

Measurement of driver vibro-acoustic comfort in electric multiple units under normal operating conditions

The article presents the methodology and results of comfort measurements in terms of noise and vibration in the driver seat of new and modernized electric multiple units, in accordance with applicable regulations and standards. The measuring apparatus used and the location of measurement points has been shown. The article also contains information on the sources of vibration and noise in rail vehicles.

Pomiary komfortu wibroakustycznego na stanowisku maszynisty elektrycznych zespołów trakcyjnych w warunkach normalnej eksploatacji

W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki pomiarów komfortu pracy w zakresie drgań i hałasu na stanowisku pracy maszynisty nowych i zmodernizowanych elektrycznych zespołów trakcyjnych, w oparciu o obowiązujące przepisy oraz normy. Zaprezentowano wykorzystaną aparaturę pomiarową oraz przedstawiono miejsca pomiarów. W artykule zawarto także informacje źródłach drgań i hałasu w pojazdach szynowych.

1. Wprowadzenie

Popularność pasażerskiego transportu kolejowego na świecie jest coraz większa. Wzrost liczby pasażerów jest najbardziej dostrzegalny w przewozach regionalnych i aglomeracyjnych. Podróże są coraz krótsze, tabor coraz nowocześniejszy, jednak przyjęte kryteria oceny nie wystarczają do pełnej weryfikacji konkurencyjności szynowego środka transportu. Pasażerowie oczekują od przewoźników coraz wyższego komfortu podróży, m.in. utrzymania odpowiedniej temperatury, zadowalającego oświetlenia, niskiego poziomu hałasu i drgań. W celu zachęcenia pasażerów do podróży, producenci taboru kolejowego dbają o atrakcyjność wyglądu zewnętrznego i wewnętrznego produkowanych pojazdów.

Na komfort podróży składają się także czynniki, których nie można zobaczyć. Nadmierne drgania oraz hałas mogą wywołać u pasażera uczucie dyskomfortu, chorobę lokomocyjną, czy problemy z utrzymaniem równowagi w pozycji stojącej. Prowadzący pojazd, w przeciwieństwie do pasażerów, narażony jest na znacznie dłuższe oddziaływanie efektów wibroakustycznych. Wymienione czynniki mogą obniżyć percepcję, powodować zmęczenie, osłabienie, a długofalowo trwałymi zmianami w organizmie, jak na przykład wibracyjne zwyrodnienia układu stawowo-kostnego lub osłabienie słuchu [1].

Dlatego istotne jest poznanie wskaźników opisujących komfort pracy na stanowisku maszynisty oraz zagrożeń płynących z ekspozycji jego ciała na drgania i hałas.

1. Introduction

The popularity of rail passenger transport in the world is growing. The increase in the number of passengers is most noticeable in the regional and urban transport. Trips are getting shorter, rolling stock more and more modern, but the used evaluation criteria are not sufficient to fully verify the competitiveness of rail transport. Passengers expect ever higher travel comfort from carriers, including maintaining adequate temperature, satisfactory lighting and low noise and vibrations. In order to encourage passengers to travel, rolling stock manufacturers care about the attractiveness of the external and internal appearance of the produced vehicles.

Comfort also consists of multiple factors that cannot be seen. Excessive vibration and noise may induce passenger discomfort, motion sickness, or problems with balance in an upright position. The vehicle driver, in contrast to the passengers, is exposed to the influence of the noise and vibration effects for a much longer period of time. These factors may reduce perceptiveness, cause fatigue, weakness, and long-term permanent changes in the body, such as vibration-induced degeneration of the joints and marrow or hearing loss [1].

That is why it is important to know the driver comfort indicators and the risks resulting from the exposure of the driver's body to prolonged vibration and noise.

The article is an assessment of train driver comfort by measuring the levels of noise and vibration. The measurements were performed on new and modern-

W artykule dokonano oceny komfortu jazdy na stanowisku maszynisty, dokonując pomiaru poziomów hałasu oraz przyspieszeń drgań. Pomiary wykonano na nowych i zmodernizowanych elektrycznych zespołach trakcyjnych eksploatowanych przez spółkę Koleje Wielkopolskie podczas przejazdów eksploatacyjnych na wybranym odcinku pomiarowym. Na podstawie wyników pomiarów porównano komfort jazdy wybranymi pojazdami.

2. Metodyka badań

Podczas pomiarów drgań zarejestrowano wartości przyspieszeń drgań pudła pojazdu oraz siedziska fotela maszynisty, w kierunkach: wzdłużnym (oś x), poprzecznym (oś y) oraz pionowym (oś z).

Podczas pomiarów hałasu rejestrowanymi wielkościami były:

- równoważny poziom dźwięku $A - L_{Aeq,1s}$, uśredniany co 1 sekundę
- szczytowy poziom dźwięku $C - L_{CPeak}$
- maksymalny poziom (słyszalny) dźwięku A , skorygowany charakterystyką dynamiczną $S - L_{ASmax}$
- minimalny poziom (słyszalny) dźwięku A , skorygowany charakterystyką dynamiczną $S - L_{ASmin}$.

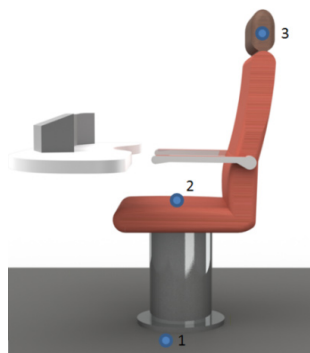
Dodatkowo rejestrowana była prędkość pojazdu v oraz droga s .

Rysunek 1. przedstawia rozmieszczenie punktów pomiarowych na stanowisku pracy maszynisty. Do pomiaru drgań odczuwalnych na stanowisku pracy maszynisty wykorzystano następujące przyrządy:

- przetwornik przyspieszeń drgań Brüel&Kjær typu 4524-B (nr 1 na rysunku)
- siedziskowy przetwornik przyspieszeń drgań Brüel&Kjær typu 4515-B-002 (nr 2)
- kasetę pomiarową Brüel&Kjær typu 3050-A-060.

W celu pomiaru hałasu panującego w kabinie maszynisty użyto:

- mikrofonu Brüel&Kjær typu 4189-A-021 (nr 3)
- analizatora dźwięku Brüel&Kjær typu 2250.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych (oznaczenia w tekście)

Fig. 1. Arrangement of measurement points (numbers explained in text)

zed electric multiple units operated by the Greater Poland Railways company during runs while operating on a selected railway section. The comfort related to riding in selected vehicles was compared based on the measurement results.

2. Methodology of tests

During vibration recordings the acceleration of the vehicle body and the driver seat were recorded in the longitudinal (x -axis), transverse (y -axis) and vertical (z -axis) directions.

During noise measurements the values were recorded for:

- weighed sound pressure level $A - L_{Aeq,1s}$, averaged over 1 second
- peak sound level $C - L_{CPeak}$
- the maximum audible sound level A , corrected with dynamic characteristic $S - L_{ASmax}$
- the minimum audible sound level A , corrected with dynamic characteristic $S - L_{ASmin}$.

In addition, the vehicle speed v and the path s were recorded.

Figure 1 shows the location of measurement points on the driver seat. To measure the vibrations noticeable on the driver seat the following instruments were used:

- vibrational accelerometer Brüel&Kjær type 4524-B (no. 1 in the figure)
- seat vibrational accelerometer Brüel&Kjær type 4515-B-002 (no. 2)
- measuring cassette Brüel&Kjær type 3050-A-060.

Noise measurement in the driver's cabin used:

- a Brüel&Kjær microphone 4189-A-021 (no. 3)
- Brüel&Kjær sound analyzer 2250.

Vibration and noise level in the driver cabin was registered for the following vehicles:

- EN57AKW, reporting marks: 1062, 1502
- EN76, reporting marks: 031, 037, 044.

Both EN57AKW and EN76 are vehicles produced in Poland and intended for regional passenger transport. The EN57AKW vehicle is from a series produced in 1961 ÷ 1993, then modernized in 2013. In contrast, the EN76 vehicle was produced in the years 2012 ÷ 2014.

The test track section leading from the Poznan Główny station to the Buk station is a part of the international railway E20, and was in good condition during the measurement. The choice of the test route was determined by the ability to pass through a track switch, the ability to achieve maximum vehicle speed and the presence of connecting rails in noncontact technology.

The selected section of the test route is shown in Fig. 2. The route is shown in blue, and the stations and stops in red.

Przyspieszenia drgań oraz poziom natężenia dźwięku na stanowisku pracy maszynisty zarejestrowano w następujących pojazdach:

- EN57AKW, numery boczne: 1062, 1502
- EN76, numery boczne: 031, 037, 044.

Zarówno EN57AKW, jak i EN76 są pojazdami wyprodukowanymi w Polsce i przeznaczonymi do regionalnych przewozów pasażerskich. Pojazd EN57AKW to pojazd z serii produkowanej w latach 1961÷1993, następnie zmodernizowany w roku 2013. Natomiast pojazd EN76 został wyprodukowany w latach 2012÷2014.

W tabelicy 1. zaprezentowano wybrane parametry techniczne badanych pojazdów.

Badany odcinek pomiarowy od stacji Poznań Główny do stacji Buk stanowi fragment międzynarodowej linii kolejowej E20 i w czasie trwania pomiaru był w dobrym stanie technicznym. Trasa pomiarowa została wybrana ze względu na możliwość przejazdu przez tor zwrótnicowy, możliwość osiągnięcia maksymalnej prędkości przejazdowej przez badane pojazdy oraz występowanie łączenia szyn w technologii bezстыkowej.

Wybrany odcinek pomiarowy przedstawiono na rys. 2. Trasę przejazdu oznaczono kolorem niebieskim, a stacje oraz przystanki osobowe kolorem czerwonym.

Maksymalna rozkładowa prędkość na powyższym odcinku dla pociągów osobowych wynosi 130 km/h. Przejazdy przyspieszone (wyłącznie pojazd EN76-037) odbywały się z prędkością maksymalną 160 km/h bez zatrzymania na stacjach Poznań Junikowo, Pałędzie i Otusz. Wszystkie przejazdy EN57AKW, ze względu na jego konstrukcyjne ograniczenie, odbywały się z prędkością maksymalną równą 120 km/h.

3. Pomiary przyspieszeń drgań

3.1. Komfort wibracyjny podczas całego przejazdu

Zgodnie z normą ISO 2631-1:1997 [2], dokonano analizy współczynników komfortu wibracyjnego: W_d (kierunek wzdłużny x oraz poprzeczny y), a także W_k (kierunek pionowy z) na siedzisku fotela maszynisty. Dodatkowo poddano analizie przyspieszenia drgań współczynnika W_k z przetwornika zamontowanego na podłodze w pobliżu fotela, będące ważnymi częstotliwościowo wartościami skutecznymi przyspieszeń drgań. Norma [2] dopuszcza wspólną analizę wszystkich obliczonych współczynników komfortu poprzez zastosowanie sumy kwadratowej.

W tabelicy 2. umieszczono jakościową skalę komfortu wibracyjnego pochodzącą z [2]. Jest to skala opierająca się na najczęstszych odczuciach pasażerów komunikacji publicznej względem całkowitego poziomu drgań w pojeździe. Subiektywne oceny komfortu zależą od oczekiwań pasażerów wobec danego środka komunikacji publicznej, długości przejazdu, czynności wykonywanych podczas jazdy (na przykład: czy-

Table 1 contains selected technical parameters of the tested vehicles.

Parametry badanych pojazdów
Tested vehicle parameters
Tablica 1
Table 1

Parametry techniczne	EN76	EN57AKW
Układ osi	Bo'2'2'2'Bo	2'2' + Bo'Bo' + 2'2'
Długość zespołu ze sprzęgami	75250 mm	64770 mm
Masa całego zespołu	134,4 t	130 t
Liczba miejsc siedzących	204	180 + 14
Liczba miejsc stojących	450	170
Maksymalna prędkość	160 km/h	120 km/h
Łączna ciągła moc silników trakcyjnych	2 MW	1 MW



Rys. 2. Trasa pomiarowa Fig. 2. Test route

Maximum scheduled speed in the above section for passenger trains is 130 km/h. Accelerated travels (only vehicle EN76-037) were done at a maximum speed of 160 km/h without stopping at stations Poznań Junikowo, Pałędzie and Otusz. All routes done by EN57AKW, due to its structural limitation, were at a maximum speed of 120 km/h.

3. Measurement of the acceleration vibration

3.1. Vibration comfort during the whole journey

In accordance with the ISO 2631-1: 1997 standard [2], an analysis of vibration comfort coefficients: W_d (longitude x direction and transverse y direction), as well as W_k (vertical direction z) on the train driver's seat was performed. Additionally, the changes in vibration of factor W_k were analyzed, using an accelerometer mounted on the floor near the chair, which are frequency-weighted Rms values of vibrational acceleration. The norm [2] allows joint analysis of all calculated comfort coefficients through the use of the sum of the square.

Table 2 provides a qualitative scale of vibration comfort derived from [2]. This scale is based on the most common passenger feelings with respect to the overall level of vibration in public transport vehicles. Subjective assessment of comfort depends on the expectations of the passengers from the type of public transportation, trip length, activities performed while traveling (for example: reading, writing), and other factors such as noise and temperature in the vehicle [2].

tanie, pisanie) oraz innych czynników, takich jak hałas czy temperatura panująca w pojeździe [2].

Skala komfortu wibracyjnego (tłumaczenie własne) [2]
Tablica 2
Passenger vibration comfort scale (own definition) [2]
Table 2

wartość współczynnika W [m/s^2]	warunki jazdy
poniżej 0,315	trochę niekomfortowe
od 0,315 do 0,63	mało niekomfortowe
od 0,50 do 1,00	umiarkowanie niekomfortowe
od 0,80 do 1,60	niekomfortowe
od 1,25 do 2,50	bardzo niekomfortowe
ponad 2,00	wybitnie niekomfortowe

Przyspieszenia drgań zarejestrowano w dwóch pojazdach serii EN57AKW oraz trzech wybranych EN76. Przejazd jednostką EN76-037 odbył się jako przejazd przyspieszony.

Całkowite współczynniki komfortu W , dla poszczególnych pojazdów na całej długości trasy pomiarowej, zestawiono na rys. 3.

Z powyższego wykresu wynika, że pojazdy typu EN76 charakteryzowały się niemalże dwukrotnie wyższym komfortem jazdy na stanowisku pracy maszynisty na całej długości trasy pomiarowej (z wyjątkiem pociągu przyspieszonego). Najwyższy komfort wibracyjny panował w pojeździe EN76-044, najniższy zaś – w pojeździe EN57AKW-1062. Na uwagę zasługuje fakt, iż pojazd EN76-037 obsługujący połączenie przyspieszone osiągnął niższą wartość współczynnika komfortu W na całej trasie pomiarowej niż pojazdy EN57AKW, przy wspomnianej wcześniej znacznej różnicy prędkości maksymalnej. Zróżnicowanie współczynników W między poszczególnymi pojazdami jednego typu mogło mieć przyczynę w odmiennych czasach przejazdów i wymiany pasażerów, różnej prędkości jazdy czy w różnym stanie zużycia elementów układów biegowych.

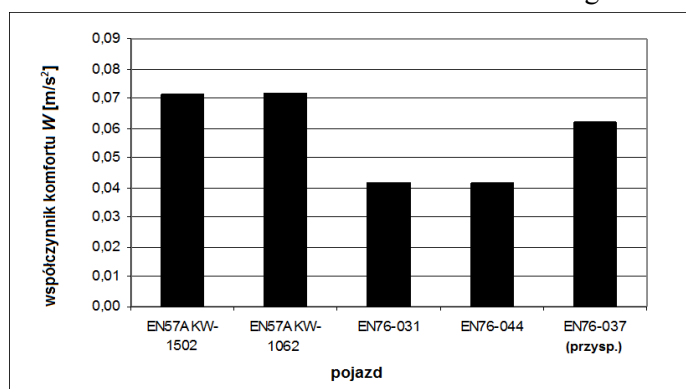
Z wartości przedstawionych na rys. 3. wynika, iż elektryczne zespoły trakcyjne eksploatowane przez Koleje Wielkopolskie oferują warunki jazdy, w aspekcie wibracji, określane jako wcale niekomfortowe.

3.2. Komfort wibracyjny podczas przejazdu z prędkością maksymalną

Analizę przeprowadzono w maksymalnej możliwej zgodności z normą EN 12299:2009 [3]. Pociągi uruchamiane przez Koleje Wielkopolskie na trasie Poznań Główny – Zbąszynek, w związku z częstymi postojami handlowymi, poruszały się nieprzerwanie z maksymalną prędkością rozkładową przez czas nie dłuższy niż 5 minut. Sprawiało to, że nie wszystkie zalecenia wyżej wymienionej normy zostały spełnione.

Vibration was recorded for two vehicles from the EN57AKW series and three selected vehicles from EN76. The test drive with vehicle EN76-037 was done at higher maximum speed.

The total rates of comfort for the individual vehicles over the whole test route were summarized in Fig. 3.



Rys. 3. Zestawienie wartości współczynników komfortu W dla wybranych pojazdów

Fig. 3. Comfort coefficients comparison for selected vehicles

From the above figure it can be concluded that the vehicle type EN76 was characterized by almost twice as high travel comfort at the driver seat for the entire test route length (with the exception of the train moving at higher speeds). The highest vibration comfort was recorded in the vehicle EN76-044 and lowest - in the vehicle EN57AKW-1062. It should be noted that the faster vehicle EN76-037 reached a lower comfort value of on the whole route than vehicles EN57AKW, due to the aforementioned substantial difference in maximum travel speed. The variation in the W factors among vehicles of the same type may have been caused by different travel times and passengers change rates, different travel speeds and various states of wear of the vehicle drive systems.

The values in Fig. 3 show that electric multiple units operated by the Greater Poland Railways offer travel conditions known, in terms of vibration, as quite uncomfortable.

3.2. Vibration comfort for vehicles travelling at maximum speeds

The analysis was carried out at the maximum possible compliance with EN 12299:2009 standard [3]. Trains run by Greater Poland Railways on the route between Poznań Główny and Zbąszynek, due to frequent stops, were moving continuously at their maximum scheduled speed for no longer than 5 minutes at a time. This meant that not all the recommendations of the aforementioned regulation have been met.

Fig. 4 summarizes the average comfort factors NMV of all tested vehicles on sections between stations Palędzie, Dopiewo, Otusz and Buk, where the travel speed was at its maximum.

Na rys. 4. zestawiono współczynniki komfortu średniego N_{MV} wszystkich badanych pojazdów, na odcinkach między stacjami Pałędzie i Dopiewo oraz Otusz i Buk, gdzie prędkości przejazdów były maksymalne.

Z powyższego wykresu wynika, że pojazdy typu EN57AKW wykazały wyższe współczynniki komfortu średniego niż pojazdy typu EN76. Różnice były niekiedy dwukrotne, a wspomnieć należy, że pojazdy EN76 poruszały się z prędkością o 10 km/h wyższą. Kolumna reprezentująca współczynnik N_{VA} dla pojazdu EN76-037 była wyraźnie wyższa od kolumn pozostałych EN76, lecz nadal nie osiągnęła wartości charakteryzujących pojazdy EN57AKW. Według powyższej analizy najbardziej komfortowym pojazdem ze względu na emisję drgań na stanowisku pracy maszynisty był pojazd EN76-031, a najmniej – EN57AKW-1062.

Obliczone współczynniki komfortu porównano ze skalą współczynnika komfortu średniego z [3] zaprezentowaną w tab. 3. Skala ta odnosi się do współczynników komfortu obliczanych według metody standardowej, natomiast współczynniki w niniejszym rozdziale zostały obliczone metodą kompletną. W związku z tym, że norma [3] nie zawiera oddzielnej skali dla współczynników obliczonych na podstawie metody kompletnej, posłużono się skalą dla współczynników komfortu średniego liczonych według metody standardowej

Skala wartości współczynnika komfortu średniego NMV (tłumaczenie własne) [3] Tablica 3.

The scale of average comfort values NMV (own definition) [3] Table 3.

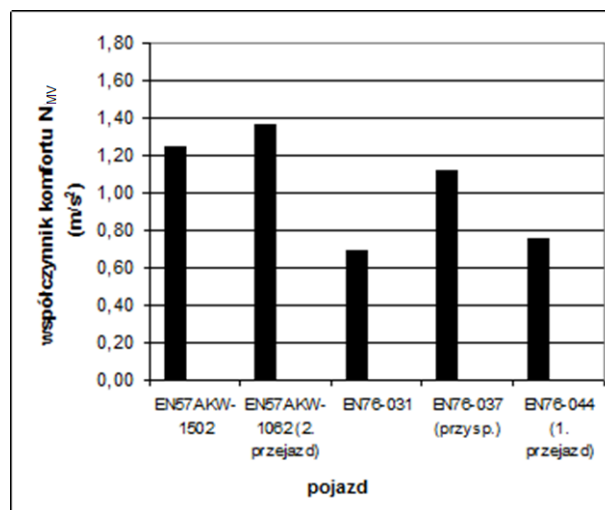
wartość [m/s^2]	warunki
$N_{MV} < 1,5$	bardzo komfortowe
$1,5 ? N_{MV} < 2,5$	komfortowe
$2,5 ? N_{MV} < 3,5$	umiarkowanie komfortowe
$3,5 ? N_{MV} < 4,5$	niekomfortowe
$N_{MV} ? 4,5$	bardzo niekomfortowe

Z konfrontacji uzyskanych wyników pomiarów z wartościami współczynnika komfortu średniego wynika, że wszystkie badane pojazdy na stanowisku maszynisty oferują bardzo komfortowe warunki jazdy.

3.3. Dzienna ekspozycja maszynisty na drgania

Dzienną ekspozycję maszynisty na drgania obliczono dla dwóch wybranych pojazdów, w sposób możliwie najbliższy zaleceniom normy EN 14253:2003 [4].

Zgodnie z informacjami uzyskanymi od przewoźnika Koleje Wielkopolskie, maszyniści pracujący dla tego przewoźnika odbywają dzienną służbę trwającą 8, 10 lub 12 h. Od 25 do 30% całkowitego czasu pracy stanowią czas prowadzenia pojazdu. Na tej podstawie obliczono dzienny czas ekspozycji maszynisty na



Rys. 4. Zestawienie współczynników średniego komfortu NMV w wykres kolumnowy

Fig. 4. Summary of average comfort coefficients NMV in a column chart

The above figure indicates that the vehicle type EN57AKW showed higher comfort rates than the average type EN76 vehicle. The differences were sometimes double in value, and it should be mentioned that the EN76 vehicles travelled faster by 10 km/h. The column representing the NVA value was significantly higher for vehicle EN76-037 than for other EN76 vehicles, but it has still not reached the value characterizing the EN57AKW vehicles. According to this analysis, the most comfortable vehicle in terms of vibrations in the driver's cabin was vehicle EN76-031, and the least - EN57AKW-1062.

The calculated comfort coefficients were compared with the average comfort scale [3] from Table 3. This scale refers to the comfort factor calculated according to the standard method, while the ratios in this section were calculated using the complete method. Therefore, the norm [3] does not include a separate scale for the coefficients calculated on the basis of the complete method, the scale for average comfort factors calculated by the standard method was used.

By comparing the results of average comfort coefficient value measurements it can be concluded that all of the tested vehicles offer their drivers a very comfortable ride.

3.3. Train driver's daily vibration exposure

The daily vibration exposure of the driver was calculated for two selected vehicles in a way as close as possible to the recommendations of EN 14253:2003 [4].

According to information from the Greater Poland Railways carrier, drivers employed by the carrier work daily shifts lasting 8, 10 or 12 h. From 25% to 30% of the total working time is spent driving the vehicle. Therefore, calculated daily time of driver exposure to vibration, rounded to the nearest hour is

drżania, który po zaokrągleniu do pełnych godzin wynosi od 2 do 4. Nie brano pod uwagę czasu pracy wydłużonego przez nadgodziny. Każdy przejazd z Poznania Głównego do Zbąszynka trwa przeważnie 65 minut. Przyjęto uproszczenie, że w ciągu dnia pracy maszynista może wykonać od 2 do 4 kursów w obie strony.

Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 4.

Z powyższego zestawienia wynika, że maszynista prowadzący pojazd EN57AKW-1062 na trasie Poznań Główny – Zbąszynek był wystawiony na większą, co do wartości, dzienną ekspozycję drgań dla obu skrajnych długości dnia pracy, niż maszynista pojazdu EN76-031. Wartości ekspozycji drgań dla ośmiogodzinnego dnia pracy, $A(8)$, nie przekraczają podanej w [1] wartości dopuszczalnej – $0,8 \text{ m/s}^2$, stąd wiadomo, że nie stanowią one niebezpieczeństwa dla zdrowia.

Maksymalne wartości dziennych ekspozycji maszynistów na drżania w poszczególnych pojazdach Tablica 4.

The maximum value of daily driver exposure for vibration in each vehicle Table 4.

pojazd	max. wartość dzienną ekspozycji na drżania $A(8)$ [m/s^2]	max. wartość dzienną ekspozycji na drżania $A(12)$ [m/s^2]
EN57AKW-1062	0,0135	0,0156
EN76-031	0,0090	0,0104

4. Pomiary poziomu hałasu

Z pomiarów hałasu w kabinie maszynisty uzyskano wyniki zaprezentowane w tablicy 5. Podane wartości dopuszczalne zaczerpnięto z Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej [5] oraz Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności [6].

Z zestawionych wartości wynika, że w pojazdach typu EN57AKW i EN76 panował podobny poziom hałasu. Wyjątek stanowiły dwa pojazdy EN76 o numerach bocznych 037 oraz 044. Pierwszy z nich poruszał się z podwyższoną prędkością maksymalną do 160 km/h , co skutkowało zwiększonym poziomem hałasu w kabinie maszynisty. Natomiast drugi z nich został wyposażony przez producenta w wygłuszenia urządzeń trakcyjnych (falowników i przetwornicy statycznej), w rezultacie poziom hałasu ekwiwalentnego $L_{Aeq,t}$ obniżył się o około 4 dB. Wartości L_{CPeak} oraz L_{ASmax} odzwierciedlają w tym przypadku poziom hałasu podczas emitowania zewnętrznych sygnałów dźwiękowych pojazdu. Wielkość L_{ASmin} odpowiada tu minimalnemu poziomowi hałasu podczas postoju pojazdu.

Zgodnie z zaleceniami Centralnego Instytutu Ochrony Pracy [7] długotrwałe przebywanie w warunkach hałasu o poziomie równoważnym dźwięku A, większym niż 80 dB może powodować trwale osłabienie narządu

from 2 to 4 hours. Overtime hours were not counted in this assessment. Each journey from Poznań Główny to Zbąszynek usually lasts 65 minutes. It was assumed that during the working day a driver can perform from 2 to 4 such courses in both directions.

Figure 4 contains the results of this calculation.

The table shows that the driver of the vehicle EN57AKW-1062, travelling from Poznań Główny to Zbąszynek, was exposed to a higher value of daily vibration for both the extremes of working day shifts than the vehicle EN76-031 driver. Vibration exposure values for the eight-hour working day $A(8)$, do not exceed specified in [1] limit value – 0.8 m/s^2 , hence it is clear that they are not a health hazard.

4. Noise level measurements

The measurements of the driver's cab noise are included in Table 5. These limit values are taken from the regulations lined out by the Minister of Labor and Social Policy [5] as well as the Technical Specifications for Interoperability [6].

Zestawienie wielkości charakteryzujących hałas w kabinie maszynisty dla poszczególnych pojazdów Tablica 5

Summary of quantities characterizing the noise in the driver cab for individual vehicles Table 5

vehicle	$L_{Aeq,t}$	L_{CPeak}	L_{ASmax}	L_{ASmin}
EN57AKW-1502	75.0	108.3	90.3	47.0
EN57AKW-1062	74.5	112.2	93.3	42.9
EN76-031	75.2	109.9	95.2	61.7
EN76-037(express)	80.5	112.9	99.1	60.0
EN76-044	71.4	104.9	91.9	60.9
limit value	85.0	135.0	115.0	-

With the compiled figures it can be seen that the type EN57AKW and EN76 vehicles recorded a similar noise level. The two EN76 vehicles with reporting marks 037 and 044 were the exceptions. The first of them travelled at the increased maximum speed of up to 160 km/h , which resulted in an increased noise level in the driver cab. The second was fitted by the manufacturer with traction soundproofing devices (inverter and static converter), resulting in the equivalent noise level $L_{Aeq,t}$ being decreased by about 4 dB. The values of L_{CPeak} and L_{ASmax} reflect in this case the noise level when emitting external audio signals by the vehicle. Value of L_{ASmin} is the minimum noise level when the vehicle is stationary.

According to the recommendations of the Central Institute for Labor Protection [7] long-term exposure to equivalent noise level A, greater than 80 dB, can cause permanent weakening of hearing. The acoustic environment of the EN76-037 vehicle cab in express mode was on the border of this criterion.

sluchu. Na granicy wartości tego kryterium znajdowało się środowisko akustyczne kabiny pojazdu EN76-037 w relacji przyspieszonej.

Poziom dzienniej ekspozycji maszynisty na hałas

W związku z tym, że przejazd na trasie pomiarowej trwał niespełna pół godziny, zdecydowano się na aproksymację całego czasu spędzonego przez maszynistę w ciągu dnia pracy na prowadzeniu pojazdów szynowych. Podczas obliczeń posłużono się formułą zaczerpniętą z normy PN-ISO 9612 [8], gdzie zamiast wartości $L_{Aeq,Te}$ użyto $L_{Aeq,t}$, czyli wartości równoważnego poziomu dźwięku A zmierzonego podczas jednego pomiaru, co jest dopuszczalne. W tablicy 6. zaprezentowano wyniki obliczeń poziomów dzienniej ekspozycji na hałas dla wybranych pojazdów wraz z wartościami dopuszczalnymi zaczerpniętymi z [5].

Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy [9] definiuje wartość poziomu dzienniej ekspozycji $L_{EX,8h}$ pracownika na hałas, ze względu na ryzyko uszkodzenia narządu sluchu, jako maksymalnie 80 dB. Maszynista pojazdu EN76-037 obsługującego połączenie przyspieszone narażony był na podwyższoną ekspozycję na hałas, natomiast maszynista pojazdu EN76-044 – nie. Połączenie przyspieszone na linii Poznań Główny – Zbąszynek uruchamiane było tylko raz dziennie. W związku z tym nie było możliwości, aby jakkolwiek maszynista cały dzień pracy prowadził pojazd ze zwiększoną prędkością. Z powyższego wynika, że żaden z zestawionych w niniejszym rozdziale pojazdów nie narażał kierującego nim maszynisty na ryzyko uszkodzenia sluchu.

5. Źródła drgań i hałasu w pojazdach szynowych

Generowanie drgań i hałasu przez elektryczne zespoły trakcyjne można podzielić na trzy fazy: postój, ruszanie i przejazd [6]. Podczas postoju pojazdu odczuwalne są drgania i hałas generowane przez urządzenia wspomagające pracę pojazdu szynowego (na przykład sprężarki, klimatyzację, ogrzewanie) lub, w przypadku trakcji spalinowej, przez silniki spalinowe. Podczas ruszania drgania generowane są przez układ jezdny (styk koła z szyną) i napędowy pojazd szynowego. Rozpędzanie się pociągu w ruchu pasażerskim przypada najczęściej na tory stacyjne, które mogą składać się z rozjazdów, intensyfikujących generowanie drgań.

Poziomy natężenia hałasu ruszania zależą od typu trakcji, a także od sposobu rozruchu silników w przypadku trakcji elektrycznej. Przykładowo, podczas rozruchu stycznikowo-oporowego (starszego typu) znaczną część hałasu wytwarzają wentylatory rezystorów obniżających wartość prądu podawanego na silniki trakcyjne. W przypadku trakcji elektrycznej z silnikami prądu przemiennego zasilanymi z falownika może być słyszany wytwarzany przez niego dźwięk o wysokiej częstotliwości. Natomiast podczas przejazdu

The level of train driver daily noise exposure

Because the travel route for the measurement took less than half an hour, it was necessary to approximate the total time spent by the driver on the daily operation of the rail vehicle. For this calculation a formula derived from the standard ISO 9612 [8] was used, where instead of $L_{Aeq,Te}$ it used $L_{Aeq,t}$, which is the equivalent sound level A measured during one pass, which is acceptable. Table 6 presents the results of daily noise exposure levels calculation for the selected vehicle with the limit values taken from [5].

Regulation of the Minister of Economy and Labor [9] defines the value of the daily exposure level $L_{EX,8h}$ of the worker, due to the risk of damage to hearing, as up to 80 dB. The driver of the vehicle EN76-037 on the express connection has been exposed to elevated noise levels, while the driver of the vehicle EN76-044 – was not. The express line between Poznan Główny and Zbąszynek was operated only once a day. Therefore, there is no possibility that any driver would spend a full day driving the vehicle at express speed. Thus none of the vehicles listed in this section risked causing the driver hearing damage.

Poziomy dzienniej ekspozycji na hałas [dB] Tablica 6.

Levels of daily noise exposure [dB] Table 6.

pojazd	$L_{EX,8h}$	
	25% udziału jazdy	30% udziału jazdy
EN57AKW-1502	69,0	69,8
EN76-031	69,2	70,0
EN76-037 (przysp.)	74,5	75,3
EN76-044	65,4	66,2
wartość dopuszczalna	85,0	85,0

5. Sources of noise and vibrations in rail vehicles

The generation of vibration and noise by electric multiple units can be divided into three phases: stopping, starting and travelling [6]. When the vehicle is stationary vibration and noise is generated by the devices supporting the operation of the rail vehicle can be felt (for example, compressors, air conditioning, heating) or, in the case of diesel vehicles by internal combustion engines. When starting off the vibrations are generated by the chassis (wheel contact with the rail) and the drive of the rail vehicle. Acceleration of a train in passenger traffic falls mostly on the substation tracks, which may consist of junctions, intensifying the generated vibrations.

Noise levels when starting the vehicle depend on the type of traction, as well as the method for starting the engines in the case of electric traction. For example, during start-up with a resistance-contactor starter (older generation) a large part of the noise is caused

ze stałą prędkością efekty wibroakustyczne generowane są przede wszystkim na styku koła z szyną, tym uciążliwsze im bardziej zużyte są poszczególne elementy współpracującej pary kinematycznej, a także im mniej zaawansowana jest technologia łączenia szyn.

Zjawiska te ulegają nasileniu także wraz ze wzrostem prędkości jazdy lub podczas procesu hamowania, w zależności od rodzaju wykorzystanego hamulca.

W przypadku hamowania elektrodynamicznego poziom drgań i hałasu nie wzrasta, lecz przy użyciu hamulców ciernych, mogą być bardziej odczuwalne.

Nie bez znaczenia jest także obecność obiektów umieszczonych w sąsiedztwie torów kolejowych zdolnych do odbijania fal dźwiękowych z powrotem w stronę pojazdu szynowego, a także tłumienie przez samo torowisko. W okresie letnim, w pojazdach niewyposażonych w systemy klimatyzacji, dla zwiększenia komfortu termicznego otwiera się okna, co także potęguje hałas wewnątrz pojazdu szynowego.

W emisji hałasu udział biorą także urządzenia wspomagające pracę maszynisty, takie jak: radiostacja (niezwykle ustawiona bardzo głośno) czy urządzenie emitujące sygnały dźwiękowe na zewnątrz pojazdu, powodujące skoki poziomu dźwięku C ponad 100 dB.

Rysunek 5. prezentuje przykładową mapę hałasu emitowanego przez pojazd szynowy. Intensywność koloru czerwonego reprezentuje natężenie hałasu.

Uwagę zwraca intensyfikacja hałasu poniżej poziomu ostoi pojazdu. Z powyższego rysunku wynika, że większość hałasu emitowanego podczas jazdy pochodzi od układów jezdnych i styku koła z szyną.



Rysunek 5. Mapa hałasu pojazdu szynowego podczas jazdy [10]

Fig. 5. Noise map of a travelling rail vehicle [10]

6. Podsumowanie

Drgania na stanowisku maszynisty badanych pojazdów nie stanowią zagrożenia narażającego go na schorzenia wibracyjne. Opisane w literaturze zwyrodnienia powstałe na skutek długotrwałej ekspozycji na drgania odnoszą się przede wszystkim do czynności związanych z drganiami o wyższej intensywności, jak na przykład obsługi młota pneumatycznego, kombajnów rolniczych czy pracy na halach produkcyjnych z

by the fans of the resistors which reduce the current applied to the vehicle drive. In the case of electric drives with alternating current motors supplied from the inverter the noise it produces can be heard due to its high frequency. However, during travel at a constant speed the vibro-acoustic effects are generated primarily on the wheel contact with the rail, the greater wear of the individual elements of the kinematic pair, and the less advanced technology for connecting rails the more onerous the noise generated.

These phenomena are intensified with the increase of speed or during the braking process, depending on the type of brake used.

In the case of electrodynamic braking the vibration and sound levels do not increase, but using friction brakes is more noticeable.

The presence of objects placed in the vicinity of railway tracks capable of reflecting sound waves back toward the rail vehicle is not without significance, as well as the noise suppression of the track itself. In the summer, for vehicles not equipped with air conditioning systems, a window is opened to increase the thermal comfort of the passengers, which also increases the noise inside the vehicle.

The driver assistance devices, such as radio (often set to very loud) contribute to the noise emission or devices emitting audible signals from outside the vehicle, causing sound level C jumps of over 100 dB.

Figure 5 shows a sample map of noise emitted by a rail vehicle. The intensity of the red color represents the noise intensity.

Attention intensification of noise below the stand of the vehicle. From the above figure it shows that most of the noise while driving comes from chassis systems and wheel contact with the rail.

6. Conclusions

Driver seat vibration of the tested vehicles does not endanger the driver's health with damaging vibrations. The degenerations caused by prolonged exposure to vibration described in the literature relate primarily to activities associated with vibrations of a higher intensity, such as operating a jackhammer, combine harvesters or work in production halls involving machines. In accordance with the relevant standards [2, 3] the workplace driver's vibration comfort for vehicles EN57AKW and EN76 operated by Greater Poland Railways is high.

When interpreting the comfort coefficients for entire routes, calculated with methods described in [2], it is essential to remember that the scale of the comparative comfort factor has been adopted for all passenger carrying mass transit vehicles with very different comfort levels. In addition, the driver is not standing but sitting in the driver chair, which has to be comfortable, because his psychophysical condition impacts the travel safety of the whole vehicle.

udziałem maszyn. Zgodnie z odpowiednimi normami [2, 3] komfort wibracyjny na stanowisku pracy maszynisty pojazdów EN57AKW oraz EN76 eksploatowanych przez Koleje Wielkopolskie jest wysoki.

Przy interpretacji współczynników komfortu dla całych przejazdów, liczonych wedle [2], należy pamiętać, że skala porównawcza współczynników komfortu została przyjęta dla ogółu pojazdów transportu masowego realizujących przewozy pasażerskie o bardzo zróżnicowanym komforcie. Dodatkowo maszynista nie stoi a siedzi na fotelu, który ma być wygodny, ponieważ od jego stanu psychofizycznego zależy bezpieczeństwo przejazdu.

Nowe elektryczne zespoły trakcyjne, typu EN76 oferują wyższy komfort ze względu na drgania niż pojazdy zmodernizowane, typu EN57AKW, jednakże dla obydwu typów pojazdów komfort wibracyjny jest wysoki.

W przypadku hałasu również wszystkie przebadane pojazdy spełniały zalecenia, co do poziomu dziennej ekspozycji na hałas, opisane w rozporządzeniu [5]. Jednakże spełnianie zaleceń zawartych w oficjalnych dokumentach nie wyklucza negatywnego wpływu hałasu na pracownika. Zaburzenia w funkcjonowaniu organizmu mogą się pojawić już powyżej poziomu ciśnienia akustycznego równego 75 dB. Pamiętać należy również, że reakcje organizmu na hałas czy drgania są kwestią indywidualną dla każdego człowieka [7].

Zdumiewającym może być wniosek, że co do wartości równoważnego poziomu hałasu w kabinie maszynisty pojazdy nowe sprawowały się podobnie lub nieznacznie gorzej od zmodernizowanych, szczególnie porównując je podczas postoju. Było to spowodowane rozmieszczeniem oprzyrządowania trakcyjnego w pobliżu maszynisty oraz hałaśliwych szaf elektrycznych i pneumatycznych w korytarzu za nim. Pojazdy typu EN76 od numeru inwentarzowego 043 wzwyż były wyposażone w dodatkowe elementy tłumiące falowniki i przetwornice statyczne. Badania wykazały, że zabieg ten przyniósł pożądany efekt – zmniejszenie równoważnego poziomu hałasu o około 4 dB podczas przejazdu przez całą trasę pomiarową.

W świetle przeprowadzonych pomiarów można postawić tezę, że w przebadanych pojazdach, kluczową rolę w kształtowaniu komfortu maszynisty, spośród rozpatrywanych czynników, ma hałas. Drgania, jakie panują na stanowisku maszynisty w pojazdach typu EN57AKW oraz EN76 są na tyle niskie, że nie powinny stwarzać ryzyka schorzeń wibracyjnych.

[8] PN-ISO 9612, Akustyka. Wytyczne do pomiarów i oceny ekspozycji na hałas w środowisku pracy

[9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne

[10] Portal e-droga.pl, <http://edroga.pl/>, dostęp: listopad 2013

The new type EN76 EMUs offer greater vibration comfort than upgraded type EN57AKW vehicles, however, for both vehicle types the vibration comfort is high.

All the tested vehicles also complied with daily noise exposure recommendations, as described in Regulation [5]. However, the fulfillment of the recommendations contained in official documents does not exclude the negative impact of noise on the employee. Body functioning disruption may appear at acoustic pressure level equal to 75 dB already. It should also be remembered that the physiological reaction to noise or vibration is an individual matter for every person [7].

Particularly interesting is the conclusion that the equivalent noise level value in the driver cab of new vehicles proved similar or slightly worse than for the modernized vehicles, especially in stationary comparison. This was caused by the arrangement of many vehicle systems in the vicinity of the driver as well as noisy electrical and pneumatic cabinets in the corridor behind him. EN76 vehicles with reporting marks 043 and above were equipped with additional noise damping elements for inverters and static converters. The studies have shown that this measure has brought the desired effect – a decrease in equivalent noise level by about 4 dB on the entire route measurement.

In light of the measurement results it can be argued that for the tested vehicles, a key role in shaping the driver comfort, among all the factors considered, was noise. Vibrations, which a driver in the vehicle type EN57AKW and EN76 is subject to are so low, that they should not pose a risk of vibration diseases.

It should be noted that the measurement route was in good technical condition. These same vehicles moving along a route kept in worse technical condition could probably record a lower vibration and acoustic driver comfort, which should be tested in follow-up studies.

Bibliografia

[1] D. Augustyńska, M. Pośniak, Czynniki szkodliwe w środowisku pracy: wartości dopuszczalne 2007, Warszawa, Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy, 2007, str. 179-222

[2] ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements

[3] EN 12299:2009, Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation

[4] EN 14253:2003, Drgania mechaniczne. Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia. Wytyczne praktyczne

[5] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. 2014 poz. 817

[6] Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności, TSI NOI

[7] Strona internetowa Centralnego Instytutu Ochrony Pracy - Państwowego Instytutu Badawczego, <http://www.ciop.pl/>, dostęp: styczeń 2014