

Grzegorz ZAJĄC¹

BADANIA HAŁASU POJAZDÓW SZYNOWYCH

W artykule zaprezentowano szacowane wartości kosztów zewnętrznych emisji hałasu generowanego przez transport szynowy w Unii Europejskiej. Przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczących wpływu materiału wstawki hamulcowej pojazdu szynowego na poziom emisji hałasu w procesie hamowania. Wykazano, że wstawki kompozytowe charakteryzują się niższymi poziomami przyspieszeń drgań w stosunku do klasycznych wstawek żeliwnych i średnio o 10 dB(A) mniejszym hałasem. W pracy przedstawiono także wybrane wyniki badań hałasu i drgań oddziałujących na pasażerów tramwajów typu 105 Na i NGT6 eksploatowanych przez MPK S.A. w Krakowie.

INVESTIGATION OF RAIL VEHICLE NOISE

In the paper the estimated values of external costs of noise emission generated by railway transport in the European Union were presented. Selected findings concerning influence of break insert material of rail-vehicle on noise emission level in braking process were shown. It has been pointed out that composite inserts are characterized by lower vibration acceleration compared to classic cast iron inserts and by lower noise at the average about 10 dB(A). In the paper also presents selected results of noise, vibration, affecting the passengers on the trams type 105 Na and NGT6 operated by MPK S.A. in Krakow.

1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój cywilizacyjny sprawił, że hałas towarzyszy człowiekowi w ciągu jego całego życia. Hałas generowany przez systemy transportowe przyczynia się do pogorszenia stanu środowiska, wpływając na jego naturalny proces funkcjonowania. W Unii Europejskiej hałas emitowany przez transport szynowy stanowi 10% globalnej emisji hałasu generowanego przez transport lądowy [2]. Szacunkową wartość tych kosztów w roku integracji Polski z Unią Europejską przedstawiono w Tab. 1. [11].

¹Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych;
31-864 Kraków; al. Jana Pawła II 37.
Tel: + 48 12 374-36-26, + 48 12 374-33-10, Fax: + 48 12 374-33-11
E-mail: gzajac@m8.mech.pk.edu.pl

Tab. 1. Szacunkowe koszty zewnętrzne emisji hałasu przez transport szynowy w Unii Europejskiej

Lp.	Koszty zewnętrzne emisji hałasu*	wartość
a	b	c
1.	Koszty zewnętrzne emisji hałasu transportu szynowego w [PKB].	0.001 ÷ 0.2
2.	Koszty zewnętrzne emisji hałasu transportu szynowego w [euro].	10 202 336 800 ÷ 2 040 467 360 000
3.	Koszty zewnętrzne emisji hałasu transportu szynowego na osobę w [euro].	22 ÷ 4486

*)

Całkowita liczba ludności (2004 r.)		454 900 000
PKB (2004 r.)	całkowity	10 202 336 800 000
	na osobę	22 428

Przedział wartości przedstawiony w kolumnie c wiersz 1. wynika z przyjętych różnych metod wyceny oraz zespołu badaczy, który dokonał oszacowania [2]. Wartości przedstawione w Tab. 1., mogą stanowić także kolejny argument dla badań wibroakustycznych pojazdów szynowych mających na celu poszukiwanie rozwiązań pozwalających ograniczyć hałas generowany przez transport szynowy.

Transport szynowy należy do najmniej uciążliwych dla środowiska gałęzi transportu lądowego. Analizując poszczególne rodzaje niekorzystnych oddziaływań tego transportu na otoczenie, w ujęciu społecznym, ludność najczęściej skarży się na dyskomfort spowodowany hałasem i drganiami. Wysoki poziom emisji hałasu zazwyczaj uwarunkowany jest lokalnym złym stanem technicznym infrastruktury, taboru lub brakiem właściwych technicznych środków ograniczających powstawanie i propagację hałasu (np. systemu smarowania szyn, ekranów akustycznych).

Przeprowadzone badania naukowe i analizy porównawcze [4, 5] wykazały, że hałas o tym samym poziomie generowany przez transport szynowy kolejowy jest mniej irytujący dla odbiorców niż hałas drogowy. Również hałas emitowany przez tramwaje jest mniej dokuczliwy w porównaniu z hałasem emitowanym przez autobusy [8]. Wynika to m.in. różnic w charakterystyce częstotliwościowej widma hałasu.

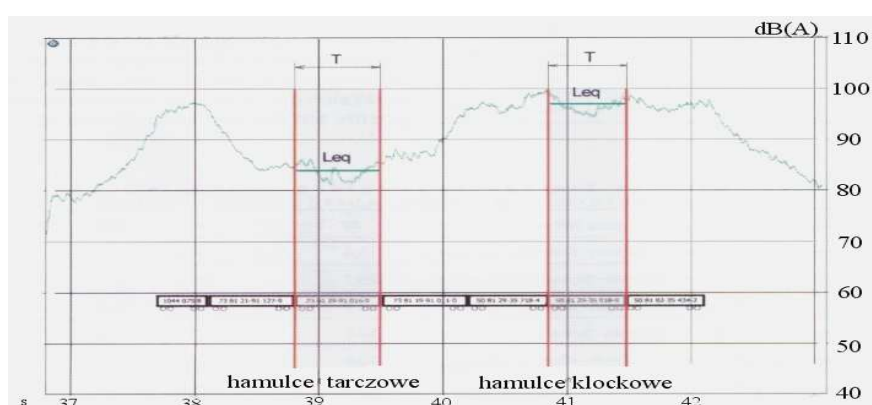
Powstawanie, propagacja hałasu i drgań w pojazdach szynowych jest procesem bardzo złożonym i skomplikowanym. Wynika to z faktu, że badane systemy mają złożoną strukturę dynamiczną zależną od wielu czynników zmiennych w czasie. Dlatego w praktyce rzadko prowadzi się badania tych systemów w ujęciu holistycznym. Najczęściej badania ogniskowane są wokół określonego kierunku lub zakresu np. dotyczącego wpływu modyfikacji jednego z układów na procesy wibroakustyczne zachodzące w pojeździe.

W artykule niniejszym przedstawiono zagadnienia i wybrane wyniki badań dotyczące wpływu układu hamulcowego pojazdów szynowych, a zwłaszcza rodzaju wstawki hamulcowej na hałas. W ostatnim rozdziale zaprezentowano przykładowe wyniki badań hałasu i drgań przeprowadzone na wybranych modelach tramwajów eksploatowanych przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. w Krakowie.

2. BADANIA HAŁASU POJAZDÓW SZYNOWYCH W ASPEKCIE UKŁADU HAMULCOWEGO

2.1 Wpływ rodzaju układu hamulcowego oraz materiału wstawki hamulcowej na poziom emisji hałasu

Rodzaj układu hamulcowego ma bardzo istotny wpływ na poziom hałasu emitowanego przez pojazd szynowy, co wynika między innymi z Rys.1. [3].



Rys.1. Ekwiwalentny poziom hałasu emitowanego przez pociąg z klockowym i tarczowym układem hamulcowym.

Przedstawiony na Rys. 1. poziom hałasu zmierzony podczas przejazdu pociągu dla wagonów z hamulcem klockowym wyposażonym w klasyczną wstawkę żeliwną, jest o około 10 dB(A) wyższy w porównaniu z poziomem hałasu zmierzonym podczas jazdy dla wagonów z hamulcem tarczowym. Różnicę taką wyjaśnia m.in. Willenbrink na podstawie przeprowadzonych obserwacji zestawów kołowych, które były wymontowane z wagonów [7, 10]. Z obserwacji tej wynika, że wszystkie zestawy z hamulcem klockowym wykazywały w mniejszym lub większym stopniu zużycie faliste. Zestawy kołowe wagonów wyposażonych w hamulec tarczowy nie wykazywały zużycia falistego.

W przypadku klockowego układu hamulcowego, o parametrach wibroakustycznych pociągu, w istotny sposób decyduje rodzaj materiału wstawki hamulcowej. W prowadzonych od wielu lat badaniach wykazano, iż zastępując klasyczne wstawki hamulcowe, wykonane z żeliwa, na wstawki kompozytowe zmniejszono poziom hałasu emitowanego przez pojazd szynowy o około 10 dB (A) [6, 9].

Dodatkową ilustracją tego zjawiska jest Tab. 2., w której przedstawiono poziomy hałas emitowanego przez pojazdy szynowe wyposażone w hamulec tarczowy, klockowy z wstawkami: wykonanymi z żeliwa, kompozytu i spiekanych proszków metali. Poziomy te ważne krzywą A zmierzono w odległości 7.5 m od toru na wysokości 1.2 m nad główką szyny.

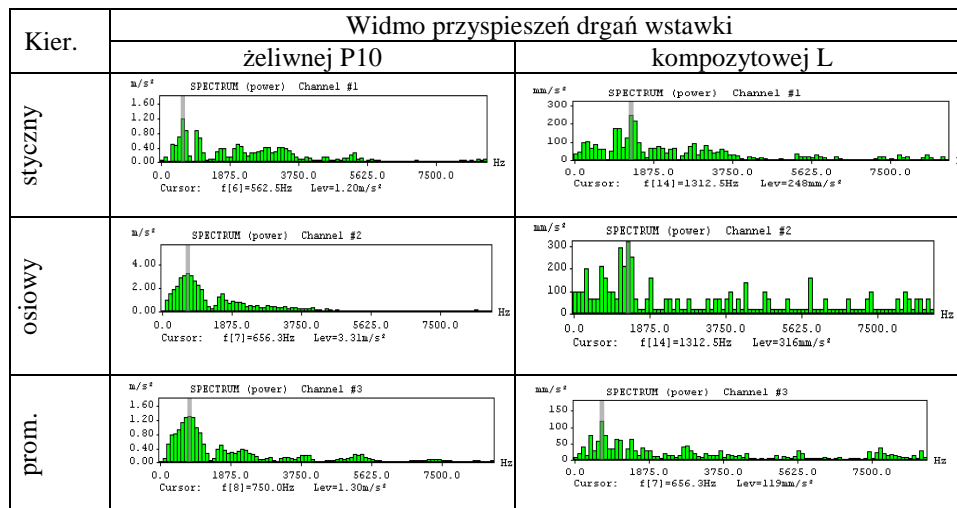
Tab. 2. Poziom hałasu emitowany przez pociągi osobowe wyposażone w układ hamulcowy tarczowy, klockowy z różnymi wstawkami [1]

Lp.	Rodzaj układu hamulcowego oraz materiału wstawki	Poziom hałas w dB (A)	
		v = 100 km/h	v = 140 km/h
a	b	c	d
1.	Hamulec tarczowy	86	90
2.	Hamulec klockowy ze wstawką kompozytową	86	90
3.	Hamulec klockowy ze wstawką spiekaną	88	93
4.	Hamulec klockowy ze wstawką żeliwną	98	104

2.2 Badania stanowiskowe hałasu i przyspieszeń drgań wstawki hamulcowej

Istotność wpływu rodzaju materiału wstawki na poziom hałasu drgań wykazać można na podstawie badań modelowych. Tego rodzaju badania przeprowadzono na testerze T-05 wraz z dodatkowym oprzyrządowaniem firmy SVANTEK do pomiaru przyspieszeń drgań i poziomu hałasu. Precyzyjny analizator drgań i hałasu typ 912 AE wraz z przystawką czterokanałową SV06 i trzema jednoosiowymi czujnikami drgań firmy Dytran i mikrofonem pojemnościowym typu SV 02/C4 wraz z przedwzmacniaczem mikrofonowym 1/2" typu SV01A. W Tab. 3. przedstawiono przykładowe widma przyspieszeń drgań wstawki żeliwnej P10 i kompozytowej L współpracującej z obręczą z materiału B2N.

Tab. 3. Widmo przyspieszeń drgań wstawek wykonanych z żeliwa P10 i kompozytu L dla prędkości tarcia równej 8.8 [m/s] i nacisku 0.5 [MPa]



Analizując histogramy widm przedstawione w Tab. 3. można zauważyć, że wartości przyspieszeń drgań w kierunku stycznym, osiowym i promieniowym są kilkakrotnie wyższe dla wstawek żeliwnych.

Wstawki kompozytowe zarówno typu L jak i K wykazywały nawet do 10-krotnie mniejsze poziomy przyspieszeń drgań w zakresie nacisków i prędkości tarcia uwzględnionych w

prowadzonych badaniach. Niższe poziomy przyspieszeń drgań klocka wpływają na ograniczenie emisji triboakustycznej w procesie tarcia. W związku z tym skojarzenia cierne z kompozytami charakteryzują się niższym poziomem hałasu w trakcie hamowania.

Podczas prób hamowania wstawki wykonane z materiału „żeliwo P10” emitują wyższy poziom hałasu. Szczególnie jest to widoczne w paśmie wysokich częstotliwości, dla oktaw: 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz i 16 kHz. Różnica ta waha się, od kilku do kilkunastu dB(A) w różnych oktawach. Dla materiałów kompozytowych nie występowały tzw. „piski” tak charakterystyczne dla wstawek żeliwnych.

W ramach badań sporządzono również wykresy hałasu emitowanego w procesie tarcia charakterystyczne dla każdego typu materiału wstawki. Poziomy hałasu ekwiwalentnego obliczono ze wzoru (1).

$$P_{eq} = 20 \log \left(\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \left(\frac{a_w(t)}{p_0} \right)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

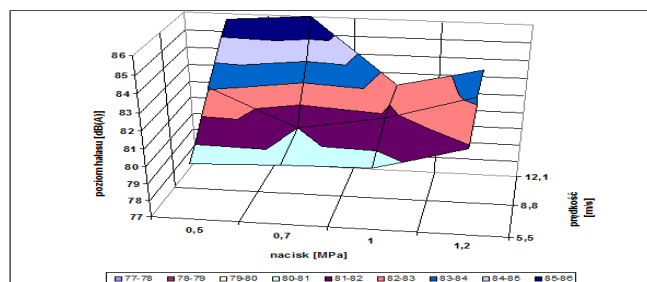
gdzie:

T_c – bieżący czas pomiaru,

$a_w(t)$ – wartość mierzonego dźwięku z filtrem korekcyjnym A,

p_0 – wartość ciśnienia odniesienia $2 \cdot 10^{-5} Pa$.

Wykres hałasu ekwiwalentnego dla pary trącej ze wstawką kompozytową L przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Poziomy hałasu podczas procesu hamowania pary trącej klocki kompozytowy L i obręcz B2N, w funkcji nacisku i prędkości tarcia.

Poziomy hałasu ekwiwalentnego dla wstawki kompozytowej zmierzony na stanowisku badawczym (Rys. 2.) dla różnych warunków hamowania (nacisku, prędkości tarcia), zmienia się w przedziale kilku decybeli. Przedział zmienności poziomu hałasu dla tego skojarzenia tribologicznego jest niższy w stosunku do wstawki żeliwnej.

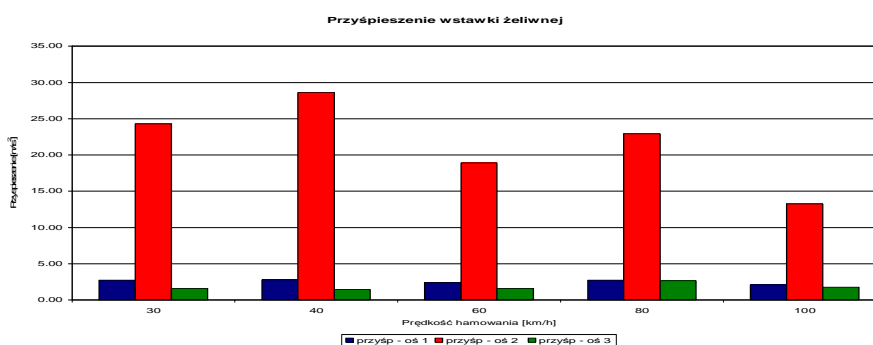
2.2 Badania poligonowe hałasu i przyspieszeń drgań wstawki hamulcowej

Kolejnym testem weryfikującym zagadnienie omawiane w artykule były badania poligonowe przeprowadzone na Elektrycznych Zespołach Trakcyjnych typu EN – 57. Do badań wytypowano dwa materiały wstawek hamulcowych: żeliwne P10 i kompozytowe L.

Wybór odpowiedniego materiału wstawek hamulcowych uwarunkowany był tym, że konstrukcja układu hamulcowego w tym pojeździe jest przystosowana do używania w nim, jako elementów ciernych, wstawek hamulcowych wykonanych z żeliwa P10. Z tego względu charakterystyka współczynnika tarcia materiału kompozytowego musiała odpowiadać w przybliżeniu charakterystyce współczynnika tarcia żeliwa P10. Takie wymogi podyktowane były przede wszystkim względami bezpieczeństwa tj. zachowania odpowiedniej skuteczności działania hamulca i długości dróg hamowania oraz nie blokowanie zestawów kołowych podczas hamowania. Materiał L o średnim współczynniku tarcia 0,18, zgodnie z Kartą UIC 541-1, może być stosowany w istniejących układach hamulcowych po spełnieniu wszystkich wymogów i badań.

Przyspieszenia wstawki hamulcowej mierzono w trzech osiach. Spektrum przyspieszeń mierzono i zapisywano w zakresie od 0 do 11300 Hz. Czujnik drgań zamontowano na boku wstawki hamulcowej. Pomiary wykonywano dla hamowań z prędkości: 100, 80, 60, 40 i 30 km/h, dla obu typów wstawek: żeliwnych i kompozytowych. Maksymalne przyspieszenia drgań kompozytowej wstawki zarejestrowane w trakcie hamowań oscylują wokół wartości 2 m/s^2 , natomiast dla wstawki żeliwnej przekraczają 25 m/s^2 . Wstawki żeliwne charakteryzowały się kilkunastokrotnie większymi przyspieszeniami drgań w kierunku stycznym w stosunku do wstawek kompozytowych.

Wybrane wyniki analiz przyspieszeń drgań występujących we wstawce hamulcowej podczas hamowania z zadanych prędkości, zestawiono w formie wykresów słupkowych. Na Rys. 3. pokazano wyniki analiz dla wstawki żeliwnej P10.



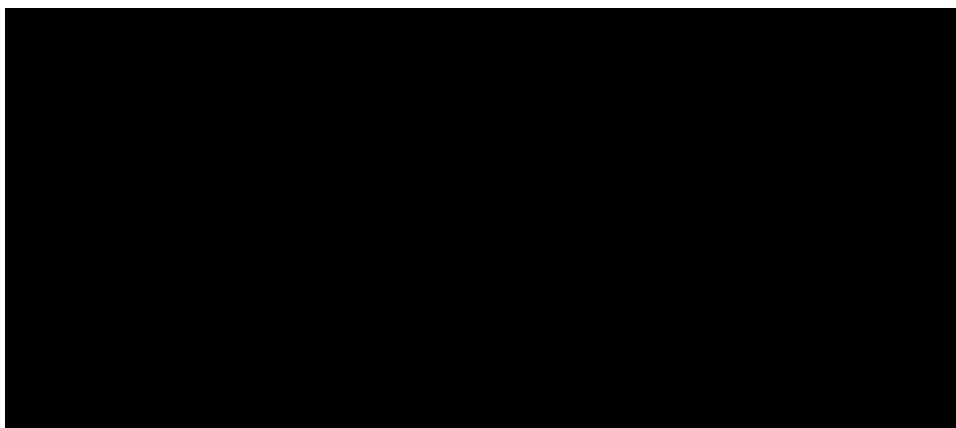
Rys.3. Wykres wartości maksymalnych przyspieszeń drgań wstawki żeliwnej P10 w trzech kierunkach: 1 – oś prostopadła do powierzchni trącej, 2 – oś styczna do pow. trącej, 3 – oś poprzeczna do pow. trącej podczas hamowania z różnych prędkości.

Z Rys. 3 wynika, że wartości przyspieszeń drgań wstawek żeliwnych w kierunku stycznym są dominujące. Może to świadczyć o występowaniu w procesie hamowania tymi wstawkami drgań typu stick-slip. Drgania te często występują w układach, w których wartość współczynnika tarcia trących się elementów wykazuje zależność od prędkości tarcia. Tego typu układem jest skojarzenie ze wstawką żeliwną.

Przyspieszenia drgań wstawek kompozytowych w kierunku stycznym, tylko dla dwóch prędkości hamowania tj. 60 i 80 km/h, osiągają dominującą wartość w stosunku do pozostałych kierunków. Jednak różnica wartości tych przyspieszeń drgań w kierunku

stycznym w stosunku do przyspieszeń w kierunku osiowym i promieniowym jest znacznie mniejsza.

Hałas w czasie hamowania mierzono w analogicznych warunkach jak przyspieszenia drgań. Z prowadzonych badań wynika, że maksymalny poziom hałasu w procesie hamowania występuje średnio po 3 sekundach od momentu rozpoczęcia hamowania. Czas, po jakim wystąpi maksimum tego poziomu uzależnione jest od prędkości hamowania. Zjawisko to ma miejsce zarówno dla wstawek kompozytowych jak i żeliwnych. Jednostka trakcyjna wyposażona we wstawki kompozytowe w procesie hamowania emitowała niższy o około 10 dB(A) poziom hałasu. Średni ekwiwalentny poziom hałasu dla wstawek żeliwnych i kompozytowych dla hamowania z różnych prędkości przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Ekwiwalentny poziom hałasu dla wstawek żeliwnych i kompozytowych podczas hamowania z różnych prędkości

Oprócz materiału wstawki hamulcowej, na poziom drgań i hałasu w pojeździe mają wpływ także inne czynniki. Stąd wynika konieczność badań oddziaływania drgań i hałasu na człowieka w pojeździe. Tego rodzaju badania podnieto w odniesieniu do tramwajów.

3. BADANIA HAŁASU I DRGAŃ W TRAMWAJACH

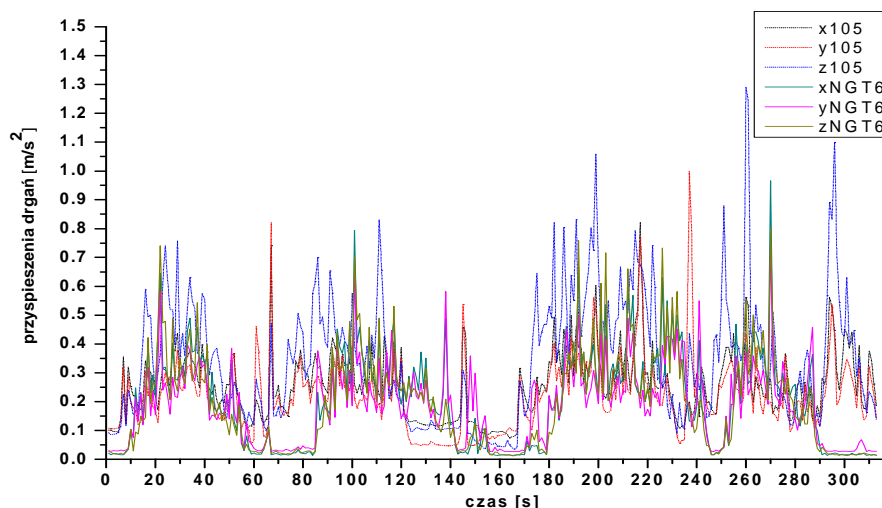
3.1 Metodyka badań

Analiza istniejących norm i przepisów krajowych związanych z hałasem i drganiami w tramwajowych wykazała, że do badania hałasu we wnętrzu tramwaju nie ma stosownej normy, dlatego też przy lokalizacji punktów pomiarowych wykorzystywano normy PN-92/K-11000, PN-90/S-04052. Ponadto, przy pomiarze drgań ogólnych korzystano z następujących norm: PN-91/N-01352, PN-91/N-01354, PN-90/K-11001, PN-90/K-11003 oraz ISO 2631. Pomiarów wykonano łącznie w 24 tramwajach (11-typu 105Na i 13-typu NGT 6) podczas realizacji procesów przewozowych, zgodnie z obowiązującym rozkładem jazdy. Odcinki pomiarowe torowiska dobierano tak, aby była możliwość porównania badanych typów tramwajów na tym samym torowisku (ponieważ tramwaje NGT6 kursują tylko na określonych liniach). W pomiarach uwzględniono trzy typy nawierzchni

tramwajowych tj: torowisko zintegrowane z jezdnią wykonane w technologii węgierskiej, torowisko na płytach betonowych z szynami podlewanymi żywicą poliuretanową oraz torowiska wydzielone szynami S 49 posadowionych na podkładach strunobetonowych. Długości odcinków pomiarowych dla poszczególnych rodzajów torowiska zbilansowano w równych proporcjach.

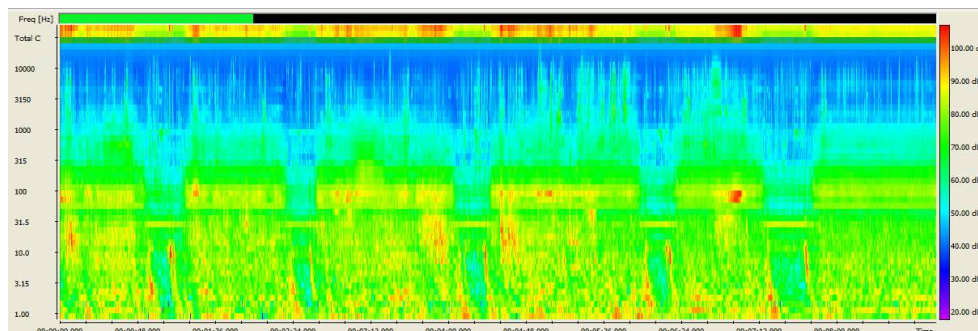
3.2 Wybrane wyniki badania hałasu i drgań w tramwajach

Przykładowe wyniki badań przeprowadzonych na 24 wytypowanych tramwajach eksploatowanych przez MPK S.A. w Krakowie przedstawiono w formie wykresów. Na Rys. 5. pokazano przykładowy przebieg szczytowych przyspieszeń drgań ogólnych oddziaływujących na pasażera siedzącego z przodu wagonu nad pierwszym wózkiem w tramwaju 105 Na i NGT6 zarejestrowanych na odcinku torowiska od przystanku Urzędnicza do Bronowic.



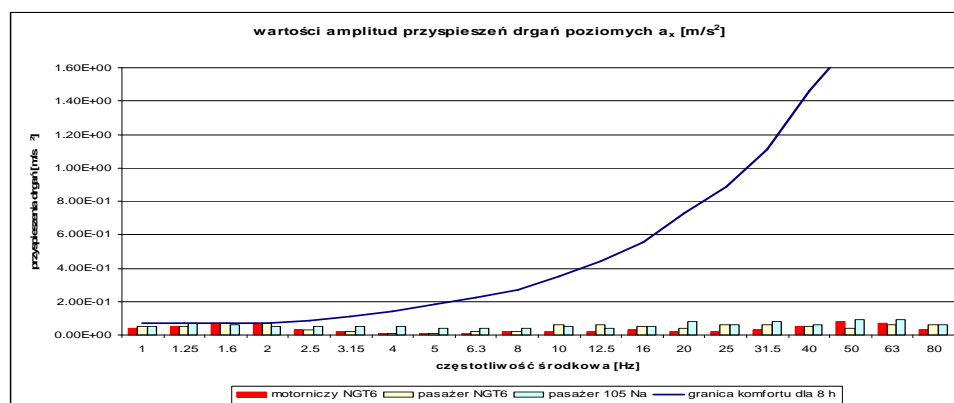
Rys. 5. Przebieg wartości szczytowych przyspieszeń drgań w kierunku x, y, z, dla tramwaju NGT 6 (linie ciągłe) i 105 Na (linie przerywane), zarejestrowanych podczas przejazdu odcinka torowiska, od przystanku Urzędnicza do Bronowic.

Na Rys. 6. pokazano spektrogram analizy widma hałasu zmierzonego w tramwaju NGT 6 na odcinku torowiska od pętli Krowodrza Górka poprzez Tunel Krakowskiego Szybkiego Tramwaju do Ronda Mogińskiego.



Rys. 6. Spektrogram analizy widma hałasu wewnątrz przedziału pasażerskiego tramwaju NGT 6 zarejestrowanego podczas przejazdu odcinka torowiska, od przystanku Krowodrza Górak do Ronda Mogilskiego.

Istotnym czynnikiem jaki analizowano w badaniach był komfort wibroakustyczny. Na rys. 7. przedstawiono wartości amplitudy przyspieszenia ogólnych drgań poziomych w kierunku osi x (oś zgodna z kierunkiem jazdy tramwaju), oddziałujących na siedzącego pasażera oraz motorniczego podczas przejazdów w badanych tramwajach. Na rysunku tym zaznaczono granicę komfortu dla ośmiogodzinnego czasu ekspozycji na drgania zgodnie z normą ISO 2631, co pozwoliło na ocenę komfortu w stosunku do motorniczego, dla którego kabina tramwaju stanowi miejsce pracy. Niewłaściwy klimat akustyczny i nadmierne oddziaływanie drgań mechanicznych na prowadzącego tramwaj potrafi spowodować zakłócenie jego percepcji zmysłowych, ograniczyć postrzeganie zjawisk z otoczenia itd., co może być przyczyną zagrożenia bezpieczeństwa podróżowania tramwajem.



Rys. 7. Amplitudy przyspieszeń drgań poziomych, ogólnych w kierunku osi x oddziałujących na motorniczego i pasażerów tramwajów NGT6 i 105 Na.

Z analizy rys. 7. wynika m.in., że w żadnym tramwaju nie ma przekroczenia granicy komfortu, jeśli chodzi o drgania ogólne w kierunku poziomym.

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wybranych materiałów stosowanych na wstawki hamulcowe pojazdów szynowych w aspekcie hałasu wykazały, że wstawki wykonane z materiałów kompozytowych w odniesieniu do klasycznych wstawek żeliwnych charakteryzują się niższymi wartościami przyspieszeń drgań w kierunku promieniowym, osiowym i stycznym, o około 10 dB(A), mniejszą emisją hałasu ekwiwalentnego, większym współczynnikiem tłumienia fali akustycznej i mniejszą wartością propagacji fali akustycznej.

Mając na uwadze problem drgań i hałasu w transporcie szynowym można się odnieść do obecnie eksploatowanego taboru. W przypadku tramwajów wprowadzając sukcesywnie do eksploatacji nowoczesne niskopodłogowe tramwaje, charakteryzujące się stosunkowo niskim ekwiwalentnym poziomem hałasu w przedziale pasażerskim, można poprawić komfort podróżowania miejską komunikacją szynową, co pozwoli pozytywnie stymulować wielkość potoków pasażerskich i poprawiać efektywność miejskich systemów transportowych.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ehlers H. R., Gärtner E.: *Potenziale und Grenzen der Klotzbremse im Vergleich zur Scheibenbremse*, ZEV+DET Glas. Ann. Nr 6/7 2002 s. 290 – 300.
- [2] Gronowicz J.: *Ochrona środowiska w transporcie lądowym*, Poznań - Radom 2003 ITE.
- [3] Kalivoda M., Kudrna M., Presle G.: *Oberbau - Teststrecke Paternion Lärm – und Gleisschwingungsmessungen*, ZEV+DET Glas. Ann. Nr.9/10 2001, s. 460 – 471.
- [4] Miedema H.M.E., Oudshoorn C.G.M.: *Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals*, Environmental Health Perspectives 109, s. 409 – 416, 2001 r.
- [5] Miedema H.M.E., Vos H.: *Exposure - response relationships for transportation noise*, Journal of the Acoustical Society of America 104, s. 3432 – 3445, 1998 r.
- [6] Peterson M.: *Noise – Related Roughness of Railway Wheels*, Departament of Solid Mechanics, Chamlers University of Technology Göteborg, Sweden 1999.
- [7] Piec P.: *Wpływ żeliwnych wstawek hamulca klockowego na podstawie zużycia falistego kół tocznych pojazdów szynowych oraz szyn*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Transport, Gliwice 1989, z.14, s. 245 – 263.
- [8] Sandrock S., Griefahn B. Kaczmarek T., Hafke H., Preis A., Gjestland T., *Experimental studies on annoyance caused by noises from trams and buses*, Journal of Sound and Vibration 313, s. 908 – 919, 2008 r.
- [9] Thompson D., Janssens M., Dittrich M.: *Rollgeräusche durch den Rad/Schiene – Kontakt Beurteilung von Lärminderungsmaßnahmen*, ZEV+DET Glas. Ann. Nr.2/3 1997. s. 226 – 233.
- [10] Willenbrink L.: *Neuer Erkenntnisse zur Schallabstrahlung von Schienen Fahrzeuge*, ETR 5/1979.
- [11] Zajac G., *Wpływ materiału wstawek hamulcowych pojazdu szynowego na poziom hałasu*, MECHANIKA EKOLOGIA BEZPIECZEŃSTWO Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów. Politechnika Warszawska 1(64)/2007 s. 155 – 164.