

# Wpływ balastowania torowiska na drgania parasejsmiczne w eksploatacji infrastruktury tramwajowej

Tomasz NOWAKOWSKI<sup>1</sup>, Tomasz STAŚKIEWICZ<sup>2</sup>

## Streszczenie

Wzmożony ruch tramwajów w obszarach zurbanizowanych, jest często przyczyną wzrostu poziomu generowanych drgań parasejsmicznych. Minimalizowanie tych niekorzystnych oddziaływań jest prowadzone między innymi przez opracowywanie i wdrażanie różnych konstrukcji torowych. W Polsce najczęściej stosowaną konstrukcją są nawierzchnie podsypkowe, które nawet jeśli są zbudowane z tych samych części składowych, różnią się pomiędzy sobą balastowaniem toru. W artykule przedstawiono problem drgań komunikacyjnych związany z realizacją pracy przewozowej tramwajów w obszarach silnie zurbanizowanych. Opisano założenia metodyczne eksperymentalnych badań porównawczych torowisk tramwajowych w aspekcie drgań parasejsmicznych, generowanych w pobliżu torowiska. Badania zrealizowano na dwóch wydzielonych torowiskach sieci tramwajowej Poznania w warunkach normalnej eksploatacji jednego typu tramwajów. Na podstawie wykonanych pomiarów sygnałów przyspieszeń drgań parasejsmicznych przeprowadzono analizę ilościową i jakościową zarejestrowanych sygnałów. W analizie wyników uwzględniono różnice w wykonaniu torowisk oraz stan techniczny określony przez zarządcę infrastruktury.

**Słowa kluczowe:** torowisko tramwajowe, tramwaj, drgania parasejsmiczne, badania eksperymentalne

## 1. Wprowadzenie

Obserwowany obecnie rozwój obszarów zurbanizowanych przyczynia się do wzrostu potrzeb transportowych mieszkańców, które są efektywnie zaspokajane przez wykorzystanie tramwajów w ich systemie transportowym [3, 11]. Mimo wielu istotnych korzyści z funkcjonowania sieci tramwajowych dla rozwoju miast i mobilności mieszkańców, udział tramwajów w ruchu miejskim przyczynia się m.in. do wzrostu poziomu generowanych drgań parasejsmicznych w otoczeniu torowisk. Są one konsekwencją dynamicznej interakcji pomiędzy tramwajem a ustrojem torowym. Drgania te negatywnie wpływają na środowisko, a w szczególności na strukturę budynków i ludzi zamieszkujących obszary oddziaływania [1, 13]. Minimalizowanie tych niekorzystnych oddziaływań jest prowadzone między innymi przez wdrażanie różnych konstrukcji torowisk. W polskich miastach najczęściej stosowane są klasyczne torowiska podsypkowe, których założenia projektowane dotyczyły obniżenia skutków oddziaływań dynamicznych pochodzących od pojazdów. Jednak nawet w obrębie tego typu konstrukcji, torowiska zbudowane z tych samych elemen-

tów składowych, różnią się między sobą wykonaniem na poszczególnych odcinkach sieci w aspekcie balastowania toru.

## 2. Balastowanie toru

Źródłem procesów drganiowych w układzie pojazd szynowy – tor są zjawiska dynamiczne, określone jako zmienne w czasie wzbudzenia siłowe w miejscu styku koła z szyną. Głównie wpływają na nie czynniki związane zarówno z pojazdem szynowym, np. prędkość jazdy, stan techniczny układu biegowego, jak również czynniki związane z torowiskiem, np. stan powierzchni tocznej szyn lub odkształcenia sprężyste nawierzchni i podtorza. Czynniki wpływające na poziom obserwowanych drgań w ustroju torowym opisano m.in. w pracach [6, 10, 12, 13, 15].

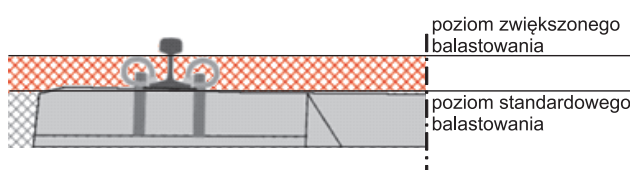
Siły w miejscu styku koło – szyna pobudzają torowisko do drgań w trzech kierunkach i propagują przez poszczególne elementy składowe torowiska, aż do gruntu [13, 15]. Drgania transmitowane przez podłoże gruntowe są przekazywane na budynki, gdzie przebywający w nich ludzie odbierają je w spo-

<sup>1</sup> Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Zakład Pojazdów Szynowych; e-mail: tomasz.zb.nowakowski@doctorate.put.poznan.pl.

<sup>2</sup> Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Zakład Pojazdów Szynowych; e-mail: tomasz.staskiewicz@put.poznan.pl.

sób bierny [14]. Jest to jeden z argumentów za ograniczaniem drgań u źródła lub na drodze propagacji. W przypadku torowisk tramwajowych konieczne jest zastosowanie w ich konstrukcji elementów wibroizolacyjnych zwłaszcza na liniach tramwajowych o dużym natężeniu ruchu w centrach miast. Oprócz elementów dodatkowo wprowadzanych do konstrukcji, tj. mat antywibracyjnych chroniących krytyczne obszary przed drganiami [7], zwrócono uwagę na elementy podsypkowej konstrukcji wydzielonych torowisk tramwajowych licznie występujących w polskich miastach. Jej podstawową częścią jest podsypka, która ze względu na stosunek jej masy do masy szyn i podkładów, pełni główną rolę w tłumieniu pomiędzy czynną masą pojazdu a bierną masą podtorza [5]. Wypełnienie konstrukcji toru podsypką, określa się mianem balastowania (ang., fr. – *ballast*, niem. *ballast* – podsypka). W zależności od sektora branży transportu szynowego spotyka się również określenie „zabudowy”, które jest aberracyjne i w przypadku torowisk wbudowanych w jezdnie odnosi się w swoim znaczeniu do spełnienia warunków technicznych umożliwiających przejazdu pojazdów samochodowych, np. nawierzchnia drogowa asfaltowa czy też brukowa torowiska. Natomiast w przypadku torowisk wydzielonych z jezdni dotyczy pokrycia toru innym materiałem niż tłuczeń, np. trawą [7].

Poziom balastowania toru jest ściśle określony w normach i wytycznych technicznych i różni się w zależności od środka transportu szynowego. Na kolei poziom ten nie może przekraczać 0,05 m poniżej dolnej powierzchni stopki szyny. Jest to uwarunkowane spełnieniem wymagań dotyczących rezystancji toru dla poprawnej pracy urządzeń sterowania ruchem kolejowym [2]. Natomiast zgodnie z wytycznymi [16], w konstrukcji wydzielonych torowisk tramwajowych poziom balastowania jest określony do górnej powierzchni podkładów. Jednak możliwe są odstępstwa, które dotyczą przypadku konieczności specjalnego wytłumienia drgań i hałasu, jak również konstrukcji torów w łukach o promieniu mniejszym od 100 m. Wówczas możliwe jest zasypanie toru tłucznem do spodu główki szyny. Możliwe poziomy balastowania torowiska tramwajowego przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Dopuszczalne poziomy balastowania torowiska tramwajowego [opracowanie własne]

Fig. 1. Permissible depths of tram tracks ballasting [the authors' own elaboration]

Zwiększenie balastowania torowiska jest metodą ograniczenia drgań u źródła przez ingerencję w konstrukcję nawierzchni, czyli zwiększenie masy podsypki, co wpływa dodatnio na stosunek masy podsypki do masy szyn i podkładów. Jest to również metoda ograniczenia drgań szynki szyny, głównego źródła hałasu w szynie.

Niniejszy artykuł zawiera wyniki eksperymentalnych badań porównawczych torowisk tramwajowych różniących się poziomem balastowania w aspekcie drgań parasejsmicznych generowanych przez tramwaj w ruchu w obszarach zurbanizowanych.

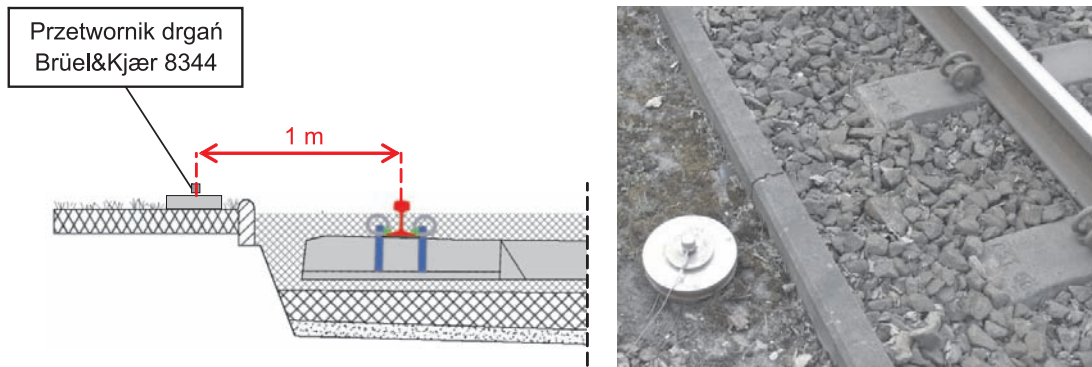
### 3. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na wydzielonych torowiskach tramwajowych w Poznaniu. W celu redukcji możliwych zakłóceń zewnętrznych, odcinki wybrane do badań stanowiły prosty tor bezстыkowy prosty w planie, umożliwiający ruch tramwaju ze stałą prędkością. W przeprowadzonych badaniach bazowano na odpowiedzi ustroju torowego na wymuszenia generowane przy przejeździe tramwaju w postaci przyspieszeń drgań parasejsmicznych gruntu dla kierunku pionowego – prostopadłego do powierzchni gruntu. Punkty pomiarowe były zlokalizowane na powierzchni gruntu, w odległości 1 m od zewnętrznego toku szynowego. Sposób i przykład usytuowania przetwornika drgań przy torze przedstawiono na rysunku 2.

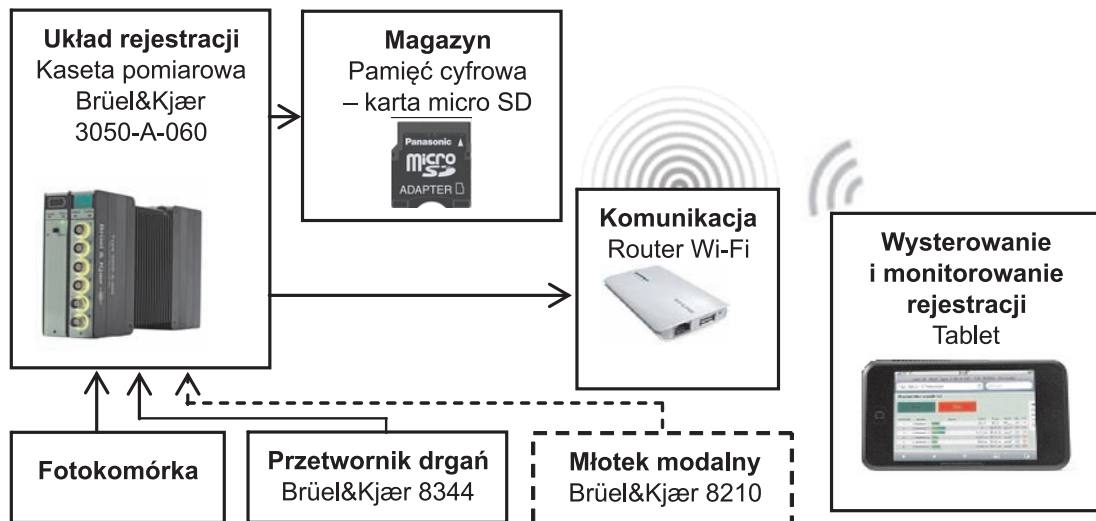
W celu rejestracji sygnałów drganiowych wykorzystano piezoelektryczny przetwornik drgań, spełniający wymagania techniczne dla prawidłowego rejestrowania drgań generowanych przez elementy infrastruktury transportowej o charakterze parasejsmicznym [4]. Schemat toru pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.

W czasie wykonywania pomiarów panowały stałe warunki atmosferyczne (zgodne z wymaganiami ISO 3095:2013). Rejestracja i analiza sygnałów była prowadzona na bazie okna czasowego, w którym tramwaj znajdował się w linii przekroju poprzecznego toru i przetwornika drgań. W tym celu wykorzystano znacznik początku i końca tramwaju, przy użyciu sygnału napięciowego fotokomórki. Sposób selekcji czasowej sygnału przedstawiono schematycznie na rysunku 4.

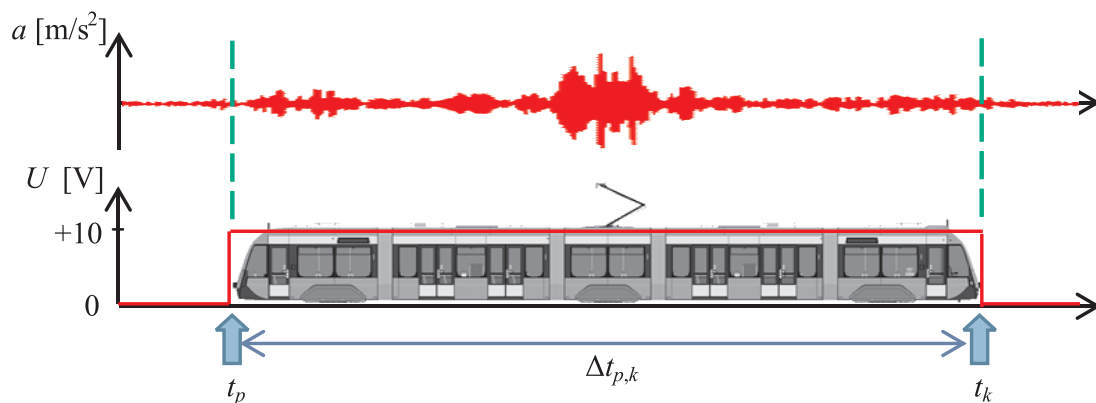
Dodatkowo, z uwagi na brak informacji o wartościach sił wymuszających generowanych przy przejeździe tramwaju uwzględniono dwa mierzalne, wpływające na nie parametry, tj. prędkość tramwaju oraz napełnienie pasażerami. Prędkość tramwajów wyznaczono pośrednio ze wskazań sygnału napięcia fotokomórki, natomiast napełnienie pasażerami wyznaczono na drodze obserwacji wnętrza tramwaju i oceny liczby pasażerów według skali od 0 do 10, gdzie 10 oznaczało całkowite zapełnienie tramwaju, a 0 oznaczało brak pasażerów.



Rys. 2. Lokalizacja punktu pomiarowego – schemat (po lewej) oraz przykładowy widok (po prawej) [opracowanie własne]  
 Fig. 2. Location of measuring point – scheme (left) and example view (right) [the authors' own elaboration]



Rys. 3. Tor pomiarowy wykorzystany do akwizycji sygnałów [opracowanie własne]  
 Fig. 3. Measuring chain used for signal acquisition [the authors' own elaboration]



Rys. 4. Metoda pomiaru czasu przejazdu tramwaju przez badane przekroje torów;  $t_p$  – chwila czasowa dla początku pomiaru,  $t_k$  – chwila czasowa końca pomiaru,  $\Delta t_{p,k}$  – czas przejazdu tramwaju przez przekrój pomiarowy [opracowanie własne]  
 Fig. 4. The method of measuring the travel time through examined sections of tram track;  $t_p$  – beginning of measurement,  $t_k$  – end of measurement,  $\Delta t_{p,k}$  – travel time [the authors' own elaboration]



## 4. Obiekty badań

### Torowisko tramwajowe

Spośród odcinków spełniających postawione wymagania wyselekcjonowano dwa odcinki wydzielonych torowisk tramwajowych w Poznaniu różniących się poziomem balastowania, zlokalizowane przy ul. Warszawskiej i ul. Starołęckiej. Wybrane odcinki torowisk są zbudowane z szyn typu kolejowego 49E1, przytwierdzonych za pomocą przytwierdzenia sprężystego SB-3 do podkładów strunobetonowych PST-98. Badane odcinki torowisk przedstawiono na rysunku 5.

Ze względu na wpływ stanu technicznego toru na oddziaływania dynamiczne wynikające z interakcji pojazd – tor, sprawdzono ocenę stanu technicznego obu torowisk oraz czas eksploatacji od ostatniej modernizacji. Dane zarządcy infrastruktury [8] wskazują, że odcinki torów wybrane do badań są w najlepszym stanie technicznym. Natomiast czas

eksploatacji od ostatniej modernizacji torowiska przy ul. Warszawskiej wynosi 13 lat (2002 r.), a torowiska przy ul. Starołęckiej 12 lat (2003 r.).

### Tramwaj

W celu porównania uzyskanych danych, ujednolicono źródła obciążeń dynamicznych torowisk przez ograniczenie do jednej liczby badanych typów tramwajów. Redukcji dokonano na podstawie kryteriów dotyczących wykonywania regularnych przewozów na wybranych odcinkach infrastruktury oraz kryterium dotyczącego nowoczesnej konstrukcji tramwaju produkowanego seryjnie. W wyniku przeprowadzonej analizy ilościowej tramwajów kursujących na wybranych odcinkach infrastruktury torowej oraz na podstawie sformułowanych kryteriów, do badań wybrano tramwaje typu Solaris Tramino S105p. Widok badanego typu tramwaju oraz główne cechy konstrukcyjne przedstawiono na rysunku 6.



Starołęcka



Warszawska

Rys. 5. Widok badanych torowisk tramwajowych [fot. autorzy]

Fig. 5. View of the examined tracks [photo: authors]



Długość całkowita [m]	32,026
Szerokość pudła [mm]	2400
Wysokość przy złożonym pantografie [mm]	3760
Masa własna [t]	42,5
Liczba członów	5
Liczba wózków	3
Wózki napędowe	2
Liczba osi	6
Maksymalna prędkość [km/h]	70

Rys. 6. Widok badanego tramwaju typu Solaris Tramino S105p oraz jego główne cechy konstrukcyjne [9]

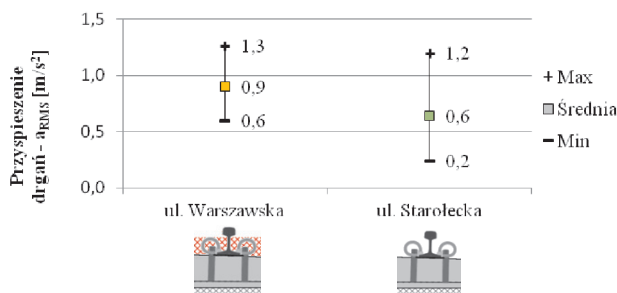
Fig. 6. Examined tram – type Solaris Tramino S105p and main constructional features [9]

Tramwaj jest eksploatowany w Poznaniu od 2011 roku, a operator taboru dysponuje obecnie 45 pojazdami. Zastosowane w tramwaju wózki jezdne wykorzystują klasyczne zestawy kołowe, z kołami wyposażonymi w gumowe wkładki tłumiące.

## 5. Wyniki badań

### Analiza ilościowa

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano sygnały czasowe przyspieszeń drgań parasejsmicznych z 18 przejazdów tramwajów na torowisku przy ul. Warszawskiej oraz z 12 przejazdów na torowisku przy ul. Starołęckiej. Dla każdego zarejestrowanego sygnału czasowego przyspieszeń drgań obliczono wartości skuteczne – RMS (Root Mean Square), a następnie uśredniono uzyskane wartości w zależności od lokalizacji pomiarowej, co przedstawiono na rysunku 7.



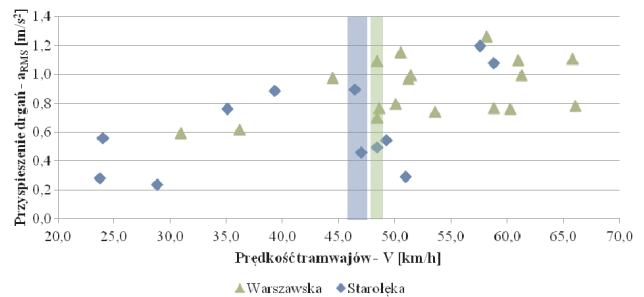
Rys. 7. Średnie wartości RMS przyspieszeń drgań parasejsmicznych uzyskane na badanych torowiskach [opracowanie własne]

Fig. 7. Average RMS values of paraseismic vibration acceleration on the examined tracks [the authors' own elaboration]

Z pomiarów wynika, że wyższą średnią wartość przyspieszeń drgań parasejsmicznych na poziomie 0,9 m/s<sup>2</sup> zarejestrowano na torowisku przy ul. Warszawskiej, charakteryzującym się większym balastowaniem. Dla torowiska o mniejszym balastowaniu przy ul. Starołęckiej, wartość ta była niższa o 30% i wyniosła 0,6 m/s<sup>2</sup>. Analiza skrajnych wartości przyspieszeń drgań umożliwiła określenie zmienności obserwowanej miary drgań na poszczególnym torowisku. Największy rozstęp uzyskanych wartości przyspieszeń drgań parasejsmicznych dotyczył torowiska przy ul. Starołęckiej, a dla torowiska przy ul. Warszawskiej wartość rozstępu była około 40% niższa, przy czym maksymalne zarejestrowane wartości dla obu badanych torowisk były zbliżone.

Analiza wyników pomiarów nie uwzględnia wpływu prędkości tramwaju na uzyskane wartości przyspieszeń drgań. W tym celu sporządzono charaktery-

styki uzyskanych wartości RMS przyspieszeń drgań w funkcji prędkości tramwajów według lokalizacji pomiarowej, co przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wartości RMS przyspieszeń drgań dla wszystkich przejazdów tramwajów w zależności od punktu pomiarowego [opracowanie własne]

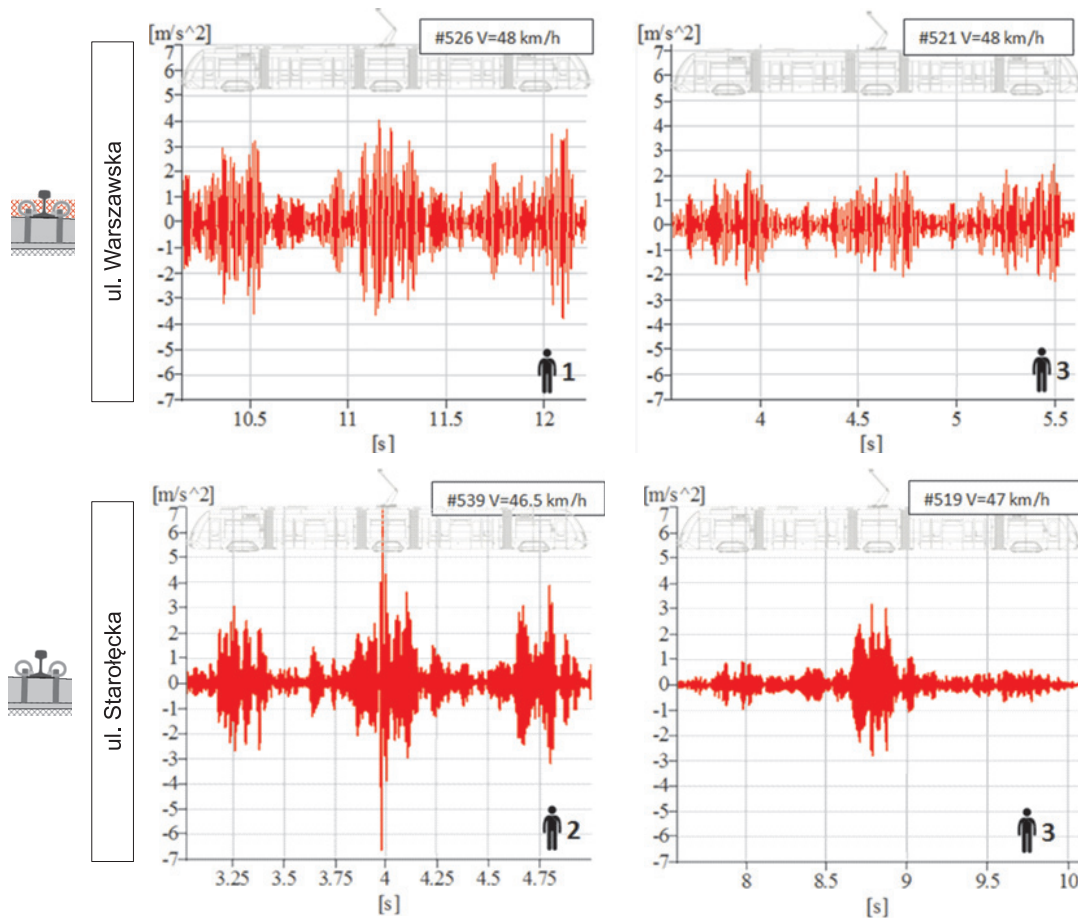
Fig. 8. RMS values of paraseismic vibration acceleration for all tram rides, depending on the measuring point [the authors' own elaboration]

Charakterystyki widoczne na rysunku 8, różnią się od siebie w zależności od torowiska. Prezentowane dane nie umożliwiają wskazania trendów w przebiegach wartości przyspieszeń drgań w zależności od torowiska. Świadczą o tym niskie współczynniki determinacji R<sup>2</sup>, wynoszące dla obu torowisk około 0,25.

W przypadku obu badanych torowisk, przejazdy tramwajów ze zbliżonymi prędkościami często wywoływały zdecydowanie odmienne wartości przyspieszeń drgań parasejsmicznych. Do porównania, ze wszystkich zarejestrowanych przejazdów, wybrano dla każdego torowiska po dwa skrajne przypadki pod względem wartości przyspieszeń drgań. Na torowisku przy ul. Warszawskiej wybrano dwa przejazdy tramwaju z prędkością około 48 km/h, natomiast na torowisku przy ul. Starołęckiej z prędkością około 47 km/h. Analizowane zakresy prędkości obejmujące porównywane przypadki przejazdów przedstawiono w wyróżnionych obszarach na rysunku 8. Do porównania zestawiono na rysunku 9 przebiegi czasowe.

Uzyskane wartości przyspieszeń drgań nie są zbliżone nawet dla przejazdów w obrębie tego samego torowiska. Na torowisku przy ul. Warszawskiej, dwa przejazdy tramwaju ze zbliżoną prędkością wygenerowały przyspieszenia drgań o zdecydowanie różnych wartościach – różnica wynosiła około 36%. Natomiast na torowisku przy ul. Starołęckiej różnica ta wynosiła około 49%.

Porównywane sygnały mają zbliżony charakter wynikający z konstrukcji badanego typu tramwaju. Różnice w sygnałach czasowych dotyczyły przede wszystkim wartości amplitud w obszarach obejmujących poszczególne wózki jezdne. Ponadto, w odniesieniu do przyjętej skali, różnica napełnienia pasażerami pomiędzy poszczególnymi przejazdami w wybranych parach nie była znacząca.



Rys. 9. Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań dla skrajnych, co do wartości RMS, przyspieszeń drgań dla przejazdów tramwaju na obu torowiskach [opracowanie własne]

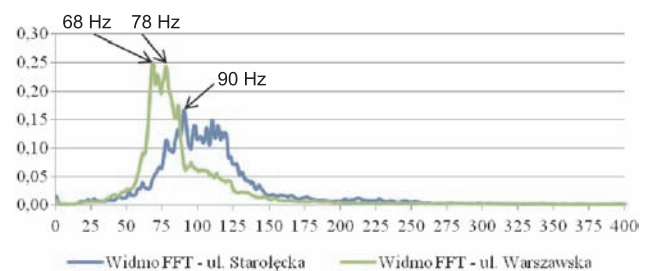
Fig. 9. Time courses of vibration acceleration for extreme values regarding RMS values of acceleration for tram rides on both tracks [the authors' own elaboration]

### Analiza jakościowa

W celu identyfikacji różnic pomiędzy badanymi torowiskami, dokonano jakościowej oceny zarejestrowanych sygnałów na podstawie struktury drgań parasejsmicznych. Uzyskane sygnały drgań przetworzono z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości wykorzystując Szybką Transformatę Fouriera – FFT (*Fast Fourier Transform*). Analizę FFT przeprowadzono w zakresie częstotliwości do 400 Hz. Widma drgań utworzone z każdego zarejestrowanego przejazdu uśredniono w zależności od lokalizacji pomiarowej, co przedstawiono na rysunku 10.

Widma przyspieszeń drgań, przedstawione na rysunku 10, wykazują znaczące różnice pomiędzy badanymi torowiskami. W przypadku torowiska przy ul. Warszawskiej, znaczna część energii drgań parasejsmicznych zawierała się w wyraźnym przedziale częstotliwości od 64 Hz do 91 Hz, natomiast dla torowiska przy ul. Starołęckiej, znaczna część energii pobudzonych drgań parasejsmicznych zawierała się w przedziale częstotliwości od 76 Hz do 121 Hz.

Dla torowiska o wyższym poziomie balastowania w porównaniu do torowiska o klasycznym poziomie balastowania, energia drgań została przesunięta o około 21 Hz w kierunku niższych częstotliwości. Ponadto zakres pobudzonych częstotliwości drgań był o około 40% węższy, stąd maksymalna amplituda tego procesu była do 36% większa.



Rys. 10. Widma średnich przyspieszeń drgań parasejsmicznych podczas przejazdów tramwajów przez badane odcinki torowisk [opracowanie własne]

Fig. 10. Mean spectrums of paraseismic vibration acceleration, during trams rides through the examined sections of track [the authors' own elaboration]



## 6. Wnioski

Przeprowadzone badania oraz analizy wskazują na różnice między oddziaływaniami dynamicznymi dwóch badanych torowisk w czasie przejazdów tramwajów. Na ich podstawie sformułowano następujące wnioski poznawcze:

1. Przyspieszenia drgań parasejsmicznych mogą posłużyć jako źródło informacji o charakterze współpracy dynamicznej danego układu pojazd – tor w badaniach porównawczych zarówno konstrukcji torowisk, jak i pojazdów.
2. Wyniki badań na obu typach torowisk dowodzą złożoności opracowywanych zagadnień i wskazują na odmienny charakter wymuszeń różnych egzemplarzy tramwajów nawet w obrębie ich jednego typu i przy przejazdach ze zbliżoną prędkością.
3. Ze względu na rozrzut uzyskiwanych wartości skutecznych przyspieszeń drgań w funkcji prędkości, konieczne jest uwzględnienie charakterystyk statystycznych analizowanych zjawisk.
4. Dla uśrednionych charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych zaobserwowano skupienie i przesunięcie głównej energii drgań w kierunku niższych częstotliwości dla torowiska o podwyższonym balastowaniu, w konsekwencji czego nastąpiło zwiększenie amplitudy obserwowanego zjawiska; wynik ten sugeruje wpływ zwiększenia masy na obserwowane zjawiska.
5. Brak wiedzy na temat aktualnych parametrów dynamicznych toru związanych z jego wykonaniem lub traktowanie ich tylko pod względem jakości geometrycznego wykonania może mieć wpływ na przyspieszone zużycie pojazdu i toru.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na sformułowanie kierunków dalszych badań:

1. Przeprowadzenie analizy właściwości dynamicznych torowisk w celu uzyskania charakterystyk inertancji i / lub mobilności dynamicznej, umożliwiających poznanie obszarów częstotliwości zwiększonej podatności dynamicznej toru oraz porównanie ich ze spektrum odpowiedzi układu pojazd – tor.
2. Przeprowadzenie badań nad czynnikami wpływającymi na obserwowane oddziaływania dynamiczne, tj.: zmiana profilu tocznego i średnica koła, zużycie faliste szyn, rodzaj przekładek sprężystych, położenie wysokościowe toru, poziom wyeksploatowania pojazdu, płaskie miejsca / nalepy, stan usprężynowania i temu podobne.
3. Budowa multisensorowego stanowiska pomiarowego do automatyzacji akwizycji i analizy sygnałów wibroakustycznych oraz ich uniezależnienie od czynnika ludzkiego.

## Literatura

1. Chyży T.: *Badania oddziaływań drgań pochodzenia komunikacyjnego na budynki mieszkalne i ludzi w aglomeracji warszawskiej*, Prace Instytutu Techniki Budowlanej – nr 1 (145), Wyd. Politechniki Białostockiej, 2008.
2. Id-1 (D-1): *Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych*, Polskie Linie Kolejowe, Warszawa 2005.
3. Komunikat Komisji dla Rady i parlamentu Europejskiego, *Utrzymać Europę w ruchu – Zrównowazona mobilność dla naszego kontynentu*, Przegląd średniookresowy Białej Księgi Komisji Europejskiej dotyczącej transportu z 2001 r. {SEC(2006) 768}
4. Korzeb J.: *Analiza drgań komunikacyjnych z zastosowaniem teorii falek*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, zeszyt 77, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
5. Kubalski J.: *Tory tramwajowe*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
6. Lewis R., Olofsson U.: *Wheel-rail interface handbook*, [Imprint] Woodhead Publishing, Cambridge 2009.
7. Makuch J.: *Materiały wibroizolacyjne we Wrocławskich torach kolejowych*, XIV konferencja naukowo-techniczna „Drogi kolejowe 2007”, Poznań – Rosnówko 2007.
8. Materiały firmowe MPK Poznań Sp. z o.o., Stan techniczny torowisk tramwajowych na dzień 23 czerwca 2014.
9. Materiały promocyjne i prospekty targowe firmy Solaris Bus and Coach SA [online], dostępny WWW: <<http://www.solarisbus.com>> [dostęp: 23.02.2015 r.].
10. Porębski R.: *Dynamiczne oddziaływania nawierzchni na podtorze podczas ruchu pociągów* [praca doktorska], Politechnika Poznańska, 1983.
11. Sanderson E.: *Terra nova – the new world after oil, cars, and suburbs*, Wydawnictwo Abrams Books, 2013.
12. Skrzyński E.: *Podtorze kolejowe*, Wydawnictwo PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2010.
13. Stypuła K.: *Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki*, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa nr 72, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2001.
14. Stypuła K.: *Wybrane problemy ochrony zabudowy powierzchniowej przed drganiami generowanymi przez komunikację podziemną*, Górnictwo i Geoinżynieria, Zeszyt 3/1, Wydawnictwo AGH, Kraków 2009 [wersja elektroniczna].
15. Towpik K.: *Utrzymanie nawierzchni kolejowej*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
16. Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych, Warszawa 1983.

## The Influence of Track Ballasting on Paraseismic Vibrations in Tram Operation

### Summary

The increased tram traffic in urban areas is often the cause of increase paraseismic vibration level. Minimizing the negative influence is conducted among other things: through the development and implementation of different track types. The most commonly used technology in Poland is ballast track, but even built based from the same type of components, individual realizations differ among themselves in terms of track ballasting. In the presented paper presents a the problem of paraseismic vibration related to the implementation of transport due to operation trams in heavily urbanized areas. The study included experimental methodology of comparative studies tram tracks in the aspect of paraseismic vibrations generated around of the track. The research was realized on two separate tracks in Poznan tram network under normal operating conditions of one type of tram. On the basis of measurements of vibration acceleration signals carried out quantitative and qualitative analysis of the recorded signals. The analysis of the results compiles for differences in execution of tracks and the technical condition specified by the infrastructure manager.

**Keywords:** tram tracks, tram, paraseismic vibration, experimental studies

## Влияние балластировки полотна железной дороги на парасейсмические колебания в эксплуатации трамвайной инфраструктуры

### Резюме

Усиленное движение трамваев на городской территории часто является причиной повышения уровня генерирования парасейсмических колебаний. Минимизация этих неблагоприятных воздействий происходит между другими благодаря разработке и внедрению разных путей конструкций. В Польше чаще всего употребляются конструкций с использованием щебеночного балластного слоя, которые даже построены на основании одинакового типа конструктивных элементов, но отличаются друг от друга в аспекте балластировки пути дроблёным щебнем. В нынешней работе было принято мериторическое предположение экспериментальных сравнительных исследований трамвайного полотна в аспекте парасейсмических колебаний генерированных вблизи полотна. Исследования были проведены на двух выделенных полотнах трамвайной сети Познани в условиях нормальной эксплуатации одного типа трамвая. На основании проведенных исследований сигналов ускорения парасейсмических колебаний был проведен качественный и количественный анализ зарегистрированных сигналов. В анализе результатов принято в участие разницы в постройке полотен и техническое состояние определенные администратором инфраструктуры.

**Ключевые слова:** трамвайное полотно, трамвай, парасейсмические колебания, экспериментальные исследования