

PROJEKTOWANIE WIBROIZOLACJI NAWIERZCHNI SZYNOWEJ NA PRZYKŁADZIE MODERNIZACJI STACJI KRAKÓW GŁÓWNY¹

Krzysztof Stypuła

Prof. dr hab. inż., Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. 11 628 23 94, kstypula@pk.edu.pl

Krzysztof Koziół

Dr inż., Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. 12 628 23 88, kkoziol@pk.edu.pl

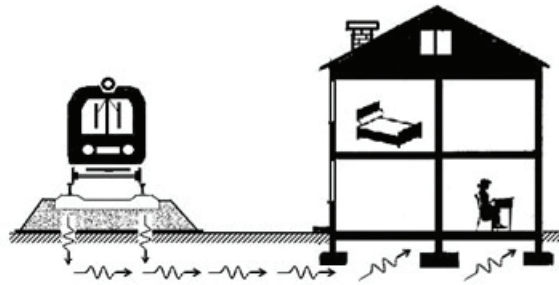
Streszczenie. *Praca dotyczy problematyki projektowania wibroizolacji nawierzchni kolejowych. Przedyskutowano kryteria brane pod uwagę przy projektowaniu takich wibroizolacji oraz rolę wykonanych wcześniej pomiarów drgań (pomiarów przedrealizacyjnych). Zaprezentowano projektowanie wibroizolacji z wykorzystaniem obliczeń symulacyjnych na przykładzie modernizacji stacji Kraków Główny. Podano także wyniki pomiarów drgań wykonanych po tej modernizacji.*

Słowa kluczowe: *drżania kolejowe, ochrona środowiska, wibroizolacje*

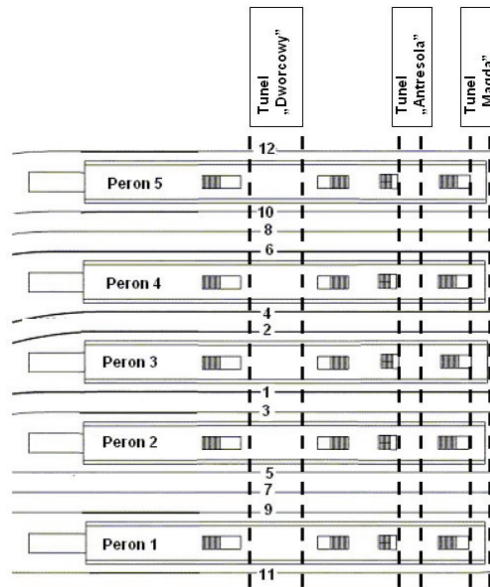
1. Wstęp

Program budowy i modernizacji infrastruktury transportu szynowego, w tym linii kolejowych, obejmuje prace projektowe związane z modernizacją nawierzchni szynowych. W projektowaniu tym powinny zostać uwzględnione wymagania w zakresie ochrony środowiska, w tym wymagania dotyczące wpływu wibracji na otoczenie (rys. 1) – por. [5 i 6]. Poprawne uwzględnienie takich wpływów z jednej strony decyduje o komforcie życia ludzi na danym terenie (por. [1 - 4]), a z drugiej często jest to wręcz warunek rozliczenia środków unijnych na taką inwestycję. Poniżej przedstawiono problematykę projektowania wibroizolacji nawierzchni szynowej na przykładzie modernizacji stacji Kraków Główny (rys. 2). W ramach modernizacji dworca stacji Kraków Główny przewidziano wymianę wibroizolacji znajdującej się pod nawierzchnią tłuczniową. Do tej pory wibroizolację stanowiły płyty gumowe. Należało zaprojektować nową wibroizolację i określić jej prognozowaną skuteczność.

¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Stypuła K. 50%, Koziół K. 50%



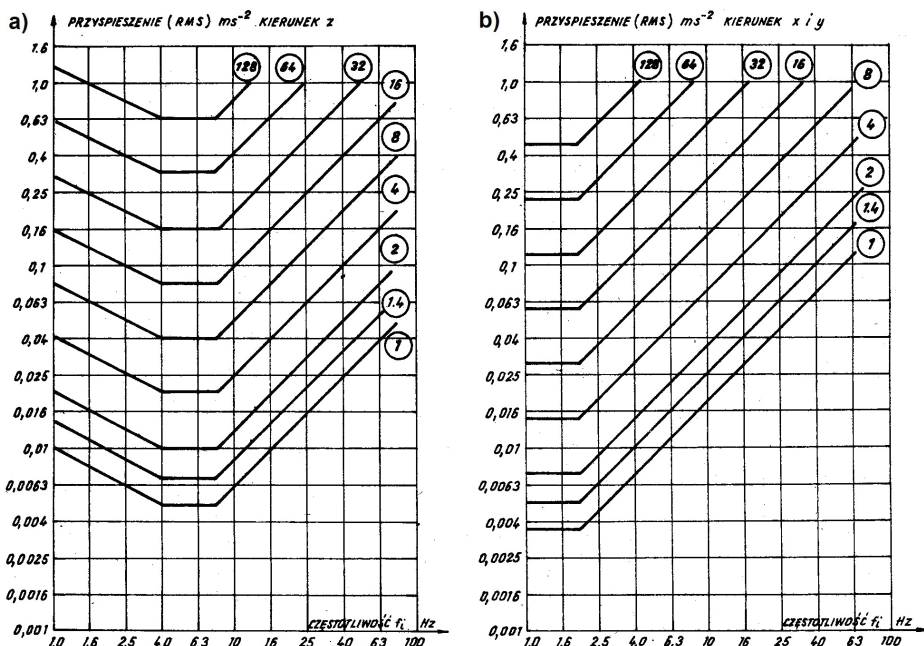
Rys. 1. Propagacja drgań wywołanych przez transport szynowy



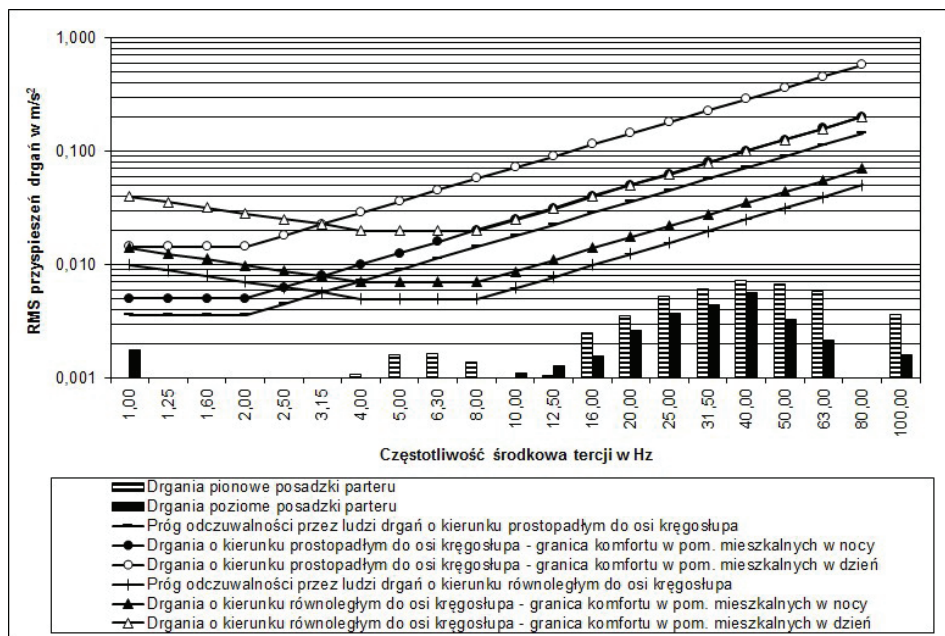
Rys. 2. Schemat usytuowania tuneli i peronów oraz numeracja torów na stacji Kraków Główny

2. Kryteria brane pod uwagę przy projektowaniu wibroizolacji nawierzchni szynowych

Najczęściej jako kryterium skuteczności wibroizolacji zastosowanej w nawierzchni szynowej przyjmuje się obniżenie poziomu wpływu drgań na ludzi przebywających w sąsiednich budynkach poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi (krzywe oznaczone cyfrą 1 na rys. 3). Ocenie podlegają wartości skuteczne (RMS) przyspieszeń drgań w poszczególnych tercjowych pasmach częstotliwości (rys. 4).



Rys. 3. Skale wpływu drgań na ludzi według normy PN-88/B-02171 (cyfrą 1 oznaczono najniższe krzywe odpowiadające progom odczuwalności drgań przez ludzi): a) składowa drgań równoległa kręgosłupa, b) składowe drgań prostopadłe do kręgosłupa

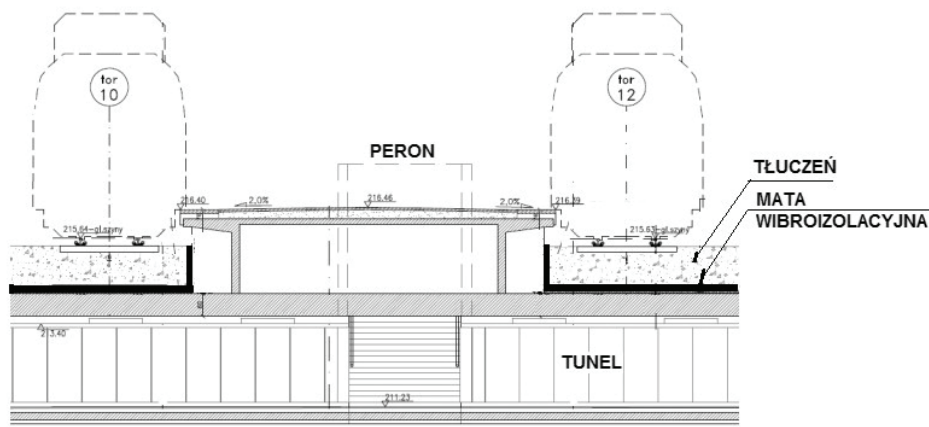


Rys. 4. Przykład analizy wpływu pionowej i poziomych składowych drgań na ludzi przebywających w budynku

W przypadkach budowy lub modernizacji stacji kolejowych, kryterium wymienione wyżej może dotyczyć nie tylko budynków znajdujących się blisko stacji, ale także do niej przylegających (np. centra handlowe jak na stacji Katowice Osobowa), czy wręcz budowanych na konstrukcji stacji (np. na płycie nad stacją Łódź Fabryczna). Kryterium to może dotyczyć także wpływu drgań na podróżnych i pracowników obsługi znajdujących się w tunelach stacyjnych pod peronami. W takich przypadkach obniżenie poziomu drgań może mieć także na celu wyeliminowanie zjawiska hałasu wtórnego (materiałowego), który jest efektem wprowadzenia w drgania elementów konstrukcji (np. ścian i stropu tuneli pod płytą dworca).

W szczególnych przypadkach kryterium może stanowić warunek obniżenia poziomu drgań emitowanych do gruntu. Dla przykładu warunek taki znaleźć można w DYREKTYWIE RADY 96/48/WE z dnia 23 lipca 1996r. w sprawie interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości. W załączniku III tej dyrektywy, zawierającym zasadnicze wymagania zamieszczono w punkcie 2.6.2, dotyczącym ochrony środowiska, następujący zapis: *Funkcjonowanie transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości nie może powodować takiego poziomu drgań gruntu, który jest niedopuszczalny dla bezpośredniego otoczenia położonego w sąsiedztwie infrastruktury i przy normalnym stanie utrzymania.*

W przypadku modernizacji stacji Kraków Główny przewidziano wymianę wibroizolacji znajdującej się pod nawierzchnią tęczniową. Do tej pory wibroizolację stanowiły płyty gumowe. Wykonawca zwrócił się o zaprojektowanie nowej wibroizolacji, określenie jej prognozowanej skuteczności, a następnie o wykonanie pomiarów kontrolnych po zakończeniu prac modernizacyjnych. Głównym celem zastosowania wibroizolacji było ograniczenie wpływu drgań na ludzi przebywających w trzech tunelach pod dworcem (rys. 2 i 5). Szczególnie chodziło o ograniczenie tego wpływu w tunelu „Dworcowy”, gdzie w przyszłości miały być ulokowane kasy biletowe, punkty obsługi pasażerów itp.



Rys. 5. Schemat przekroju przez jeden z peronów i fragment tunelu na stacji Kraków Główny

3. Pomiary przedrealizacyjne

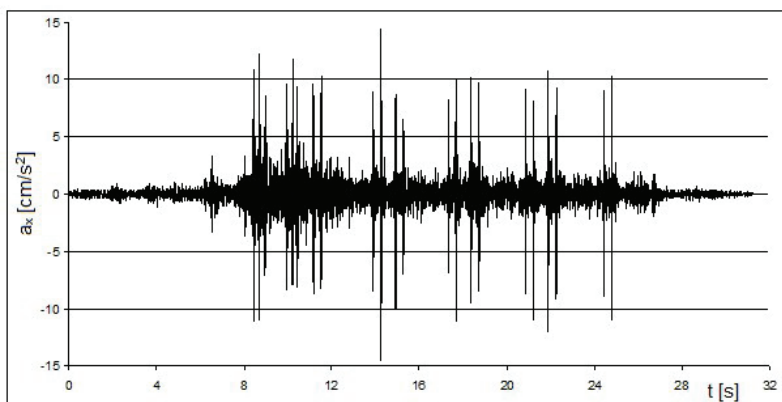
Pomiary drgań wykonywane przed realizacją inwestycji, najlepiej w ramach przygotowania inwestycji (opracowywania dokumentów środowiskowych: raportu lub oceny oddziaływania inwestycji na środowisko) obejmować powinny ocenę wpływu drgań na konstrukcję budynków oraz na ludzi przebywających w tych budynkach wraz z wnioskami dotyczącymi możliwości i konieczności zastosowania rozwiązań obniżających te wpływy.

Pomiary przedrealizacyjne (zwane też, szczególnie w przypadku budowy nowych arterii komunikacyjnych, pomiarami tła dynamicznego) mogą służyć kilku celom:

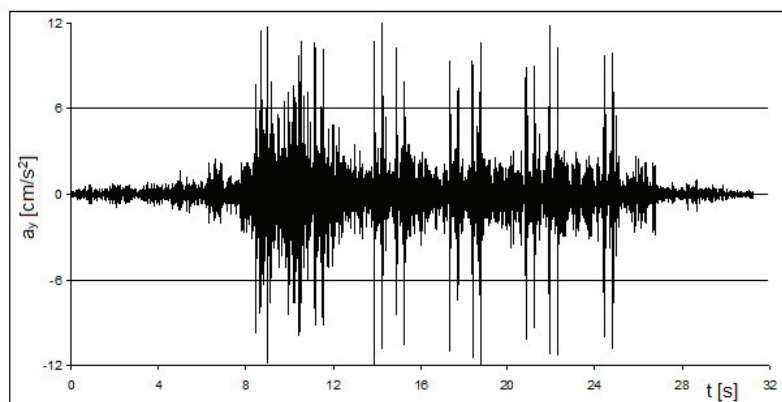
- dają informację o poziomie wpływu drgań na środowisko (na budynki i ludzi w budynkach, ewentualnie na wrażliwe na drgania urządzenia: precyzyjne obrabiarki, mikroskopy elektronowe, itp.) przed realizacją nowej lub modernizacją starej linii transportu szynowego,
- pozwalają na wstępne określenie zakresu koniecznych zabezpieczeń przed drganiami, tj. na ustalenie, na których odcinkach linii kolejowej wpływ drgań na ludzi przekracza poziom komfortu wibracyjnego i konieczne jest zastosowanie np. mat podtłuczniowych,
- dostarczają danych do ustalenia wymuszenia dynamicznego potrzebnego doprowadzenia obliczeń dynamicznych i zaprojektowania wibroizolacji.

Przeprowadzając pomiary przedrealizacyjne należy brać pod uwagę założone kryteria projektowe, jakie będą brane pod uwagę przy projektowaniu wibroizolacji.

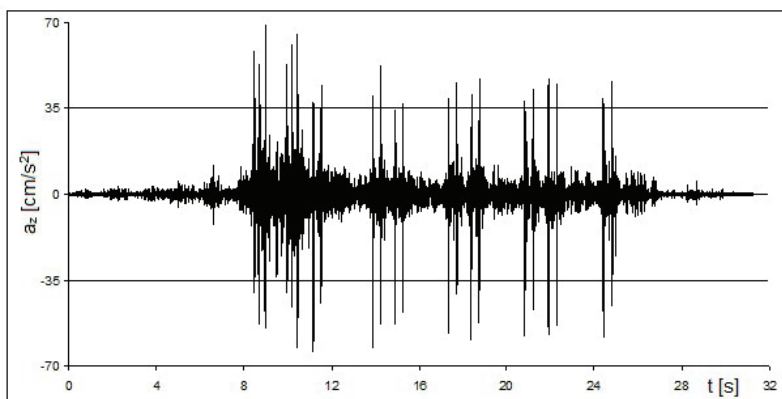
Na stacji Kraków Główny w pierwszej kolejności przeprowadzono pomiary drgań na wybranych peronach, celem określenia na tej podstawie prognozowanych drgań szyny (ustalenie wymuszenia dynamicznego – rys. 6 – 8). Należy podkreślić, że wiarygodnych danych nie da się uzyskać z bezpośredniego pomiaru drgań szyny z uwagi na wysoki poziom wysokoczęstotliwościowych szumów. Prognozowane drgania szyny zależą od takich czynników, jak geometria nawierzchni szynowej, konstrukcja peronów i tuneli, warunki geotechniczne, stosowany tabor kolejowy itp. Dlatego pomiary przedrealizacyjne pozwalają ustalić wymuszenie dynamiczne w odniesieniu do warunków panujących na danej stacji. Ponadto mierzono drgania posadzek w tunelach pod dworcem celem określenia wpływu drgań na ludzi przebywających w tych tunelach przed wymianą wibroizolacji. Wyniki tych badań (rys. 9) potwierdziły konieczność wymiany wibroizolacji, bowiem drgania nie tylko przekraczały próg odczuwalności drgań przez ludzi, ale także granicę komfortu w pomieszczeniach przeznaczonych do pracy biurowej.



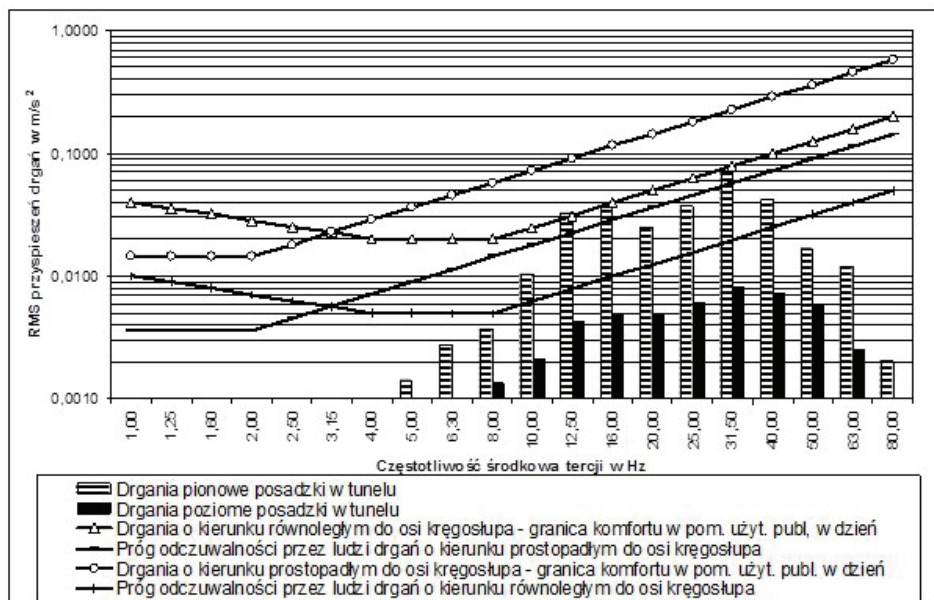
Rys. 6. Przebieg w czasie (t) składowej poziomej przyspieszeń drgań szyny w kierunku x prostopadłym do osi torów (a_x)



Rys. 7. Przebieg w czasie (t) składowej poziomej przyspieszeń drgań szyny w kierunku y równoległym do osi torów (a_y)



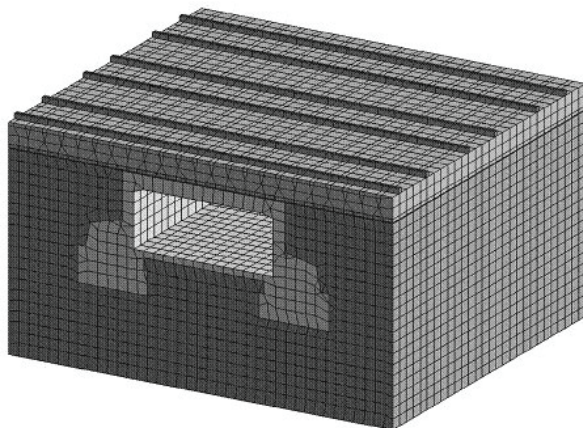
Rys. 8. Przebieg w czasie (t) składowej pionowej przyspieszeń drgań szyny (a_z)



Rys. 9. Wyniki analizy wpływu na ludzi drgań posadzki jednego z tuneli w przypadku pierwotnej wibroizolacji (przed jej wymianą na nową)

4. Analizy projektowe

Po ustaleniu wymuszenia sporządzono model obliczeniowy nawierzchni i konstrukcji dworca w programie Diana (wersja 9.4). Na rysunku 10 przedstawiono fragment analizowanego obiektu – tunel „Magda”. W modelu uwzględniono grunt, tunel (wykonany z betonu B25), matę rozłożoną na tunelu, płyty dociskowe położone na macie, warstwę tłucznia oraz podkłady i szynę. Gabaryty poszczególnych elementów zaczerpnięto z rysunków projektu budowlanego.



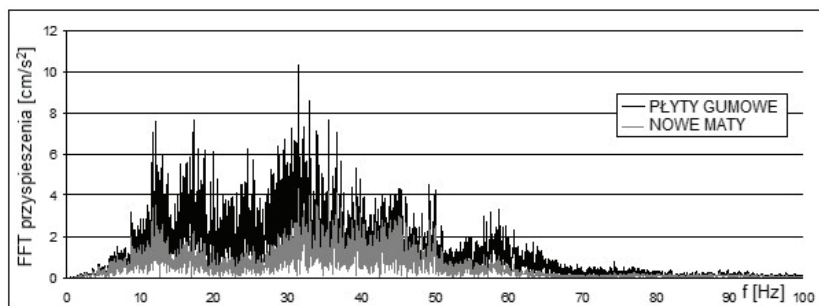
Rys. 10. Fragment analizowanej konstrukcji z podziałem na elementy skończone

Obliczenia symulacyjne, których celem było dobranie maty wibroizolacyjnej o określonych parametrach sztywności, tłumienia i grubości, wykonano wykorzystując dane materiałowe mat podane przez producenta:

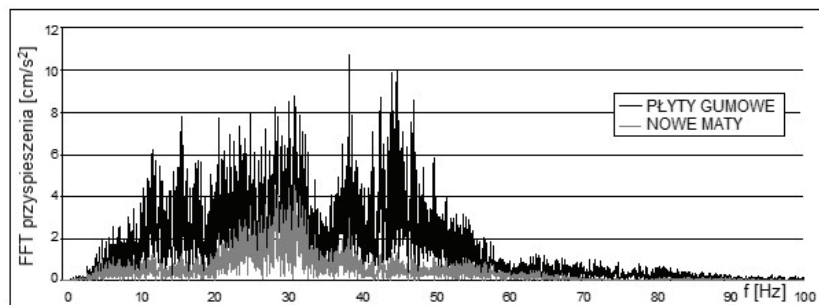
- sztywność statyczną (wg DIN 45673-5),
- sztywność dynamiczną (wg DIN 45673-7),
- tłumienie (współczynnik stratności) $tg\theta$.

Po wstępnym przeanalizowaniu mat o różnej grubości, przyjęto maty o grubości 30 mm. Rozważono następujące ułożenie wibroizolacji: mata wibroizolacyjna ma grubość 30 mm, ułożona jest pod płytą dociskową na podłożu lub płycie górnej tunelu, zaś po bokach na pionowych ścianach peronów do wysokości tłucznia ułożono matę wibroizolacyjną o grubości 15 mm.

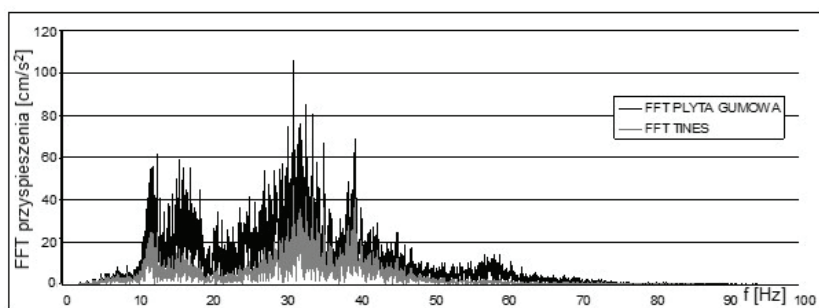
Na rysunkach 11 do 13 przedstawiono przykładowo wyniki obliczeń dotyczące tunelu „Magda”. Wyniki te zostały wyrażone w postaci najniekorzystniejszego spektrum drgań (FFT) w punktach pomiarowych na konstrukcji po przejściu przez wibroizolację i porównane z FFT drgań zarejestrowanych podczas pomiarów przedrealizacyjnych w tych samych punktach. Umożliwia to ocenę skuteczności nowego układu wibroizolacyjnego w porównaniu ze stosowanym dotychczas zabezpieczeniem w postaci płyt gumowych.



Rys. 11. Porównanie wyników analizy FFT przyspieszeń drgań poziomych w kierunku x (prostopadłym do torów, a równoległym do osi tunelu) środka posadzki tunelu „Magda” w przypadku płyt gumowych (stara wibroizolacja, linia czarna) oraz po zastosowaniu elastomerowych mat wibroizolacyjnych o grubości 30 mm (linia szara)



Rys. 12. Porównanie wyników analizy FFT przyspieszeń drgań poziomych w kierunku y (równoległym do torów, a prostopadłym do osi tunelu) środka posadzki tunelu „Magda” w przypadku płyt gumowych (stara wibroizolacja, linia czarna) oraz po zastosowaniu elastomerowych mat wibroizolacyjnych o grubości 30 mm (linia szara)



Rys. 13. Porównanie wyników analizy FFT przyspieszeń drgań pionowych (kierunek z) środka posadzki tunelu „Magda” w przypadku płyt gumowych (stara wibroizolacja, linia czarna) oraz po zastosowaniu elastomerowych mat wibroizolacyjnych o grubości 30 mm (linia szara)

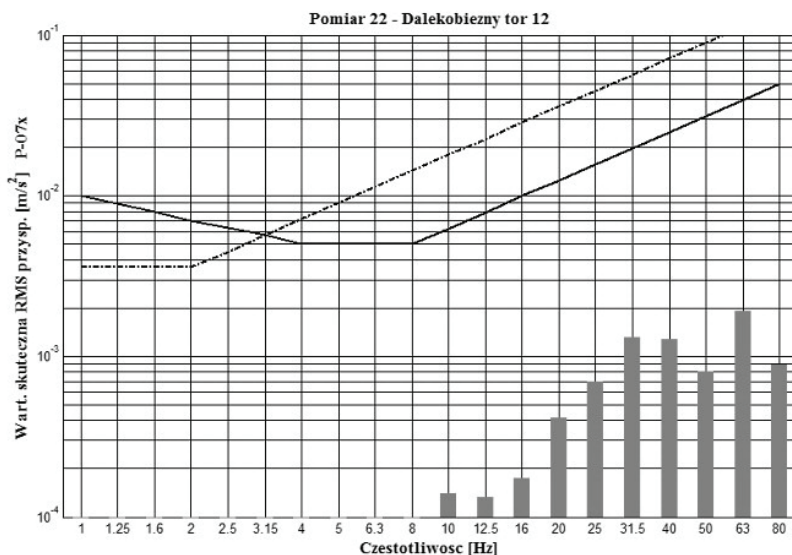
Nowe maty wykazały większą skuteczność wibroizolacyjną w stosunku do dotychczasowej wibroizolacji. Prognozowana globalna (w całym paśmie częstotliwości) redukcja drgań w stosunku do dotychczasowego rozwiązania została przedstawiona w tabeli 1.

Tabela 1. Prognozowana globalna redukcja drgań w stosunku do pierwotnie zastosowanej wibroizolacji z płyt gumowych

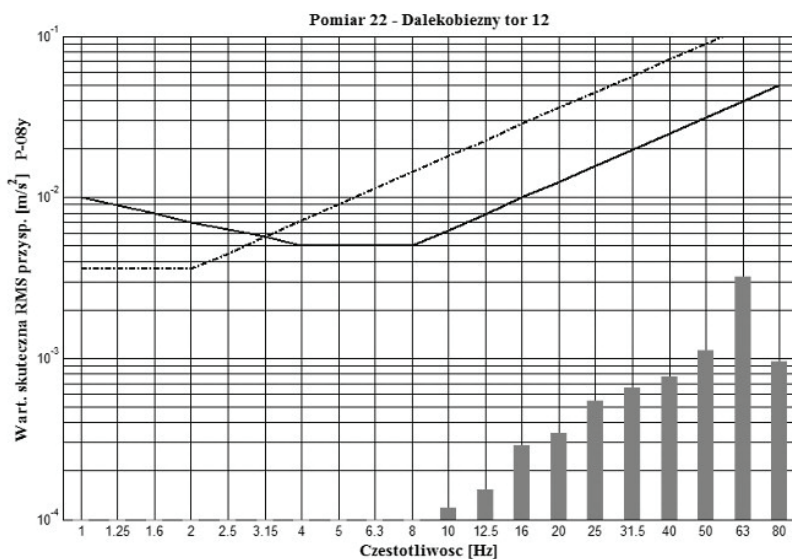
Miejsce	Składowa	Globalna redukcja drgań
posadzka w tunelu „Magda”	x	53,2%
	y	62,1%
	z	57,8%
posadzka w tunelu „Antresola”	x	28,0%
	y	37,9%
	z	49,4%

5. Pomiary porealizacyjne

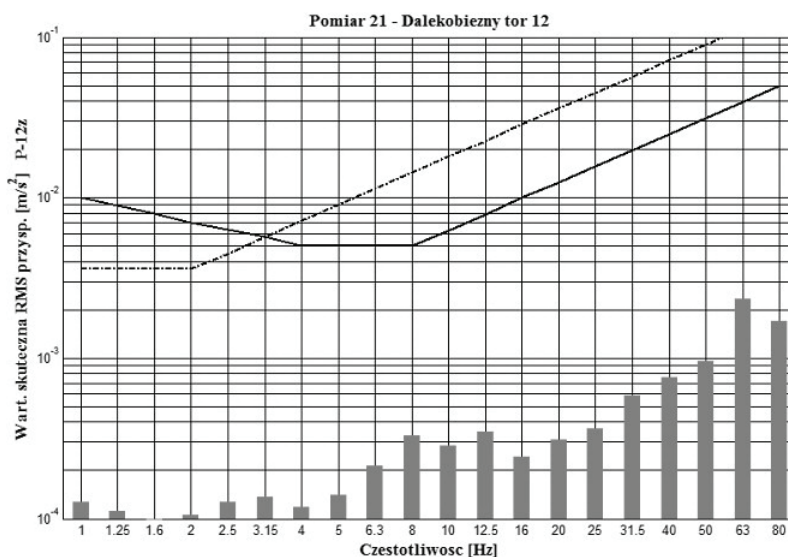
Po wykonaniu prac modernizacyjnych przy zastosowaniu elastomerowych mat wibroizolacyjnych zostały przeprowadzone porealizacyjne pomiary drgań w tunelu „Dworcowy” (pod każdym z peronów) i na płytach poszczególnych peronów. Uzyskane z pomiarów najniekorzystniejsze wyniki analiz wpływu drgań na ludzi w tunelu „Dworcowy” zamieszczono na rysunkach 14 do 16, porównując je z progami odczuwalności drgań przez ludzi w odniesieniu do składowych równoległych (linia ciągła) i prostopadłych (linia przerywana) do kręgosłupa człowieka.



Rys. 14. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na ludzi składowej x (prostopadłej do torów) drgań poziomych zarejestrowanych na posadzce tunelu „Dworcowy” pod peronem 5 - przejazd pociągu dalekobieżnego po torze 12



Rys. 15. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na ludzi składowej y (równoległej do torów) drgań poziomych zarejestrowanych na posadzce tunelu „Dworcowy” pod peronem 5 - przejazd pociągu dalekobieżnego po torze 12



Rys. 16. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na ludzi drgań pionowych (składowa z) zarejestrowanych na posadzce tunelu „Dworcowy” pod peronem 5 - przejazd pociągu dalekobieżnego po torze 12

Przedstawione wyniki analiz wskazują, że zarejestrowane na posadzce tunelu „Dworcowy” (pod wszystkimi peronami) drgania wywołane przejazdami pociągów mają poziom znacznie niższy od progu odczuwalności drgań przez ludzi, co oznacza, że nie są one odczuwane przez ludzi przebywających w tym tunelu.

W odniesieniu do tunelu „Dworcowy” możliwe jest porównanie wyników pomiarów wykonanych przed i po realizacji prac modernizacyjnych. W tabeli 2 zestawiono maksymalne wartości amplitud przyspieszeń drgań posadzki tunelu „Dworcowy” przed i po modernizacji nawierzchni szynowej wraz z podaniem redukcji drgań uzyskanej w stosunku do stanu sprzed modernizacji. Są to wartości redukcji globalnej, tj. w całym paśmie częstotliwości mierzonych drgań (bez podziału na pasma tercjowe). Obliczone wartości redukcji drgań wskazują, o ile nowa wibroizolacja jest skuteczniejsza od dotychczasowej.

Tabela 2. Maksymalne wartości amplitud przyspieszeń drgań posadzki tunelu „Dworcowy” przed i po modernizacji nawierzchni szynowej

Składowa drgań	Maksymalna amplituda przyspieszenia [cm/s ²]		Redukcja drgań (1-b/a)x100 [%]
	przed modernizacją	po modernizacji	
	a	b	
x	5,4	2,32	57,0
y	5,3	3,03	42,8
z	25,1	2,6	89,6

Również pomiary drgań na płytach peronowych wykazały istotne obniżenie poziomu drgań tych płyt.

6. Wnioski

Projektowanie wibroizolacji powinno uwzględniać kryteria oceny skuteczności projektowanych rozwiązań dostosowane do danej sytuacji projektowej. Prognozę tej skuteczności otrzymuje się z obliczeń symulacyjnych wykorzystujących dane otrzymane z pomiarów drgań wykonanych w miejscu projektowanej inwestycji lub wziętych z bazy danych pomiarowych. Zastosowanie obliczeń symulacyjnych do projektowania wibroizolacji pozwala na dobranie odpowiednich jej parametrów (np. sztywność, grubość i tłumienie mat wibroizolacyjnych) z warunku spełnienia założonego kryterium skuteczności przyjętego rozwiązania. Skuteczność tej metody projektowania potwierdzają wyniki pomiarów porealizacyjnych, jak to przedstawiono w zamieszczonym wyżej przykładzie.

Bibliografia

- [1] Kawecki J., Stypuła K., Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne, Wydawnictwo PK, Kraków 2013.
- [2] Kozioł K., Stypuła K., Pomiary drgań i symulacje komputerowe w projektowaniu wibroizolacji nawierzchni szynowych, Mat. VIII konf. Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, nr 149, Zakopane, 2-4.12.2009r.
- [3] Kozioł K., Stypuła K., Obliczenia symulacyjne w projektowaniu wibroizolacji nawierzchni szynowych. Wybrane przykłady zastosowań, Drogi Lądowe – Powietrzne – Wodne, Nr 10/2010 (29), s. 95 – 109.
- [4] Stypuła K., Kozioł K., Problematyka drgań budynków posadowionych w sąsiedztwie linii kolejowych, II Konf. Naukowo – techniczna: Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2009, Zakopane 22-24 kwietnia 2009r., s. 303-314.
- [5] PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [6] PN-88/B-02171. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.