

BEDNARZ Jarosław¹
TARGOSZ Jan²

EKSPERYMENTALNA ANALIZA ROZCHODZENIA SIĘ DRGAŃ W GRUNCIE WYWOŁANYCH PRZEJAZDEM POJAZDÓW SZYNOWYCH

W obecnych czasach coraz więcej budynków użyteczności publicznej jest budowanych w bliskiej odległości od torów tramwajowych i kolejowych. Przejeżdżające pojazdy szynowe wywołują drgania, które poprzez grunt mogą przenosić się na budynki, co może powodować ich uszkodzenia oraz wpływać na ich komfort użytkowania. W związku z tym istnieje konieczność uwzględnienia w procesie projektowania budynków wpływu fali drganiowej przemieszczającej się w gruncie. W artykule przedstawiono próbę określenia propagacji fali drganiowej w gruncie wywołanej przejazdami tramwajów z wykorzystaniem metody OMA - eksploatacyjnej analizy modalnej. Pracę wykonano w ramach projektu badawczego 4875/B/TO2/2010/38.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PROPAGATION OF VIBRATIONS WAVE IN THE SOIL CAUSED BY PASSING TRAMS

Nowadays, more and more of public buildings are built in areas close to rail and tram tracks. Passing rail vehicles cause vibration, which can move through soil into buildings, which can cause its damage and affect the comfort of its usage. Therefore, there is a necessity to take into account in the process of building design influences of the vibration caused by passing rail vehicles. This paper presents an attempt to use a operational modal analysis method (OMA) to determine the vibration wave propagation in the ground caused by passing trams. The work was carried out in a research project 4875/B/TO2/2010/38.

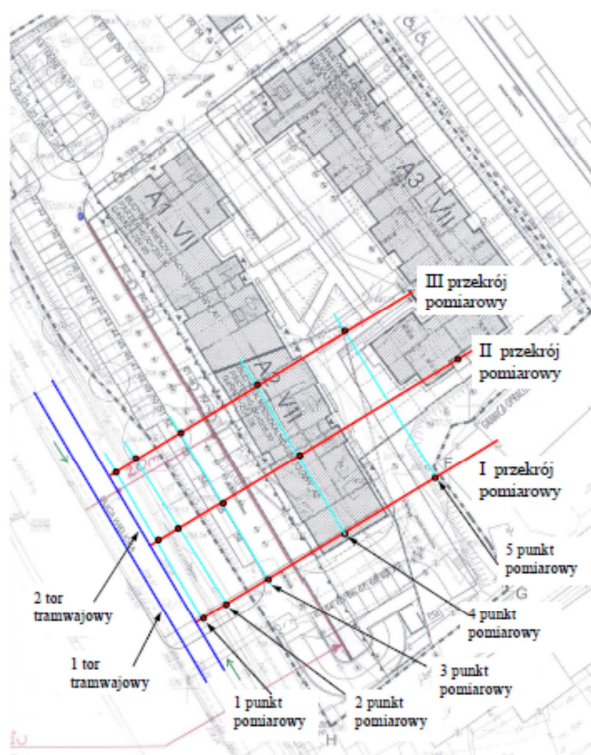
1. WSTĘP

W obecnych czasach ze względu na bardzo dużą gęstość zabudowy w miastach coraz częściej budynki mieszkalne i przemysłowe lokalizowane 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

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: +4812 617-35-11, faks: +4812 634-35-05, e-mail: bednarz@agh.edu.pl

² Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: +4812 617-36-75, faks: +4812 634-35-05, e-mail: jantargosz@interia.pl

ich użytkowania. Dlatego istnieje konieczność uwzględnienia w procesie projektowania budynków położonych blisko torowisk wpływu drgań wywołanych przejazdem pojazdu szynowego na ich konstrukcję. W artykule przedstawiono próbę zastosowania metod analizy modalnej, w szczególności metody OMA - Eksploatacyjnej Analizy Modalnej [3,11], do określania propagacji fali drganiowej w gruncie wywołanej przejazdami pojazdów szynowych. Prowadzone badania związane były z analizą drgań gruntu w miejscu planowanej budowy wielopiętrowego budynku mieszkalnego zlokalizowanego w odległości około 20 [m] od linii tramwajowej o dużym natężeniu ruchu (Rys. 1).



Rys. 1. Umieszczenie planowanego budynku względem istniejącego torowiska.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY OMA

Analiza modalna [3] jest procesem wyznaczania parametrów modalnych oraz opracowania modelu matematycznego obiektu. Jest to technika, która umożliwia na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych amplitudy drgań wyznaczenie zbioru parametrów modalnych (częstotliwości drgań własnych ω_r (CDW), współczynników tłumienia modalnego ζ_r (WTM) oraz postaci drgań własnych ψ_r (PDW), $r=1,2,3,\dots,N$) zwanego modelem modalnym opisujących dynamiczne zachowanie się systemu lub badanego obiektu. Wymienione powyżej parametry są niezależne od wartości sił

działających na dany obiekt. Znajomość tych parametrów umożliwia sprawdzenie tego jak zachowuje się dany obiekt pod wpływem dowolnego wymuszenia. Analiza modalna może być stosowana w przypadku obiektów, które spełniają następujące założenie:

- badany układ dynamiczny jest liniowy – odpowiedź układu jest proporcjonalna do wymuszenia,
- układ jest stacjonarny – współczynniki równań opisujących dynamikę badanego systemu są stałe w czasie,
- układ spełnia zasadę wzajemności Maxwella – odpowiedź układu w punkcie A na wymuszenie w punkcie B jest równa odpowiedzi układu w punkcie B na takie samo wymuszenie w punkcie A,
- układ jest obserwowalny – wszystkie dane potrzebne do określenia dynamiki układu są możliwe do zmierzenia,
- tłumienie w układzie jest małe lub proporcjonalne.

Zazwyczaj rozkład przestrzenny masy, tłumienia i sztywności badanego układu jest opisywany w praktyce z wykorzystaniem pewnej liczby elementów skupionych. Wyznaczenie modelu modalnego układu mechanicznego jest fizycznie równoważne transformacji skupionych parametrów (masy, tłumienia i sztywności) układu dynamicznego na zestaw niezależnych oscylatorów.

Eksperymentalna technika wyznaczania modelu modalnego oparta jest na wyznaczeniu widmowej funkcji przejścia (WFP) $H(\omega)$, czyli stosunku transformaty Fouriera $X(\omega)$ odpowiedzi sygnałów $x(t)$ do transformaty Fouriera $F(\omega)$ sił wymuszających $F(t)$. WFP może być wyznaczona na podstawie wyników jednoczesnego pomiaru siły wymuszenia $F(t)$ i reakcji $x(t)$ wywołanej tą siłą:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (1)$$

Bezpośrednią zależność pomiędzy parametrami modelu modalnego, a WFP układu przedstawia można zapisać w następujący sposób:

$$H_{ik}(j\omega) = \sum_{r=1}^N \left(\frac{Q_r \Psi_{ri} \Psi_{rk}}{(j\omega + \lambda_r)} + \frac{Q_r^* \Psi_{ri}^* \Psi_{rk}^*}{(j\omega + \lambda_r^*)} \right) \quad (2)$$

gdzie: Q_r - r-ty skalarny współczynnik skali.
 $i, k = 1, 2, 3, \dots, N$

W praktyce zazwyczaj wykorzystywana jest metoda prób rezonansowych - Phase Separation Method (PSM) [7] do estymacji parametrów modalnych w eksperymencie modalnej. W trakcie eksperymentu mierzone są zarówno sygnały odpowiedzi układu na wymuszenie w szerokim paśmie częstotliwości (wymuszenie impulsowe, wymuszenie białym szumem lub przestrajającym sinusem) jak i wartość siły wymuszenia. Techniki estymacji parametrów oparte na metodzie PSM [3,4,7] zapewniają skuteczne wyznaczenie postaci drgań badanego układu są bardzo dokładne ale zaawansowane obliczeniowo i dlatego estymacja musi być wspomagana komputerowo. Metoda PSM jest powszechnie stosowana w praktyce inżynierskiej w warunkach laboratoryjnych, jak również w środowisku przemysłowym, jeżeli tylko istnieje możliwość pomiaru siły

wzbudzenia. Istnieją jednak co najmniej trzy przykłady, dla których pomiar siły jest technicznie trudne lub w ogóle niemożliwy. Są to przypadki badań modalnych środków transportu w ruchu, wirujących elementów maszyn oraz obiektów inżynierii lądowej.

Szybki rozwój techniki EAM spowodował zmianę podejścia inżynierów do pomiaru siły wymuszającej drgania badanych obiektów. Metoda ODS - Operational Deflection Shapes [10], która pozwala wyznaczyć eksploatacyjne postacie drgań zaczęła być wykorzystywana do analizy wyników testów wibracyjnych (metoda Basic Frequency Decomposition [2]). Niestety jest to technika, która uniemożliwia estymację bliskich w dziedzinie częstotliwości postaci drgań. Problem ten został częściowo rozwiązany wraz z pojawieniem się algorytmu LSCE (Least Square Complex Estimation Method) do estymacji parametrów modalnych [5]. Algorytm LSCE wykorzystywany jest do jednoczesnej estymacji wielu postaci drgań. Algorytm ten wykonuje obliczenia w dziedzinie czasu dla wielu stopni swobody i znajduje swoje zastosowanie do estymacji postaci drgań w szerokim paśmie częstotliwości. Algorytm najlepiej estymuje postacie o małym współczynniku tłumienia.

Kolejnymi metodami estymacji, które były wykorzystywane to metody CMIF [4] oraz Frequency Domain Decomposition [1] jednak prawdziwy przełom nastąpił w momencie zastosowania w estymacji parametrów modalnych algorytmów identyfikacji modeli w podprzestrzeni stanów SSI - Stochastic Subspace Identification [1]. Szczególnie przydatnym okazał się algorytm BR - Balanced Realisation [3]. Algorytm BR wyznacza z pomocą funkcji auto-regresji sygnałów odpowiedzi pozwala na estymację parametrów modalnych na podstawie danych drganiowych w dziedzinie czasu bez znajomości sygnału wymuszającego. Algorytm wykonuje operacje w podprzestrzeni stochastycznej i bazuje na modelu w przestrzeni stanu. Algorytmy SSI są lepsze od innych ponieważ umożliwiają analizę sygnałów, które w pewnym stopniu są niestacjonarne i są przydatne w przypadku estymacji postaci drgań, które wzbudzone są chwilowo.

Problem poprawnej estymacji parametrów modalnych jest ściśle związany z jakością wymuszenia w dziedzinie częstotliwości. Większość metod analizy modalnej zakłada, że wymuszenie jest szerokopasmowe (np. wymuszenie białym szumem) co nie zawsze jest osiągalne w praktyce. Dlatego stosowanie skomplikowanych metod identyfikacji takich jak metody SSI lub eksploatacyjnego algorytmu PolyMAX [9] nie rekompensuje ich generalnej wady jaką jest estymacja tylko tych postaci drgań, które były poprawnie odwzorowane w zarejestrowanych sygnałach odpowiedzi obiektu na widmo wymuszenia zastosowanego w trakcie przeprowadzonego eksperymentu. Ponadto ze względu na brak pomiaru wartości siły wymuszenia otrzymane postacie drgań są nieskalowane i ich skalowanie wymaga najczęściej przeprowadzenia dodatkowego eksperymentu [8].

Pomimo wielu problemów związanych z zastosowaniem technik EAM jest ona coraz częściej wykorzystywana w praktyce inżynierskiej. EAM jest jedyną techniką, która umożliwia estymację parametrów dynamicznych obiektu w przypadku braku jego poprawnego modelu matematycznego np. modelu zbudowanego z wykorzystaniem metody elementów skończonych i dlatego jest bardzo często wykorzystywana w dostrajaniu i walidacji modeli numerycznych. Metody analizy modalnej są również coraz częściej wykorzystywane w monitorowaniu stanu maszyn i stają się coraz bardziej powszechne w praktyce inżynierskiej.

3. ZASTOSOWANIE METODY OMA W BADANIU PROPAGACJI FALI DRGANIOWEJ W GRUNCIE

Badania przeprowadzono w siatce 15 punktów pomiarowych rozmieszczonych zgodnie z rysunkiem 1. W tabeli 1 przedstawiono odległości pomiędzy punktami pomiarowymi.

Tab. 1. Odległości pomiędzy punktami pomiarowymi

Nr punktów	Odległość [m]		
	Przekrój I	Przekrój II	Przekrój III
torowisko - 1	2	2	2
1 - 2	4	4	4
2 - 3	8	8	8
3 - 4	16	16	16
4 - 5	20	32	20

Odległość pomiędzy pierwszym i drugim przekrojem pomiarowym wynosiła 18 [m], pomiędzy drugim i trzecim – 18 [m]. W trakcie badań wykonano trzy testy:

- TEST A – pomiar amplitudy przyspieszenia drgań w pięciu punktach pomiarowych zlokalizowanych na pierwszym przekroju pomiarowym
- TEST B – pomiar amplitudy przyspieszenia drgań w pięciu punktach pomiarowych zlokalizowanych na drugim przekroju pomiarowym
- TEST C – pomiar amplitudy przyspieszenia drgań w pięciu punktach pomiarowych zlokalizowanych na trzecim przekroju pomiarowym

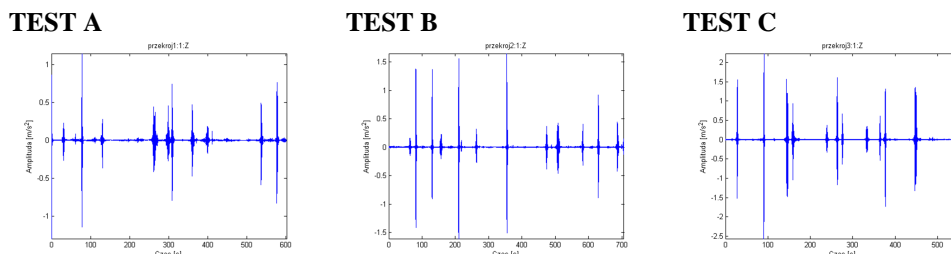
W trakcie badań wykorzystano następujący sprzęt pomiarowy:

- rejestrator sygnałów TEAC Gx-01,
- komputer pomiarowy,
- 6 jednoosiowych akcelerometrów sejsmicznych typu PCB 393A03,
- 3 trójosiowe akcelerometry piezoelektryczne typu PCB 356A16.

W punktach 1 i 5 pomiary wykonano z wykorzystaniem czujników sejsmicznych zamocowanych na kostkach prostopadłościennych co umożliwiło rejestrację przebiegów czasowych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. W punktach 2, 3 i 4 przebiegi czasowe drgań rejestrowano z wykorzystaniem trójosiowych akcelerometrów piezoelektrycznych zamocowanych na prętach stalowych wbitych w ziemię. Poniżej zestawiono najważniejsze cechy przeprowadzonych badań:

- rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszenia drgań sygnałów odpowiedzi w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach równocześnie dla wszystkich punktów pomiarowych z danego przekroju pomiarowego,
- sygnałem referencyjnym z każdym z testów był sygnał zarejestrowany w punkcie numer 1 w kierunku Z,
- zastosowano filtrację dolnoprzepustową rejestrowanych sygnałów o częstotliwości odcięcia 80 [Hz],
- na podstawie mierzonych sygnałów pomiarowych w każdym z testów wyznaczono funkcje wzajemnej gęstości widmowej mocy pomiędzy sygnałem referencyjnym i sygnałami w pozostałych punktach pomiarowych.

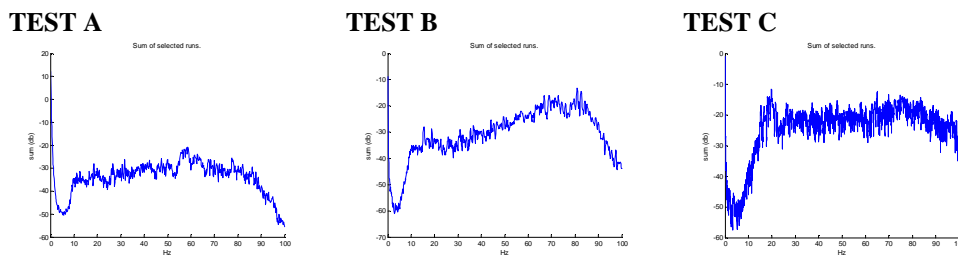
Wykresy czasowe przebiegów amplitudy przyspieszenia drgań w punkcie referencyjnym przedstawione są rysunku 2.



Rys. 2. Przebiegi amplitudy przyspieszenia drgań zarejestrowane w punkcie referencyjnym.

Na rysunku 2 można zauważyć, że wyraźnie zostały odwzorowane w sygnale czasowym amplitudy drgań związane z przejazdami kolejnych tramwajów.

Analizę propagacji fali drganiowej w gruncie przeprowadzono osobno dla każdego z testów w paśmie częstotliwości od 0 do 60 [Hz] w kierunku prostopadłym do gruntu. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi unormowanej sumy amplitud wzajemnych gęstości widmowych mocy dla każdego z testów. Maksyma lokalne tych przebiegów wskazują wartości częstotliwości drgań własnych oraz częstotliwości źródeł wymuszenia. Położenie tych maksimów oznacza, że w trakcie przeprowadzonych eksperymentów zostały odwzorowane w zarejestrowanych przebiegach drgania własne dla częstotliwości z zakresu 0 – 60 [Hz].



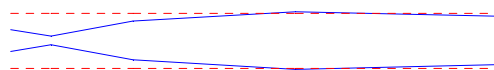
Rys. 3. Unormowana suma przebiegów amplitudy wzajemnych gęstości widmowych mocy.

Estymacja parametrów modalnych gruntu była przeprowadzona przy pomocy oprogramowania VIOMA opracowanego w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH z zastosowaniem obydwóch wymienionych wcześniej algorytmów. Przeprowadzono zbiór procedur estymacji, z których wyników wybrano najbardziej reprezentatywne postacie drgań przy pomocy autorskiej procedury konsolidacji modelu modalnego będącej składnikiem oprogramowania VIOMA. W czasie przeprowadzonych badań zidentyfikowano tylko tę część postaci drgań, która została dobrze wymuszona i odwzorowana w wynikach przeprowadzonego eksperymentu. Wyniki estymacji parametrów modelu modalnego na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych zestawiono w tabeli 2. Propagację fali drganiowej w gruncie dla każdego z przekrojów pomiarowych przedstawiono na rysunku na rysunku 4.

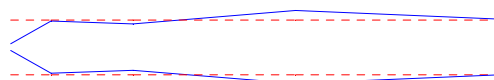
Tab. 2. Zestawienie wyestymowanych wartości częstotliwości drgań własnych (CDW) i współczynników tłumienia modalnego (WTM)

Lp.	TEST A		TEST B		TEST C	
	CDW [Hz]	WTM [%]	CDW [Hz]	WTM [%]	CDW [Hz]	WTM [%]
1	9.8700	6.1400	9.6500	7.3600	3.7700	5.4300
2	10.3300	4.6400	10.7300	7.0100	15.3100	1.2900
3	12.6000	2.1500	15.4700	0.5800	21.9500	1.1500
4	20.6300	1.0700	15.5200	1.0200	26.0800	1.2000
5	26.5300	1.1900	20.8400	1.5800	29.1900	1.6400
6	28.6700	1.5200	25.3100	2.3600	29.6500	1.0700
7	31.9700	1.5500	27.3600	1.8400	34.4100	1.1900
8	36.5600	1.6300	32.3900	1.5000	43.1300	1.3500
9	39.6600	0.7300	41.2900	2.0300	45.7800	1.2100
10	45.6000	1.7200	44.3400	1.7100	47.8800	0.7000
11	58.8900	0.9800	54.4200	0.6800	55.7600	1.2600

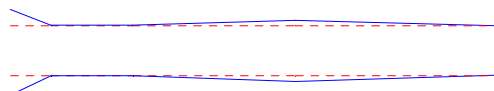
TEST A - 9.87 Hz, 6.14 %



TEST B - 15.52 Hz, 1.02 %



TEST C - 3.77 Hz, 5.43 %



Rys. 4. Propagacja fali drganiowej w gruncie.

Analizując wyniki estymacji parametrów modalnych gruntu można zauważyć, że dla każdego przekroju pomiarowego wyestymowano inny zestaw parametrów modalnych. Związane jest to z niejednorodnością gruntu w miejscu planowanej budowy bloku mieszkalnego oraz brakiem jednorodnego wymuszenia w trakcie trwania pomiarów. Wymuszenie związane było z przejazdami tramwajów różnego typu co wiązało się z następującymi różnicami:

- masa wagonów,
- prędkość przejazdu,
- ilość pasażerów w wagonach.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono próbę zastosowania techniki analizy modalnej do określenia propagacji w gruncie fali drganiowej wymuszonej ruchem pojazdów szynowym. Analiza wyników badań pozwala na postawienie następujących wniosków:

- oszacowanie parametrów modalnych gruntu jest możliwe, ale wymaga odpowiedniego przygotowania danych pomiarowych,
- brak jednorodnego wymuszenia powoduje problemy z budową modelu modalnego,
- wyniki analizy zależą od składu materiałowego gruntu w miejscu mocowania czujników pomiarowych,
- warunki pogodowe mają wpływ na wyniki analiz (np. niejednorodna wilgotność gruntu po opadach atmosferycznych).

Podsumowując można stwierdzić, że prawidłowo przeprowadzony pomiar drgań oraz proces estymacji parametrów modalnych pozwala określić propagację fali drganiowej w gruncie i może być wykorzystany w projektowaniu budynków użyteczności publicznej zlokalizowanych w pobliżu szlaków kolejowych i linii tramwajowych.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Basseville M., Benveniste A., Goursat M., Hermans L., Mevel L., Van der Auweraer H. Output-only subspace-based structural identification: from theory to industrial testing practice. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2001; 123: 668-676.
- [2] Brincker R., Zhang L., Andersen P. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. *Proceedings of XVIII IMAC SEM USA*. 2000; 625-630.
- [3] Ewins D.J. *Modal Testing: Theory and Practice*. Research Studies Press Ltd. 1985.
- [4] Haylen W., Lammens S., Sas P., *Modal Analysis Theory and Practice*, KU Leuven, 1997.
- [5] Hermans L., Van der Auweraer H.: *Modal Testing and Analysis of Structures under Operational Conditions*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1999; 13(2): 193-216.
- [6] Lisowski W.: *Wybrane problemy automatyzacji eksperymentalnej analizy modalnej*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2006.
- [7] Maia N., Silva J. (Ed.) *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press Ltd. 1997.
- [8] Parloo E., Cauberghe B., Benedettini F., Alaggio R., Guillaume P.: Sensitivity based operational mode shape normalization: application to a bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2005; 19(1): 43-55
- [9] Peeters B., Vecchio A., Van der Auweraer H. PolyMAX modal parameter estimation from operational data. *Proceedings of ISMA2004*. 2004; 1049-1063.
- [10] Richardson M.H.: Is it a mode shape or an operating deflection shape? *Sound and Vibration*. 1997; 54-61.
- [11] Uhl T., Lisowski W., Kurowski P., *In-operation modal analysis and its application*, Wydawnictwo Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH, 2001.