

Jarosław Korzeb
Politechnika Warszawska Wydział Transportu

ZASTOSOWANIE ANALIZY FALKOWEJ W OCENIE PROPAGACJI DRGAŃ W STREFACH ODDZIAŁYWANIA INFRASTRUKTURY TRANSPORTOWEJ

Streszczenie: W pracy przedstawiono jeden z etapów realizowania pracy badawczej dotyczącej badania wpływu infrastruktury transportowej na otoczenie. Szczególną uwagę poświęcono badaniu oddziaływań dynamicznych takich jak parasejsmiczne drgania komunikacyjne. Przedstawiono charakterystyki występujących drgań, stosowane metody analizy zarejestrowanego sygnału przyspieszeń drgań i wskazano zalety stosowania transformaty falkowej. Ponadto wskazano potencjalne możliwości szerszego zastosowania transformaty w analizie tych oddziaływań, co wprowadza nową jakość w sensie ilości otrzymywanych informacji dotyczących badanego sygnału.

Słowa kluczowe: transport, drgania komunikacyjne, propagacja drgań, analiza falkowa

1. WSTĘP

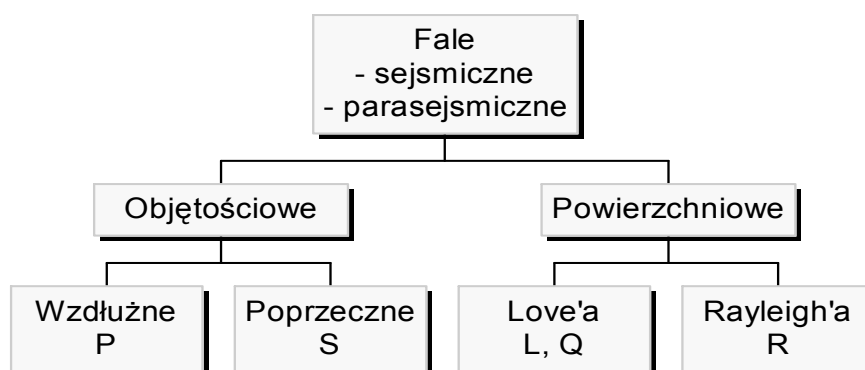
W terenach zurbanizowanych występują duże natężenia ruchu środków transportu o zróżnicowanej i bardzo złożonej strukturze rodzajowej oraz z dużymi wahaniami dobowego natężenia ruchu. Obowiązujące przepisy w tym zapisy Ustawy Prawo Ochrony Środowiska nakładają obowiązek wykonywania raportów oceny wpływu inwestycji na środowisko. Niezmiernie istotnym elementem dokonywania takich raportów jest ocena oddziaływań dynamicznych, w tym drgań i hałasu, które coraz częściej pojawiają się w kontekście „zanieczyszczenia” środowiska naturalnego. Analiza ścieżek propagacji drgań pochodzących od elementów infrastruktury transportowej do najbliższego otoczenia zwanego strefą oddziaływania, wymaga indywidualnego rozpatrywania dla każdego szlaku komunikacyjnego, z podziałem na występujące na nim różnorodne środki transportu. W przypadku nowych inwestycji transportowych występują w obszarach zurbanizowanych lokalne zmiany organizacji ruchu, a nowa struktura ruchu wprowadza nowe cechy charakteryzujące wymuszenia dynamiczne w strefie jej oddziaływania. Jeśli w obszarze zurbanizowanym ma miejsce modernizacja istniejącego szlaku komunikacyjnego, wystąpią zmiany odległości szlaku od sąsiednich obiektów inżynierskich, jak również zmianie ulegnie dobowy rozkład natężenia ruchu. Nie bez znaczenia pozostają tu również zmiany

własności gruntu w otoczeniu nowej lub modernizowanej inwestycji. W takich przypadkach pojawia się nie tylko problem rozważania ścieżek propagacji, ale również i analizy wpływu oddziaływań dynamicznych – opartej na szeroko rozumianej analizie sygnałów. Niniejsza praca przedstawia elementy opracowania budowy modułu należącego do systemu oceny oddziaływań dynamicznych generowanych przez środki transportu do otoczenia. Moduł analizy sygnałów, odpowiedzialny za obróbkę i analizę wielkości charakteryzujących drgania, wykorzystany będzie dodatkowo jako element budowy bazy oddziaływań dynamicznych stanowiącej źródło sygnałów wymuszeń dla potrzeb oceny lub prognozowania przyszłych zmian. Baza docelowo obejmować będzie struktury rodzajowe ruchu występujące w obszarach zurbanizowanych, z podziałem na dobowe wahania natężenia ruchu. Dzięki powstaniu tego modułu możliwe będzie szybkie prognozowanie umożliwiające ocenę zmian oddziaływań dynamicznych powodowanych zmianą organizacji ruchu lub docelowym wprowadzeniem nowego medium transportowego w badanym obszarze.

2. BADANIE PROPAGACJI DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH

2.1. Charakterystyka źródeł oddziaływań dynamicznych

Drgania komunikacyjne pochodzące od eksploatowanych elementów infrastruktury transportowej i propagowane przez podłoże do otoczenia - mogą być klasyfikowane jako drgania parasejsmiczne o charakterze losowym- niestacjonarnym. Podział fali branych pod uwagę przy badaniu oddziaływań sejsmicznych i parasejsmicznych przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 1. Podział fali rozprzestrzenianych w podłożu.

Wymienione typy fal powierzchniowych i objętościowych skrótkowo scharakteryzowano w poniższej tabeli.

Tablica 1.

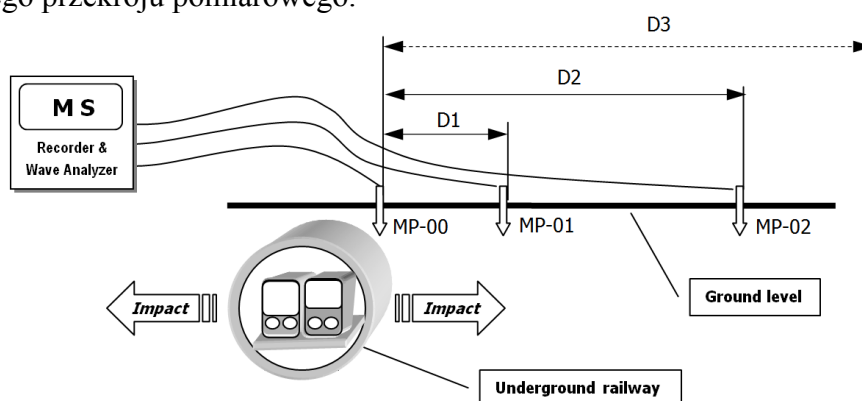
Charakterystyka fali rozprzestrzenianych przez podłoże.

Typ	Charakterystyka fal	Prędkość [km/s]
P	Fala podłużna (zwana dylatacyjną), opisuje ją naprzemienne ściskanie i rozluźnianie podłoża w kierunku propagacji; ma małą amplitudę przez co mniej destrukcyjne działanie niż S, L, R.	$v_P \approx 5-8$
S	Fala poprzeczna (torsyjna, skrętna), spolaryzowana poziomo, opisuje ją prostopadle do kierunku propagacji przemieszczanie się gruntu; ma kilkakrotnie większą amplitudę niż P i szybko zanika w środowisku podatnym.	$v_S \approx 0.6v_P$ ok. 3-5
L	Poziomo spolaryzowane fale poprzeczne, które wywołują drgania poziome, prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali.	$v_R < v_L < v_P, v_S$
R	Falę opisuje kombinację kompresji wzdłużnej i dylatacji, co skutkuje eliptycznymi przemieszczeniami powierzchni w płaszczyźnie pionowej w kierunku rozchodzenia się fali.	$v_R \approx 0.9v_S$ ok. 2-4,5

Ze względu na specyfikę oddziaływania drgań komunikacyjnych oraz największą energię - do analiz brane są pod uwagę fale powierzchniowe L oraz R, których źródłami są dynamicznie zmienne siły kontaktowe powstające na styku koło pojazd-droga oraz zjawiska impulsowe powstające w wyniku ruchu pojazdu po nierównościach drogi. Drgania te przekazywane są do elementów infrastruktury transportowej – następnie wędrują do podłoża (gruntu) skąd propagowane są do bliskiego otoczenia. Przy projektowaniu układów pomiarowych należy brać pod uwagę zjawisko reakcji obiektów zlokalizowanych w strefie wpływów dynamicznych na wymienione oddziaływania oraz występowanie stref odbicia fali od takich elementów konstrukcyjnych jak fundamenty i konstrukcje wsporcze[1].

2.2. Pomiary drgań komunikacyjnych

Wstępne określenie ścieżek propagacji drgań komunikacyjnych pozwala na wytypowanie przekrojów pomiarowych i punktów pomiarowych do wykonania badań eksperymentalnych. Na poniższym rysunku przedstawiono typowy układ pomiarowy dla pojedynczego przekroju pomiarowego.



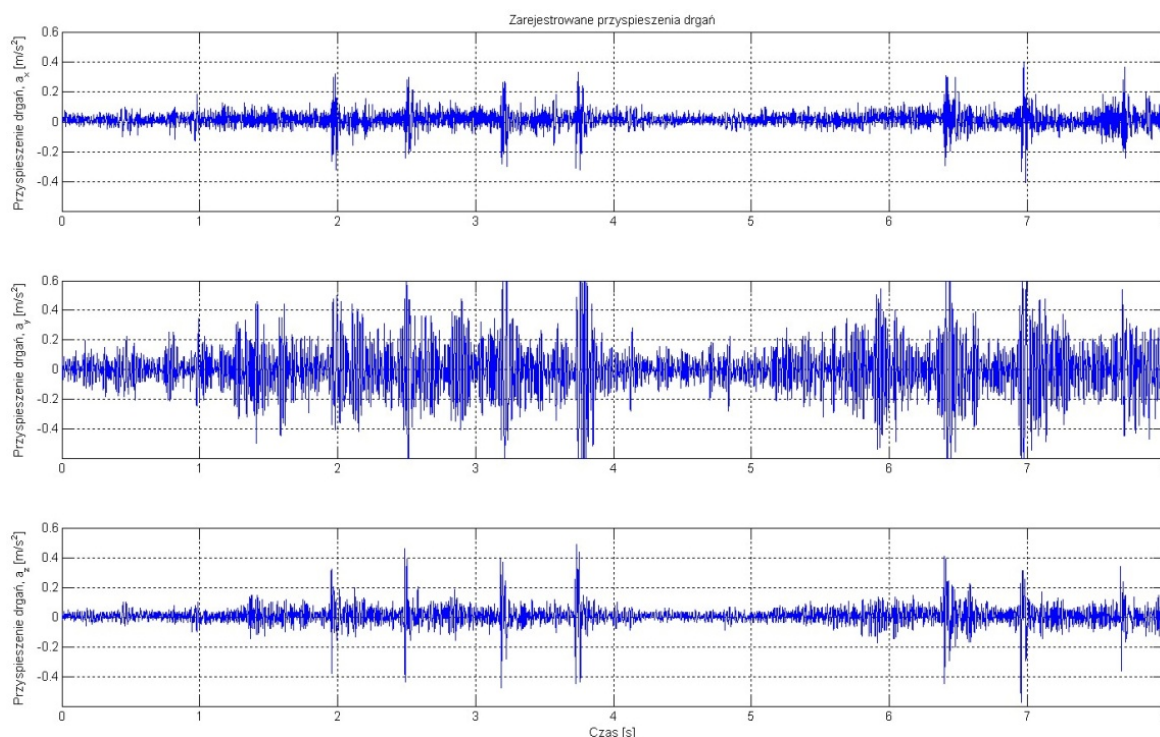
Rys. 2. Układ pomiarowy do akwizycji danych eksperymentalnych w przekroju pomiarowym, złożony z trzech punktów pomiarowych (9 kanałów pomiarowych).[3]

Wielkością mierzoną w tym przypadku było przyspieszenie drgań. Przetworniki wykorzystane w układzie rejestrującym to akcelerometry o dolnym zakresie częstotliwości mierzonych od 0,5 Hz i czułości 1 V/g. Takie zestawienie parametrów czujników pozwala na zarejestrowanie drgań generowanych przez elementy infrastruktury transportowej. Przy zachowaniu kryterium częstotliwościowego Nyquist'a, w celu uniknięcia zjawiska aliasingu do częstotliwości rzędu 512[Hz], przyjęto w badaniach częstotliwość próbkowania sygnału $f_p = 1024$ [Hz]. Minimalną rozdzielczość częstotliwościową sygnału ustalono na $d_f = 0,125$ [Hz], co pomogło w określeniu niezbędnej ilości próbek sygnału f_p/d_f (8192 próbki) czyli minimalnego czasu rejestracji przebiegów czasowych $t=8$ [s].

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

3.1. Wyniki badań eksperymentalnych

Poniżej przedstawiono przykładowy wynik reprezentujący przyspieszenia drgań komunikacyjnych, zarejestrowane w 3 kierunkach (wzdłużnym-x, poprzecznym-y i pionowym-z) w jednym z badanych punktów przekroju pomiarowego. Po próbkowaniu sygnałów napięciowych pochodzących z przetworników drgań (akcelerometrów) dla każdego punktu pomiarowego otrzymano sygnały ciągłe czasu dyskretnego $a_x, a_y, a_z = f(n\Delta t)$, gdzie $1/\Delta t$ – częstotliwość próbkowania sygnału [5].



Rys. 3. Zarejestrowane w eksperymencie przebiegi przyspieszeń drgań w kierunkach x, y, z.

Dla każdego z kierunków oddziaływania drgań energia (E) i moc średnia (P) w przedziale czasu dla sygnału ciągłego (1) i dyskretnego (2) opisywane są następująco [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = \int_{-\infty}^{\infty} a_x^2(t) dt \\ E_y = \int_{-\infty}^{\infty} a_y^2(t) dt \\ E_z = \int_{-\infty}^{\infty} a_z^2(t) dt \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} P_x = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_x^2(t) dt \\ P_y = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_y^2(t) dt \\ P_z = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_z^2(t) dt \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_x^2(n) \\ E_y = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_y^2(n) \\ E_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_z^2(n) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} P_x(n_1, n_2) = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} a_x^2(n) \\ P_y(n_1, n_2) = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} a_y^2(n) \\ P_z(n_1, n_2) = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} a_z^2(n) \end{array} \right. \quad (2)$$

Następnym krokiem w badaniach było przekształcenie wyników pomiarów zarejestrowanych w funkcji czasu do dziedziny częstotliwości, z wykorzystaniem transformat Fouriera i falkowej.

3.2. Klasyczna analiza wyników badań

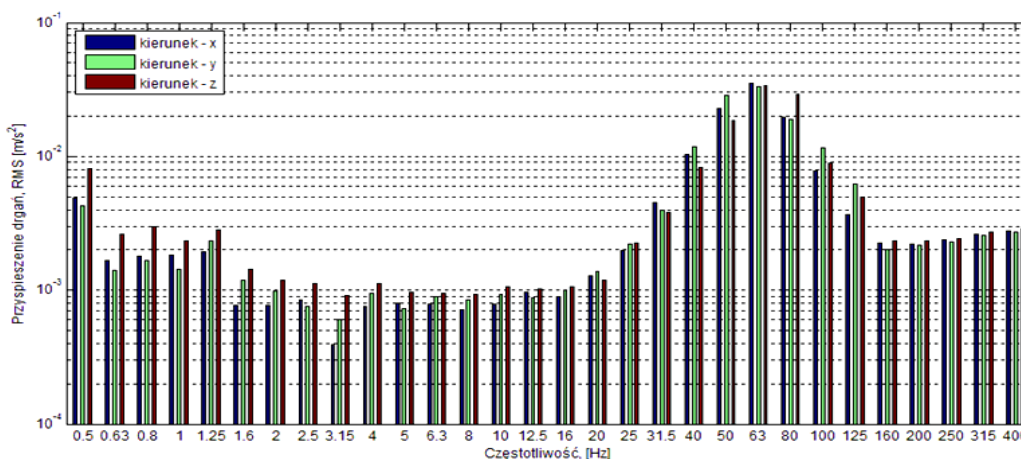
Klasyczne podejście analizy sygnału w zadanym przedziale czasu wymaga podania informacji amplitudowo-częstotliwościowej. Podstawowym narzędziem w analizie klasycznej jest wykorzystanie transformaty Fouriera (najczęściej FFT)[2,5]. Dla każdej rejestracji sygnału czasowego dokonywane jest przekształcenie na częściach rzeczywistych i urojonych obliczonej transformaty:

$$|a(f)| = \sqrt{\operatorname{Re} \left(\int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi ft} dt \right)^2 + \operatorname{Im} \left(\int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi ft} dt \right)^2} \quad (3)$$

Takie dekomponowanie sygnału na szereg częstotliwości składowych przypisanych kolejnym sygnałom okresowym pozwala na ustalenie poszczególnych składowych prążków widma czyli tzw. częstotliwości dominujących. Kolejnym krokiem jest albo analiza widma ciągłego, albo częściej stosowany podział widma na pasma tercjowe, o częstotliwościach środkowych każdego z pasm - f_s , co ułatwia porównywanie otrzymywanych widm częstotliwościowych. Podział realizowany może być przez całkowanie widma ciągłego w przedziałach od dolnej (f_d) do górnej (f_g) częstotliwości każdego z kolejnych pasm tercjowych.

$$\begin{cases} f_d = f_s \cdot \sqrt[6]{2^{-1}} \\ f_g = f_s \cdot \sqrt[6]{2} \end{cases} \quad (4)$$

W praktyce bezpośrednie analizy częstotliwościowe wykonywane są często w oparciu o iteracyjne filtrowanie sygnału przez zespoły filtrów Cauer'a lub Butterworth'a, z diadyczną zmianą rozmiaru analizowanej próbki sygnału i częstotliwości próbkowania. Rekomendowane urządzenia pomiarowe klasy 1 posługują się zwykle filtrami eliptycznymi Cauer'a – 6 rzędu (zgodnie z wymogami norm DIN 45651, IEC 1260, ANSI S1,11-1986). Efekt przeprowadzonej transformacji Fouriera przedstawiono na rysunku 4.

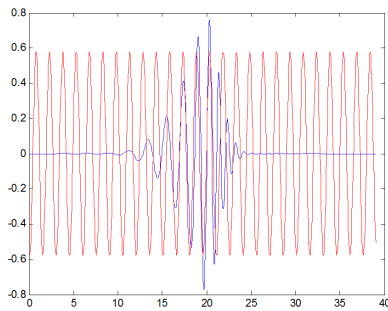


Rys. 4. Widmo częstotliwościowe sygnału przyspieszeń drgań zarejestrowanych w trakcie badań eksperymentalnych z podziałem na kierunki i pasma tercjowe.

Pewnego rodzaju wadą stosowanej powszechnie transformaty Fouriera jest utrata informacji o czasie występowania zdarzeń, która powstaje w momencie przekonwertowania wartości z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości.

3.3. Zastosowanie teorii falek

Zastosowanie transformaty falkowej pozwala na przeniesienie wartości sygnału z dziedziny czasu do układu współrzędnych czas-skala (czas-częstotliwość), co umożliwia analizę zmiany zachowań częstotliwościowych badanego sygnału w funkcji czasu. Zasadniczym elementem w tym wypadku są falki podstawowe (ψ – funkcje o zerowej wartości średniej i zwartym nośniku) oraz rodziny falek (utworzone w wyniku jej „przesuwania” i „rozciągania”)[2,4,5]. Poniżej przedstawiono przykład funkcji falkowej I.Daubechies „db20” (współczynnik skali 4, częstotliwość 0,667[Hz] - okres 1,5[s]).



$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

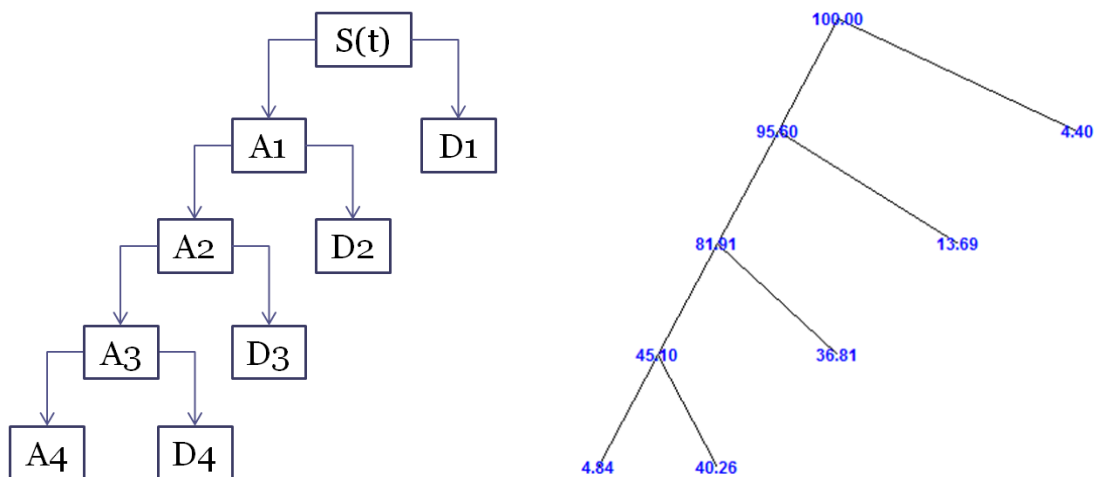
gdzie:

- a - współczynnik skali - wskazuje częstotliwość reprezentowaną przez przyjętą funkcję falkową (z jego wzrostem częstotliwość maleje), $a \in R^+$;
- b - współczynnik przesunięcia, $b \in R$.

Dla badanego sygnału przyspieszeń drgań ($s(t)=a(t)$) można zapisać ciągłą transformatę falkową (CTF) jako[5]:

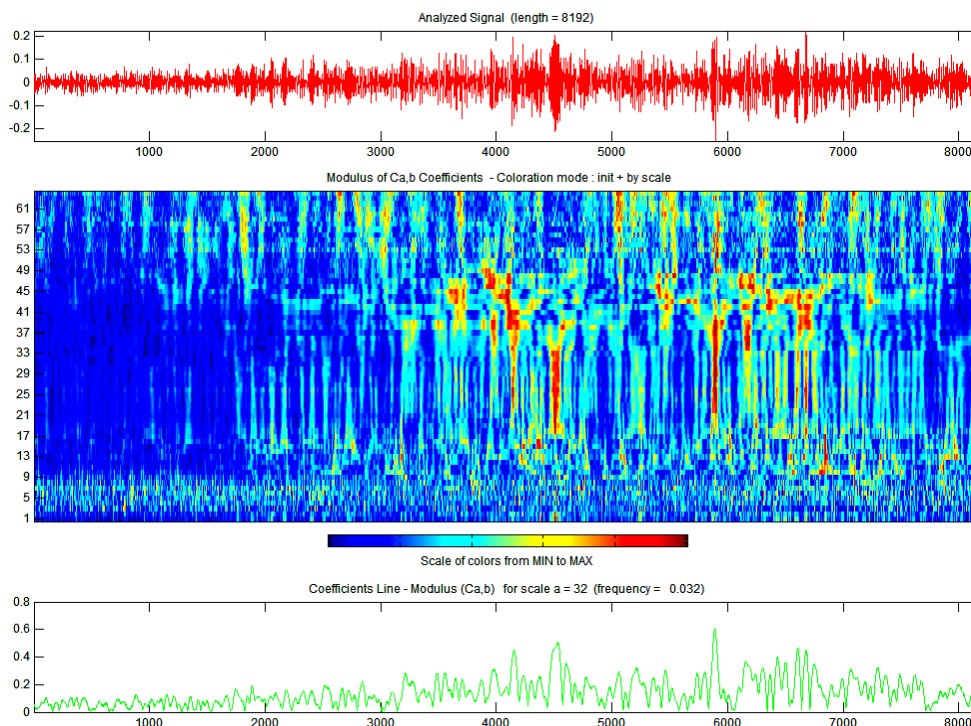
$$CTF_s^t(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

Praktyczna realizacja transformaty falkowej jest procesem iteracyjnym polegającym na wielostopniowej dekompozycji badanego sygnału z wykorzystaniem zespołów filtrów dolno i górnoprzepustowych. Każda iteracja daje efekt w postaci uzyskiwanej składowej niskoczęstotliwościowej – zwanej aproksymacją (A) oraz wysokoczęstotliwościowej zwanej detalem (D). W kolejnych iteracjach stosowane jest tzw. skalowanie diadyczne[2], w efekcie którego otrzymywana jest wielostopniowa dekompozycja sygnału.



Rys. 6. Drzewo dekompozycji sygnału z wykorzystaniem funkcji falkowej oraz rozkład procentowy energii przykładowego sygnału na kolejnych poziomach dekompozycji.

Przykład przeprowadzonej analizy sygnału przyspieszeń drgań $a_z(t)$ generowanych przez przejeżdżający tramwaj (lokalizacja punktu pomiarowego w poziomie terenu, w odległości 0,5[m] od rzutu główki szyny) przedstawiono poniżej.



Rys. 7. Sygnał analizowany (8192 próbki) poddany dyskretnej transformacji falkowej (dwt - środowisko Matlab) i rezultat analizy macierzy otrzymanych współczynników falkowych.

Analiza otrzymanych wyników umożliwia tym przypadku nie tylko obserwację rozkładu widma częstotliwościowego, ale również precyzyjne wskazanie chwil wystąpienia danego zdarzenia o określonej charakterystyce.

4. PODSUMOWANIE

Analiza częstotliwościowa sygnału przyspieszeń drgań, prowadzona z wykorzystaniem transformaty Fouriera, pozwala wytypować dominujące częstotliwości harmoniczne wchodzące w skład analizowanego sygnału, lecz nie dostarcza informacji na temat zmian tych częstotliwości w funkcji czasu. Transformata ta uniemożliwia również wykrycie krótkotrwałych zmian w analizowanym sygnale. Obie wymienione wyżej wady rekompensuje zastosowanie transformaty falkowej.

Transformata falkowa umożliwia obserwację i analizę sygnałów niestacjonarnych co umożliwia szybkie wykrywanie nieciągłości i silnych nieliniowości w ścieżkach propagacji drgań. W celu modelowania dynamicznych zjawisk nieliniowych pomocna jest budowa sieci falkowych.

Możliwość wykorzystania dekompozycji i syntezy jako „odszumiania” przebiegów, poprzez odcięcie detali na określonym poziomie (pozwalającym na wiarygodną syntezę

przebiegu oryginalnego), przesądza o wykorzystaniu falek w budowie bazy wymuszeń dynamicznych dla potrzeb badań symulacyjnych przy projektowaniu i prognozowaniu oddziaływań komunikacyjnych.

Dzięki analizie falkowej w dziedzinie czas-częstotliwość, podczas realizacji długookresowych pomiarów przyspieszenia drgań, możliwa jest detekcja przejazdów określonego typu pojazdu.

Bibliografia

1. Adamczyk J., Targosz J.: *Ochrona przed drganiami wywołanymi przez transport samochodowy*. Wydawnictwo AGH, Monografie, Agencja KoKo, ISBN 83-913400-5-8, Kraków 2000r. str. 68.
2. Białasiewicz J.T.: *Falki i aproksymacje*. WNT, ISBN 83-204-2971-4, Warszawa 2004r. str. 253.
3. Korzeb J.: "Propagation of vehicle generated vibration - simulation and experimental tests". Proceedings of 3rd IC-EpsMsO (International Conference on Experiments/ Process/ System/ Modelling/ Simulation/ Optimization), Athens, Patras University Press, ISBN: 978-960-98941-0-4, Rio Patras, Greece, 2009, pp. 584-590.
4. Rucka M., Wilde K.: *Application of wavelet analysis In damage detection and localization*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, ISBN 978-83-7348-192-3, Gdańsk 2007r. str. 116.
5. Zieliński T.P.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. WKiŁ, ISBN 978-83-206-1640-8, Warszawa 2009r. str. 832.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2010/2011 jako projekt badawczy nr N N509 501838.

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS IN EVALUATION OF VIBRATIONS PROPAGATION IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE IMPACT ZONES

Abstract: The paper presents a stage of carrying out research work on the study of transport infrastructure impacts on the environment. Particular attention was paid to study the dynamic effects such as paraseismic-type traffic vibrations. Presents the vibration characteristics, as the methods used to study recorded vibration acceleration signal and indicates the advantages of using wavelet transform. In addition, indicates the potential wider use of this transform in the analysis of these interactions, which introduces a new quality in terms of quantity of information received on the tested signal.

Keywords: transport, traffic vibration, propagation of vibration, wavelet analysis