

Bartosz CZECHYRA¹, Jerzy KWAŚNIKOWSKI, Franciszek TOMASZEWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Zakład Pojazdów Szynowych

ul. Piotrowo 3; 60-965 Poznań

¹ bartosz.czechyra@put.poznan.pl

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA METOD WIBROAKUSTYCZNYCH W PROCESIE OCENY WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNYCH TRAMWAJU

Streszczenie:

Największą wadą pojazdów szynowych jest ich znaczne oddziaływanie na środowisko poprzez generowanie drgań i hałasu w czasie jazdy. Dynamiczne procesy zachodzące przy kontakcie koło-szyna w połączeniu ze strukturalnym oddziaływaniem pudła pojazdu składa się na szeroko rozumianą aktywność wibroakustyczna pojazdu. W artykule przedstawiono przekrój zagadnień związanych z analizą i wykorzystaniem wibroakustyki do oceny własności eksploatacyjnych tramwajów. zilustrowano przykładami możliwości pozyskania i wykorzystania informacji diagnostycznej o pojeździe i infrastrukturze jaką niesie sygnał wibroakustyczny generowany przez lekki pojazd szynowy typu tramwaj.

Słowa kluczowe: drgania i hałas, tramwaj, diagnostyka, aktywność wibroakustyczna

WPROWADZENIE

Konieczność przemieszczania znacznych potoków pasażerów w obrębie dużych miast wymaga zaangażowania znacznych środków finansowych na zapewnienie odpowiedniej liczby pojazdów oraz należycie przygotowanej infrastruktury. Na terenach silnie zurbanizowanych najważniejszą cechą procesu transportowego powinna być jego efektywność. W związku z tym rozwijają się systemy transportu publicznego. Aktualne tendencje rozwojowe systemów zbiorowego transportu miejskiego wskazują na istotną rolę tramwaju w prawidłowym funkcjonowaniu aglomeracji miejskich. W miastach, które posiadają komunikację tramwajową coraz większe kwoty są przeznaczane na zakup nowych pojazdów lub modernizację już eksploatowanych. Takie postępowanie jest motywowane koniecznością odnawiania zasobu pracy starzejącego się taboru z jednej strony, a z drugiej – koniecznością konkurowania z indywidualnym transportem samochodowym.

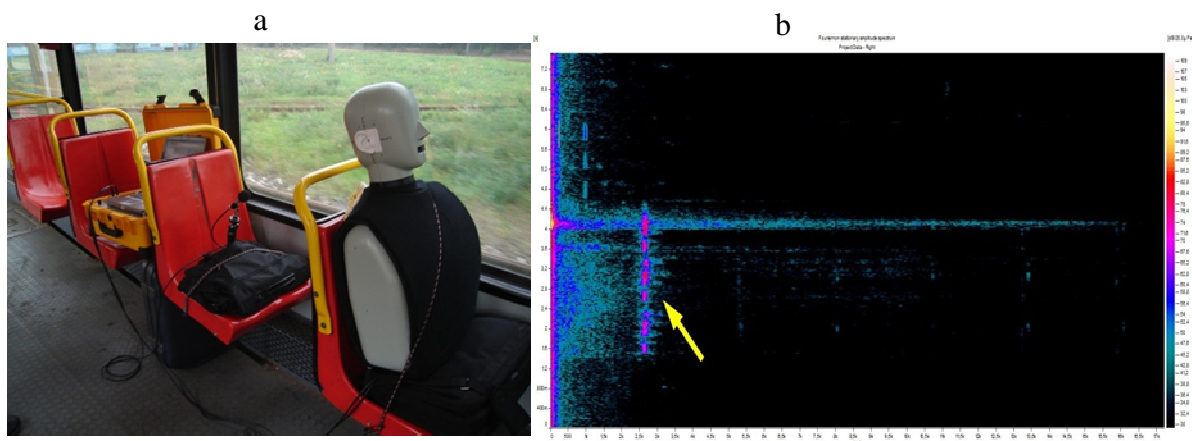
Prócz niepodważalnych zalet tramwajów, takich jak wysoka sprawność, znaczna prędkość eksploatacyjna, pojemność, zasilanie energią elektryczną z możliwością jej odzysku przy hamowaniu, tramwaje są źródłem drgań i hałasu komunikacyjnego. Procesy, które zachodzą przy toczeniu stalowego koła po stalowej szynie są pierwotnymi źródłami mechanoakustycznego oddziaływania pojazdu na środowisko oraz ludzi znajdujących się w pojeździe. I pomimo faktu, że hałas generowany przez tramwaje nie ma dużego udziału w ogólnym hałasie komunikacyjnym dużego miasta [15] to aktualnym, a nie rzadko krytycznym zadaniem przewoźnika jest minimalizowanie wpływu środka transportu tak na pasażerów i prowadzącego pojazd, jak również na infrastrukturę i najbliższe otoczenie. W związku z tym uzasadnionym staje się prowadzenie regularnych kontroli aktywności wibroakustycznej tramwajów w warunkach normalnej eksploatacji. Takie działania mogą dostarczyć pełnych danych dotyczących następujących obszarów działalności przewoźowej:

- oddziaływanie na środowisko w zakresie drgań i hałasu
- ocena narażenia pasażerów i operatora na ekspozycję na zjawiska wibroakustyczne
- weryfikacja poprawności wykonywanych napraw i obsługa
- diagnozowanie stanu i dynamiczne ustalanie zakresu obsługi pojazdu
- diagnozowanie stanu infrastruktury

Przykłady badań prowadzonych w ramach podjętej współpracy z Miejskim Przedsiębiorstwem Komunikacyjnym w Poznaniu przedstawiono poniżej.

1. KLIMAT WIBROAKUSTYCZNY POJAZDU

Z punktu widzenia przewoźnika, żeby konkurować z innymi środkami komunikacji, należy pasażerowi zapewnić możliwie wysoki komfort podróżowania. Najbardziej subtelną formą dbania o jakość przewozów jest badanie jakości dźwięku w przestrzeni pasażerskiej tramwaju. Badania takie mają na celu opis wrażeń akustycznych odbieranych przez pasażera w czasie jazdy. Są to badania z zakresu psychoakustyki, dlatego też w czasie ich realizacji wykorzystano specjalistyczną aparaturę pomiarową przedstawioną poglądowo na rysunku 1a) natomiast przykładowe wyniki analiz w postaci mapy czasowo-widmowej zamieszczono na rysunku 1b).



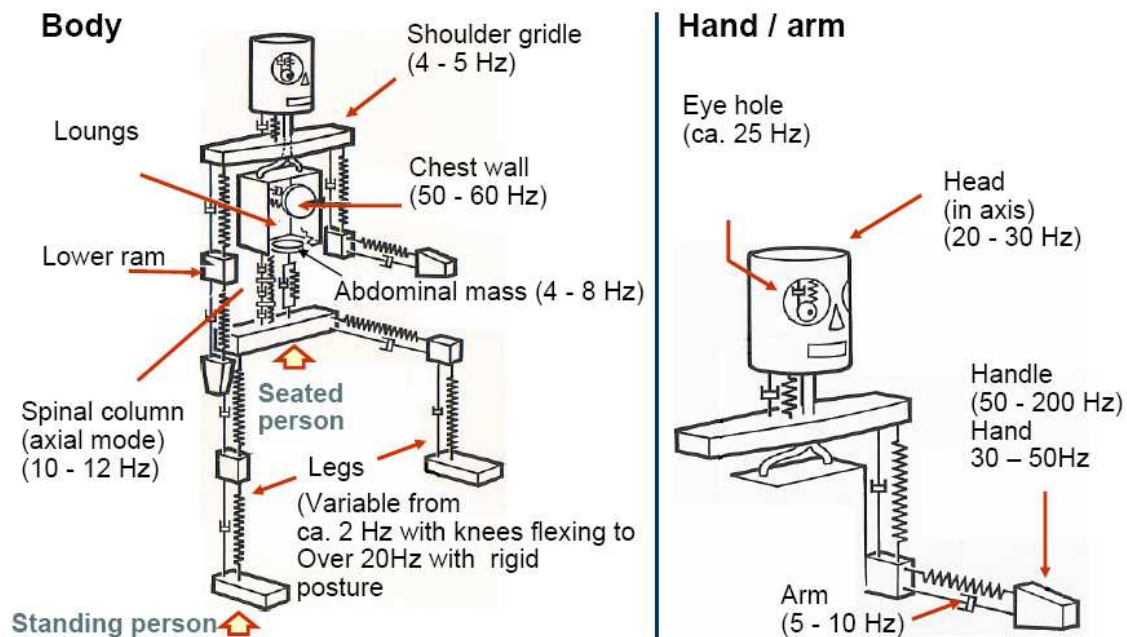
Rys. 1. Widok aparatury pomiarowej zainstalowanej w wagonie typu 105N oraz przykładowa mapa czasowo-widmowa zarejestrowanego sygnału.

W badaniach wykorzystano symulator głowy i torsu HATS 4100D firmy Brüel & Kjær wraz z platformą sprzętową PLUSE[®] tego samego producenta. Przeprowadzone testy jezdne wykonane w warunkach normalnej eksploatacji stanowiły podstawę weryfikującą poprawność wykonania modernizacji wózka tramwajowego [6]. Opracowana na potrzeby projektu metodyka rejestracji i analizy dźwięku przestrzennego w tramwaju jest podstawą prowadzenia badań porównawczych na różnych typach tramwajów oraz wskazywania najbardziej dokuczliwych efektów akustycznych docierających do uszu pasażera w czasie jazdy. Przykładową mapę czasowo-widmową sygnału rejestrowanego na wybranym miejscu pasażera przedstawiono na rysunku 1b) z zaznaczeniem procesu zamykania drzwi (strzałka wskazuje monotonalny sygnał ostrzegawczy o znacznym poziomie). Przedstawione badania pomogły wskazać błędy i niedokładności w zakresie obsługi mechanizmu drzwiowego oraz poprawić procedurę regulacji mechanizmu drzwiowego w warunkach przeglądów okresowych.

Komfort podróżowania pasażerów jest związany również z drgań generowanymi przez pojazd a na działanie, których narażone są osoby wewnątrz pojazdu. Poziom narażenia na

drżania ogólne operatora pojazdu regulują przepisy wykonawcze związane z opublikowaną dyrektywą europejską [9] oraz odpowiednimi przepisami szczegółowymi [17]. Jednakże na drżania o oddziaływaniu ogólnym są również narażeni pasażerowie. I pomimo tego, że czas ekspozycji na drżania w czasie jazdy nie jest długi (dla warunków Poznania średni czas jazdy wynosi ok. 15 minut) to kontrola poziomu drgań na wybranych miejscach wagonu powinna być prowadzona regularnie. Takie działania można motywować dwoma niezależnymi argumentami: fizjologiczną odpornością na drżania ogólne oraz zmianami narażenia na drżania wynikającymi ze zmiany stanu technicznego układu biegowego i/lub infrastruktury.

Aspekt fizjologiczny jest oparty o złożony model wielomasowy organizmu ludzkiego, który poddany drżaniom o odpowiedniej częstotliwości doznaje efektów rezonansowych poszczególnych narządów. Mechaniczny model ciała człowieka, jako układu dynamicznego przedstawiono na rysunku 2 [1].



Rys. 2. Wielomasowy model człowieka

Źródło: [1].

Jak wynika z rysunku 2 charakterystyczne częstotliwości dla naszego ciała można podzielić na dwie grupy:

- niskoczęstotliwościowe (od 1,5Hz do 20Hz)
- wysokoczęstotliwościowe (powyżej 40Hz)

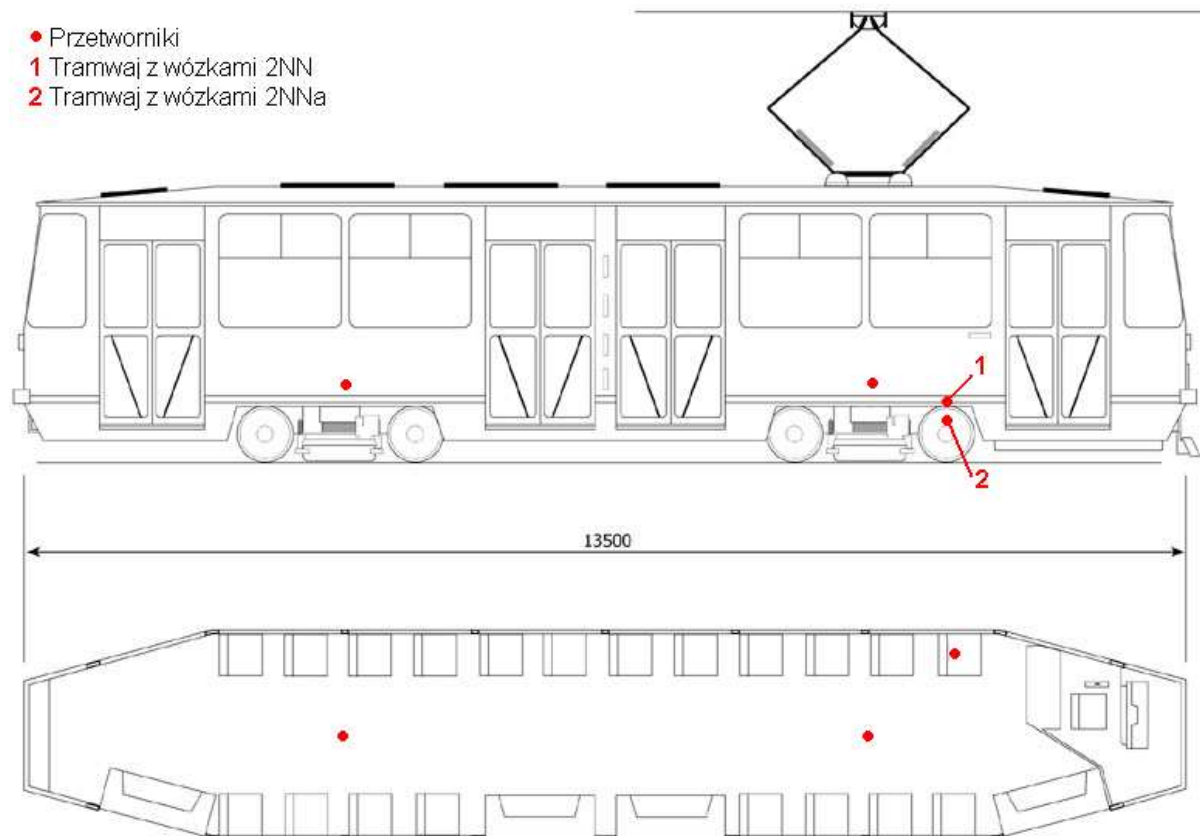
Wskazany podział jest podziałem umownym i jest wprowadzony na potrzeby skojarzenia zakresu wymuszenia ze źródłem drgań. I tak dla wymuszeń niskoczęstotliwościowych podstawowym źródłem drgań wymuszających jest zaprogramowana konstrukcyjnie dynamika pojazdu związana z usprężynowaniem drugiego stopnia [5,7,10].

W aspekcie technicznym prowadzenie systematycznych pomiarów przyspieszeń drgań wewnątrz eksploatowanego pojazdu pozwala na pośrednie określenie zmian jakościowych i ilościowych w sposobie funkcjonowania układu biegowego oraz poziomu wymuszeń, na jakie narażony jest pojazd w trakcie eksploatacji. Rozpatrując drżania generowane przez pojazd oraz sposób przemieszczania (np. spokojność biegu wg [16]) można określić maksymalne prędkości jazdy dopuszczalne na danej sekcji ze względu na drżaniowy komfort jazdy oraz bezpieczeństwo przed wykolejeniem [8,13,20].

2. TEST JEZDNY W DIAGNOSTYCE STANU POJAZDU I TORU

Eksperymentalna weryfikacja własności dynamicznych pojazdu szynowego jest wykonywana w ramach testu jezdny. Dla normatywnych badań związanych z badaniami typu lub dopuszczeniem do eksploatacji wykorzystywana jest standardowa procedura opisana w [17]. Natomiast dla celów diagnostycznych (badania porównawcze) opracowywana jest odrębna metodyka badań uwzględniająca zagadnienia szczegółowe zawarte w celu badań.

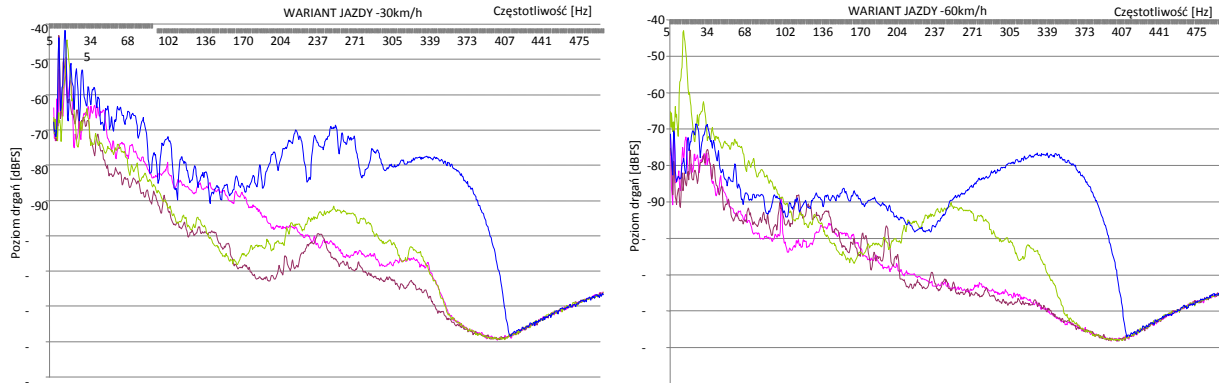
Przykładem szczegółowych badań porównawczych mogą być testy przeprowadzone na tramwajach tego samego typu, ale wyposażonych w wózki różnych producentów. Celem badań była weryfikacja poprawności przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych oraz określenie transmisyjności drganiowej nowej konstrukcji. Badania przeprowadzono na sieci Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Poznaniu w nocy, aby uzyskać możliwość bezkolizyjnego sterowania prędkością jazdy. Trasa pomiarowa biegła od zajezdni tramwajowej na ulicy Głogowskiej do przystanku „Os Jana III Sobieskiego”. Do analizy wykorzystano ten właśnie odcinek, ponieważ cechuje się on dobrym utrzymaniem toru umożliwiającym jazdę z prędkością ustaloną ciągle wynoszącą 60 km/h oraz posiadają odcinki proste bez zwrotnic i krzyżownic. Zarejestrowane 20-to sekundowe sekwencje sygnału pozwoliły dokonać analizy transmisyjności wózka względem pudła pojazdu. Na rysunku 3 przedstawiono rozmieszczenie przetworników drgań na konstrukcji pojazdu.



Rys. 3. Rozmieszczenie przetworników drgań na konstrukcji pojazdu 105N

Lokalizacja punktów pomiarowych wynikała z założeń wyznaczania funkcji przejścia dla pojazdu w ruchu [18]. Określenie własności dynamicznych wózka oraz ilości i sposobu przenoszenia energii na pudło wagonu określono wyznaczając charakterystyki przenoszenia sygnału pomiędzy sygnałem „źródła” a „odbiornikiem”. Ze względu na brak możliwości pomiaru drgań koła przy kontakcie z szyną sygnałem referencyjnym w każdym przypadku pomiarowym były przyspieszenia drgań obudowy łożyska maźniczego, jako te zlokalizowane

najbliższej źródła generowania drgań. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wyniki analiz porównując ze sobą cztery przypadki badawcze: po dwa wózki przed i po modernizacji z czego w obrębie typu jeden był nowy lub po remoncie a drugi tuż przed jego wykonaniem. Ze względu na niejawność uzyskanych wyników zmieniono skalę i opisy na osiach wykresów.



Rys. 4. Przykładowe wyniki porównawcze testu jezdno wagonu 105N z wózkami o różnej konstrukcji i skrajnie różnym stopniu wyeksploatowania

Jak wynika z zamieszczonych na rys. 4 wykresów tak konstrukcja, jak i stopień wyeksploatowania układu biegowego ma znaczny wpływ na ilość energii przenoszonej z układu biegowego na wagon. Jednocześnie prezentowany test skłonił użytkownika nowoczesnych wózków do negocjowania nowych warunków obsługi i gwarancji na dostarczane wózki tramwajowe uwzględniające zmiany parametrów dynamicznych wózków w funkcji przyjętej miary eksploatacji.

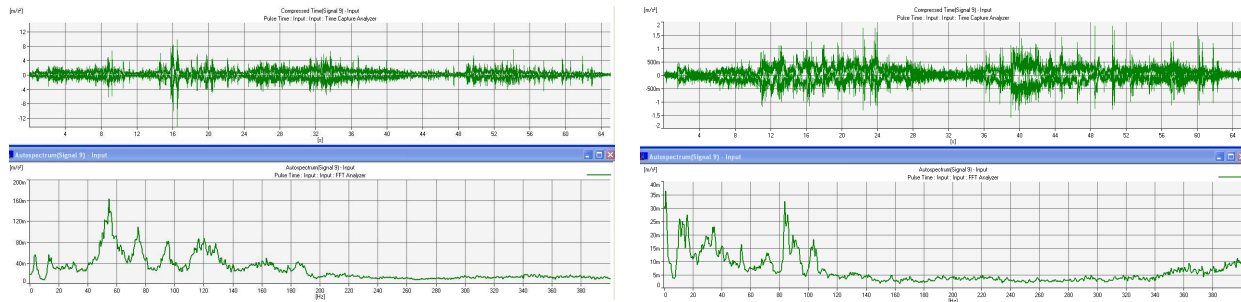
Bardziej ogólnym przypadkiem badań lekkich pojazdów szynowych jest porównanie własności biegowych na etapie wyboru ofert zakupu nowego taboru. W ramach badań porównawczych jest możliwa ocena jakości biegu wykorzystując jazdy techniczne pojazdów nowych. Przykładem takich badań może być analiza porównawcza dwóch typów niskopodłogowych pojazdów eksploatowanych w jednym mieście (Rys. 5) [7].



Rys. 5. Obiekty badań porównawczych w aspekcie spokojności biegu na wskazanych przez Zleceniodawcę odcinkach infrastruktury.

Źródło: [7].

Przykładowe wyniki analiz (przebieg czasowy i uśrednione widmo sygnału) przedstawiono na rys.6. Dla uwidocznienia różnic w sygnałach amplitudy przebiegu sygnału przyspieszeń drgań i odpowiadające widmo (po prawej) zwiększono 6-cio krotnie.

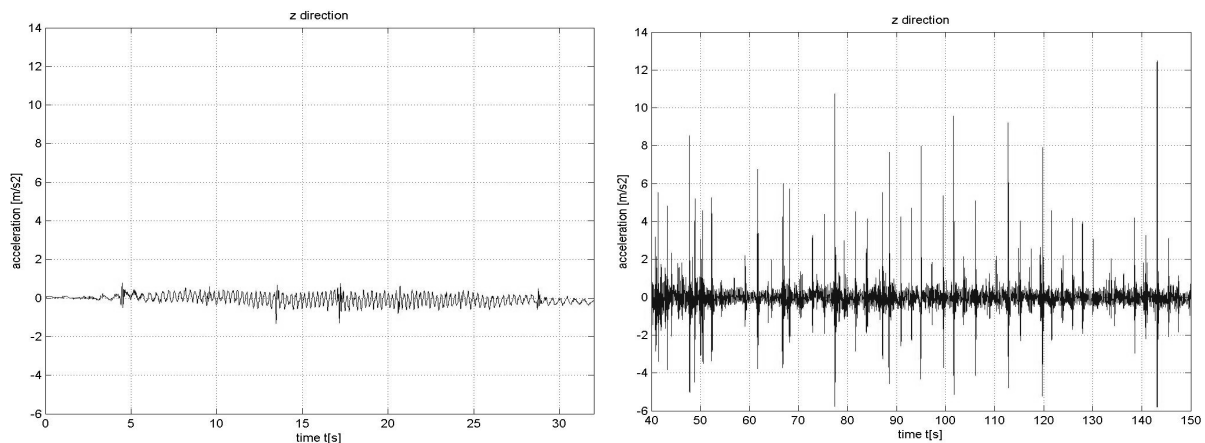


Rys. 6. Porównanie przebiegów drgań na pudle pojazdów i ich widm

Analizy przeprowadzone na zlecenie użytkownika obu typów pojazdów pozwoliły na opracowanie wytycznych określających sposób eksploatacji poszczególnych typów pojazdów w określonych warunkach eksploatacji. Uzyskane wyniki stały się również przyczynkiem do podjęcia decyzji co do realizacji dalszych zakupów taboru określonego typu.

Test jezdny może zostać również wykorzystany do diagnozowania stanu toru tramwajowego [3,4,14,19]. Diagnozowanie stanu technicznego toru tramwajowego może być realizowane w dwóch wariantach: jako porównawcze badania „in-situ” oraz ze znanym modelem dynamiki układu biegowego pojazdu.

Pierwszy wariant obejmuje badania prowadzone na pojeździe jednego typu przy zachowaniu dobrego stanu technicznego układu biegowego. Bazą do wnioskowania jest porównanie odpowiedzi układu biegowego na wymuszenie od toru zachowując stałe parametry jazdy pojazdu. Przykładowy przebieg przyspieszeń drgań obudowy łożyska zestawu kołowego tramwaju 105Na przedstawiono na rysunku 7.

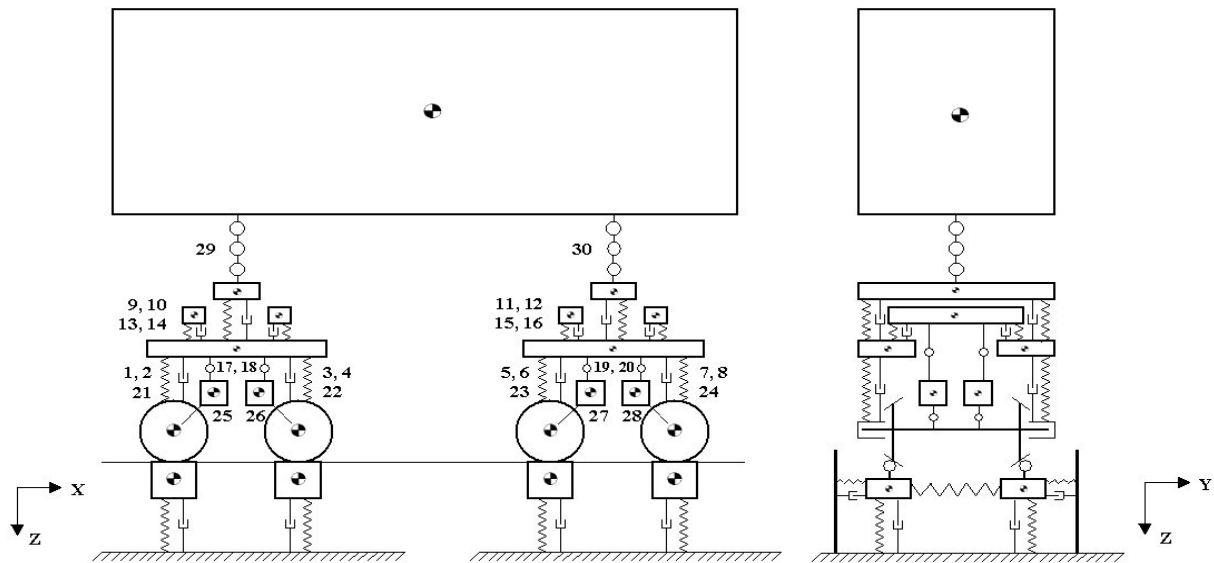


Rys. 7. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań maźnicy na torze nowym (z lewej) i zużyтым (z prawej).

Jak wynika z przebiegów czasowych prezentowanych na rysunku 7 rejestrowane amplitudy drgań w czasie jazdy po torze nowym i torze zużyтым znacznie są różne. Chwilowe przyspieszenia drgań jakim poddawany jest układ biegowy na torze zużyтым (przy tej samej prędkości jazdy i obciążeniu wagonu) są nawet 15-krotnie większe niż na torze nowym. Badania takie są podstawą do wnioskowania o ewolucji stanu toru na wskazanych sekcjach infrastruktury oraz wykrywania awaryjnego zużycia wybranych elementów infrastruktury (rozjazdy i krzyżownice).

W przypadku oceny ilościowej stopnia zużycia toru bezwzględnie wymagane jest określenie modelu układu biegowego pojazdu testowego, aby możliwa była kalibracja

systemu diagnostycznego. Przykładowy model lekkiego pojazdu szynowego przedstawiono na rysunku 8 [3,5,12.].



Rys. 8. Model lekkiego pojazdu szynowego użyty do badań stanu toru.

Źródło: [5].

Po eksperymentalnej weryfikacji poprawności modelu oraz dostrojeniu jego parametrów do odpowiedzi rzeczywistego obiektu jest możliwa ocena stanu technicznego toru tramwajowego z pozycji pojazdu [5].

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono przekrój zagadnień związanych z wykorzystaniem sygnału wibroakustycznego, jako narzędzia pozwalającego dynamicznie ocenić własności pojazdu oraz infrastruktury w różnych aspektach i na różnym etapie życia konstrukcji. Wsparcie procesu decyzyjnego co do zakresu i jakości eksploatacji pojazdów szynowych wykorzystując informacje o dynamicznym zachowaniu pojazdu w torze oraz jego własnościach wibroakustycznych pozwala w pełni wykorzystać potencjał pojazdu/infrastruktury a także dynamicznie dostosować zakres prac obsługowych w ramach istniejącego systemu utrzymania taboru. Wibroakustyka może być również wykorzystane na etapie podejmowania decyzji co do zakupu taboru i wartościowania jego własności użytkowych mając na uwadze aktualną sytuację rynkową i oczekiwania społeczne odnośnie transportu publicznego.

Pozyskanie i wykorzystanie informacji diagnostycznej pozwala również na dynamiczne dostosowywanie bieżących działań do obecnych i przyszłych stanów systemu eksploatacji. Jest to o tyle ważne, że wciąż istnieje zapotrzebowanie na narzędzia umożliwiające przeciwdziałanie negatywnym oddziaływaniom pojazdów szynowych na środowisko, skutkom awarii pojazdu/infrastruktury oraz bardziej efektywnego zarządzania elementami systemu transportowego. Dostępność technologii pomiarowej i analitycznej a także teleinformatycznej daje ogromne możliwości w zakresie budowy systemów gromadzenia i przetwarzania informacji diagnostycznej, jako wsparcie w optymalnym funkcjonowaniu systemu zarządzania i eksploatacji zróżnicowaną flotą pojazdów, dostrzegając jednocześnie indywidualne potrzeby społeczeństwa w zakresie transportu publicznego [2,10,11].

Efektywne wykorzystanie informacji o stanie technicznym pojazdów i infrastruktury daje potencjalną możliwość osiągnięcia przewagi rynkowej nad konkurentami. Dodatkową zaletą

funkcjonowania takiego systemu jest możliwość bieżącego śledzenia ewolucji stanu technicznego tak poszczególnych pojazdów jak i całego eksploatowanego taboru, a tym samym dynamicznego podejmowania decyzji na poziomie operacyjnym i strategicznym funkcjonowania przedsiębiorstwa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aflalo E.: Human Vibration European Directive 2002/44/EC and a new human vibration analysis tool for field measurements of vibration doses. Special Customer Seminar, B&K University, Nærum Denmark 2008
- [2] Czechyra B., Firlik B., Chudzikiewicz A.: Założenia i podstawowe wymagania systemu monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego. Logistyka, 4/2010 wydanie CD 1 – streszczenia drukiem str. 15
- [3] Czechyra B., Firlik B., Tomaszewski F.: Technical state assessment of a light rail track wear based on tramway dynamic model IV International Congress On Technical Diagnostics, 09÷12 September 2008, Olsztyn – Poland
- [4] Czechyra B., Firlik B., Tomaszewski F.: Technical state monitoring method of light rail track wear, Proceedings of the Fourth European Workshop on Structural Health Monitoring 2008, Edited by: UHL, OSTROWSKI, HOLNICKI-SZULC; DEStrech Publications, Inc., 439 North Duke Street Lancaster, Pennsylvania 17602 USA; page 167-174; ISBN 978-1-932078-94-7
- [5] Czechyra B., Firlik B.: Test jezdny w dynamicznej ocenie stanu torów tramwajowych 28th International Scientific Conference, Technical Diagnostics of Machines and Manufacturing Equipment, 27 – 28. January 2009, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic
- [6] Czechyra B., Tomaszewski F.: The Changes Of Acoustic Climate In 105N Tram Type As a Result Of Modernization Of Its Gear System, The Archive of Transport, volume 20, issue 4, Warszawa 2008; Indeks 201901; ISSN 0866-9546; page 29-38
- [7] Czechyra B.: Operational excitations in experimental research into dynamics of light rail vehicles. XXIV SYMPOSIUM VIBRATIONS IN PHYSICAL SYSTEMS, Będlewo (near Poznań, Poland), 11th-15th May 2010, Editors: Cempel C., Dobry W.M. ISBN 978-83-89333-35-3, str. 81-86
- [8] Czechyra B.: Tramway operating excitations in Operational Modal Analysis – first approach, Proceedings of 16TH International Congress on Sound and Vibration, Kraków, Poland, 5-9 July 2009
- [9] Directive 2002/44/WE of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration). (Sixteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). OJL177, 06.07.2002
- [10] Firlik B., Czechyra B.: Symulacyjne podstawy systemu monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego XIX Konferencja Naukowa POJAZDY SZYNOWE, Kraków - Targanice k. Andrychowa 15–17 września 2010. Tom II, str. 241-247
- [11] Firlik B.: Light Rail Vehicle Running Safety Analysis on a Worn Track Profile, Ist International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists InterTech'2008, 17-18.04.2008 Poznan
- [12] Firlik B.: Wpływ stanu zużycia profili szyn oraz geometrii toru na bezpieczeństwo jazdy lekkiego pojazdu szynowego, Rozprawa doktorska Politechnika Warszawska 2009
- [13] Firlik B., Czechyra B.: Założenia i podstawy symulacyjne systemu monitorowania stanu technicznego toru tramwajowego. Materiały konferencyjne Międzynarodowej Konferencji Naukowej TRANSPORT XXI WIEKU, 21-24 września 2010, Białowieża. Wydanie CD – streszczenia drukiem str. 61
- [14] Lewis, R.; Olofsson, U. (2009). Wheel-Rail Interface Handbook. ©Woodhead Publishing. Online version available at:
http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2792&VerticalID=0

- [15] Makarewicz R. i inni: Mapa akustyczna miasta Poznania wraz z programem ochrony środowiska przed hałasem - PROGRAM OCHRONY PRZED HAŁASEM (POH), Centrum Badań Akustycznych Fundacja Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza na zlecenie Urzędu Miasta Poznania, Poznań 2008
- [16] PN-EN 12299:2009 Kolejnictwo -- Komfort jazdy pasażerów -- Pomiary i ocena
- [17] PN-EN 14253:2005 Drgania mechaniczne. Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia. Wytoczne praktyczne
- [18] Richardson M. H.: Structural Dynamics Measurements. Papers of Structural Dynamics 2000 - April 11-16, 1999
- [19] Thompson, David (2009). Railway Noise and Vibration - Mechanisms, Modelling and Means of Control. ©Elsevier. Online version available at:
http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2493&VerticalID=0
- [20] UIC Chart 518 Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality. 2003

THE USE OF VIBROACOUSTIC METHODS TO EVALUATE OF TRAMS OPERATING PROPERTIES

Abstract:

The biggest disadvantage of rail vehicles is their significant impact on the environment by generating noise and vibration while driving. Dynamic processes occurring at the wheel-rail contact, combined with the structural impact of the vehicle body is made up of vibroacoustic activity vehicle. The article presents a cross section of issues related to the analysis and use the vibroacoustics to assess the operating properties of trams. Illustrated with examples of possible acquisition and use of diagnostic information about the vehicle and infrastructure, which based on vibroacoustic signals generated by light rail vehicle.

Key words: tram, noise and vibration, vibroacoustics, diagnostics.