

Jan Różowicz
Politechnika Warszawska Wydział Transportu

Jarosław Korzeb
Politechnika Warszawska Wydział Transportu

ANALIZA WPLYWU ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH NA BUDYNKI I LUDZI W NICH PRZEBYWAJĄCYCH W STREFIE ODDZIAŁYWANIA ŚRODKÓW TRANSPORTU

Streszczenie: W pracy przedstawiono zagadnienia niezbędne do realizacji wykonywania prognoz oddziaływań dynamicznych na otoczenie. Szczególną uwagę poświęcono oddziaływaniom dynamicznym środków transportu na budynki i ludzi. Wykonano analizę zadań szczegółowych niezbędnych przy wykonywaniu pełnej prognozy. Omówiono trzy podstawowe metody stosowane w badaniach symulacyjnych oddziaływań dynamicznych. Scharakteryzowano modele wykorzystywane w tych metodach oraz omówiono ich wady i zalety. Przedstawiono przykładowe wyniki prognozy wykonanej dla budynku zlokalizowanego w rejonie projektowanej II linii metra i ludzi w nim przebywających.

Słowa kluczowe: transport, modelowanie, oddziaływania dynamiczne, budynki i ludzie

1. WSTĘP

Poważnym problemem oceny wpływu środków transportu na otoczenie jest utworzenie jednolitej metodologii wykonywania badań oddziaływań dynamicznych. Problematyką badawczą poruszaną w niniejszej pracy jest zagadnienie wpływu szeroko pojętych zanieczyszczeń wywołanych oddziaływaniem transportu, ze szczególnym uwzględnieniem zanieczyszczenia środowiska hałasem i drganiami. Głównym kierunkiem zainteresowań autorów jest oddziaływanie drgań generowanych przez środki transportu na obiekty inżynierskie oraz na ludzi.

W artykule przedstawiono próbę opracowania metodologii prowadzenia badań nad oddziaływaniami dynamicznymi oraz zaproponowano stosowanie jednolitej metodologii. Pozwoli to na ujednolicenie prezentowania wyników badań oraz ich porównywanie w przypadku wykonywania analogicznych badań przez różne ośrodki krajowe i zagraniczne.

Przedstawiono ponadto wyniki badań symulacyjnych oddziaływania projektowanej II linii metra w Warszawie na zabytkowy budynek użyteczności publicznej (szpital).

2. METODOLOGIA PROWADZENIA BADAŃ

Prognozowanie oddziaływań dynamicznych jest ważnym zagadnieniem w gospodarce związanym z oceną wpływu inwestycji transportowych na środowisko naturalne człowieka. Prognozowanie szczególnie dotyczy oddziaływań takich inwestycji jak budowa i modernizacja dróg i ulic, budowa lotnisk, linii tramwajowych, kolejowych oraz linii metra. Ze względu na interdyscyplinarność zagadnienia prognozowania oddziaływań dynamicznych niezbędne jest posiadanie w zespole badawczym specjalistów z wielu dziedzin.

2.1. Zakres badań i założenia

Wykonanie prognozy oddziaływań dynamicznych generowanych przez środki transportu na otoczenie związane jest z realizacją podanych poniżej zadań głównych:

- określenie strefy wpływów inwestycji transportowej na otoczenie,
- określenie tła dynamicznego w strefie oddziaływania inwestycji,
- opracowanie modeli dynamicznych obiektów inżynierskich,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych,
- wykonanie prognozy,
- wykonanie badań weryfikujących,
- ocena trafności prognozy.

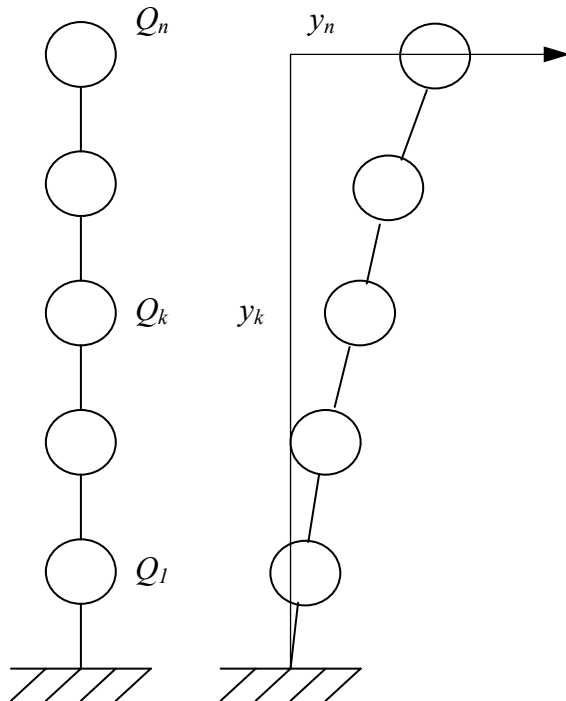
Jedną z podstawowych trudności otrzymywania poprawnej oceny oddziaływań dynamicznych jest budowa modeli matematycznych elementów drogi propagacji drgań od źródła przez obiekty inżynierskie do ludzi w nich przebywających. Obecnie stosowane są trzy podstawowe metody modelowania, które skrótowo omówiono w rozdziale 2.2.

2.2. Metody modelowania

Jednym z najistotniejszych zagadnień powstających podczas wykonywania prognozy oddziaływań dynamicznych jest określenie drogi propagacji drgań i hałasu oraz określenie ich skutków przy oddziaływaniu na obiekty i ludzi w nich przebywających. Źródłem drgań i hałasu wywołanych środkami transportu są między innymi wymuszenia wywoływane kontaktem pojazdu z nawierzchnią, pracą jednostki napędowej itd. Drgania te są przenoszone przez grunt do fundamentu budynków, a następnie odbierane przez budynek i przenoszone przez jego konstrukcję do poszczególnych pomieszczeń, w których przebywają ludzie. W pracy przedstawiono wykorzystanie trzech podstawowych metod modelowania obiektów inżynierskich, stosowanych do oceny oddziaływań dynamicznych.

Metoda 1 oparta jest na określeniu przybliżonych wartości charakterystyk dynamicznych obiektów służących do wyznaczenia sił bezwładności i przemieszczeń w

obiektach [5]. W tym celu stosowany jest dyskretny model obliczeniowy z masami skupionymi obejmującymi część budynku pomiędzy płaszczyznami poziomymi przechodzącymi w połowie kondygnacji poniżej i powyżej stropu (rys. 1).



Przybliżony okres drgań własnych:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n Q_k y_k^2}{g y_n}} \quad (1)$$

gdzie:

y_k, y_n - przemieszczenia kondygnacji
 Q_k - ciężar skupiony k -tej kondygnacji

Rys. 1. Schemat ideowy metody

Składowe siły bezwładności na poszczególnych kondygnacjach odpowiadające drganiom z i -tą częstotliwością drgań własnych wyznaczone są z poniższej zależności

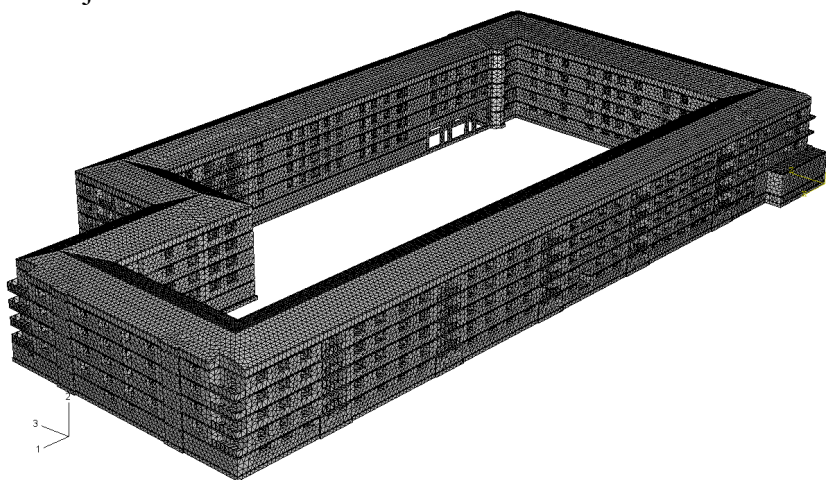
$$P_{ik} = \frac{a_p}{g} \cdot (Q_k' + \lambda Q_k'') \cdot c_{ik} \frac{\sum_{j=1}^n Q_j \cdot c_{ij}}{\sum_{j=1}^n Q_j (c_{ij})^2} \cdot \beta_i \quad (2)$$

gdzie:

- P_{ik} - składowa siły bezwładności, w punkcie k odpowiadająca i -tej częstotliwości drgań własnych,
- a_p - amplituda przyspieszeń drgań podłoża,
- Q_k', Q_k'' - obciążenia stałe i zmienne skupione w punkcie k ,
- λ - współczynnik redukujący długotrwałą część obciążenia zmiennego,
- β_i - współczynnik zależny od częstotliwości wymuszenia kinematycznego,
- c_{ij}, c_{ik} - rzędna i -tej postaci drgań w punktach j i k budynku,
- Q_j - ciężar masy skupionej w punkcie j .

Metoda ta jest metodą przybliżoną, łatwą do wykonywania przy obiektach o prostej konstrukcji i jednolitym stanie technicznym. Wadą tej metody jest duża niedokładność powstająca m.in. w wyniku szacowania mas skupionych w poziomach kondygnacji.

Metoda 2 wykorzystuje Metodę Elementów Skończonych do modelowania bryły budynku [2]. Otrzymany model jest modelem przestrzennym. Model pozwala na wyznaczenie odpowiedzi na oddziaływanie środków transportu w postaci przebiegów czasowych oraz składowych w dziedzinie częstotliwości, w dowolnie wybranych punktach obiektu. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy model budynku wielokondygnacyjnego o konstrukcji murewej.



Rys. 2. Model budynku przeanalizowanego w środowisku MES

Metoda ta charakteryzuje się bardzo dużą dokładnością oraz możliwością oceny poziomu drgań w dowolnie wybranym punkcie budowli. Model zbudowany jest w ten sposób, że obciążenia przykładane są w węzłach zlokalizowanych na poziomie styku gruntu z elementami posadowienia. Wymienione wyżej przebiegi czasowe przemieszczeń uzyskuje się z rozwiązania następującego układu równań różniczkowych.

$$[A] \cdot [\ddot{\bar{q}}] + [B] \cdot [\dot{\bar{q}}] + [C] \cdot [\bar{q}] = [\bar{F}] \quad (3)$$

gdzie:

A-macierz bezwładności układu elementów skończonych równa sumie macierzy bezwładności poszczególnych elementów, $\dim A = n \times n$;

B-macierz tłumienia układu elementów skończonych równa sumie macierzy tłumienia poszczególnych elementów, $\dim B = n \times n$;

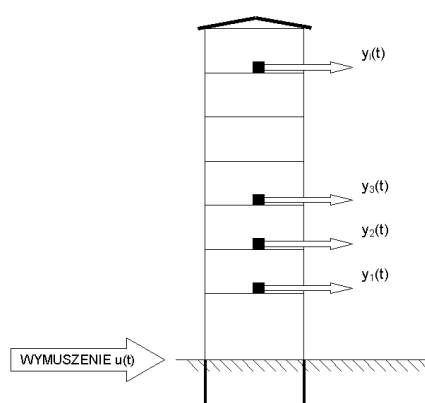
C-macierz sztywności układu elementów skończonych równa sumie macierzy sztywności poszczególnych elementów, $\dim C = n \times n$;

\bar{F} -wektor wymuszeń przyłożonych do obiektu w węzłach układu znajdujących się w poziomie gruntu, $\dim \bar{F} = n \times 1$;

$\bar{q} = \bar{q}(t)$, \bar{q} -wektor współrzędnych uogólnionych, $\dim \bar{q} = n \times 1$;

Metoda ta sprawdza się szczególnie przy obiektach nowo-projektowanych natomiast trudnością w jej zastosowaniu do obiektów istniejących jest konieczność pracochłonnego modelowania uszkodzeń powstałych w trakcie eksploatacji. Miejszem powstawania częstych błędów jest konieczność arbitralnego przyjmowania wartości niektórych parametrów.

Metoda 3 polega na wykorzystaniu teorii identyfikacji systemów z wykorzystaniem metody autoregresji [4]. W zależności od wielkości i stopnia skomplikowania budynku można stosować modele z jednym wejściem i jednym wyjściem (SISO) oraz modele z jednym wejściem i wieloma wyjściami (SIMO), przy założeniach że modele są parametryczne, stacjonarne i opisywane równaniami różnicowymi. Na rysunku 3 przedstawiono schemat budowy modelu w układzie SIMO.



Rys. 3. Schemat ideowy modelu SIMO

Model matematyczny opisywany jest wielomianami zgodnie z podaną zależnością.

$$WA(q) \cdot y(t) = WB(q) \cdot u(t) + WC(q) \cdot e(t) \quad (4)$$

gdzie:

WA , WB , WC - macierze współczynników wielomianów o zmiennej q , $\dim W = n \times n$;

$u(t)$ – sygnał wejściowy,

$y(t)$ – sygnał wyjściowy,

$e(t)$ – sygnał zakłóceń.

Wiersze wielomianów przedstawiane są jako:

$$\begin{cases} A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na} \\ B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + b_3 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1} \\ C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \end{cases} \quad (5)$$

W praktycznym zastosowaniu dla modelu propagacji drgań na ścieżce transportowe źródło drgań – grunt – obiekt (rys.3) otrzymujemy :

$$\begin{cases} W_r(t) + W_p(t) = \frac{A_{bud}(q)}{B_{bud}(q)} \cdot y_{bud}(t) - \frac{C_{bud}(q)}{B_{bud}(q)} \cdot e(t) \\ W_p(t) = \frac{A_{gr}(q)}{B_{gr}(q)} \cdot y_{gr}(t) - \frac{C_{gr}(q)}{B_{gr}(q)} \cdot e(t) \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

$W_r(t)$ – wymuszenia rzeczywiste istniejące przed i po uruchomieniu docelowej organizacji ruchu,

$W_p(t)$ – projektowane wymuszenia,

$y_{bud}(t)$ – sygnał wyjściowy z obiektu,

$y_{gr}(t)$ – sygnał wejściowy do obiektu,

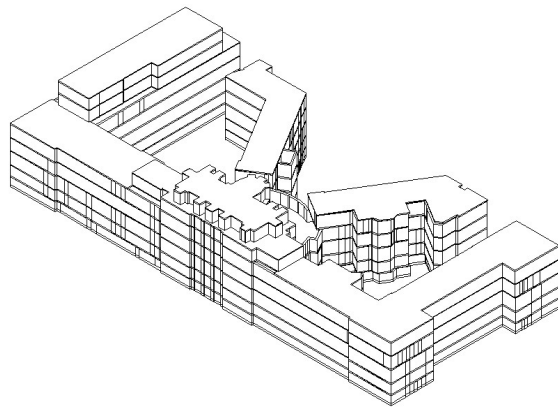
$A_{bud}, B_{bud}, C_{bud}$ – macierze współczynników wielomianów w modelu obiektu,

A_{gr}, B_{gr}, C_{gr} - macierze współczynników wielomianów w modelu propagacji drgań przez grunt,

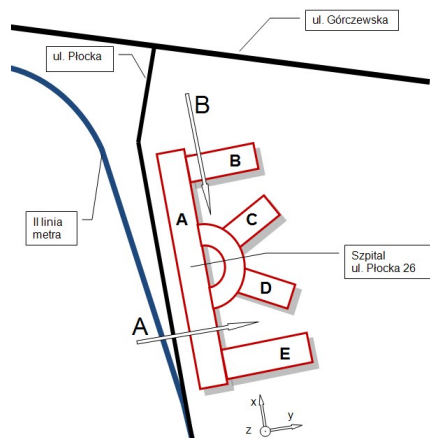
Metoda ta może być stosowana do istniejących obiektów o dowolnym stopniu zużycia, jednakże należy pamiętać o konieczności wykonywania szczegółowych pomiarów drgań w ramach niezbędnych wstępnych badań eksperymentalnych.

3. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Poniżej przedstawiono wyniki badań oddziaływań dynamicznych środków transportu na zabytkowy budynek znajdujący się w bezpośrednim sąsiedztwie projektowanej II linii metra w Warszawie[1]. Na rysunku 4 przedstawiono analizowany budynek. Do analizy zachowania obiektu wykorzystano metodę identyfikacji systemów wyznaczając 2 przekroje pomiarowe charakterystyczne dla jego konstrukcji. Pomiarów wykonywano przy maksymalnym natężeniu istniejącego ruchu transportu naziemnego w osiach ulic Płockiej i Górczewskiej.

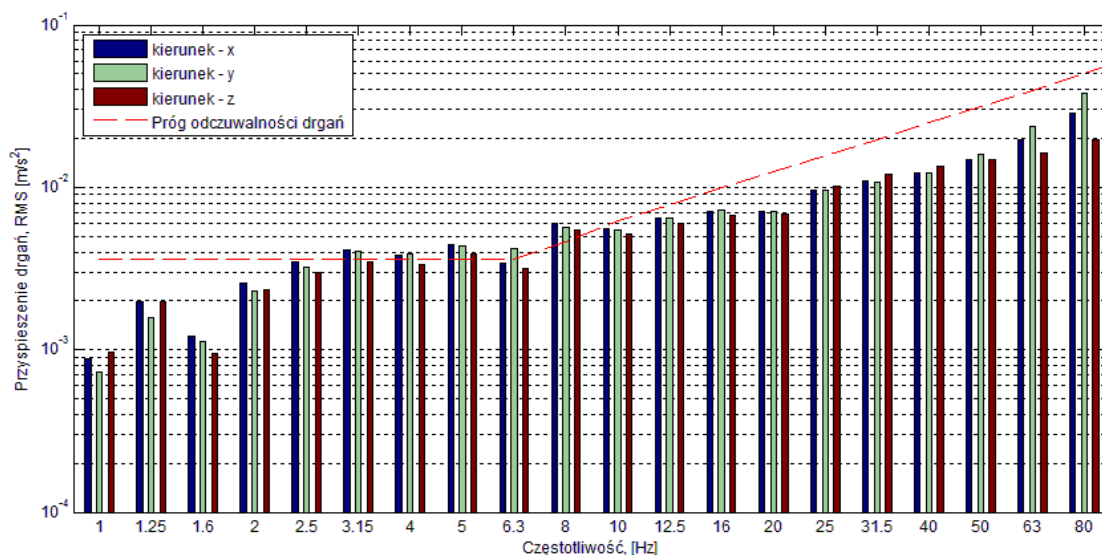


Rys. 4. Widok części frontowej budynku oraz jego bryły [1]



Rys. 5. Lokalizacja przekrojów pomiarowych i źródeł drgań [1]

Następnie wykorzystując wyniki pomiarów dokonano badań symulacyjnych z uwzględnieniem przyszłych przejazdów pociągów metra w projektowanym tunelu. Dobór przekrojów pomiarowych oraz punktów pomiarowych podyktowany był złożonością kształtów bryły szpitala oraz jego skomplikowanymi funkcjami użytkowymi. Szpital posiada wiele laboratoriów oraz sal operacyjnych wyposażonych w aparaturę wrażliwą na drgania, co zostało uwzględnione w modelu matematycznym obiektu. Na rys. 6 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych w postaci widma przyspieszeń drgań w przekroju pomiarowym A, na parterze obiektu z uwzględnieniem wpływu przejazdów pociągów metra.



Rys. 6. Wyniki symulacji z uwzględnieniem przejazdu pociągu metra

Wyniki porównano z wartościami dopuszczalnymi dla pomieszczeń szpitalnych, w poszczególnych pasmach tercjowych, zarówno w porze dziennej jak i nocnej. Ponadto obliczono współczynniki obciążenia dynamicznego wywołanego wpływem nowej linii metra. Współczynniki te określają relację wartości przyspieszeń w poszczególnych pasmach tercjowych do wartości dopuszczalnych.

$$W_{OD} = \frac{a_{sym}(f), [m/s^2]}{a_{dop}(f), [m/s^2]} \quad (5)$$

W analizie przyjęto:

$a_{sym}(f)$ – wartości przyspieszeń drgań (w poszczególnych pasmach częstotliwości tercjowych) uzyskane w wyniku badań symulacyjnych,

$a_{dop}(f)$ – wartości przyspieszenia drgań (dla poszczególnych pasm częstotliwości tercjowych) określające próg odczuwalności drgań przez człowieka (ocena w kierunkach x, y, z) zgodnie z wartościami normatywnymi wg PN-88/B-02171[6].

Tablica 1.

Wartości współczynników W_{OD} zestawione w pasmach tercjowych

Częstotliwość, f [Hz]	Współczynnik, $a/a_{dop}[m/s^2 / m/s^2]$		
	X	Y	Z
1,00	0,242960	0,201853	0,266575
1,60	0,335416	0,312017	0,264247
2,00	0,711896	0,635864	0,654714
2,50	0,967397	0,891880	0,828167
3,15	1,133906	1,123016	0,973821
4,00	1,058882	1,085992	0,937191
5,00	1,227548	1,202165	1,090294
6,30	0,952498	1,168670	0,876182
8,00	1,305016	1,230442	1,188917
10,00	0,900871	0,888529	0,827639
12,50	0,835066	0,822856	0,773974
16,00	0,007039	0,007178	0,006728
20,00	0,007063	0,007128	0,006866
25,00	0,009601	0,009541	0,010081
31,50	0,011043	0,010775	0,011928
40,00	0,012311	0,012158	0,539668
50,00	0,475061	0,505433	0,475594
63,00	0,495544	0,597384	0,408027
80,00	0,569451	0,764376	0,389482

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule trzy typy stosowanych do symulacji metod można scharakteryzować w przedstawiony poniżej sposób. Metoda 1 wykorzystuje model bardzo uproszczony, płaski i niedokładny - służący do ogólnego inżynierskiego oszacowania wpływu drgań na budynek. Wadą tej metody jest brak odpowiedzi struktury na wymuszenie w dowolnie wybranych punktach budynku, zaletą natomiast jest prostota i łatwość użycia.

Metoda 2 posługuje się modelem przestrzennym pozwalającym na precyzyjne zamodelowanie struktury oraz użytych materiałów do budowy obiektu. Zaletą tego modelu jest możliwość otrzymania odpowiedzi na wymuszenia w dowolnym punkcie budynku, co ułatwia nie tylko prognozowanie oddziaływań na budynek, ale także na ludzi w nim przebywających. Model nadaje się bardzo dobrze do obliczeń stosowanych dla budynków projektowanych lub istniejących o niskim stopniu zużycia. Wadą modelu jest pracochłonne przygotowanie oraz zamodelowanie elementów o dużym stopniu zużycia.

Metoda 3 wydaje się być metodą najlepszą do wykonywania prognoz ze względu na jej dokładność oraz łatwość przygotowania danych i jasną strukturę otrzymywanych wyników. Obliczenia charakteryzują się dużą dokładnością, a ponadto model uwzględnia elementy zużycia konstrukcji. Metodą tą można modelować dowolnie skomplikowane budowle, jednakże należy pamiętać, że metoda wymaga dołożenia starań przy projektowaniu i wykonywaniu pomiarów drgań w budynku.

Atutem zarówno 2 i 3 metody jest możliwość wprowadzenia współczynników wskazujących na rzeczywisty poziom wzrostu obciążenia dynamicznego w stosunku do wartości dopuszczalnych.

Szczegółowa analiza przykładowych wyników wykazała kilkuprocentowy wzrost obciążeń dynamicznych, który spowoduje uruchomienie II linii metra.

Bibliografia

1. Praca zbiorowa pod kier. M. Nadera: „*Prognoza oddziaływań dynamicznych na budynki i ludzi w nich przebywających w rejonie planowanej II – linii metra (odcinek zachodni) dla 2 reprezentatywnych budynków zlokalizowanych w strefie wpływu stacji Wolska*”. Umowa z Metro Warszawskie Sp.z o.o. nr 233/IP/09, Warszawa 2009, stron 136.
2. Rakowski G., Kacprzyk Z.: *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. WPW, 2005.
3. Różowicz J.: „*Investigation of Projected Underground Railway Influence on Architectural Objects and People*”, Proceedings of 37th INTER-NOISE 2008, s.6, Shanghai, Chiny, 2008.
4. Söderström T., Stoica P.: *Identyfikacja systemów*. Wydawnictwo naukowe PWN. Warszawa 1997.
5. PN-85/B-02170 1985. *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
6. PN-88/B-02171, 1988. *Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*.

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

ANALYSIS OF THE DYNAMIC INFLUENCES ON BUILDINGS AND PEOPLE IN THEM STAYING IN THE TRANSPORT IMPACT ZONE

Abstract: The paper presents the essential issues in the implementation of the exercise of forecasting dynamic impact on the environment. Particular attention was paid to transport the dynamic impacts on people and buildings. Performed detailed analysis of the tasks required in the performance of the full forecast. Discusses the three basic methods used in simulation studies of dynamic effects. Characterized models used in these methods and discusses their advantages and disadvantages. Presents the detailed results of the forecasts made for a building located in the area of the proposed II-nd subway line and the people in it.

Keywords: transport, modeling, dynamic interaction, buildings and people