

Radosław MARCZUK ¹
Ryszard OLSZEWSKI ¹

PROBLEM DRGAŃ I HAŁASU W ŚRODKACH TRANSPORTU PUBLICZNEGO

Celem niniejszej pracy jest sformułowanie wstępnych propozycji rozwiązań technicznych zmierzających do ograniczenia odczuwalnych wibracji oraz hałasu we wnętrzu pojazdu autobusowego. Analizy dokonano w oparciu o szereg pomiarów dokonanych w wybranych pojazdach. Zwrócono szczególną uwagę na identyfikację wymuszeń wibroakustycznych od silnika, wstępną ocenę stanu akustycznego i drganiowego wewnątrz autobusów, oraz analizę propagacji hałasu do wnętrza autobusu.

Obiektem badań były autobusy A1012T i A0909L produkowane przez AUTOSAN S.A.

NOISE AND VIBRATIONS PROBLEM IN THE PUBLIC TRANSPORT

The main goal of this work is formulation the initial proposals of technical solution to minimize vibrations and noise inside buses. The analysis is based on a series of measurements from selected vehicles. The identification of vibroacoustic excitation from the engine, preliminary assessment acoustic and vibration parameters inside the buses and noise propagation paths was investigated.

Research focused on buses A1012T and A0909L produced by AUTOSAN S.A.

1. WSTĘP

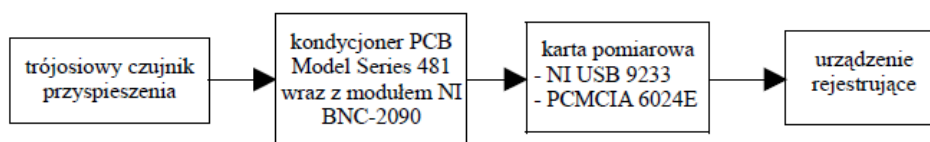
Problem związany z uciążliwością hałasu oraz drgań przenoszonych do wnętrza środków komunikacji, takich jak autobusy jest problemem sygnalizowanym od lat. Tylko z pozoru wydawać by się mogło, że rozwój współczesnej techniki motoryzacyjnej wyeliminował te niedogodności. Nacisk kładziony na stronę ekologii silników o zapłonie samoczynnym wymusił na producentach autobusów stosowanie w produkowanych pojazdach zunifikowanych jednostek napędowych. Przy takim podejściu nie zwrócono szczególnej uwagi na dostosowanie konstrukcji nadwozi do dostępnych na rynku typoszeregów silników. Może to prowadzić do problemu nadmiernego hałasu i drgań odczuwanych przez pasażerów.

2. POMIAR DRGAŃ

Pomiary przyspieszeń drgań zrealizowano podczas postoju pojazdu, przy pracy silnika na biegu luzem z następującymi prędkościami obrotowymi wału silnika:

- 600 obr/min,
- 1200 obr/min,
- 2000 obr/min.

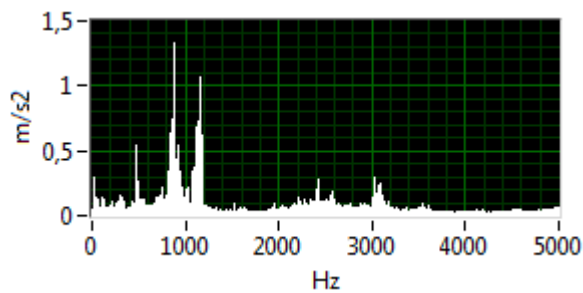
Pomiary przyspieszeń drgań wykonano według schematu prezentowanego na rysunku 1. W pomiarach wykorzystano środowisko LabVIEW, co pozwoliło na jednoczesny pomiar sygnałów w 16 kanałach (rejestracja sygnałów z pięciu trójosiowych czujników przyspieszenia).



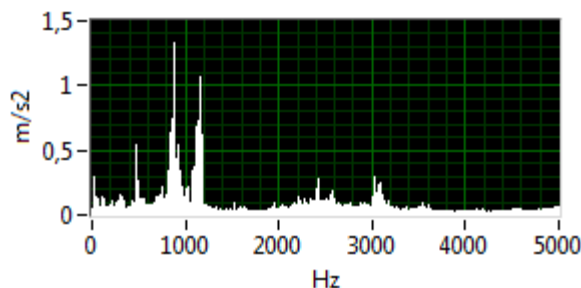
Rys. 1. Uproszczony schemat toru pomiarowego

Drgania rejestrowane były w następujących miejscach:

- 1 – silnik,
- 2 – podłużnica, luk aparatu grzewczego,
- 3 – podłużnica, luk bagażowy,
- 4 – płyta podłogowa, mocowanie od strony luku bagażowego,
- 5 – stelaż fotela pasażera



Rys. 2. Widmo drgań zarejestrowane w A1012T



Rys. 3. Widmo drgań zarejestrowane na podłuznicy A1012T

W wynikach zwracają uwagę widma sygnałów zarejestrowane w przypadku A1012T z silnikiem Renault (Rysunek 2), które niezależnie od prędkości obrotowej jednostki napędowej wskazują na wzbudzenie się drgań silnika o częstotliwości ok. 850Hz.

Trudno jest wskazać jednoznaczną przyczynę tego stanu rzeczy, ale wykluczając urządzenia dodatkowe prawdopodobnym może być źle dobrane zawieszenie silnika. Zdają się to potwierdzać widma przyspieszeń drgań rejestrowane na podłuznicy w pobliżu silnika z widocznymi podbiciami dla częstotliwości odpowiednio 30Hz, 60Hz i 100Hz (Rysunek 3).

O ile składowe wyższych częstotliwości stosunkowo łatwo są tłumione, to w przypadku niskich będą się one propagować na dalsze elementy pojazdu. Może to mieć związek np. ze zbyt małą sztywnością odcinka od tylnej osi do tyłu pojazdu. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku pojazdu z silnikiem Cummins, choć występuje z mniejszymi amplitudami i innymi częstotliwościami.

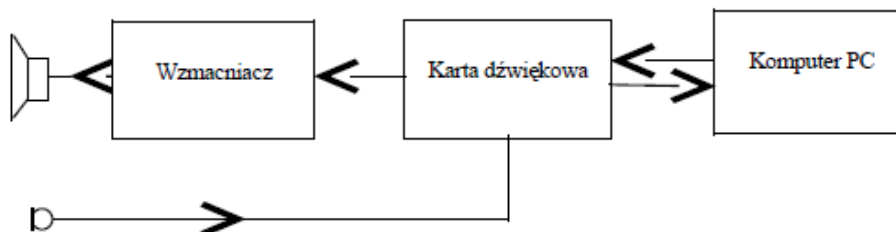
W każdym z badanych pojazdów widoczne są stosunkowo duże amplitudy przyspieszeń drgań podłogi jak i stelaża fotela pasażerskiego w zakresie niskich częstotliwości.

W ramach pracy nie prowadzono badań w kierunku przenoszenia się drgań na organizm człowieka jako pasażera pojazdu, gdyż wymagało by to spełnienia odpowiednich warunków pomiaru. Jednakże traktując uzyskane rezultaty jako wartości przybliżone do tych jakie byłyby przenoszone na człowieka to należy je uznać jako wyraźnie odczuwalne.

3. POMIARY AKUSTYCZNE

Badania akustyczne przeprowadzono dla autobusów A1012T oraz A0909L, których wykończenia wewnątrz są różne pod względem zastosowanych materiałów.

Polegały one na wyznaczeniu odpowiedzi impulsowej drogi transmisji fali dźwiękowej ze źródła do punktu odbioru. Na podstawie zmierzonej odpowiedzi impulsowej obliczone zostały parametry akustyczne badanych wewnątrz, tak przedziału pasażerskiego jak i komory silnika oraz luków bagażowych. Do wyznaczenia odpowiedzi impulsowej użyto zestawu pomiarowego pokazanego na rysunku 4



Rys. 4. Schemat blokowy układu do pomiarów odpowiedzi impulsowej układów akustycznych

Sygnalelem wymuszającym była binarna sekwencja MLS (długa sekwencja impulsów). Sygnał ten po wzmacnieniu był przekazywany do źródła dźwięku o charakterystyce wszechkierunkowej. Kuliste źródło dźwięku stanowiło 6 głośników typu BG 20/70W Visaton zamkniętych w sześcienniej obudowie. Sygnał akustyczny poprzez mikrofon pomiarowy (G.R.A.S. typu 40AN 8394) oraz kartę dźwiękową był rejestrowany na komputerze PC.

Następnie wyznaczana była odpowiedź impulsową drogi transmisji sygnału akustycznego i na jej podstawie obliczono poszczególne parametry akustyczne wnętrza. Wyznaczone zostały: czas pogłosu T_{30} , wczesny czas zaniku EDT, wskaźnik wyrazistości dla muzyki C_{80} , wyrazistość D_{50} , wskaźnik zrozumiałości mowy STI oraz wskaźnik zrozumiałości mowy RASTI. Pomiary wykonano w dwóch punktach pomiarowych. Mikrofon oraz głośnik były usytuowane na wysokości 1,2 m od podłogi.

Wykonano również pomiary fali dźwiękowej przenikającej z komory silnika do przestrzeni pasażerskiej i luków bagażowych. W tym celu źródło dźwięku umieszczono w komorze silnika w miejsce montowanej jednostki napędowej.

Punkty pomiarowe wewnątrz kabiny zlokalizowane były na środku tylnych foteli pasażerskich na wysokości 1m mierzone od siedziska oraz nad włazem inspekcyjnym umieszczonym nad skrzynią biegów. Pomiary wykonano także w lukach bagażowych, w lewej części pojazdu – pkt. A oraz prawej części pojazdu – pkt B.

Na ich podstawie wyznaczone zostały parametry oceny akustycznej wnętrza.

2.1 Parametry określające akustykę wnętrza

Umożliwiają one obok oceny jakości odbioru muzyki również ocenę zrozumiałości mowy. Idea polega na porównywaniu różnych części odpowiedzi impulsowej ze sobą w celu otrzymania obiektywnych miar. Ma to związek z ograniczeniami organu słuchu w rozróżnianiu niezliczonych sygnałów dźwiękowych. Przedstawione poniżej wskaźniki porównują energię przenoszoną w „pożytecznych” odbiciach z dźwiękiem bezpośrednim włącznie oraz z energią zawartą w pozostałych odbiciach.

Czas pogłosu formalnie definiowany jako okres od chwili wyłączenia źródła dźwięku aż do momentu, gdy poziom natężenia dźwięku zmniejszy się o 60 dB. Jest jednym z podstawowych parametrów oceny akustycznych własności pomieszczeń. Tradycyjne metody pomiaru polegają na analizie krzywych zaniku energii dźwiękowej, które są rejestrowane po wyłączeniu źródła, zaraz po tym jak w pomieszczeniu zostanie osiągnięty

stan nasycenia energią dźwiękową. Jednakże z punktu widzenia współczesnej praktyki pomiarowej określa się go w oparciu o wyznaczoną odpowiedź impulsową.

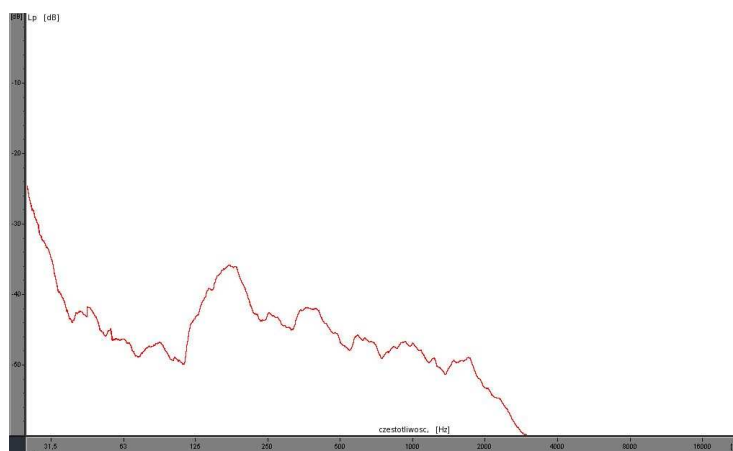
T_{30} – czas pogłosu określany w oparciu o zmniejszenie natężenia dźwięku o 30 dB.

EDT – wczesny czas pogłosu (z ang. *early decay time*) jest ważnym parametrem charakteryzującym prędkość zaniku dźwięku. Jest on określany na podstawie prędkości zaniku dla pierwszych 10 dB spadku poziomu natężenia dźwięku po wyłączeniu źródła.

D_{50} – wyrazistość dźwięku, jest miarą oceniającą jaka część energii akustycznej dociera do słuchacza drogą bezpośrednią (w ciągu pierwszych 50 ms) w odniesieniu do energii całkowitej. Wyznaczana jest w oparciu o odpowiedź impulsową drogi sygnału akustycznego między źródłem dźwięku, a punktem odbioru.

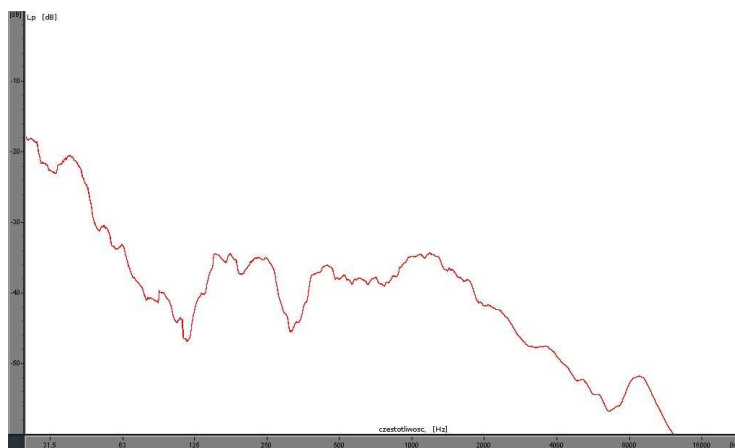
C_{80} – wskaźnik wyrazistości muzyki, jest wielkością, która formalnie jest podobna do wyrazistości dźwięku, lecz przewidziana do określania czystości odbioru muzyki w pomieszczeniach. Większy czas opóźnienia (80 ms w porównaniu do 50 ms) uwzględnia fakt, że w przypadku muzyki odbicie jest mniej wykrywalne niż w przypadku sygnału mowy.

STI – wskaźnik zrozumiałości mowy (z ang. *speech transmission index*), lub jego uproszczona wersja $RASTI$ (z ang. *rapid speech transmission index*). Fala dźwiękowa biegnąca od źródła jako sygnał posiada obwiednię zmodulowaną sygnałem sinusoidalnym o pewnej częstotliwości modulacji. Układ akustyczny jakim jest np. pomieszczenie zmienia (zmniejsza) stopień modulacji sygnału, natomiast nie zmienia kształtu sinusoidalnego fali modulacyjnej. Zmniejszenie zrozumiałości mowy zależy przede wszystkim od pogłosu i poziomu tła akustycznego, które występują wewnątrz.



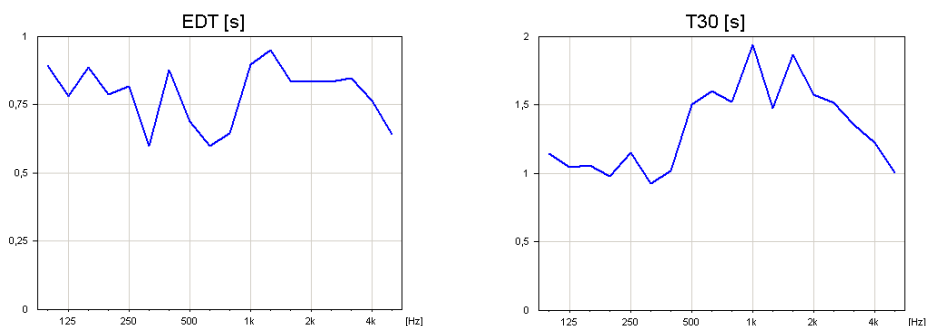
Rys.5. Charakterystyka widmowa wnętrza A1012T

Na charakterystyce widmowej dźwięku przenikającego (rysunek 5 dla autobusu A1012T) można zaobserwować maksimum pomiędzy 125 Hz a 250 Hz. Prawdopodobną przyczyną jest spadek izolacyjności akustycznej od pokrywy kanału inspekcyjnego zlokalizowanego tuż przed ostatnim rzędem siedzeń. Nie można również wykluczyć przenikania hałasu od braku szczelności między pokrywą, a podłogą.



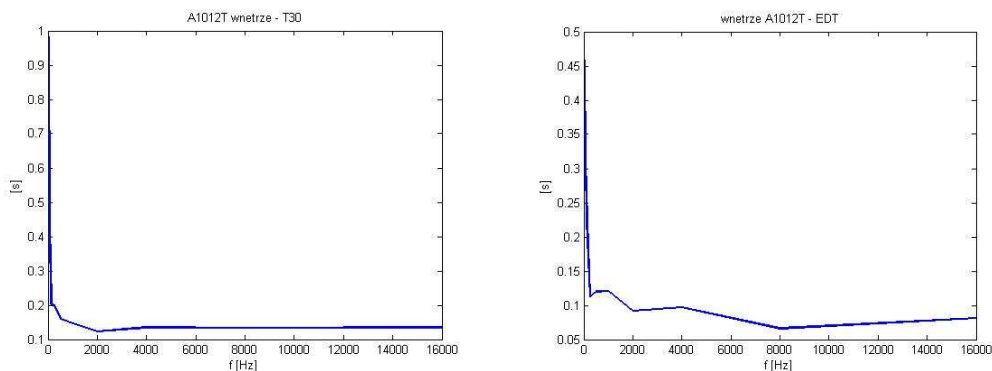
Rys. 6. Widmo hałasu przenikającego do luków bagażowych A1012T

W przypadku widma hałasu przenikającego do luków bagażowych zwraca uwagę charakterystyczne ich „pofalowanie” co świadczyć może o powstawaniu fal stojących. Parametry akustyczne EDT i T_{30} zmierzone w lukach bagażowych autobusu A1012T są wyraźnie większe od oczekiwanych dla tak stosunkowo niewielkich przestrzeni. Czas pogłosu przekracza 1s, co wskazuje wyraźnie na stosunkowo niewielkie tłumienie fali akustycznej (rysunek 7).



Rys.7. Wybrane parametry akustyczne luków bagażowych – lewa strona

Dodatkowo komory bagażowe połączone są ze sobą i pracują jak sprzężone komory rezonansowe. Zatem, nie można wykluczyć przenoszenia się do kabiny pasażerskiej hałasu od silnika dodatkowo „wzmacnianego” w lukach bagażowych. Tym bardziej, że od komory silnika wzdłuż pojazdu pod podłogą przebiega otwarta na obu końcach rura PVC zawierająca elementy służące przekazywaniu sterowania. Taki element rurowy pracuje jako falowód.

Rys. 8. Wybrane parametry akustyczne ($T30$ i EDT) wnętrza A1012TTab.1 Wskaźniki STI , $RASTI$ wnętrza A1012T

Pkt. pomiarowy	STI	$RASTI$
1	0,93	0,95
2	0,93	0,95
średnia	0,93	0,95

Należy podkreślić bardzo dobre własności akustyczne wnętrza pojazdów A1012T oraz A0909L. Obrazują to małe wartości czasu pogłosu $T30$, EDT (rysunek 8) oraz duże wartości wskaźników zrozumiałości mowy STI , $RASTI$ (Tabela 1).

Czas zaniku i czas pogłosu w lukach obok komory silnika autobusu A0909L jest nieco mniejszy w lewym łuku (średnio 0.5s), jednak w prawym łuku dochodzi prawie do 2s (średnio ok. 1s). Także i w tym przypadku sensorywnym wydaje się zwiększenie chłonności akustycznej tych wnętrz, przez co osłabiona zostanie energia fali przedostającej się do wnętrza autobusu.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych pomiarów drgań oraz pomiarów własności akustycznych autobusów A1012T i A0909L uzyskano szereg wyników, których analiza uprawnia do sformułowania wstępnych koncepcji ukierunkowanych na obniżenie aktywności wibroakustycznej pojazdów o bliźniaczej konstrukcji.

W przypadku pojazdu A1012T drgania rejestrowano dla wersji z jednostką napędową firmy Renault oraz Cummins, co pozwala na dokonanie prostego porównania rezultatów. Należy zaznaczyć, że wyposażenie wnętrza w obydwu przypadkach różniło się drobnymi

szczegółami, nie mającymi istotnego wpływu na wynik, stąd pomiary akustyczne wykonano przy zdemontowanej jednostce napędowej, zastąpionej źródłem fali dźwiękowej w jednym z tych pojazdów.

Pojazd autobusowy A0909L pod względem analizy drgań badany był z jednostką napędową firmy Cummins, zaś pod względem akustycznym analogicznie jak A1012T ze zdemontowaną jednostką napędową.

Cząstkowe uwagi co do zauważonych zjawisk zostały zawarte w poszczególnych punktach przy omówieniu wyników pomiarów. Na tej podstawie można zaproponować rozważenie następujących kierunków działań dla obniżenia aktywności wibroakustycznej pojazdów:

3.1 Drgania

Wydaje się być uzasadnionym zapoczątkowanie prac w kierunku bądź to usztywnienia zespołu silnik – tylny fragment podłóżnicy ze względu na duże amplitudy drgań, bądź przekonstruowanie tylnego fragmentu ze zwiększeniem sztywności podłóżnicy lub jej zastąpienie rozwiązaniem alternatywnym.

W tym kontekście celowym wydaje się być rozważenie zastosowania dynamicznych eliminatorów drgań wbudowanych w konstrukcję nadwozia. Należy również dokładnie przeanalizować węzły mocowania silnika. Samo określenie własności dynamicznych układu silnik – podparcie – konstrukcja pojazdu jest zadaniem trudnym. Wydaje się być celowym zbudowanie modelu opartego na metodzie elementów skończonych, który z jednej strony umożliwi identyfikację własności dynamicznych (całej konstrukcji), zaś z drugiej strony może ułatwić i przyspieszyć trafny wybór koncepcji.

3.2 Hałas

Odnosząc się do elementów stanowiących wyposażenie wnętrza, należy uznać je za wykonane z materiałów o wystarczającym tłumieniu odbić fal dźwiękowych. Decydujące znaczenie mają tutaj fotele wykonane z materiałów miękkich, które w sposób wystarczający tłumią fale akustyczne, nawet we wnętrzu A0909L (krótki czas pogłosu, dobra zrozumiałość mowy). Nie ma uzasadnionej potrzeby prowadzenia badań nad poprawą tego stanu rzeczy.

Inaczej sprawa wygląda w przypadku przenikania hałasu od pracy silnika do przestrzeni pasażerskiej. Odbywa się to drogą bezpośrednią z komory silnika oraz pośrednio przez przestrzeń bagażową. W przypadku propagacji pośredniej nie jest bez znaczenia niewielka izolacyjność akustyczna właściwa materiałowi płyt podłogi, tym bardziej, że dźwięk z komory silnika do bagażnika przenoszony jest rurą PVC (kanał przewodów elektrycznych i sterowania) obustronnie otwartą. Należy bezwzględnie zamknąć (uszczelnić) końce aby w ten sposób przeciąć drogę propagacji. Wnętrze bagażnika jest wnętrzem nietłumionym o dużym jak na jego wymiary czasie pogłosu (T_{30} , EDT). Wydaje się być celowym wprowadzenie materiałów tłumiących dla zwiększenia izolacyjności akustycznej i jednocześnie zmniejszenia czasu pogłosu.

W przypadku materiałów rozdzielających komorę silnika od przestrzeni pasażerskiej można rozważyć zastosowanie układów rezonatorowych dla zwiększenia tłumienia składowych częstotliwości widma o najwyższych amplitudach.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych 11.11.130.885

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] [1] P. T. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.
- [2] [2] H. Kuttruff, *Room Acoustic*, Elsevier 1991
- [3] [3] Z. Engel, *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, PWN, Warszawa 1993
- [4] [4] R. Hagel, J. Szuta, *Podstawy miernictwa wielkości stochastycznych*, skrypt uczelniany 1187, Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej 1985