

JANUSZ KAWECKI*, PIOTR STECZ**, KRZYSZTOF STYPUŁA***

O KONIECZNOŚCI WYKONYWANIA OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH WIBROIZOLACJI W TORZE TRAMWAJOWYM

ON THE NECESSITY OF USE OF SIMULATION CALCULATIONS OF THE VIBRATION ISOLATION IN THE TRAM TRACK

Streszczenie

W pracy opisano przykład doświadczalnych badań drgań zabytkowego budynku przed i po zastosowaniu wibroizolacji w konstrukcji nawierzchni szynowej pobliskiego toru tramwajowego. Porównanie dotyczy wpływu drgań generowanych przez dwa typy tramwajów na konstrukcję budynku i na ludzi w nim przebywających. Rezultaty badań wskazują na konieczność stosowania obliczeń symulacyjnych w procesie projektowania wibroizolacji torów tramwajowych.

Słowa kluczowe: drgania budynku zabytkowego, wibroizolacja toru tramwajowego

Abstract

The example of experimental investigations of a historical building vibrations before and after use of vibration isolation in the construction of a nearby tram track is described in the paper. The comparison concerns the influence of vibrations generated by two types of trams on the building construction and on the people inside. Results indicate a necessity of use of simulation calculations in the process of tram track vibration isolation design.

Keywords: historical building vibrations, vibroinsulation of a tram track

* Prof. dr hab. inż. – Politechnika Krakowska

** Mgr inż. – Politechnika Krakowska

*** Dr hab. inż., prof. PK – Politechnika Krakowska

1. Wstęp

Coraz częściej podczas budowy albo przebudowy nawierzchni tramwajowej wprowadza się w jej konstrukcję wibroizolację. Ma ona doprowadzić do obniżenia poziomu drgań przekazywanych na budynki zlokalizowane w sąsiedztwie trasy przejazdu tramwajów oraz na ludzi przebywających w tych budynkach. Dobranie elementów wchodzących w skład układu wibroizolacyjnego powinno następować na podstawie odpowiednich obliczeń symulacyjnych (por. np. [2, 3]). Podstawowym celem takich obliczeń jest wykazanie, iż przyjęta konstrukcja i parametry wibroizolacji umożliwią uzyskanie niezbędnej redukcji drgań generowanych podczas przejazdów tramwajów. Odpowiednie kryteria oceny poziomu drgań przekazywanych na budynki oraz na ludzi w budynkach podane są w normach polskich ([5, 6]), zagranicznych i międzynarodowych ([7, 8, 9]).

Analizy wykonywane na podstawie obliczeń symulacyjnych mają szczególne znaczenie w przypadku ochrony przed drganiami komunikacyjnymi budowli zabytkowych [1]. Znanych jest wiele przykładów wykonywania takich analiz z uwzględnieniem wymagań dotyczących ochrony obiektów zabytkowych przed drganiami pochodzenia komunikacyjnego. Tak było np. przed wybudowaniem linii tramwajowej w Atenach, przebiegającej między wioską olimpijską a wybrzeżem. Trasa przebiegała przez zabytkową część miasta, obok Łuku Hadriana. Przed przystąpieniem do budowy wykonano obliczenia symulacyjne (por. [4]). To zadanie powierzono nawet dwóm niezależnym zespołom ekspertów. W Polsce zaś takie wymaganie jest przeważnie pomijane. A jeśli nawet inwestor rozumiejąc wagę problemu żądałby wykonania takich analiz, to wygrywający przetarg na projekt i budowę lub modernizację linii tramwajowej z reguły stara się obniżyć koszty przez rezygnację z tej części pracy. Podstawowym argumentem przedstawianym przez wykonawcę jest twierdzenie, iż nie ma on obowiązku wykonywania tych obliczeń, gdyż nie są one zapisane w raporcie lub ocenie oddziaływania na środowisko oraz w decyzji środowiskowej. Wiadomo zaś, że przy sporządzaniu raportu lub oceny oddziaływania na środowisko wpływ drgań jest najczęściej pomijany. Dwie są główne przyczyny takiego stanu. W rozporządzeniach określających zawartości tych opracowań ocena wpływu wibracji na budynki i ludzi nie jest wymieniona tak wyraźnie jak np. ocena wpływu hałasu. A ponadto wiedza o wpływie wibracji na środowisko nie jest - nawet wśród ekspertów od ochrony środowiska - tak powszechna, jak w przypadku wpływu hałasu. Trzeba też zauważyć, że najczęściej w celu uniknięcia zmuszonych uzgodnień środowiskowych inwestor zamiast przebudowy toru zgłasza jego remont, dzięki czemu - zgodnie z przepisami - nie jest zobowiązany do wykonania analiz oddziaływania inwestycji na środowisko. Wszystko to powoduje, że projektanci nawierzchni tramwajowych powielają w kolejnych zastosowaniach konstrukcje wibroizolacji zastosowane w innym miejscu albo opisane przez producentów wibroizolacji. Wiadomo jednak, że skuteczność zastosowanego rozwiązania jest m.in. zależna od typów pojazdów (ściślej: od struktury częstotliwościowej drgań generowanych podczas przejazdów tych pojazdów), od lokalnych warunków geotechnicznych oraz od cech dynamicznych konstrukcji budynku odbierającego drgania. Zdarzają się więc sytuacje, że przyjęta w taki sposób konstrukcja wibroizolacji nie tylko nie doprowadza do redukcji drgań, ale nawet może spowodować zwiększenie wpływu tych drgań w stosunku do sytuacji przed modernizacją.

Nawet, jeśli przed przystąpieniem do budowy albo modernizacji konstrukcji toru tramwajowego nie wykona się obliczeń symulacyjnych, to zawsze jest możliwe przeprowadzenie oceny skuteczności nowego rozwiązania przez wykonanie pomiarów drgań przed i po zakończeniu budowy. Jeśli jednak wówczas wykaże się, że skuteczność zastosowanej wibroizolacji nie jest wystarczająca, to trzeba będzie zastosować dodatkowe środki techniczne redukcji drgań. To zaś wymagać będzie dodatkowych nakładów finansowych.

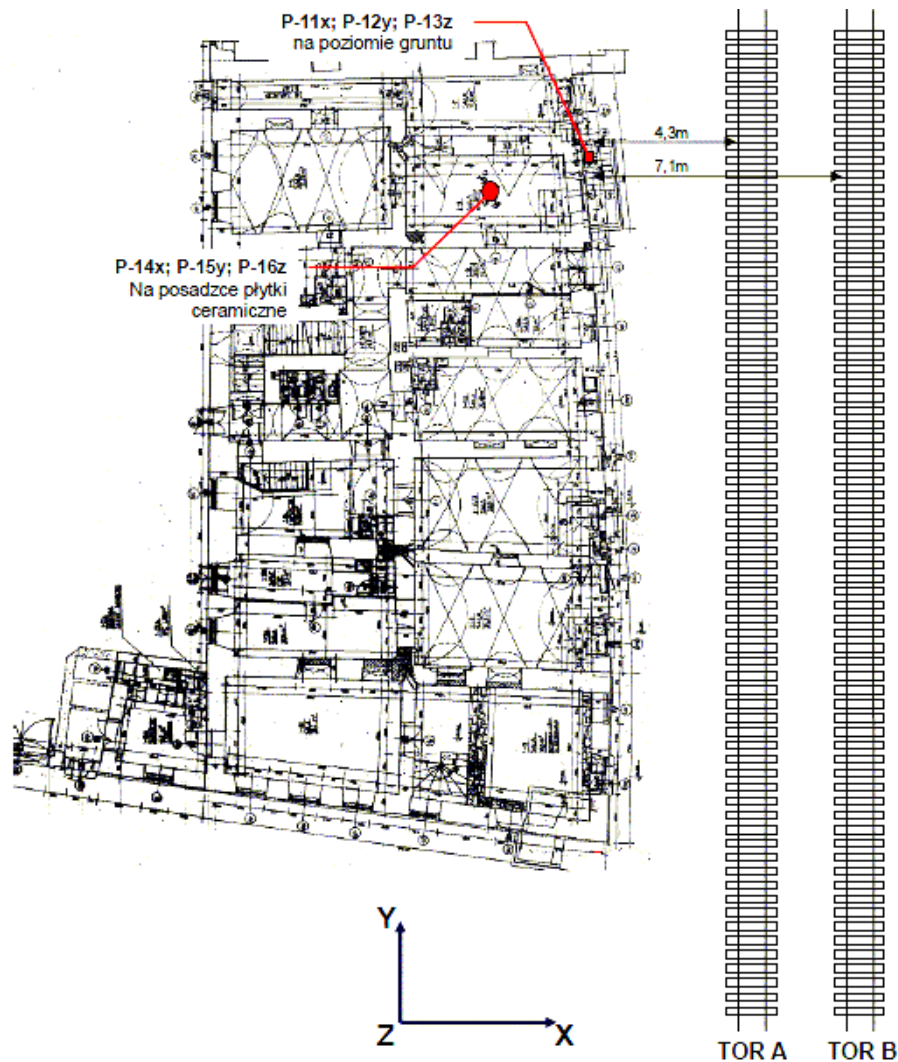
W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki pomiarów drgań budynku zlokalizowanego w sąsiedztwie modernizowanej linii tramwajowej. Badania wykonano w ramach prac badawczych Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Pomiary drgań wykonane zostały przez akredytowane Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli (akredytacją PCA 846).

2. Opis badań

W ramach modernizacji toru tramwajowego wykonano wibroizolację torowiska, którego trasa przebiegała w sąsiedztwie kilku budowli zabytkowych. Obiekty położone najbliżej torów znajdowały się w odległości 3,9 m oraz 4,3 m od najbliższej im szyny. W celu obniżenia poziomu hałasu oraz wibracji zastosowano konstrukcję tzw. szyny w otulinie oraz maty wibroizolacyjne umieszczone pod płytą torową.

Poniżej przedstawione są wyniki pomiarów w budynku, którego ściana znajduje się w odległości 4,3 m od najbliższej szyny w torze A. Budynek jest średniowieczną kamienicą, podpiwniczoną, z trzema kondygnacjami nadziemnymi i strychem. Mury wykonane są z cegły. Strop nad piwnicą wykonano z cegły jako sklepienie odcinkowe, na wyższych kondygnacjach - stropy drewniane.

Podczas pomiarów rejestrowano przyspieszenia drgań budynku w obranych punktach pomiarowych generowane przejazdami tramwajów w różnych warunkach eksploatacji. Wyniki pomiarów poddano analizie i na tej podstawie przeprowadzono ocenę wpływu drgań na konstrukcję budynku wg kryteriów określonych w skali SWD-II (norma [5]) i ocenę wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku wg kryteriów podanych w normie [6]. W tym celu obrano w budynku trzy punkty pomiarowe, których rozmieszczenie zaznaczono na rys. 1 i 2. W punktach pomiarowych rejestrowano składowe drgań w trzech kierunkach: dwóch poziomych x (kierunek prostopadły do osi toru tramwajowego) i y (kierunek równoległy do osi toru tramwajowego oraz w kierunku pionowym z.



Rys. 1. Rzut parteru budynku wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych

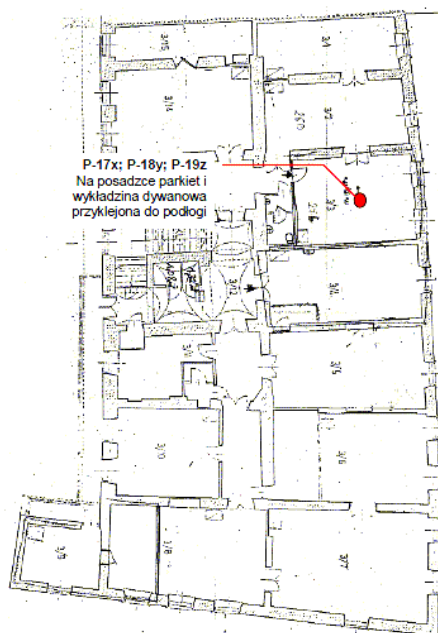
Fig. 1. Horizontal projection of the ground floor of the building
with the location of measurement points

Pomiary wykonano podczas przejazdów dwóch typów tramwajów: tramwaju typu NTG6 (firmy Bombardier) oraz tramwaju typu E1 (tzw. Norymberga, z wagonem C3). Pomiary przeprowadzono w dwóch stanach konstrukcji jezdni: stan występujący przed modernizacją konstrukcji jezdni oraz po modernizacji tzn. z zastosowaniem przyjętej w projekcie wibroizolacji toru tramwajowego.

3. Wyniki badań

3.1. Ocena wpływu drgań na konstrukcję budynku

Budynek zakwalifikowano do obiektów, w stosunku do których można zastosować skalę SWD-II (wg [5]) jako kryterium oceny wpływu drgań na konstrukcję. W tym celu przeprowadzono analizę drgań poziomych budynku. w punktach P-11x i P-12y (rys. 1) i oceniono rozkład wartości szczytowych przyspieszenia drgań w pasmach 1/3 oktawowych.



Rys. 2. Rzut II piętra budynku wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych

Fig. 2. Horizontal projection of the second floor of the building with the location of measurement points

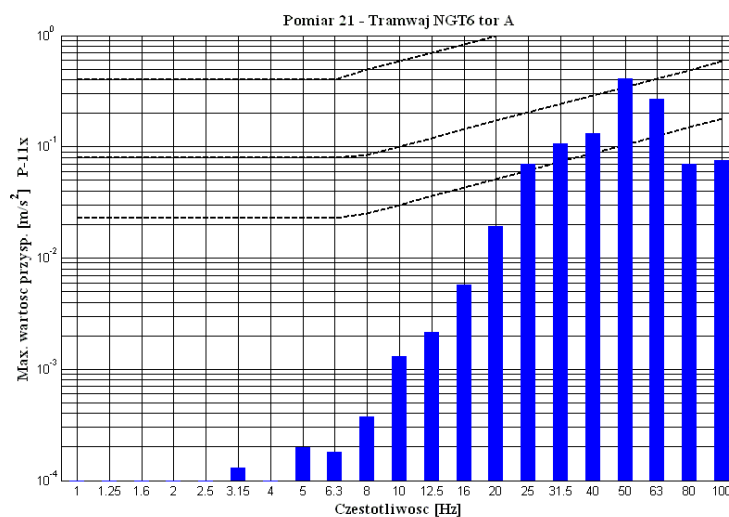
Najniekorzystniejsze wyniki tych analiz uzyskane przed i po modernizacji toru przedstawiono na rys. 3 i 4 (przy przejazdach tramwajów NGT6) oraz na rys. 5 i 6 (przy przejazdach tramwajów E1). Linia najniższej położona na tych rysunkach oznacza górną granicę odczuwalności drgań przez konstrukcję budynku. W obiektach zabytkowych linia ta nie powinna być przekraczana.

3.2. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach

Zasady oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach i odbierających drgania w sposób bierny określone są w normie [6] i są zgodne z normą międzynarodową [7], która przywoływana jest również w normie europejskiej [10]. Ocenie podlegają drgania w paśmie od 1,0 do 80,0 Hz. Ocenę wpływu drgań na ludzi przeprowadzono na podstawie porównania widma wartości skutecznej (RMS) przyspieszenia pomierzonych drgań

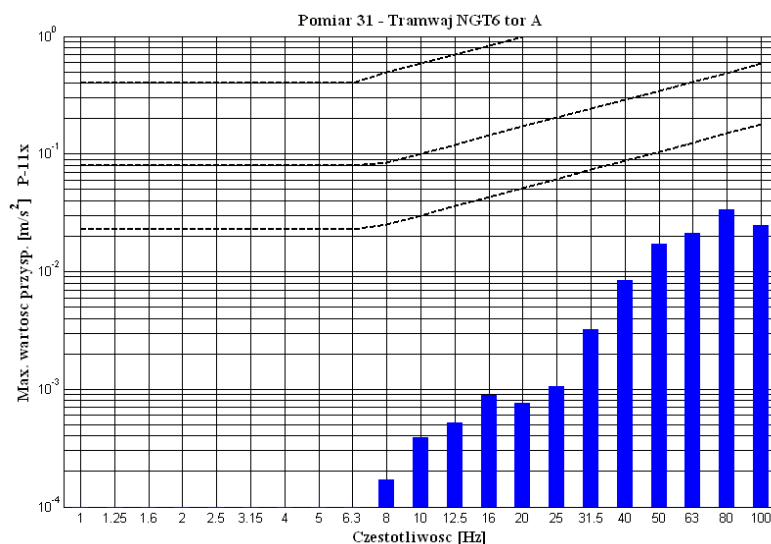
przedstawionego w pasmach 1/3 oktawowych z linią określającą poziom zapewnienia ludziom niezbędnego komfortu wibracyjnego. Na rysunkach 7–14 przedstawiono najniekorzystniejsze z uzyskanych w czasie pomiarów wyniki odpowiednich porównań. Odnoszą się one do sytuacji przed i po modernizacji toru tramwajowego i odpowiadają przejazdom tramwajów typu NGT6 oraz E1. Na rysunkach podano także linie, które uwzględniane są w kryteriach oceny wpływu drgań, w następującej kolejności:

- najniżej położona linia ciągła – próg odczuwalności przez człowieka drgań w kierunku z (wzdłuż osi kręgosłupa tzn. wzdłuż linii: stopy-głowa),
- środkowa linia ciągła – linia graniczna zapewnienia ludziom niezbędnego komfortu wibracyjnego w pomieszczeniu mieszkalnym w porze nocnej (w godz. od 22 do 6) przy drganiach odbieranych przez człowieka w kierunku z,
- najwyżej położona linia ciągła – linia graniczna zapewnienia ludziom niezbędnego komfortu w pomieszczeniach biurowych i mieszkalnych w porze dnia (w godz. od 6 do 22) przy drganiach odbieranych przez człowieka w kierunku z,
- najniżej położona linia przerywana – próg odczuwalności przez człowieka drgań w kierunkach x i y (poprzecznie do osi kręgosłupa tzn. wzdłuż linii: plecy-piersi albo bok-bok),
- środkowa linia przerywana – linia graniczna zapewnienia ludziom niezbędnego komfortu wibracyjnego w pomieszczeniu mieszkalnym w porze nocnej przy drganiach odbieranych przez człowieka w kierunkach x i y,
- najwyżej położona linia przerywana - linia graniczna zapewnienia ludziom niezbędnego komfortu w pomieszczeniach biurowych i mieszkalnych w porze dnia przy drganiach odbieranych przez człowieka w kierunkach x i y.



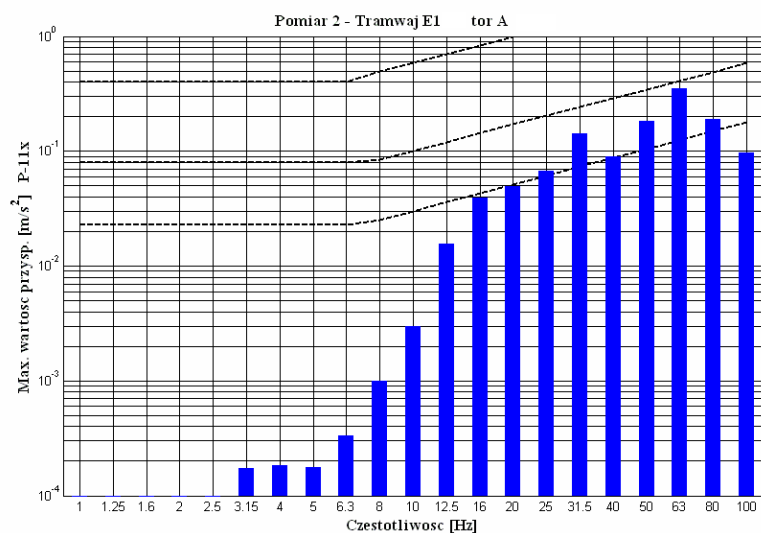
Rys. 3. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na budynek drgań generowanych przejazdem tramwaju NGT6 przed zastosowaniem wibroizolacji

Fig. 3. Most unfavorable results of the analysis of the influence on building's construction vibrations generated by passing tram NGT6 before applying of vibroinsulation



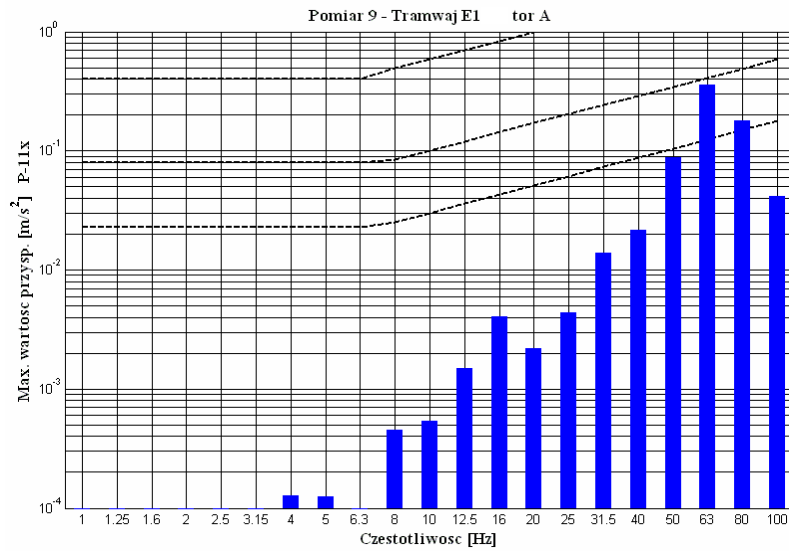
Rys. 4. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na budynek drgań generowanych przejazdem tramwaju NGT6 po zastosowaniu wibroizolacji

Fig. 4. Most unfavorable results of the analysis of the influence on building's construction vibrations generated by passing tram NGT6 after applying of vibroinsulation



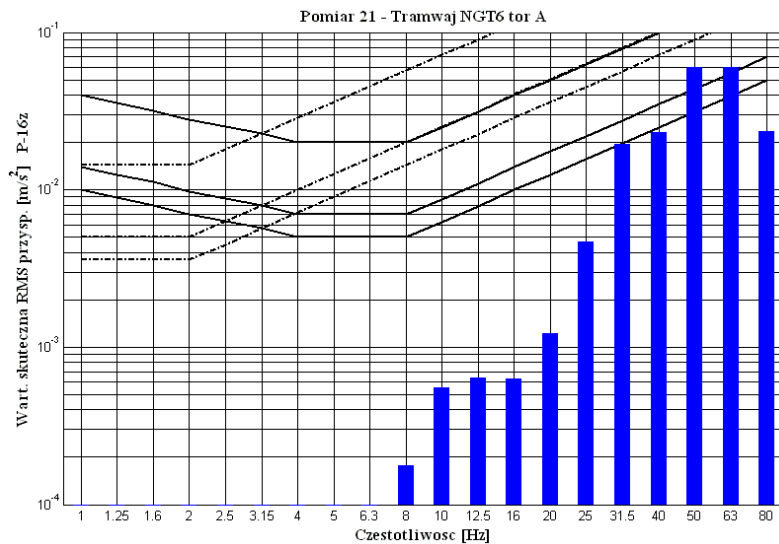
Rys. 5. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na budynek drgań generowanych przejazdem tramwaju E1 przed zastosowaniem wibroizolacji

Fig. 5. Most unfavorable results of the analysis of the influence on building's construction vibrations generated by passing tram E1 before applying of vibroinsulation



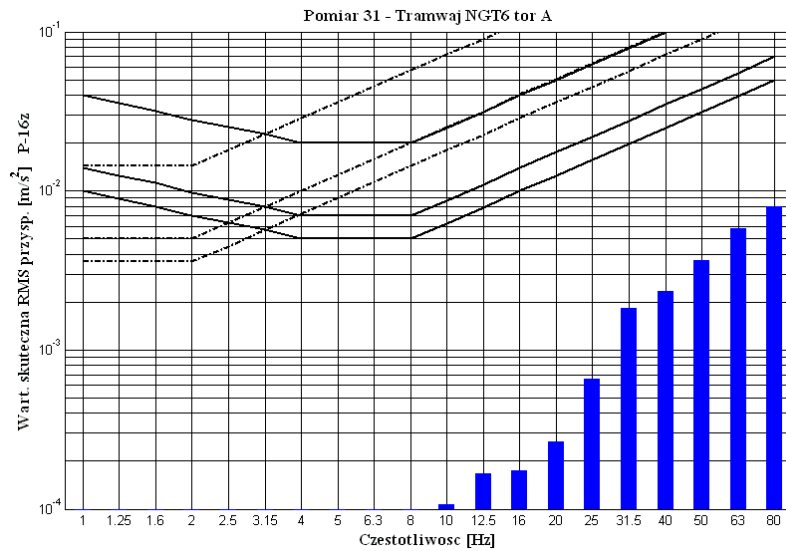
Rys. 6. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na budynek drgań generowanych przejazdem tramwaju E1 po zastosowaniu wibroizolacji

Fig. 6. Most unfavorable results of the analysis of the influence on building's construction vibrations generated by passing tram E1 after applying of vibroinsulation



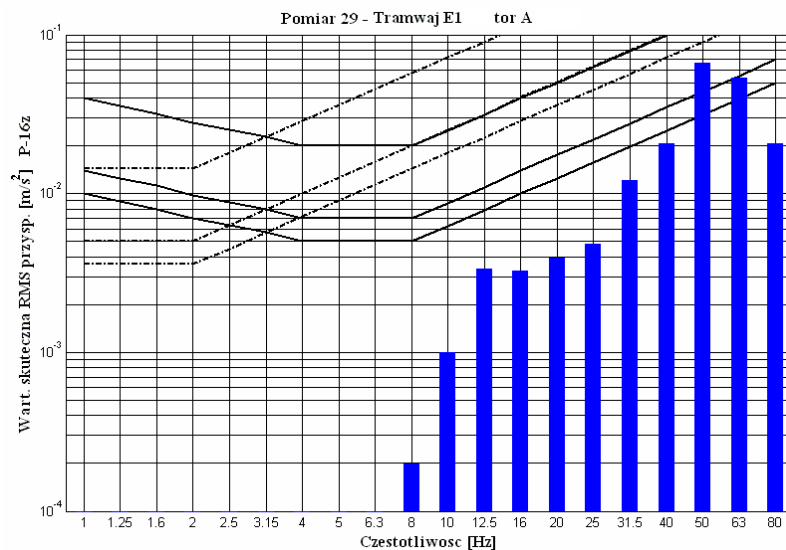
Rys. 7. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na ludzi drgań pionowych (Z) posadzki parteru generowanych przejazdem tramwaju NGT6 przed zastosowaniem wibroizolacji

Fig. 7. Most unfavorable results of the analysis of the influence on people inside the building vertical (Z) vibrations of the ground floor generated by passing tram NGT6 before applying of vibroinsulation



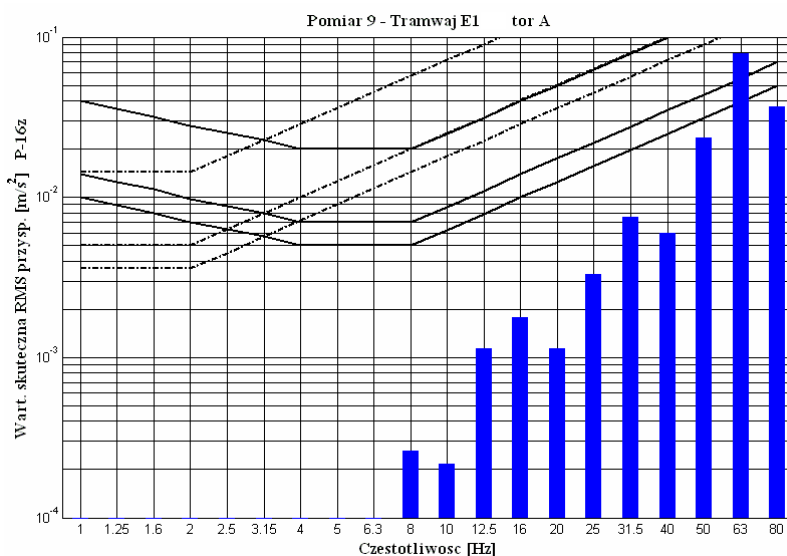
Rys. 8. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na ludzi drgań pionowych (Z) posadzki parteru generowanych przejazdem tramwaju NGT6 po zastosowaniu wibroizolacji

Fig. 8. Most unfavorable results of the analysis of the influence on people inside the building vertical (Z) vibrations of the ground floor generated by passing tram NGT6 after applying of vibroinsulation



Rys. 9. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na ludzi drgań pionowych (Z) posadzki parteru generowanych przejazdem tramwaju E1 przed zastosowaniem wibroizolacji

Fig. 9. Most unfavorable results of the analysis of the influence on people inside the building vertical (Z) vibrations of the ground floor generated by passing tram E1 before applying of vibroinsulation



Rys. 10. Najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu na ludzi drgań pionowych (Z) posadzki parteru generowanych przejazdem tramwaju E1 po zastosowaniu wibroizolacji

Fig. 10. Most unfavorable results of the analysis of the influence on people inside the building vertical (Z) vibrations of the ground floor generated by passing tram E1 after applying of vibroinsulation

4. Wnioski

Z przedstawionych analiz wynika, że modernizacja toru tramwajowego spowodowała znaczące zmniejszenie wpływów dynamicznych wywołanych przejazdami tramwajów typu NTG6. To spostrzeżenie dotyczy zarówno wpływu drgań na badany budynek, jak i na ludzi w tym budynku przebywających (poziom drgań nie przekracza wartości progu odczuwalności drgań przez ludzi).

Wyraźnie inne są wyniki analizy skuteczności zastosowanej wibroizolacji w odniesieniu do drgań generowanych przejazdami tramwajów typu E1. Efekt zastosowanej wibroizolacji w pasmach o częstotliwościach środkowych 63Hz i 80Hz nie jest zauważalny, a w tych właśnie pasmach występują największe wartości przyspieszeń. Maksymalne wartości szczytowe przyspieszeń drgań poziomych sytuują się w II strefie skali SWD-II, i to stosunkowo blisko linii odpowiadającej dolnej granicy strefy III. Są to drgania odczuwalne przez konstrukcję budynku, a w przypadku obiektów zabytkowych traktuje się je nawet jako szkodliwe dla takich obiektów.

Podobnie można sformułować wyniki oceny wpływu drgań na ludzi w budynku. Zastosowana wibroizolacja nie doprowadza do istotnej redukcji drgań przejmowanych przez ludzi w pomieszczeniu na parterze budynku. Nadal poziom drgań przekracza linię progu odczuwalności drgań przez ludzi, ale nie przekracza w tym pomieszczeniu linii zapewnienia niezbędnego komfortu w porze dziennej. Wyniki te mogą jednak wzbudzać niepokój z tego powodu, iż przedstawiana ocena dotyczy sytuacji odpowiadających

przejazdom tramwajów po torze w bardzo dobrym stanie (bezpośrednio po oddaniu go do użytkowania). Po kilku latach eksploatacji można spodziewać się wzrostu poziomu drgań na skutek postępującego zużycia szyn.

Przedstawione wyniki pomiarów i analiz świadczą o konieczności wykonywania obliczeń symulacyjnych przed zastosowaniem projektowanego rozwiązania wibroizolacyjnego. W rozważanym przypadku zastosowano w modernizowanym torze maty dobrej jakości, renomowanego producenta uzyskując dobrą skuteczność wibroizolacji w odniesieniu do jednego typu używanych na tej linii tramwajów. Podczas postulowanych obliczeń symulacyjnych można było w taki sposób dobrać parametry maty (np. grubość, sztywność itp.), aby osiągnąć podobną skuteczność w odniesieniu do drgań generowanych podczas przejazdów obydwu typów kursujących na tej linii tramwajów.

Badania naukowe zostały wykonane w ramach realizacji Projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”-temat: PT1.7 - współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

L i t e r a t u r a

- [1] C i e s i e l s k i R., K a w e c k i J., M a c i ą g E., *Diagnostyka dynamiczna i zabezpieczenia istniejących budynków mieszkalnych przed szkodliwym działaniem drgań na właściwości użytkowe budynków*, Instrukcja Nr 348/98, ITB, Warszawa 1998.
- [2] K a w e c k i J., S t y p u ł a K., *Minimalizacja wpływów dynamicznych komunikacji szynowej na budynki i ludzi w budynkach*, Problemy Nauk.-Bad. Budownictwa, t. VI: Badawczo-Projektowe Zagadnienia w Budownictwie, Wyd. Politechniki Białostockiej, PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, 2008, s. 65-74.
- [3] K o z i o ł K., S t y p u ł a K., *Obliczenia symulacyjne w projektowaniu wibroizolacji nawierzchni szynowych. Wybrane przykłady zastosowań*, DROGI Lądowe – Powietrzne – Wodne, Nr 10/2010 (29), s. 95-109.
- [4] M a l d o n a d o M., L e H o u e d e c D., *Vibration induced by trams: Propagation, isolation and perception*, Proc. of the 6th International Conference on Structural Dynamics EUROLYN 2005, C. Soize&G.I. Schuëller (eds.) © 2005 Millpress, Rotterdam, vol. 3, s. 2047-2052.
- [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.
- [7] ISO 10137: Bases for design of structures- serviceability of buildings and walkways against vibration, 2007.
- [8] BS 6472-1:2008, Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings, Part 1: Vibration sources other than blasting, 2008, British Standard.
- [9] DIN 4150-2, Structural vibration, Part 2: Human exposure to vibration in buildings, 1999, German Standard.
- [10] PN-EN 1990: 2004, Podstawy projektowania konstrukcji.