



TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO

Jarosław BEDNARZ, Jan TARGOSZ

METODY ANALITYCZNE MODELOWANIA WIBROIZOLOWANYCH TOROWISK POJAZDÓW SZYNOWYCH

Streszczenie

Zagadnienie wibroizolacji jest znane od wielu dziesięcioleci lecz dotyczyły one głównie maszyn i urządzeń przemysłowych takich jak sprężarki, kruszarki, przenośniki wibracyjne, walcarki itp. Dopiero w latach 70 i później dwudziestego wieku problem wibroizolacji, która w tej pracy rozumiana jest jako ograniczenie wpływu oddziaływań dynamicznych do środowiska, dotknął większą część populacji ludzkiej w związku z ogromnym rozwojem komunikacji, zarówno szynowej (kolej, tramwaje) jak i samochodowej. Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że dotyczą one około 30 - 40 % populacji naszego społeczeństwa. Szczególnie narażeni na drgania są mieszkańcy dużych aglomeracji miejskich oraz miast o charakterze przemysłowym, w których występuje duże natężenie ruchu środków transportu realizujących dowóz surowców i wywóz wytworzonych produktów. Te same miasta są dodatkowo obciążone drganiami pochodzącymi od środków transportu publicznego i pojazdów indywidualnych. Niniejsza praca dotyczy przedstawienia oraz porównania podstawowych metod analitycznych modelowania wibroizolowanych torowisk pojazdów szynowych. Praca wykonana została w ramach projektu badawczego 4875/B/TO2/2010/38 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

WSTĘP

Współczesna komunikacja XXI wieku wykorzystująca transport szynowy, a zwłaszcza linie kolejowe przebiegająca przez duże aglomeracje miejskie stwarza ogromne wyzwania oraz wymagania związane z szeregiem czynników o charakterze technicznym, ergonomicznym czy ekologicznym, wśród których najistotniejszymi są:

1. Planowanie przebiegów tras komunikacji po terenach których słabo poznana jest struktura geologiczna i geofizyczna (brak badań).
2. Drgania podłoża i propagacji fali drganiowej do otoczenia.
3. Drgania konstrukcji inżynierskich (wiadukty, tunele, mosty itp.).
4. Trwałość i niezawodność układu nawierzchnia podtorza – konstrukcja nośna.
5. Możliwa do zastosowania z punktu widzenia technicznego, ekonomicznego i skuteczności ochrona przed drganiami i emitowanym hałasem obiektów i środowiska.

Do źródeł drgań i emitowanego hałasu przez ruch transportu szynowego zaliczyć należy:

1. Charakter styku koła z szyną.
2. Pracę silnika trakcyjnego.
3. Konstrukcję pudła wagonu.
4. Zawieszenie zestawu kołowego.

5. Konstrukcję nośną, tzn. typ podtorza oraz rodzaj konstrukcji inżynierskiej po której przebiega podtorze (tunele, mosty, wiadukty itp.).

Podstawowym źródłem drgań i emisji hałasu są nierówności koła pojazdu oraz szyny [6]. Nierówności koła generują drgania o częstotliwościach od 30 do 50 Hz, a nierówności szyny są źródłem drgań materiałowych o szerokim widmie częstotliwości.

Spośród wielu możliwych metod ograniczenia poziomu tych drgań wyróżnić należy dwie grupy działań. Jedna polega na ograniczeniu drgań źródeł, natomiast druga grupa działań sprowadza się do wyeliminowania dróg propagacji fali drganiowej. Pierwsza grupa wymusza ingerencję bezpośrednią w źródła drgań pojazdów szynowych i wymaga wielu badań doświadczalnych przez co jest niezwykle utrudniona, ponieważ wiąże się z celowością zmian konstrukcyjnych pojazdów oraz z ciągłą eliminacją nierówności kół i szyn.

Liczne badania teoretyczne jak i doświadczalne prowadzone w ośrodkach krajowych i zagranicznych [1, 5, 6] potwierdzają, że jedną z najbardziej skutecznych grup działań ograniczającą emisję energii wibroakustycznej, będącej wynikiem stosowania transportu szynowego, do środowiska naturalnego jest wibro i dźwiękoizolacja podtorzy [3]. Stanowi ona przeszkodę na drodze propagacji fali drganiowej, a także barierę na drodze rozchodzenia się drgań materiałowych będących źródłem hałasu.

Problem prawidłowego doboru układu wibroizolacji jest bardzo istotny i jest niezmiernie zależny od przyjętego modelu obliczeniowego, a w zasadzie od przyjętej koncepcji systemu wibroizolacji. W niniejszej pracy przedstawiono różne koncepcje doboru układu wibroizolacji podtorzy pojazdów szynowych w oparciu o różne rodzaje modeli i przeprowadzono analizę możliwości ich zastosowania przy doborze układu wibroizolacji. Zagadnienie wibroizolacji zwykle kojarzy się z analizą modelu o strukturze bryły sztywnej i bezmasowych elementach sprężysto-tłumiących. W przypadku układów wibroizolacji podtorzy pojazdów szynowych taki model jest jednak zbyt uproszczony z czym związane są problemy w jego praktycznym zastosowaniu.

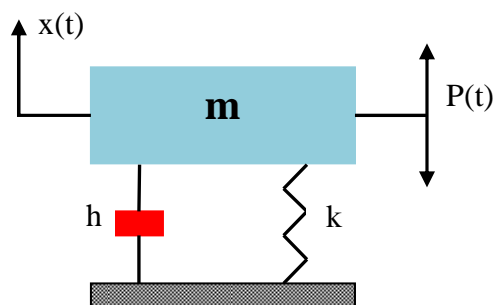
1. MODELE UKŁADÓW WIBROIZOLACJI

Zagadnienie wibroizolacji rozróżnia dwa przypadki tj. ograniczenia przekazywania sił typu dynamicznego wywołanych poprzez maszyny i środki transportu do otoczenia (wibroizolacja siłowa) lub ograniczenia ich wpływu na otoczenie (wibroizolacja przemieszczeniowa). W obu tych przypadkach mamy do czynienia z częstotliwościami drgań poniżej 100 Hz a wynika to z przyjętego modelu układu wibroizolacji jako układu dyskretnego o jednym stopniu swobody. Ponieważ problem torowisk to nie tylko drgania rozumiane jako oddziaływania dynamiczne ale również drgania materiałowe, które odpowiadają za dźwięki materiałowe, zagadnienie wibroizolacji nie jest adekwatne w przypadku wystąpienia drgań o częstotliwościach w przedziale od 100 do 5000 Hz. Ponieważ głównym zagadnieniem poruszonym w tej pracy jest przedstawienie analitycznych metod modelowania wibroizolowanych podtorzy pojazdów szynowych i problemu oddziaływania na środowisko komunikacji szynowej należy uwzględnić również aspekty wpływu drgań o wyższych częstotliwościach tzw. drgań materiałowych. Matematycznie zagadnienie to można określić jako proces optymalizacji z pewnymi ograniczeniami. Funkcje celu, w tym procesie są określone w zależności od rodzaju rozpatrywanego urządzenia np. jako minimum zmian amplitudy drgań wynikającej z procesu technologicznego dla danej częstotliwości, minimum zapotrzebowania energii, minimum oddziaływania dynamicznego na otoczenie dla określonej częstotliwości wymuszenia. Ograniczenia te w procesie projektowania podtorzy pojazdów szynowych wynikają z ograniczeń konstrukcyjnych, do których należą: rozmieszczenie elementów sprężysto-tłumiących, dopuszczalne ugięcia statyczne, rozmieszczenie mas, możliwości technologiczne realizacji elementów sprężysto -

tłumiących o żądanych parametrach, jak również z ograniczeń zewnętrznych np. ograniczenie propagacji fali drganiowej na środowisko.

1.1. Model dyskretny podtorza pojazdu szynowego

Klasyczne podejście do projektowania układu wibroizolacji polega na sprowadzeniu dynamiki układu mechanicznego do modelu o jednym stopniu swobody poprzez redukcję wszystkich masowych elementów układu na bryłę poruszającą się ruchem postępowym i przyjmując, że elementy sprężyste są bezmasowe. Ma to swoje uzasadnienie, gdyż warunek wibroizolacji został wyprowadzony właśnie w oparciu o tak przyjęty model. Na rysunku 1 przedstawiono model takiego układu drgającego o jednym stopniu swobody będącym przybliżeniem rzeczywistego układu dynamicznego obiektów wibroizolowanych, gdzie masa m symbolizuje masę zredukowaną pojazdu szynowego, podtorza, wibroizolacji i innych elementów układu biorącego udział w ruchu a sztywność k i tłumienie h są parametrami charakteryzującymi bezmasowe elementy sprężyste i tłumiące. W przypadku tym stosuje się uogólnienie polegające na tym, że nie definiuje się w tym przypadku rodzaju wymuszenia, przyjmując jedynie, że charakter wymuszenia pochodzący od siły P jest harmoniczny.



Rys.1. Ogólny model układu wibroizolacji.

Dla modelu przedstawionego na rysunku 1 równanie różniczkowe ruchu masy m ma następującą postać:

$$m \ddot{x} + h \dot{x} + kx = P_0 \sin \omega t \quad (1)$$

Rozwiązaniem równania (1) w przypadku ruchu ustalonego masy m jest całka szczególna w postaci:

$$x(t) = A_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (2)$$

gdzie:

A_0 – amplituda drgań wymuszonych,

ω - częstość wymuszenia,

ϕ - kąt przesunięcia fazowego.

Przekształcając zależność (2) możemy wyznaczyć charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową drgań wymuszonych układu $\eta=f(\omega)$ (η - współczynnik zwielokrotnienia amplitudy drgań wymuszonych) oraz tangens kąta przesunięcia fazowego ϕ na podstawie następujących zależności:

$$\eta = f(\omega) = \frac{F_{\max}}{P_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{h\omega}{h_{kr}\omega_0}\right)^2}} \quad (3)$$

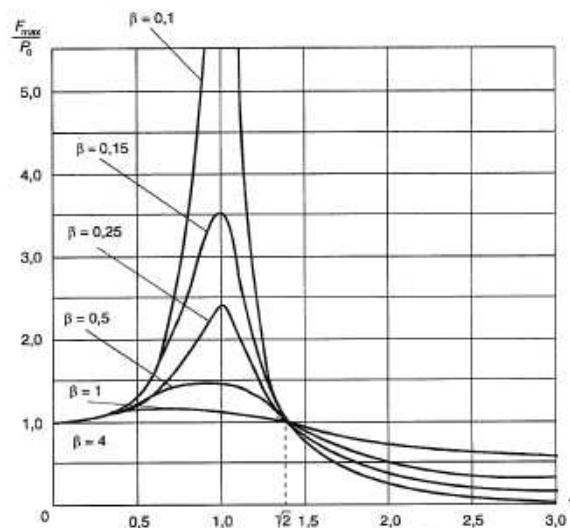
$$\operatorname{tg} \phi = \frac{2 \frac{h\omega}{h_{kr}\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (4)$$

gdzie:

$$h_{kr} = 2m\omega_0$$

Charakterystyka amplitudowo częstotliwościowa $\eta=f(\omega)$ ma przebieg jak na rysunku 2. Na bazie tego wykresu można określić między innymi warunek wibroizolacji, który wynosi:

$$\frac{\omega}{\omega_0} \geq \sqrt{2} \quad (5)$$



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki amplitudowo - częstotliwościowa modelu dyskretnego układu wibroizolacji [4]

Przedstawione powyżej zależności nie mają praktycznego znaczenia, gdyż w przypadku złożonych obiektów dynamicznych, a takim jest system wibroizolacji podtorzy pojazdów szynowych, dobór układu wibroizolacji powinien być oparty o analizę modeli o strukturze dyskretno-ciągłej ze względu na znaczną masę elementu sprężysto-tłumiącego i mogące w nim wystąpić zjawiska falowe.

1.2. Model dyskretno ciągły podtorza pojazdu szynowego w terenie zabudowanym

Modele o strukturze dyskretno-ciągłej pozwalają na uwzględnienie zjawisk falowych w samym elemencie elastycznym, które z reguły charakteryzują się znaczną masą i posiadają swoje częstotliwości drgań własnych. Jeżeli przypadkowo jedna z nich pokryje się z częstotliwością związaną z wymuszeniem podtorza pojazdu szynowego wówczas efekt wibroizolacji jest

odwrotny do zamierzonego. Na rysunku 3 przedstawiono model dyskretno-ciągły podtorza pojazdów szynowych w terenie zabudowanym. Idea jego polega na wibroizolacji podtorzy szynowych pozwalającej na znaczne ograniczenie oddziaływań dynamicznych podłoże (ograniczenie propagacji fali drganiowej) a poprzez to na zwiększenie jego żywotności oraz znacznie mniejsze osiadanie w gruncie.



Rys. 3. Model wibroizolacji podtorza pojazdów szynowych w terenie zabudowanym

Równania różniczkowe opisujące ten model wyprowadzono przy założeniu, że charakterystyka sprężystości materiału gumowego ma charakterystykę liniową przyjmując postać następującą:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4)$$

gdzie:

$$a = \sqrt{\frac{E^*}{\rho}},$$

E^* - dynamiczny moduł Younga materiału gumowego,

ρ - gęstość materiału gumowego,

Dla zależności (4) wprowadzamy następujące warunki brzegowe:

$$m_z \ddot{z} + E^* F \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = 0, \quad u(0,t) = 0 \quad (5)$$

gdzie:

F - powierzchnia przekroju poprzecznego materiału gumowego,

m_z - masa płyty dociskowej,

Dla zależności (4) wprowadzamy następujące warunki początkowe:

$$u(x,0) = f_1(t), \quad \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = f_2(t) \quad (6)$$

Następnie wykorzystując metodę Fouriera rozdzielenia zmiennych otrzymujemy równanie na częstości własne problemu początkowo- brzegowego w postaci:

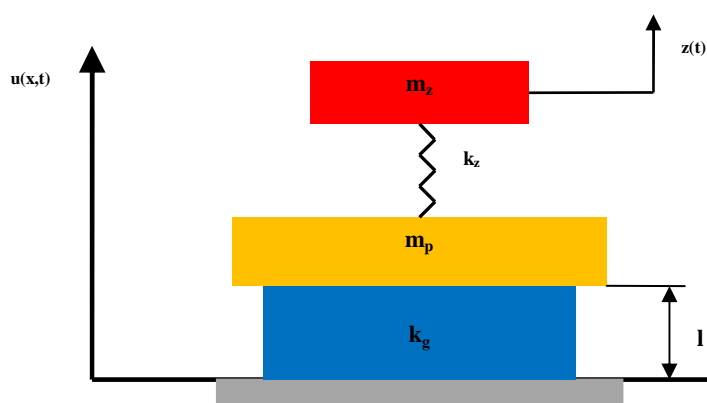
$$\tan \frac{\omega}{a} l - \frac{EF}{m_z a \omega} = 0 \quad (7)$$

Na podstawie zależności (7) wyznaczamy ω_i stanowiące częstości drgań własnych modelu podtorza pojazdu szynowych w terenie zabudowanym. Znając wartości ω_i możemy tak sterować własnościami fizyko-mechanicznymi elementu gumowego, aby spełnić warunek

wibroizolacji technicznej a tym samym ograniczyć wpływ propagacji fali drganiowej na budynki w aglomeracji miejskiej.

1.3. Model dyskretno ciągły podtorza pojazdu szynowego w terenie niezabudowanym

Na rysunku 4 przedstawiono model dyskretno- ciągły podtorza pojazdów szynowych w terenie niezabudowanym, dotyczy głównie podtorzy pojazdów kolejowych oraz pojazdów tramwajowych których linie przebiegają w terenie otwartym tzn. w dość dużej odległości od zabudowań. Idea jest identyczna i polega na znaczne ograniczenie oddziaływań dynamicznych podłoże (ograniczenie propagacji fali drganiowej) a poprzez to na zwiększenie jego żywotności oraz znacznie mniejsze osiadanie w gruncie.



Rys. 4. Model wibroizolacji podtorza pojazdów szynowych w terenie niezabudowanym

Równania różniczkowe opisujące ten model wyprowadzono przy identycznych założeniach jak poprzednio (charakterystyka sprężystości materiału gumowego ma charakterystykę liniową). Dla przyjętych założeń przyjmuje ono postać następującą:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (8)$$

gdzie:

$$a = \sqrt{\frac{E^*}{\rho}}$$

E^* - dynamiczny moduł Younga materiału gumowego,

ρ - gęstość materiału gumowego.

Warunki brzegowe dla takiego układu mają postać:

$$\begin{aligned} m_p \frac{\partial^2 u(l,t)}{\partial t^2} + E^* F \frac{\partial^2 u(l,t)}{\partial l^2} + k_t [u(l,t) - z(t)] &= 0 \\ \ddots \\ m_z \ddot{z} + k_t [z(t) - u(l,t)] &= 0 \\ u(0,t) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie:

F - powierzchnia przekroju poprzecznego gumy,

m_z - masa zastępcza pojazdu szynowego,

m_p - masa płyty dociskowej,
 k_t - zastępczy współczynnik sztywności tłucznia.

Następnie wykorzystując metodę Fouriera rozdzielania zmiennych otrzymujemy równanie na częstości własne problemu początkowo- brzegowego w postaci:

$$\frac{\omega}{a} \tan \frac{\omega}{a} l = \frac{E^* F}{m_p \omega^2 - \frac{k_t m_z \omega^2}{k_t - m_z \omega^2}} = 0 \quad (10)$$

Na podstawie zależności (10) wyznaczamy ω_i stanowiące częstości drgań własnych modelu podtorza pojazdu szynowych w terenie zabudowanym. Znając wartości ω_i możemy tak sterować własnościami fizyko-mechanicznymi elementu gumowego, aby spełnić warunek wibroizolacji technicznej a tym samym ograniczyć wpływ propagacji fali drganiowej na tereny niezabudowane.

PODSUMOWANIE

Prowadzone w pracy rozważania analityczne służą przedstawieniu metod i zasad doboru wibroizolacji dla podtorzy pojazdów szynowych. Na podstawie ich analizy można się przekonać, że nie każdy z tych modeli daje nam szansę prawidłowego doboru wibroizolacji. Należy zdawać sobie sprawę z tego, że podtorza wraz pojazdami i układem elastycznym stanowią pewien system, w którym poszczególne wzajemnie na siebie oddziałują. Mając to na uwadze w przypadku złożonych obiektów wibroizolacji, szczególnie gdy masa elementu wibroizolującego jest znaczna, a także w przypadku gdy wymiary geometryczne elementów układu wibroizolacji upodobniają się do płyty, pasa lub arkusza, modelowanie układu wibroizolacji jako układu dyskretnego niesie za sobą ogromne zagrożenia. Najpoważniejszym problemem jest możliwość wystąpienia w takich układach zjawiska falowego elementów sprężysto-tłumiących ponieważ nie można w tym przypadku założyć, że elementy te są bezmasowe. W takim elastycznym elemencie mogą pojawić się również tzw. rezonanse wewnętrzne, co może spowodować, że efekt wibroizolacji będzie przeciwny do zamierzonego. Aby zapobiec takiej możliwości koniecznym jest wyznaczenie częstotliwości drgań własnych układu wibroizolującego w oparciu o rozpatrzenie układu wibroizolacji jako modelu ciągłego lub dyskretno-ciągłego. W przypadku, gdy elementy wibroizolujące (guma lub sprężyna) charakteryzują się masą rozłożoną w sposób ciągły, częstotliwości dla jednorodnych pryzmatycznych układów, np. gumowych o wysokości „l”, można wyznaczyć w oparciu o powyżej przedstawioną metodykę [2, 7, 8]. Dobór parametrów elementów sprężystych powinien być w nowoczesnym ujęciu przeprowadzony w oparciu analizę modelu matematycznego drgającego podtorza wraz z równaniami, które uwzględniają dynamikę urządzeń transportowych a ponadto spełniają warunek wibroizolacji technicznej.

ANALYTICAL METHODS OF MODELLING OF VIBRATION ISOLATION TRACKS

Abstract

The problem of vibration isolation has been known for many decades, but it was mainly related to machinery and industrial equipment such as compressors, crushers, vibrating conveyors, rolling mills, etc. Since 70's of twentieth century the problem of vibration isolation, which is defined as value of

excitation force to the force transferred to the environment , has been become very important for the most of the human population due to the enormous development of rail and road traffic. Last research and analysis confirmed that this problem relates to about 30 - 40% of the population of our society. Particularly vulnerable to vibration are citizens of large urban areas and an industrial cities in which the heavy transport is used for carrying raw materials and for the export of manufactured products. The problem of vibrations from public and individual transport is also a serious problem in these cities. In this paper the basic analytical methods of modelling of vibration isolation tracks as well as comparison of this method is presented. The work was carried out in a research project 4875/B/TO2/2010/38 financed by Ministry of Science and Higher Education..

BIBLIOGRAFIA

1. Adamczyk J., Stanek W., Stojek Z., Wapiennik J.: *Wibroizolacja konstrukcji podłoża nawierzchni szynowej*. Proceedings of Noise-Control 85, IMiWA AGH, Kraków, 1985.
2. Adamczyk J., Targosz J.: *The concept of limitation of the vibration generated by rail-vehicles at railway station and railway crossings*. Archives of Transport, vol. 23, no. 1, str. 5-22, Warszawa, 2011
3. Bednarz J., Targosz J.: *Analysis of civil engineering structures vibroisolation effectiveness*. Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 19, no. 4, str. 33-41, Warszawa, 2012.
4. Giergiel J.: *Drgania mechaniczne*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2000.
5. Kisielowski J., Strzyżakowski Z., Sowiński B., *Badanie dynamiki układu pojazd-tor z punktu widzenia jego własności wibroizolacyjnych*. VIII Sympozjum Techniki Wibracyjnej i Wibroakustyki, AGH Kraków, 1987.
6. Stojek Z.: *Zagadnienie izolacji akustycznej i przeciwdrganiowej dla I linii metra w Warszawie*. Sprawozdanie naukowe IMiWA-AGH, Kraków, 1981.
7. Targosz J.: *Technical vibroisolation*. Prezentacja na konferencji 2nd IC-EpsMsO, Ateny, lipiec 2006.
8. Targosz J.: *Vibroisolation of railway crossings*. The Archives of Transport, vol. XVIII, no. 3, Warszawa, 2006.

Autorzy:

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

dr inż Jan TARGOSZ - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: jantargosz@interia.pl