

Tomasz STRASZEWSKI¹, Jan WARCZEK²

OCENA KOMFORTU PODRÓŻOWANIA W AUTOBUSACH KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych przez autorów w kołowych pojazdach komunikacji miejskiej. Opisano przyczyny powstawania drgań w autobusach oraz zagrożenia wynikające z narażenia organizmu człowieka na ich ekspozycję. Przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne stosowane w autobusach miejskich oraz dokonano analizy wpływu poszczególnych elementów na drgania występujące w przestrzeni transportowej pojazdu. Obiektami badań były autobusy Przedsiębiorstwa Komunikacji Miejskiej Sosnowiec, w których prowadzono badania w warunkach normalnej eksploatacji. Przeprowadzone wnioskowanie pozwoliło na ocenę komfortu podróżowania na wybranych miejscach pasażerskich, rozmieszczonych równomiernie w całym pojeździe.

Słowa kluczowe. Autobusy, komfort jazdy, drgania.

ASSESSMENT OF COMFORT TRAVELING IN BUSES PUBLIC TRANSPORT

Summary. The article presents the results of research conducted by the authors of wheeled transport vehicles. Described the causes of vibration in the buses and the risks resulting from exposure of the human body on their exposure. Presented construction solutions used in city buses and an analysis of the impact of individual components for vibration occurring in passenger space. Research facilities were buses from Sosnowiec Public Transport Company in which the study was conducted in normal transport operation. Carried out to assess the inference allowed the comfort of traveling on selected passenger seats, evenly distributed throughout the vehicle.

Keywords. Buses, traveling comfort, vibration.

1. WPROWADZENIE

Zjawisko drgań i próby zmniejszenia jego szkodliwego oddziaływania na otoczenie jest zagadnieniem badawczym, z którym zmagają się wielu inżynierów i konstruktorów maszyn. Oddziaływanie drgań jest szczególnie niebezpieczne dla człowieka, gdy ich częstotliwość jest zgodna z częstotliwością własną poszczególnych organów. Występujący rezonans potęguje negatywny wpływ drgań na organizm. Człowiek jest narażony na szkodliwe oddziaływanie

¹ Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Katowice, Poland, e-mail: tomasz.straszewski1@gmail.com

² Faculty of Transport, University of Silesia, Katowice, Poland, e-mail: jan.warczek@polsl.pl

drgań podczas zaspokajania potrzeb transportowych, realizowanych za pomocą pojazdów mechanicznych. We współczesnych autobusach można spotkać rozwiązania konstrukcyjne ograniczające drgania, które pierwotnie stosowane były tylko w samochodach osobowych. Jednym z przykładów jest zawieszenie niezależne, które jest obecnie standardem w autobusach nowszej konstrukcji. Producenci autobusów oferują wiele rozwiązań konstrukcyjnych w zależności od zapotrzebowania przedsiębiorstwa komunikacyjnego. Przykładowo, autobusy miejskie PKM Sosnowiec, ze względu na długość całkowitą oraz liczbę modułów można podzielić na:

- jednoczłonowe:
 - długości 12 m,
 - długości 15 m,
- dwuczłonowe – przegubowe, o długości 18 m.

Ze względu na rodzaj zastosowanego układu napędowego można wyróżnić:

- konwencjonalne układy napędowe z silnikiem spalinowym,
- hybrydowe układy napędowe, będące połączeniem silników spalinowego i elektrycznego.

Każde z wyżej wymienionych rozwiązań ma wady i zalety. W poniższym artykule dokonano analizy i porównania rozwiązań konstrukcyjnych pod względem oferowanego komfortu. Jako główne kryterium służące do jego oceny wybrano wypadkową wartość skuteczną przyspieszeń drgań.

2. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE STOSOWANE W AUTOBUSACH MIEJSKICH

Zgodnie z definicją, autobus to pojazd samochodowy służący do przewozu osób, w którym łączna liczba miejsc siedzących razem z fotelem kierowcy jest większa od 9. Liczba miejsc siedzących i stojących dla pasażerów musi być tak dobrana, aby dopuszczalna masa całkowita autobusu nie została przekroczona. Autobusy miejskie są to autobusy przeznaczone do przewozu pasażerów na obszarze miast i w ruchu podmiejskim. Istotnym elementem budowy autobusu jest wysokość podłogi nad poziomem jezdni. Ze względu na to kryterium, możemy wyróżnić autobusy [1]:

- niskopodłogowe, z podłogą na wysokości 350 – 370 mm,
- średniopodłogowe, z podłogą na wysokości ok. 600 mm,
- wysokopodłogowe, z podłogą na wysokości powyżej 720 mm.

Współcześnie produkowane pojazdy komunikacji miejskiej to w przeważającej większości rozwiązania niskopodłogowe.

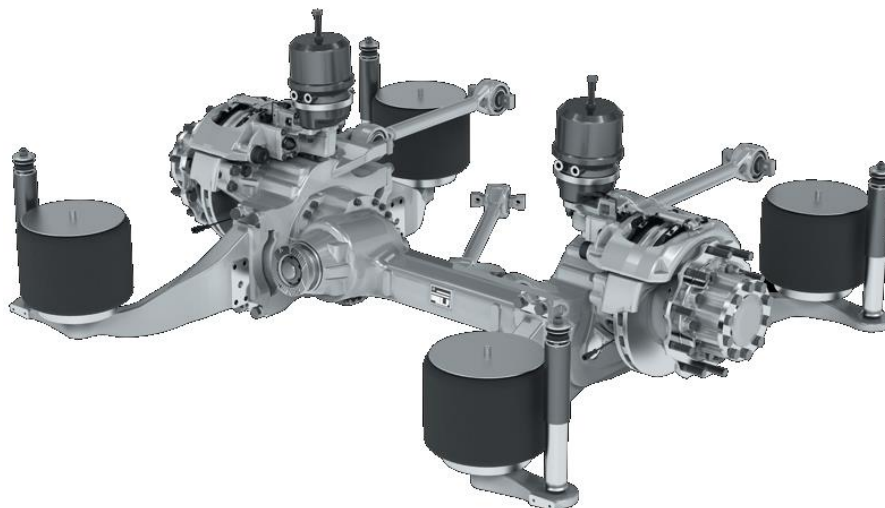
Ważnym aspektem jest usytuowanie jednostki napędowej. Ze względu na konstrukcję autobusów niskopodłogowych, silnik umieszczony jest w tylnej części pojazdu. Najpopularniejszym rozwiązaniem jest usytuowanie silnika z tyłu pojazdu w pozycji leżącej lub umieszczenie silnika w tzw. zabudowie wieżowej. Do najważniejszych zalet wynikających z umieszczenia silnika z tyłu autobusu zaliczamy:

- możliwość dobrego odizolowania akustycznego i termicznego przedziału silnikowego od wnętrza autobusu,
- niewielką odległość pomiędzy zespołami układu napędowego.

Kolejnym elementem konstrukcyjnym jest nadwozie, które powinno spełniać określone wymagania. Przy zapewnieniu dużej przestrzeni dla pasażerów powinno mieć ono lekką konstrukcję, ale z drugiej strony zapewniającą odpowiednią sztywność.

Istnieją dwa rodzaje rozwiązań konstrukcyjnych nadwozi. Nadwozie może być zabudowane na ramie podwozia - w takim przypadku połączenie szkieletu nadwozia z ramą jest wykonane za pomocą śrub lub spoin. Drugim rozwiązaniem jest nadwozie samonośne, stanowiące jednolitą konstrukcję - nadwozie to jest zbudowane na bazie kratownicy przestrzennej, wykonanej z cienkościennych profili, co pozwala na uzyskanie dużej sztywności przy stosunkowo niewielkiej masie nadwozia. Rozwiązanie konstrukcyjne nadwozia posiada znaczący wpływ na poziom drgań występujący wewnątrz autobusu. Wynika to z faktu sztywnego łączenia foteli pasażerskich z nadwoziem autobusu.

Z punktu widzenia przeprowadzanych badań, istotnym zespołem konstrukcyjnym jest układ napędowy. Moment obrotowy z silnika jest przekazywany za pomocą skrzyni biegów i wału napędowego do przekładni głównej mostu napędowego. W autobusach niskopodłogowych stosowane są portalowe mosty napędowe z asymetrycznie położoną przekładnią główną. Portalowy most napędowy jest wyposażony w przekładnię dwustopniową. Pierwszy stopień stanowi asymetrycznie położona przekładnia główna, a drugi jest realizowany przez zwolnice, czyli umieszczony przy kołach układ kół zębatych, zwiększające moment obrotowy. Zastosowanie przekładni dwustopniowej pozwoliło zmniejszyć rozmiary mostu napędowego, a w szczególności przekładni głównej. Rysunek 1 przedstawia budowę portalowego mostu napędowego montowanego w autobusach niskopodłogowych.



Rys. 1. Budowa mostu portalowego ZF [6]

Fig. 1. Construction of rear axle ZF

Ze względu na duże gabaryty autobusów miejskich, stosuje się w nich układy zawieszenia podobne do tych, które znalazły swoje zastosowanie w samochodach ciężarowych. Od pewnego czasu stosuje się także rozwiązanie niezależnego zawieszenia przedniej osi. Niezależne zawieszenie oferuje większy komfort jazdy oraz lepszą kierowność. Przykład takiego rozwiązania, bazującego na elementach pneumatycznych, przedstawiono na rys. 2. Elementy pneumatyczne umożliwiają zmianę charakterystyki sprężystości w zależności od bieżącego obciążenia.



Rys. 2. Budowa niezależnego zawieszenia przedniej osi ZF RL 75 EC [6]
 Fig. 2. Construction of independent front suspension ZF RL 75 EC

Całkowite obciążenie elementów konstrukcyjnych w autobusie jest w dużej mierze uzależnione od liczby osób przebywających w jego wnętrzu i w czasie jazdy podlega ono nieustannym zmianom. Obecnie standardem stało się wyposażanie autobusu w system ECAS, umożliwiające obniżenie wysokości podłogi do zadanego poziomu podczas postoju na przystanku.

3. ODDZIAŁYWANIE DRGAŃ NA PASAŻERÓW AUTOBUSU

Drgania są zjawiskiem niepożądanym szczególnie w tych miejscach, w których przebywają ludzie. Drgania przedmiotów będących w bezpośrednim kontakcie z człowiekiem powodują drgania narządów wewnętrznych, a także są odczuwane za pomocą mechanoreceptorów umiejscowionych na skórze i w mięśniach. Poprzez mechanoreceptory skóry i innych tkanek drgania powodują przenoszenie określonych informacji do ośrodkowego układu nerwowego człowieka. Te informacje natomiast powodują odruchowe reakcje całego organizmu. Drgania możemy podzielić na dwie grupy, w zależności od sposobu oddziaływania na organizm człowieka oraz miejsca ich wnikania [3]:

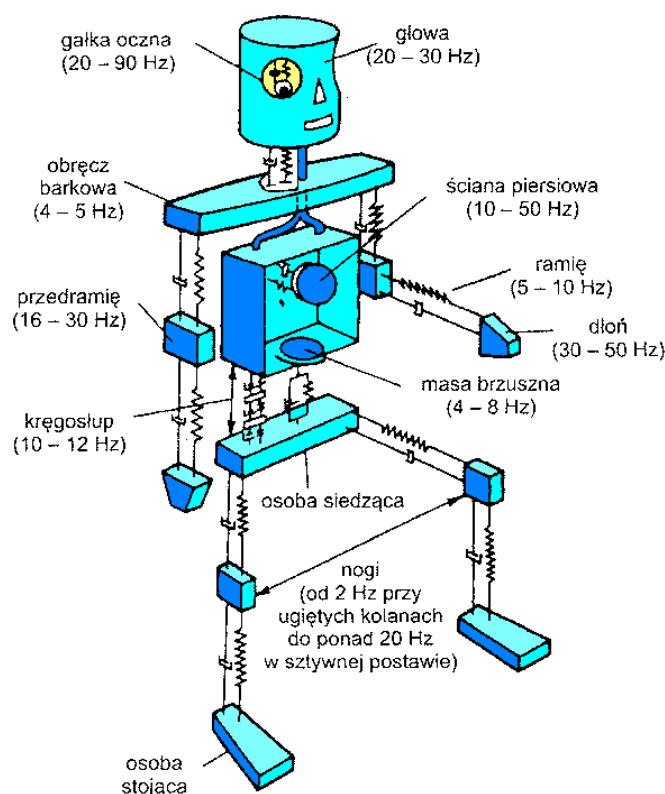
- drgania o oddziaływaniu ogólnym, wnikające do organizmu za pomocą:
 - stóp – w pozycji stojącej,
 - bioder – w pozycji siedzącej,
 - pleców – w pozycji leżącej,
- drgania o oddziaływaniu miejscowym – wnikające do organizmu przez kończyny górne.

Wszystkie niekorzystne zmiany w organizmie człowieka wywołane szkodliwym oddziaływaniem drgań nazywamy chorobą wibracyjną. Uszkodzenia w organizmie człowieka pod wpływem działania drgań możemy podzielić na:

- zmiany ostre – występujące w czasie trwania ekspozycji i niedługo po jej zakończeniu,
- zmiany chroniczne – występujące na skutek długotrwałego działania drgań o dużym natężeniu.

Drgania nie wywołują takich samych zmian u wszystkich ludzi. Wpływ drgań jest także uwarunkowany od cech fizjologicznych i psychicznych człowieka, wśród których możemy wyróżnić: wiek, budowę i masę ciała, wzrost, płeć, pobudliwość nerwową, stan zdrowia, stan psychiczny. Indywidualne cechy człowieka decydują także o częstotliwościach rezonansowych poszczególnych części jego ciała.

Do parametrów opisujących szkodliwość drgań możemy zaliczyć: częstotliwość, czas oddziaływania, chwilowe przyspieszenia, przebieg zmian w czasie oddziaływania oraz kierunek działania. Najbardziej niebezpieczne są drgania rezonansowe, o częstotliwości zgodnej z częstotliwością drgań własnych poszczególnych narządów. Rysunek 3 przedstawia model fizyczny ciała człowieka, na którym zaznaczono częstotliwości rezonansowe poszczególnych narządów.



Rys. 3. Model ciała człowieka opracowany przez R.R Coermana [4]

Fig. 3. Model of the human body developed by R. R. Coermana

W autobusach miejskich głównym źródłem drgań są wymuszenia pochodzące od nierówności nawierzchni drogi, które są przenoszone poprzez układ zawieszenia na cały pojazd. Do pozostałych źródeł drgań zaliczamy [3]:

- pracę przekładni mechanicznych,
- drgania łożysk,
- nierównomierność pracy silnika spalinowego,
- pulsacje ciśnienia powietrza, wywołane pracą wentylatorów,
- drgania spowodowane współpracą opon z nawierzchnią drogi.

Źródłem drgań są także zużywające się elementy pojazdu, które wskutek długotrwałej eksploatacji doznają uszkodzeń lub nadmiernych luzów.

4. OPIS I WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Badania komfortu jazdy w autobusach komunikacji miejskiej zostały wykonane na podstawie wytycznych zawartych w Polskiej Normie PN-EN 14253+A1: 2011 „Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia – wytyczne praktyczne”. Norma opisuje sposoby wyznaczania ekspozycji na drgania o działaniu ogólnym, z zastosowaniem skorygowanych częstotliwościowo skutecznych przyspieszeń drgań, dla częstotliwości z zakresu od 0,5 do 80 Hz [2].

Pomiary drgań zostały wykonane na wybranych siedziskach pasażerskich autobusów. Podczas pomiarów rejestrowano:

- wartość skuteczną przyspieszeń drgań,
- wartość szczytową przyspieszeń drgań.

Do wykonania pomiarów został użyty układ pomiarowy, składający się z wibrometru WH-30 i dysku gumowego z zabudowanym trójosiowym przetwornikiem drgań (rys. 4).



Rys. 4. Poduszka pomiarowa wykorzystana w badaniach
Fig. 4. The pad measuring used in research

Wibrometr umożliwia wykonywanie pomiarów dla każdej osi z osobna, dlatego otrzymane wyniki zostały poddane dalszej analizie. Na podstawie (1) zostały obliczone wartości wypadkowe, będące ważoną sumą wektorową przyspieszeń mierzonych w trzech prostopadłych kierunkach:

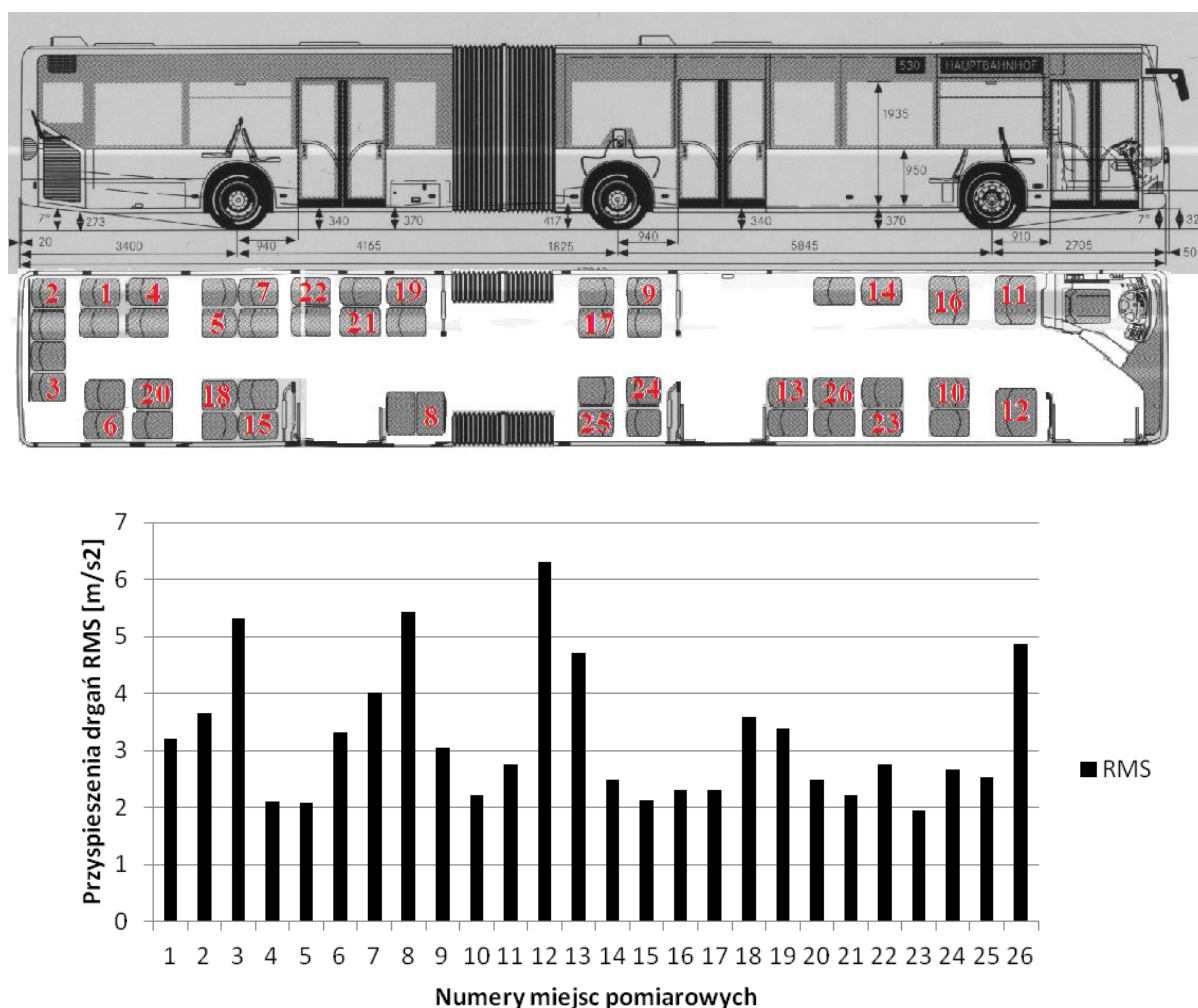
$$a = \sqrt{(1,4 * a_x)^2 + (1,4 * a_y)^2 + a_z^2} \quad , \quad (1)$$

gdzie:

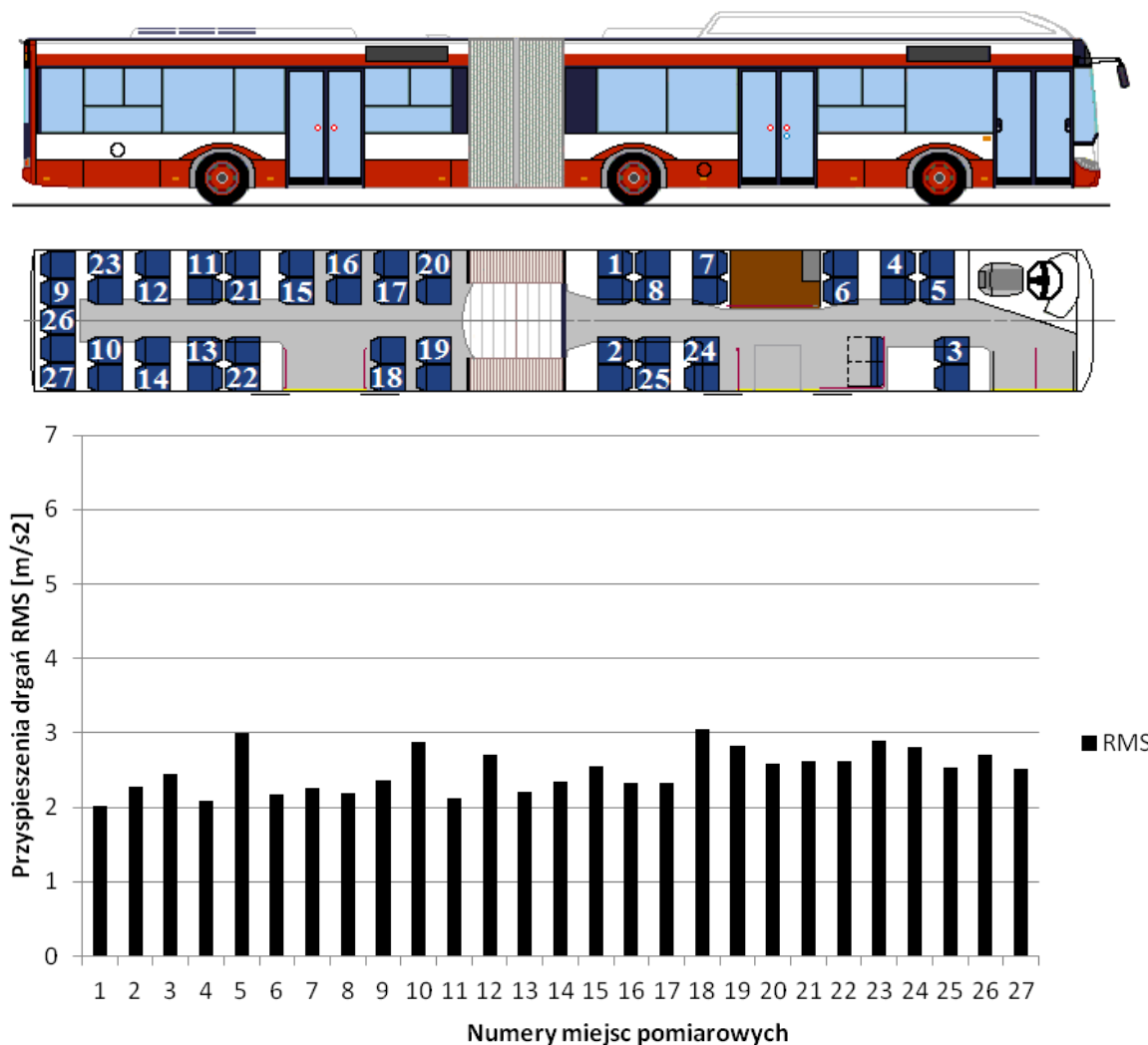
- a – przyspieszenia wypadkowe drgań,
- a_x – przyspieszenia drgań działające w kierunku poziomym x, zgodnym z osią wzdłużną pojazdu,
- a_y – przyspieszenia drgań działające w kierunku poziomym y, zgodnym z osią poprzeczną pojazdu,
- a_z – przyspieszenia drgań działające w kierunku pionowym z.

Badania były przeprowadzane podczas normalnej eksploatacji autobusu, w czasie regularnych kursów, zgodnie z wyznaczonym rozkładem jazdy. Pierwszą grupę pojazdów badawczych stanowiły autobusy trójosiowe, o długości 15 m dwóch producentów: Solaris Urbino 15 III oraz Mercedes Citaro L. W badanych pojazdach najmniejsze wypadkowe wartości przyspieszeń drgań wynosiły odpowiednio: ok. $1,6 \text{ m/s}^2$ w autobusie Solaris Urbino 15 III (zarejestrowano je na siedziiskach w okolicach osi napędzanej) i $1,93 \text{ m/s}^2$ w autobusie marki Mercedes. Największe wartości przyspieszeń wypadkowych wynosiły $4,94 \text{ m/s}^2$ w autobusie Solaris Urbino 15 III (w przedniej części pojazdu) i $6,94 \text{ m/s}^2$ w autobusie marki Mercedes. W każdym z autobusów można zaobserwować, że niższe wypadkowe wartości przyspieszeń drgań występują przed przednią osią i za tylną osią napędzaną, patrząc od tyłu pojazdu. Duże wartości przyspieszeń drgań zostały odnotowane w części znajdującej się w pobliżu przedziału przeznaczanego dla kierowcy.

Drugą grupę autobusów, w których przeprowadzono badania komfortu jazdy, stanowiły autobusy przegubowe, o długości 18 m. Pojazdy, w których przeprowadzono badania, to odpowiednio Solaris Urbino 18 Hybrid i Mercedes Citaro G. Jest to zestawienie autobusów różnych producentów, ale także porównanie dwóch różnych układów zasilania. Wyniki badań pozwoliły na ocenę wpływu nowoczesnego hybrydowego układu zasilania na poziom komfortu jazdy. Rozmieszczenie punktów pomiarowych oraz uzyskane wyniki badań przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Wyniki pomiarów drgań w autobusie Mercedes Citaro G
Fig. 5. Results of measurement vibration in bus Mercedes Citaro G



Rys. 6. Wyniki pomiarów drgań w autobusie Solaris Urbino 18 Hybrid
 Fig. 6. Results of measurement vibration in bus Solaris Urbino 18 Hybrid

Powyższe wykresy prezentują wyniki pomiarów wykonanych w autobusach przegubowych. Na schematach autobusów zostały oznaczone poszczególne miejsca pomiarowe, które odpowiadają numeracji na osi odciętych powyższych wykresów.

W Mercedesie Citaro G najniższa wartość przyspieszeń wyniosła $1,93 \text{ m/s}^2$, a najwyższa $6,30 \text{ m/s}^2$. Bardzo dobre wyniki uzyskał pojazd hybrydowy Solaris Urbino 18 - najniższe zarejestrowane wartości ważonych częstotliwościowo przyspieszeń drgań są zbliżone do pozostałych autobusów i oscylują wokół 2 m/s^2 , lecz wartości najwyższe osiągają wartość ok. 3 m/s^2 . Maksymalna wartość przyspieszeń drgań jest o połowę mniejsza niż w pozostałych autobusach.

Na podstawie przeprowadzonych badań w autobusach przegubowych można stwierdzić, że:

- drgania w okolicach przegubu osiągają większe wartości w części za przegubem niż w części przedziału pasażerskiego znajdującej się przed nim,
- przyspieszenia drgań przyjmują większe wartości w okolicy silnika i układu przeniesienia napędu w autobusie z napędem konwencjonalnym,

- w autobusie hybrydowym występują dodatkowe drgania związane z załączaniem układu ładowania baterii, znajdującego się w pierwszym członie pojazdu, lecz wartości ich przyspieszeń nie są bardzo wysokie,
- w przedniej części autobusu występują miejsca z dużymi wypadkowymi wartościami przyspieszeń drgań,
- w autobusie Mercedes Citaro G najniższe wartości przyspieszeń odnotowano pomiędzy pierwszą i drugą osią pojazdu,
- w drugim członie autobusu hybrydowego jest wiele miejsc, na których występują niskie wartości przyspieszeń drgań.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy można stwierdzić, że:

- w autobusach jednoczłonowych największe wartości przyspieszeń drgań występują w okolicy silnika i kierowanej osi autobusu,
- najmniejsze drgania w autobusach Solaris Urbino 15 III i Mercedes Citaro L występują w miejscach mocowania sprężyn pneumatycznych i okolicach środkowych stref pojazdów,
- autobusy przegubowe charakteryzują się tym, że największe drgania występują w nich w okolicach przegubu,
- wartości badanego parametru mieszczą się w zakresie od ok. 1,5 – 6,5 m/s²,
- przyspieszenia RMS zmierzone w autobusach marki Solaris osiągały najniższe wartości spośród wszystkich przebadanych autobusów,
- praca silnika ma mały wpływ na wartości przyspieszeń powstających podczas jazdy na fotelach oddalonych od komory silnikowej,
- drgania zmierzone na fotelach w pobliżu silnika osiągają duże wartości podczas jazdy, autobusem, który uzyskał najlepsze wyniki wartości zdefiniowanej równaniem (1), występujące podczas jazdy, jest Solaris Urbino 18 z napędem hybrydowym. Wartości zmierzone w tym pojeździe są niższe w porównaniu do innych badanych pojazdów.

Podsumowując, można stwierdzić, że pojazd z napędem hybrydowym oprócz korzyści ekonomicznych i ekologicznych oferuje także większy komfort jazdy dla pasażerów.

Bibliografia

1. Prochowski L., Żuchowski A.: Samochody ciężarowe i autobusy. WKiŁ, Warszawa 2011.
2. PN-EN 14253+A1:2011 Drgania mechaniczne. Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia. Wytyczne praktyczne.
3. Engel Z.: Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem. PWN, Warszawa 2001.
4. Engel Z., Zawieska W. M.: Hałas i drgania w procesach pracy. Źródła, ocena, zagrożenia. CIOP- PIB, Warszawa 2010.
5. <http://www.igkm.pl/site/tabor,autobusy.html>
6. www.zf.com
7. Straszewski T.: Ocena komfortu jazdy w autobusach PKM Sosnowiec. Praca magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katowice 2012.