami pociągu Pendolino (EMU 250). Zaprezentowano uzyskane przyspieszenia drgań w dziedzinie częstotliwości – widma ciągłe (FFT) przejazdu i ich zależności od położenia akcelerometru względem osi toru. Dokonano przedstawienia wyników w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej przy zastosowaniu Krótkookresowej Transformaty Fouriera (STFT) w celu porównania charakteru uzyskiwanego wzbudzenia drgań w zależności od prędkości oraz odległości odbiornika od źródła drgań. W artykule wykazano, iż analizy dostarczające informacji w dziedzinie częstotliwości i pozwalające znaleźć cechy globalne sygnału powinny zostać uzupełniane (w przypadku analiz sygnałów niestacjonarnych) o analizy dające odpowiedzi w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej.

Słowa kluczowe: pociąg Pendolino, STFT, pomiary propagacji drgań

1. Wprowadzenie

Problem emisji drgań regulowany licznymi normami i przepisami (zarówno polskimi [1,2], jak i zagranicznymi [3-5]) jest zagadnieniem ważnym we współczesnym budownictwie. Zgodnie ze światową literaturą [6-8], można stwierdzić, że kwestia wibracji wzbudzanych przez transport jest coraz bardziej istotnym problemem dzisiejszego świata. Problem narasta i zwiększa się proporcjonalnie do wzrostu prędkości pociągów i liczby budowanych nowych linii o coraz większych prędkościach eksploatacyjnych.

Jak podano w [9,10], na podstawie przeglądu ponad 230 dokumentów technicznych, dopuszczalny poziom drgań w otoczeniu dróg szynowych przekraczany jest w ponad 44% przypadków (na podstawie ogólnoswiatowych badań).

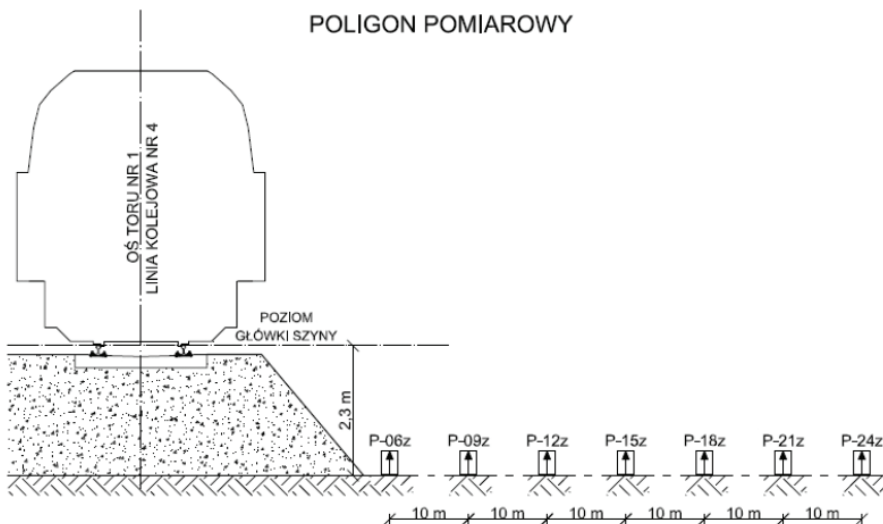
Mając na uwadze powyższe, w listopadzie 2013 roku przeprowadzono testy homologacyjne pociągu Pendolino (EMU 250) przy prędkościach przejazdu znajdujących się w przedziale od 40 do 293 km/h. Elektryczny zespół trakcyjny kursował na odcinku Psary – Góra Włodowska (około 36 km) znajdującym się w obrębie linii kolejowej nr 4 (CMK). Podczas testów odcinek szlaku zamknięto dla kursujących rozkładowo składów. Podobne badania przeprowadzono i omówiono w pracy [11].

W artykule przedstawiono wybrane wyniki pomiarów drgań warstw przypowierzchniowych gruntu (składowa pionowa Z), w jednym z trzech poligonów pomiarowych. Pomiary in situ przeprowadził zespół akredytowanego Laboratorium Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej. Analizy przeprowadzono wykorzystując wiedzę i doświadczenie naukowców oraz dostępne materiały i publikacje [12-15]. Szczegółowy opis badań znajduje się w [16].

2. Poligon i aparatura pomiarowa

Pomiary drgań wykonano przy zastosowaniu piezoelektrycznych akcelero-metrów Piezotronics PCB oraz analizatora SCADAS Mobile LMS International. Względna niepewność standardowa przyspieszenia sygnału maksymalnego wynosi $\pm 11,61\%$.

Schematyczny rozkład przetworników przedstawiono na rys. 1. Czujniki rozmieszczono począwszy od podstawy nasypu kolejowego (2,3 m poniżej główki szyny) co 10 m, prostopadle do linii kolejowej. Czujniki oznaczono kolejno: P-06z, P-09z, P-12z, P-15z, P-18z, P-21z, P-24z.



Rys. 1. Poligon pomiarowy

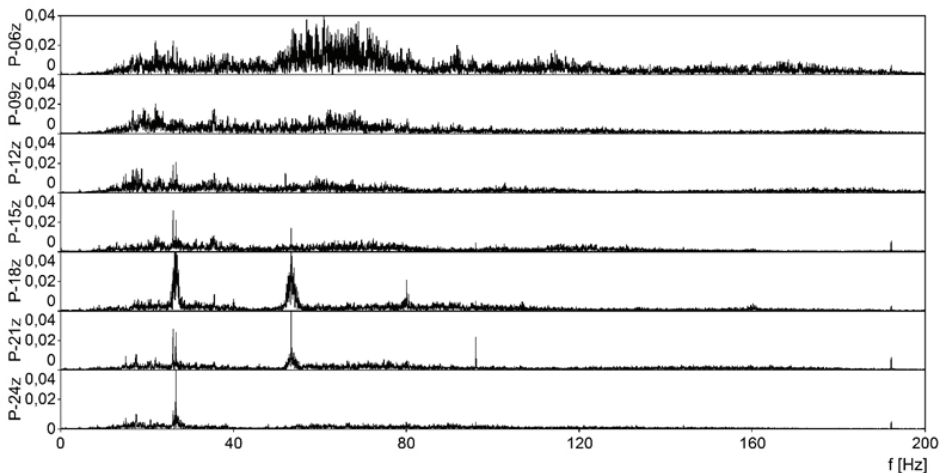
3. Analiza danych

Analizie poddano trzy przejazdy – z prędkościami minimalną i maksymalną dla danego przekroju – 40 km/h i 270 km/h oraz z prędkością pociągów rozkładowo kursujących – 160 km/h. W celu identyfikacji sygnału wykonano Szybka Transformację Fouriera (FFT) oraz Krótkookresową Transformację Fouriera (STFT).

3.1. Analiza wyników przy zastosowaniu FFT

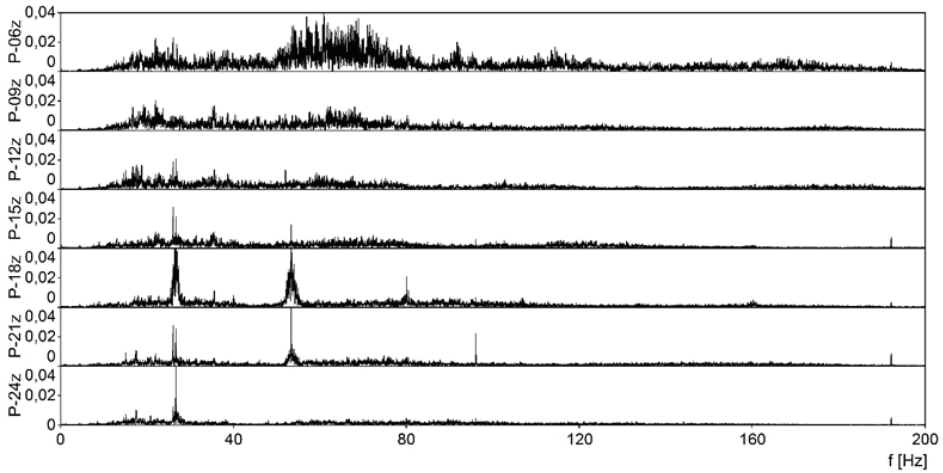
Zarejestrowane przebiegi czasowe przekształcono przy pomocy Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT) na dane w dziedzinie częstotliwości. Analizę przeprowadzono w przedziale częstotliwości 0,5 – 200 Hz. Zestawiono dane uzyskane z siedmiu przetworników drgań (P-06z – P-24z) rejestrujących dany przejazd w tym samym czasie w różnych odległościach od toru.

Na rysunku 2 przedstawiono rozkład zarejestrowanych przebiegów drgań wzbudzanych przejazdami pociągów z prędkością 40 km/h z wykorzystaniem FFT. Skalę pionową wykresu (amplitudy analizy Fouriera [cm/s²/Hz]) dla wszystkich przetworników dostosowano do skali czujnika rejestrującego maksymalne wartości (P-06z). Dla czujnika znajdującego się u podnóża nasypu pasmem dominującym (wartości powyżej 0,02 cm/s²) jest zakres 50 – 80 Hz. Drgania tego zakresu zostają najszybciej wytłumione i na czujniku znajdującym się 10 m dalej (P-09z) pasmo dominujące przesuwa się w zakres 10-70 Hz. Drgania z niewielką redukcją amplitud utrzymują się na następnych dwóch czujnikach (P-12z i P-15z). Na czujniku P-18z zaobserwowano wzmocnienie sygnału w otoczeniu częstotliwości 27 Hz oraz 53 Hz. Pasma w otoczeniu częstotliwości 27 Hz dominuje również na dwóch ostatnich czujnikach (P-21z i P-24z).



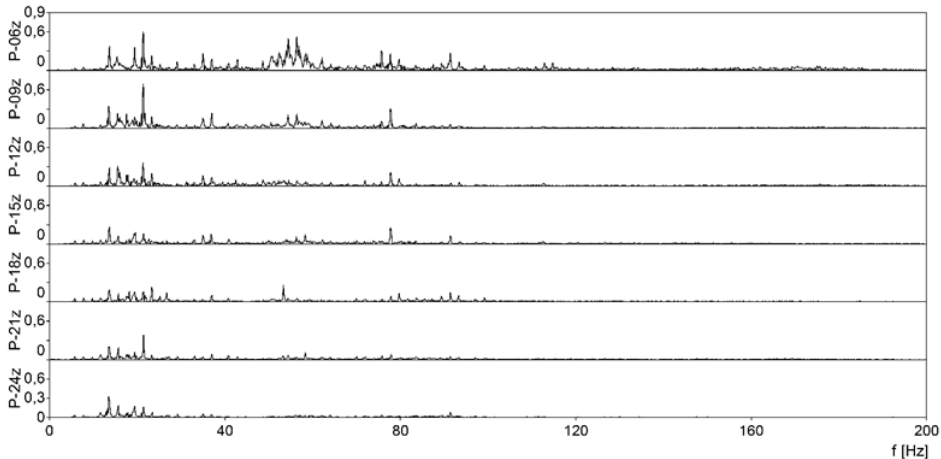
Rys. 2. Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h

Analogicznie zestawiono FFT dla przejazdu o prędkości 160 km/h. Maksymalne amplitudy drgań przyjmowały prawie dwukrotnie większe wartości w stosunku do poprzedniego sygnału. Dominującym pasmem częstotliwości na każdym odbiorniku i najwolniej tłumionym w zależności od odległości jest pasmo 10-30 Hz. Drgania zarejestrowane za pomocą czujnika P-06z charakteryzują się dużym udziałem częstotliwości w zakresie 50-60 Hz, są one jednak bardzo szybko tłumione. Wykresy uzyskane przez zastosowanie transformaty przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h

Zestawienie danych z analiz dla przejazdu z prędkością 270 km/h pokazano na rys. 4. Podobnie jak w poprzedniej analizie uzyskano jedno dominujące pasmo, które uwidacznia się na każdym czujniku (20-40 Hz) oraz pasmo wysokich amplitud – przedział 50-60 Hz, uwidaczniające się jedynie na czujnikach P-06z i P-09z. Amplitudy drgań osiągają wartości dwukrotnie większe od wartości amplitud uzyskiwanych przez wzbudzenie pojazdem o prędkości 160 km/h.

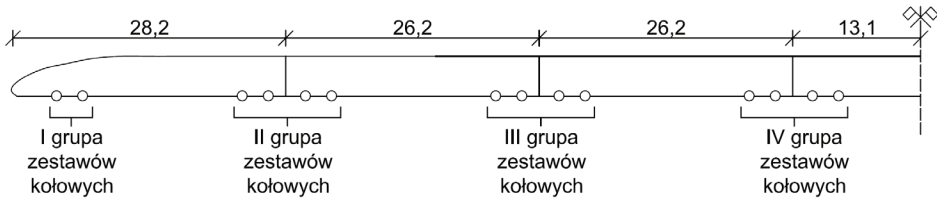


Rys. 4. Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h

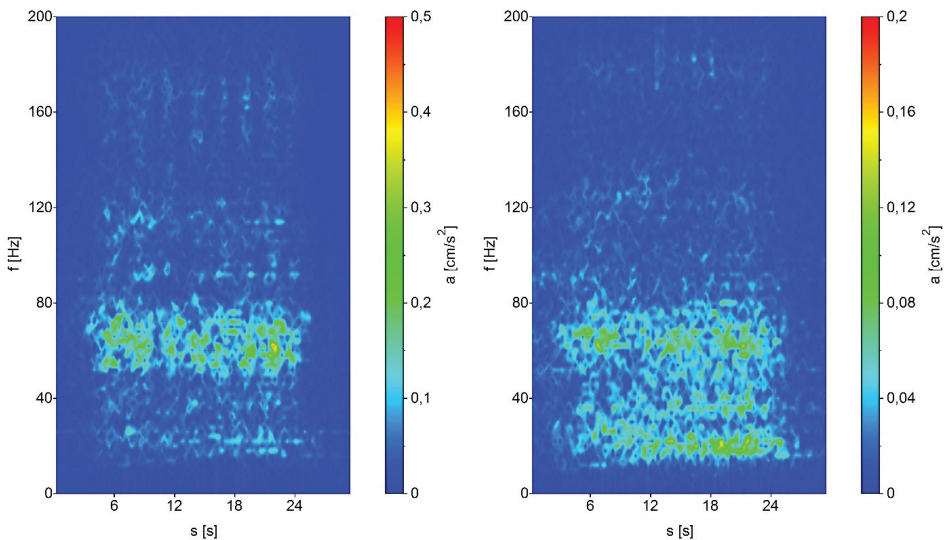
3.2. Analiza Krótkookresowej Transformaty Fouriera

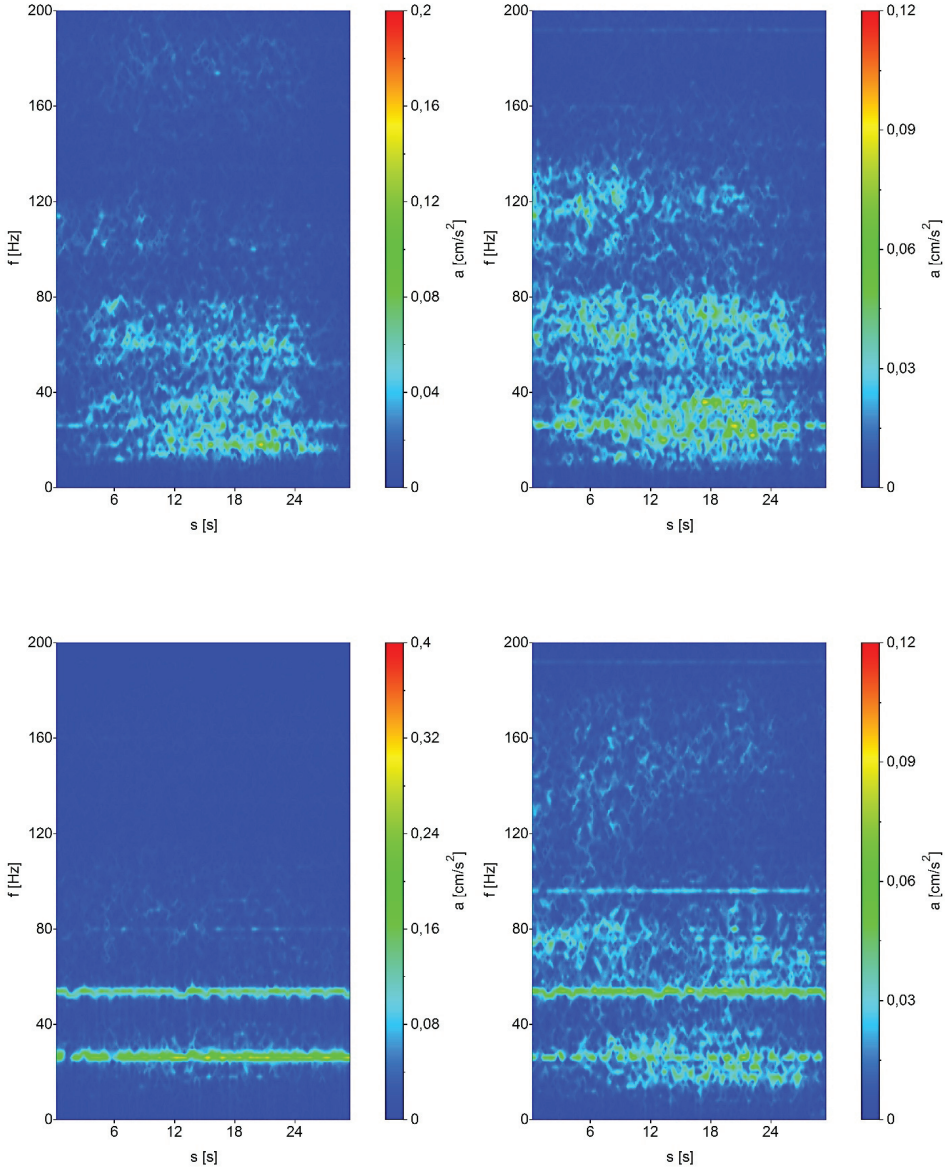
Dla każdego z wyżej analizowanych punktów pomiarowych wykonano Krótkookresową Transformatę Fouriera (STFT). Analiza ta pozwoliła na uwypuklenie

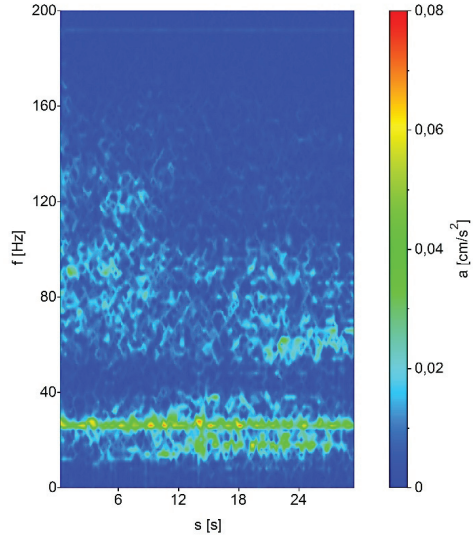
cech niewidocznych w klasycznym FFT. Na rys. 6 zestawiono wyniki uzyskane z przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 40 km/h. Amplituda drgań rejestrowanych w punkcie P-06z nie przekracza $0,5 \text{ cm/s}^2$. Na wykresie dla tego czujnika widoczne jest wzmocnienie drgań na skutek interakcji z szyną 8 grup zestawów kołowych (pierwszy i ostatni wózek składu tworzą pierwszą i ostatnią grupę – pozostałe grupy tworzone są przez wspólny sygnał drugiego wózka członu poprzedzającego i pierwszego wózka członu następnego). Schematyczny rozstaw wózków pociągu przedstawiono na rys. 5. Wyodrębnienia poszczególnych zestawów kołowych nie można dokonać na żadnym z następujących czujników – drgania zostają rozproszone. Pod nasypem skarpy dominują drgania o zakresie częstotliwości 40-80 Hz. Na pierwszych dziesięciu metrach dochodzi do szybkiego tłumienia tego pasma (amplitudy STFT uzyskane w punkcie P-09z wykazują wartości ponad dwukrotnie mniejsze). Najłabiej tłumione jest pasmo 10-20 Hz, które przy dalszych odległościach stanowi najistotniejszą część sygnału. Czas odbioru sygnału o maksymalnych wartościach amplitud zwiększa się wraz z odległością – czujnik P-06z – ekstremalne wartości uzyskuje w przedziale czasowym 5-25 s. Przy czterech ostatnich czujnikach ekstremalne wartości występują przez całą długość pomiaru. Związane jest to również z tym, że wraz ze wzrostem odległości coraz trudniej wyodrębnić sygnał z szumu tła.



Rys. 5. Schematyczny rozstaw wózków w pociągu Pendolino

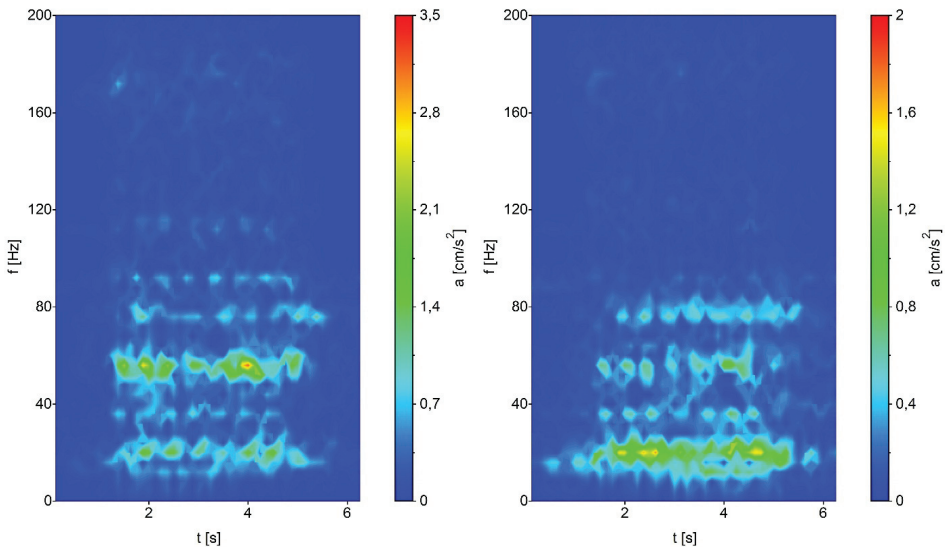


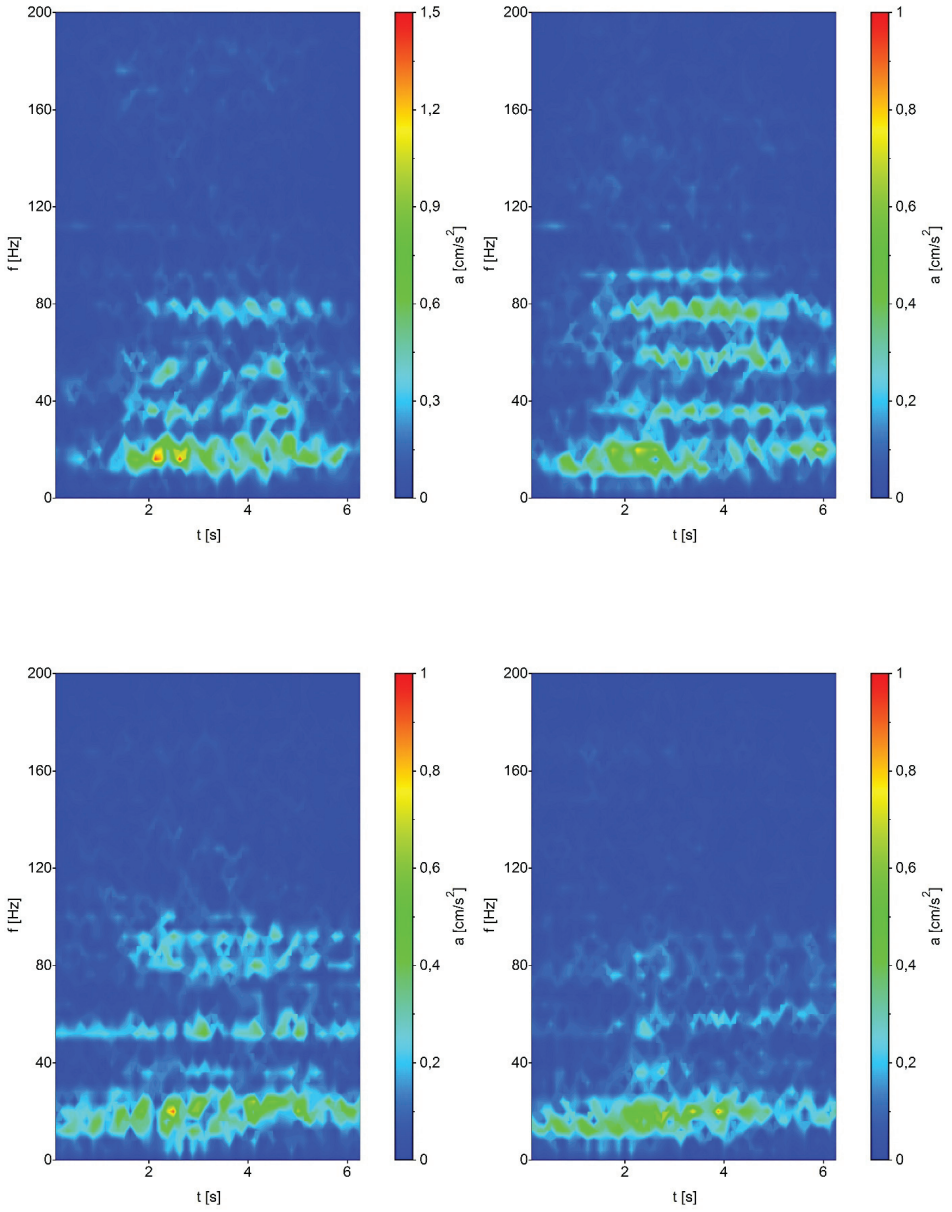


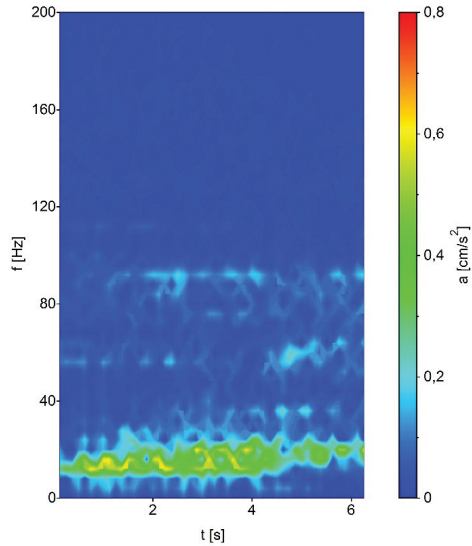


Rys. 6. Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujniki kolejno P-06z – P-24z)

Siedmiokrotnie wyższe amplitudy na czujniku P-06z uzyskano dla przejazdu z prędkością 160 km/h. Nie można tu dokładnie wykazać liczby wózków – jednak sygnał wyraźnie posiada elementy wzmocnień i osłabień w czasie. Pasmo dominujące w pierwszym punkcie pomiarowym (otoczenie 50 Hz) zostaje bardzo szybko stłumione. Drgania dominujące w pozostałych punktach pomiarowych występują w paśmie o częstotliwości nieprzekraczającej 20 Hz. Maksymalne amplitudy czterech ostatnich punktów pomiarowych wykazują bardzo zbliżone wartości (około 1 cm/s^2). Czas trwania pomiaru ze względu na prędkość pociągu skraca się czterokrotnie. Wyniki analizy przestawiono na rys. 7.





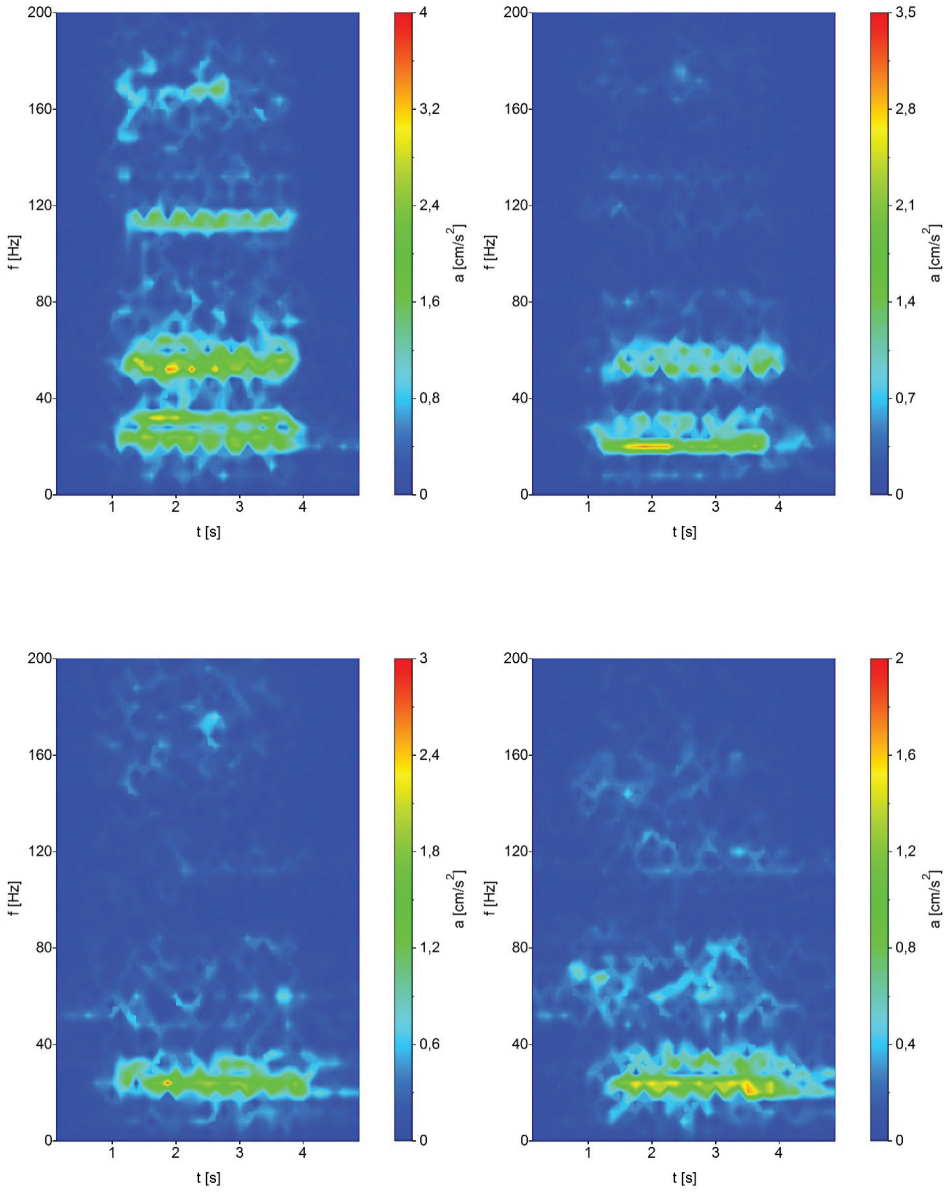


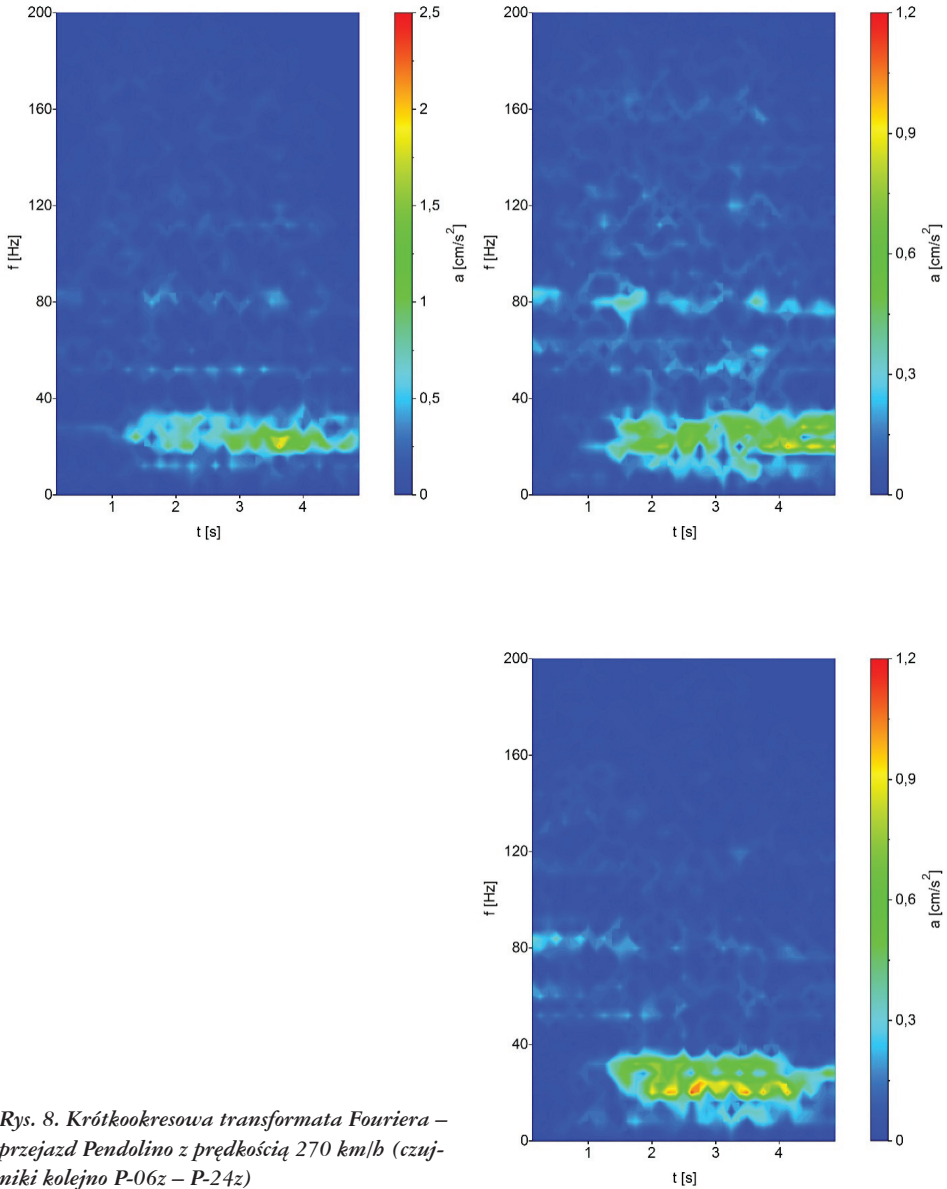
Rys. 7. Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujniki kolejno P-06z – P-24z)

Maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań przy dalszym zwiększaniu prędkości (z 160 km/h na 270 km/h) wykazują dużo wolniejszy wzrost niż przy zmianach prędkości z 40 km/h na 160 km/h. Na przetworniku P-06z zauważa się dwa mocno dominujące pasma (otoczenie 25 Hz i 55 Hz). Niższe z pasm jest najlepiej przenoszone wraz ze wzrostem odległości i jego dominację można zaobserwować na każdym z czynników. Dodatkowo tylko w pierwszym punkcie pomiarowym wyróżnia się częstotliwość w otoczeniu 115 Hz – tak wysoka częstotliwość dominująca nie występowała przy przejazdach z niższą prędkością. Również ze względu na prędkość skraca się czas trwania sygnału, nie przekracza on 5 sekund. Analizę STFT dla przejazdu przedstawiono na rys. 8.

W przypadku analizy wszystkich przebiegów i ich transformat można zauważyć, iż pociąg Pendolino na całej długości przejazdu wywołuje równomierne drgania, nie występuje tu, jak w przypadku pociągów np. Intercity różnica w wartościach amplitud drgań wzdłużnych pierwszym członem i pozostałymi (największe drgania wywoływane lokomotywą i dużo mniejsze wagonami).

Jak pokazały analizy najszybciej tłumione są wyższe pasma częstotliwości. Przyszłościowe działania mające na celu redukcję drgań powinny się skupić przede wszystkim na tłumieniu drgań niskoczęstotliwościowych.





Rys. 8. Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujniki kolejno P-06z – P-24z)

4. Wnioski

Drgania komunikacyjne stanowią emisję, która ma istotny wpływ na stan środowiska. Rozważając informacje zamieszczone w literaturze, jest to problem globalny, który dotyczy również krajów rozwiniętych, gdzie infrastruktura kolejowa stoi na wysokim technologicznie poziomie, a wykorzystywane systemy spełniają

europiejskie standardy. Z tego względu, przy projektowaniu nowych linii oraz eksploataowaniu już wybudowanych istotne jest uwzględnianie redukcji drgań.

Wyznaczone widma częstotliwości przebiegów drgań pozwalają na określenie pasm dominujących częstotliwości oraz na ich porównanie dla różnych prędkości przejazdu i odległości od źródła. Wyniki analiz wykazały, że drgania nie zmieniają się proporcjonalnie do wzrostu prędkości. Pasma w wyższych zakresach częstotliwości (powyżej 50 Hz), pomimo iż są dominujące w niewielkiej odległości od źródła drgań, zostają bardzo szybko tłumione przy zwiększaniu dystansu punktu pomiarowego od linii kolejowej.

Dla przedstawienia propagacji drgań wykonano Krótkookresową Transformatę Fouriera. Analizy dostarczające informacji równocześnie w dziedzinie częstotliwości i dziedzinie czasu, znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie badany sygnał jest niestacjonarny, a tradycyjne analizy czasowe lub częstotliwościowe pomijają jego istotne cechy. Dlatego analizy pozwalające znaleźć cechy globalne sygnału (szczególnie polecane do sygnałów stacjonarnych), takie jak FFT, powinny zostać uzupełniane (w przypadku analiz sygnałów niestacjonarnych) o analizy dające odpowiedź w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej (np. STFT).

Krótkookresowa Transformata Fouriera może znaleźć zastosowanie m.in. w diagnostyce, gdy oprócz całkowitego poziomu drgań jaki generowany jest przez przejazd taboru ważne stają się informacje dotyczące wibracji w poszczególnych oknach czasowych przejazdu. Za pomocą analizy można zauważyć, gdy np. jeden z wózków uległ awarii i wzbudza znacząco większe drgania niż pozostałe zestawy kołowe – czego nie będziemy w stanie zaobserwować przypadku klasycznej Transformaty Fouriera.

Bibliografia

- [1] Ustawa z dn. 27.04.2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. z 2001 r. Nr 62, poz. 627).
- [2] Ustawa z dn. 3.10.2008 r. O udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. z 2008 r. Nr 199, poz. 1227).
- [3] ISO 14000 - Environmental management.
- [4] Directive 85/337/EEC on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment.
- [5] Directive 2001/42/EC of the European Parliament and of the Council of 27 June 2001 on the assessment of the effects of certain plans and programmes on the environment.
- [6] Lawrence T., Noise and vibration from road and rail, CIRIA, Londyn 2011.
- [7] Tompson D., Railway noise and vibration, Mechanisms. Modelling and Means of Control, Institute of Sound and Vibration Research University of Southampton, UK, Elsevier, 2009.

-
- [8] Krylov V. V., Noise and vibration from high-speed trains. Thomas Telford, Londyn 2001.
- [9] Connolly D. P. et al., The growth of railway ground vibration problem – A review. *Science of The Total Environment*, 2015, nr 568, s. 1276-1282
- [10] Connolly D., Kouroussis G., Laghrouche O., Hoc C. and Forded M., Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects. *Construction and Building Materials*, 2015, nr 92, s. 64-81.
- [11] Degrande L. S. G., Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 247(1), s.131-144.
- [12] Ciesielski R., Maciąg E., Drgania drogowe i ich wpływ na budynki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1990.
- [13] Kawecki J., Stecz P., Stypuła K., O konieczności wykonywania obliczeń symulacyjnych wibroizolacji w torze tramwajowym. *Czasopismo Techniczne, Seria: Budownictwo, z.3-B*, s. 163-173, 2011.
- [14] Stypuła K., Nowe inwestycje a ochrona środowiska przed drganiami. *Izolacje*, nr 10, 2008.
- [15] Ciesielski R., Kwiecień A., Stypuła K., Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego. *Badania doświadczalne in situ*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków, 1999.
- [16] Czyczyła W., Tatara T. et al., Badania eksploatacyjne odpowiedzi toru podczas przejazdu pociągu EMU-250 (Pendolino) z prędkościami do 293 km/h. *Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, raport*, 2014.

