

Możliwości uproszczenia procedury monitorowania hałasu tramwajowego z punktu widzenia automatyzacji procesu analitycznego

Paweł KOMORSKI¹, Bartosz CZECHYRA², Tomasz NOWAKOWSKI³

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę pomiarów sygnałów akustycznych generowanych podczas testu *pass-by* wybranego typu lekkich pojazdów szynowych w warunkach normalnej eksploatacji. Pomiary hałasu wykonano zgodnie z wymaganiami normy ISO 3095. Celem analizy było sprawdzenie, w jakim stopniu uwzględnianie czasu przed i po przejeździe pojazdu przez punkt pomiarowy, ma wpływ na obliczanie ekspozycyjnego poziomu dźwięku A.

Słowa kluczowe: tramwaj, pomiary akustyczne, system monitorowania hałasu

1. Wprowadzenie

Tramwaj, jest efektywnym środkiem transportu szynowego do przemieszczania osób i towarów w obszarach silnie zurbanizowanych. Niestety, jedną z uciążliwych cech transportu szynowego jest jego osobliwy wpływ na klimat akustyczny wokół linii tramwajowych. Ze względu na specyfikę generowanych sygnałów akustycznych [1, 2] oraz dużą różnorodność eksploatacyjnych typów tramwajów w obrębie nawet jednej linii, hałas tramwajowy może być w skrajnym przypadku odbierany jako uciążliwy. Ze względu na postępujące zużywanie elementów układów biegowych pojazdów szynowych oraz infrastruktury torowej w celu podniesienia standardów jakości życia w mieście, istnieje konieczność monitorowania m.in. efektów akustycznych generowanych przez tramwaj w ruchu.

W artykule przedstawiono wyniki analiz dotyczących automatyzacji procedur analitycznych w monitorowaniu hałasu tramwajowego. Pierwsze procedury analityczne opracowano na podstawie powszechnie stosowanej normy ISO 3095 [3]. Ponieważ spełnienie wszystkich wymagań normatywnych w gęstej zabudowie miejskiej nie jest możliwe, postanowiono opracować własną metodykę badań. Jednym z elementów badań porównawczych jest analiza wrażliwości symptomu na zmianę warunków uśredniania danych eksperymentalnych oraz możliwości jej zastosowania

w systemie monitorowania aktywności wibroakustycznej tramwaju. Dokonano sprawdzenia, w jakim stopniu uwzględnianie czasu przed i po przejeździe pojazdu przez punkt pomiarowy ma wpływ na obliczanie ekspozycyjnego poziomu dźwięku A (SEL) wybranych lekkich pojazdów szynowych i czy uzyskane charakterystyki można uznać za własne, przypisane do typu pojazdu.

2. Metodyka badań

Obiektem badań był najnowszy tramwaj eksploatowany w Poznaniu – Solaris Tramino S105p (rys. 1).



Rys. 1. Tramwaj Solaris Tramino S105p [6]

Tramino S105p jest tramwajem w pełni niskopodłogowym, składającym się z trzech wózków i pięciu członów. Jest to standardowa konstrukcja lekkiego

¹ Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Zakład Pojazdów Szynowych, pawel.r.komorski@doctorate.put.poznan.pl.

² Dr inż.; Politechnika Poznańska, Zakład Pojazdów Szynowych, bartosz.czechyra@put.poznan.pl.

³ Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Zakład Pojazdów Szynowych, tomasz.zb.nowakowski@doctorate.put.poznan.pl.

pojazdu szynowego nowszej generacji, powszechnie eksploatowanego w Polsce. Podstawowe parametry techniczne pojazdu przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1
Podstawowe dane techniczne tramwaju Solaris Tramino S105p [5]

Producent	SOLARIS Bus&Coach
Model	TRAMINO S105p
Długość [mm]	31960
Szerokość [mm]	2400
Wysokość [mm]	3575
Liczba członów	5 (w tym dwie lektyki)
Liczba przegubów	4
Liczba wózków napędnych	2 (pierwszy i ostatni)
Liczba wózków tocznych	1 (środkowy)
Liczba miejsc siedzących	61
Liczba miejsc stojących	168
Liczba drzwi wejściowych	4 pary podwójne, 2 pojedyncze
Procent niskiej podłogi [%]	100
Liczba i rodzaj silników trakcyjnych	4 (po dwa umieszczone na każdym wózku napędnym), asynchroniczne firmy VEM o mocy 105 kW każdy
Maksymalna prędkość [km/h]	70

W pomiarach sygnałów wibroakustycznych, należy również zwrócić uwagę na rodzaj toru tramwajowego, po którym porusza się pojazd, gdyż od typu nawierzchni zależy charakter generowanych sygnałów wibroakustycznych [2, 4]. Przeprowadzono 20 pomiarów sygnałów akustycznych w obrębie dwóch torowisk tramwajowych przy ulicy Starołęckiej i Warszawskiej w Poznaniu (rys. 2), w warunkach *in situ*. Konstrukcja torowisk składała się z następujących części składowych:

- szyny typu kolejowego S49,
- przytwierdzenie typu SB-3,
- podkłady strunobetonowe PST-98.

Jedyną różnicą pomiędzy wymienionymi torowiskami był stopień balastowania, czyli poziom warstwy tłucznia w torze (rys. 2).

Wpływ stopnia balastowania torowiska na rejestrowane poziomy ciśnienia akustycznego generowanego przez przejazd pojazdu szynowego, w trakcie normatywnych pomiarów hałasu, jest niski i został opisany w artykule [4].

Normatywne pomiary poziomów dźwięku metodą *pass-by* wykonano zgodnie z wymaganiami normy ISO 3095 [3] w normalnych warunkach eksploatacyjnych, przy różnych prędkościach przejeżdżających tramwajów. W obu lokalizacjach mikrofony pomiarowe były umieszczone w odległości 7,5 m od osi linii tramwajowej, na wysokości około 1,2 m od główki szyny. Podczas wykonywania pomiarów, warunki atmosferyczne były następujące: temperatura powietrza około 20°C, (słonecznie), wilgotność względna około 40%, prędkość wiatru nie przekraczała 3 m/s. Do analizy dokonano selekcji pomiarów, dla których tło akustyczne nie miało wpływu na jakość uzyskanych wyników i dalszy

a)



b)



Rys. 2. Widok torowisk w wybranych punktach pomiarowych: a) przy ul. Warszawskiej, b) przy ul. Starołęckiej w Poznaniu [fot. autor]

przebieg badań. Tor pomiarowy składał się z następujących części składowych:

- mikrofon typu 4189-L-001,
- jednostka akwizycji sygnałów szybkozmiennych PULSE Access Type 3050-A-060,
- dwie fotokomórki rozmieszczone po dwóch stronach toru w celu wyznaczenia początku i końca pojazdu oraz wyznaczenia średniej prędkości przejeżdżającego tramwaju.

3. Analiza poziomów dźwięku

Pierwszy etap analizy zarejestrowanych sygnałów ciśnienia akustycznego polegał na obliczeniu ekspozycyjnych poziomów dźwięku skorygowanych charakterystyką częstotliwościową A (SEL) dla poszczególnych przejazdów na podstawie wzoru 1 [3]:

$$SEL = 10 \lg \left(\frac{1}{T_0} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (1)$$

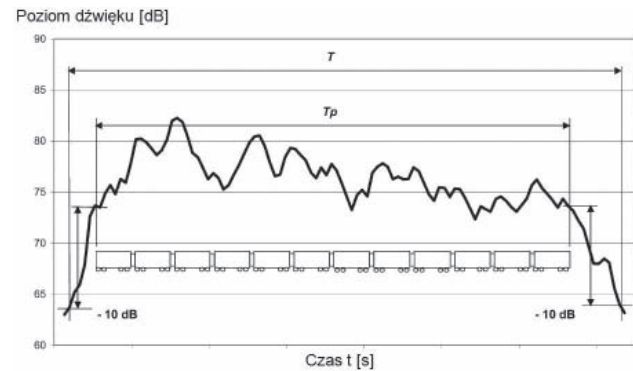
gdzie:

- SEL – ekspozycyjny poziom dźwięku A dla przejazdu pojazdu szynowego [dB],
- T_0 – czas odniesienia równy 1 [s],
- T – czas wykonania pomiaru przejazdu – uśredniania [s],
- $p_A(t)$ – chwilowa wartość zmierzonego ciśnienia akustycznego A [Pa],
- p_0 – ciśnienie odniesienia równe 20 [μ Pa].

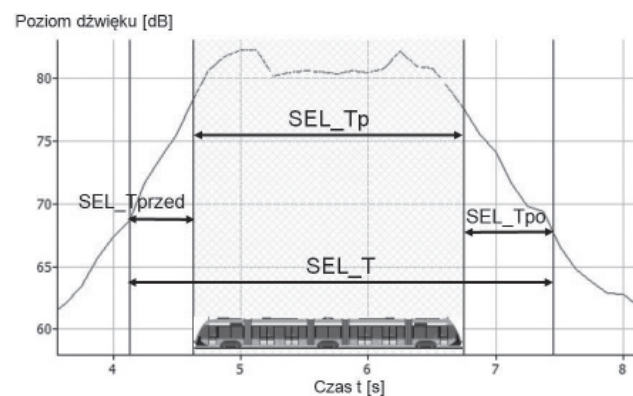
W analizie, bardzo istotny jest dobór odpowiedniego czasu uśredniania T z przejazdu tramwaju. Według normy ISO 3095 [3], obliczenia ekspozycyjnego poziomu dźwięku A pojedynczego przejazdu pojazdu szynowego realizuje się w dwóch etapach. Pierwszym z nich jest przyjęcie okna czasowego T_p przejazdu pojazdu: od chwili czasowej t_1 , w której czoło pojazdu minie punkt pomiarowy do chwili czasowej t_2 , w której tył pojazdu przekroczy punkt pomiarowy (rys. 3). Wyznaczony w ten sposób średni poziom dźwięku jest bazą do wyznaczenia normatywnego poziomu dźwięku z przejazdu pojazdu. Drugim etapem jest przyjęcie zakresu czasu uśredniania T , dla którego rozszerza się czas obliczeniowy przed i za pojazdem tak, aby uchwycić punkt o 10 dB niższy od wyznaczonego wcześniej poziomu średniego przy użyciu czasu uśredniania T_p .

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wykres poziomu dźwięku A w funkcji czasu dla badanego tramwaju. Zaznaczone są na nim zakresy czasowe (T , T_p , T_{przed} , T_{po}), które wykorzystano do obliczeń wskazanych ekspozycyjnych poziomów dźwięku – SEL_T i SEL_{T_p} . Dodatkowo wyznaczono ekspozycyjne po-

ziomy dźwięku $SEL_{T_{przed}}$ oraz $SEL_{T_{po}}$ w celu porównania narastania i spadku poziomu ciśnienia akustycznego przed i po przejeździe tramwaju przez punkt pomiarowy.



Rys. 3. Sposób wyznaczania ekspozycyjnego poziomu dźwięku pojazdu szynowego [3]



Rys. 4. Wizualizacja sposobu uśredniania poziomu dźwięku w prezentowanych badaniach [rys. autor]

Wyniki obliczeń ekspozycyjnego poziomu dźwięku A dla poszczególnych przejazdów z uwzględnieniem różnych czasów uśredniania podano w tabelicy 2. (pomiar przeprowadzono przy ulicy Warszawskiej i Starołęckiej). Ponadto, w tabelicy pokazano różnice pomiędzy ekspozycyjnymi poziomami dźwięku uwzględniającymi czas rejestracji pomiaru T oraz T_p . Ostatni wiersz tabelicy zawiera wartości średnie z przeprowadzonych badań. Na ich podstawie można stwierdzić, że średnia różnica pomiędzy wartościami ekspozycyjnego poziomu dźwięku uwzględniającego przedział czasowy T oraz T_p wynosi 8 dB. Z tego powodu można wnioskować, że wykorzystanie do obliczeń czasu uśredniania T_p jest bardziej zasadne, ponieważ wyniki uzyskane z obliczeń w większym stopniu obrazują skalę problemu, jakim jest hałas. Natomiast średnia wartość ekspozycyjnego poziomu dźwięku SEL_T jest taka sama, jak wartości ekspozycyjnego poziomu dźwięku, uwzględniającego w obliczeniach przedział czasowy T_{przed} .

Tablica 2

Wyniki obliczeń ekspozycyjnego poziomu dźwięku (SEL) z uwzględnieniem poszczególnych czasów i prędkości przejazdu tramwajów Solaris Tramino S105p

Lp.	Prędkość [km/h]	SEL_T _p [dB]	SEL_T [dB]	SEL_T _{przed} [dB]	SEL_T _{po} [dB]	Różnica SEL_T _p i SEL_T [dB]
1	23,8	67	63	63	63	4
2	24,0	67	59	59	64	9
3	28,9	69	59	59	67	10
4	35,1	69	59	59	67	10
5	39,3	71	67	67	68	4
6	44,5	79	71	71	77	8
7	46,5	74	64	64	72	10
8	47,0	71	63	63	70	8
9	48,4	72	63	63	71	9
10	48,4	81	73	73	78	8
11	50,5	82	74	74	78	8
12	51,0	73	64	64	71	9
13	51,2	81	73	73	78	8
14	51,4	80	72	72	76	8
15	57,6	72	64	64	69	9
16	58,2	82	74	74	79	8
17	58,8	74	65	65	71	10
18	61,0	82	74	74	79	7
19	61,3	82	73	73	78	8
20	65,8	82	74	74	80	9
ŚREDNIA	48	75	67	67	73	8

Na rysunku 5 pokazano wykres ekspozycyjnego poziomu dźwięku w zależności od prędkości przejazdu z zaznaczeniem parametrów SEL_T oraz SEL_T_p.

Porównano parametry przedstawione na rysunku 5 i obliczono współczynniki korelacji dla tego samego pomiaru sygnału akustycznego. Obliczenia wykonano zgodnie z metodą korelacji Spearmana (założono, iż wyznaczone parametry są nieparametryczne). Współczynniki korelacji wynoszą:

- 0,94 dla parametrów SEL_T_p i SEL_T,
- 0,73 dla parametrów Prędkości i SEL_T,
- 0,81 dla parametrów Prędkości i SEL_T_p.

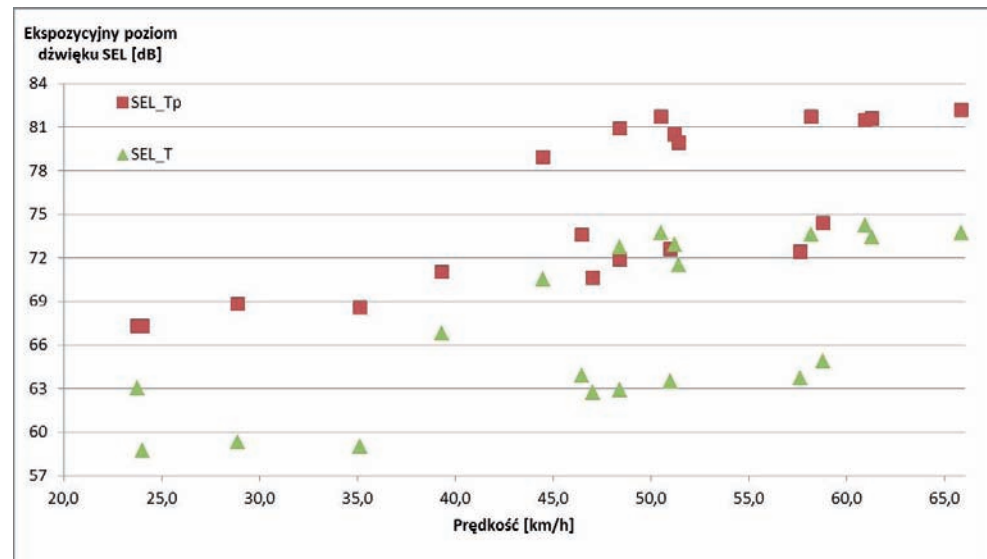
Przedstawione wyniki obliczeń są zbliżone do jedności, co świadczy o silnej korelacji wymienionych

parametrów. Szczególnie warto zwrócić uwagę na dwa rodzaje ekspozycyjnych poziomów dźwięku, których współczynnik korelacji wynosi 0,94.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dla analizy akustycznej przejazdu pojazdów szynowych nie ma większego znaczenia, czy wybrać ekspozycyjny poziom dźwięku z zakresem czasu uśredniania T_p czy T, ponieważ:

- różnica uśrednionych wartości ekspozycyjnych poziomów dźwięku wynosi średnio **8 dB**,
- współczynnik korelacji pomiędzy parametrami jest bardzo wysoki – **0,94**.



Rys. 5. Wykres eksponcyjnego poziomu dźwięku SEL w zależności od prędkości przejazdu tramwaju [rys. autor]

Wykorzystanie do badań zakresu czasu uśredniania T_p wydaje się bardziej zasadne, gdyż wynik jest mniej uśredniony (wyższe wartości), przez co dokładniej obrazuje skalę problemu hałasu, z którym ma się do czynienia. Ponadto współczynnik korelacji SEL_T_p z prędkością jest wyższy. Można również zauważyć następujące zależności:

- 1) w każdym z analizowanych przypadków, wartości eksponcyjnego poziomu dźwięku dla uśrednionego zakresu czasu T i zakresu czasu przed przejazdem tramwaju (T_{przed}) były **jednakowe**,
- 2) różnice pomiędzy wartościami eksponcyjnego poziomu dźwięku dla uśrednionego zakresu czasu T_p i zakresu czasu po przejeździe pojazdu (T_{po}) wynosiły średnio **2 dB**.

Należy również rozpatrzyć aspekt wykonywania normatywnych pomiarów akustycznych, zgodnie z normą ISO 3095, w warunkach gęstej zabudowy miejskiej. Zagadnienie jest problematyczne ze względu na kryterium lokalizacji punktu pomiarowego w odległości 7,5 m od osi toru. Częsty brak możliwości umieszczenia przetwornika elektroakustycznego w warunkach miejskich jest powodem wykonania pomiarów akustycznych według własnej metodyki badawczej. W następnym etapie badań autorzy chcą skupić się na analizie wyników pomiarów poziomu dźwięku, w zależności od odległości punktów pomiarowych od źródła dźwięku.

Badanie przedstawione w artykule zrealizowano w projekcie badawczym „Innowacyjny tramwaj miejski” (WND-DEM-1-281/00), finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w programie DEMONSTRATOR+ (wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej).

Literatura

1. Czechyra B., Firlik B., Tomaszewski F.: *Monitoring System of the Tram Vibroacoustic Activity Level: General Concept*, nr 314, Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press, 2014, Stirlingshire, Szkocja.
2. Czechyra B.: *Noise and vibration activity of trams as a development of a tram acoustic signature*, nr 449, Proceedings of 19th International Congress on Sound and Vibration, 08-12.07.12, Wilno, Litwa.
3. EN ISO 3095:2005: *Railway applications – Acoustics. Measurement of noise emitted by railbound vehicles*.
4. Nowakowski T., Staśkiewicz T.: *Wpływ balastowania torowiska na drgania parasejsmiczne w eksploatacji tramwajów*, Instytut Kolejnictwa, Problemy kolejnictwa, 2016.

Źródła Internetowe:

5. www.mpk.poznan.pl [dostęp na dzień: 30.10.2015].
6. www.solarisbus.com [dostęp na dzień: 30.10.2015].

Possibility Simplify the Procedure of Tram Noise Monitoring from Viewpoint of Automation Analytical Process

Summary

The article presents the results of analysis carried out for automatization of analytical procedures for tram noise monitoring. The primary analytical procedures were developed based on the ISO 3095:2005 standard. However, it was decided to develop own research methodology. Due to, that fulfillment of all the requirements in strict urban area is impossible. The analysis of sensitivity symptom to different averaging data condition changes is presented in the comparative study. Also the possibility of its application in the vibroacoustic monitoring system of trams is proposed. There are the two main aims of the study. Firstly, checking the extent to which, the time before and after the passage of the vehicle through the measurement point, has an impact on the calculation of the exposure sound level A (SEL), on selected tram. Secondly, ensure if obtained characteristics can be considered as own, assigned to the type of vehicle. The study presents a part of research carried out in the Department of Rail Vehicles of University of Technology in Poznan, in terms of comprehensive description of the interaction of light rail vehicle – track in a highly urbanized environment. In this range, the crucial becomes an analysis of vibroacoustic activity of the tram, which is presented here.

Keywords: tram, acoustic measurements, noise monitoring system, rail vehicles

Возможности упрощения процедур контроля трамвайного шума с точки зрения автоматизации аналитического процесса

Резюме

В статье представлен анализ измерений акустических сигналов генерированных во время теста pass-by избранного типа легких рельсовых единиц в условиях нормальной эксплуатации. Измерения шума были проведены в соответствии с требованиями нормы ISO 3095. Целью анализа было проверить в какой степени учет времени до и после проезда через точку измерений влияет на вычисление дисплейного уровня звука A.

Ключевые слова: трамвай, акустические измерения, система контроля шума