

Porównanie metod analizy i oceny drgań w systemie „ruch tramwajowy-podłoże gruntowe-budynki”

W artykule przedstawiono metodykę pomiaru, analizy i oceny drgań komunikacyjnych przekazywanych przez podłoże gruntowe na budynki. Opisano uwarunkowania stosowania skal oceny stopnia szkodliwości drgań dla budynków, wynikające ze specyfiki parasejsmicznych oddziaływań ruchu tramwajowego. Zarysowano nową koncepcję przybliżonej oceny szkodliwości drgań, na podstawie analizy orbit częstotliwościowo korygowanych przyspieszeń drgań i wartości kryterialnych zadanych w postaci orbit granicznych. Dokonano porównania wyników badań wibracji budynku dla trzech typów tramwajów i różnych metod analizy.

1. Wprowadzenie

W ośrodkach miejskich ruch pojazdów szynowych jest częstym źródłem niekorzystnych oddziaływań na otoczenie, między innymi w postaci wibracji gruntów podtorza. Drgania powstające podczas ruchu pojazdów po torowisku rozprzestrzeniają się w podłożu gruntowym i propagują się na bliżej położone budynki, stwarzając niejednokrotnie zagrożenia dla ich trwałości. W przypadku tras ruchu kolejowego przebiegających przez miasta, z uwagi na szerokość pasa zajmowanego przez drogę kolejową i obowiązujące warunki techniczne jej usytuowania, oddalenie budynków od torowiska jest na ogół znaczne. Natomiast torowiska linii tramwajowych przebiegają bardzo często w bezpośredniej bliskości gęstej zabudowy miejskiej.

Stąd też rozpoznanie charakteru wibracyjnych oddziaływań tramwajów na otoczenie oraz prawidłowa ocena stopnia zagrożenia dla budynków mają szczególne znaczenie. Są to zagadnienia bardzo złożone, gdyż składające się na nie procesy generowania i propagacji drgań zależą od wielu czynników:

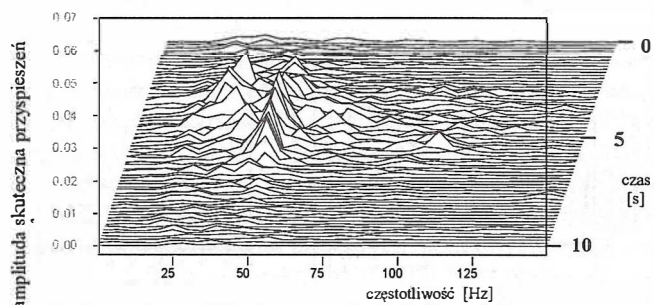
- rodzaju i stanu taboru tramwajowego (zwłaszcza masy pojazdu, liczby osi, sposobu zawieszenia, luzów łożyskowych, owalizacji obręczy kół itp.),
- obciążenia pasażerami, prędkości poruszania się i długości zestawów wagonów,
- częstotliwości przejazdów i możliwości nakładania się wpływów dwóch pojazdów przejeżdżających w przeciwnych kierunkach po sąsiednich torach,
- rozwiązań konstrukcyjnych, jakości wykonania i utrzymania torowiska tramwajowego (szczególnie występowania nierówności pionowych i poziomych),
- budowy podłoża gruntowego oraz aktualnych parametrów gruntów i stosunków wodnych,
- usytuowania budynku w stosunku do linii tramwajowej (odległości od torowiska i kątów między ścianami nośnymi budynku a kierunkami propagacji drgań),
- rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych budynków, geotechnicznych warunków ich posadowienia oraz stanu technicznego budynków.

Analizie oddziaływań ruchu tramwajowego na budynki poświęconych jest stosunkowo niewiele prac. Są to prace prezentujące wyniki badań drgań powstających podczas przejazdów wagonów tramwajowych po istniejących torowiskach i przekazujących się na budynki [1,5,6] oraz opracowania poświęcone badaniom skuteczności wibroizolacji toru tramwajowego [7,10].

Autorzy cytowanych prac, przy szacowaniu szkodliwości drgań pochodzących od ruchu tramwajowego, posługiwali się skalami wpływów dynamicznych SWD [4,8], w połączeniu z analizą trzecją składowych drgań. Ocena ta polegała na porównaniu wartości szczytowych przyspieszeń drgań w pasmach 1/3-oktawowych, z odpowiednimi krzywymi skal SWD.

2. Specyfika wibracyjnego oddziaływania tramwaju

Czasowo-częstotliwościowy charakter dynamicznych oddziaływań przejeżdżających tramwajów, przekazywanych przez podłoże gruntowe na budynki, oszacowano na podstawie czasowo-widmowych analiz drgań zarejestrowanych na ścianie fundamentowej (w poziomie terenu) czterokondygnacyjnego budynku, oddalonego o 15 m od torowiska tramwajowego. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy wynik analizy drgań uzyskany techniką krótkoczasowej transformaty Fouriera STFT [9]. W badaniach wzięto pod uwagę oddziaływania trzech typów tramwajów: polskiego typu 105N, niemieckiego GT8 oraz czeskiego Tatra Rt6-N1.



Rys. 1. Przykład analizy czasowo-widmowej STFT drgań na ścianie fundamentowej wielokondygnacyjnego budynku, zarejestrowanych w trakcie przejazdu tramwaju 105N (składowa pozioma x drgań)

Na podstawie wstępnej analizy uzyskanych wyników pomiarów sformułowano następujące wnioski:

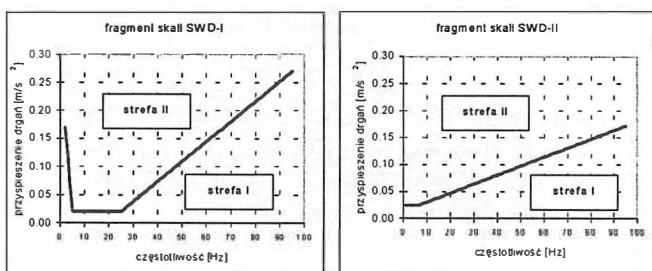
- Przejazd tramwaju wzbudza złożone szerokopasmowe drgania budynków z dominacją składowych w paśmie ok. 20÷75 Hz (w zakresie korekcji częstotliwościowej skal SWD).
- Oddziaływanie ma charakter niestacjonarny w sensie amplitudowym i częstotliwościowym (z uwagi na ciągle przemieszczanie się pojazdu, jego odległość od budynku jest zmienna w czasie oraz ma miejsce zróżnicowanie interakcji pojazdu z torowiskiem).

- Czas oddziaływania drgań zależy od prędkości poruszania się pojazdu oraz od długości i liczby wagonów w zestawie. Średni czas oddziaływania przejeżdżającego tramwaju można oszacować na ok. 5 s. Łączny czas oddziaływania tramwajów w ciągu doby zależy *a priori* od rozkładu jazdy na analizowanej linii. W centrach miast, dobowy czas wymuszeń dynamicznych tego typu zazwyczaj przekracza 30 minut, zatem zgodnie z [8] są to „drgania występujące stale”.

3. Skale wpływów dynamicznych (SWD)

Skale wpływów dynamicznych opracowano dla przybliżonej oceny szkodliwości drgań przekazywanych na budynki przez podłoże gruntowe. W pracach [4,8] przyjęto, że dla przybliżonej oceny miarodajna jest składowa pozioma drgań w najniekorzystniejszym dla budowni kierunku, niemniej zalecane jest prowadzenie pomiarów w dwóch kierunkach wzajemnie prostopadłych. Mierzonym parametrem są amplitudy przemieszczeń lub przyspieszeń drgań w paśmie 1÷100 Hz.

Do przeprowadzenia oceny wymagana jest znajomość amplitudy, częstotliwości i czasu oddziaływania drgań. Na podstawie badań eksperymentalnych opracowano dwie skale, które w uproszczeniu można scharakteryzować: skala SWD-I dla jedno- lub dwukondygnacyjnych budynków o zwartym kształcie i małych wymiarach zewnętrznych rzutu poziomego oraz skala SWD- II dla budynków nie wyższych niż pięć kondygnacji. Dokładne opisy skal i uwarunkowania ich stosowania można znaleźć w [4]. Na rysunku 2 przedstawiono fragment skal SWD-I i SWD-II w zakresie pierwszych dwóch stref: strefy I - drgań nieodczuwalnych przez budynek i strefy II - drgań odczuwalnych przez budynek, powodujących jego przyspieszone zużycie, lecz nieszkodliwych dla konstrukcji. W większości analizowanych przypadków drgania pochodzące od przejeżdżających tramwajów mieszczą się w tych strefach.



Rys.2. Fragmenty skal wpływów dynamicznych (SWD) stosowanych w ocenie szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże gruntowe na budynki - na podstawie [8]

W opracowaniach [4,8] zawarto również wskazania dotyczące sposobu wykonywaniu pomiarów. W przypadku drgań złożonych i długotrwałych zalecana jest analiza widmowa wąskopasmowa lub tercjowa. Dla drgań krótkotrwałych (czas oddziaływania w ciągu doby nie przekracza 3 minut), należy rejestrować drgania w czasie minimum trzech cykli. W przypadku drgań złożonych sugerowane jest stosowanie mierników wyposażonych w filtry korekcyjne, pozwalające na sprowadzenie mierzonego parametru do poziomu równej szkodliwości w całym paśmie.

Mając na uwadze specyfikę czasowo-częstotliwościową wibracyjnego oddziaływania tramwajów, arbitralne przyjęcie jednej z tych metod pomiaru i wartościowania drgań staje się problematyczne. W dalszej części przeanalizowano możliwości stosowania powyższych zaleceń, oraz zaproponowano alternatywne możliwości analizy i oceny drgań, pozwalające na odniesienie uzyskanych wyników do skal SWD.

4. Metody analizy drgań w aspekcie ich oddziaływań na budynki

4.1 Analiza widmowa

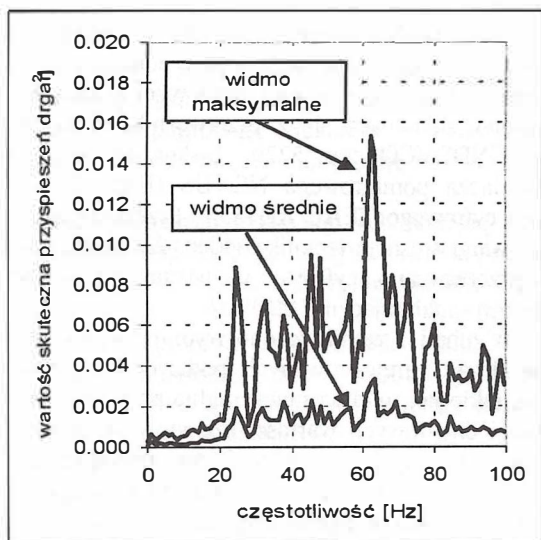
Wykonywanie analiz widmowych w przypadku sygnałów o charakterze niestacjonarnym może prowadzić do pewnych nieprawidłowości w ilościowej ocenie drgań [2,3]. Rozpatrywano dwa typy analiz widmowych: wąskopasmową o stałej bezwzględnej szerokości pasma i o stałej względnej szerokości pasma analizy.

Zastosowanie wąskopasmowej analizy widmowej. W metodzie tego typu stosowane jest zazwyczaj uśrednianie widm chwilowych (liniowe lub średniokwadratowe). Uśrednianie niestacjonarnego sygnału w sensie amplitudowym i częstotliwościowym niesie ze sobą niebezpieczeństwo znacznego zaniżania wartości amplitud drgań w stosunku do maksymalnych wartości składowych. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie widma uzyskanego w wyniku uśrednienia z widmem maksymalnym (opcja *Max Hold* analizatora widmowego). Analizie poddano sygnał przyspieszeń drgań zarejestrowany na ścianie fundamentowej budynku podczas przejazdu tramwaju. Odrębnym problemem jest fakt, że składowe widma uzyskiwane na drodze FFT nie są wartościami szczytowymi, lecz wartościami skutecznymi amplitud poszczególnych składowych sygnału.

Zastosowanie analizy o stałej względnej szerokości pasma (np. widma tercjowego). Widmo tego typu można uzyskać poprzez konwersję widma wąskopasmowego o stałej rozdzielczości. Dla poprawnego odwzorowania amplitud widma tercjowego (szczególnie składowych nisko-częstotliwościowych) wymagana jest wysoka rozdzielczość widma wyjściowego. Przy ograniczeniu pasma analizy do 100 Hz i rozdzielczości $\Delta f = 0.125$ Hz, widmo chwilowe wyznaczane jest w oparciu o 8 - sekundową sekwencję sygnału. Przejazd tramwaju trwający około 5 sekund (rys. 2), będzie zawarty tylko w jednej 8-sekundowej sekwencji analizowanego sygnału, ponieważ w tym czasie zachodzą zmiany amplitudy i częstotliwości wymuszenia. Można się spodziewać, że mimo analizy tylko jednej realizacji, maksymalne amplitudy składowych sygnału nie będą w widmie poprawnie odwzorowane. Widmo tercjowe można również uzyskać poprzez równoległą filtrację pasmową zestawem filtrów cyfrowych. Czas uzyskania pełnego wyniku jest uwarunkowany czasem analizy niezbędnym dla uzyskania wyniku w najniższym paśmie. Jest to zwykle proces długotrwały.

Przedstawione powyżej metody dotyczą każdorazowo tylko jednego kierunku analizy drgań. Dla pełnej oceny wpływów dynamicznych, analizy wykonuje się dla wszystkich kierunków *x,y,z*, lub przynajmniej dla kierunków poziomych *x,y*. Stosowane jest niekiedy sumowanie wektorowe wyników pomiarów lub analiz z poszczególnych kierunków. Uzyskany w ten sposób rezultat nie uwzględnia jednak związków fazowych i koincydencji

czasowej oddziaływań drgań.



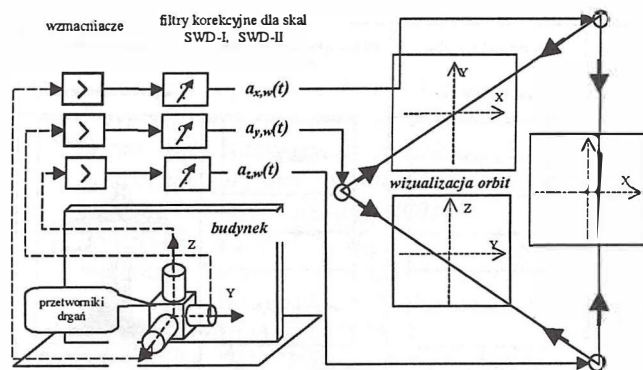
Rys. 3. Porównanie maksymalnego i uśrednionego widma przyspieszeń drgań (kierunek poziomy x) zarejestrowanych na ścianie fundamentowej budynku podczas przejazdu tramwaju

4.2. Analiza orbit przyspieszeń drgań

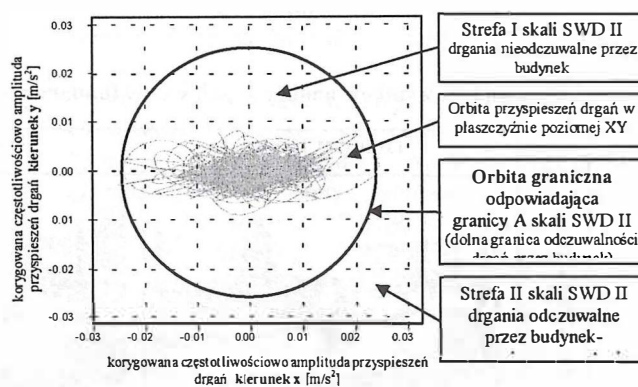
Na rysunku 4 przedstawiono schemat przetwarzania sygnału pozwalający na uzyskanie reprezentacji obrazu drgań w postaci orbit. W torze pomiarowym umieszczono filtry formujące sygnał częstotliwościowo do poziomu równej szkodliwości w całym analizowanym paśmie częstotliwości. W zależności od rodzaju budynku, filtracja może być prowadzona według charakterystyk korekcyjnych dla skal SWD-I lub SWD-II. Rysunek 5 ilustruje nową ideę przybliżonej oceny szkodliwości drgań na podstawie orbit korygowanych częstotliwościowo przyspieszeń drgań. Zaproponowano też nową jakościowo wartość kryterialną oceny drgań w postaci orbit granicznych. Dla budowni uwzględnionych w [8] rozmiary orbit granicznych można przyjąć odpowiednio dla granic skal SWD.

Na podstawie orbit możliwe jest przestrzenne określenie kierunkowości oddziaływania drgań, gdyż w tego typu analizie zachowana jest koincydencja czasowa ortogonalnych składowych drgań. Kierunkowość oddziaływań zależna jest od amplitud oraz związków fazowych pomiędzy falami parasejsmicznymi rozprzestrzeniającymi się w warstwie przypowierzchniowej podłoża gruntowego i odbieranymi w danym punkcie pomiarowym: fali podłużnej – kompensacyjno-dylatacyjnej (P) oraz fali poprzecznej poziomej (SH) i poprzecznej pionowej (SV).

Włączenie w miejsce filtrów układu całkującego (całkowanie podwójne) umożliwia uzyskanie orbit przemieszczeń drgań. Prowadzenie synchronicznej analizy orbit przemieszczeń w kilku sąsiednich punktach zlokalizowanych na tym samym elemencie konstrukcyjnym budynku, daje potencjalnie możliwości określenia dodatkowych naprężeń dynamicznych wywołanych przejazdem tramwaju. Przedmiotem dalszych prac w tej dziedzinie będzie parametryzacja orbit, prowadząca do uzyskania nowej klasy miar opisujących oddziaływanie drgań na budynki oraz obiekty infrastruktury podziemnej miast, nie ujęte w skalach SWD.



Rys. 4. Idea przetwarzania sygnału pozwalającego uzyskać reprezentacje oddziaływania drgań na budynki w postaci orbit

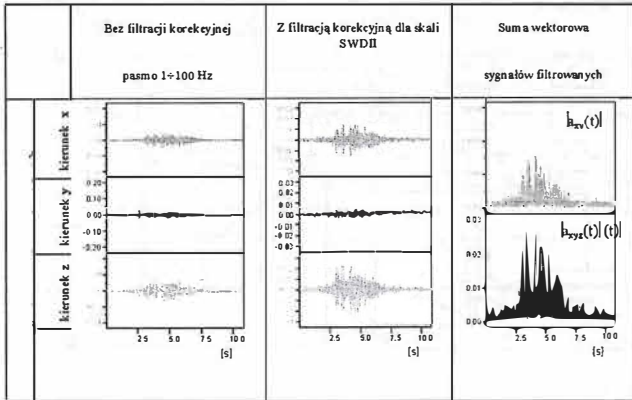


Rys. 5. Postać orbity przyspieszeń drgań XY uzyskana na podstawie drgań budynku zarejestrowanych w trakcie przejazdu tramwaju i sposób oceny szkodliwości oddziaływań drgań na budynek

4.3 Analiza wartości szczytowych sumy wektorowej przyspieszeń drgań

Kolejna metoda parametryzacji drgań i oceny szkodliwości ich oddziaływania bazuje na analizie chwilowych wartości szczytowych sumy wektorowej przyspieszeń drgań, poddanych uprzednio korekcji częstotliwościowej, zgodnie z charakterystykami korekcyjnymi dla skal SWD. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych składowych drgań bez filtracji i z filtracją korekcyjną (SWD), oraz odpowiadające im przebiegi chwilowych wartości szczytowych sum wektorowych przyspieszeń, w płaszczyźnie poziomej $a_{xy}(t)$ oraz drgań przestrzennych $a_{xyz}(t)$.

Prowadzenie oceny w oparciu o chwilowe wartości szczytowe sum wektorowych korygowanych przyspieszeń drgań (ich powierzchnią lub przestrzenną reprezentację) uwzględnia związki fazowe i daje pełniejszy obraz faktycznych oddziaływań dynamicznych. Nie zachodzi również niebezpieczeństwo pominięcia w ocenie wpływów wibracyjnych, np. dominującego kierunku oddziaływania drgań. Analiza przestrzenna drgań może być przydatna dla oceny oddziaływań drgań na powierzchnię i podpowierzchnię infrastruktury technicznej miast. Przez analogię do skal SWD, w tym przypadku konieczne jest określenie charakterystyk częstotliwościowych wrażliwości drgań.



Rys. 6. Porównanie przebiegów czasowych przyspieszeń drgań rejestrowanych na ścianie fundamentowej budynku, wywołanych przejazdem tramwaju typu 105N w odległości 15 m

5. Porównanie wartościowania drgań proponowanymi metodami

Do synchronicznej rejestracji drgań ściany fundamentowej budynku na poziomie otaczającego terenu, w kierunkach poziomych x, y i pionowym z , stosowano tor pomiarowy składający się z przetworników przyspieszeń drgań ENDEVCO typ 5220, niskosumowego przedwzmacniacza pomiarowego NEXUS (B&K 2693), rejestratora cyfrowego TEAC RD135T. Przejazdy tramwajów rejestrowano stosując technikę video. Zarejestrowane sygnały przetwarzano cyfrowo w wirtualnym środowisku pomiarowo-analizującym *DASYLab*.

W tabeli 1 zamieszczono wybrane wyniki przetwarzania drgań zarejestrowanych podczas przejazdu tramwajów, takie jak: widma maksymalne przyspieszeń drgań, przebiegi chwilowych wartości szczytowych sumy wektorowej korygowanych częstotliwościowo przyspieszeń drgań $a_{xy,w}(t)$, orbity uzyskane na podstawie korygowanych częstotliwościowo (dla skali SWD-II) przyspieszeń drgań.

Porównanie wyników analizy drgań ściany fundamentowej budynku wywołanych przejazdem tramwajów Tabela 1.

	Tramwaj 105N	Tramwaj GT8	Tramwaj TATRA Rt6-N1
Źródło wymuszeń wibracyjnych			
Widmo maksymalne przyspieszeń drgań kier. x			
Wartość szczytowa sumy wektorowej xv			
Orbity przyspieszeń drgań			

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 można sformułować następujące wnioski:

- Widmo maksymalne przyspieszeń drgań, z uwagi na reprezentację składowych w postaci wartości skutecznych oraz złożony charakter drgań, nie odwzorowuje poprawnie oddziaływań maksymalnych. Do oceny konieczne jest naniesienie na widmo skali SWD.
- Wartości wymuszeń maksymalnych najlepiej odwzorowują przebiegi wartości szczytowych. Na podstawie tych przebiegów można precyzyjnie określić czas oddziaływania drgań.
- Analiza orbit pozwala określić maksymalne wartości wektora przyspieszeń oraz dominujący kierunek oddziaływań. Nie jest natomiast możliwe określenie czasu wpływu drgań na budynki.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metody analizy sygnałów służące do wartościowania oddziaływań drgań na budynki, wzbudzanych przez jadący tramwaj, z odniesieniem uzyskanych wyników do skal SWD. Zaprezentowano nową koncepcję przybliżonej oceny szkodliwości drgań w oparciu o analizę orbit częstotliwościowo korygowanych przyspieszeń drgań i wartości kryterialnych zdefiniowanych w postaci orbit granicznych. Dokonane porównania zalet i ograniczeń proponowanych metod oraz przykładowe wyniki przeprowadzonych badań, powinny być pomocne w wyborze odpowiedniej metody analizy. Ujednolicenie i przyjęcie dobrze zweryfikowanej metodyki badawczej ma duże znaczenie dla prowadzenia dalszych prac, które powinny zmierzać do określenia i skatalogowania relacji między różnymi czynnikami wpływającymi na oddziaływania wibracyjne w środowisku zurbanizowanym.

Ograniczenie analizy drgań budynków do kierunków poziomych x, y jest w większości przypadków uzasadnione. Do oceny wpływu drgań pochodzących od ruchu tramwajowego na inne budowle, np. elementy podziemnej infrastruktury technicznej miast, należałoby uwzględnić drgania przestrzenne x, y, z . Zaadaptowanie proponowanych metod do oceny szkodliwości drgań dla innych typów budowli, wymaga określenia odpowiednich częstotliwościowych charakterystyk korekcyjnych i wartości kryterialnych.

Literatura

- [1] Abratański A., Chelmecki J., Maciąg E., Tataro T., *Przypadki przekazywania się z podłoża na budynki drgań od komunikacji miejskiej, Materiały X Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowle”, Kraków, listopad 2003.*
- [2] Barczewski R., Kania M., *Study of ground and building vibrations generated by vibratory rollers, Proc. XXV Symposium “Vibrations in Physical Systems”, Poznań, maj 2004.*
- [3] Barczewski R., Kania M. *Problemy analizy niestacjonarnych drgań generowanych przez walec wibracyjny i ich wpływów na budynki, X Sympozjum „Wpływ Wibracji na Otoczenie”, Kraków-Janowice, wrzesień 2004 (w druku).*
- [4] Ciesielski R. i inni, *Komentarz do normy PN-85/B-02170 „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”, COBPBO, Warszawa, 1988.*
- [5] Ciesielski R., Stypuła K., *Wpływy dynamiczne od komunikacji szynowej na budynki w miastach, Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Inżynierskie problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych”, PZITB, Kraków, 1990.*
- [6] Ciesielski R., Maciąg E., *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki, WKiŁ, Warszawa 1990.*
- [7] Maciąg E., *Wpływ wibroizolacji toru tramwajowego na drgania budynków, Inżynieria i Budownictwo, 52, nr 6, 1995.*
- [8] *Polska Norma PN-85/B-02170, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki, Wydawnictwo Normalizacyjne „ALFA”, Warszawa 1985.*
- [9] Shie Qian, Dapang Chen, *Joint Time-Frequency Analysis. Methods and Applications, Prentice Hall PTR Inc., 1996.*
- [10] Tataro T., *Badania skuteczności dynamicznej nowego rozwiązania ułożenia torów tramwajowych, Inżynieria i Budownictwo, 61, nr 4, 2004.*