

Janusz KAWECKI<sup>1</sup>  
Krzysztof KOZIOL<sup>2</sup>  
Krzysztof STYPUŁA<sup>3</sup>

## WERYFIKACJA MODELI DYNAMICZNYCH NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIARÓW „TŁA DYNAMICZNEGO”

Eksploracja drogi projektowanej w pobliżu istniejących budynków nie powinna naruszać warunków ich dalszej bezpiecznej eksploatacji oraz wymagań odnośnie do zapewnienia niezbędnego komfortu wibracyjnego ludziom przebywającym w tych budynkach. Projektant konstrukcji drogi powinien na podstawie odpowiednich analiz dynamicznych wykazać, iż podane wymagania będą spełnione podczas eksploatacji drogi. Rozpatrywane zagadnienia należą do zadań diagnozy z prognozą (por. [3]). Obliczenia sprawdzające wpływ prognozowanego oddziaływania parasejsmicznego na budynek i ludzi w budynku przeprowadza się na modelu budynku. Ukształtowany model obliczeniowy budynku (przeważnie z zastosowaniem MES) powinno się zweryfikować. Można to zrobić korzystając z wyników pomiarów tzw. tła dynamicznego (por. [5]). W pracy opisano procedurę weryfikacji modelu dynamicznego budynku oraz podano przykłady jej zastosowania przy weryfikowaniu modelu stosowanego w ocenie wpływu prognozowanych drgań na konstrukcję budynku, na ludzi w budynku oraz na inne obiekty infrastruktury.

**Słowa kluczowe:** drgania parasejsmiczne, model dynamiczny budynku, weryfikacja modelu, badania tła dynamicznego

### 1. Wprowadzenie

Projektując drogi w otoczeniu istniejącej zabudowy należy uwzględnić również wymagania odnośnie do oddziaływania eksploatacji drogi na jej otoczenie. Wśród takich wymagań coraz częściej stawiane są te, które dotyczą zapewnienia budynkom dalszej ich bezpiecznej eksploatacji oraz ludziom przebywającym w budynkach niezbędnego komfortu wibracyjnego. Takie zadanie zalicza

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Janusz Kaweck, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. (12) 628 2388, e-mail: jkawec@pk.edu.pl

<sup>2</sup> Krzysztof Koziol, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. (12) 628 2391, e-mail: koziol\_k@poczta.fm

<sup>3</sup> Krzysztof Stypuła, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. (12) 628 2340, e-mail: kstypula@pk.edu.pl

się do sytuacji diagnostycznych (por. [3]) określanych jako „diagnoza z prognozą”.

W [5] opisano procedury projektowe i diagnostyczne odnoszące się do zapewnienia ludziom przebywającym w budynkach niezbędnego komfortu wibracyjnego. Można, nawiązując do tamtego opisu, rozszerzyć procedurę diagnozy z prognozą na wpływ drgań przekazywanych przez podłoże (parasejsmicznych) zarówno na ludzi w budynku jak i na konstrukcję budynku. Zachowując w miarę ogólne ujęcie można wyróżnić w tej procedurze diagnostycznej następujące elementy:

- Wykonanie pomiarów drgań w punktach pomiarowych na istniejącym budynku (albo innym obiekcie budowlanym). Drgania te generowane są przez dostępne źródło drgań, inne od prognozowanego, występujące poza budynkiem. W razie potrzeby można też dodatkowo przyjąć punkty pomiarowe pomiędzy źródłem drgań a budynkiem. Ten etap określa się jako badanie tła dynamicznego.
- Ukształtowanie (najczęściej z zastosowaniem MES) modelu obliczeniowego budynku (albo innego obiektu budowlanego) na podstawie dostępnej dokumentacji technicznej uzupełnionej informacjami zebranymi podczas wizji lokalnej.
- Poddanie przyjętego modelu obliczeniowego budynku oddziaływaniu wymuszenia kinematycznego, którego zapis w dziedzinie czasu uzyskano podczas pomiarów tła dynamicznego. Informacje te uzyskuje się z pomiaru drgań w punktach pomiarowych usytuowanych na fundamencie albo na ścianie piwnicznej (w sztywnym węźle konstrukcji) w poziomie terenu, od strony źródła drgań.
- Analityczne wyznaczenie reakcji modelu budynku w miejscach usytuowania punktów pomiarowych przyjętych w pomiarach objętych badaniem tła dynamicznego.
- W odniesieniu do wibrogramów uzyskanych w wyniku pomiarów i obliczeń w tych samych punktach pomiarach wykonuje się ich analizę stosownie do kryterium oceny diagnostycznej i porównuje uzyskane wyniki. Na tej podstawie bada się zgodność przyjętego modelu budynku z obiektem rzeczywistym. Przyjęta w ocenie funkcja jakości określa wymagania umożliwiające akceptację modelu i jego wykorzystanie w następnym etapie analiz dotyczących prognozowania wpływu drgań na budynek i ludzi w budynku.
- Jeśli zestawione rezultaty uzyskane na podstawie pomiarów i obliczeń spełniają kryterium opisane za pomocą funkcji jakości, to model budynku można zaakceptować i stosować w kolejnych analizach odnoszących się do prognozowanych oddziaływań komunikacyjnych. Jeśli zaś ta akceptacja nie jest możliwa (np. zgodność wyników analizy nie jest wystarczająca), to odpowiednio poprawia się model budynku. Akceptacją modelu budynku kończy

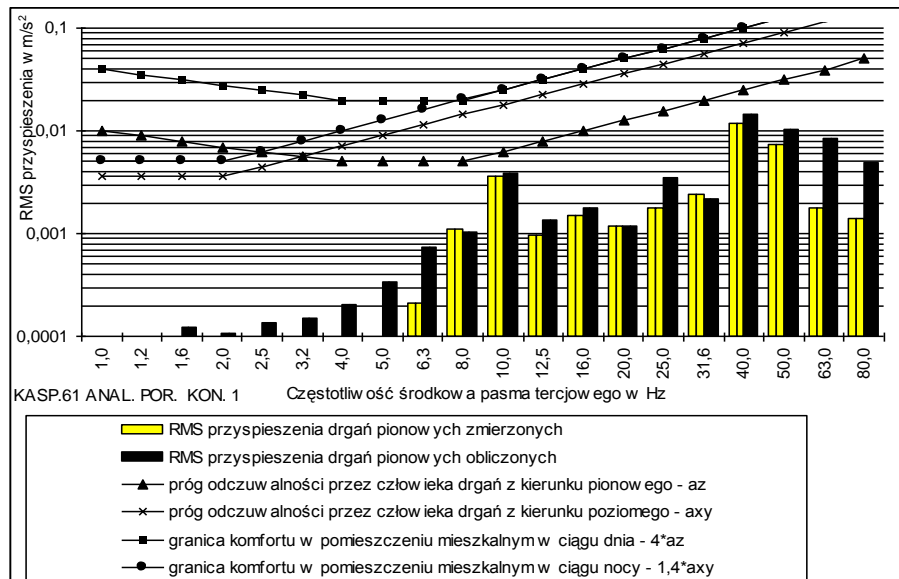
się etap pierwszy diagnozy z prognozą obejmujący pomiar tła dynamicznego i wykorzystanie jego wyników do weryfikacji modelu budynku.

- W drugim etapie opracowuje się prognozę wpływu drgań generowanych podczas eksploatacji projektowanej drogi na budynki i ludzi w budynkach. Na podstawie analizy zbioru danych pomiarowych pozyskanych w podobnych sytuacjach (występujących np. w Bazie Danych Pomiarowych, którą dysponuje autor opracowania diagnostycznego) wyznacza się najbardziej prawdopodobny wibrogram odpowiadający wymuszeniu kinematycznemu budynku.
- Po przyłożeniu do modelu budynku prognozowanego wymuszenia kinematycznego wyznacza się drgania budynku w miejscach odgrywających istotną rolę w odniesieniu do wyężenia jego elementów albo w miejscach narażenia na drgania ludzi przebywających w budynku.
- Wyznaczone wibrogramy analizuje się z zastosowaniem odpowiednich kryteriów oceny wpływu drgań na konstrukcję oraz na ludzi w budynkach. Przy niespełnieniu odpowiednich wymagań w zakresie bezpiecznego przeniesienia drgań przez konstrukcję budynku albo zapewnienia ludziom w budynku niezbędnego komfortu wibracyjnego wprowadza się środki techniczne doprowadzające do osiągnięcia potrzebnej redukcji drgań.

W niniejszej pracy opisano rozwiązane zadania weryfikacji modeli obliczeniowych budynków (albo innych obiektów budowlanych) na podstawie wyników pomiarów tła dynamicznego.

## 2. Weryfikacja modelu obliczeniowego budynku wg [5]

Weryfikację modelu obliczeniowego przeprowadza się z uwzględnieniem zakresu jego wykorzystania w prognozowaniu oddziaływań dynamicznych. Zakres ten uwzględnia się również w opisie funkcji jakości, na podstawie którego dokonuje się akceptacji modelu. Jeśli więc przykładowo model będzie stosowany w diagnozie dotyczącej wpływu prognozowanych drgań na ludzi w budynku, to w funkcji jakości uwzględni się zgodność oceny drgań obliczonych (na modelu) i pomierzonych (na obiekcie rzeczywistym) przy tym samym – pomierzonym – wymuszeniu kinematycznym i w tym samym miejscu ich przekazywania na człowieka (por. np. [4]). Dobrze ilustruje to rys. 1., który zaczerpnięto z [5]. W układzie współrzędnych: częstotliwość oraz wartość RMS przyspieszenia drgań w pasmach 1/3-oktawowych podano wyniki analizy wibrogramów uzyskanych w wyniku pomiaru na stropie 1. piętra w pewnym budynku oraz w wyniku obliczeń na modelu tego budynku. Na tym samym rysunku zaznaczono linie odpowiadające kryteriom oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach.



Rys.1. Porównanie wyników analizy wibrogramów uzyskanych jako rezultat pomiarów oraz obliczeń w punkcie na stropie 1. piętra budynku (za [5])

Fig. 1. Comparison of the results of the analysis of the vibrograms obtained as a result of measurements and calculations in the point on the second floor of the building ([5])

Funkcję jakości opisano tak, iż za wystarczającą zgodność modelu z obiektem uznano zgodność wartości RMS przyspieszenia w paśmie o największej wartości. Takie wymaganie uzupełniono dodatkowymi informacjami, które dopuszczają uznanie modelu budynku za akceptowany, jeśli występujące różnice między podanymi wyżej wartościami nie przekraczają 30% i większe wartości uzyskano z analizy modelu. Zaakceptowanie takiego modelu wynika z analizy dokładności pomiarów dynamicznych oraz przyjętego kryterium oceny wpływu drgań na ludzi (por. [7]). Z informacji zawartych na rys. 1. wynika, iż wymagania opisane za pomocą przedstawionej wyżej funkcji jakości zostało spełnione i na tej podstawie zaakceptowano model budynku zbudowany na bazie MES o przyjętych parametrach opisujących jego właściwości materiałowe. Największe wartości skuteczne przyspieszenia drgań występują w paśmie o częstotliwości őrdkowej 40Hz. Wartości uzyskane na podstawie analizy wibrogramu pomierzonego na budynku okazały się mniejsze od wyznaczonych na podstawie analizy wibrogramu uzyskanego w tym samym miejscu z modelu obliczeniowego.

Taki rezultat otrzymano także w wypadku pasma o częstotliwości őrdkowej 10Hz. Większe różnice między wartościami wyznaczonymi w odniesieniu do istniejącego budynku i jego modelu wystąpiły jedynie w pasmach, w których wyznaczone wartości skuteczne przyspieszenia drgań

były znacząco mniejsze. Nie wpływało to na wynik oceny zapewnienia ludziom wymaganego komfortu wibracyjnego. Podobne rezultaty uzyskano w odniesieniu do innych punktów pomiarowych umieszczonych na tym budynku.

### 3. Opis procedury weryfikacji modeli

#### 3.1. Pomiar tła dynamicznego

Pomiary, analizy i oceny wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach wykonuje się zgodnie z zaleceniami podanymi w normach [6, 7]. Uwzględniając kryteria oceny podane w tych normach przyjęto, że pomiar dotyczy przyspieszeń drgań w wybranych punktach pomiarowych w trzech kierunkach: dwóch poziomych ( $x$  i  $y$ ) oraz pionowym ( $z$ ). Pomiar drgań odbywa się jednocześnie we wszystkich punktach pomiarowych usytuowanych w danym budynku.

Punkty pomiarowe rozmieszcza się w budynku w następujący sposób (uwzględniono tu wymagania zapisane w przywołanych normach oraz ich uzasadnienia zawarte np. w [1, 2, 5, 8]):

- Na fundamencie albo na ścianie piwnicznej w poziomie terenu, od strony źródła drgań. Dane pozyskane w tym punkcie pomiarowym dostarczają informacji o zmianie wymuszenia kinematycznego budynku, które w procedurze weryfikacji modelu obliczeniowego będzie przykładane również do modelu budynku.
- Na środku stropu w wybranych pomieszczeniach w tym także na stropie najwyższej położonej kondygnacji.

Z wibrogramów zarejestrowanych podczas pomiarów tła dynamicznego wybiera się reprezentatywne, które będą wykorzystane w procedurze weryfikacji modelu obliczeniowego budynku. Jeśli np. model budynku będzie zastosowany w analizach dotyczących wpływu prognozowanych drgań na ludzi w budynku, to analiza wibrogramów zarejestrowanych w miejscach przekazywania tych drgań na ludzi dotyczy wyznaczenia maksymalnych z wielu wartości skutecznych RMS przyspieszeń drgań określonych w 1/3 oktaowych pasmach częstotliwości (por. np.: [9]). W tym samym układzie współrzędnych, w którym przedstawiono wykresy schodkowe wartości skutecznych przyspieszeń drgań nanosi się również linie odpowiadające progom odczuwalności drgań przez człowieka oraz zapewnieniu ludziom niezbędnego komfortu wibracyjnego (por. rys. 1).

Jeśli z kolei model budynku będzie wykorzystany w analizach dotyczących wpływu prognozowanych drgań na konstrukcję budynku, to analiza wibrogramów zarejestrowanych na elementach konstrukcyjnych dotyczy przedstawienia struktury częstotliwościowej tych wibrogramów. Służy ona do wyznaczenia pasm częstotliwości, których udział w wibrogramie jest dominujący. Do weryfikacji modelu będą służyły wartości maksymalne przyspieszenia drgań wyznaczone w tych pasmach.

### **3.2. Metodologia modelowania budynków**

W kształtowaniu modeli budynków stosuje się przeważnie Metodę Elementów Skończonych. Obecnie dostępne programy obliczeń komputerowych umożliwiają kształtowanie modeli przestrzennych (3D). Wymiary i układ elementów przyjmuje się zgodnie z danymi zawartymi na rysunkach technicznych z uwzględnieniem ich weryfikacji podczas wizji lokalnej. Przyjmuje się również na tej podstawie wartości parametrów charakteryzujących właściwości materiałów występujących w konstrukcji. Wartości obciążeń użytkowych przyjmuje się w modelu z uwzględnieniem zaleceń norm dotyczących obciążeń, normy [6] oraz ewentualnie informacji i obserwacji zebranych podczas wizji lokalnej.

Do tak opisanego modelu budynku przykładą się wymuszenie kinematyczne opisane w dziedzinie czasu wibrogramem zapisanym podczas pomiarów tła dynamicznego. W wyniku rozwiązania układów równań opisujących ukształtowany model uzyskuje się reakcję modelu budynku na wymuszenie kinematyczne opisaną również w dziedzinie czasu. Oddziaływanie na budynek (obiekt) i na jego model opisane jest tym samym wibrogramem (wymuszenie kinematyczne). Porównanie zaś odnosi się do odpowiedzi budynku i jego modelu w tych samych punktach (punkty pomiarowe).

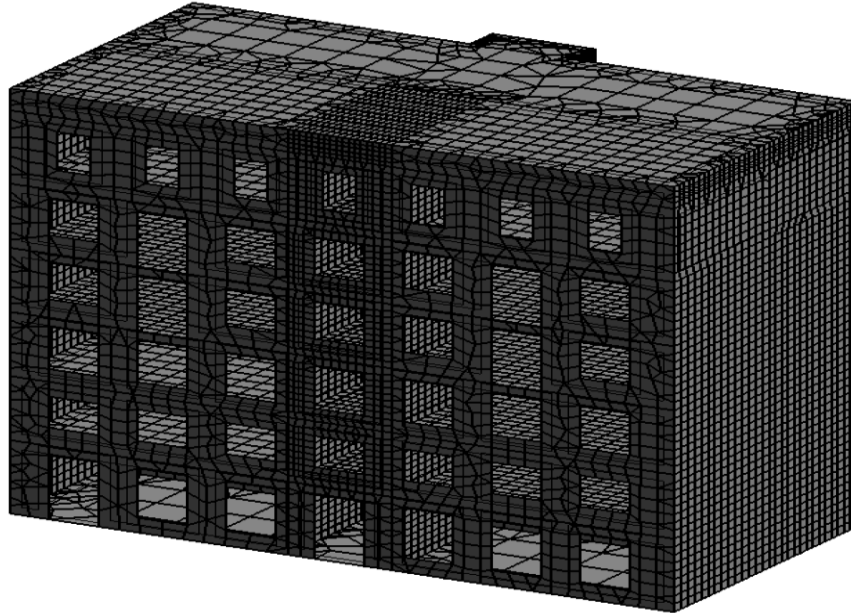
## **4. Przykłady weryfikacji modeli**

### **4.1. Model budynku wykorzystany w ocenie wpływu drgań na ludzi w budynku**

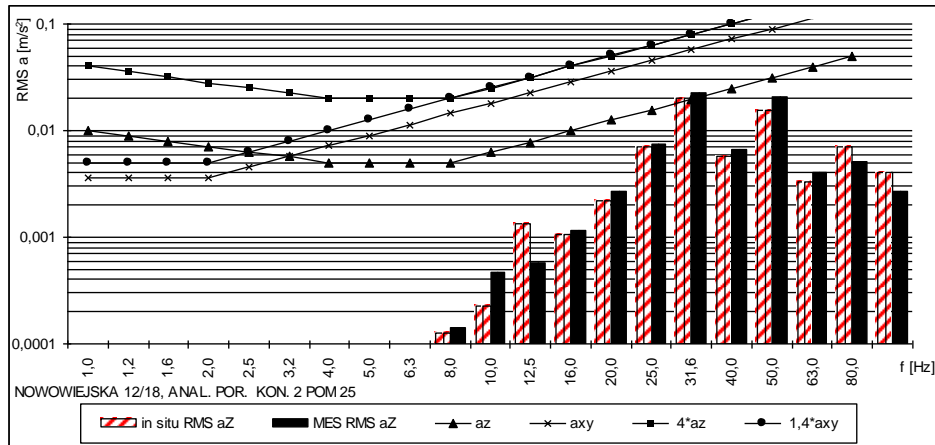
Budynek mieszkalny znajduje się w sąsiedztwie linii tramwajowej, która będzie modernizowana. Przewidziano zastosowanie wibroizolacji nowego toru tramwajowego. Badania tła dynamicznego wykonano podczas sterowanych jazd tramwajów po dotychczasowym torze. Punkty pomiarowe obrano na ścianie piwnicy, w poziomie terenu, od strony toru tramwajowego. Pozostałe punkty pomiarowe występowały na stropach poszczególnych kondygnacji, na posadzce w środku rozpiętości stropu w wybranych pomieszczeniach.

Schemat modelu obliczeniowego MES budynku podano na rys. 2. Do modelu przyłożono wymuszenie kinematyczne w postaci uzyskanego z pomiaru wibrogramu. Wyznaczono reakcję budynku w punktach pomiarowych na stropach poszczególnych kondygnacji. Wibrogramy pomierzone i obliczone na stropach poddano analizie w pasmach 1/3-oktawowych.

Wyniki analizy wybranych wibrogramów pomierzonych i obliczonych w tych samych punktach pomiarowych zestawiono na rys. 3 – 4.

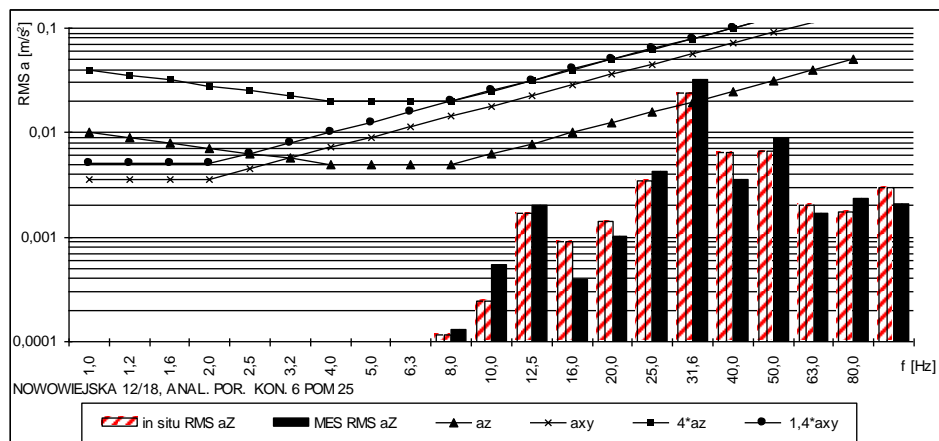


Rys. 2. Schemat modelu obliczeniowego budynku  
Fig. 2. Scheme of calculations model of building



Rys. 3. Weryfikacja modelu budynku stosowanego w ocenie wpływu drgań na ludzi. Analiza drgań pionowych na stropie 1. piętra budynku. Wyniki otrzymane z pomiaru (słupki zakreskowane) i z obliczeń (słupki czarne).

Fig. 3. Verification of building model used in the assessment of the effects of vibration on people. Analysis of vertical vibration on the second floor of the building. Results obtained from measurement (hatched bars) and calculation (black bars)



Rys.4. Weryfikacja modelu budynku stosowanego w ocenie wpływu drgań na ludzi . Analiza drgań pionowych na stropie 5. piętra budynku. Wyniki otrzymane z pomiaru (słupki zakreskowane) i z obliczeń (słupki czarne).

Fig. 4. Verification of building model used in the assessment of the effects of vibration on people. Analysis of vertical vibration on the six floor of the building. Results obtained from measurement (hatched bar) and calculation (black bars).

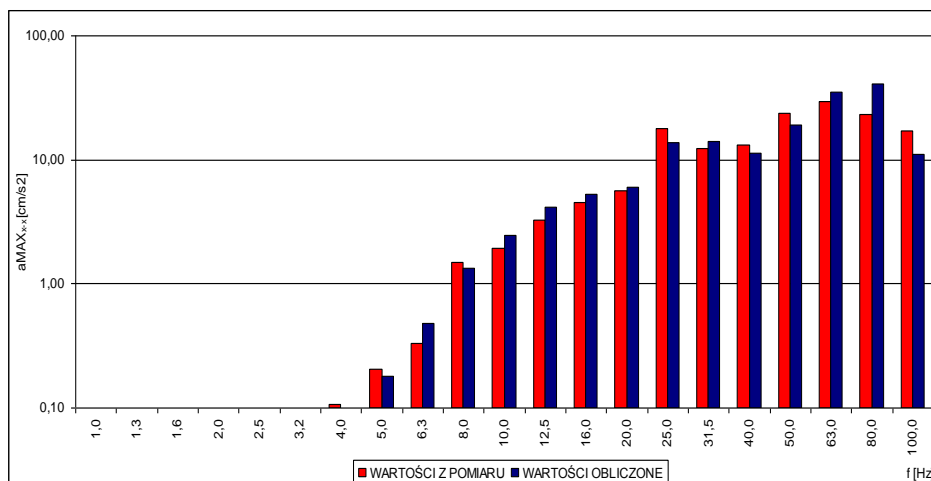
Posługując się kryterium opisanym w punkcie 1. zaakceptowano model budynku i zastosowano go w ocenie wpływu prognozowanych drgań na ludzi w budynku. Drgania te wyznaczono z uwzględnieniem różnych wariantów wibroizolacji zastosowanej w konstrukcji toru.

#### 4.2. Weryfikacja modelu z uwzględnieniem podłoża na drodze propagacji drgań

Niekiedy należy zweryfikować model opisujący budowlę z podłożem między budowlą i drogą. Wówczas pomiar tła dynamicznego obejmuje również punkt pomiarowy na krawędzi drogi (lub na gruncie). Wielkości zarejestrowane w tym punkcie pomiarowym będą stanowiły wymuszenie drgań modelu, a zarejestrowane i obliczone w miejscu odbioru ich przez konstrukcję posłużą do weryfikacji modelu. Na rys. 5 podano przykładowy wynik analiz, które posłużyły do weryfikacji modelu, w którym występowało podłoże między źródłem drgań i obiektem budowlanym (hala produkcyjna). Zestawiono tam wyniki analizy wibrogramów (pomierzonego i obliczonego) na fundamencie słupa hali w pasmach 1/3-okawowych.

Stosując do tych wyników kryteria weryfikacji modelu obliczeniowego opisane w punkcie 1 (funkcja jakości) stwierdza się, że przyjęty model obliczeniowy podłoża między konstrukcją drogi a fundamentem hali można zaakceptować. Można go więc zastosować w obliczeniach, na podstawie których dobrane zo-

staną parametry charakteryzujące wibroizolację zaprojektowaną w konstrukcji drogi.



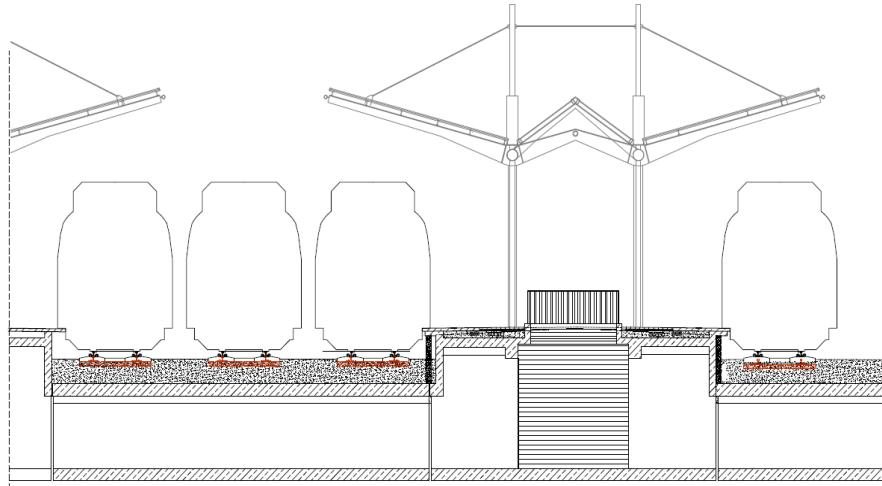
Rys. 5. Porównanie wyników analizy wibrogramów drgań poziomych fundamentu słupa hali w pasmach 1/3 –oktawowych, otrzymanych z pomiarów i z obliczeń

Fig. 5. Comparison of the results of the analysis of horizontal vibrations of the foundation of the pillar hall in the 1/3-octave bands, derived from measurements and calculations

Inny przykład weryfikacji modelu odnosi się do obliczeń wykonanych w związku z modernizacją układu torowego na dworcu kolejowym. Przewidziano zastosowanie wibroizolacji w modernizowanym układzie torowym. W celu dobrania parametrów charakteryzujących wibroizolację należało najpierw przyjąć model obliczeniowy obszaru między torem a konstrukcją peronu i następnie wykonać prognozę skuteczności wibroizolacji. Ma ona skutecznie zmniejszyć poziom drgań generowanych podczas przejazdów pociągów i przekazywanych na ludzi przebywających w tunelach pod peronami. Badania tła dynamicznego podczas przejazdów wielu pociągów po dotychczasowym torze dostarczyły informacji wykorzystywanych w procedurze weryfikacji modelu opisującego obszar między źródłem drgań a górną powierzchnią płyty peronowej. Na rys. 6 podano przekrój poprzeczny przez układ torów i peron. Następnie ukształtowano model obliczeniowy MES. Analizę porównawczą modelu obliczeniowego z obiektem rzeczywistym przeprowadzono w punkcie pomiarowym usytuowanym na płycie peronu, przy wyjściu środkowym z peronu.

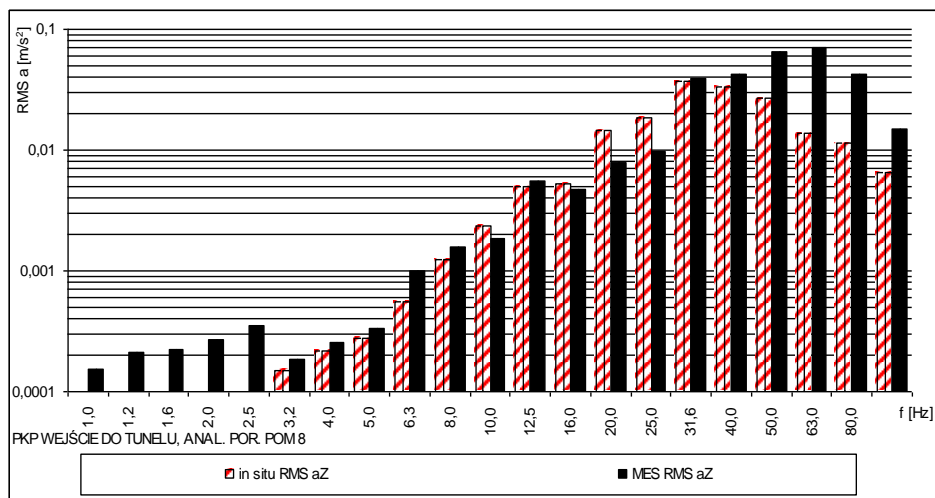
Przykładowe wyniki weryfikacji przyjętego modelu w odniesieniu do punktu pomiarowego na płycie peronowej podano na rys.7. Dotyczą one wartości odpowiadających przejazdowi pociągu, podczas którego otrzymano wartości największe RMS przyspieszenia drgań pionowych na płycie peronu. W badaniu odpowiedności modelu stosowano wartości RMS przyspieszenia drgań w pa-

smach 1/3-oktawowych ze względu na wykorzystanie modelu w ocenie wpływu drgań na ludzi.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny przez peron.

Fig. 6. Cross section through the platform



Rys. 7. Weryfikacja modelu. Maksymalne wartości skuteczne przyspieszenia (RMS) w pasmach 1/3-oktawowych pomierzone (słupki zakreskowane) i obliczone (słupki czarne).

Fig. 7. Verification of the model. The maximum values of the effective acceleration (RMS) in 1/3-octave bands measured (hatched bars) and calculated (black bars).

W przedstawionej sytuacji kryteria akceptacji modelu opisane przyjętą funkcją jakości uznano za spełnione i w kolejnych analizach zastosowano zaak-

ceptowany model do wyznaczenia parametrów charakteryzujących wibroizolację torów kolejowych.

## 5. Podsumowanie

Opisana tu metodyka weryfikacji modeli obliczeniowych przyjmowanych w zadaniach diagnozy z prognozą (por. [3]) jest rozwinięciem metodyki przedstawionej wcześniej w [4, 5]. Jej zastosowanie zwiększa wiarygodność prognoz opracowywanych w związku z ochroną przed drganiami budynków i ludzi w budynkach usytuowanych w otoczeniu projektowanych albo modernizowanych dróg. Autorzy zweryfikowali tę metodykę w wielu sytuacjach praktycznych. Przykłady przywołane w niniejszym opracowaniu nawiązują do takich opracowań.

## Literatura

- [1] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., Stypuła K.: Ocena diagnostyczna skutków wpływów drgań na budynki i ludzi w budynkach, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 9, 1993, s. 390-394
- [2] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.: Ocena wpływu wibracji na budynki i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna), Wyd. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1993
- [3] Kawecki J.: Diagnostyka drgań komunikacyjnych na budynki i ludzi w budynkach, *Transport Miejski i Regionalny*, nr 11, 2006, s. 17-27
- [4] Kawecki J., Stypuła K.: Metodyka pomiarowo-interpretacyjna wyznaczania modelu budynku przydatnego w ocenie wpływu drgań parasejsmicznych na ludzi, *Czasopismo Techniczne*, seria: Budownictwo, z. 2-B, 2007, s. 39-46.
- [5] Kawecki J., Stypuła K.: Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2013.
- [6] PN-B-02170:1985, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [7] PN-B-02171:1988, Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [8] Stypuła K.: Drgania wywołane eksploatacją miejskiego transportu szynowego – Badania i zapobieganie, *Transport Miejski i Regionalny*, nr 10, 2006, s. 2-11.
- [9] Zieliński T. P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – Od teorii do zastosowań, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.

## VERIFICATION OF DYNAMIC MODELS BASED ON THE RESULTS OF THE "DYNAMIC BACKGROUND" MEASUREMENTS

### Summary

The operation of the road projected near the existing buildings should not affect the conditions of their further safe operation and requirements to ensure the necessary vibration comfort of the people in these buildings. Road designer should demonstrate based on the respective analyses

of dynamic that the requirements will be fulfilled during operation. Considered issues are among the tasks of the diagnosis with the forecast. (see [3]). Calculations of the influence of the forecasted paraseismic impact on the building and the people inside are carried out using the building model. Prepared calculation model of the building (mostly using FEM) can be verified by using the results of these dynamic background measurements (see [5]). This paper describes a procedure for the verification of the dynamic model of the building and gives examples of its use for the verification of the model used in the assessment of the expected impact of vibration on the structure of the building, on the people in the building and on the other infrastructure facilities.

**Keywords:** paraseismic vibration, dynamic building model, dynamic model verification, research of a dynamic background

DOI:10.7862/rb.2014.29

*Przesłano do redakcji: 05.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.*