

KRZYSZTOF STYPUŁA

prof. dr hab. inż., Politechnika
Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej,
Instytut Mechaniki Budowli,
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24,
12 6282394, kstypula@pk.edu.pl

TADEUSZ TATARA

prof. dr hab. inż., Politechnika
Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej,
Instytut Mechaniki Budowli,
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24,
12 6282348, ttatara@pk.edu.pl

Wybrane wyniki badań wpływu drgań tramwajowych na budynki w Krakowie¹

Streszczenie. W pierwszej części artykułu przedstawiono badania drgań wybranych zabytkowych budynków zlokalizowanych w centrum Krakowa. Źródłem drgań były przejazdy tramwajów różnych typów. Oceniano szkodliwość zarejestrowanych drgań na konstrukcje budynków oraz na ludzi w nich przebywających według procedur opisanych w polskich normach. Badania wykazały znaczący wpływ drgań na konstrukcję budynku zabytkowego w zależności od typu tramwajów wzbudzających drgania. Po zastosowaniu wibroizolacji, dobranej na podstawie symulacji numerycznych, poziom drgań uległ istotnej redukcji. W pracy oceniono także wpływ drgań pochodzenia komunikacyjnego na ludzi. Wykazano przekroczenia granic odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach. Druga część artykułu dotyczy oceny skuteczności zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego toru tramwajowego z uwagi na poziom wzbudzanych drgań i ich szkodliwości na konstrukcję budynku mieszkalnego zlokalizowanego w bezpośrednim sąsiedztwie linii tramwajowej. Pomiar drgań budynku wykonane zostały przed i po remoncie torowiska. Oceniano także wpływ prędkości przejazdów różnego typu tramwajów na poziom drgań wzbudzanych w murowym budynku mieszkalnym. Podano opisy matematyczne zależności maksymalnych wartości składowych poziomych i składowej pionowej przyspieszeń drgań mierzonych w budynku w poziomie terenu od prędkości przejazdów tramwajów oraz współczynniki linii trendu.

Słowa kluczowe: drgania komunikacyjne, badania drgań, tramwaj

Wprowadzenie

W dyskusjach dotyczących idei budowy metra lub premetra w Krakowie pojawiają się często obawy o wpływ drgań na istniejące budynki, w tym szczególnie na obiekty zabytkowe. Czasami obawy te formułowane są tak, jakby obiekty te nie podlegały nigdy drganiom od miejskiego transportu szynowego. W rzeczywistości wiele budynków i budowli zabytkowych w Krakowie od dawna znajduje się pod wpływem drgań generowanych przez samochody, a przede wszystkim pod większym lub mniejszym wpływem drgań wywołanych przejazdami tramwajów (zdarzają się też obiekty narażone na wpływ drgań kolejowych). Dlatego warto zwrócić uwagę na obecny poziom wpływu drgań tramwajowych na obiekty budowlane w Krakowie jako na tło dynamiczne ewentualnych przyszłych wpływów dynamicznych metra. Na podstawie wieloletnich badań prowadzonych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] przedstawiono kilka przykładów wpływu drgań tramwajowych na bu-

dynki w Krakowie i na ludzi w tych budynkach. Warto zaznaczyć, że już w drugiej połowie lat osiemdziesiątych XX wieku Instytut wykonywał badania drgań wybranych budynków i budowli w związku z opracowywaną wówczas koncepcją metra lub premetra w Krakowie [3].

Badania drgań zabytkowych budynków w średniowiecznym centrum Krakowa na przykładzie budynków przy ulicy Dominikańskiej 3 i Filharmonii Krakowskiej

Początki komunikacji tramwajowej w Krakowie sięgają roku 1882. Obecnie średniowieczne centrum Krakowa jest otoczone liniami tramwajowymi (ulice Podwale, Straszewskiego, 3 Maja, Basztowa, Westerplatte, św. Gertrudy) oraz przecięte tylko jedną linią tramwajową przebiegającą przez ulicę Dominikańską, plac Wszystkich Świętych i ulicę Franciszkańską (rys. 1). Pozostałe linie tramwajowe w centrum zostały zlikwidowane w latach 1951–1953.

Przy tej linii znajduje się największe skupisko obiektów zabytkowych (których historia w większości sięga średniowiecza) poddanych wpływom dynamicznym, są to m.in. Pałac Biskupi, Pałac Larischa, kościół Świętej Trójcy, kościół Świętego Franciszka i kamienice przy ulicy Dominikańskiej. Linia ta dochodzi także do zabytkowego (z pierwszej połowy XX w.) budynku Filharmonii Krakowskiej.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów drgań budynku D3 przy ulicy Dominikańskiej 3 (rys. 2), wykonanych w roku 2010 dwukrotnie, tj. w lipcu przed remontem torowiska oraz w listopadzie po remoncie torowiska i zastosowaniu maty wibroizolacyjnej w konstrukcji torowiska.

Źródłem drgań były przejazdy eksploatowanych w 2010 roku na tej linii tramwajów. Badania obejmowały pomiar przyspieszeń drgań w celu wykonania oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku (wg skali SWD-II normy [8]) oraz oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku (według normy [9]). Mierzono składowe drgania w kierunkach poziomych x (kierunek prostopadły do osi torów) i y (kierunek równoległy do osi torów) oraz w kierunku pionowym z .

W pomiarach zastosowano specjalistyczną aparaturę do pomiaru przyspieszeń drgań w zakresie częstotliwości od 1 do 100 Hz. Pomiar drgań poziomych, do oceny wpływu drgań na budynek wg skali SWD-II, wykonano w punktach pomiarowych usytuowanych na murze nośnym budynku w poziomie terenu.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2015. Wkład autorów w publikację: K. Stypuła 50%, T. Tataro 50%

Wybrane wyniki analiz wpływu na konstrukcję budynku D3 drgań pomierzonych przed remontem torowiska i po remoncie, z zastosowaniem wibroizolacji, zamieszczono na rysunkach 3 i 4 odpowiednio w przypadku przejazdów tramwajów typu E1+C3 oraz typu NGT6.

Badania wykazały znaczący poziom wpływu drgań na konstrukcję budynku D3. Przed zastosowaniem wibroizolacji drgania generowane przejazdami tramwaju typu NGT6 sięgały do III strefy szkodliwości według skali SWD-II: *drgania szkodliwe dla budynku, powodują lokalne zarysowania i spękania, przez co osłabiają konstrukcję budynku i zmniejszają jego nośność oraz odporność na dalsze wpływy dynamiczne; może nastąpić odpadanie wypraw i tynków*. Po zastosowaniu wibroizolacji torowiska poziom tego wpływu obniżył się do I strefy szkodliwości (drgania klasyfikowane jako nieodczuwalne dla konstrukcji), ale jest bliski osiągnięcia II strefy szkodliwości np. w wyniku pogarszania się stanu szyn na skutek zużycia. Drgania wywołane przejazdami tramwajów typu E1+C3 zarówno przed remontem, jak i po zastosowaniu wibroizolacji mieszczą się w II strefie szkodliwości skali SWD-II: *drgania odczuwalne przez budynek, ale nieszkodliwe dla konstrukcji; następuje tylko przyspieszone zużycie budynku i pierwsze rysy w wyprawach, tynkach itp.* Jest to stan wysoce niezadawalający, bowiem w przypadku budowli zabytkowych traktuje się, że drgania sięgające do II strefy szkodliwości skal SWD mogą być już szkodliwe dla konstrukcji tych obiektów.

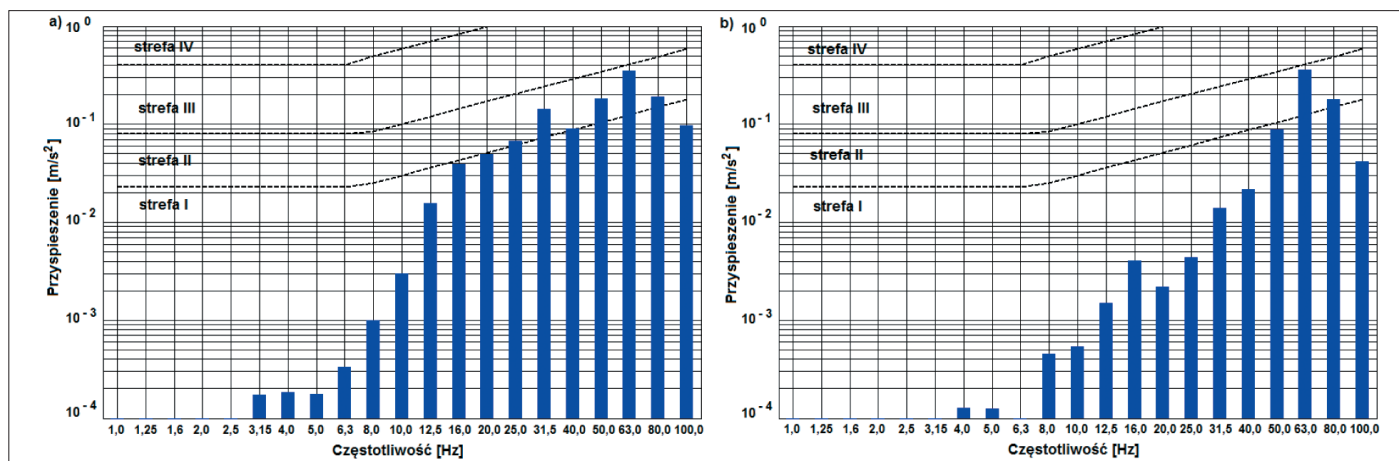
Niekorzystne wyniki uzyskano także, badając wpływ drgań na ludzi przebywających w tym budynku. Pomiar wpływu drgań na ludzi przeprowadzono w dwóch pomieszczeniach: na parterze i na II piętrze budynku D3, zakładając na środku stropów w tych pomieszczeniach punkty do pomiaru drgań w trzech kierunkach. Ocenę wpływu drgań na ludzi wykonano zgodnie z normą PN-B-02171:1988, analizując wartości skuteczne RMS (Root Mean Square) w 1/3-oktawowych (tercjowych) pasmach częstotliwości i porównując je z wartościami odpowiadającymi progowi odczuwalności drgań przez ludzi oraz wartościami odpowiadającymi zapewnieniu ludziom niezbędnego komfortu. Na zamieszczonych rysunkach zaprezen-



Rys. 1. Linie tramwajowe w średniowiecznym centrum Krakowa
Źródło: [1]



Rys. 2. Zabytkowy budynek przy ul. Dominikańskiej 3



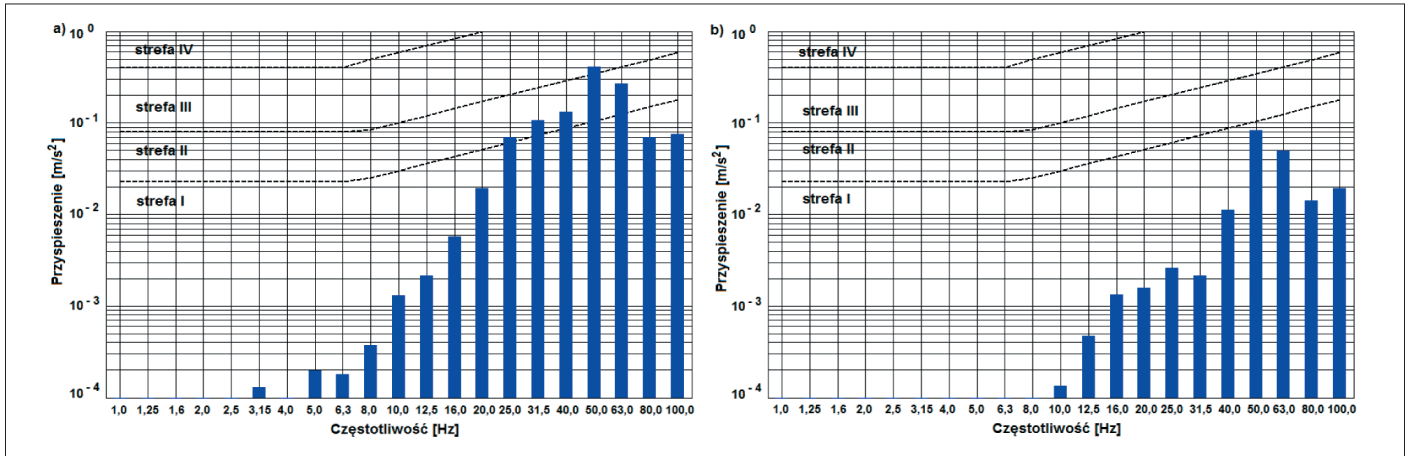
Rys. 3. Analiza wpływu na budynek D3 drgań poziomych podczas przejazdu tramwaju typu E1+C3: a) przed remontem, b) po remoncie z zastosowaniem wibroizolacji
Źródło: [7]

towano wyniki tych analiz – linie ciągłe odpowiadają drganiom działającym wzdłuż podłużnej osi ludzkiego ciała, a linie przerywane – drganiom o kierunku poprzecznym do tej osi. W kolejności od najniższej położonych linie te odpowiadają:

- progowi odczuwalności drgań przez ludzi,
- górnemu poziomowi zapewnienia ludziom wymaganego komfortu w pomieszczeniach mieszkalnych w porze nocnej (od godz. 22 do 6),

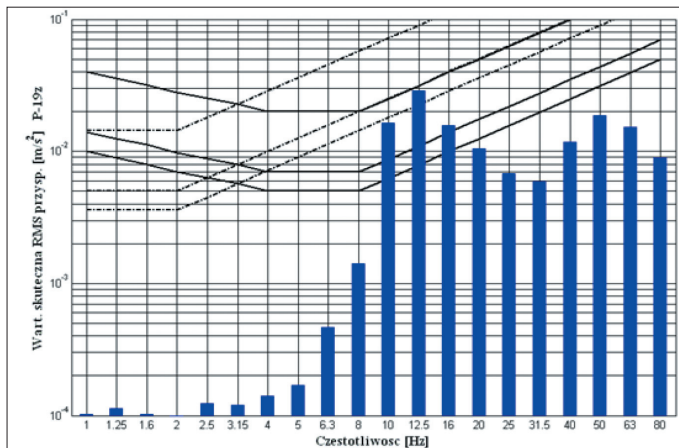
- górnemu poziomowi zapewnienia ludziom wymaganego komfortu w pomieszczeniach mieszkalnych w porze dziennej (od godz. 6 do 22) oraz w pomieszczeniach biurowych i handlowo-usługowych niezależnie od pory ich występowania.

Drgania generowane przejazdami tramwajów przekraczają próg odczuwalności drgań przez ludzi, a także granicę komfortu nocnego w pomieszczeniach mieszkalnych (rys. 5–8).



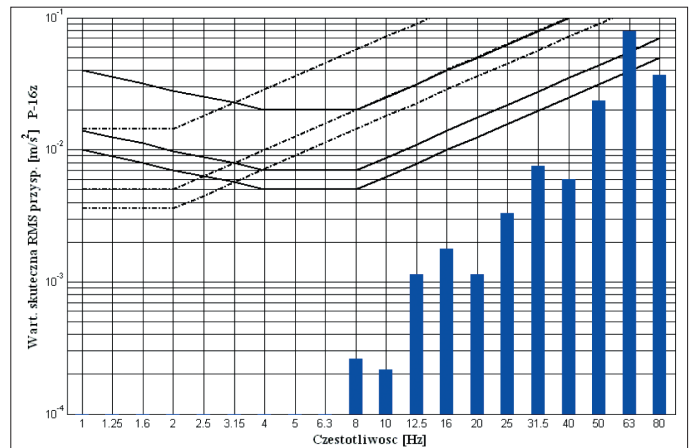
Rys. 4. Analiza wpływu na budynek D3 drgań poziomych podczas przejazdu tramwaju typu NGT6: a) przed remontem, b) po remoncie z zastosowaniem wibroizolacji

Źródło: [7]



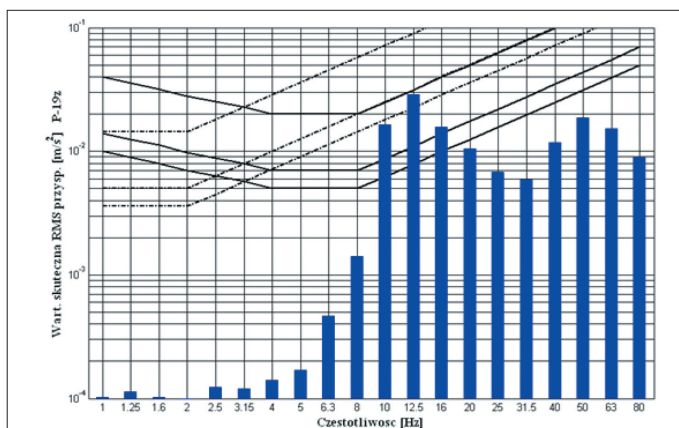
Rys. 5. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych na parterze budynku D3 podczas przejazdu tramwaju typu E1 + C3 przed remontem torowiska

Źródło: [7]



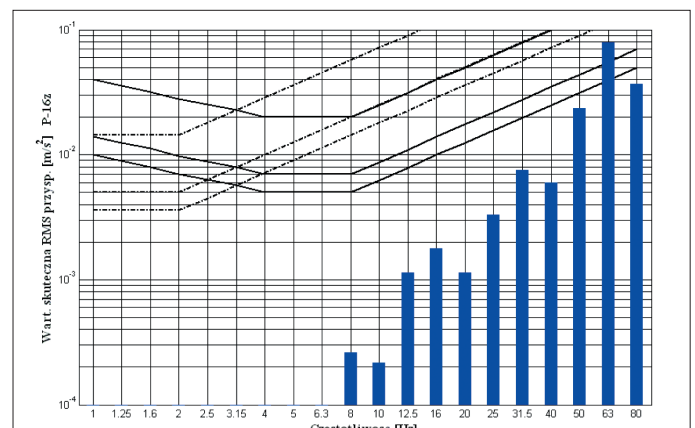
Rys. 6. Analiza wpływu na ludzi drgań poziomych na II piętrze budynku D3 podczas przejazdu tramwaju typu E1 + C3 przed remontem torowiska

Źródło: [7]



Rys. 7. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych na II piętrze budynku D3 podczas przejazdu tramwaju typu E1 + C3 przed remontem torowiska

Źródło: [7]



Rys. 8. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych na parterze budynku D3 podczas przejazdu tramwaju typu E1 + C3 po remoncie torowiska z zastosowaniem wibroizolacji

Źródło: [6]

Problem nadmiernego wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach występuje częściej niż problemy nadmiernego wpływu na konstrukcję budynków. Dotyczy on wielu budynków położonych wzdłuż pierwszej obwodnicy Krakowa (np. przy ulicy Basztowej, Westerplatte, św. Gertrudy, Straszewskiego, Podwale itd.), w tym także takich obiektów jak budynek Filharmonii Krakowskiej (przy ulicy Zwierzynieckiej 1), gdzie hałas i drgania są szczególnie dokuczliwe z uwagi na funkcję tego obiektu. Obok przedstawiono przykładowe wyniki, wykonanych w 2012 roku, badań wpływu drgań tramwajowych na ludzi przebywających w sali koncertowej w tym budynku (rys. 9).

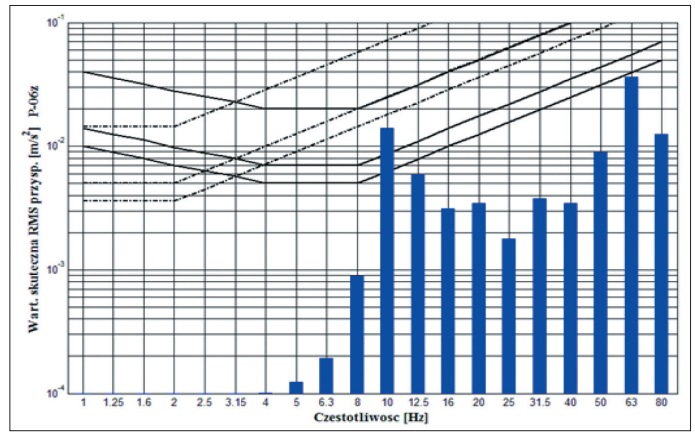
Badania drgań tramwajowych budynków poza ścisłym centrum na przykładzie ulicy Bronowickiej i Kapelanka

W pierwszej dekadzie bieżącego stulecia w Krakowie remontowane były dwa torowiska tramwajowe: Bronowice – osiedle Widok oraz Rondo Grunwaldzkie – ulica Kapelanka, leżące poza ścisłym centrum miasta. Zabudowa mieszkaniowa przy tych torowiskach jest zróżnicowana: od wolnostojących, wysokich 12-kondygnacyjnych, prefabrykowanych budynków wielorodzinnych i budynków niskich wzniesionych metodą tradycyjną na osiedlu Podwawelskim do budynków murowych 1–3 kondygnacyjnych w zabudowie zwartej przy ulicy Bronowickiej. W obu przypadkach wykonano badania dynamiczne budynków przed i po remoncie, co umożliwiło ocenę skuteczności zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego [10, 11]. Podczas pomiarów dynamicznych badano drgania budynków zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie torowisk oraz propagację drgań w podłożu gruntowym [12].

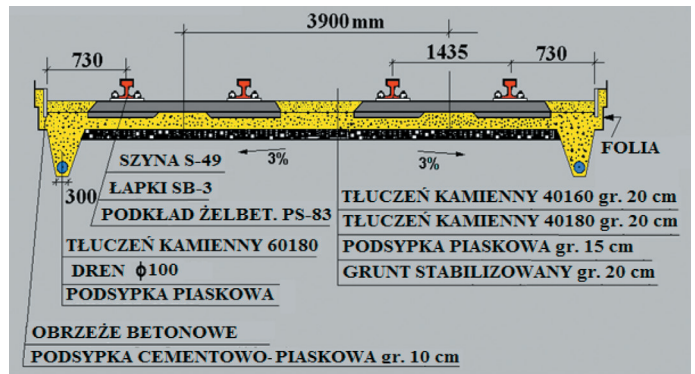
Badania wpływu drgań komunikacyjnych na budynek przy ul. Bronowickiej

Przed i po remoncie torowisko było i jest wydzielone w ulicy. Przed remontem tor tramwajowy zbudowany był z szyn S-49 na podkładach betonowych z przytwierdzeniem pośrednim. Tor zasypany był pod główkę szyny tłuczniem. Podtorze wykonane zostało z tłucznia na warstwie odcinającej z piasku. Nawierzchnia na przejazdach przez torowisko wykonana była z płyt EPT i asfaltu lanego – por. rysunek 10.

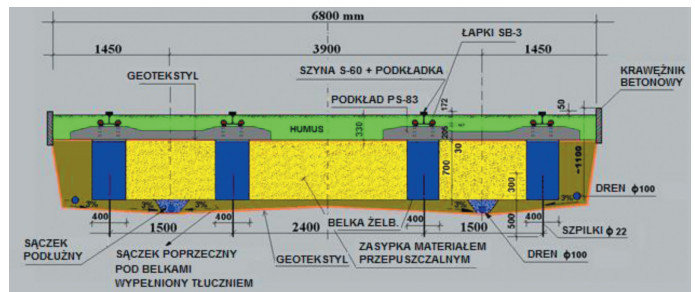
Po remoncie, torowisko po ułożeniu szyn tramwajowych jest zasypane humusem z wysianą, krótko rosnącą trawą. Takie rozwiązanie nazywane jest „tramwajem ekologicznym”. Poza faktem zielonego pasa torowiska warstwa humusu z ukorzoną trawą tworzy dodatkową warstwę tłumiącą hałas i drgania powstające na styku koło-szyna. Istotą tego rozwiązania jest posadowienie toków szynowych na podłożu (por. rys. 11). W tradycyjnym systemie toki szynowe układane są na podkładach drewnianych lub żelbetowych. Powstały układ w postaci drabiny posadowiony jest na kamiennym tłuczniu. W nowym zastosowanym rozwiązaniu zamiast tłucznia zastosowano podłużne belki żelbetowe wykonane na mokro. Na tych belkach ułożono, przytwierdzone za pomocą łapek sprężystych SB-3 do żelbetowych podkładów, toki szynowe S-60. Przestrzeń styku spadku podkładów żelbetowych i belki podłużnej wypełniona została materiałem sklejającym obie powierzchnie. Po stwardnieniu warstwa ta przejmuje rolę reduktora hałasu i drgań.



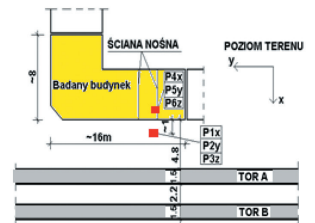
Rys. 9. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych w sali koncertowej budynku Filharmonii Krakowskiej podczas przejazdu tramwaju typu NGT6



Rys. 10. Przekrój przez torowisko w ul. Bronowickiej przed remontem
Źródło: [11]



Rys. 11. Przekrój przez torowisko po remoncie
Źródło: [11]



Rys. 12. Badany budynek przy ul. Bronowickiej; rozmieszczenie czujników pomiarowych i oznaczenie torów jazdy
Źródło: [11]

Zabudowę fragmentu ulicy Bronowickiej, w którym było remontowane torowisko, stanowią budynki mieszkalne 1–3 kondygnacyjne. Do badań wybrano reprezentatywny budynek położony w odległości około 4.8 metra od najbliższej biegnących torów tramwajowych. Budynek wzniesiono w 1936

roku w zabudowie zwartej jako murowy, dwukondygnacyjny plus strych, podpiwniczony. Budynek przekryty jest drewnianym dachem pokrytym blachą. Wysokość kondygnacji około 3 metry. Stropy są drewniane. Rzut budynku jest nieregularny. Budynek jest w dobrym stanie technicznym; stwierdzono w nim zarysowanie faset, co jest typowe dla połączenia podatnego drewnianego stropu i sztywnych ścian murowych. Widok budynku, jego wymiary, usytuowanie względem torów i oznaczenia oraz rozmieszczenie czujników pomiarowych pokazano na rysunku 12.

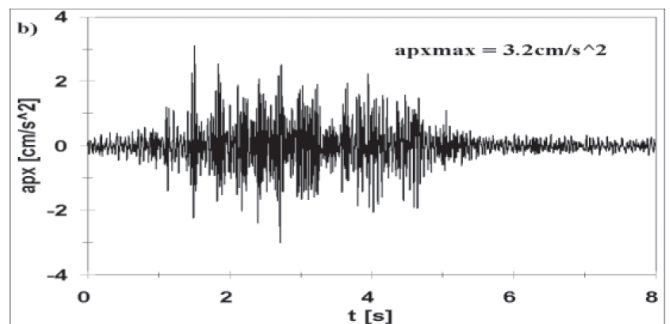
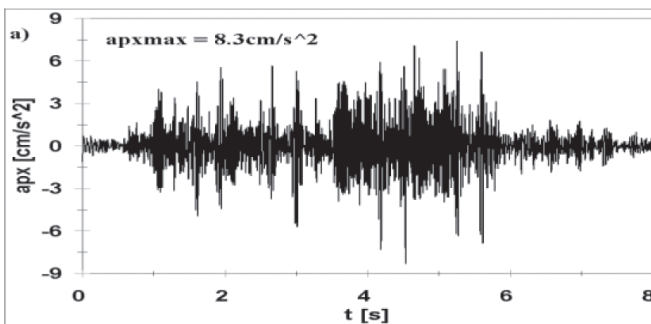
Do oceny szkodliwości wpływu drgań dla przedmiotowego budynku wykorzystuje się skalę wpływów dynamicznych SWD-II i procedurę zawartą w normie PN-85/B-02170 [7], co uzasadnione jest m.in. konstrukcją, wymiarami i kształtem rzutu poziomego przedmiotowego budynku. Aby dokonać tej oceny, wstępnie analizowano wszystkie zarejestrowane przebiegi drgań poziomych budynku w poziomie terenu, a następnie do dalszej szczegółowej analizy wybrano te, które reprezentują najniekorzystniejsze drgania.

Na rysunkach 13a i b pokazano przykładowe przebiegi najintensywniejszych przebiegów drgań składowych poziomych x drgań analizowanego budynku pomierzonych w po-

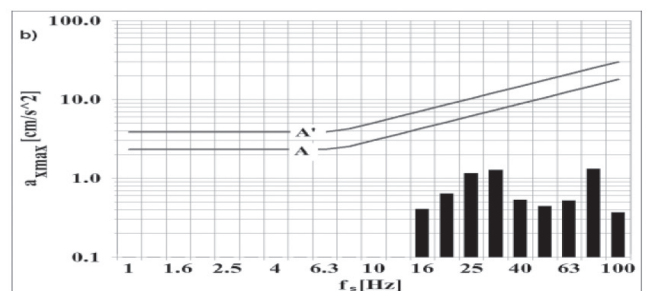
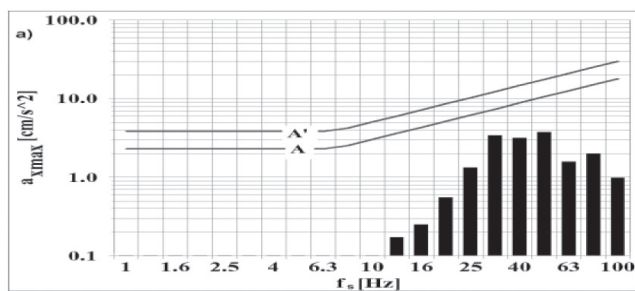
ziomie terenu wzbudzonych przejazdem tramwaju z wozami typu 105N przed i po remoncie torowiska. Przy przejazdach torem A i B największe rzędne odpowiadały środkowym częstotliwościom $f_s > 25\text{Hz}$. Na rysunkach 14a i b przedstawiono wyniki analiz tercjowych przebiegów składowej poziomej (x) najintensywniejszych drgań.

Wyznaczone z analiz rzędne maksymalnych amplitud drgań w poszczególnych pasmach tercjowych pozostają w I strefie skali SWD-II zarówno dla przebiegów drgań zarejestrowanych przed, jak i po remoncie torowiska. Stąd też drgania wzbudzone przejazdami torem A tramwajów z wozami 105N są nieodczuwalne, a więc i nieszkodliwe dla konstrukcji budynku.

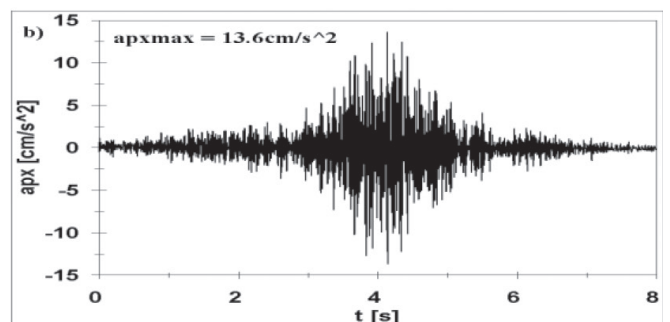
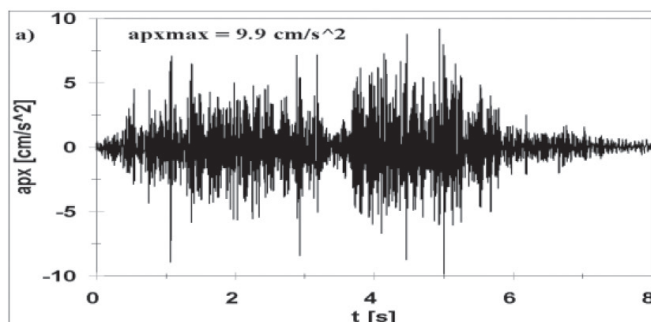
Charakter przebiegów drgań wzbudzanych przejazdami tramwajów z wozami GT6+B4 torem A, odpowiednio przed i po remoncie torowiska, jest odmienny od drgań wzbudzanych przejazdami tramwajów z wozami 105N. Na rysunkach 15a i b pokazano przykładowe przebiegi składowych poziomych x najintensywniejszych drgań pomierzonych w budynku w poziomie terenu wzbudzonych przejazdem tramwaju torem A. Największe rzędne amplitud drgań w poszczególnych pasmach tercjowych otrzymano



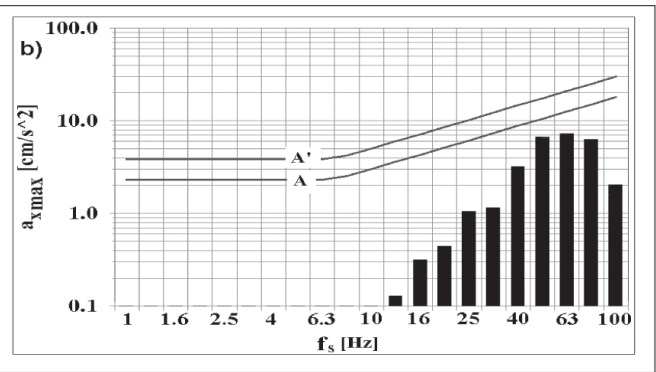
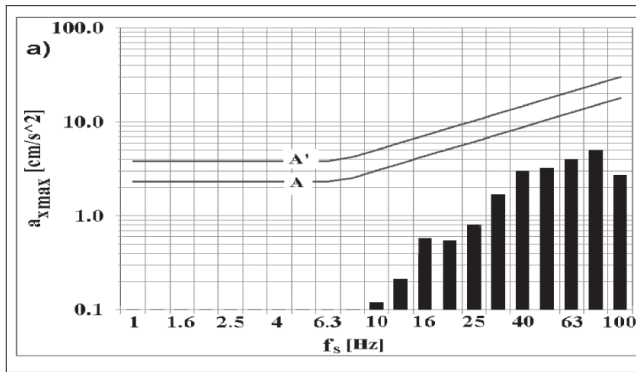
Rys. 13. Przebiegi najintensywniejszych drgań budynku w poziomie terenu przed (a) i z (b) torowiska wzbudzone przejazdami tramwajów z wozami 105N
Źródło: [11]



Rys. 14. Wyniki analizy tercjowej (1/3 oktawowej) przebiegów drgań z rys. 13a (a) i z rys. 13b (b) Źródło: [11]



Rys. 15. Przebiegi najintensywniejszych drgań budynku w poziomie terenu przed (a) i po remoncie (b) torowiska wzbudzone przejazdami tramwajów z wozami GT6+B4
Źródło: [11]



Rys. 16. Wyniki analizy trójowej (1/3 oktawowej) przebiegów drgań z rys. 15a (a) i z rys. 15b (b)
Źródło: [11]

dla środkowych częstotliwości $f_s \gg 40\text{Hz}$ i pozostają one w I strefie skali SWD-II zarówno dla przebiegów drgań zarejestrowanych przed, jak i po remoncie torowiska (por. rysunki 16a, b). Maksymalne amplitudy rozłożonych drgań odpowiadają wyższym częstotliwościom, niż było to w przypadku przejazdów torem A tramwajów z wozami 105N. Drgania wzbudzone przejazdami tramwajów z wozami GT6+B4 torem A są nieodczuwalne, a więc i nieszkodliwe dla konstrukcji budynku.

Przejazdy torem B tramwajów z wozami 105N i GT6+B4 wzbudzają niższy poziom najintensywniejszych drgań. Wyniki analizy trójowej przebiegów tych drgań (tu nie prezentowanych) wskazują, że są również nieszkodliwe dla konstrukcji przedmiotowego budynku.

Badania wpływu drgań komunikacyjnych na budynek przy ul. Kapelanka

W trakcie badań dynamicznych drgania budynku były mierzone na stanowisku pomiarowym nr 6 w poziomie terenu (por. rysunek 17).

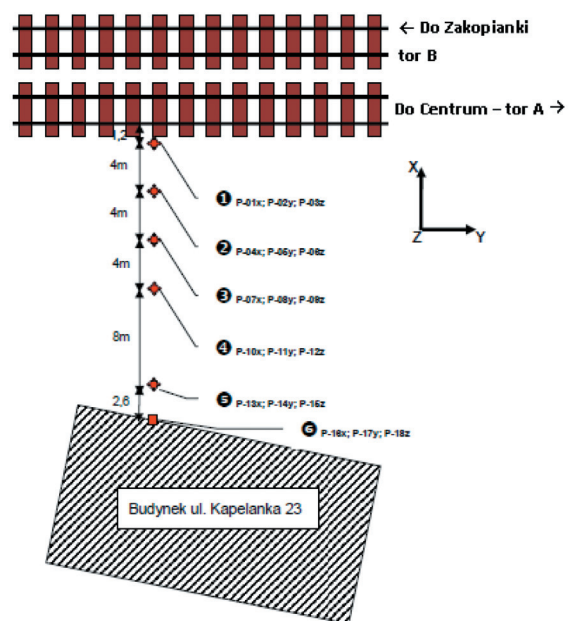
Na podstawie danych z pracy [12] w tabeli 1 zestawiono wartości maksymalnych składowych poziomych x i y oraz składowej pionowej z przyspieszeń złożonych drgań budynku w poziomie terenu w odległości 23.8 metra od torowiska (czujniki P-16x, P-17y i P-18z), przy przejazdach torem A, zróżnicowanych typów tramwajów z dedykowanymi prędkościami od 10 do 50 km/h.

Przy przejazdach tramwajów torem A wartości maksymalnych składowych przyspieszeń złożonych drgań budynku pomierzonych w poziomie terenu wynoszą:

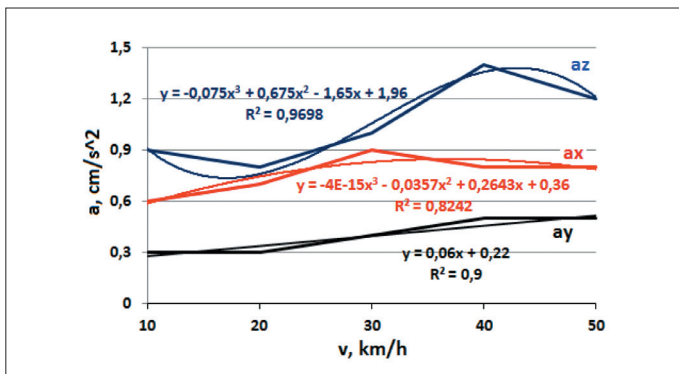
- składowa pozioma x – w przypadku przejazdów tramwajów z wozami typu E1+C3 i NTG6 maksymalna wartość składowej poziomej x przyspieszeń drgań ax nie przekracza 1 cm/s^2 , a w przypadku tramwaju z wozami 105N przy prędkości $v = 20, 30$ i 40 km/h wartość ax przekracza 1 cm/s^2 i osiąga wartość 1.4 cm/s^2 przy $v = 40\text{ km/h}$;
- składowa pozioma y – maksymalna wartość składowej poziomej y przyspieszeń drgań ay nie przekracza 0.5 cm/s^2 ;
- składowa pionowa z – charakteryzuje się większą intensywnością niż składowe poziome. W przypadku przejazdów tramwaju z wozami typu E1+C3 maksymalna wartość przyspieszenia składowej pionowej

Tabela 1

Zestawienie maksymalnych wartości składowych przyspieszeń (w cm/s^2) złożonych drgań przy przejazdach tramwajów torem A			
Numer i opis pomiaru	P-16x	P-17y	P-18z
	Punkt pomiarowy nr 6 - budynek 23.8m od toru A		
Pomiar 1 – Tramwaj E1-C3 10km/h	0.6	0.3	0.6
Pomiar 2 – Tramwaj E1-C3 20km/h – zbyt szybkie wyhamowanie	0.7	0.4	0.9
Pomiar 3 – Tramwaj E1-C3 20km/h	0.7	0.5	0.8
Pomiar 4 – Tramwaj E1-C3 30km/h	0.7	0.5	0.9
Pomiar 5 – Tramwaj E1-C3 40km/h	0.6	0.4	1.0
Pomiar 6 – Tramwaj E1-C3 50km/h	0.7	0.4	1.0
Pomiar 7 – Tramwaj NGT6 10km/h	0.6	0.3	0.9
Pomiar 8 – Tramwaj NGT6 20km/h	0.7	0.3	0.8
Pomiar 9 – Tramwaj NGT6 30km/h	0.9	0.4	1.0
Pomiar 10 – Tramwaj NGT6 40km/h	0.8	0.5	1.4
Pomiar 11 – Tramwaj NGT6 50km/h	0.8	0.5	1.2
Pomiar 12 – Tramwaj 105N 40km/h	1.4	0.4	1.9
Pomiar 13 – Tramwaj 105N 40km/h	0.9	0.4	1.5
Pomiar 14 – Tramwaj 105N 10km/h – w końcowej fazie przyspieszenie	0.8	0.3	1.2
Pomiar 15 – Tramwaj 105N 20km/h	1.1	0.4	1.7
Pomiar 16 – Tramwaj 105N 30km/h	1.3	0.5	1.7
Pomiar 17 – Tramwaj 105N 50km/h	0.9	0.4	1.7



Rys. 17. Sytuacja – badany budynek, oznaczenia czujników i rozmieszczenie punktów pomiarowych
Źródło: [12]



Rys. 18. Zmiana maksymalnych wartości składowych przyspieszeń drgań budynku w poziomie terenu w zależności od prędkości przejazdów tramwajów z wozami typu NGT6

z przyspieszeń drgań az nie przekracza 1 cm/s^2 . W przypadku tramwaju NGT6 maksymalna wartość az wynosi 1.4 cm/s^2 przy prędkości przejazdu $v = 40\text{ km/h}$. W przypadku przejazdów tramwaju z wozami 105N intensywność składowej z jest największa i przy $v = 40\text{ km/h}$ osiąga wartość $az = 1.9\text{ cm/s}^2$.

Na rysunku 18 pokazano przykładowo zmianę maksymalnych wartości składowych przyspieszeń drgań budynku (ax , ay i az) w poziomie terenu w zależności od prędkości przejazdów tramwajów z wozami typu NGT6 wraz liniami trendu i ich opisami matematycznymi i wartościami współczynnika linii trendu R^2 . Podobne zależności przy przejazdach tramwajów z wozami typu 105N, pokazano na rysunku 19.

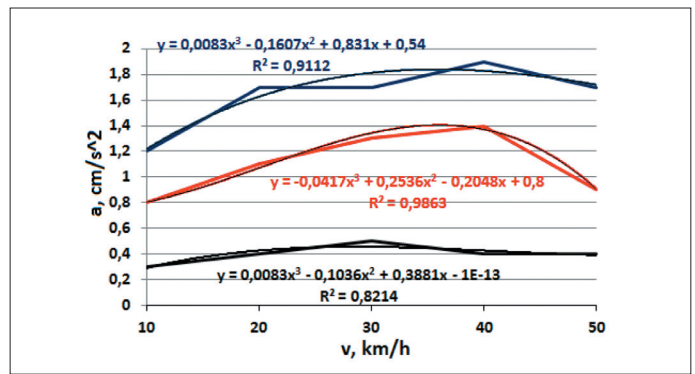
Poziom wzbudzonych drgań jest niski i w związku z tym rejestrowane drgania przy przejazdach trzech typów tramwajów nie jest szkodliwy dla konstrukcji budynku. Przy przejazdach tramwajów torem B wartości maksymalnych składowych przyspieszeń złożonych drgań budynku pomierzonych w poziomie terenu są mniejsze niż przy przejazdach tramwajów torem A.

Podsumowanie

W szeregu przypadków linie tramwajowe w Krakowie wywołują ponadnormatywny wpływ na konstrukcję budynków i na ludzi przebywających w tych budynkach. Dotyczy to również niekorzystnego wpływu drgań na obiekty zabytkowe.

Podobnie jak w przypadku linii metra wpływy te można ograniczyć, stosując wibroizolację w konstrukcji torowisk. Warunkiem osiągnięcia odpowiedniej skuteczności takiej wibroizolacji jest jej zaprojektowanie. Polega ono na przeprowadzeniu obliczeń symulacyjnych celem dobrania parametrów wibroizolacji tak, aby prognozowany po zastosowaniu wibroizolacji wpływ drgań na ludzi w budynkach mieścił się poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi (por. [5, 6]).

Skuteczność wibroizolacji zależy m.in. od typu tramwaju, warunków gruntowo-wodnych, jak i od konstrukcji budynków odbierających drgania. Stąd w różnych lokalizacjach parametry wibroizolacji konieczne do osiągnięcia wymaganej skuteczności wibroizolacji będą się różnić. Dla przykładu, w przypadku stosowanych często mat wibroizolacyjnych, pod płytami torowymi, parametrami tymi są: gęstość masy,



Rys. 19. Zmiana maksymalnych wartości składowych przyspieszeń drgań budynku w poziomie terenu w zależności od prędkości przejazdów tramwajów z wozami typu 105N

sztwywność statyczna i dynamiczna maty, tłumienie oraz grubość maty. Dlatego rozwiązanie sprawdzone w jednym miejscu a skopiowane, bez prognozy skuteczności, w innych lokalizacjach nie zawsze będzie skuteczne, a w skrajnych przypadkach może prowadzić nawet do wzrostu poziomu emitowanych do otoczenia drgań.

Literatura

1. Ciesielski R., Pieronek M., Stypuła K., *Ramowy program badań wpływu drgań komunikacyjnych na budowlę zabytkową Krakowa*, Materiały sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowlę”, Kraków 1985.
2. Ciesielski R., Pieronek M., Stypuła K., *Kinematic excitation of building vibrations caused by tramway traffic in the Old City of Cracow*, Czechoslovak Conf. Dynamics of Engineering Structures, Smolenice-Bratislava 1985.
3. Ciesielski R., Stypuła K., *Wpływy dynamiczne na budowlę w związku z budową metra w Krakowie*, Konf. nauk.-techn. Budowa geologiczna, warunki hydrogeologiczne i geotechniczne podłoża Krakowa. Kraków 1991.
4. Ciesielski R., Bogusz J., Stypuła K., Tataro T., Abratański A., *Analiza odpowiedzi budowli zabytkowych na wpływy dynamiczne parasejsmiczne, diagnostyka techniczna i metody zabezpieczenia*, w: *Naukowe podstawy rewaloryzacji budynków i zespołów zabytkowych na tle rozwoju miast*, Politechnika Krakowska, Kraków 1997.
5. Kawecki J., Stecz P., Stypuła K., *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*, „Czasopismo Techniczne” 2011, z. 19. Budownictwo z. 3-B Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011.
6. Kawecki J., Stypuła K., *Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływanie komunikacyjne*, Wydawnictwo PK, Kraków 2013.
7. PN-B-02170:1985. *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
8. PN-B-02171:1988. *Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*.
9. Stecz P., Stypuła K., *Przykłady pomiarów drgań komunikacyjnych w budynkach wykonanych przez akredytowane laboratorium*, Materiały V Seminarium „Wpływ hałasu i drgań wywołanych eksploatacją transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach – diagnostyka i zapobieganie”, WIBROSZYN-2010. Kraków, 9–10 września 2010.
10. Tataro T., *Dynamic effectiveness of „ecological tramway” on building vibration*, Proc. 2nd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, Slovak Republic, Tale, May 2003.
11. Tataro T., *Badanie skuteczności dynamicznej nowego rozwiązania ułożenia torów tramwajowych*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2004, nr 4.
12. Tataro T., Kuboń P., *Prognoza poziomu drgań gruntu w związku z planowaną linią tramwajową w Krakowie*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2013, nr 12.