



Jarosław BEDNARZ

METODY PROGNOSTYCZNYCH W OCENIE ZAGROŻEŃ KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH DRGANIAMI GRUNTU WYMUSZONYMI PRZEZ RUCH TRAMWAJÓW

Streszczenie

W dzisiejszych czasach wiele z nowoprojektowanych konstrukcji inżynierskich (budynków, wiaduktów, tuneli itp.) lub już istniejących wymaga prognostycznej oceny stanu zagrożenia drganiami. W pracy zastosowano ocenę stanu zagrożenia nowoprojektowanego budynku od fali drganiowej wzbudzonej przez przejazd pojazdu tramwajowego w oparciu o istniejące uproszczone metody oceny oraz w oparciu o symulację propagacji fali drganiowej metodą elementów skończonych. Prace były prowadzone w ramach projektu badawczego 4875/B/TO2/2010/38 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

WSTĘP

W artykule przedstawiono analizę i zastosowanie metod prognostycznych w ocenie zagrożeń konstrukcji budowlanych. Tematyka ta jest w obecnym czasie niezwykle istotna ze względu na szybki rozwój infrastruktury w kraju i dotyczy ona zarówno budynków i konstrukcji inżynierskich już istniejących jak również nowoprojektowanych np. konstrukcja II linii metra warszawskiego czy tunelu łączącego stacje Łódź Fabryczna z Łódź Kaliska. Metody oceny związane są głównie z propagacją fali drganiowej wzbudzonej przez ruch pojazdów szynowych (kolej, metro, tramwaj) lub pojazdów samochodowych. W pracy omówiono uproszczone metody tej oceny oraz przedstawiono ocenę w oparciu o analizę MES, będącą na etapie rozwoju w tego rodzaju zagadnieniach. Do analizy wykorzystano wyniki pomiarów amplitud przyspieszeń drgań gruntu wykonanych w ramach projektu badawczego MNiSW 4875/B/TO2/2010/38 oraz badania geologiczne gruntu udostępnione przez firmy prowadzące różnego typu inwestycje budowlane.

1. METODY OCEN PROGNOSTYCZNYCH ZAGROŻEŃ KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH

Teoretycznie problem rozprzestrzeniania się fali drganiowej gruntu, który jest bezpośrednio związany z oceną zagrożeń konstrukcji budowlanych, został rozwiązany przez Naviera, który przez podanie równań różniczkowych dynamicznej równowagi podał zależności opisujące drgania gruntu. Jednakże równanie to można rozwiązać tylko przy uwzględnieniu szeregu dość złożonych warunków. W izotropowym ośrodku występują dwa rodzaje fal – podłużne i poprzeczne. W przypadku jednak gdy ośrodek jest z jednej strony

ograniczony, stanowi wówczas nie przestrzeń, lecz półprzestrzeń sprężystą. W takim przypadku oprócz wymienionych dwu typów fal możliwe jest powstanie fali powierzchniowej Rayleigh'a rozchodzącej się w dwu kierunkach i szybko zanikającej wraz z głębokością. Zagadnieniami rozchodzenia się fali drganiowej w gruncie w latach 40, 50 i 60 XX wieku zajmowali się między innymi Barkan D.D. [1], Sawinow O.A. [12], Kisiel I. [10], Lipiński J. [11], Ciesielski R. [7] W roku 1946 Szermana D.I. [13] opublikował zależność na rozchodzenie się drgań w gruncie w której to publikacji podał rozwiązanie wymagające jednak olbrzymiego aparatu matematycznego, a otrzymane wyniki nie nadają się bezpośrednio do praktycznych zastosowań. Na przestrzeni lat 1960 – 2012 zajmowano się drganiami gruntu głównie pod kątem oceny zagrożenia konstrukcji budowlanych spowodowanych propagacją fali drganiowej. W tym okresie powstało wiele prac związanych z tym zagadnieniem a zaliczyć można do nich np. Ciesielski R. Maciąg E. [6], Gardien W., Stuit H.G. [9], Fialaa, P, Degrandeb G. Augusztinovicza F. [8], Bednarz J. [5], Bednarz J, Brożek G, Jan Targosz [3], Bednarz J, Targosz.J [2].

Zaniechanie tymi badaniami w Polsce spowodowane było głównie ukazaniem się normy PN-85/B-02170 pt. „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki” pod redakcją Ciesielskiego, która spowodowała, że próbowano oceniać zagrożenia konstrukcji budowlanych na podstawie opracowanych przez niego skal SWD I i SWD II. Norma ta dotyczy jednak tylko i wyłącznie budynków mieszkalnych i przemysłowych, nie zostały w niej opracowane metody badania innych konstrukcji budowlanych (wiaduktów, mostów, tuneli itp.). W przypadku, gdy rodzaj konstrukcji budynku oraz jego typ nie mieścił w zakresie zastosowania tych skal, należało przeprowadzić symulację modelu cyfrowego budynku i na tej podstawie ocenić wpływ propagacji fali drganiowej.

W niniejszej pracy przedstawiono prognozę rozprzestrzeniania się drgań od drogi tramwajowo-samochodowej na budynek mieszkalny będący na etapie projektu. W celu określenia wpływu propagacji fali drganiowej na projektowany budynek wykorzystano trzy metody:

1. analizę w oparciu o normę PN-80/B-0304,
2. analizę w oparciu o metodę Golicyna,
3. symulację cyfrową rozprzestrzeniania się drgań z wykorzystaniem MES.

2. OCENA PROGNOSTYCZNA ZAGROŻENIA KONSTRUKCJI BUDYNKU MIESZKALNEGO W OPARCIU O METODY ANALITYCZNE

1.1. Ocena rozprzestrzeniania się drgań wg polskiej normy PN-80/B-03040

Według modelu przyjętego w normie amplituda drgań pionowych (poziomych) podłoża gruntowego A_r w odległości r od środka ciężkości fundamentu (w naszym przypadku podtorza tramwajowego rys. 1), wywołanych przez pionowe (poziome) drgania wymuszone fundamentu może być orientacyjnie, niezależnie od rodzaju gruntu podłoża, wyznaczona według zależności:

$$A_r = A_0 \rho \quad (1)$$

gdzie:

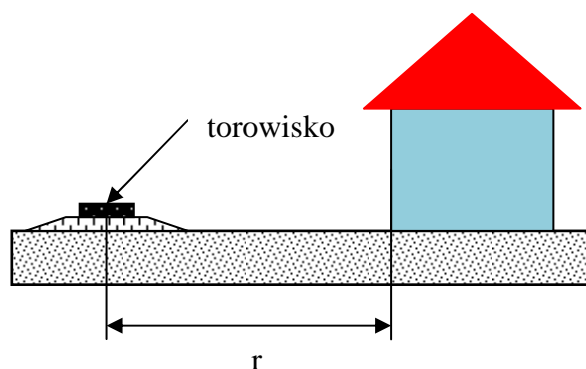
A_0 – amplituda drgań wymuszonych przejazdami tramwajów

A_r - amplituda drgań gruntu w odległości r od osi torowiska,

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{\beta} - 0,4 \left[\frac{1}{\beta} - \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 \right]}$$

$$\beta = \frac{r}{r_0},$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$$



Rys. 1. Schemat modelu obliczeniowego

Przyjmując, że odległość fundamentu nowoprojektowanego budynku mieszkalnego od osi pojedynczego torowiska r jest równa 20 m, powierzchnia pojedynczego podkładu F wynosi $0,51 \text{ m}^2$, obliczamy r_0 , które w naszym przypadku jest równe 0,4 m, oraz β , które jest równe 50. Podstawiając te wartości do wzorów wyznaczamy współczynnik ρ , który wynosi 0,133. Zakładając ponadto, że amplituda przyspieszenia drgań podłoża spowodowana przejazdem pojedynczego tramwaju, mierzona na podkładzie wynosi około 1 m/s^2 (dane te winny być zweryfikowane pomiarowo - badania wykazały $0,77 \text{ m/s}^2$ dla tramwaju NGT6 – przyspieszenia drgań mogą być wyższe w zależności od stanu torowiska, typu tramwaju, zabezpieczeń wibroizolacyjnych itp.) wówczas wartość amplitudy drgań pionowych i poziomych wyznaczony teoretycznie (w budownictwie one odgrywają główną rolę chociaż drgania pionowe mogą wywołać niekorzystny moment wywrotowy) przekazywanych na projektowany budynek mieszkalny wynoszą $A_r = 0,133 \text{ m/s}^2$.

Zgodnie z polską normą PN-85/B-02170 wpływ drgań przekazywanych przez podłoże na budynek można pominąć w tych przypadkach, gdy udział tego obciążenia konstrukcji jest znikomy i orientacyjnie można przyjąć, że amplituda przyspieszeń ruchu poziomego podłoża (a_p) w miejscu posadowienia budynku spełnia warunek $a_p < 0,005 \text{ g}$ ($0,05 \text{ m/s}^2$). W rozważanym przypadku prognozowane drgania na budynek przekraczają wartości dopuszczalne normą i należy uwzględnić potrzebę zastosowania zabezpieczeń ograniczających rozchodzenie się drgań wymuszonych przejazdami tramwajów na nowoprojektowany budynek.

2.2. Ocena rozprzestrzenienia się drgań wg metody Golicyna

Kolejną ocenę prognostyczną zagrożeń związanych z propagacją fali drganiowej na nowoprojektowany przeprowadzono w oparciu o zależność podawaną przez Golicyna [7]. Metoda proponowana przez Golicyna jest obarczona błędami, ale dla tego typu prognozy drganiowej jest to metoda wystarczająco dokładna i dodatku wygodna i prosta w użyciu. Do określenia prognozowanej wartości maksymalnej amplitudy przyspieszenia drgań wykorzystywana jest następująca zależność:

$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (2)$$

gdzie:

A_r, A_0 - amplitudy drgań gruntu w odległościach r i r_0 (rys.1),

α - współczynnik absorpcji (pochłaniania) energii drganiowej fal.

Dopuszczalną amplitudę przyspieszeń, która pozwala na pominięcie sił bezwładności w budynku, określono na podstawie normy PN-85/B-02170 pt. „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”. Jej wartość w celu określenia strefy drganiowej przyjęto zarówno dla kierunków poziomych (x,y) jak i dla kierunku pionowego (z) równą $A_r = 0,005g$. Przyjmując następnie wartość współczynnika absorpcji α można wyznaczyć odległość r stanowiącą granicę strefy o dopuszczalnych wartościach amplitud drgań.

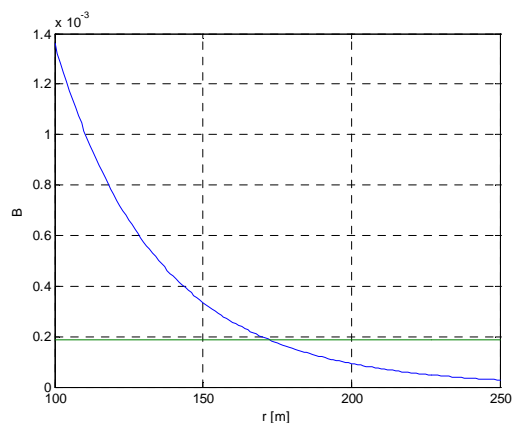
Dla przykładu wykonano prognozę rozprzestrzeniania się drgań w gruncie spowodowanych przejazdami tramwajów. Dokonuje się tego przekształcając równanie (2) do następującej postaci:

$$B = \frac{1}{r} e^{-2\alpha r} = \frac{1}{r_0 e^{2\alpha r_0}} \cdot \left(\frac{A_r}{A_0} \right)^2 \quad (3)$$

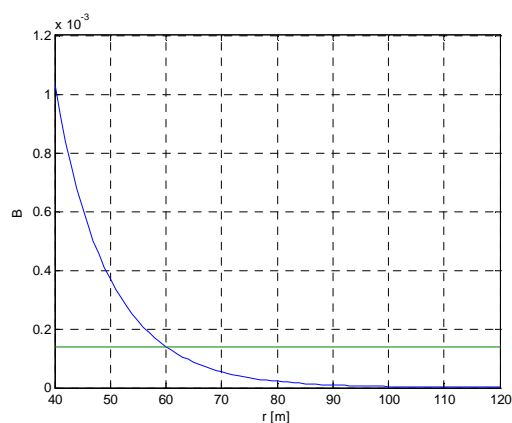
Rozwiązanie równania (3) można wyznaczyć metodą graficzną. Dla przykładu wyznaczono strefę o dopuszczalnych wartościach amplitudy drgań przyjmując następujące wartości $r_0 = 5$ m, $A_r = 0,04$ m/s² (wartość przyjęta na podstawie warunku, że wpływ drgań przekazywanych przez podłoże na budynek można pominąć w tych przypadkach, gdy udział tego obciążenia konstrukcji jest znikomy i orientacyjnie można przyjąć że amplituda przyspieszeń ruchu poziomego podłoża (a_p) w miejscu posadowienia budynku spełnia warunek $a_p < 0,005$ g (0,05 m/s²) wg normy PN-85/B-02170), $A_0 = 1,25$ m/s² (wartość zmierzonej amplitudy przyspieszenia drgań w odległości 1 m od torowiska) i rozwiązując równanie (3) w funkcji współczynnika absorpcji α , dla którego przyjęto następujące wartości:

1. $\alpha=0,01$ - drobne i średnie oraz pylaste piaski, gliny piaszczyste i gliny,
2. $\alpha=0,05$ - piaski średnie i grube oraz wilgotne iły i gliny,
3. $\alpha=0,10$ - gliny piaszczyste, gliny i iły mało wilgotne i suche.

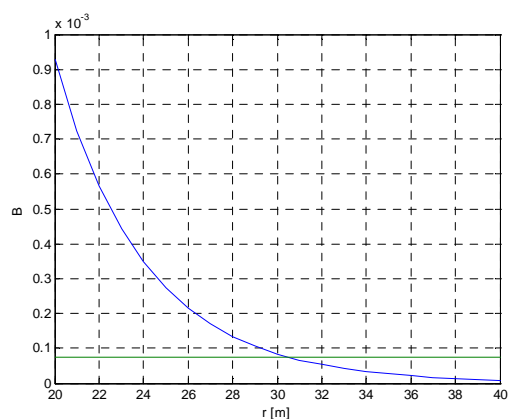
Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono jak wpływa na granicę strefy drgań współczynnik absorpcji energii fali drganiowej α . Pierwiastkami równania 3 są $r(\alpha) = \{172$ m, 61 m, 30 m}, co oznacza że w tej odległości winna przebiegać granica strefy drganiowej. Na podstawie tej analizy widać wyraźnie, że wpływ współczynnika absorpcji na szerokość strefy jest bardzo duży.



Rys. 2. Promień strefy drganiowej dla $\alpha=0,01$



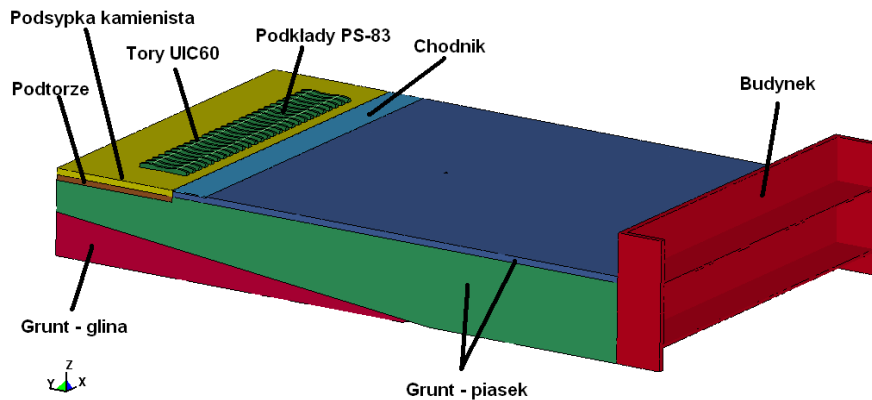
Rys. 3. Promień strefy drganiowej dla $\alpha=0,05$



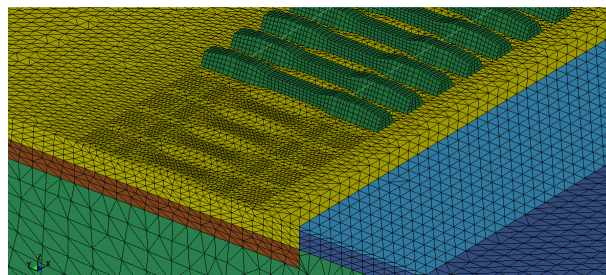
Rys. 4. Promień strefy drganiowej dla $\alpha=0,1$

3. OCENA ROZPRZESTRZENIA SIĘ DRGAŃ Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

W celu przeprowadzenia symulacji rozchodzenia się drgań w gruncie przyjęto jego model obliczeniowy, którego schemat przedstawiono na rysunku 5 [4]. Na jego podstawie zbudowano model elementów skończonych gruntu przedstawiony na rysunku 6, dla którego wykonano analizę rozchodzenia się w nim fali drganiowej

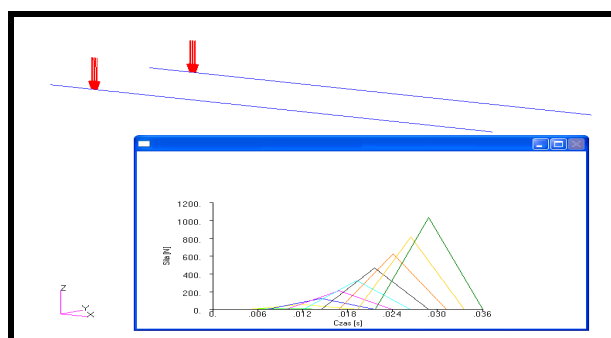


Rys. 5. Przyjęty model obliczeniowy



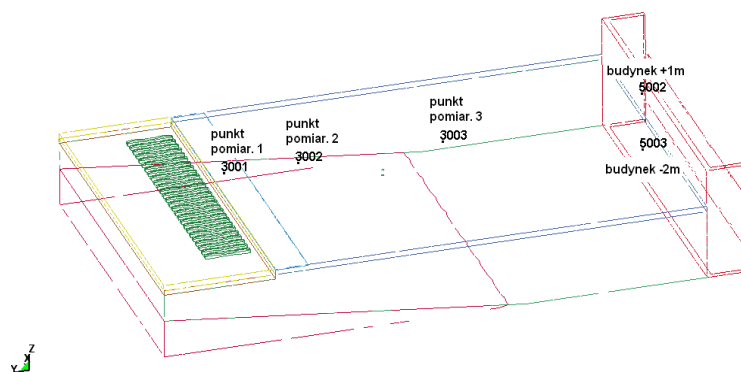
Rys. 6. Model elementów skończonych zbudowany dla potrzeb badań symulacyjnych

Dla zbudowanego modelu elementów skończonych przyjęto obciążenie związane z przejazdem tramwaju z maksymalną ‘zmierzoną w trakcie prowadzonych badań, prędkością tj. 45 km/h (12.5 m/s). Analizę przeprowadzono dla tramwaju Bombardier NGT-6 jako najbardziej krytycznego przypadku ze względu na największy dopuszczalny nacisk na oś 10 Mg. Dla tego tramwaju rozstaw osi wózka wynosi 1800 mm. W związku z tym przygotowano model obciążenia, który odpowiada przejazdowi jednego wózka przez zamodelowany odcinek torów. Amplituda obciążenia zmieniała się od wartości zerowej do wartości maksymalnej a następnie ponownie do wartości zerowej w celu odwzorowania przejazdu pociągu oraz ze względu na stabilność analizy numerycznej (rys. 7).



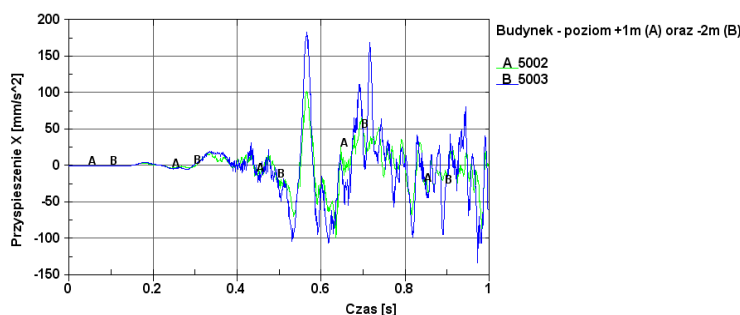
Rys. 7. Przykład rozkładu amplitudy siły dla kilku węzłów szyny

Wyniki zostały przedstawione w postaci wykresów przyspieszenia w dwóch kierunkach pomiarowych (X, Y). Punkty pomiarowe 1, 2, 3 odpowiadały punktom pomiarowym 1, 2, 3 w jednym z przekrojów pomiarowych (rys.8).

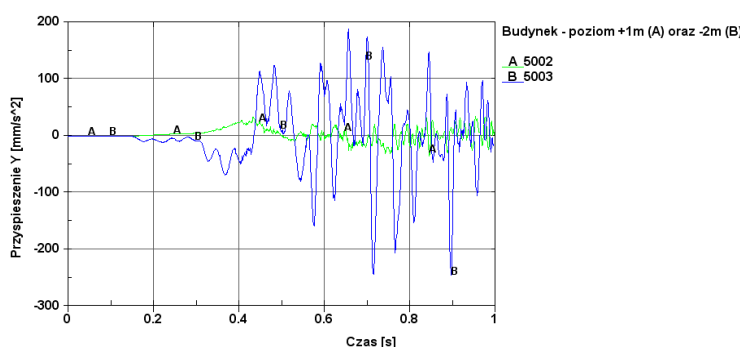


Rys. 8. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na modelu.

Dla tak przygotowanego modelu przeprowadzono symulację drgań fundamentu nowoprojektowanego budynku, a uzyskane wyniki dla punktów pomiarowych znajdujących się na wysokości fundamentu 1 m nad powierzchnią gruntu oraz 2 m pod powierzchnią gruntu w kierunku osi X i Y przedstawiono na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Przebieg przyspieszenia drgań fundamentu budynku w kierunku X



Rys. 10. Przebieg przyspieszenia drgań fundamentu budynku w kierunku Y

Na podstawie uzyskanych wyników (Rys. 10 i 11) można wnioskować, że amplituda przyspieszeń drgań w kierunkach X i Y przekracza wartości dopuszczalne. Wyniki symulacji wykazały przekroczenie amplitud dopuszczalnych dla nowoprojektowanego budynku, który nie powinien przekraczać wartości 0,005g.

PODSUMOWANIE

Wyniki analiz prowadzonych z wykorzystaniem wszystkich trzech metod prognostycznych wykazały, że amplitudy przyspieszenia drgań gruntu wywołane oddziaływaniem przejazdów tramwajów w miejscu planowanej inwestycji budowlanej przekraczają wielokrotnie wartości dopuszczalne przez normę PN-85/B-02170 pt. „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”. W związku z tym

lokalizacja na tym terenie budynków mieszkalnych stanowi przedsięwzięcie ryzykowne i wymaga uwzględnienia w projektowaniu konstrukcji budynku obliczeń sił jego bezwładności. Należy dodatkowo na etapie projektowania uwzględnić możliwość zastosowania aktywnych i biernych układów wibroizolacji [3] pozwalających na ograniczenie oddziaływań dynamicznych od transportu szynowego.

FORECASTING METHODS IN ASSESSMENT OF VIBRATIONS RISK OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES CAUSED BY THE TRAMWAY RIDES

Summary

Nowadays, many of the newly designed civil engineering structures (buildings, bridges, tunnels, etc.) require prognostic evaluation of vibration risk caused by tramway rides. In the paper the risk evaluation caused by vibration wave induced by passing tramway for the newly designed building is presented. The prognostic assessment of risk based on the existing simplified methods and on the simulation of vibration wave propagation using FEM. The work was carried out in a research project 4875/B/TO2/2010/38 financed by Ministry of Science and Higher Education.

BIBLIOGRAFIA

1. Barkan D.D.: *Dynamika osnowanij i fundamentow*. Wydawnictwo Strojwojenmorizdat, Moskwa 1948.
2. Bednarz J., Targosz J.: Finite elements method in analysis of propagation of vibrations wave in the soil. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 18 no. 3 str. 19–25, 2011.
3. Bednarz J., Brożek G., Targosz J.: *Application of finite elements method in the design of road located in the densely built-up residential area*. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 19, no. 4, str., 2012.
4. Bednarz J., Brożek G., Targosz J.: *Metoda elementów skończonych w analizie drgań gruntu*. *Logistyka* nr 6, str. 195-203, 2010.
5. Bednarz J.: *Experimental verification of the developed soil model describing the propagation of vibration wave in the ground*. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 19, no. 3, pp. 31-40, 2012.
6. Ciesielski R., Maciąg E.: *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*. Wydawnictwo WKiŁ, Warszawa 1990.
7. Ciesielski R.: *Ocena szkodliwości wpływów dynamicznych w budownictwie*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1973.
8. Fialaa P., Degrandeb G. Augusztinovicza F.: *Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic*. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 301, 2007.
9. Gardien W., Stuit H.G.: *Modelling of soil vibrations from railway tunnels*. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 267, str. 605–619, 2003.
10. Kisiel I.: *Drgania bryły na sprężystym podłożu*. *Archiwum Mechaniki Stosowanej*, Gdańsk 1950.
11. Lipiński J.: *Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1985.

12. Sawinow O.A.: *Fundamenty pod maszyny*. Wydawnictwo GILSiA, Leningrad-Moskwa 1955.
13. Szermana D.I.: *Drgania sprężystej półprzestrzeni przy zadanych warunkach przemieszczeń lub zewnętrznych obciążeń.*, Moskwa 1946.

Autor:

dr inż Jarosław BEDNARZ - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: bednarz@agh.edu.pl