

NADER Mirosław¹
KORZEB Jarosław²
KOZYRA Zofia³

OCENA WPŁYWU DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH NA PROJEKTOWANY OBIEKT MIESZKALNY

W pracy przedstawiono metodologię prowadzenia analizy oraz wyniki uzyskane w ramach prowadzonych badań symulacyjnych, które obejmowały ocenę wpływu drgań generowanych przez środki transportu na projektowany obiekt mieszkalny. W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych posłużono się środowiskiem obliczeniowym MES oraz autorskim oprogramowaniem opartym o standardowe biblioteki Matlab. Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w pasmach terejowych i porównano z wartościami dopuszczalnymi przez krajowe akty normatywne, a wyniki pełnej analizy dynamicznej porównywano z odpowiednimi własnościami wytrzymałościowymi.

TRANSPORT VIBRATIONS EFFECT EVALUATION ON DESIGNED RESIDENTIAL BUILDING

The paper presents a research methodology of analysis and the results of the conducted simulation studies, which included evaluation the impact of vibrations generated by the means of transport for designing residential building. In order to prepare simulation studies used a computing FEM-based environment, and proprietary software based on the standard Matlab libraries. The results of calculations are presented in one-third octave bands and compared with the national normative acts values of limits. The results of a full analysis of the dynamic properties were compared with the corresponding strength.

1. WSTĘP

Oddziaływanie drgań parasejsmicznych, których źródłem są środki transportu niesie szereg niekorzystnych skutków dla najbliższego otoczenia[1,3,4,5]. Drgania generowane zwykle na styku koło-droga, bądź koło-szyna przenoszone są do podłoża, skąd w postaci fal o charakterze parasejsmicznym rozprzestrzeniane są do sąsiadujących obiektów inżynierskich, budynków mieszkalnych lub miejsc użyteczności publicznej. Mają więc

¹Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75,
tel.+48 22 234 7581, *E-mail*: mna@it.pw.edu.pl

²Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75,
tel.+48 22 234 7707, *E-mail*: korzeb@it.pw.edu.pl

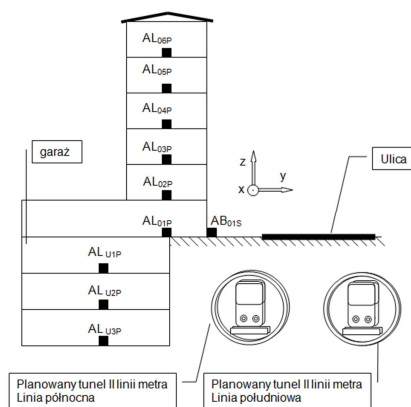
³Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16,
tel.+48 22 234 6431, *E-mail*: z.kozyra@il.pw.edu.pl

niekwestionowany wpływ na warunki pracy i odpoczynku ludzi zamieszkujących aglomeracje miejskie. Drugim niezmiernie ważnym efektem jest wpływ drgań na konstrukcję wymienionych obiektów. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż rodzaj podłoża, typ posadowienia obiektu oraz stan techniczny w znaczący sposób wpływa na sposób przenoszenia drgań. W niniejszej pracy przedstawiono fragment badań naukowych prowadzonych w ramach złożonej pracy badawczej obejmującej budowę systemu oceny oddziaływań dynamicznych. System z założenia będzie wykorzystywany w celu przeprowadzania szybkiej oceny zmiany w warunkach oddziaływań dynamicznych, po wprowadzeniu nowego środka transportu w obszarze aglomeracji miejskiej. Przedstawione w pracy elementy dotyczące metod wykonywania analiz i końcowej oceny oddziaływań, zweryfikowano dodatkowo w trakcie prowadzenia badań, w ramach wykonania rzeczywistego raportu dla projektowanego obiektu mieszkalnego, z którego przytoczono wybrane wyniki.

2. OBIEKT PODLEGAJĄCY OCENIE ORAZ ŹRÓDŁA DRGAŃ

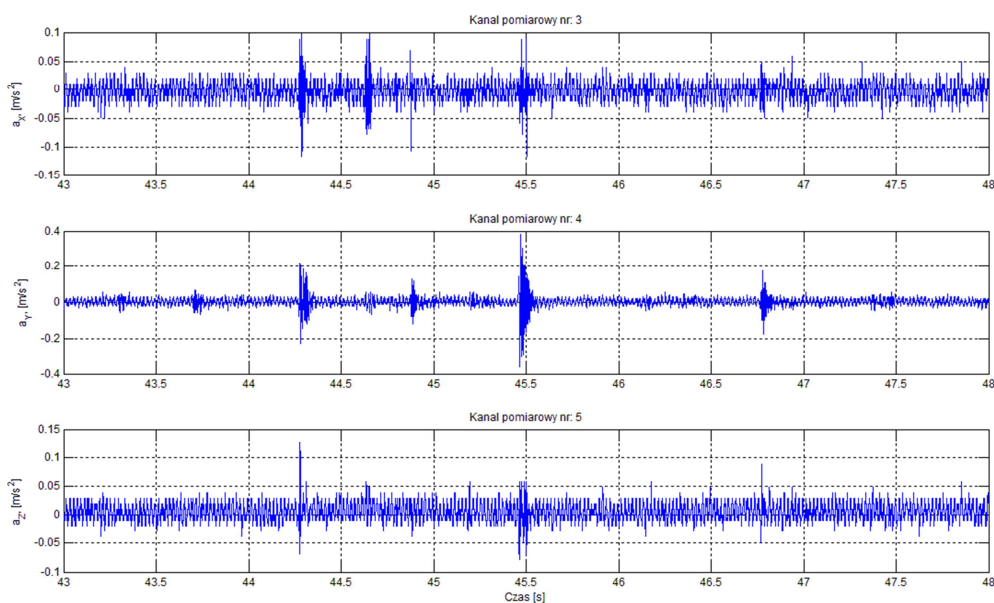
W celu przeprowadzenia wybranych analiz wykorzystano nowo-projektowany obiekt mieszkalny, którego lokalizację przewidziano w miejscu bezpośrednio narażonym na oddziaływanie drgań generowanych przez środki transportu. Obiekt narażony jest na drgania pochodzące od pojazdów poruszających się ulicą dwukierunkową, posiadającą po jednym pasie ruchu w każdym kierunku i przejeżdżających przez sąsiadujące skrzyżowanie oraz na oddziaływania dynamiczne, które generować będą pociągi metra przejeżdżające planowaną w tym obszarze - II linią metra warszawskiego[6]. Należy dodać, iż na obecnym etapie, zarówno obiekt mieszkalny oraz przedmiotowa linia metra nie zostały jeszcze zrealizowane.

Na rysunku 1 przedstawiono położenie analizowanego obiektu względem omawianych źródeł drgań.



Rys.1. Położenie projektowanego obiektu oraz lokalizacja punktów charakterystycznych, dla potrzeb wyznaczenia wyników badań symulacyjnych

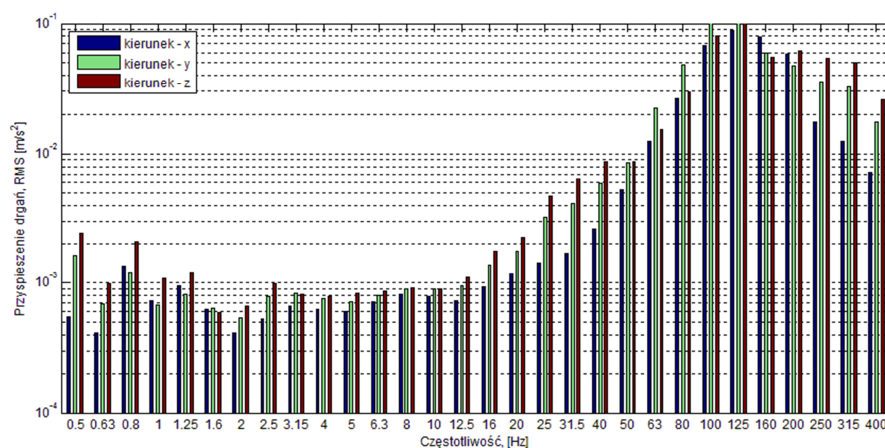
Planowany obiekt będzie posiadał trzy garażowe kondygnacje podziemne, częściowo ukrytą pod powierzchnią gruntu kondygnację pierwszą oraz pięć kondygnacji typowo naziemnych. Obiekt znajduje się na granicy stosowalności uproszczonych kryteriów oceny wg skali SWD-II, w związku z czym przeprowadzono pełne modelowanie i analizę dynamiczną. Zlokalizowany będzie w bezpośredniej strefie oddziaływań projektowanego tunelu metra, a odległość pomiędzy garażem podziemnym i korpusem zewnętrznym tunelu metra wynosić będzie ok. 6[m]. W celu przeprowadzenia analizy zbadano natężenie ruchu powierzchniowego na sąsiadujących ulicach. Poziom natężenia ruchu jest daleki od osiągnięcia poziomu przepustowości sąsiadującego skrzyżowania. Ruch ma charakter lokalny, a struktura rodzajowa ruchu nie wprowadza znaczących wymuszeń dynamicznych. Do oceny warunków ruchu wykorzystano system klasyfikacyjny oparty na oznaczeniu wskaźnika Poziomu Swobody Ruchu. Można stwierdzić, że PSR jest bliski poziomu B/C, co oznacza, iż ruch jest równomierny, ale na sposób jazdy istotny wpływ wywierają inne pojazdy, a prędkość przemieszczania jest ograniczona ze względu na obecność innych pojazdów. Na poniższym rysunku przedstawiono przykładowe przebiegi drgań generowanych przez ruch powierzchniowy w omawianej lokalizacji.



Rys. 2 Przebieg czasowy przyspieszeń drgań w kierunkach x, y, z – tło dynamiczne

Źródłem przedstawionych na rys.2 drgań jest tło dynamiczne, a drgania zarejestrowano w punkcie referencyjnym położonym w pobliżu projektowanego obiektu. Przebieg wymuszeń stosowanych w badaniach symulacyjnych uwzględniał ponadto efekt wpływu metra. W tym celu pomierzono drgania bezpośrednio nad tunelem I linii metra warszawskiego na odcinku białąskim. Wybrano ten odcinek ze względu na zastosowany na nim

zaawansowany system wibroizolacji. Przyjęto, iż II linia metra posiadać będzie system wibroizolacji o parametrach nie gorszych niż zastosowany na odcinku bielańskim[6].



Rys. 3 Widmo częstotliwościowe przyspieszeń drgań generowanych przejazdem pociągu metra zarejestrowane na odcinku bielańskim I linii metra

Przedstawione wyżej widmo częstotliwościowe uwzględnia przejazd pociągu przez tunel z dużą szybkością, przy dobrym stanie utrzymania kół i zastosowaniu systemu wibroizolacji. Odległość punktu pomiarowego w tym przypadku wynosiła 2[m] nad poziomem tunelu.

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych uwzględniono najbardziej niekorzystną kombinację sygnału przyspieszeń drgań pochodzących od nałożenia dwóch przejazdów pociągów, o dobrym stanie technicznym kół w zestawach wagonowych i z uwzględnieniem systemu wibroizolacji ekwiwalentnego do zastosowanego na odcinku bielańskim I linii metra. Pierwszy przejazd to przejazd szybki z prędkością 50[km/h] (13,89[m/s] – trwający około 8,5[s]) pobudzający wstępnie obiekt do drgań, drugi to przejazd wolniejszy – z prędkością 30[km/h] (8,33[m/s] – trwający około 14,5[s]).

Przyjęto pełne obciążenie pociągu złożonego z 6 wagonów o masie ok. 33[t] każdy, wypełnionego maksymalnie tj. masą sięgającą 100[t]. Ponadto przygotowano wymuszenia, będące kombinacją tła dynamicznego oraz przebiegów metra, które przykładano do siatki fundamentów obiektu od strony źródeł propagacji drgań – traktując je jako powierzchniowe oddziaływania parasejsmiczne.

3. METODA ANALIZY

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych dobrano odpowiednie metody, określono kryteria oceny otrzymanych wyników oraz wykonano model matematyczny obiektu. Ocena dokonana zostanie w oparciu o przygotowanie szczegółowego modelu 3D, uwzględniającego właściwe elementy charakterystyczne jego konstrukcji oraz walidację parametrów opartą o zastosowane dane materiałowe oraz wiedzę ekspercką, a następnie weryfikację modelu i przeprowadzenie odpowiednich badań symulacyjnych.

Badania symulacyjne przeprowadzono w przedstawionych poniżej etapach:

- Etap I - określenie tła dynamicznego w analizowanym obszarze, z uwzględnieniem istniejącej organizacji ruchu. Na tym etapie dokonano pomiarów natężeń ruchu i oceniono jego strukturę rodzajową i kierunkową, co w oparciu o przeprowadzony wcześniej eksperyment pozwoliło na przygotowanie zestawu wymuszeń dynamicznych dla potrzeb modelowania i badania zachowań projektowanego obiektu poddawanego drganiom komunikacyjnym.
- Etap II - opracowanie modelu konstrukcji projektowanego obiektu, przygotowany w oparciu o dostępne materiały projektowe oraz wiedzę na temat lokalizacji. W etapie tym przeanalizowano planowane rozwiązania konstrukcyjne oraz materiały obiektu. Przyjęto mniej korzystnie wartości parametrów materiałowych z proponowanych, natomiast wartości obciążeń stałych i zmiennych przyjęto przez analogię jak w innym obiekcie tego rodzaju. W fazie uszczegółowienia modelu matematycznego wykorzystano poniższe informacje i zagadnienia:
 - położenie obiektu,
 - rozwiązania konstrukcyjne,
 - rodzaj fundamentów,
 - materiał do budowy fundamentów,
 - materiał do budowy ścian,
 - materiał stropów,
 - rodzaj i konstrukcja klatek schodowych oraz szybów windowych,
 - typ wieńców,
 - zastosowane dylatacje konstrukcyjne,
 - występowanie dużych otworów w ścianach i ich regularność,
 - opis rodzaju gruntu posadowienia budynku,
 - typ posadowienia budynku,
 - odległość od źródeł wymuszeń dynamicznych i miejsca przyłożenia wymuszeń.
- Etap III to przygotowanie wymuszeń reprezentujących istniejącą rodzajową i kierunkową strukturę ruchu oraz natężenie ruchu – w postaci reprezentatywnych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań. Na tym etapie przygotowano również odpowiednie wymuszenia reprezentujące przejazdy pociągów metra. W tym etapie wykorzystano m.in. zależność opisującą propagację fali Raileigh'a o amplitudach w pierwotnym punkcie pomiarowym A_0 i A_r w analizowanym punkcie, znajdujących się w odległościach r_0 i r , dla parametrów określających własności podłoża p i α [2, 15].

$$\ln \left[\frac{A_0}{A_r} \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^p \right] = \alpha(r - r_0) \quad (1)$$

- Etap IV to przeprowadzenie badań symulacyjnych. Wymuszenia w postaci przebiegów czasowych, przykładano do odpowiednich węzłów siatki geometrycznej budynku znajdujących się w poziomie posadowienia budynku od strony odpowiedniego źródła drgań. Podstawą analizy dynamicznej były w tym przypadku podstawowe równania ruchu[14]:

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = -M \cdot \ddot{x}_g \quad (2)$$

gdzie:

x , \dot{x} , \ddot{x}	-	wektory odpowiednio przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń,
\ddot{x}_g	-	przyspieszenie drgań gruntu w poziomie terenu,
M	-	macierz mas układu,
K	-	macierz sztywności układu,
C	-	macierz tłumienia.

Przy czym macierz tłumienia definiowano jako kombinację liniową macierzy mas i macierzy sztywności.

$$C = \alpha K + \beta M \quad (3)$$

gdzie α i β są stałymi współczynnikami wyznaczonymi w sposób podany w literaturze [2, 14]. Na tym etapie przeprowadzono weryfikację modelu. Obliczenia symulacyjne dały odpowiedź w każdym węźle siatki elementów w kierunkach x, y, z na przyłożone wymuszenia dynamiczne. Przy analizie wpływu drgań komunikacyjnych na obiekt brano pod uwagę maksymalne wartości przyspieszeń drgań w kierunkach x, y występujące w punktach pomiarowych konstrukcji obiektu, na poziomie terenu od strony źródła propagacji drgań. Prowadzono analizę oddziaływań drgań komunikacyjnych na budynki zgodnie z normą PN-85/B-02170[8]. Wyniki przedstawiono w pasmach tercjowych i porównywano z wartościami kryterialnymi. Podczas analizy wpływu drgań na ludzi przebywających w obiekcie brano pod uwagę skuteczne wartości przyspieszenia drgań w kierunkach x, y, z występujące na każdej kondygnacji obiektu w wytypowanych przekrojach pionowych. W trakcie oceny porównywano je z wartościami progu odczuwalności drgań przez człowieka ($n=1$), granicą komfortu dla pory nocnej w pomieszczeniach mieszkalnych ($n=1,4$) oraz granicą komfortu dla pory dziennej ($n=4$) w pomieszczeniach mieszkalnych i użyteczności publicznej zgodnie z wymaganiami normy PN-88/B-02171[7].

- Etap V to analiza i synteza otrzymanych wyników cząstkowych, dająca podstawę do wykonania całościowej prognozy oddziaływań dynamicznych na obiekt i ludzi w nim przebywających.

Przy analizie wpływu drgań komunikacyjnych na konstrukcję omawianego obiektu poza przebiegami czasowymi przyspieszeń, dodatkowo określono maksymalne naprężenia zastępcze w konstrukcji budynku. Przyjęto kryterium wyężeniowe i warunki graniczne związane z hipotezą Coulomba-Mohra, właściwą dla betonu jako materiału kruchego.

Dokonano pełnej analizy dynamicznej reakcji obiektu pobudzonego do drgań działaniem kinematycznych wymuszeń pochodzenia parasejsmicznego, łącznie z wyznaczeniem sił bezwładności, a obliczone wielkości naprężeń zastępczych porównywano do wytrzymałości obliczeniowych elementów konstrukcyjnych.

W związku z faktem, że obiekt jest na granicy stosowania uproszczonych kryteriów skal Strefy Wpływu Dynamicznych SWD-2a, dokonano odczytu odpowiedzi obiektu w poziomie terenu od strony źródeł propagacji drgań i porównywano je z odpowiednimi

wartościami dopuszczalnymi przez skalę oraz wytycznymi określonymi w normach[8]. Ten test miał jedynie charakter informacyjny.

W przypadku gruntów można wykorzystywać różne kryteria wytrzymałościowe, na podstawie których formułowane są powierzchnie graniczne dla gruntów. Jednym z częściej stosowanych kryteriów wytrzymałościowych jest hipoteza Coulomba-Mohra [16], wg której materiał osiąga stan graniczny, gdy naprężenia styczne oraz naprężenie normalne osiągną graniczną wartość zależną od współczynnika kohezji c i kąta tarcia wewnętrznego ϕ .

$$\frac{1}{3} \operatorname{tg}(\phi) \operatorname{tr} \boldsymbol{\sigma} + \|\mathbf{s}\| \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \frac{1}{\cos(\phi)} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \operatorname{tg}(\phi) \right] - c = 0 \quad (4)$$

gdzie:

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos\left(-\frac{3\sqrt{3} \det(\mathbf{s})}{2(I_{2s})^{3/2}}\right) - \text{kąt Lodego, natomiast operacje } \|\cdot\|, \text{ „tr” oznaczają}$$

odpowiednio normę i ślad tensora natomiast I_{2s} jest drugim niezmiennikiem dwiatora tensora naprężenia.

Na podstawie kryterium wytrzymałościowego Druckera-Pragera powierzchnią graniczną jest stożek, który można potraktować jako gładką aproksymację powierzchni granicznej uzyskiwanej z hipotezy Coulomba-Mohra.

$$\alpha \operatorname{tr} \boldsymbol{\sigma} + \|\mathbf{s}\| - \sqrt{2} k = 0 \quad (5)$$

gdzie α i k są parametrami materiałowymi.

Na potrzeby numerycznej implementacji, można również przyjmować uogólnioną postać funkcji plastyczności związanej z powierzchnią Druckera-Pragera.

W celu prowadzenia oceny zgodnej z obowiązującymi aktami prawnymi, w tym Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury [13], należało przyjąć wyznaczenie uogólnionych wskaźników obciążenia drganiami dla konstrukcji obiektu i ludzi w nim przebywających,

$$VLF_{aax} = \frac{a_x}{a_{xdop}} \quad (6)$$

dla wartościami przyspieszeń drgań, odpowiednio a_x -pomierzonych lub prognozowanych oraz a_{xdop} -wartości dopuszczalnych przez normy.

4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Następnym krokiem było wykonanie obliczeń symulacyjnych. Przygotowany wcześniej, przestrzenny model obiektu poddano badaniom symulacyjnym, w wyniku których otrzymano odpowiedzi czasowe dla dowolnego punktu siatki obiektu.

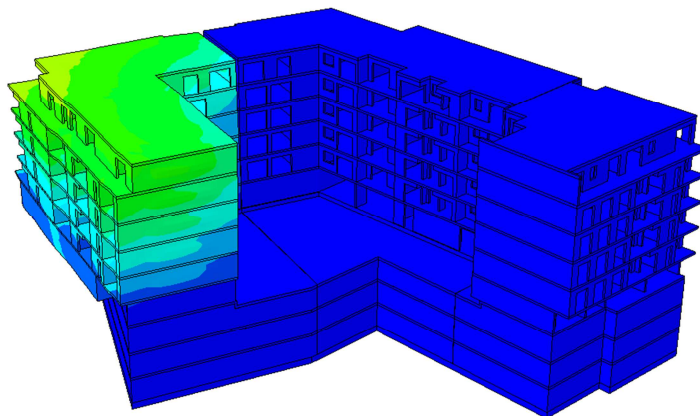
W celu przygotowania modelu konstrukcji obiektu wykorzystano informacje o sposobie posadowienia, szczegółowe rzuty i przekroje konkretnego budynku wraz z ich wymiarami, co pozwoliło na przygotowanie modelu geometrycznego konstrukcji z uwzględnieniem zapisów odpowiednich norm [9,10,11,12]. Ustalono lokalne układy współrzędnych skorelowane z globalnym układem współrzędnych kartezjańskich-wynikający z położenia głównego źródła wymuszeń, wytyczonym przez trasę przebiegu tunelu metra. Model geometryczny obiektu został wykonany w środowisku projektowym w formacie Boola.

W obiekcie wyróżniono elementy konstrukcyjne, takie jak: płyta fundamentowa, ściana szczelinowa, stropy żelbetowe krzyżowo zbrojone, słupy, nadproża, wieńce, klatki schodowe i żelbetowe ściany trzony, spoczniki, otwory, dylatacje, konstrukcja dachu.

Wymienione elementy konstrukcji importowano do autorskiego programu symulacyjnego wykorzystującego Metodę Elementów Skończonych [14]. Zbudowano model z importowanych elementów składowych poprzez zdefiniowanie więzów istniejących pomiędzy tymi elementami. W tak przygotowanym modelu przypisywano odpowiednie własności i cechy materiałowe, takie jak: charakterystyki mechaniczne materiałów użytych do konstrukcji (moduł Younga, liczba Poissona, gęstość, współczynnik odkształcenia postaciowego itp.), parametry konstrukcyjne elementów obiektu (rozstaw i wymiary belek, płyt stropowych, balkonowych, schodów itp.), nominalne obciążenia statyczne poszczególnych elementów konstrukcji obiektu. Po nadaniu własności materiałowych na model nałożono trójwymiarową siatkę elementów czterowzłowych i ośmiowzłowych. Warunki brzegowe uwzględniające posadowienie na gruncie zadano przyjmując model półprzestrzeni sprężystej. Model obiektu poddany został opisanym wcześniej wymuszeniom.

4.1 Analiza w środowisku MES

Obliczenia symulacyjne dały odpowiedź dla dowolnego punktu siatki, każdej kondygnacji i każdego skrzydła obiektu w kierunkach x , y , z na zadane wymuszenia.

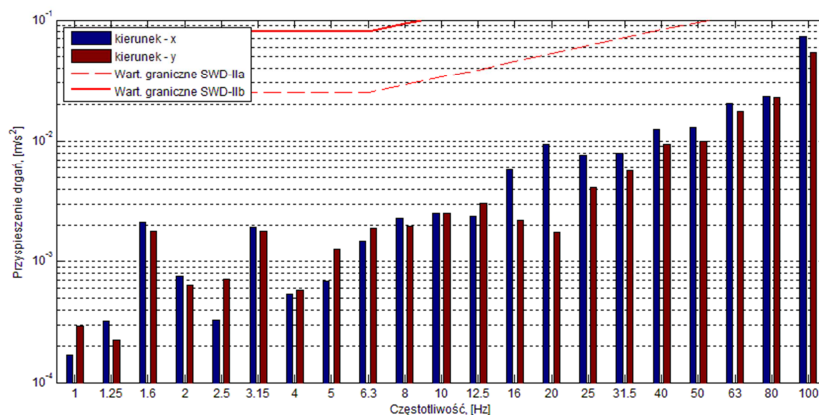


Rys. 4 Szósta postać drgań własnych obiektu

Powyżej przedstawiono jako przykład szóstą postać drgań własnych dla modelowanego obiektu, przy częstotliwości 4,5[Hz]. Wyróżniona część obiektu leży w bezpośrednim sąsiedztwie zarówno ulicy, jak i tuneli II linii metra.

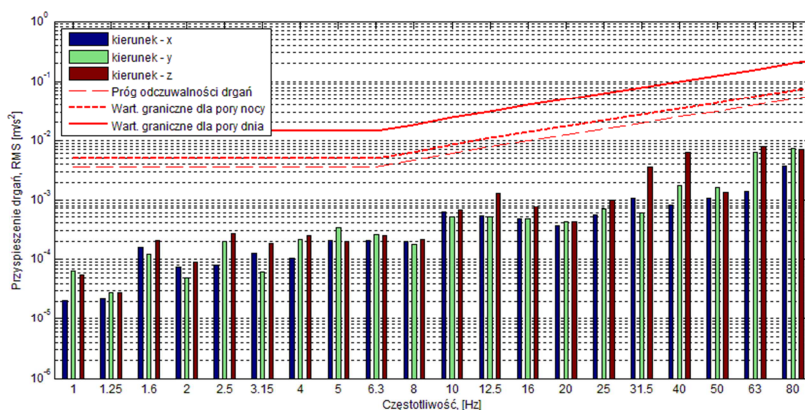
4.2 Analiza częstotliwościowa

Analizę częstotliwościową przeprowadzoną zgodnie z obowiązującymi aktami normatywnymi. Na rysunku 5 przedstawiono informację na temat wpływu drgań na konstrukcję obiektu.



Rys. 5 Wpływ drgań wywołanych łącznym oddziaływaniem wymienionych środków transportu na konstrukcję obiektu

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badania wpływu drgań na ludzi przebywających na 1 kondygnacji obiektu. Odpowiedź uzyskano dla wybranego wymuszenia dynamicznego.



Rys. 6 Wpływ drgań powodowanych łącznym oddziaływaniem wymienionych środków transportu na ludzi przebywających na 1 kondygnacji obiektu

Jak pokazano prognozowane wymuszenia dla tej kombinacji źródeł drgań nie przekraczały wartości dopuszczalnych przez krajowe akty normatywne[7,8].

5. WNIOSKI

Podsumowując - w oparciu o analizę otrzymanych wyników pomiarów można stwierdzić, że w analizowanym przekroju pomiarowym, przy analizie wpływu drgań prognozowanych na konstrukcję budynku, nie stwierdzono przekroczenia granicy SWD-2a dla żadnej częstotliwości w kierunkach x i y. Obliczona uśredniona wartość współczynnika obciążenia dynamicznego, wyznaczona dla wszystkich częstotliwości środkowych pasm tercjowych, dla poziomych kierunków oddziaływania drgań (x,y) wynosiła dla

analizowanego przekroju 6,7% (maksimum 34%) wartości dopuszczalnej, w związku z czym zachowane zostaną warunki wymagane Załącznikiem 2 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury, sugerujące iż maksymalny wskaźnik odczuwalności drgań podczas analizy wpływu drgań na konstrukcję obiektu powinien być mniejszy niż 0,7.

Przy analizie wpływu prognozowanych oddziaływań na ludzi przebywających w budynku, stwierdzono przekroczenia wartości progu odczuwalności drgań przez człowieka dla 3 z 20 częstotliwości środkowych pasm tercjowych, w zakresie 6,3-12,5[Hz], na 6 kondygnacji projektowanego obiektu.

Naukowo-badawcze aspekty pracy zostały pozytywnie zweryfikowane dla kolejnego rzeczowego przypadku i zostaną uwzględnione w pracy dotyczącej budowy systemu oceny oddziaływań dynamicznych, finansowanego ze środków na naukę w latach 2010/2011 jako projekt badawczy nr N N509 501838.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamczyk J., Targosz J.: Ochrona przed drganiami wywołanymi przez transport samochodowy. Wydawnictwo AGH, Monografie, Kraków 2000r. str. 68.
- [2] Ciesielski R., Maciąg E.: Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990. s. 248.
- [3] Korzeb J.: "Simulation studies of vibration influence on people in buildings", Proceedings of 37th INTER-NOISE 2008, s.6, Shanghai, Chiny, 2008.
- [4] Nader M.: "Investigation of communication vibrations influence on new-designed objects". Proceedings of 3rd IC-EpsMsO, Athens, Patras University Press, ISBN: 978-960-98941-0-4, Rio Patras, Greece, 2009.
- [5] Nader M., Różowicz J., Korzeb J.: „Simulating investigations of traffic generated vibrations influence on people staying in buildings”. Proc.of 36th INTER-NOISE 2007, CD-ROM, Istanbul Turcja, 2007.
- [6] Praca zbiorowa: „Program Funkcjonalno-Użytkowy - Projekt i budowa II linii metra od stacji „Rondo Daszyńskiego” do stacji „Dworzec Wileński” w Warszawie“. Koordynator prac A. Chudzikiewicz, WTPW, str. 462, Warszawa, wrzesień 2008r.
- [7] PN-88/B-02171, 1988. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [8] PN-85/B-02170, 1985. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [9] PN-82/B-02000, 1982. Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.
- [10] PN B 03264 grudzień 2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [11] PN 81 B 03020 Grunt budowlany, posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [12] PN-EN 1992-1-2 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
- [13] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie. notyfikowane w Komisji Europejskiej, Publikacja Dz.U. Nr 144 poz. 859, 13 lipca 2011.
- [14] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: The Finite Element Method. Fifth edition. Butterworth-Heinemann, Oxford 2000
- [15] Barkan D. D.: Dynamics of bases and foundations. MacGraw-Hill. N.Y., 1962
- [16] Wifun Z.: Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa, 2008.