

Politechnika Śląska
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej
Katedra Transportu Drogowego



ROZPRAWA DOKTORSKA

**Wpływ czynników eksploatacyjnych
na wielkość emisji zanieczyszczeń
z użytkowania środków transportu samochodowego
z napędami alternatywnymi**

Influence of exploitation factors on the amount of pollutant emissions from the use of
means of road transport with alternative drives

mgr inż. Wioletta Cebulska

Promotor:
dr hab. inż. Damian Hadryś, prof. PŚ

Katowice, marzec 2025

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	8
2. CEL I ZAKRES ROZPRAWY.....	10
3. PRZEGLĄD LITERATURY	12
3.1. Samochody hybrydowe	12
3.2. Samochody elektryczne	16
3.3. Silniki i baterie samochodów elektrycznych.....	18
3.4. Stacje ładowania samochodów elektrycznych	22
3.5. Rozwój elektromobilności w Polsce	24
3.6. Problemy elektromobilności	25
3.7. Zalety i wady samochodów elektrycznych i hybrydowych	27
3.8. Ochrona środowiska w transporcie samochodowym – ślad węglowy	29
3.8.1. Aspekty środowiskowe produkcji pojazdów samochodowych.....	29
3.8.2. Aspekty środowiskowe w eksploatacji pojazdów samochodowych.....	30
3.8.3. Aspekty związane z wycofaniem pojazdu z eksploatacji	32
3.9. Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych.....	33
3.9.1. Emisja hałasu	33
3.9.2. Emisja drgań.....	40
3.9.3. Emisja pola elektromagnetycznego.....	47
3.9.4. Emisja pyłów.....	55
3.10. Podsumowanie przeglądu literatury	60
4. TEZA PRACY	61
5. BADANIA WŁASNE.....	62
5.1. Zakres badań	62
5.2. Obiekt badań	64
5.3. Pomiary hałasu	72
5.3.1. Urządzenia pomiarowe do pomiaru hałasu	73
5.3.2. Pomiary stanowiskowe hałasu	75
5.3.3. Pomiary hałasu wewnątrz pojazdów	83
5.3.4. Pomiary hałasu na zewnątrz pojazdów podczas jazdy.....	93
5.3.5. Analiza i interpretacja wyników z pomiarów hałasu	98
5.4. Pomiary drgań	101

5.4.1. Urządzenia pomiarowe do pomiaru drgań.....	103
5.4.2. Pomiary stanowiskowe drgań.....	105
5.4.3. Pomiary drgań wewnątrz pojazdów	114
5.4.4. Analiza i interpretacja wyników z pomiarów drgań.....	125
5.5. Pomiary emisji pola elektromagnetycznego.....	127
5.5.1. Urządzenia pomiarowe do pomiaru PEM	128
5.5.2. Pomiary PEM wewnątrz pojazdów	129
5.5.3. Pomiary PEM podczas ładowania baterii	141
5.5.4. Pomiary indukcji magnetycznej	144
5.5.5. Analiza i interpretacja wyników dla pomiarów PEM	150
5.6. Pomiary zapylenia	151
5.6.1. Dane eksploatacyjne zużycia hamulców i opon	152
5.6.2. Badanie składu chemicznego pyłów pochodzących z eksploatacji pojazdów	158
5.6.3. Analiza i interpretacja wyników badań emisji pyłów	162
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	164
7. LITERATURA.....	168
8. SPIS RYSUNKÓW.....	180
9. SPIS TABLIC	188
STRESZCZENIE	190
ABSTRACT.....	192

WYKAZ JEDNOSTEK, OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

° C	– stopień Celsjusza, skala termometryczna
μ	– przenikalność magnetyczna, T · m/A
A	– amper, jednostka natężenia prądu elektrycznego
AC	– prąd przemienny
ADR	– Międzynarodowa konwencja dotycząca drogowego przewozu ładunków i towarów niebezpiecznych (z francuskiego: Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route)
Al	– aluminium
AVAS	– system stosowany w pojazdach elektrycznych emitujący dźwięk informujący o nadjeżdżającym pojeździe
B	– indukcja magnetyczna, T
Ba	– bar
c	– prędkość rozchodzenia się dźwięku, m/s
C	– węgiel
Ca	– wapń
CCS	– rodzaj złącza stosowanego do ładowania samochodów elektrycznych
CH ₄	– metan
Cl	– chlor
CNG	– Compressed Natural Gas (sprężony gaz ziemny),
CO ₂	– dwutlenek węgla
CO ₂ e	– ekwiwalent dwutlenku węgla
Cu	– miedź
dB	– decybel, jednostka miary dźwięku
DC	– prąd stały
E	– natężenie pola elektrycznego, V/m
EDS	– mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego
EV lub BEV	– pojazd z napędem elektrycznym
Fe	– żelazo
FFT	– szybka transformata Fouriera (z angielskiego: Fast Fourier Transform)
F(ω)	– transformata Fouriera funkcji w dziedzinie częstotliwości
f(t)	– sygnał czasowy

g	– gram, jednostka masy
H	– natężenie pola magnetycznego, A/m
HEV	– pojazd z napędem hybrydowym
Hz	– herc, jednostka częstotliwości
I	– natężenie prądu, A
ICNIRP	– Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym
K	– potas
κ	– wektor
km	– kilometr, jednostka długości
KM	– koń mechaniczny, jednostka mocy
kW	– kilowat, jednostka mocy
kWh	– kilowatogodzina, jednostka energii
L_{Aeq}	– równoważny uśredniony poziom ekspozycji na hałas skorygowana wg charakterystyki częstotliwościowej A
L_{AFmax}	– maksymalna wartość skuteczna poziomu ekspozycji na hałas skorygowana wg charakterystyki częstotliwościowej A
L_{Ceq}	– równoważny uśredniony poziom ekspozycji na hałas skorygowana wg charakterystyki częstotliwościowej C
L_{Cpeak}	– maksymalna wartość szczytowa poziomu ekspozycji na hałas skorygowana wg charakterystyki częstotliwościowej C
LF	– Low Frequency – zakres niskiej częstotliwości
LM	– związki niskometaliczne
LNG	– Liquefied Natural Gas (ciekły gaz ziemny),
LPG	– Liquefied Petroleum Gas (propan – butan)
Mg	– magnez
MWh	– megawatogodzina, jednostka energii
N ₂ O	– podtlenek azotu
NAO	– związki organiczne bezazbestowe
O	– tlen
OECD	– Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju
Pa	– Pascal, jednostka ciśnienia
PEM	– pole elektromagnetyczne
PHEV	– pojazd z napędem hybrydowym z możliwością ładowania z sieci elektrycznej

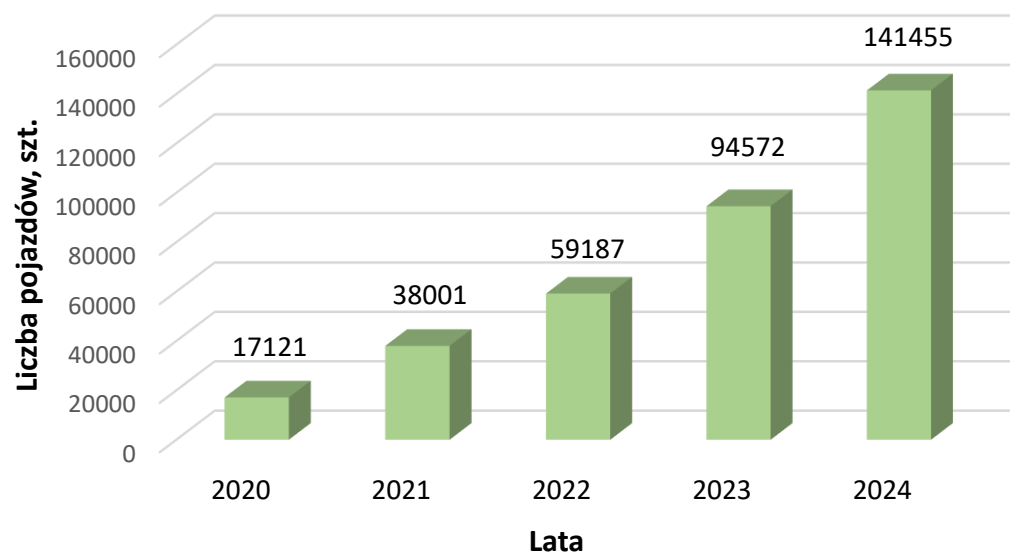
Pm	– mierzone ciśnienie
RBS	– hamowanie rekuperacyjne
RF	– częstotliwość radiowa
rm	– odległości mikrofonów, m
RMS	– root mean square – wartość skuteczna
S	– gęstość mocy, W/m ²
Si	– krzem
Sb	– antymon
SE	– detektory elektronów wtórnych
SM	– związki półmetaliczne
Sn	– cyna
t	– czas, s
T	– Tesla, jednostka indukcji magnetycznej
Ti	– tytan
TRPW	– emisja pyłów pochodzących z eksploatacji pojazdów
U	– napięcie prądu elektrycznego, V
UE	– Unia Europejska
V	– wolt, jednostka napięcia
V2G	– interfejs umożliwiający przepływ prądu z i do samochodu i sieci elektrycznej
W	– wat, jednostka mocy
wm	– zbiór współczynników wag zastosowanych do indywidualnych sygnałów
ZS	– zapłon samoczynny

1. WPROWADZENIE

Obecnie bardzo dużą wagę przykładą się do zagadnień ochrony środowiska naturalnego, również w kontekście wpływu transportu na to środowisko. Ograniczona ilość zasobów kopalnych, zmiana klimatu oraz globalne ocieplenie skłaniają branżę motoryzacyjną do stosowania coraz to bardziej wydajnych i zrównoważonych rozwiązań. Problemy te skłaniają producentów samochodów do szukania nowych technologii i napędów alternatywnych. Przykładami takich pojazdów są samochody elektryczne oraz samochody hybrydowe. Zwyczajowo podstawowym tematem w tym przypadku jest emisja gazów spalinyowych. Natomiast bez wątpienia ważne są również zagadnienia wpływu eksploatacji tych środków transportu na wielkość emisji zanieczyszczeń innych niż spaliny. Przykładami tych zanieczyszczeń są hałas, drgania, pole elektromagnetyczne oraz pyły.

Zwiększająca się liczba użytkowanych pojazdów samochodowych skłania do podjęcia tematu w tym zakresie, szczególnie, że stopniowo rośnie liczba pojazdów o alternatywnych napędach (hybrydowych i w pełni elektrycznych). Istnieją wyraźne przesłanki do tego, że emisje takie jak pole elektromagnetyczne oraz pyły mogą osiągać większe parametry w przypadku środków transportu o alternatywnych napędach. Odmienne z kolei wygląda sprawa emisji hałasu i drgań. Uważa się, że emisje te są mniejsze w przypadku środków transportu o alternatywnych napędach.

Ze względu na pewne wątpliwości w tym temacie, wydaje się więc koniecznym rozpatrzenie kwestii emisji zanieczyszczeń pochodzących z użytkowania środków transportu samochodowego. Według statystyk szybko wzrasta liczba pojazdów z napędem elektrycznym w Polsce. Na rysunku 1 zaprezentowano zmianę liczby pojazdów ładowanych z sieci elektrycznej (pojazdy EV oraz PHEV) w latach 2020-2024 w Polsce. Dane pochodzą z listopada poszczególnych lat i wskazują na stałe zwiększanie się tej liczby [1, 2].



Rys. 1. Zmiana liczby pojazdów z napędem elektrycznym (pojazdy EV oraz PHEV) w Polsce w latach 2020-2024 [opracowanie własne na podstawie 1, 2]

2. CEL I ZAKRES ROZPRAWY

Jako cel rozprawy określono ustalenie, które pojazdy segmentu ekonomicznego (czy z alternatywnym napędem, czy z konwencjonalnym napędem) i w jakich warunkach eksploatacji (warunki miejskie, czy autostradowe) oraz użytkowania (współdzielony lub prywatny) są bardziej ekologiczne oraz bezpieczniejsze pod względem emisji zanieczyszczeń dla ludzi oraz środowiska. Co do aspektu badań należy uznać, iż jest on środowiskowy oraz utylitarny, ponieważ celem ich jest pogłębienie wiedzy ludzkiej na temat zanieczyszczeń antropogenicznych.

Zakres rozprawy obejmuje badania porównawcze emisji wybranych zanieczyszczeń (pola elektromagnetycznego, hałasu, drgań oraz zapylenia) pochodzących z użytkowania pojazdów o napędzie konwencjonalnym, elektrycznym i hybrydowym. Przeprowadzono badania wpływu na te emisje dla wybranych czynników eksploatacyjnych, tj.:

- warunki drogowe (ruch miejski i autostradowy),
- prędkość jazdy (30 km/h, 50 km/h, 100km/h i 140 km/h),
- prędkość obrotowa wału korbowego lub wirnika silnika (zależna od rodzaju napędu i związana z prędkością jazdy),
- warunki użytkowania (użytek współdzielony oraz prywatny).

Rozprawa obejmuje także analizę wpływu eksploatacji i charakterystyki użytkowania na poziomy emisji poszczególnych zanieczyszczeń. Badania te mają na celu wskazanie najbardziej optymalnych rozwiązań transportowych pod względem środowiskowym i zdrowotnym, biorąc pod uwagę rosnącą popularność pojazdów elektrycznych oraz modeli współdzielenia środków transportu. Praca doktorska obejmuje:

- przegląd aktualnego stanu wiedzy z zakresu pojazdów o napędach alternatywnych (napęd hybrydowy i elektryczny), rozwoju i problemów elektromobilności oraz badań i emisji pola elektromagnetycznego, hałasu, drgań oraz zapylenia przez pojazdy samochodowe z napędami alternatywnymi,
- pomiary pola elektromagnetycznego w pojeździe z napędem konwencjonalnym, w pojeździe z napędem elektrycznym oraz w pojeździe z napędem hybrydowym, podczas jazdy w warunkach miejskich oraz autostradowych,
- pomiary pola elektromagnetycznego w pojeździe z napędem elektrycznym podczas ładowania na stacji ładowania pojazdów elektrycznych,

- pomiary indukcji magnetycznej w pojeździe z napędem konwencjonalnym, elektrycznym i hybrydowym,
- stanowiskowe pomiary hałasu pochodzącego z układów napędowych w pojazdach (z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym),
- pomiary hałasu wewnątrz pojazdów (z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym) podczas jazdy w warunkach miejskich i autostradowych,
- pomiary hałasu na zewnątrz przejeżdżających pojazdów (z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym),
- stanowiskowe pomiary drgań ogólnych oraz drgań nadwozia pochodzących z układów napędowych w pojazdach (z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym),
- pomiary drgań ogólnych wewnątrz pojazdów (z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym) podczas jazdy w warunkach miejskich i autostradowych,
- zebranie informacji z obsługi pojazdów (z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym) odnośnie resursu wymiany opon, klocków i tarcz hamulcowych oraz analiza ilości produktów zużycia,
- zebranie próbek pyłu powstającego podczas użytkowania pojazdów (opony, klocki hamulcowe) oraz wykonanie badań w celu określenia składu chemicznego próbek za pomocą elektronowej mikroskopii skaningowej,
- analiza uzyskanych wyników badań,
- wnioski i podsumowanie.

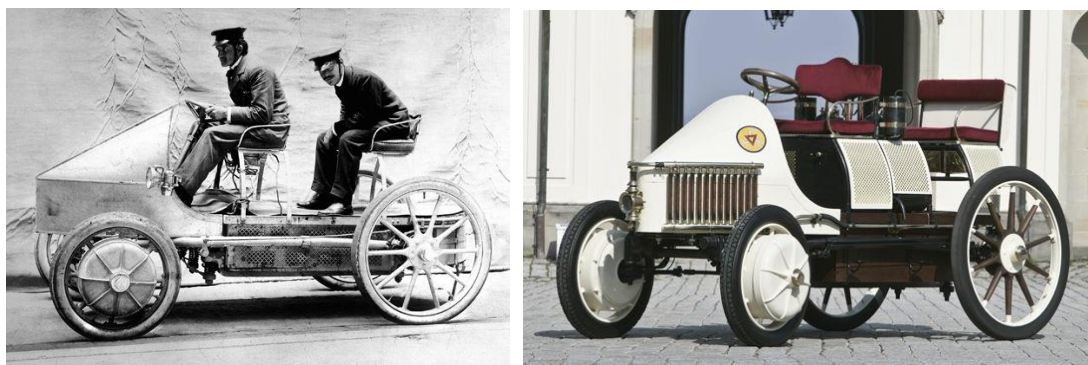
3. PRZEGLĄD LITERATURY

W celu scharakteryzowania tematu dotyczącego pojazdów z napędami alternatywnymi oraz emisji zanieczyszczeń przez te pojazdy, dokonano przeglądu literatury przedmiotu. W niniejszym rozdziale zawarto informacje dotyczące rodzaju pojazdów z napędami alternatywnymi, aspekty związane z rozwojem i problemami elektromobilności, aspekty środowiskowe oraz rodzaj zanieczyszczeń z użytkowania pojazdów samochodowych i ich wpływ na zdrowie ludzi. Analizowano emisje zanieczyszczeń takie jak hałas, drgania, pole elektromagnetyczne oraz pyły.

3.1. Samochody hybrydowe

Pojazd hybrydowy jest to pojazd wyposażony w przynajmniej dwa różne przemienniki energii i dwa różne układy gromadzenia energii przeznaczone do jego napędzania. Definicja ta zawarta jest w Regulaminie Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) dotyczącym jednolitych przepisów w odniesieniu do homologacji silników spalinowych lub elektrycznych układów napędowych przeznaczonych do napędzania pojazdów silnikowych kategorii M i N w zakresie pomiaru mocy netto oraz maksymalnej mocy [3]. Przemiennikiem energii jest na przykład silnik spalinowy (lub elektryczny), ponieważ przekształca on energię zawartą w paliwie (lub elektryczną) w energię mechaniczną. Zasobnikami energii są zbiorniki paliwa oraz akumulatory. Dla porównania silnik wykorzystujący dwa paliwa (np. benzyna i gaz LPG) nie jest pojazdem hybrydowym, lecz dwupaliwowym ze względu na zastosowanie jednego przemiennika energii, którym jest silnik spalinowy [4, 5].

Pojazdy hybrydowe uważane są często za etap przejściowy pomiędzy samochodami spalinowymi, a elektrycznymi. Pierwszy pojazd hybrydowy wyprodukowany został w 1900 r. Był to samochód Lohner Porsche Mixte Hybrid, nazywany Semper Vivus, czyli Wiecznie Żywy (rysunek 2). Pojazd ten posiadał napęd szeregowy. Napęd przekazywany był na koła przez silniki elektryczne zamontowane w piastach kół. Rozwijał on prędkość do 56 km/h o posiadał zalety zarówno samochodów spalinowych, jak i elektrycznych. Jednak wysokie koszty wytworzenia tego pojazdu w owym czasie spowodowały czasowe zaniechanie rozwijania tej idei [5, 6].



Rys. 2. Pierwszy pojazd hybrydowy Lohner Porsche Mixte Hybrid z 1900 roku [7]

Dopiero w roku 1970 pojawiły się koncepcyjne samochody z napędem hybrydowym. Dalej jednak były one drogie w produkcji. Przełomem był zaprezentowany przez Toyotę w 1997 roku model Prius, produkowany początkowo na rynek japoński, później także na amerykański [8].

W samochodach hybrydowych w trakcie jazdy miejskiej, a więc przy niskich prędkościach i małym obciążeniu, wykorzystywany jest silnik elektryczny. Gdy zwiększa się prędkość jazdy i obciążenie (np. podczas jazdy dynamicznej) uruchamiany jest silnik spalinowy. Obie jednostki uruchamiane są automatycznie bez udziału kierowcy w tym procesie. Pośród samochodów hybrydowych rozróżnia się [6]:

- napęd mikro-hybrydowy (micro hybrid),
- miękka hybryda (mild hybrid),
- pełny napęd hybrydowy (full hybrid),
- napęd hybrydowy ładowany z sieci (PHEV – plug-in hybrid).

W napędzie mikro-hybrydowym silnik elektryczny nie jest wykorzystywany do napędzania samochodu. Pełni on jedynie rolę rozrusznika i alternatora, a także odzyskuje energię podczas hamowania. W rzeczywistości więc pojazd taki nie może być traktowany jako pojazd hybrydowy według definicji EKG ONZ. Należy uznać stosowanie tej nazwy za chwyt marketingowy.

W przypadku tak zwanej miękkiej hybrydy silnik elektryczny działa jako jednostka pomocnicza silnika spalinowego i niemożliwa jest jazda wyłącznie w trybie elektrycznym.

Jeśli chodzi o pełny napęd hybrydowy, to silnik elektryczny może zarówno samodzielnie napędzać samochód, jak i wspomagać silnik spalinowy. Ponadto, silnik elektryczny może odzyskiwać energię podczas hamowania. Należy zaznaczyć, że jazda z wykorzystaniem wyłącznie silnika elektrycznego jest możliwa w ograniczonym zakresie. W przypadku pełnego

napędu hybrydowego (bez możliwości ładowania z sieci) ładowanie jest możliwe tylko podczas jazdy.

Innym przykładem jest pojazd wyposażony w napęd hybrydowy z możliwością ładowania baterii trakcyjnych z sieci elektrycznej, po podłączeniu do odpowiedniego gniazda elektrycznego. W zależności od sytuacji silnik spalinowy i elektryczny pracują razem lub oddzielnie.

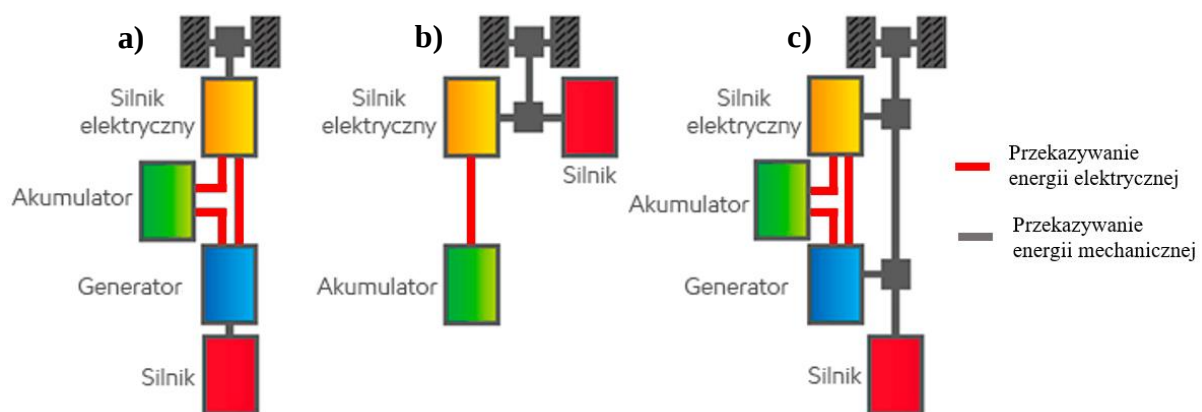
Inną klasyfikacją pojazdów hybrydowych jest ta, dzieląca je ze względu na sposób połączenia silnika spalinowego i elektrycznego. Rozróżnia się tu następujące napędy [6]:

- szeregowy,
- równoległy,
- mieszany (szeregowo – równoległy).

W przypadku układu szeregowego (rysunek 3a) w pojeździe hybrydowym silnik spalinowy nie jest połączony z kołami napędowymi poprzez układ przeniesienia napędu. Służy on wyłącznie do napędu maszyny elektrycznej (generatora) zmieniającej energię mechaniczną na energię elektryczną. Energia ta służy do zasilania silnika elektrycznego i ładowania akumulatora. Natomiast z kołami napędowymi połączony jest silnik elektryczny, który jest silnikiem trakcyjnym.

W układzie równoległym (rysunek 3b) silnik spalinowy i silnik elektryczny są połączone poprzez układ napędowy z kołami. Umożliwia to napędzanie pojazdu równocześnie przez oba silniki lub wyłącznie przez jeden z nich. W układzie takim maszyna elektryczna pracuje zamiennie jako silnik trakcyjny, jako generator lub w niektórych rozwiązaniach także jako rozrusznik silnika spalinowego. Natomiast silnik spalinowy może pracować jako silnik trakcyjny lub jako silnik napędzający maszynę elektryczną w funkcji generatora.

Jeżeli chodzi o układ mieszany (rysunek 3c), jest to połączenie powyższych przypadków. Tak jak w napędzie szeregowym występuje silnik elektryczny oraz generator i jeden silnik spalinowy. Zarówno silnik spalinowy, jak i silnik elektryczny są połączone z kołami napędowymi poprzez układ napędowy. Zadaniem silnika elektrycznego jest napędzanie pojazdu, wspomaganie jednostki spalinowej i odzyskiwanie energii przy hamowaniu. Zadaniem generatora napędzanego przez silnik spalinowy, jest ładowanie akumulatora lub bezpośrednie zasilanie energią elektryczną silnika elektrycznego.



Rys. 3. Rodzaje napędów hybrydowych [8]: a) szeregowy, b) równoległy, c) mieszany (szeregowo – równoległy)

3.2. Samochody elektryczne

Samochody elektryczne (EV-Electric Vehicle lub BEV-Battery Electric Vehicle) to pojazdy posiadające przynajmniej jeden silnik elektryczny, który napędza samochód. Definicję osobowego samochodu elektrycznego podaje Ustawa z 11 stycznia 2018 roku o elektromobilności i paliwach alternatywnych [9]. Zgodnie z nią, samochód elektryczny to pojazd wykorzystujący do napędu wyłącznie energię elektryczną, akumulowaną w baterii dzięki wcześniejszemu jej naładowaniu z zewnętrznego źródła zasilania.

W pojazdach tych bateria wysokonapięciowa magazynuje i dostarcza energię do silnika elektrycznego. Ładowanie baterii odbywa się za pomocą ładowarki sieciowej. Według definicji w regulaminie EKG ONZ termin „wysokonapięciowy” w pojazdach oznacza obwody elektryczne, które pracują pod napięciem roboczym przekraczającym 60 V i nie większym niż 1500 V dla prądu stałego oraz przekraczającym 30 V i nie większym niż 1000 V dla prądu przemiennego. Sieć ta stosowana jest ze względu na to, iż uzyskanie mocy elektrycznej o wartości kilku kilowatów przy niskim napięciu wymagałoby konieczności zastosowania wysokiego natężenia prądu. To z kolei wymagałoby zastosowania przewodów elektrycznych o wielkich przekrojach poprzecznych, niekorzystnych ze względu na masę pojazdu, koszty oraz miejsce w pojeździe. W samochodach elektrycznych oprócz sieci elektrycznej wysokiego napięcia występuje także 12 woltowa sieć pokładowa do zasilania układów takich jak na przykład oświetlenie wnętrza. Z powodu braku silnika spalinowego wszystkie podzespoły i układy takie jak pompa cieczy chłodzącej, wspomaganie kierownicy i sprężarka klimatyzacji są napędzane elektrycznie [4, 5].

Stwierdzić należy, że samochody elektryczne nie są nowością. Pierwszy pojazd elektryczny powstał w pierwszej połowie XIX wieku. Ważnymi aspektami sprzyjającymi budowie pojazdów elektrycznych było odkrycie indukcji elektromagnetycznej przez Michaela Faradaya w 1831 roku. Kilkadziesiąt lat później w roku 1859 zbudowany został akumulator ołowiowy. Siedem lat później skonstruowano prądnice elektryczną. Dużym postępem w tej dziedzinie było również opracowanie możliwości zmiany energii elektrycznej na mechaniczną. Wszystkie te odkrycia znalazły zastosowanie w ówczesnych napędach elektrycznych pojazdów [5, 6].

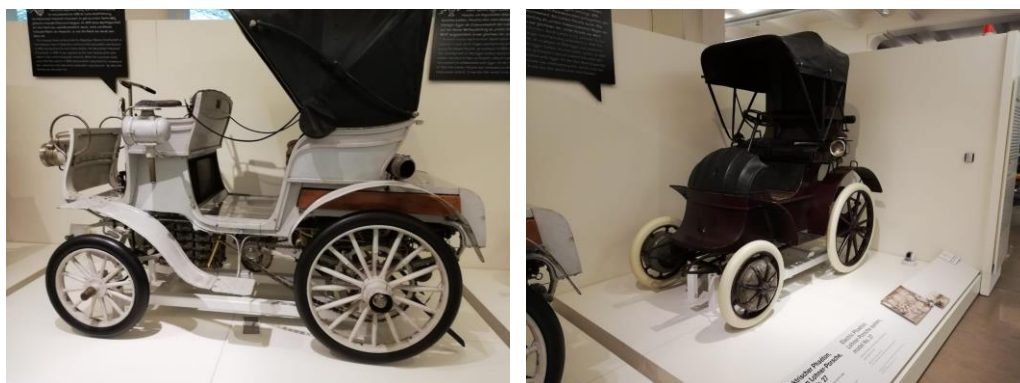
Pierwszy pojazd elektryczny zaprezentował Mr Trouve w 1881 roku we Francji. Pojazd ten rozwijał prędkość do 12 km/h. W tym samym roku W. Ayrton i J. Perry zaprezentowali w Anglii samochód elektryczny, który mógł poruszać się z prędkością do 14 km/h oraz miał zasięg do 40 km [10]. W 1882 roku zbudowany został trójkołowiec elektryczny, którego silnik

miał masę około 20 kg oraz baterię o masie ponad 45 kg. W 1888 roku skonstruowany został trolejbus elektryczny, który przewoził pasażerów z prędkością około 10 km/h. W ostatnim dziesięcioleciu XIX wieku na drogach pojawiły się elektryczne autobusy.

W 1897 roku rozpoczęto wynajem pojazdów z silnikiem elektrycznym. Samochody te miały masę około 2000 kg. Ich silnik elektryczny generował moc 2,6 kW (około 3,5 KM) przy 1500 min^{-1} . Przeniesienie napędu odbywało się poprzez przekładnię łańcuchową, a bateria składała się z 40 ogniw. Prędkość tych pojazdów wynosiła około 15 km/h, a ich zasięg to niecałe 50 kilometrów [4, 10]. Pierwszy amerykański pojazd elektryczny został użyty w sierpniu 1894 roku i jest znany pod nazwą „Elektrobat”. Konstrukcyjnie przypominał powóz konny, a napęd przenoszony był na koła przez skórzaną pas [10]. W 1899 powstał pojazd elektryczny w kształcie pocisku La Jamais Contente, który osiągnął maksymalną prędkość 105,9 km/h. Pojazd ten posiadał dwa silniki Postel-Vinay o mocy 25 kW każdy. Silniki były zasilane z pakietu akumulatorów kwasowo-ołowiowych o napięciu około 200 V. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykłady wczesnych pojazdów elektrycznych.



Rys. 4. Pojazd elektryczny w kształcie pocisku La Jamais Contente z 1899 roku [10]



Rys. 5. Przykładowe samochody elektryczne jako eksponaty w Muzeum Techniki w Austrii [opracowanie własne]

W XX wieku zmniejszyło się zainteresowanie pojazdami elektrycznymi. Głównym powodem tego był relatywnie mały zasięg pojazdów elektrycznych.auta z silnikami spalinowymi były bardziej praktyczne i rozwojowe w tym zakresie. Ograniczenia technologiczne nie pozwoliły pojazdom z napędem elektrycznym na podobną popularność. Pojazdy elektryczne wymagały stosowania ciężkich baterii, które znacznie zwiększały masę samochodu i zmniejszały jego masę i negatywnie wpływały na właściwości dynamiczne. Mimo rozwoju technologii w późniejszym okresie produkcja pojazdów z napędem elektrycznym była wciąż zbyt droga [10, 11].

W latach 90 dwudziestego wieku ponownie wzrosło zainteresowanie pojazdami elektrycznymi. Przyczyn tego stanu rzeczy można upatrywać w pojawiających się w tym czasie kryzysach paliwowych, objawiających się ograniczeniem dostępu do ropy naftowej i wzrostem jej cen. W tym czasie na rynek trafiły takie samochody elektryczne jak, np. [5]:

- Skoda Favorit ELTRA zaprezentowana w 1992 roku (zasięg 80 km, prędkość maksymalna 80 km/h),
- Chevrolet S10 EV zaprezentowany w 1998 roku, (zasięg 144 km, prędkość maksymalna 118 km/h),
- Honda EV zaprezentowana w 1999 roku, (zasięg 180 km, prędkość maksymalna 130 km/h),
- Toyota RAV4 EV zaprezentowana w 2002 roku, (zasięg 140 km, prędkość maksymalna 125 km/h).

Na początku XXI wieku niemal wszystkie największe koncerny motoryzacyjne posiadały w swojej ofercie przynajmniej jeden samochód elektryczny. Problemem był jednak mały zasięg tych pojazdów oraz wysoka cena. Sytuacja zmieniła się w 2008 roku, gdy firma Tesla wprowadziła do sprzedaży model Roadster, który charakteryzował się zasięgiem do 300 km i przyspieszał do 100 km/h w czasie 4 sekund. Od tego czasu samochody elektryczne na rynku stają się coraz bardziej popularne [10].

3.3. Silniki i baterie samochodów elektrycznych

Maszyny elektryczne pełnią kilka funkcji, działają jako silnik elektryczny lub generator. Mogą nie tylko napędzać pojazd, ale także uruchamiać silnik spalinowy (pełnić funkcję rozrusznika). Silnik elektryczny zazwyczaj jest zamontowany z przodu lub z tyłu pojazdu i napędza odpowiednio koła osi przedniej (np. Dacia Spring) lub tylnej (np. Tesla model S).

Nieco inne rozwiązanie techniczne oparte jest o silniki elektryczne montowane w piastach kół jezdnych. Taki układ stosuje się zazwyczaj w małych, lekkich i wolniejszych samochodach, ze względu na dość wielką jego masę nieresorowaną.

Do napędu pojazdów używane są silniki prądu stałego (DC) lub przemiennego (AC). Silniki prądu przemiennego są to silniki bezszczotkowe synchroniczne z magnesami trwałymi w wirniku. Odpowiednio wielką wartość momentu obrotowego generowanego przez silnik uzyskano poprzez zastosowanie trwałych magnesów neodymowych. Takie rozwiązanie sprawia, iż nie jest potrzebne doprowadzenie prądu do wirnika. Nie ma więc potrzeby stosowania komutatorów i szczotek. Natomiast istnieje konieczność zmiany prądu stałego pochodzącego z baterii trakcyjnej na prąd przemienny wykorzystywany przez silnik elektryczny. Silniki prądu stałego mają mniej skomplikowany układ sterowania, dlatego stosowane są w starszych i tańszych samochodach (lub w przypadku samochodów przebudowanych z napędu spalinowego na elektryczny na zasadach konwersji) [12, 13].

Parametrem opisującym silnik elektryczny jest moc znamionowa. Ważnym jest określenie czy wskazana wartość dotyczy mocy ciągłej czy mocy chwilowej (np. 30 sekundowej). Zdarza się, że producenci pojazdów podają moc chwilową, której wartość jest zazwyczaj znacznie większa od wartości mocy ciągłej [4, 12].

Akumulator trakcyjny (zwany również baterią trakcyjną) jest magazynem energii elektrycznej stosowanym w pojazdach elektrycznych. Składa się z połączonych ze sobą elementów nazywanych ogniwami. W samochodach elektrycznych stosowane są układy wysokiego napięcia, które charakteryzuje napięcie wynoszące nawet do 400 – 800 V. Oprócz baterii trakcyjnej w pojeździe znajduje zastosowanie również akumulator o napięciu 12 V. Jego zadaniem jest zasilanie wyposażenia pojazdu. Do ładowania tego typu akumulatorów stosowane są przetwornice obniżające napięcie prądu stałego do 12 V.

Pojemność baterii wykorzystywanych do zasilania silnika pojazdu jest od kilku do kilkunastu razy większa od tradycyjnych akumulatorów. Jest to możliwe dzięki budowie modułowej, która pozwala w łatwy sposób zwiększyć pojemność przez zwiększanie liczby ogniw oraz dopasowanie kształtu akumulatora do konstrukcji pojazdu. Sterownik baterii nadzoruje i ocenia stan naładowania baterii, co ma wpływ na intensywność odzyskiwania energii z hamowania oraz wyrównanie poziomu naładowania poszczególnych ogniw. Wymogi techniczne nakładane na akumulatory to między innymi: niezawodność, możliwie największy potencjał mocy użytkowej, długa żywotność bez utraty właściwości, bezpieczeństwo dla środowiska [3, 4, 10 – 12].

Wraz z rozwojem napędów elektrycznych następowało opracowywanie różnych idei odnoszących się do zasad działania i budowy baterii (i innych elementów gromadzących energię elektryczną). Zaznaczyć należy, że dotyczyło to nie tylko kwestii napędu pojazdów elektrycznych, ale miało to miejsce w znacznie szerszym pojęciu. Zasadniczo wyróżnić można różne rodzaje akumulatorów stosowanych w pojazdach elektrycznych [3, 4]:

- kwasowo-ołowiowe,
- zasadowe niklowo-kadmowe (Ni-Cd),
- zasadowe niklowo-metalowo-wodorkowe (NiMH),
- litowo-jonowe (Li-Ion),
- litowo-żelazowo-fosforanowe (LFP),
- litowo-polimerowe,
- litowo-tytanowe,
- potasowo-jonowe,
- superkondensatory.

Akumulatory kwasowo-ołowiowe są obecnie powszechnie używane. Są tanie, mają jednak dużą masę w stosunku do ich pojemności. Duży prąd podczas ich ładowania lub odzyskiwania energii z hamowania pogarsza ich trwałość, która zwykle i tak wynosi około 3 – 4 lat lub 500 cykli. Napięcie znamionowe jednego ogniwa to 2 V. Z kolei akumulatory zasadowe niklowo-kadmowe (Ni-Cd) są trwałe przy regularnym całkowitym rozładowaniu. Niestety przy powtarzających się częściowych rozładowaniach zmniejsza się ich pojemność. Są szkodliwe dla środowiska ze względu na stwierdzoną toksyczność kadmu. Napięcie znamionowe jednego ogniwa wynosi 1,2 V. Akumulatory zasadowe niklowo-metalowo-wodorkowe (NiMH) cechuje je pojemność większa od akumulatorów niklowo – kadmowych (o 30-50%). Napięcie znamionowe jednego ogniwa to 1,2 V. Natomiast w akumulatorach litowo-jonowych stosowany jest roztwór soli litu w mieszaninie rozpuszczalników organicznych. Negatywnie wpływają na nie wysokie temperatury, przez co ważne jest monitorowanie i regulowanie temperatury tych baterii. Znane są przykłady, w których przegrzanie baterii prowadziło do ich zapłonu lub nawet wybuchu. Nie zaprzeczalną z kolei zaletą w ich przypadku jest brak występowania tzw. efektu pamięci (zmniejszenie pojemności w skutek częściowego rozładowania). Napięcie znamionowe jednego ogniwa wynosi 3,7 V. Akumulatory litowo-żelazowo-fosforanowe (LFP) to rodzaj akumulatorów litowo-jonowych z katodą LiFePO_4 . Wyróżniają się one trwałością i odpornością na zmiany temperatury. W ich produkcji nie są wykorzystywane toksyczne materiały. Trwałość tych

baterii ocenia się na 3000 cykli ładowania. Napięcie znamionowe jednego ogniwa to 3,7 V. Z kolei akumulatory litowo-polimerowe to rodzaj akumulatorów litowych z anodą składającą się z folii i elektrolitem z przewodzących polimerów. Są one pięciokrotnie lżejsze od akumulatorów z płynnym elektrolitem o podobnej pojemności. Akumulatory litowo-tytanowe to rodzaj akumulatorów litowo-jonowych, które można ładować szybciej (w porównaniu do baterii Li-Ion), ze względu na wielką powierzchnię anody wynoszącą do 100 m² na gram masy anody (zamiast 3 m² na gram masy anody, jak w przypadku Li-Ion). Jest ono skutkiem pokrycia powierzchni anody nanokryształkami tytanu litu. Ze względu na większy prąd ładowania należy stosować specjalne przewody i złącza. W przypadku akumulatorów potasowo-jonowych napięcie ogniwa jest podobne do napięcia akumulatorów litowo-jonowych. Są jednak od nich tańsze i prostsze w użyciu, lecz nie są jeszcze stosowane w samochodach jako akumulatory trakcyjne. Oprócz akumulatorów trakcyjnych służących do przechowywania energii elektrycznej przez relatywnie długi czas, stosowane są superkondensatory. Są to kondensatory o dużej pojemności, wynikającej z zastosowania cienkiej izolacji pomiędzy pofałdowanymi powierzchniami elektrod. Mają one większą pojemność przypadającą na jednostkę masy w porównaniu do akumulatorów. Z uwagi na fakt, iż przechowują mniej energii niż akumulatory, mogą je wspomagać przy hamowaniu odzyskowym lub chwilowym wielkim zapotrzebowaniu na energię [3, 4].

Sprawne technicznie baterie nie są uważane za obiekty niebezpieczne. Należy jednak zachować ostrożność podczas ich przemieszczania i magazynowania. Warto zaznaczyć, że zarówno baterie sprawne, jak i te uszkodzone (np. w wyniku wypadku) podlegają określonym zasadom postępowania. Przykładem mogą tu być zasady określone w przepisach o drogowym przewozie towarów niebezpiecznych (ADR), ze względu na niebezpieczeństwo ich samozapłonu [3]. Na rysunku 4 przedstawiono przykładową baterię trakcyjną stosowaną w samochodach elektrycznych.



Rys. 6. Przykład baterii trakcyjnej w samochodach elektrycznych [14]

3.4. Stacje ładowania samochodów elektrycznych

Właściwości baterii przekładają się bezpośrednio na sposób ładowania pojazdów elektrycznych oraz konstrukcję stacji ładowania. Samochody hybrydowe typu PHEV wyposażone są w baterie o małej pojemności, zwykle nieprzekraczające 10 kWh. Pojazdy te nie posiadają złącz szybkiego ładowania DC i można ładować je przy mocy nie przekraczającej 3,7 kW, a więc z gniazda 230 V [11-13].

W przypadku samochodów elektrycznych problem bezpośredniego podłączenia do gniazda rozwiązują specjalne naścienne ładowarki (tzw. Wallboxy). Ładowarki te pozwalają na ładowanie z mocą od 3,7 kW do nawet 22 kW. Samochód elektryczny może być wyposażony w gniazdo szybkiego ładowania DC oraz gniazdo wolnego ładowania AC. W ładowarkach samochodowych rozróżnia się następujące standardy złączy [13, 15]:

- Typ 1,
- Typ 1 combo,
- Typ 2 (Mennekes),
- Typ 2 combo (CCS),
- Typ 3 (Scame),
- Typ 4 (CHAdeMO).

Typ 1 jest to złącze do ładowania prądem przemiennym obowiązujące głównie na terenie Ameryki, o maksymalnej mocy 36 kW (Level 1) oraz 90 kW (Level 2). Przykłady samochodów, które można ładować poprzez to złącze to Nissan Leaf, Chevrolet Volt oraz inne produkowane na amerykański rynek.

Typ 1 combo to rozwinięcie idei wtyczki Typ 1. Zastosowano w niej dwa dodatkowe piny do ładowania prądem stałym. Przykłady samochodów, które można ładować poprzez to złącze to BMW i3, Chevrolet Spark oraz inne produkowane na amerykański rynek.

Typ 2 (Mennekes) to złącze do ładowania prądem przemiennym, dominujące na terenie Europy. Obsługuje ładowanie do mocy 140 kW, lecz w praktyce możliwości samochodów ograniczają je do 120 kW. Typ 2 combo (CCS) to rozwinięcie idei wtyczki Typ 2. Zastosowano w niej dwa dodatkowe piny do ładowania prądem stałym. Obsługuje ładowanie do mocy 350 kW. Przykłady samochodów, które można ładować poprzez to złącze to wszystkie samochody obecnie sprzedawane na terenie UE oraz samochody marki Tesla przeznaczone na rynek europejski.

Gniazdem, które było rozpatrywane jako standardowe do stosowania na terenie Unii Europejskiej jest gniazdo Typ 3 (Scame). Uznano jednak, że lepszym rozwiązaniem dla Europy będzie lepiej zabezpieczony Typ 2. Istniejące ładowarki z gniazdem Typ 3 powinny posiadać fabrycznie zamocowane przejściówki z Typ 3 na Typ 2. Przykłady samochodów, które można ładować poprzez to złącze to niektóre mini pojazdy sprzed 2010 roku.

Typ 4 (CHAdeMO) to złącze do zasilania prądem stałym, wprowadzone w Azji. Charakteryzuje je moc przyłączeniowa do 62,5 kW. Standard posiada oznaczenie IEC 62196 Typ 4. Nazwa standardu CHAdeMO ma kilka rozwinięć. Jedno z nich to „CHArge to MOve”, inne to „O CHA DEMO ikaga desuka”, co po japońsku oznacza „Napijmy się herbaty, gdy się ładuje”. Przykłady samochodów które można ładować za pomocą tego złącza to Kia Soul EV, Peugeot iOn, Citroen C-zero, Mitsubishi i-MiEV, Toyota RAV4, Mazda Demio EV oraz większość samochodów przeznaczonych na rynek japoński i azjatycki.

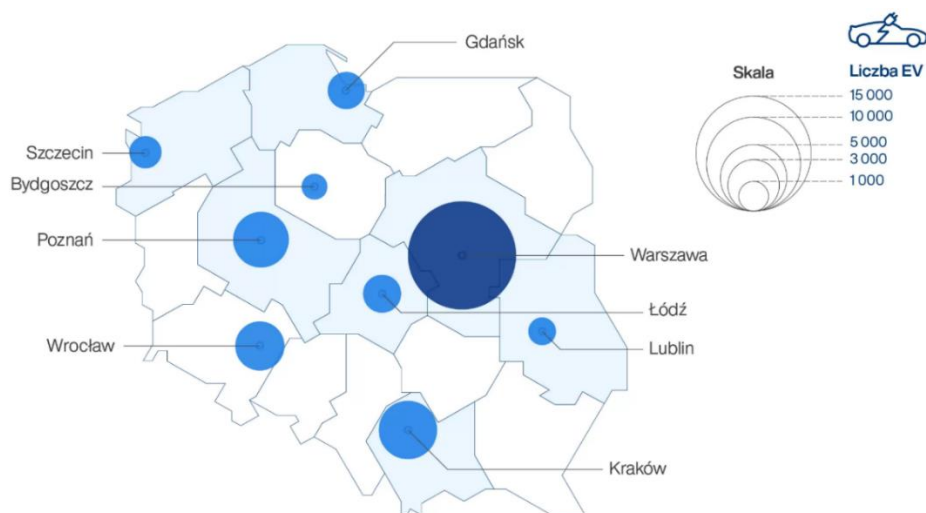
3.5. Rozwój elektromobilności w Polsce

Konieczność redukcji gazów cieplarnianych wymusiła nowe regulacje prawne, które mają zmniejszyć emisję pochodzącą z transportu. Założenie Ustawy [9] zakłada spadek emisji CO₂ do atmosfery o 37,5% w 2030 roku dla samochodów osobowych w stosunku do 2021 roku. Początek zmian wyznaczono na 2021 rok i wprowadzono w tym roku ograniczenie emisji CO₂ do 95 g/km. W roku 2025 dopuszczalna emisja CO₂ powinna wynosić 80,75 g/km, natomiast w roku 2030 tylko 59,37 g/km. Biorąc pod uwagę obecne możliwości i technologie, pojazd zasilany wyłącznie paliwem węglowodorowym nie jest w stanie spełnić tych wymagań. Konieczne jest zatem zastosowanie alternatywnych napędów. Jednym z kierunków zmian w motoryzacji jest właśnie elektromobilność.

Obecny etap rozwoju elektromobilności w Polsce można określić jako początkowy. Zagadnienie to reguluje Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych [9]. Powstał także dokument znany jako „Plan rozwoju elektromobilności”. Przyjęto w nim trzy etapy rozwoju. Pierwszy etap obejmował przygotowanie do rozwoju elektromobilności i przypadał na lata od 2016 do 2018. Drugi etap obejmował budowę infrastruktury zasilania pojazdów elektrycznych oraz zachętę do zakupu pojazdów elektrycznych. Przypadał on na lata od 2019 do 2020. Trzeci etap rozpoczął się w roku 2020. Ma on doprowadzić do postrzegania elektromobilności jako koniecznego kierunku rozwoju nowoczesnego transportu. Jego zapisy zakładają większy popyt na samochody elektryczne oraz stopniowe wycofanie pojazdów spalinowych. Etap ten zakończy się w roku 2025 [9, 17-21].

Liczba pojazdów elektrycznych oraz hybrydowych w Polsce stale zwiększa się. Stan na grudzień 2019 roku wynosił 6 672 pojazdy, z czego 4 178 to pojazdy EV, natomiast 2 494 to pojazdy PHEV. Stan na wrzesień 2022 wynosił już aż 54 795 pojazdów, w tym 27 595 PHEV i 27 200 EV. W listopadzie 2023 roku liczba samochodów z napędem elektrycznym w Polsce wyniosła 94 572 sztuk, w tym 49 139 samochodów EV oraz 45 433 PHEV.

Podobnie jest z liczbą stacji ładowania, których w roku 2019 było 888, z czego 624 to stacje ładowania AC, a 264 to DC. Do roku 2022 liczba stacji ładowania zwiększyła się ponad dwukrotnie i wynosiła 2460, w tym 1 759 stacji AC i 701 stacji DC. Natomiast w listopadzie 2023 roku liczba stacji ładowania wyniosła 5 829, z czego 4 362 to punkty ładowania AC oraz 1 467 punkty ładowania DC. Zatem od września roku 2022 do listopada roku 2023 liczba samochodów elektrycznych zwiększyła się o 21 369 sztuk, tj. o 54% [1, 2, 13, 20-22]. Na rysunku 7 przedstawiono liczbę samochodów elektrycznych w Polsce.



Rys. 7. Liczba samochodów elektrycznych w roku 2023 w polskich miastach liczących powyżej 300 tys. mieszkańców [23]

3.6. Problemy elektromobilności

Głównym wyzwaniem dla elektromobilności jest problem zabezpieczenia energetycznego. Rozwój infrastruktury ładowania będzie w dużej mierze zależny od jakości systemu elektroenergetycznego. Ładowanie pojazdów elektrycznych zwiększy obciążenie sieci elektrycznej. Problem ten nie będzie dotyczył znacząco sieci elektrycznej najwyższych napięć, lecz przede wszystkim sieci średniego i niskiego napięcia. Zakłócenia powstać mogą przy ładowaniu w godzinach szczytu dużej liczby pojazdów, które wymagają dużych mocy. Jednym z możliwych rozwiązań jest budowa stacji rozdzielczych oraz modernizacja sieci średnich i niskich napięć w czego skład wchodzi wymiana przewodów, wymiana transformatorów i bieżące analizowanie parametrów sieci. Cechą charakterystyczną systemu elektroenergetycznego jest ograniczony technologicznie brak możliwości magazynowania energii na dużą skalę, a także zmiana zapotrzebowania na energię ze względu na pogodę lub koniunkturę gospodarczą. Dodatkowym wyzwaniem jest także coraz większy udział źródeł odnawialnych takich jak elektrownie wiatrowe, solarne, wodne, które często są uznawane za źródła niestabilne. Sytuację elektroenergetyczną poprawić może budowa elektrowni jądrowej, której uruchomienie planowane jest na rok 2033. Planuje się, że następne będzie uruchamianych pięć elektrowni jądrowych, kolejno po jednej co dwa lata. Uruchomienie elektrowni atomowej ma poprawić stabilność produkcji energii [13, 21, 24, 25].

Ciekawym rozwiązaniem dotyczącym elektromobilności jest interfejs V2G, który oznacza Vehicle to Grid, czyli układ samochód – sieć. Umożliwia on dwustronny przepływ

energii z sieci energetycznej do samochodu i odwrotnie, w zależności od potrzeb sieci. W godzinach szczytowego poboru energii duża liczba samochodów podłączonych do sieci mogłaby stanowić swoisty bank energii. Problemami tego układu są: zachęcenie ludzi do korzystania z tej idei, pora w której samochody muszą być podłączone do sieci oraz uzgodnienie szczegółów współpracy tak, aby była ona korzystna dla funkcjonowania sieci energetycznej oraz osób udostępniających samochody. Trudno też określić jak zmieni się czas eksploatacji baterii, które charakteryzują się określoną liczbą cykli ładowań i rozładowań [3].

Projektowanie i lokalizacja punktów ładowania zależna jest od specyfikacji technicznej pojazdów. W tym pierwszym duże znaczenie ma dystans jaki może przebyć samochód po pełnym naładowaniu baterii. Podstawową zasadą jest ta, że odcinki między stacjami ładowania powinny być mniejsze od zasięgu pojazdu elektrycznego. Wdrażanie i rozwój transportu elektrycznego w aglomeracjach miejskich wymusza przede wszystkim rozbudowę infrastruktury stacji ładowania w centrach miast, w pobliżu dróg szybkiego ruchu oraz węzłów komunikacyjnych, na dworcach autobusowych i zajezdniach, w pobliżu centrów handlowych. Konieczne będzie ciągłe monitorowanie punktów ładowania oraz ich rozbudowa, co będzie wiązało się ze wzrostem zapotrzebowania na energię [13, 24-27].

Kolejnym problemem w rozwoju elektromobilności jest czas ładowania samochodu. W przypadku baterii o pojemności 24 kWh czas szybkiego ładowania ładowarką o mocy 22 kW wynosić będzie około godziny. W przypadku ładowarki 14,5 kW będzie to już około 1 h 20 min, a dla ładowarki 7 kW wyniesie około 2 h 30 min. Takie czasy ładowania można uznać za satysfakcjonujące dla użytkownika pojazdu. Niestety urządzenia szybkiego ładowania wymagają jednak rozbudowy infrastruktury ze względu na wyższe zapotrzebowanie na moc. Z kolei w przypadku wolnego ładowania przy mocy 3,7 kW, naładowanie baterii 24 kWh będzie trwało ponad 5 godzin, natomiast dla baterii 2,3 kWh będzie trwało prawie 9 godzin. Taki czas ładowania można uznać za zbyt długi. Osoby posiadające przydomowe ładowarki na swoich posesjach będą mogły ładować pojazdy w nocy. Jednak większość osób, zwłaszcza mieszkających w miastach, nie będzie miała takiej możliwości. Będą one ładować swoje samochody podczas pobytu w pracy, co może skutkować częstym zajmowaniem miejsca przy ładowarce przez samochód z naładowaną już baterią. Co ciekawe operatorzy ładowarek samochodowych przewidują w tej sytuacji dodatkowe opłaty dla użytkownika pojazdu.

Ważnym aspektem jest również koszt ładowania samochodu elektrycznego. Uważa się, że ceny energii elektrycznej będą wzrastać, a w przypadku przydomowych ładowarek cena będzie jeszcze wyższa ze względu na nałożone w Polsce limity zużycia energii przez gospodarstwa domowe [13, 24-29]. Koszt ładowania samochodu elektrycznego na stacji sieci

GreenWay za 1 kWh wynosi 1,95 zł dla prądu przemiennego. Dla prądu stałego do 100 kW koszt wynosi 2,95 zł, natomiast dla prądu stałego powyżej 100 kW koszt wynosi już 3,25 zł. Są to ceny bez opłaty miesięcznej za korzystanie z ładowarki. Warto wspomnieć, że dostępne są w tym przypadku dwie opłaty miesięczne (34,99 zł lub 99,99 zł), po wykupieniu których koszty ładowania maleją od kilku do kilkudziesięciu groszy za kWh. Przykładowo naładowanie samochodu elektrycznego Dacia Spring z baterią o pojemności 27 kWh prądem stałym wyniesie 79,65 zł. Producent deklaruje możliwość przejechania 200 km na pełnym naładowaniu. Koszt przejazdu 100 kilometrów wyniesie około 40 zł. Aktualne ceny energii elektrycznej wynoszą około 70 groszy za kWh, więc naładowanie samochodu elektrycznego w prywatnym garażu wynosi zaledwie 20 zł. Należy jednak pamiętać, że samochód z baterią o tak małej pojemności będzie wymagał częstego ładowania. Dla porównania koszt przejazdu 100 km samochodem Dacia Sandero wyposażonym w silnik benzynowy, który zużywa 5,2 dm³/100 km benzyny wynosi około 35 zł (przy cenie benzyny wynoszącej 6,70 zł za dm³).

Dodatkowo należy zaznaczyć, że akumulatory oddają mniej energii niż pobrały podczas ładowania. Przyczyną tych strat są uboczne reakcje chemiczne (samowyladowanie) oraz wydzielanie się ciepła w czasie przepływu prądu [4, 13, 23-29].

3.7. Zalety i wady samochodów elektrycznych i hybrydowych

Często przywoływaną zaletą samochodów elektrycznych jest ich zasadniczo nieskomplikowana konstrukcja (np. brak silnika spalinowego. Brak stosowania układów takich jak układ rozrządu, układ dolotowy i układ zasilania paliwem, przekłada się na brak konieczności wykonywania obsługi technicznych tych układów.

Odnosząc się do silnika spalinowego jego stworzenie wiąże się z dużym nakładem pracy projektowej, konstrukcyjnej oraz wykonawczej. Produkcja silników elektrycznych jest tańsza i mniej pracochłonna. W silniku elektrycznym brak jest zasadniczo elementów narażonych na tarcie i wysokie temperatury. Nie ma więc konieczności stosowania smarowania par kinematycznych. Eliminuje to obsługę techniczną dotyczącą wymiany oleju i filtra oleju, a dalej usuwa również problem utylizacji odpadów pochodzących z tego procesu. Wysoka wartość momentu obrotowego silnika elektrycznego zasadniczo pozwala na zrezygnowanie ze sprzęgła i skrzynki biegów i zastosowanie przekładni jednostopniowej. Upraszcza to wydatnie konstrukcje pojazdu. Wyjątkiem są pojazdy, które mogą poruszać się z wielkimi prędkościami i wymagają zmiany przełożeń [3, 4].

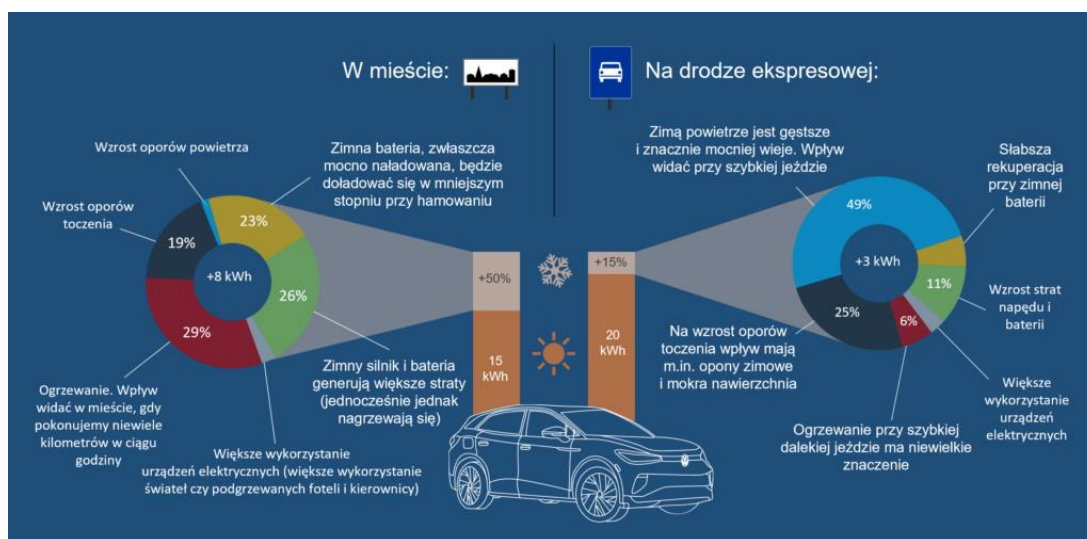
Pomimo licznych zalet pojazdy elektryczne i hybrydowe cechują się również pewnymi wadami. Najczęściej wymienia się wśród nich małym zasięgiem, długi czas ładowania, a także kwestie środowiskowe związane z produkcją i utylizacją baterii.

Jedną z podstawowych wad pojazdów elektrycznych jest niewielki zasięg w porównaniu do pojazdów z silnikiem spalinowym. Dodatkowo zasięg ten zmniejsza się w zależności od warunków atmosferycznych (np. ujemne temperatury, używanie ogrzewania lub klimatyzacji). Zasięg pojazdu elektrycznego zmniejsza się także wraz ze stopniem zużycia akumulatorów. Pomimo dynamicznego rozwoju baterii nadal charakteryzuje je niska trwałość, ograniczona liczba cykli ładowania, problemy z recyklingiem oraz potrzeba zapewnienia odpowiednich warunków temperaturowych. Problemem jest także długi czas ładowania i niewystarczająca liczba punktów ładowania.

Ponadto, samochody elektryczne posiadają liczne zaawansowane układy i sterowniki (np. sterownik zarządzania baterią, układy chłodzenia oraz ogrzewania baterii), które nie występują w samochodach spalinowych. Prócz tego zwraca się uwagę, że pojazdy elektryczne i hybrydowe mogą wymagać specyficznych materiałów eksploatacyjnych. Przykładem może być układ klimatyzacji samochodów elektrycznych, w którym należy używać oleju o wysokiej oporności elektrycznej.

Wskazuje się również na fakt, że pojazdy elektryczne cechuje wysoka cena w porównaniu do samochodów spalinowych. Na cenę tę wpływ mają przede wszystkim koszty wytworzenia akumulatorów trakcyjnych [3, 6, 13].

Na rysunku 8 schematycznie przedstawiono problemy dotyczące zużycia energii w samochodzie elektrycznym w odniesieniu do miejskich i pozamiejskich warunków jazdy.



Rys. 8. Przyczyny wzrostu zużycia energii w samochodzie elektrycznym [30]

3.8. Ochrona środowiska w transporcie samochodowym – ślad węglowy

Rozpatrywanie środowiskowego wpływu samochodu elektrycznego wyłącznie co do czasu jego eksploatacji uznać należy za ułomne. Warto zwrócić uwagę na bezwzględną konieczność rozeznania tego wpływu również na etapie pozyskania surowców jak i samego procesu produkcji, a także na etapie następującym po wycofaniu tego pojazdu z eksploatacji. Ciekawym ujęciem tej problematyki jest opis wykorzystujący ślad węglowy.

Ślad węglowy jest to całkowita suma emisji gazów cieplarnianych emitowanych bezpośrednio przez cały okres użytkowania danego przedmiotu, a także podczas jego produkcji i utylizacji. Dominującym gazem cieplarnianym jest dwutlenek węgla (CO_2). Uwalnia się on podczas spalania w domach, pojazdach, fabrykach oraz elektrowniach. Innym gazem cieplarnianym jest metan (CH_4), którego siła oddziaływania jest 28-krotnie większa od dwutlenku węgla. Głównym jego źródłem jest rolnictwo oraz składowiska odpadów. Kolejnym gazem jest podtlenek azotu (N_2O), którego siła oddziaływania jest około 265 razy większa. Uwalniany jest on w trakcie procesów przemysłowych i gospodarki rolnej. Gazy stosowane w chłodnictwie oddziałują nawet kilka tysięcy razy silniej niż CO_2 .

Każdy przedmiot lub czynność mogą emitować wiele różnych gazów cieplarnianych. Trudno zatem określić dokładną emisję śladu węglowego. W tym celu wyrażany jest on jako ekwiwalent dwutlenku węgla (CO_2e). Oznacza to, że całkowity wpływ gazów cieplarnianych uwalniany przez przedmiot lub czynność wyraża się jako ilość dwutlenku węgla, która miałaby taki sam wpływ oddziałując przez okres 100 lat [30-33].

3.8.1. Aspekty środowiskowe produkcji pojazdów samochodowych

Badania dotyczące elektromobilności wskazują, że pojazdy wykorzystujące energię elektryczną mają mniejszy ślad węglowy niż pojazdy napędzane silnikiem spalinowym. Problemem z interpretacją danych jest to, że porównanie samochodów elektrycznych i spalinowych jest dość skomplikowane. Dużo zależy od wielkości porównywanych aut, roku produkcji, dokładności informacji o źródłach energii elektrycznej w poszczególnych krajach lub sposobu określania emisji. Brytyjska organizacja Low Carbon Vehicle [31] wyliczyła że średni ślad węglowy pozostały po produkcji samochodu elektrycznego wynosi 8800 kg, natomiast w przypadku samochodu o konwencjonalnym napędzie to 5600 kg. Emisja gazów cieplarnianych podczas produkcji samochodu jest złożonym aspektem. Należy wliczyć

materiały potrzebne do wyprodukowania pojazdu takie jak na przykład metale, tworzywa sztuczne, opony, szkło, lakier itp. Następnie przetwarzanie, produkcja oraz transport. Wyprodukowanie pojazdów małych takich jak Citroen C1 lub Peugeot 107 z silnikiem spalinowym emituje około 4000 kg CO_{2e} do atmosfery, w przypadku samochodu średniego jak Ford Focus jest to około 8000 kg CO_{2e}. Produkcja małego samochodu elektrycznego Renault Zoe emituje 11000 kg CO_{2e}, a w przypadku samochodu hybrydowego Toyota Prius jest to 12000 kg CO_{2e}. Wynika to z tego, iż do wytworzenia pojazdu elektrycznego produkowane są baterie, których produkcja wytwarza duży ślad węglowy. W przypadku pojazdów hybrydowych i elektrycznych oprócz emisji gazów cieplarnianych związanych z produkcją samochodu dodatkowo pojawia się emisja związana z produkcją baterii [34]. Szacuje się, że produkcja baterii tworzy ślad węglowy porównywalny do 3 lat jazdy pojazdem z silnikiem wysokoprężnym, pod względem emisji CO₂ do środowiska [30-33, 35, 36].

Kolejnym problemem dotyczącym produkcji baterii jest ograniczona ilość surowców. Spośród pierwiastków niezbędnych do budowy samochodu elektrycznego ok. 17 % zalicza się do metali rzadkich. Do produkcji baterii wykorzystywane są pierwiastki takie jak lit, kadm, kobalt, nikiel, mangan, miedź czy ołów. Niektóre z tych pierwiastków wykazują szkodliwość dla środowiska. Kadm jest bardzo toksyczny, a jego szkodliwe działanie polega na tym, że uszkadza nerki, powoduje anemię, a także zaburzenia powonienia i zmiany w układzie kostnym (choroba Itai-Itai). Kobalt działa negatywnie na funkcjonowanie tarczycy. Lit może odkładać się w płucach, co prowadzi do ich obrzęku. Ołów oddziałuje niekorzystnie na każdy z narządów [37].

3.8.2. Aspekty środowiskowe w eksploatacji pojazdów samochodowych

Silnik spalinowy działa na zasadzie zamiany energii chemicznej w energię mechaniczną poprzez spalanie mieszanki (paliwa i powietrza) w cylindrze. Jako paliwa stosuje się benzynę, olej napędowy oraz gazy (np. LPG, CNG, LNG). Samochód elektryczny do napędu wykorzystuje energię elektryczną. Zamiast silnika spalinowego jest silnik lub silniki elektryczne, sterownik oraz zestaw akumulatorów. Energia elektryczna zmagazynowana w akumulatorach jest przekazywana do silnika elektrycznego, który napędza koła samochodu bezpośrednio lub przez zespół przekładni [38-40].

Ślad węglowy powstały podczas wyprodukowania 50 dm³ gazu LPG wynosi 108 kg CO_{2e}, w przypadku benzyny wynosi 173 kg CO_{2e}, natomiast dla oleju napędowego jest to 196 CO_{2e}. Pokonanie 1 kilometra samochodem elektrycznym emituje około 110 g CO_{2e} do

atmosfery. W przypadku ekonomicznego samochodu z silnikiem spalinowym wartość ta wynosi około 180 g CO₂e, natomiast samochód spalający 8 dm³ paliwa na 100 km wyemituje około 330 g CO₂e przejeżdżając 1 kilometr. Wartości te są zawyżone z powodu uwzględnienia emisji pochodzących z wydobycia, rafinacji i transportu paliwa oraz utrzymania samochodu. Prawie połowa emisji pochodzi bezpośrednio z procesu spalania paliwa. Dane te pochodzą z modeli zastosowanych na podstawie emisji dostaw paliwa, amortyzacji oraz produkcji [38].

Podczas użytkowania pojazdu elektrycznego bądź hybrydowego ślad węglowy wydaje się być niższy niż w przypadku użytkowania samochodu z silnikiem spalinowym. Ma to miejsce dlatego, że w samochodzie z napędem konwencjonalnym energia jest wytwarzana bezpośrednio przez silnik spalinowy, czemu towarzyszą różne emisje (np. emisja gazów spalinowych). Natomiast w przypadku samochodu elektrycznego to zjawisko nie występuje. Energia elektryczna potrzebna do poruszania się pojazdu jest wytwarzana w elektrowni (np. wykorzystującej paliwa kopalne, wiatrowej, słonecznej), natomiast w pojeździe jest tylko magazynowana i wykorzystywana do napędu. Zdarza się, że przy charakterystyce wpływu pojazdu elektrycznego na środowisko pomija się ważny aspekt wytwarzania energii elektrycznej poza tym pojazdem.

Duży ślad węglowy powstaje w wyniku wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni. Krajowa energetyka w Polsce opiera się głównie o tzw. konwencjonalne elektrownie ciepłne, gdzie paliwem jest węgiel kamienny lub brunatny. Do naładowania pojazdu elektrycznego potrzeba kilkanaście kW mocy, a w przypadku szybkiego ładowania wartość ta dochodzi nawet do 300 kW (w przypadku samochodu marki Tesla). Pamiętać zatem należy, iż praca elektrowni, której efektem jest zasilanie pojazdu elektrycznego, również nie jest obojętna dla środowiska naturalnego.

Ciekawym zagadnieniem jest kompleksowe porównanie emisji CO₂ z użytkowania samochodów spalinowych i elektrycznych. Podaje się, że emisja pochodząca ze spalania benzyny wynosi około 250 g CO₂/kWh. Natomiast w Polsce emisyjność związana z wytwarzaniem prądu elektrycznego w elektrowniach węglowych wynosi około 700 g CO₂/kWh. Biorąc pod uwagę, że pojazd elektryczny na takiej samej trasie zużywa nawet do czterech razy mniej energii niż spalinowy można uzyskać ciekawe porównanie. Mianowicie jeżeli emisyjność elektrowni wynosi powyżej 750 g CO₂/kWh, trudno jest określić który z tych pojazdów cechuje mniejszy negatywny wpływ na środowisko. Natomiast w przypadku przekroczenia przez elektrownię emisyjności na poziomie 1000g CO₂/kWh, pojazd spalinowy należy uznać za mniej obciążający dla środowiska naturalnego, niż pojazd elektryczny. Takie rozumowanie miałoby miejsce w przypadku produkcji energii elektrycznej wyłącznie

w konwencjonalnych elektrowniach ciepłych. Należy jednak pamiętać, iż najczęściej występuje fakt uzupełniania zapotrzebowania na energię elektryczną z elektrowni słonecznych, wiatrowych oraz wodnych. Należy się przy tym spodziewać wzrostu ilości energii pozyskanej z tych źródeł.

Warto wspomnieć jeszcze o jednym aspekcie. Mianowicie ilość paliwa w zbiorniku samochodu z silnikiem spalinowym może być generalnie traktowana jako stała. Natomiast ilość energii w akumulatorze pojazdu elektrycznego zmniejsza się wraz z upływem czasu. Wielkość tego ubytku zależy od czasu oraz warunków temperaturowych [33, 35-41].

3.8.3. Aspekty związane z wycofaniem pojazdu z eksploatacji

Biorąc pod uwagę emisję śladu węglowego bardziej ekologiczne jest posiadanie starszego samochodu przez wiele lat niż jego wymiana na nowy samochód elektryczny, o ile stan techniczny posiadanego samochodu jest prawidłowy. W przypadku pojazdów z konwencjonalnym napędem sporo jego części może zostać ponownie wykorzystane poprzez recykling (np. wykorzystanie karoserii poprzez przeróbkę metali w hucie). W przypadku samochodów elektrycznych, także sporo elementów nadaje się do ponownego wykorzystania. Dużym problemem jest jednak utylizacja zużytych baterii. Zużyte ogniwa można jednak wykorzystać jako magazyn energii lub mobilne banki energii. Uszkodzone baterie coraz częściej poddaje się recyklingowi, jednak jest on trudny, ze względu na dużą ilość zastosowanych materiałów i pierwiastków. Akumulator o masie 400 kilogramów składa się w 31,5% z obudowy, zazwyczaj wykonanej z aluminium. Prawie 18% masy baterii, czyli 71 kg stanowi grafit, z którego zbudowana jest anoda. Natomiast katoda zbudowana jest z takich pierwiastków jak: nikiel (ponad 10%, czyli 41 kg), mangan (12 kg), kobalt (9 kg) i litu (8 kg), miedź (ponad 5%). Wykorzystywane jest także tworzywo sztuczne (około 5%). Niecałe 10% stanowi ciekły elektrolit. Układy elektroniczne zabudowane w baterii stanowią około 9 kg jej masy, a stal to około 3 kg.

Ważnym problemem dotyczącym samochodów elektrycznych jest wycofanie takiego pojazdu z eksploatacji nawet po niewielkiej kolizji. Przyczyną tego jest możliwość uszkodzenia baterii oraz przewodów wysokiego napięcia. Takie uszkodzenie skutkować może wybuchem lub samozapłonem baterii. Podatne na to zjawisko są zwłaszcza baterie litowo-jonowe. Dowodem istnienia niebezpieczeństwa zwarcia wewnętrznego baterii są odnotowane pożary pojazdów występujące z czasowym opóźnieniem po przeprowadzonych testach zderzeniowych. W przypadku nawet niewielkiego naruszenia konstrukcji samochodu, należy

niezwłocznie wymontować baterie. Gdy nie jest to możliwe należy pozostawić pojazd w miejscu, w którym nie doszłoby do szkód w otoczeniu w przypadku powstania pożaru. Sygnałem, że bateria wykazuje uszkodzenie, które może prowadzić do samozapłonu jest jej temperatura wynosząca powyżej 70° C. Pożar baterii jest bardzo trudny, a czasami wręcz niemożliwy do ugaszenia. Powodem tego jest fakt, iż w składzie chemicznym materiałów użytych do budowy baterii znajduje się tlen. Stanowi on pewnego rodzaju zasób i wyklucza konieczność obecności tlenu z atmosfery w procesie spalania. Co za tym idzie odcięcie dopływu tlenu z atmosfery nie gwarantuje ugaszenia pożaru. Obecnie do gaszenia pożarów samochodów elektrycznych stosuje się na przykład kontenery z wodą, w której zanurza się płonący pojazd. W tym przypadku ugaszenie pożaru polega nie tyle na ograniczeniu dostępu tlenu z atmosfery co na schłodzeniu płonącej baterii. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie specjalnego kontenera nakładanego na płonący samochód w celu samoistnego jego dopalenia [3, 41-50].

3.9. Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych

Pojazdy zarówno z napędem konwencjonalnym, jak i z napędem alternatywnym są źródłem zanieczyszczeń. Pojazdy z napędem spalinowym emitują zanieczyszczenia związane z procesem spalania odbywającym się w jednostce napędowej. Pojazdy hybrydowe emitują spaliny w czasie jazdy z użyciem silnika spalinowego oraz przez ładowanie baterii koniecznych do napędzania silnika elektrycznego (emisje pochodzące z elektrowni). Pojazdy elektryczne nie emitują spalin bezpośrednio do atmosfery. Odbywa się to jednak podczas produkcji prądu potrzebnego do naładowania samochodu elektrycznego (emisje pochodzące z elektrowni).

Wszystkie pojazdy, bez względu na rodzaj zastosowanego napędu, emitują zanieczyszczenia związane z hałasem, drganiami, polem elektromagnetycznym, oraz z pyłami. W niniejszym rozdziale omówione zostały te właśnie zanieczyszczenia.

3.9.1. Emisja hałasu

Jedną z podstawowych emisji pochodzących od pracujących maszyn (w tym również od pojazdów) jest emisja hałasu. Jako hałas traktuje się każdy niepożądany, nieprzyjemny, dokuczliwy, szkodliwy dźwięk występujący w danym miejscu, czasie i okolicznościach. Dźwięk jest określany z wykorzystaniem ciśnienia akustycznego. Ciśnienie akustyczne określa zmienne w czasie odchylenie od średniej wartości ciśnienia statycznego panującego w ośrodku, występującego podczas rozchodzenia się fali akustycznej. Jednostką ciśnienia akustycznego

jest Pascal (Pa). Gdy porównuje się wielkości zmieniające się liniowo w szerokim zakresie używa się skali decybelowej.

Poziom dźwięku jest poziomem ciśnienia akustycznego skorygowanego według krzywej korekcji A. Krzywa ta ma na celu dostosowanie skali decybelowej do właściwości ucha ludzkiego przy niskich poziomach ciśnienia akustycznego. Jest najczęściej stosowana w pomiarach hałasu. Dźwięki o bardzo niskich i bardzo wysokich częstotliwościach ludzie słyszą słabiej niż dźwięki w zakresie częstotliwości od 800 Hz do 7 kHz. Krzywa korekcji B jest przeznaczona dla średnich poziomów ciśnienia akustycznego. Krzywa korekcji C odpowiada reakcji ucha na dźwięki o wysokich poziomach ciśnienia akustycznego. Krzywa D służy do pomiaru hałasu lotniczego, natomiast L to krzywa bez ważenia (liniowa) [51-56].

Do scharakteryzowania zjawisk akustycznych używany jest szereg wielkości fizycznych. Do podstawowych z nich zalicza się:

- poziom ciśnienia akustycznego,
- równoważny poziom dźwięku A,
- maksymalny poziom dźwięku A,
- równoważny poziom dźwięku C,
- szczytowy poziom dźwięku C.

Poziom ciśnienia akustycznego L to wielkość wyrażona w decybelach, wyznaczana według wzoru (1) [56]:

$$L = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie:

L – poziom ciśnienia akustycznego, dB,

p – zmierzona wartość skuteczna ciśnienia akustycznego, Pa,

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

Poziom dźwięku A jest to poziom ciśnienia akustycznego dźwięku, skorygowanego według charakterystyki częstotliwościowej zgodnej z krzywą korekcyjną A (2) [56]:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (2)$$

gdzie:

L_{Aeq} – równoważny ciągły poziom dźwięku skorygowany charakterystyką A, dB,

p – zmierzona wartość skuteczna ciśnienia akustycznego, Pa,

$p_A(t)$ – ciśnienie akustyczne skorygowane charakterystyką A, Pa,

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

T – czas pomiaru, s.

Maksymalny poziom dźwięku A jest to poziom maksymalnej wartości RMS ciśnienia akustycznego, skorygowanego według charakterystyki częstotliwościowej zgodnej z krzywą korekcyjną A (3) [56]:

$$L_{Amax} = 10 \log \left(\frac{p_{A_{RMS}}}{p_0} \right)^2 \quad (3)$$

gdzie:

L_{Amax} – maksymalny poziom dźwięku skorygowany charakterystyką A, dB,

$p_{A_{RMS}}$ – wartości RMS ciśnienia akustycznego A, Pa,

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

Poziom dźwięku C jest to poziom ciśnienia akustycznego dźwięku, skorygowanego według charakterystyki częstotliwościowej zgodnej z krzywą korekcyjną C (4) [56]:

$$L_{Ceq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_C^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (4)$$

gdzie:

L_{Ceq} – równoważny ciągły poziom dźwięku skorygowany charakterystyką C, dB,

$p_C(t)$ – ciśnienie akustyczne skorygowane charakterystyką C, Pa,

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

T – czas pomiaru, s.

Szczytowy poziom dźwięku C jest to poziom maksymalnej amplitudy ciśnienia akustycznego, skorygowanego według charakterystyki częstotliwościowej zgodnej z krzywą korekcyjną C (5) [56]:

$$L_{Cpeak} = 10 \log \left(\frac{p_{Cpeak}}{p_0} \right)^2 \quad (5)$$

gdzie:

L_{Cpeak} – szczytowy poziom dźwięku skorygowany charakterystyką C, dB,

p_{Cpeak} – maksymalna amplituda ciśnienia akustycznego C, Pa,

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

Dodatkowo wspomnieć należy, że przy opisie zjawisk akustycznych należy odnieść się do częstotliwości dźwięku. Rozróżnia się hałas infradźwiękowy o częstotliwościach do 16 Hz, hałas słyszalny w zakresie częstotliwości 16-16 000 Hz oraz hałas ultradźwiękowy o częstotliwościach powyżej 16 000 Hz.

W akustyce bardzo często stosowane są analizy oktauwowe i tercjowe. Uzasadnia to fakt, że częstotliwości pasm tych analiz zostały znormalizowane, co zapewnia możliwość porównania wyników. Dodatkowo, ucho ludzkie jest szczególnie czułe na dźwięki o niskiej częstotliwości niż o częstotliwości wysokiej, a szerokość pasm analizy oktauwowej i tercjowej mają stałą względną szerokość. Tony niskie o różnicy 10 Hz są wyraźnie rozróżniane (np. 30 Hz i 40 Hz), natomiast tony wysokie już nie (17 000 Hz i 17 010 Hz). Wydzielenie pasm o określonych częstotliwościach odbywa się z zastosowaniem filtrów. Proces filtracji usuwa wybrane częstotliwości z sygnału, pozostawiając tylko te pożądane. Analiza częstotliwości mierzonych sygnałów akustycznych w przypadku pomiarów hałasu drogowego powinna odbywać się w pasmach o szerokości 1/3 oktawy (z wykorzystaniem filtrów tercjowych). Filtry tercjowe mają stałą względną szerokość równą jednej trzeciej filtrów oktauwowych, dlatego często stosowana jest dla nich stosowna nazwa, tj. filtry 1/3 oktawy. Analiza tercjowa pozwala na uzyskanie bardziej szczegółowych informacji o widmie sygnału. Wymaga to przeprowadzenia większej ilości obliczeń. Wykres częstotliwościowy może zawierać 31 pasm. Częstotliwości środkowe filtrów wynoszą: 22,4; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1 000; 1 250; 1 600; 2 000; 2 500; 3 150; 4 000; 5 000; 6 300; 8 000; 10 000; 12 500; 16 000; 20 000. Warto wspomnieć, iż bardzo popularnym typem analizy jest dyskretna transformata Fouriera (DFT). W praktyce realizowana jest ona algorytmem szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Zakłada się stałą szerokość pasma częstotliwości (rozdzielczość) niezależnie od zakresu częstotliwości sygnału [53, 56, 57].

a) Efekty słuchowe i pozasłuchowe oddziaływania hałasu na człowieka

Odczuwanie hałasu jest subiektywne oraz zależy od odporności układu nerwowego, stanu psychicznego, czasu oddziaływania oraz rodzaju hałasu. Hałas występujący w środkach transportu działa negatywnie na narząd słuchu oraz na ośrodkowy układ nerwowy. Powoduje tzw. uraz akustyczny wywołujący reakcje obronne organizmu, które objawiają się zmianami rytmu oddychania i akcji serca, wzrostem ciśnienia tętniczego, zmianami krążenia i zakłóceniami perystaltyki jelit. Długie przebywanie w hałasie o wysokim poziomie natężenia przekraczającym wartości uznawane za bezpieczne może prowadzić do pogorszenia lub nawet utraty słuchu oraz choroby o podłożu nerwicowym. Hałas ten może powodować upośledzenie sprawności słuchu bez uszkodzeń anatomicznych czego skutkiem jest spadek ostrości słyszenia lub uszkodzenie struktur anatomicznych narządu słuchu (np. perforacje lub ubytki błony bębenkowej) prowadzące do pogorszenia słuchu aż do wystąpienia głuchoty [55, 56].

Infradźwięki odbierane są nie tylko przez narząd słuchu, ale także przez mechanoreceptory podobnie jak w przypadku drgań o niskich częstotliwościach. Skutkiem ich wpływu może być ból uszu, zmiany ciśnienia, zaburzenia pracy serca oraz drgania rezonansowe [57].

Ultradźwięki oddziałują na organizm w postaci mechanicznej (podobnie jak infradźwięki) oraz cieplnej. Wpływają negatywnie na układ nerwowy, proces przemiany materii oraz zaburzenia układu krążenia [53, 54].

Szczególnie szkodliwy jest hałas impulsowy, ponieważ jest to hałas nieustalony, składający się z jednego lub więcej zdarzeń dźwiękowych o czasie trwania około 1 s, a uszkodzenie słuchu zależne jest od szczytowego poziomu akustycznego [55-57].

Hałas można podzielić z wykorzystaniem wartości zrównoważonego poziomu dźwięku, mierzonego z filtrem korekcyjnym A [54-57]:

- poniżej 35 dB(A) – nie wpływa szkodliwie, lecz może być uciążliwy;
- 35-70 dB(A) – wpływa negatywnie na układ nerwowy, prowadzi do spadku wydajności pracy oraz utrudnionego wypoczynku;
- 70-80 dB(A) – może powodować bóle głowy i trwałe osłabienie słuchu;
- 85-130 dB(A) – może powodować liczne uszkodzenia słuchu oraz zaburzenia układu krążenia i nerwowego;
- 130-150 dB(A) – powoduje trwałe uszkodzenie słuchu, wywołuje drgania organów wewnętrznych co może wpływać na ich uszkodzenie;

- powyżej 150 dB(A) – oprócz wcześniej wymienionych zaburzeń może powodować mdłości, zaburzenia równowagi oraz ruchów kończyn, a nawet choroby psychiczne np. stany lękowe czy depresja.

Dyrektywa Rady 70/157/EWG z dnia 6 lutego 1970 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do dopuszczalnego poziomu hałasu i układu wydechowego pojazdów silnikowych określa limity poziomu hałasu pochodzącego z części mechanicznych i układów wydechowych pojazdów, do których mają zastosowania. Ograniczenia wynoszą od 74 dB(A) dla samochodów osobowych [53]. Według Rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne [54] wartość maksymalna dla L_{Aeq} wynosi 80 dB(A), dla L_{AFmax} wynosi 115 dB(A), natomiast dla L_{Cpeak} 135 dB(C). Pomiary emisji hałasu wewnątrz pojazdu określa norma ISO 5128. Norma ta opisuje metody pomiaru hałasu wewnątrz pojazdów, ale nie definiuje konkretnych dopuszczalnych poziomów. Stosowana jest głównie do porównań i oceny komfortu akustycznego oraz do badań producentów [55].

b) Hałas z użytkowania pojazdów samochodowych

Hałas komunikacyjny, obok zanieczyszczenia spalinami, uważany jest za jedno z bardziej uciążliwych zanieczyszczeń pochodzące z eksploatacji pojazdów. Podobnie jak w przypadku emisji spalin, emisja hałasu jest określona odpowiednimi normami. Pomiary hałasu są dokonywane nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale również w terenie [45-47]. Powstaje on poprzez pracę jednostki napędowej, układ odprowadzania spalin, powietrza opływającego pojazd podczas jazdy oraz hałas powstający od współpracy opony z nawierzchnią. Wprowadza to do analizy kolejne elementy, którymi jest rodzaj i bieżnik opony oraz nawierzchnia drogi. Nawierzchnie gładkie (np. asfaltowe i betonowe) są bardziej korzystne pod względem oceny akustycznej od nawierzchni chropowatych i bruku. Poruszające się z określoną prędkością po nawierzchni pojazdy, charakteryzują różnymi mocami akustycznymi, a więc hałas jest funkcją liczby pojazdów, ich rodzaju oraz drogi, po której jadą [52-58].

Samochody z napędem konwencjonalnym wytwarzają hałas pochodzący z pracy silnika spalinowego oraz układu wydechowego. Samochody elektryczne nie posiadają silnika spalinowego, a zatem układów dolotowego i wydechowego, więc hałas jest głównie wywołany przez zmienne siły elektromagnetyczne towarzyszące zmianie energii elektrycznej w mechaniczną [54-56]. W przypadku samochodów z napędem hybrydowym źródła hałasu są

takie same jak w przypadku wspomnianych wcześniej pojazdów. Wszystkie pojazdy z napędem zarówno konwencjonalnym, jak i alternatywnym emitują hałas pochodzący ze współpracy opon z nawierzchnią oraz od powietrza opływającego nadwozie (hałas aerodynamiczny).

Duży wpływ ma także częstotliwość hałasu emitowanego przez samochody spalinowe i elektryczne. Różni się ona znacznie ze względu na różne źródła dźwięku. Hałas generowany przez silniki spalinowe wytwarza dźwięki o szerokim zakresie częstotliwości, zazwyczaj od około 20 Hz do 10 kHz. Największy poziom natężenia hałasu może występować w zakresie od 100 Hz do 1 kHz, z wyraźnymi pikami w niższych częstotliwościach związanych z pracą silnika i drganiami. Przy biegu jałowym i niskich prędkościach dźwięk oscyluje w przedziale 50-400 Hz. W samochodach elektrycznych hałas zazwyczaj mieści się w zakresie od 20 Hz do 4 kHz, z dominującymi częstotliwościami często poniżej 1 kHz. System AVAS emituje częstotliwości w zakresie od 300 Hz do 5 kHz [58-60].

Literatura sugeruje, że hałas w samochodach z silnikiem elektrycznym jest niższy niż w przypadku samochodów z silnikiem spalinowym podczas jazdy z prędkością do 20 km/h. Podczas jazdy z prędkością powyżej 30 km/h różnica wpływu hałasu w stosunku do samochodów z konwencjonalnym napędem zanika. Wynika to z faktu, iż hałas pochodzący ze współpracy opona-droga oraz hałas aerodynamiczny są głównymi źródłami hałasu. Współczesne silniki spalinowe nie są głośne, więc podczas jazdy mogą być niesłyszalne przez zagłuszające je opony. Aspekty te dotyczą emisji hałasu do otoczenia. Ważnym aspektem jest także emisja hałasu oddziałującego na kierowcę i pasażerów. W tym przypadku duże znaczenie ma wygłuszenie samochodu, które zależy od klasy wykonania pojazdu [54, 57-61].

Ze względu na niski poziom hałasu przy niskich prędkościach w samochodach z napędem elektrycznym przy prędkości do 20 km/h pojazdy te posiadają system AVAS (z angielskiego Acoustic Vehicle Alerting System). System ten emituje dźwięki informujące przechodniów o nadjeżdżającym pojeździe. AVAS automatycznie wytwarza dźwięk przy minimalnym zakresie prędkości pojazdu, od uruchomienia do około 20 km/h, oraz podczas cofania. W przypadku pojazdów wyposażonych w dźwiękowy sygnalizator cofania system AVAS nie musi wytwarzać dźwięku podczas cofania. Poziom dźwięku wytwarzany przez system nie może przekraczać przybliżonego poziomu dźwięku pojazdu kategorii M1 wyposażonego w silnik spalinowy i działającego w takich samych warunkach. System ten emituje dźwięk o wartości od 56 dB do 75 dB i częstotliwości w zakresie od 300 Hz do 5000 Hz, w zależności od prędkości i warunków jazdy. Przy niskich prędkościach (do około 30 km/h), AVAS emituje dźwięki o dominujących częstotliwościach 300-1000 Hz. Jest on obowiązkowym wyposażeniem każdego samochodu elektrycznego oraz hybrydowego sprzedawanego na

terenie Unii Europejskiej od 1 lipca 2021 roku [59-63]. Nakaz ten reguluje rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady nr 540/2014 w odniesieniu do wymogów dotyczących dźwiękowego systemu informującego o pojeździe na potrzeby homologacji typu UE pojazdu z dnia 26 czerwca 2017 roku [59, 61].

3.9.2. Emisja drgań

Hałas i drgania mechaniczne towarzyszą eksploatacji pojazdów. Drgania to proces, w którym wielkości fizyczne są zmienne w funkcji czasu. Podstawowymi wielkościami opisującymi drgania mechaniczne są przemieszczenie, prędkość drgań oraz przyspieszenie drgań. Do oceny wpływu drgań mechanicznych na organizm, najczęściej używa się wartości przyspieszenia drgań. Sygnał drganiowy może zawierać jedną składową o określonej częstotliwości (drgania sinusoidalne). Najczęściej jednak występują drgania złożone, składające się z wielu składowych sinusoidalnych [54, 57].

Chwilowa wartość przyspieszenia drgań określona jest zależnością (6) [54]:

$$a = a_{Peak} \sin\left(2\pi \frac{f}{T}\right) \quad (6)$$

gdzie:

a_{Peak} – szczytowa wartość przyspieszenia, m/s^2 ,

t – czas, s,

T – okres drgań, s,

f – częstotliwość, Hz.

Wartość skuteczna przyspieszenia drgań określona jest wzorem (7) [54]:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (7)$$

gdzie:

a_{RMS} – wartość skuteczna przyspieszenia, m/s^2 ,

a – wartość chwilowa przyspieszenia, m/s^2 ,

T – okres drgań, s.

Pozyskiwanie danych wibracyjnych jest tylko częścią wyzwania pomiaru drgań. Druga część to analiza uzyskanych danych. Ważne jest przy tym zrozumienie rodzajów charakterystyk czasowych i częstotliwościowych związanych z analizą drgań. Analiza drgań rozpoczyna się od zmieniającego się w czasie sygnału rzeczywistego z przetwornika.

Ze względu na oddziaływanie drgań na organizm ludzki można podzielić je na drgania miejscowe oraz drgania ogólne. Drgania miejscowe przenoszone są przez kończyny górne np. podczas ujmowania kierownicy, drążków sterujących, dźwigni itp. Mogą one prowadzić do schorzeń układu nerwowego i kręcenia w kończynach górnych. Drgania ogólne odnoszą się do drgań przekazywanych na całe ciało np. przez kończyny dolne w pozycji stojącej, przez siedzisko w pozycji siedzącej oraz przez bok w pozycji leżącej. Drgania te mogą prowadzić do dolegliwości zdrowotnych, takich jak bóle kręgosłupa, zmęczenie oraz zaburzenia równowagi. Ograniczenie narażenia na drgania ogólne wymaga stosowania odpowiednich siedzeń amortyzujących oraz dbałości o ergonomiczne środowisko pracy, minimalizujące negatywne skutki drgań mechanicznych.

Przy ocenie wpływu drgań na organizm ludzki ważnym aspektem jest długość ekspozycji na drgania (ekspozycja krótkotrwałą – do 3 min, ekspozycja dzienna – odniesiona do 8-godzinne go dnia pracy).

Na podstawie otrzymanych z pomiarów skutecznych wartości ważonych przyspieszeń drgań, mierzonych we wszystkich kierunkach (x, y, z) w ocenie wpływu drgań miejscowych na człowieka wyznaczana jest wartość postaci sumy wektorowej skutecznych przyspieszeń drgań. Dla ekspozycji krótkotrwałej określa się ją zgodnie ze wzorem (8), natomiast dla ekspozycji dziennej (8-godzinny tryb pracy) określa się wzorem (9):

$$a_{hvi} = \sqrt{a_{hwx i}^2 + a_{hwy i}^2 + a_{hwz i}^2} \quad (8)$$

gdzie:

$a_{hwx i}^2, a_{hwy i}^2, a_{hwz i}^2$ – skuteczne wartości ważne przyspieszenia drgań, m/s^2 ,

a_{hwi} – wartość sumy wektorowej skutecznych ważonych przyspieszeń drgań, m/s^2 .

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{hwi}^2 \cdot t_i} \quad (9)$$

gdzie:

$a_{hwx i}^2, a_{hwy i}^2, a_{hwz i}^2$ – skuteczne wartości ważne przyspieszenia drgań, m/s^2 ,

n – liczba czynności wykonywanych w narażeniu na drgania,

i – numer kolejnej czynności wykonywanej w narażeniu na drgania,
 a_{hwi} – wartość sumy wektorowej skutecznych ważonych przyspieszeń drgań, m/s^2 .
 t_i – czas wykonywania czynności, s,
 T – 480 minut (czas odniesienia - 8 godzin).

W kontekście wpływu drgań ogólnych na człowieka na podstawie wartości wyników pomiarów uzyskanych dla 3 kierunków pomiarowych (x, y i z) wyznaczana jest składowa dominująca. Oznacza to, że późniejsze wskaźniki określa się dla jednej dominującej wartości. Dla ekspozycji krótkotrwałej określa się zgodnie ze wzorem (10), natomiast dla ekspozycji dziennej (8-godzinny tryb pracy) określa się wzorem (11):

$$a_{wmax} = \max\{a_{wl1}, a_{wl2}, \dots a_{wln}\} \quad (10)$$

gdzie:

a_{wln} – skuteczne, skorygowane przyspieszenia drgań wyznaczone dla kierunku l z uwzględnieniem właściwych współczynników kierunkowych ($1,4a_{wxi}$, $1,4a_{wyi}$, $1a_{wzi}$), m/s^2 ,
 a_{max} – maksymalna wartość sumy wektorowej skutecznych ważonych przyspieszeń drgań, m/s^2 .

$$A(8)_l = k_l \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{wli}^2} \cdot t_i \quad (11)$$

gdzie:

n – liczba wykonywanych czynności w narażeniu na drgania,
 i – numer czynności wykonywanej w narażeniu na drgania,
 l – kierunek drgań (x, y lub z),
 k_l - współczynnik kierunkowy ($1,4k_x$, $1,4k_y$, $1k_z$),
 t_i – czas wykonywania i-tej czynności,
 a_{wln} – skuteczne, skorygowane przyspieszenia drgań wyznaczone dla kierunku l z uwzględnieniem właściwych współczynników kierunkowych ($1,4a_{wxi}$, $1,4a_{wyi}$, $1a_{wzi}$), m/s^2 .

Interpretacja danych dotyczących drgań w dziedzinie czasu (amplituda wykreślona w funkcji czasu) jest ograniczona do kilku parametrów w określaniu poziomu drgań (amplitudy, wartości szczytowej i wartości skutecznej - RMS), które są identyfikowane w przebiegu

sinusoidalnym. Wartość RMS jest na ogół najbardziej użyteczna, ponieważ jest bezpośrednio związana z poziomem energii drgań. Wibracja jest ruchem oscylacyjnym, więc większość analiz drgań ma na celu określenie prędkości tej oscylacji lub jej częstotliwości. Liczba wystąpień pełnego cyklu ruchu w okresie jednej sekundy jest częstotliwością drgań i określana jest w Hz. W przypadku prostych fal sinusoidalnych częstotliwość drgań można określić na podstawie obserwacji przebiegu w dziedzinie czasu. Natomiast w przypadku, gdy sygnał drganiowy zawiera różne składowe częstotliwości, analiza widma jest odpowiednim sposobem do scharakteryzowania sygnału drganiowego. W celu prawidłowego określenia widma częstotliwościowego stosuje się próbkowanie sygnału. Jest to liczba próbek pobranych w czasie 1 sekundy (częstotliwość próbkowania). Im wyższa częstotliwość próbkowania, tym dokładniejszy sygnał jest zapisany. Należy jednak pamiętać, iż zwiększanie częstotliwości próbkowania sygnału ma swoje ograniczenia. Wynikają one z nieodwracalnego zniekształcenia sygnału w procesie próbkowania. Maksymalna częstotliwość składowych widmowych sygnału poddawanego procesowi próbkowania, które mogą zostać odtworzone z ciągu próbek bez zniekształceń nazywana jest częstotliwością Nyquista. Składowe widmowe o częstotliwościach wyższych od częstotliwości Nyquista ulegają podczas próbkowania nałożeniu na składowe o innych częstotliwościach (zjawisko aliasingu), co powoduje zniekształcenie sygnału.

Cyfrowe sygnały mogą być analizowane w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie częstotliwości. Algorytmy działające w dziedzinie czasu operują bezpośrednio na próbkach cyfrowego sygnału. Analiza częstotliwościowa sygnału, stosowana w wielu operacjach cyfrowego przetwarzania sygnałów, polega na przekształceniu sygnału z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości. Widmo sygnału to reprezentacja częstotliwościowa sygnału, często mówi się więc o analizie widmowej [54, 56, 57, 63-65].

Jean-Baptiste Joseph Fourier odkrył, że dowolny sygnał okresowy można przedstawić w postaci sumy sygnałów trygonometrycznych (sinusów i cosinusów) o różnych amplitudach i częstotliwościach, czyli szeregu Fouriera. Operację przekształcenia sygnału z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości nazywa się przekształceniem (transformacją) Fouriera. Wynik tej operacji, czyli częstotliwościową reprezentację sygnału, nazywa się transformatą Fouriera. W analizie drgań stosuje się transformatę Fouriera, aby przekształcić sygnał czasowy $f(t)$ na jego reprezentację w dziedzinie częstotliwości $F(\omega)$. W dziedzinie częstotliwości można łatwiej identyfikować charakterystyczne częstotliwości, które mogą odpowiadać pewnym trybom drgań obiektu, błędom lub zakłóceniom. Podstawowy wzór na transformatę Fouriera wygląda następująco (12) [56, 57, 66]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (12)$$

gdzie:

$F(\omega)$ – transformata Fouriera funkcji w dziedzinie częstotliwości,

$f(t)$ – sygnał czasowy,

ω – pulsacja (częstotliwość kątowna), R/s,

t – zmienna czasu, s,

i – jednostka urojona (czyli $i^2 = -1$).

Transformata Fouriera jest bardzo użyteczna jednak wymaga wykonania wielu operacji dla każdego punktu sygnału. Dlatego często stosuje się szybką transformację Fouriera (FFT – Fast Fourier Transform). Jest algorytmem, który znacznie przyspiesza obliczenie transformaty Fouriera, redukując czas potrzebny na uzyskanie wyniku.

FFT jest przydatna w zastosowaniach takich jak przetwarzanie sygnałów, analiza drgań mechanicznych oraz kompresja danych. W analizie drgań szczególnie interesująca jest możliwość wyznaczenia głównych częstotliwości drgań, amplitud składowych harmonicznym oraz faz, co jest istotne na przykład przy diagnostyce maszyn wirujących [56, 57, 66].

a) Efekty oddziaływania drgań na człowieka

Pierwsze informacje na temat negatywnych skutków drgań pojawiły się w 1910 roku i dotyczyły szkodliwego oddziaływania drgań w zależności od przyspieszenia. W 1955 roku Andrejewa-Gałanina sklasyfikowała negatywne oddziaływanie drgań jako jednostkę chorobową – zespół wibracyjny [56].

Drgania mechaniczne których pasmo częstotliwościowe zawiera się w przedziale 0,1 – 100 Hz wpływają niekorzystnie na organizm człowieka. Dzieli się je na wstrząsy (zmiany położenia, na które organizm reaguje czynnie) oraz drgania (organizm reaguje biernie poprzez układ nerwowy i narządy). Ekspozycja na drgania może być krótkotrwała, w której negatywne skutki funkcjonalne znikają po ustaniu drgań oraz długotrwała, powodująca skutki chorobowe.

Krótkotrwałe przebywanie w środowisku drgań może powodować dyskomfort funkcjonalny (np. choroba lokomocyjna), rozdrażnienie, nadmierne zmęczenie, bezsenność oraz zakłócenie koordynacji ruchów. Wyniki badań pokazują, iż przekroczenie $0,25 \text{ m/s}^2$

wartości skutecznej przyspieszenia drgań niskoczęstotliwościowych w zakresie 0,1-0,315 Hz w kierunku pionowym wywołuje niepożądane objawy [66-69].

Długotrwałe przebywanie w środowisku drgań może powodować zaburzenia pracy narządów oraz ośrodków nerwowych. Pojawiają się stany ogólnego zmęczenia, zmniejszenie sprawności, a także zmniejszona wydolność psychofizyczna. Dochodzi do zaburzeń układu kostnego i stawowego w odcinku szyjnym i lędźwiowym oraz stawów barkowych, biodrowych i kolanowych. W konsekwencji może to powodować bóle mięśni, stawów i dolegliwości kręgosłupa we wszystkich jego odcinkach. Dużym niebezpieczeństwem są drgania o częstotliwościach odpowiadającym częstotliwościom drgań własnych narządów wewnętrznych, które mogą wzbudzać drgania rezonansowe narządów, zaburzające chwilowe funkcjonowanie organizmu. Drgania wpływają mechanicznie na gałki oczne powodując przesuwanie się obrazu w siatkówce oka, co objawia się wrażeniem rozmazanego obrazu, pogorszenie ostrości widzenia oraz trudności w zlokalizowaniu obiektów w przestrzeni [70-75].

Norma ISO 2631-1:1997 określa poziomy komfortu w zależności od wartości przyspieszenia drgań w m/s^2 [54, 56]:

- komfortowo – poniżej 0,315,
- nieznacznie niekomfortowo – od 0,315 do 0,63,
- dość niekomfortowo – od 0,5 do 1,
- niekomfortowo – od 0,8 do 1,6,
- bardzo niekomfortowo – od 1,25 do 2,5,
- ekstremalnie niekomfortowo – powyżej 2.

Wartości dopuszczalne drgań mechanicznych na stanowisku pracy określone zostały w Rozporządzeniu Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dla drgań ogólnych wartości te wynoszą $3,2 \text{ m/s}^2$ dla ekspozycji krótkotrwałej oraz $0,8 \text{ m/s}^2$ podczas ekspozycji dziennej [54].

b) Drgania z użytkowania pojazdów samochodowych

W eksploatacji pojazdów największy wpływ na drgania podczas jazdy ma współpraca koła jezdnego z nawierzchnią. Dodatkowo pojawiają się drgania pochodzące od układu napędowego i jednostki napędowej. Czynniki wzbudzające drgania to zmiana sił kontaktowych

między kołem pojazdu a nawierzchnią, reakcja poruszającego się pojazdu na zmiany geometryczne nawierzchni, reakcja pojazdu na nierówności oraz chwilowe stany odrywania się koła od jezdni (jeśli występują), siły pochodzące od niewyrównoważenia kół, a także siła oporu powietrza powstająca podczas ruchu pojazdu [57, 72-75].

Drgania generowane podczas jazdy samochodem przenoszone są na człowieka przez siedzisko oraz podest (drżania ogólne), a także przez elementy sterownicze, takie jak koło kierownicy (drżania miejscowe). Wymuszenia są przekazywane przez zawieszenie na nadwozie pojazdu, następnie na fotele kierowcy oraz pasażerów. Siedzisko powinno więc zapewniać odpowiedni komfort oraz ograniczać wpływ drgań mechanicznych na człowieka [54, 69, 71].

Drgania emitowane przez pojazd spalinowy wydają się być większe niż w przypadku pojazdu elektrycznego, ponieważ posiadają dodatkowy czynnik generujący drżania w postaci silnika spalinowego, a także skrzynkę biegów oraz układ wydechowy. Uważa się, że w pojazdach elektrycznych drżania te są zdecydowanie mniejsze ze względu na brak silnika spalinowego oraz innych układów i elementów wirujących, które emitują drżania. W przypadku pojazdów z napędem hybrydowym źródła drgań są takie same jak w przypadku pojazdów spalinowych i elektrycznych. Inaczej wygląda jednak kwestia emisji drgań podczas jazdy. Drgania te powstają w wyniku pracy układu zawieszenia, amortyzacji oraz współpracy opony z nawierzchnią. Zależą one głównie od rodzaju i wykonania, a także zużycia elementów zawieszenia, wyrównoważenia kół oraz od rodzaju opon i stanu nawierzchni [73, 74].

Częstotliwości drgań emitowanych przez silniki elektryczne i spalinowe różnią się w zależności od ich konstrukcji, prędkości obrotowej wałów oraz rodzaju pracy. Silniki spalinowe mogą emitować drżania w szerokim zakresie częstotliwości, zwykle od kilku Hz do kilku kHz. Niższe częstotliwości (około 10-100 Hz) są związane z drżaniami silnika, które wynikają z pracy jednostki napędowej. Wyższe częstotliwości (do kilku kHz) mogą występować w wyniku różnych procesów np. drżania układu wydechowego. Częstotliwość drgań spowodowana jest również częstotliwością zapłonu w silnikach spalinowych. Wynosi ona zazwyczaj od 30-100 Hz w zależności od liczby cylindrów. Silniki elektryczne również emitują drżania w zakresie od kilku Hz do kilku kHz, ale mają inne charakterystyki. Częstotliwość drgań przy pracy silnika elektrycznego zasilanego prądem zmiennym jest związana z częstotliwością parametrów jego zasilania. Ponadto, drżania silnika elektrycznego mogą być generowane w wyniku wyrównoważenia jego wału. Drgania te mają częstotliwość w zakresie od około 20 Hz do około 1 kHz [71].

Warto wspomnieć, że przy ograniczeniu poziomu drgań celem jest uzyskanie wartości mniejszej niż wartości dopuszczalne ze względu na ochronę zdrowia i życia człowieka. Nieuzasadniona jest przy tym najczęściej całkowita eliminacja drgań, ponieważ sygnał drganiowy niesie za sobą informację o stanie pracy maszyny, które są istotne dla operatora. Takie podejście leżało u podstaw działań firm Hyundai i Kia. Firmy te złożyły w Stanach Zjednoczonych wnioski patentowe opisujące mechanizm generowania drgań, który miałby znaleźć zastosowanie w samochodach elektrycznych. Poziom drgań generowanych przez wspomniany mechanizm zależałoby od położenia pedału przyspieszenia. Podstawą tego pomysłu był fakt, iż ludzkie ciało odbiera sygnały z otoczenia na różne sposoby. Na przykład drgania odczuwalne przez kierowcę w samochodzie spalinowym informują go o prędkości obrotowej wału silnika [76].

3.9.3. Emisja pola elektromagnetycznego

Pole elektromagnetyczne (zwane również promieniowaniem elektromagnetycznym) określane w skrócie jako PEM jest to efekt działania pól elektrycznych i magnetycznych.

Pole elektryczne jest to pole wytwarzane w otoczeniu naładowanego przewodnika. Natężenie pola elektrycznego wyrażone jest w woltach na metr (V/m). Natomiast pole magnetyczne jest to stan przestrzeni, w której siły działają na poruszające się ładunki elektryczne, a także na ciała mające moment magnetyczny niezależnie od ich ruchu. Natężenie pola magnetycznego wyraża się w amperach na metr (A/m) [77]. Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego przedstawiają wzory (13, 14) [77]:

$$E = f(U) \quad (13)$$

$$H = f(I) \quad (14)$$

gdzie:

I – natężenie prądu, A,

U – napięcie, V,

E – natężenie pola elektrycznego, V/m,

H – natężenie pola magnetycznego, A/m.

Pole magnetyczne jest przejawem pola elektromagnetycznego o częstotliwościach w przedziale od 0 Hz (pola stałe) do 300 GHz (promieniowanie mikrofalowe). Powyżej górnej granicy wskazanego zakresu wyróżnia się promieniowania: podczerwone, widzialne, nadfioletowe, rentgenowskie, gamma oraz promieniowanie kosmiczne. Pola elektromagnetyczne dzielą się na naturalne oraz te wytwarzane sztucznie. Naturalne pola magnetyczne związane są ze zjawiskami występującymi w atmosferze (np. wyładowania podczas burzy), z kolei pola wytwarzane sztucznie są przejawem działalności człowieka. Mogą się one różnić długością fali, częstotliwością [77].

Do scharakteryzowania pól magnetycznych małych częstotliwości stosowana jest często wielkość alternatywna dla natężenia pola magnetycznego - indukcja magnetyczna wyrażona w teslach (T). Indukcję magnetyczną przedstawia wzór (15) [77]:

$$B = \mu H \quad (15)$$

gdzie:

B – indukcja magnetyczna, μT ,

μ – przenikalność magnetyczna, $T \cdot m/A$,

H – natężenie pola magnetycznego, A/m .

Gęstość mocy jest to moc na jednostkę powierzchni w stosunku do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Wyraża się ją w watach na metr kwadratowy (W/m^2). Gęstość mocy przedstawia wzór (16) [77]:

$$S = E \cdot H \quad (16)$$

gdzie:

S – gęstość mocy, W/m^2 ,

E – natężenie pola elektrycznego, V/m ,

H – natężenie pola magnetycznego, A/m .

Promieniowanie jonizujące oznacza, że pole elektromagnetyczne posiada wystarczającą ilość energii, aby zakłócić strukturę atomu, poprzez wytrącenie elektronu jednocześnie przemieniając neutralny atom w dodatnio naładowany jon. Przykładem takiego promieniowania jest promieniowanie rentgenowskie.

Promieniowanie niejonizujące nie posiada tyle energii, by stworzyć jony, dlatego przez wiele lat było uważane za nieszkodliwe. Promieniowanie to towarzyszy pracy urządzeń zasilanych prądem elektrycznym, a więc obecne jest przy pracy silnika elektrycznego oraz wokół przewodów doprowadzających energię elektryczną z baterii do silnika [77]. Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym ICNIRP ma na celu ochronę ludzi i środowiska przed niekorzystnymi skutkami promieniowania niejonizującego. W tym celu ICNIRP opracowuje i rozpowszechnia naukowe wytyczne dotyczące ograniczania narażenia na promieniowanie niejonizujące [78].

Statyczne pola elektryczne są polami stałymi, które nie zmieniają wartości i kierunku w czasie, w przeciwieństwie do pól przemennych o niskiej i wysokiej częstotliwości. Stąd statyczne pola elektryczne mają częstotliwość 0 Hz. Wywierają siłę na ładunki lub naładowane cząstki. Natężenie statycznego pola elektrycznego wyraża się w woltach na metr (V/m). Siła naturalnego pola elektrycznego w atmosferze waha się od około 100 V/m do kilku tysięcy V/m. Źródłami statycznych pól elektrycznych są separacja ładunków na przykład w wyniku tarcia. Linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia prądu stałego mogą wytwarzać statyczne pola elektryczne o wartości 20 kV/m i więcej [77].

Statyczne pola elektryczne nie przenikają do ciała człowieka ze względu na jego wysoką przewodność. Pole elektryczne indukuje powierzchniowy ładunek elektryczny, który można dostrzec (oddziaływanie z włosami na ciele, wyładowania iskrowe). Próg percepcji u ludzi zależy od różnych czynników i może wynosić od 10 do 45 kV/m.

Badania laboratoryjne na zwierzętach i ludziach, w których oceniano skutki narażenia na statyczne pola elektryczne, nie dostarczyły dowodów na niekorzystne skutki zdrowotne. Jedynym ustalonym skutkiem zdrowotnym jest możliwy dyskomfort spowodowany przez wyładowania elektryczne w tkankach ciała [77].

Statyczne pola magnetyczne są polami stałymi, które nie zmieniają wartości ani kierunku w czasie, w przeciwieństwie do pól przemennych o niskiej i wysokiej częstotliwości. Dlatego mają częstotliwość 0 Hz. W naturze pole geomagnetyczne Ziemi wywiera siłę, która umożliwia np. działanie kompasu. Znacznie silniejsze pola są generowane przez niektóre rodzaje sprzętu przemysłowego i medycznego, na przykład urządzenia do obrazowania metodą rezonansu magnetycznego (MRI).

Siła gęstości statycznego strumienia magnetycznego jest wyrażana w teslach (T). Siła naturalnego pola geomagnetycznego waha się od około 30 do 70 μ T. Magnesy mają siłę rzędu kilkudziesięciu militesli. Natomiast pola sprzętu MRI wahają się od 1,5 do nawet 10 T.

Istnieje kilka znanych mechanizmów, za pomocą których statyczne pola magnetyczne mogą wpływać na systemy biologiczne. Pola magnetyczne nie tylko wywierają siły fizyczne na przedmioty metalowe, ale także na poruszające się ładunki elektryczne. Jeśli chodzi o funkcjonowanie biologiczne, narażenie na statyczne pola magnetyczne wpłynie na naładowane elektrycznie cząsteczki i komórki we krwi podczas poruszania się w polu magnetycznym. Siła magnetyczna może przyspieszyć lub zmniejszyć ruch wrażliwych cząstek. Przykładem jest zmniejszenie prędkości krwinek przepływających przez naczynia krwionośne. Kolejnym mechanizmem są złożone interakcje elektronowe, które mogą wpływać na prędkość określonych reakcji chemicznych.

Tylko wtedy, gdy ludzie są narażeni na silne pola magnetyczne, takie jak te generowane przez sprzęt do rezonansu magnetycznego lub w niektórych wyspecjalizowanych placówkach badawczych, wystąpią odczuwalne skutki dla organizmu człowieka. Pola o natężeniu 3 T lub wyższym mogą wywoływać przejściowe odczucia, takie jak zawroty głowy i nudności. Wynikają one z generowania małych prądów elektrycznych w narządzie równowagi ucha. Prądy generują sygnały do mózgu, które dostarczają informacji innych niż te uzyskane za pomocą wzroku, co powoduje uczucie zawrotów głowy i nudności. Efekty te same w sobie nie są niekorzystnymi skutkami zdrowotnymi, ale mogą zaburzać normalne funkcjonowanie [77-81].

Pole elektromagnetyczne o niskiej częstotliwości (LF) oznacza zmienne w czasie pola elektryczne i magnetyczne o niskiej częstotliwości, które obejmują zakres częstotliwości od 1 Hz do 100 kHz. Pola LF mają dwie składowe: pole elektryczne spowodowane ładunkiem elektrycznym i powiązane pole magnetyczne. Pola magnetyczne występują tylko wtedy, gdy płynie prąd elektryczny. Pola elektromagnetyczne o niskiej częstotliwości są związane głównie z zasilaniem energią elektryczną poprzez wytwarzanie, dystrybucję i wykorzystanie prądu przemiennego (AC). Częstotliwość sieci energetycznej wynosi zwykle 50 lub 60 Hz, w zależności od kraju. Ludzie są narażeni na pola LF wokół urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Linie energetyczne są również źródłem pól LF.

Narażenie na pola LF powoduje, że wewnątrz ciała generowane są pola elektryczne i prądy, które mogą zakłócać własne pola elektryczne i przepływy prądu w ciele związane z normalnym funkcjonowaniem biologicznym. Ponadto pole elektryczne LF oddziałuje z ładunkiem powierzchniowym ciała. Przy niskich poziomach interakcje te pozostają w większości niezauważone i nie zagrażają zdrowiu. Powyżej pewnego poziomu ekspozycji, indukowane pola wewnętrzne wywołują skutki dla komórek w ciele, takie jak słabe migotanie

światła na obrzeżach pola widzenia lub pobudzenie nerwów i mięśni odczuwane jako uczucie mrowienia.

Wyniki badań sugerują, że długotrwała ekspozycja na pola magnetyczne o częstotliwości 50-60 Hz może być związana ze zwiększonym ryzykiem białaczki u dzieci oraz może prowadzić do rozwinięcia choroby nowotworowej u dorosłych. Nie ma jednak istotnych dowodów naukowych na związek między ekspozycją na LF a chorobą Parkinsona, stwardnieniem rozsianym, czy też rozwojem chorób sercowo – naczyniowych, podczas gdy w przypadku choroby Alzheimera dowody nie są rozstrzygające. Badania jakości snu oraz funkcji poznawczych nie dostarczyły spójnych dowodów na wpływ tego rodzaju narażenia [77-81].

Pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej (RF) to termin używany do opisanie części widma elektromagnetycznego obejmującego zakres częstotliwości od 100 kHz do 300 GHz. W tym zakresie częstotliwości pola elektryczne i magnetyczne, które razem tworzą pola elektromagnetyczne, są ze sobą powiązane i uwzględniane łącznie w pomiarach. Pola elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości są wykorzystywane w różnych technologiach, najczęściej do celów komunikacyjnych (np. telefony komórkowe, Wi-Fi, 5G, radio, telewizja), a także w medycynie (np. obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego), do celów grzewczych (np. kuchenki mikrofalowe) oraz do bezprzewodowego przesyłania energii.

Po latach badań pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej nad potencjalnymi skutkami zdrowotnymi mającymi znaczenie dla zdrowia i bezpieczeństwa ludzi jest nagrzewanie tkanek. Pola RF mogą wnikać w ciało i powodować wibracje naładowanych lub polarnych cząsteczek wewnątrz. Ciało ludzkie może przyjąć niewielki wzrost temperatury. Dzieje się tak, ponieważ organizm ludzki ma silną zdolność do regulowania temperatury wewnętrznej. Jednak powyżej pewnego poziomu w zależności od czasu trwania narażenia, narażenie na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej i towarzyszący mu wzrost temperatury może wywołać poważne skutki zdrowotne, takie jak uszkodzenie tkanek. Przeprowadzono badania dotyczące skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej, a skutkami zdrowotnymi. Wykazały one dolegliwości takie jak bóle głowy, trudności z koncentracją, pogorszenie jakości snu, negatywny wpływ na układ sercowo – naczyniowy itp. Konsekwentnie obserwowanym odkryciem jest także niewielki wpływ na aktywność mózgu mierzoną za pomocą elektroencefalografii (EEG). Przeprowadzono szeroko zakrojone badania dotyczące narażenia na pola elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej stosowane w szczególności w telefonii komórkowej [77-81].

a) Efekty oddziaływania pola elektromagnetycznego na człowieka

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizm może powodować stymulację tkanki pobudliwej na skutek indukowania w ciele prądów elektrycznych. Największe znaczenie zjawisko to ma przy częstotliwościach niższych od kilkuset kHz. Ponadto ma miejsce ogrzewanie tkanek powodowane pochłanianiem energii pól (tzw. efekt termiczny), a najistotniejsze jest występowanie tego zjawiska przy częstotliwości powyżej 1 MHz. Także poruszanie się w polu elektromagnetycznym może powodować m.in. zawroty głowy, nudności i utrudnioną koordynację wzrokowo-ruchową. Ustają one po oddaleniu się od źródła. Skutkiem oddziaływania pola elektromagnetycznego mogą być niepożądane zmiany funkcjonowania organizmu. Wyniki badań naukowych wskazują, że do możliwych skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego należy zaliczyć: zaburzenia układu nerwowego i sercowo-naczyniowego oraz odpornościowego, procesy nowotworowe oraz dolegliwości subiektywne, takie jak bóle głowy, zmęczenie, i zaburzenia pamięci. U ludzi mieszkających w pobliżu linii przesyłowych, generatorów elektryczności i podobnych urządzeń zakłócających odnotowuje się dużą liczbę schorzeń. Badania przeprowadzone w 1979 roku przez fizyka Eda Leepera ukazały, że u dzieci narażonych na działanie zaledwie $0,3 \mu\text{T}$ dwukrotnie częściej występowała białaczka. W 1998 roku badanie to zostało powtórzone przez Departament Zdrowia stanu Nowy Jork i potwierdziło wyniki badania poprzedniego [79-86].

Badania wykazują, że próg ochronny bezpośredniego oddziaływania pola elektrycznego prądu przemiennego nie powinien przekraczać 5 V/m z potencjałem uziemienia oraz $1,5 \text{ V/m}$ bez potencjału uziemienia. Emisja pola magnetycznego prądu przemiennego nie powinna przekraczać $0,1 \mu\text{T}$. [86-89].

W 1960 roku swoje badania nad wpływem częstotliwości mikrofalowych rozpoczął dr Allan Frey. Interesował go wpływ pola elektromagnetycznego na funkcje mózgu. Prowadził badania na temat słyszalności dźwięków emitowanych przez radary. Pierwsze takie dźwięki słyszeli już operatorzy radarów podczas drugiej Wojny Światowej. Badania potwierdziły, że dźwięki wydawane przez radar nie były rejestrowane przez ucho, a przez mózg. Zjawisko to jest nazywane efektem Freya. Opisuje ono możliwość słyszenia przez ludzi dźwięków, które są indukowane w mózgu za pomocą mikrofal. Zatem żeby odebrać tego typu dźwięk nie potrzeba odbiornika (ucha). Częstotliwości mikrofalowe mogą więc powodować szkodliwe fale uderzeniowe w mózgu [77].

Frey odkrył także, że po wystawieniu na promieniowanie o poziomie $0,6 \text{ mW/cm}^2$ u żab dochodziło do zatrzymania akcji serca. W 1975 roku opublikował artykuł, w którym ujawnił,

że narażenie na PEM powodowały ubytki w barierze krew – mózg. Bariera ta ma za zadanie chronić mózg przed toksynami, bakteriami czy wirusami które mogą znajdować się w krwiobiegu. Zwiększenie narażenia na PEM może powodować przerwy w tej barierze, których następstwem mogą być choroby układu nerwowego np. choroba Alzheimera. Problemem dotyczącym negatywnego wpływu pola elektromagnetycznego na zdrowie, jest fakt, iż oddziaływanie PEM wiąże się z długim okresem odroczenia w czasie. Skutki mogą być widoczne dopiero po około 30 latach. Rozwój raka mózgu może zająć nawet 40 lat [77, 87-89].

1 stycznia 2020 r. weszło w życie Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. Tym samym zmieniło ono treść Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów utrzymania tych poziomów w części dotyczącej wartości granicznych oddziaływania pól elektromagnetycznych. W związku z wprowadzeniem Rozporządzenia dokonano zmian dopuszczalnych parametrów dla pól o częstotliwościach od 2 GHz do 300 GHz (Tabl. 1). Wartości zostały zmienione dla składowej elektrycznej z 7 V/m na 61 V/m (wzrost niemal 9 razy) oraz dla gęstości mocy z 0,1 W/m² na 10 W/m² (100-krotny wzrost) [77, 90-92].

Tabl. 1. Wartości dopuszczalne dla pola elektromagnetycznego [90]

Parametr fizyczny Zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego		Składowa elektryczna, V/m	Składowa magnetyczna, A/m	Gęstość mocy, W/m ²
1	0 Hz	10 000	2500	ND
2	od 0 Hz do 0,5 Hz	ND	2500	ND
3	od 0,5 do 50 Hz	10 000	60	ND
4	od 0,05 kHz do 1 kHz	ND	3/f	ND
5	od 1 kHz do 3 kHz	250/f	5	ND
6	3 kHz do 150 kHz	87	5	ND
7	od 0,15 MHz do 1 MHz	87	0,73/f	ND
8	od 1 MHz do 10 MHz	87/f ^{0,5}	0,73/f	ND
9	od 10 MHz do 400 MHz	28	0,073	2
10	od 400 MHz do 2000 MHz	1,375 x f ^{0,5}	0,0037 x f ^{0,5}	f/200
11	od 2 GHz do 300 GHz	61	0,16	10
f – wartość częstotliwości pola elektromagnetycznego z tego samego wiersza kolumn. ND – nie dotyczy.				

b) Pole elektromagnetyczne z użytkowania pojazdów samochodowych

W ostatnich latach wraz z rozwojem technologii i związaną z tym poprawą wydajności maszyn elektrycznych oraz źródeł energii coraz popularniejsze stają się samochody o napędzie elektrycznym oraz hybrydowym. W pojazdach elektrycznych źródło energii stanowi akumulator doładowywany z sieci elektroenergetycznej za pośrednictwem ładowarek. Podczas jazdy energia elektryczna z akumulatora trafia do przetwornika, dopasowującego parametry energii elektrycznej do typu silnika oraz warunków wynikających z warunków jazdy. Największe prądy w instalacji zasilającej pojazdu elektrycznego płyną w stanach dynamicznych takich jak przyspieszanie lub hamowanie. Podczas przyspieszania energia elektryczna płynie od akumulatora do silnika, natomiast w przypadku zmniejszania prędkości energia kinetyczna jest zamieniana na energię elektryczną przesyłaną do baterii. Poza dynamicznymi stanami pracy można spodziewać się znacznych wartości składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego podczas ładowania pojazdu elektrycznego. Zgodnie z prawem Ampere'a wokół przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny, powstaje pole magnetyczne o wartości tym większej im wyższe natężenie prądu występuje w przewodniku. Efektem przepływu prądu elektrycznego w obwodach zasilających, odbiorczych oraz sterujących samochodem elektrycznym jest natomiast powstawanie pola elektromagnetycznego, które przez WHO zostało uznane jako czynnik nieobojętny dla środowiska [93-96].

Aby zwiększyć świadomość społeczną w kwestii bezpieczeństwa samochodów elektrycznych zainicjowano finansowany ze środków Unii Europejskiej projekt „EM safety and hazards mitigation by proper EV design”. Naukowcy przeprowadzili pomiary pola elektromagnetycznego różnych samochodach elektrycznych. Pomiary prowadzono wewnątrz pojazdu, stosując platformę do monitorowania, która obejmowała czujniki znajdujące się na głowie, klatce piersiowej i stopach. Wyniki wskazały, że emisja pola elektromagnetycznego była mniejsza niż 20% wartości granicznej zalecanej przez Międzynarodową Komisję Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP). W przypadku samochodów z silnikiem spalinowym zmierzone narażenie wynosiło około 10% wartości granicznej [83, 93-95].

Silniki samochodów elektrycznych oraz zasilająca je instalacja prądu przemiennego emituje częstotliwości od 20 Hz do 600 Hz, zależnie od trybu jazdy. Stacje ładowania akumulatorów emitują PEM o częstotliwości od 20 kHz do 100 kHz. Konstrukcja pojazdu w dużej części jest wykonana z elementów metalowych, co przy częstotliwościach pracy rzędu 0,8-150 kHz stanowi barierę przed emisją pola elektromagnetycznego [96]. Pole

elektromagnetyczne w pojazdach elektrycznych zawiera się w przedziale od pola niskiej częstotliwości po promieniowanie mikrofalowe. Silniki oraz sterownik z przewodami w samochodach elektrycznych, a także alternator w samochodach spalinowych emitują pola magnetycznej niskiej częstotliwości, czyli indukcje magnetyczną.

Źródłem pól elektromagnetycznych wysokich częstotliwości w samochodach elektrycznych np. inwertery odpowiedzialne za zamianę prądu stałego z baterii na prąd zmienny, który zasila silniki elektryczne; przetwornice; silniki elektryczne oraz ładowarki pojazdów elektrycznych.

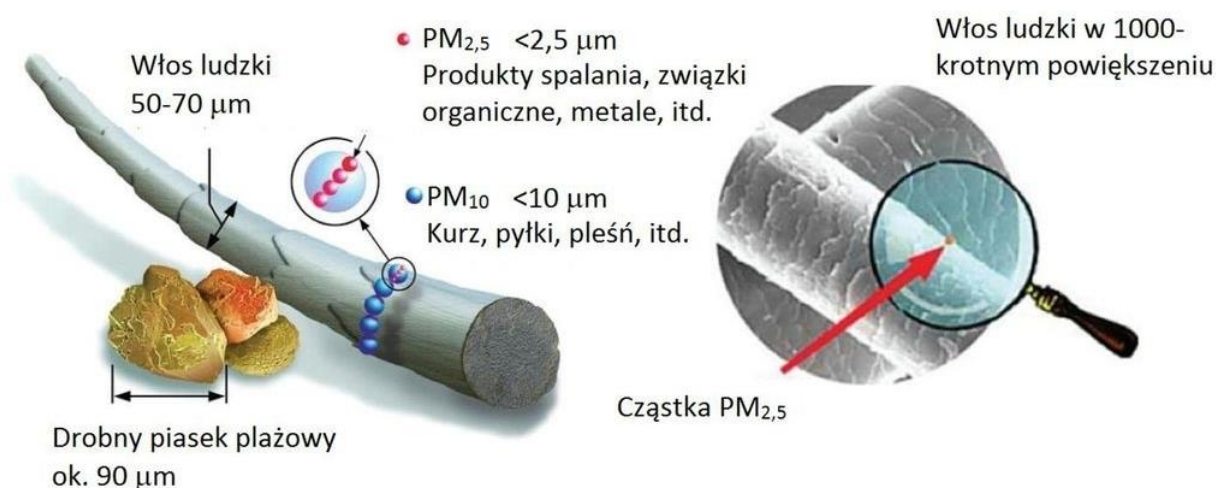
Zjawisko promieniowania elektromagnetycznego jest często pomijane, ze względu na fakt, iż jest ono nie widoczne i nie wyczuwalne przez ciało ludzkie. Ze względu na rosnącą liczbę użytkowników samochodów z napędami alternatywnymi takimi jak napęd hybrydowy lub elektryczny wydaje się koniecznym zbadanie emisji pola elektromagnetycznego emitowanego przez te pojazdy.

3.9.4. Emisja pyłów

Jednym z bardziej istotnych zagrożeń wywoływanych przez eksploatację środków transportu drogowego, związanych z zanieczyszczeniem powietrza jest emisja pyłów. Głównymi źródłami powodującymi powstawanie pyłów w procesie eksploatacji pojazdów są: układy hamulcowe, opony, tarcze sprzęgła. Powstające w procesie użytkowania pojazdów pyły dzielone są zwykle na dwa rodzaje: pył drobnoziarnisty i gruboziarnisty. Pyłami drobnoziarnistymi określa się jako małe cząstki ciała stałego o średnicy poniżej 50 μm . Pyły gruboziarniste, są to cząstki ciała stałego o średnicy powyżej 50 μm . Ponadto tutaj wielkość graniczna nie decyduje w sposób jednoznaczny o tym, czy pył się unosi czy opada. Zdarza się niekiedy, że pyły o większej średnicy unoszą się w powietrzu natomiast pyły o mniejszej średnicy opadają na powierzchnię ziemi. Mają na to wpływ różne czynniki, takie jak np. opady atmosferyczne, skład chemiczny i właściwości fizyczne pyłu. Podczas użytkowania pojazdów powstają zarówno pyły gruboziarniste jak i drobnoziarniste. W większości są to jednak pyły drobnoziarniste, czyli PM_{2,5} oraz PM₁₀ [97-102].

Określenie PM_{2,5} oznacza pył o średnicy cząstek poniżej 2,5 μm . Taką średnicę ma między innymi sadza. Pył PM₁₀ to pył o średnicy cząstek poniżej 10 μm . Z definicji, w jego skład wchodzi także pył PM_{2,5}, jednak są tam również cząstki większe, o średnicach od 2,5 do 10 μm . Na te większe cząstki składa się w dużej mierze pył mineralny. Pyły PM₁₀ i PM_{2,5} nie stanowią jednorodnej grupy substancji szkodliwych. Mogą to być drobiny kurzu,

piasku, a także pyłki roślin. Pyły generowane przez pojazdy samochodowe to przede wszystkim emitowane z silnika cząstki sadzy, popiołów oraz metali ciężkich. Ponadto, przyczyną powstawania pyłów w dużej mierze jest również zużycie eksploatacyjne opon, tarcz i klocków hamulcowych oraz nawierzchni. Pył powstały w wyniku emisji tych zanieczyszczeń gromadzi się na powierzchni drogi, a następnie wzbijany jest w powietrze poprzez przejeżdżające samochody oraz wiatr. Jest to tak zwany unos wtórny (pylenie wtórne). Powstający pył zależy od wielu różnych czynników, do których można zaliczyć: siłę hamowania pojazdu, jako siłę docisku klocka do tarczy, prędkość pojazdu, rodzaj materiału z jakiego wykonana jest tarcza oraz kłosek hamulcowy. Te czynniki odpowiadają dla różnych warunków drogowych, czyli miejskich czy też autostradowych [103-108]. Schemat na rysunku 9 przedstawia porównanie cząsteczek PM10 oraz PM2,5 do włosa ludzkiego.



Rys. 9. Schemat przedstawiający wielkość cząstek PM10 i PM2,5 [109]

a) Efekty oddziaływania pyłów na człowieka

Pył PM10 osadza się na górnych drogach oddechowych, w nosie, gardle, tchawicy, krtani. Powoduje zwiększenie zachorowalności na choroby układu oddechowego. Pył PM2,5 swobodnie wnika w układ oddechowy do pęcherzyka płucnego, gdzie jest absorbowany do układu krążenia, następnie wraz z krwią przedostaje się do tkanek miękkich oraz wszystkich narządów. Pierwszymi efektami ich obecności są kaszel, zadyszka, zapalenie gardła oraz nasilenie objawów astmy i chorób alergicznych. Zagrożają zdrowiu przyczyniając się do wzrostu liczby zgonów w wyniku chorób serca, naczyń krwionośnych, dróg oddechowych oraz raka płuc. Wzrost stężeń pyłu PM2,5 może spowodować wzrost ryzyka nagłych wypadków

wymagających hospitalizacji z powodu problemów z krążeniem i oddychaniem. Część pyłów zawieszonych kumuluje się w drogach oddechowych, a zawarte w nich toksyny uszkadzają błony komórkowe i wywołują stan zapalny. Układ odpornościowy nie zawsze jest w stanie podjąć w pełni skuteczną obronę i doprowadzić do usunięcia z organizmu całego pyłu. Ich obecność w drogach oddechowych stanowi czynnik ryzyka wielu schorzeń w przewlekłej obturacyjnej choroby płuc. Ich oddziaływanie powoduje także problemy z układem krążenia, choroby kardiologiczne oraz udary mózgu. Pyły zawieszone mają również potwierdzone działanie kancerogenne. Największe ryzyko dotyczy nowotworów układu oddechowego. Badania dowodzą, że u osób zamieszkujących tereny, gdzie stężenie pyłu PM_{2,5} przekracza dopuszczalne normy, ryzyko rozwoju choroby Alzheimera i demencji wzrasta aż o 92% [3, 102, 103, 110].

b) Pyły z użytkowania pojazdów samochodowych

Emisja zapylenia w dużej mierze zależy od stylu jazdy kierowcy, prędkości, masy pojazdu oraz od rodzaju i składu opon, elementów ciernych w układach hamulcowych. Do zużycia opon dochodzi w trakcie współpracy opony z nawierzchnią, a więc cały czas podczas jazdy. Większe zużycie występuje jednak podczas ruszania z miejsca, przyspieszania oraz hamowania, w porównaniu do jazdy ze stałą prędkością. Podczas hamowania z użyciem tradycyjnego ciernego układu hamulcowego energia kinetyczna jest przekształcana w ciepło wynikające z tarcia. Podczas tego procesu dochodzi do zużycia elementów współpracujących, a zatem do powstawania produktów tarcia [110-113].

Podczas swobodnego toczenia po nawierzchni opona doznaje odkształcenia sprężystego. Współczynnik tarcia związany z toczeniem opony po nawierzchni wynosi ok. $\mu=0,5$. Jeżeli opona toczy się swobodnie po gładkiej nawierzchni, zużycie nie jest duże. W sytuacji gdy samochód przyspiesza, zwalnia lub zmienia kierunek, między oponą a jezdnią występuje niewielki poślizg.

Hamowanie jest jednym z procesów, w którym duża siła tarcia jest korzystnym zjawiskiem. Współczynnik tarcia klocków hamulcowych z tarczą wynosi $\mu=0,4$ dla osi przedniej (silnik) oraz $\mu=0,3$ dla osi tylnej.

Klocki hamulcowe składają się z materiałów ściernych, spoiw, wypełniaczy i składników wzmacniających. Do wytworzenia każdego z tych materiałów, wykorzystywano dużą ilość związków chemicznych, co utrudnia ich szcharakteryzowanie. Ze względu na użyte składniki, klocki hamulcowe klasyfikujemy jako [97]:

- organiczne bezazbestowe (NAO), czyli składające się ze związków organicznych, włókien mineralnych i grafitu,
- niskometaliczne (LM), czyli składające się ze składników metalicznych i związków organicznych,
- półmetaliczne (SM) z zawartością stali i żelaza.

Główne pierwiastki składu klocków hamulcowych według literatury to żelazo (Fe), bar (Ba), antymon (Sb), cyna (Sn) oraz miedź (Cu). W ostatnich latach zaobserwowany został spadek zawartości antymonu i miedzi. Według prawa w Europie do produkcji klocków hamulcowych zabroniono wykorzystywania azbestu. Ponadto w USA zabroniono stosowania miedzi do produkcji klocków hamulcowych, ze względu na niebezpieczeństwo związane z uszkodzeniem nerek, wątroby, wystąpienia anemii, alergicznego zapalenia pęcherzyków płucnych, a nawet choroby nowotworowej [97-108].

Moment obrotowy silnika elektrycznego dostępny jest od zerowej prędkości obrotowej w wyniku czego zużycie opon jest prawdopodobnie większe, co zwiększać może ilość pyłu pochodzącego z eksploatacji takiego środka transportu. Bardzo istotnym czynnikiem zwiększającym emisję pyłu jest również masa pojazdu. Samochody elektryczne ze względu na dużą masę akumulatorów, mogą emitować więcej pyłu z opon niż ich spalinowe odpowiedniki spełniające wymogi współczesnych norm emisji spalin. To kolei w niektórych przypadkach może przełożyć się nawet na wyższą sumaryczną emisję pyłu przez samochód z napędem elektrycznym. Jednak twierdzi się, że pojazdy elektryczne i hybrydowe w porównaniu z pojazdami spalinowymi emitują mniej pyłów pochodzących ze zużycia okładzin hamulcowych dzięki systemowi RBS (Regenerative Braking System) w systemie tym hamowanie rekuperacyjne odzyskuje energię podczas hamowania i zamieniają energię kinetyczną na energię elektryczną bez procesu tarcia. Wówczas silniki elektryczne działają jak prądnice. Wytworzona energia elektryczna jest magazynowana w akumulatorach. Układ ten wydłuża żywotność tarczowego układu hamulcowego, ponieważ jego elementy zużywają się wolniej. Według The Platform for Electro-Mobility, system RBS zmniejsza zużycie hamulców o 25 – 50% [97-104].

Według raportu OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) z 2020 roku, przeprowadzono ankietę odnośnie emisji innych niż spaliny. Ankietowani zakładali, że zwiększona masa pojazdów elektrycznych prowadzi do zwiększonego zużycia opon. Podczas porównania masy pojazdów elektrycznych w klasie średniej, wykazano, że jest ona o 22% większa, niż masa pojazdów spalinowych tej samej klasy. To samo dotyczy opinii, iż moment obrotowy w pojazdach elektrycznych, który jest większy oraz dostępny od zerowej

prędkości obrotowej wirnika silnika, prowadzi do częstej utraty przyczepności podczas ruszania i przyspieszania, a zatem wyższej emisji zapylenia pochodzącej z opon [98-102].

Obecnie na rynku istnieje wiele firm zajmujących się produkcją elementów hamulcowych oraz opon. Stąd też biorą się różnice w zakresie wytworzonych materiałów, a ponadto systematycznie prowadzone prace badawczo–doświadczalne skutkują wprowadzeniu na rynek nowych tworzyw, m.in. różnych materiałów kompozytowych. Utrudnia to jednak identyfikację pyłu hamulcowego z pośród całości pyłu drogowego, a tym samym określenie wpływu czynników eksploatacyjnych na poziom zanieczyszczeń. Trudności w identyfikacji są tym większe, iż istnieją jeszcze różnice w materiałach poszczególnych rodzajów pojazdów, na przykład osobowych, ciężarowych. Jednak by móc to dokładnie określić należy przeprowadzić analizę chemiczną pyłu sprawdzając zawartość pierwiastków charakterystycznych dla materiałów ciernych hamulców pojazdów. Badania sugerują, że emisja cząstek stałych z układów hamulcowych może wynosić od kilku do kilkudziesięciu mg/km. Wskazano, że średnia emisja cząstek stałych z hamulców może wynosić około 4-6 mg/km, ale w przypadkach intensywnego użytkowania lub w pojazdach o dużej masie ta wartość może być znacznie wyższa. [105-107].

Badania dowodzą, że zużycie jednej, letniej opony samochodowej 250/40 R18 po przejechaniu 15 000 km wynosi 130 gramów na 1000 kilometrów, a zimowej 139 g/1000 km (uśrednione wyniki badań ADAC). Od założenia do wymiany, średnie zużycie opony dochodzi do 2 kilogramów. 80% produktów zużycia opon ma wymiar między 100 a 500 μm . [106, 107]

Rozporządzenie Euro 7 ustanawia przepisy o emisjach spalin z pojazdów drogowych, ale też o innych rodzajach emisji wytwarzanych np. podczas ścierania opon i hamowania. Dla samochodów osobowych i dostawczych rozporządzenie utrzymuje obowiązujące limity emisji przewidziane w ramach normy Euro 6, ale wprowadza surowsze wymagania dotyczące cząstek stałych PM₁₀. Limity wynoszą 3 mg/km dla pojazdów z napędem wyłącznie elektrycznym oraz 7 mg/km dla pojazdów z innymi napędami (spalinowym i hybrydowym). Wstępnie zakładano wprowadzenie nowej normy między 2025 a 2026 rokiem, jednak plan przesunięto na rok 2029. [108].

3.10. Podsumowanie przeglądu literatury

Samochody z napędami alternatywnymi wydają się być przyszłościowe oraz posiadają wiele zalet, jednak tak jak pojazdy z napędem konwencjonalnym posiadają też szereg wad. Elektromobilność szybko się rozwija, jednak problemy związane z infrastrukturą ładowania, małym zasięgiem pojazdów elektrycznych oraz długim czasem ładowania dalej są znacząco duże.

Analiza literaturowa wykazuje, że emisja hałasu i drgań z samochodów z napędem elektrycznym może być mniejsza tylko przy niskich prędkościach jazdy. W przypadku dróg szybkiego ruchu i autostrad, poziom hałasu i drgań jest podobny, bez względu na rodzaj napędu zastosowanego w danym pojeździe. Brak jest jednak szczegółowych badań odnośnie tych emisji.

Co do emisji pola elektromagnetycznego z pojazdów hybrydowych i elektrycznych uznać należy, że badania w tym zakresie są szczątkowe i nie prezentuje się specyficznych wyników pomiarów. Literatura podaje na przykład, że przeprowadzono badania „EM safety and hazards mitigation by proper EV design”, które wykazały, że emisja pola elektromagnetycznego była mniejsza niż 20% wartości granicznej zalecanej przez Międzynarodową Komisję Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP). Odnośnie emisji pyłów różne pozycje literaturowe sugerują, że może być ona wyższa w przypadku samochodów z napędem elektrycznym w porównaniu do tych z napędem konwencjonalnym, np. z powodu zwiększonego zużycia opon.

Mimo iż napęd elektryczny nie emituje bezpośrednio spalin do atmosfery to eksploatacja środków transportu z napędami alternatywnymi ma wpływ na emisję innych zanieczyszczeń takich jak: hałas, drgania, pole elektromagnetyczne oraz pył pochodzący z opon i klocków hamulcowych. Zwiększająca się liczba użytkowanych pojazdów samochodowych skłania do podjęcia tematu w tym zakresie. Jest to szczególnie, że stopniowo rośnie liczba pojazdów o alternatywnych napędach, czyli hybrydowych i w pełni elektrycznych. W celu o czy pojazdy te emitują mniej zanieczyszczeń należy przeprowadzić badania porównawcze zanieczyszczeń emitowanych ze środków transportu z napędami alternatywnymi (hybrydowym i elektrycznym) oraz środków transportu z napędami konwencjonalnymi w różnych warunkach eksploatacji.

4. TEZA PRACY

Na podstawie przeprowadzonej kompleksowej analizy literaturowej podjętego tematu sformułowano następującą tezę:

W przypadku samochodów segmentu ekonomicznego emisja hałasu i drgań z samochodów o napędzie elektrycznym jest niższa niż w przypadku samochodów o napędzie konwencjonalnym, jednocześnie emisja pola elektromagnetycznego i zapylenia z samochodów o napędzie elektrycznym jest wyższa niż w samochodach o napędzie konwencjonalnym, a ponadto na emisje może wpływać przeznaczenie pojazdów do użytku współdzielonego lub prywatnego.

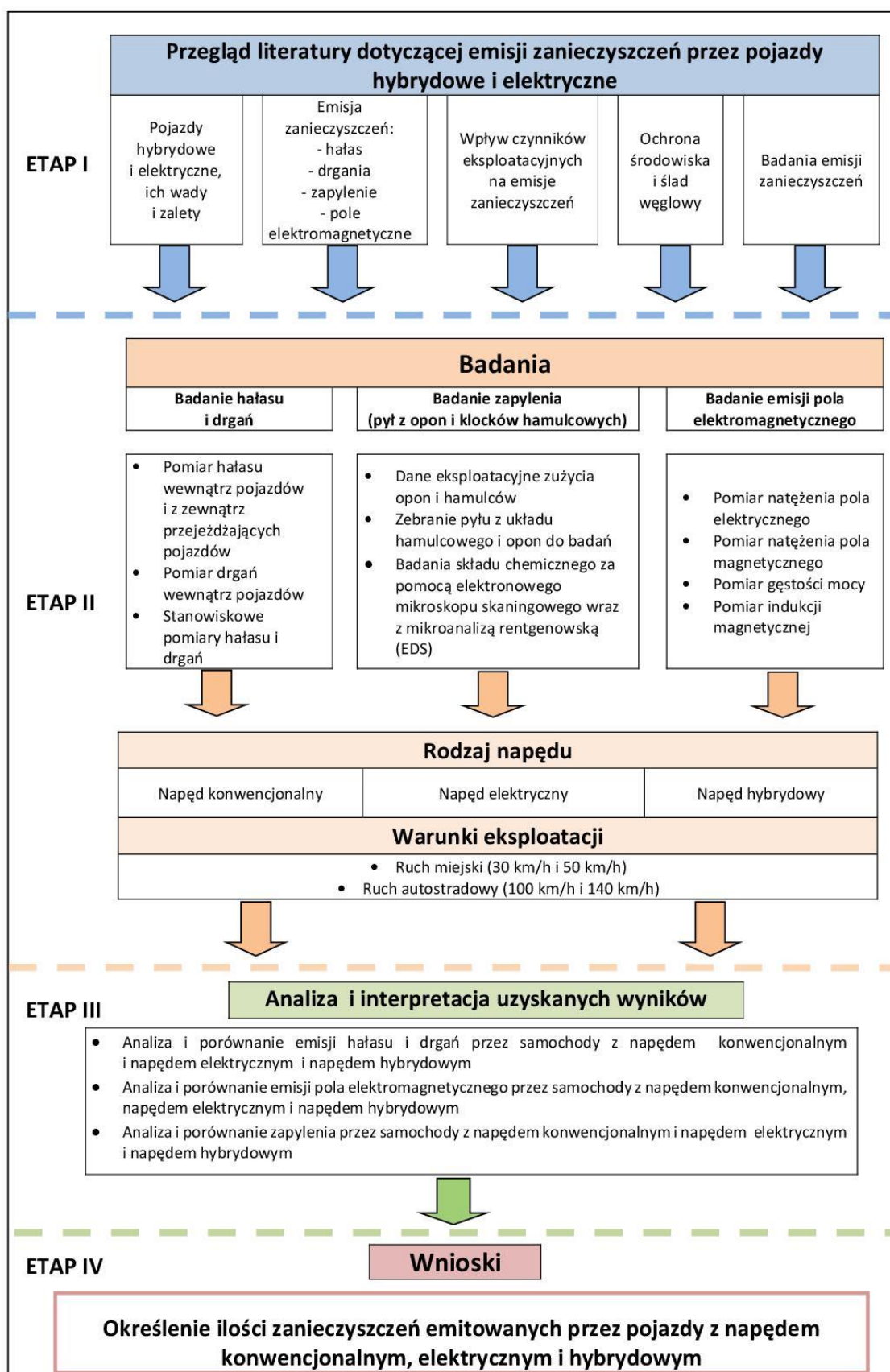
Zgodnie z przyjętą tezą rozprawy prowadzone badania i poprzedzające je studia literaturowe zostały poświęcone osiągnięciu głównego celu pracy, którym było ustalenie, które pojazdy (czy z alternatywnym napędem, czy z konwencjonalnym napędem) i w jakich warunkach eksploatacji (warunki miejskie, czy autostradowe) są najbardziej ekologiczne oraz najbezpieczniejsze pod względem emisji zanieczyszczeń dla ludzi oraz środowiska.

5. BADANIA WŁASNE

Po przeprowadzeniu kompleksowej analizy literaturowej podjętego tematu rozpoczęto przygotowania do realizacji badań własnych. Badania własne zaczęto od przygotowania planu badań, następnie wybrano obiekty badań oraz aparaturę badawczą. Kolejnym etapem było przystąpienie do realizacji zaplanowanych badań.

5.1. Zakres badań

W ramach realizacji zaproponowanego tematu badawczego opracowano zależności określające rodzaj napędu zastosowanego w środku transportu samochodowego (pojazdy osobowe) z podziałem na samochody z konwencjonalnym napędem z silnikiem spalinowym oraz samochody elektryczne i hybrydowe. Badania były prowadzone z podziałem na warunki eksploatacyjne takie jak ruch miejski oraz ruch autostradowy i miały charakter porównawczy. Określana i porównywana była wielkość emisji wybranych zanieczyszczeń – promieniowanie elektromagnetyczne niejonizujące, zapylenie, hałas i drgania. W ramach realizacji projektu badawczego porównano zanieczyszczenia emitowane ze środków transportu z napędem alternatywnym i środków transportu tradycyjnym napędem silnikowym w różnych warunkach eksploatacji. Na rysunku 10 przedstawiono plan badań rozprawy doktorskiej.



Rys. 10. Plan badań rozprawy doktorskiej [opracowanie własne]

5.2. Obiekt badań

Na potrzeby realizacji części badawczej niniejszej rozprawy wytypowano do badań porównawczych określone środki transportu samochodowego, tj.: samochód z napędem konwencjonalnym, samochód z napędem elektrycznym oraz samochód z napędem hybrydowym. Samochody marki Dacia to pojazdy klasy ekonomicznej, natomiast pojazd marki Toyota jest wyższej klasy. Jako obiekty badań wytypowano trzy samochody osobowe:

- a) samochód z napędem konwencjonalnym marki Dacia Sandero III (Pojazd 1) z silnikiem benzynowym 1.0 Tce z turbodoładowaniem o mocy 67 kW,
- b) samochód elektryczny marki Dacia Spring (Pojazd 2) posiadający silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o mocy 33 kW,
- c) samochód z napędem hybrydowym marki Toyota C-HR (Pojazd 3) z silnikiem spalinowym 1,8 o mocy 72 kW oraz silnikiem elektrycznym o mocy 53 kW; całkowita moc układu hybrydowego wynosiła 90 kW.

Do pomiarów wykorzystano łącznie 10 samochodów marki Dacia – 5 z napędem elektrycznym (Pojazd 2) i 5 z napędem konwencjonalnym (Pojazd 1). Wszystkie z tych pojazdów pochodziły z floty użytkowanej na zasadzie użytkowania współdzielonego (carsharing). Dodatkowo, w celach porównawczych, w badaniach uwzględniono prywatnie użytkowany samochód hybrydowy marki Toyota (Pojazd 3).

Kryteria jakimi kierowano się w wyborze pojazdów do badań, to najtańsze dostępne na rynku pojazdy z napędem konwencjonalnym oraz elektrycznym. Wytypowano tu pojazdy marki Dacia. Z uwagi na fakt, iż marka ta nie posiadała w ofercie samochodu hybrydowego, zdecydowano się na uzupełnienie badań samochodem z napędem hybrydowym marki Toyota (w celach porównawczych). Włączenie samochodu Toyota C-HR do zbioru badanych pojazdów miało na celu rozszerzenie analizy o pojazd hybrydowy, mimo że różnił się on od pojazdów marki Dacia zarówno pod względem klasy, jak i sposobu użytkowania. Podczas gdy pojazdy marki Dacia pochodziły z carsharingu i reprezentowały ekonomiczny segment rynku, Toyota C-HR była samochodem prywatnym, co pozwalało dodatkowo przeanalizować wpływ eksploatacji i stylu użytkowania na wyniki badań. Wybór tych konkretnych modeli sprawia, że badania obejmują szeroką gamę pojazdów dostępnych na rynku, co czyni wyniki bardziej reprezentatywnymi. Dacia Sandero jest popularnym modelem, jednym z najtańszych pojazdów spalinowych. Dacia Spring to najtańszy samochód elektrycznych, a Toyota C-HR jest jednym z najczęściej kupowanych pojazdów hybrydowych. Wszystkie pojazdy zostały wyprodukowane w roku 2021 oraz wszystkie pojazdy posiadały nadwozia typu crossover.

Warto wspomnieć, że samochody przeznaczone do użytku współdzielonego różnią się od prywatnych pojazdów przede wszystkim pod względem jakości, wyposażenia oraz warunków eksploatacji. Pojazdy przeznaczone do współdzielonego użytku to zazwyczaj tańsze modele w podstawowych wersjach, co pozwala na ograniczenie kosztów zakupu i utrzymania. Podczas kompletowania floty samochodowej dokonywane są obliczenia kosztów obejmujących m. in. części zamiennych, obsług technicznych i napraw. Ważna jest także deklaracja producenta odnośnie przebiegu między dopuszczalnymi przeglądami gwarancyjnymi. W porównaniu do nich samochody prywatne mają często lepsze wyposażenie, wyższej jakości materiały wykończeniowe oraz dodatkowe opcje zwiększające komfort jazdy.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż ze względu na intensywną eksploatację przez wielu różnych użytkowników, samochody z wypożyczalni są bardziej zużyte zarówno pod względem mechanicznym, jak i wizualnym od samochodów użytkowanych prywatnie. Prywatne pojazdy są zwykle lepiej utrzymane, ponieważ ich właściciele dbają o ich stan techniczny.

Istotną różnicą jest także rodzaj stosowanych opon. W carsharingu, aby ograniczyć koszty, często montuje się opony wielosezonowe, które eliminują konieczność sezonowej wymiany, a także koszty związane z magazynowaniem opon lub całych kół. Chociaż są one bardziej ekonomiczne, mogą charakteryzować się gorszą przyczepnością w trudnych warunkach, na przykład na mokrej nawierzchni. Z kolei właściciele prywatnych samochodów zazwyczaj wybierają opony sezonowe wyższej jakości, co przekłada się na lepsze właściwości jezdne, bezpieczeństwo oraz mniejszą emisję hałasu, drgań czy też zapylenia.

Samochód konwencjonalny (Dacia Sandero III – Pojazd 1) z silnikiem benzynowym reprezentuje tradycyjne motoryzacyjne rozwiązania techniczne, co pozwala na ocenę wpływu klasycznych silników spalinowych na emisję hałasu, drgań i spalin. Samochód elektryczny (Dacia Spring – Pojazd 2) stanowi przykład nowoczesnych technologii napędu, które są coraz bardziej popularne i wspierane przez polityki ekologiczne. Samochód hybrydowy (Toyota C-HR – Pojazd 3) łączy w sobie zastosowanie zarówno silnika spalinowego, jak i elektrycznego, co umożliwia badanie powiązań między tymi dwoma rodzajami napędu oraz ich wpływu na poszczególne emisje.

Analiza pojazdów z różnymi napędami pozwala na zbadanie wpływu różnych napędów na hałas i drgania, pole elektromagnetyczne oraz emisję pyłów. Wybór tych pojazdów odzwierciedla aktualne trendy w motoryzacji, w tym rosnące zainteresowanie pojazdami elektrycznymi i hybrydowymi, co ma znaczenie w kontekście ochrony środowiska

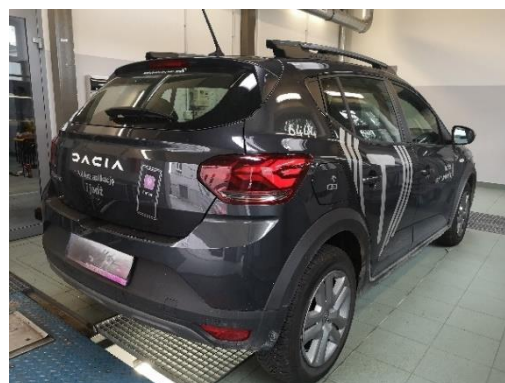
i zrównoważonego rozwoju. Na rysunkach od 11 do 16 oraz w tabelach od 2 do 4 przedstawiono obiekty badań oraz ich charakterystykę techniczną.

a) Samochód z napędem konwencjonalnym

W tabeli 2 przedstawione zostały dane techniczne pojazdu z napędem konwencjonalnym marki Dacia Sandero (Pojazd 1). Na rysunkach 11 i 12 przedstawiony został widok samochodu.

Tabl. 2. Dane techniczne samochodu Dacia Sandero – Pojazd 1 [114]

Model	Dacia Sandero III Hatchback
Napęd	konwencjonalny
Silnik	benzynowy 1,0 Tce z turbodoładowaniem
Pojemność skokowa	999 cm ³
Liczba cylindrów	3
Moc silnika	67 kW (90 KM) przy 4600 min ⁻¹
Moment obrotowy	160 Nm przy 2100-3750 min ⁻¹
Montaż silnika	z przodu, poprzecznie
Rodzaj skrzynki biegów	manualna
Liczba biegów	6
Napęd	na przednią oś
System start&stop	tak
Zużycie paliwa	5,2 dm ³ / 100 km
Pojemność zbiornika paliwa	50 dm ³
Zasięg	962 km
Masa własna	1152 kg
Rok produkcji	2021
Cena	59 900 zł



Rys. 11. Samochód z napędem konwencjonalnym Dacia Sandero [opracowanie własne]



Rys. 12. Samochód z napędem konwencjonalnym Dacia Sandero – widok na przedział silnika
[opracowanie własne]

b) Samochód z napędem elektrycznym

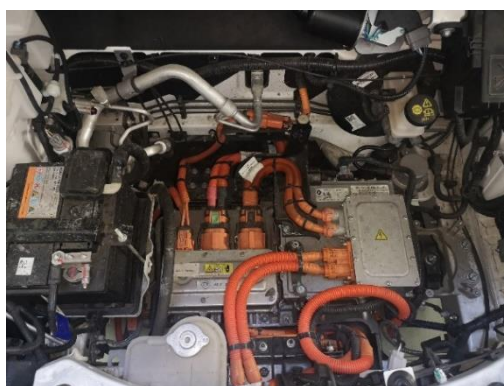
W tabeli 3 przedstawione zostały dane techniczne pojazdu z napędem elektrycznym marki Dacia Spring (Pojazd 2). Na rysunkach 13 i 14 przedstawiony został widok samochodu.

Tabl. 3. Dane techniczne samochodu Dacia Spring – Pojazd 2 [114]

Model	Dacia Spring Crossover Elektryczny
Napęd	elektryczny
Silnik	synchroniczny z magnesami trwałymi
Moc silnika	33 kW (45 KM) przy 3000 – 8200 min ⁻¹
Moment obrotowy	125 Nm przy 500 – 2500 min ⁻¹
Rodzaj skrzynki biegów	1 – stopniowa
Napęd	na przednią oś
Akumulator	litowo – jonowy
Pojemność akumulatora brutto	27 kWh
Czas ładowania z gniazdka	13 h
Czas ładowania – szybkie ładowanie	1 h
Zużycie energii	13,9 kWh/100km
Zasięg	230 km
Masa własna	920 kg
Rok produkcji	2021
Cena	97 490 zł



Rys. 13. Samochód z napędem elektrycznym Dacia Spring [opracowanie własne]



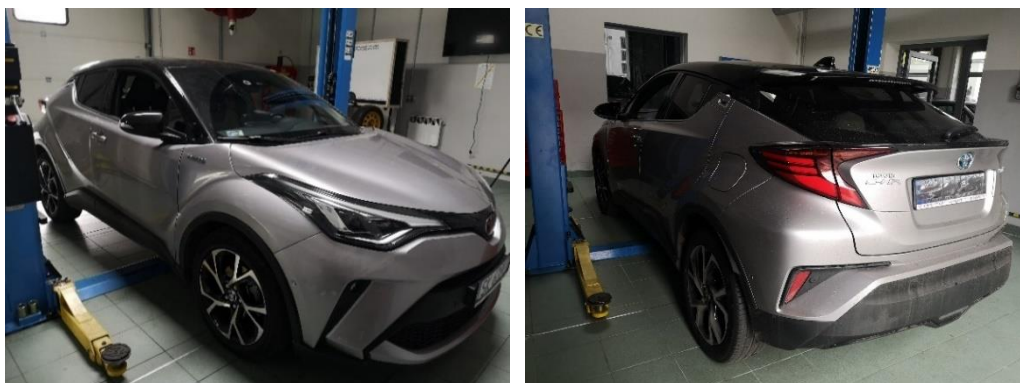
Rys. 14. Samochód z napędem elektrycznym Dacia Spring – widok na przedział silnika [opracowanie własne]

c) Samochód z napędem hybrydowym

W tabeli 4 przedstawione zostały dane techniczne pojazdu z napędem hybrydowym marki Toyota C-HR (Pojazd 3). Na rysunkach 15 i 16 przedstawiony został widok samochodu.

Tabl. 4. Dane techniczne samochodu Toyota C-HR – Pojazd 3 [115]

Model	Toyota C-HR Crossover SUV – 5d
Napęd	hybrydowy (HEV)
Silnik	1,8 Hybrid
Pojemność skokowa	1798 cm ³
Liczba cylindrów	4
Liczba zaworów	16
Moc układu silnikowego	moc 90 kW (122 KM) przy 5200 min ⁻¹
Moc silnika benzynowego	72 kW (98 KM) przy 3600 min ⁻¹
Moment obrotowy silnika benzynowego	142 Nm przy 3600 min ⁻¹
Moc silnika elektrycznego	53 kW (72 KM)
Moment obrotowy silnika elektrycznego	163 Nm
Montaż silnika	z przodu, poprzecznie
Akumulator	litowo – jonowy
Pojemność akumulatora brutto	1 kWh
Rodzaj skrzynki biegów	automatyczna e – CVT
Napęd	na przednią oś
System start&stop	tak
Zużycie paliwa	4,8 dm ³ / 100 km
Pojemność zbiornika paliwa	43 dm ³
Zasięg	895 km
Masa własna	1380 kg
Rok produkcji	2021
Cena	109 000 zł



Rys. 15. Samochód z napędem hybrydowym Toyota C-HR [opracowanie własne]



Rys. 16. Samochód z napędem hybrydowym Toyota C-HR – widok na przedział silnika [opracowanie własne]

d) Porównanie kosztów zakupu pojazdów wytypowanych do badań

W tabelach od 5 do 7 przedstawione zostały ceny samochodów, które są przedmiotem badań. Dane zostały zebrane z ASO marki Dacia oraz Toyota, dnia 06.12.2022 rok [116-118].

Tabl. 5. Ceny samochodu Dacia Sandero z 2021 roku [116]

SILNIK	ESSENTIAL	STEPWAY ESSENTIAL	EXPRESSION	STEPWAY EXPRESSION
TCe 90	59 900	67 600	63 900	73 300
TCe 90 CVT	-	-	69 900	79 300
ECO-G 100	-	70 450	66 750	76 150
TCe 110	-	-	-	77 950

Tabl. 6. Ceny samochodu Dacia Spring z 2021 roku [117]

SILNIK	CARGO	ESSENTIAL*	EXPRESSION*
ELECTRIC 45	97 490	95 400	102 900
*samochody dostępne wyłącznie z zapasów magazynowych dealerów, mogą zawierać opcje dodatkowo płatne. Liczba aut ograniczona. Oferta ważna do wyczerpania zapasów. Szczegóły u Autoryzowanych Dealerów Dacii.			

Tabl. 7. Ceny samochodu Toyota C-HR z 2021 roku [118]

Rok modelowy: 2021. Rok produkcji: 2021		Cennik obowiązuje od 1 listopada 2021 r.		
Crossover	Comfort	Style	Executive	GR Sport
1.8 Hybrid 122 KM e-CVT	113 900 109 100	118 900 114 100 ¹	131 900 126 900 ¹	137 900 132 800
2.0 Hybrid Dynamic Force 184 KM e-CVT	–	127 900 122 900 ¹	140 900 135 700 ¹	146 900 141 600
Skrzynia biegów: e-CVT – bezstopniowa automatyczna.				

Ceny samochodów z napędem spalinowym są najniższe, podczas gdy modele elektryczne zazwyczaj kosztują najwięcej. Samochody hybrydowe cenowo mieszczą się pomiędzy nimi w ramach tej samej klasy pojazdów. Dla porównania, w 2023 roku Peugeot 208 w wersji spalinowej kosztował od 92 700 zł, natomiast ceny elektrycznego e-208 zaczynały się od 159 900 zł. Hyundai Kona był dostępny w trzech wariantach: spalinowym od 90 900 zł, hybrydowym od 118 000 zł i elektrycznym od 139 900 zł. Najtańszym samochodem elektrycznym pozostaje Dacia Spring, której cena może być zbliżona do modeli hybrydowych i spalinowych, jednak należy do segmentu aut niskiej klasy.

5.3. Pomiary hałasu

Jako pierwsze zaplanowano i zrealizowano badania emisji hałasu. Przeprowadzono trzy etapy badań hałasu:

- pierwszy etap obejmował pomiary stanowiskowe hałasu za pomocą kamery akustycznej,
- drugi etap badań przeprowadzono wewnątrz pojazdów podczas jazdy miejskiej i autostradowej. Pomiary przeprowadzono za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku,
- trzeci etap obejmował pomiary hałasu zewnętrznego mierząc hałas emitowany przez przejeżdżające po drodze pojazdy. Pomiary przeprowadzono za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku.

Podczas badań mierzono takie wartości jak [54, 57]:

- L_{Aeq} – równoważny uśredniony poziom dźwięku skorygowana wg charakterystyki częstotliwościowej A, wielkość wyrażana w decybelach (dB);
- L_{AFmax} – maksymalna wartość skuteczna poziomu dźwięku skorygowana wg charakterystyki częstotliwościowej, wielkość wyrażana w decybelach (dB);
- L_{Ceq} – równoważny uśredniony poziom dźwięku skorygowany charakterystyką częstotliwościową C, wielkość wyrażana w decybelach (dB);
- L_{Cpeak} – maksymalna wartość chwilowa (ang. peak) poziomu dźwięku (zwana również szczytową) skorygowana charakterystyką częstotliwościową C, wielkość wyrażana w decybelach (dB).

Badania hałasu poprzedzono przeglądem kart technicznych pojazdów, które zawierały deklaracje producentów co do emisji hałasu. Deklarowany poziom hałasu przedstawiono na rysunkach od 17-19.



KONFIGURACJA DACIA SANDERO
 Data utworzenia: 16 / 06 / 2023

Wysokość pojazdu
 nieobciążonego bez bagażnika
 (mm): 1535-1587
 Długość całkowita: 4099
 Szerokość całkowita: 1784
 Wysokość progu załadunku: 777
 Wysokość bez obciążenia z
 otwartą klapą tylną: 2019
 Zwis tylny: 666
 Wysokość całkowita: 1535/1587 (z
 relingami)
 Szerokość całkowita z lusterkami
 zewnętrznymi: 1848/2007

Typ techniczny:
 DJFBVMT6UA45M5200
 Liczba miejsc siedzących: 5

 Skrzynia biegów
 Rodzaj skrzyni biegów: manualna
 Liczba biegów do przodu: 6

Aerodynamika
 Poziom hałasu przy 50 km/h (dB):
 68

Rys. 17. Deklaracja producenta odnośnie emisji hałasu – Dacia Sandero [116]



KONFIGURACJA DACIA SPRING
 Data utworzenia: 31 / 08 / 2023

Poziom hałasu przy 50 km/h (dB):
 63

Pojemność bagażnika (dm3)

 Pojemność przestrzeni bagażowej
 min. (dm3): 290
 Pojemność przestrzeni bagażowej
 maks. po złożeniu kanapy (dm3):
 620

Rys. 18. Deklaracja producenta odnośnie emisji hałasu – Dacia Spring [116]

Poziom hałasu na postoju (dB(A))	68,1 – 68,4
Poziom hałasu podczas jazdy (dB(A))	66,7 – 68,0

Rys. 19. Deklaracja producenta odnośnie emisji hałasu – Toyota C-HR [117]

5.3.1. Urządzenia pomiarowe do pomiaru hałasu

Pomiary poziomu natężenia dźwięku przeprowadzono przy pomocy miernika Brüel&Kjaer 2250 Light. Badania wizualizacji i poziomu dźwięku wykonano przy pomocy kamery akustycznej SoundCam Bionic XS. W tabelach 8 i 9 przedstawiono parametry techniczne mierników, a urządzenia pomiarowe przedstawiono na rysunkach 20 i 21.



Rys. 20. Kamera akustyczna SoundCam Bionic XS [119]

Tabl. 8. Parametry techniczne kamery akustycznej SoundCam Bionic XS [119]

Cecha	Wartość
Wymiary	28 x 28 x 15 cm
Temperatura robocza	-20° C do 50° C
Ekran	Rozmiar 7 cali Rozdzielczość 800 x 480 pikseli System operacyjny Linux dla ARM
Mikrofony	112 cyfrowych MEMS
Zakres częstotliwości	10 Hz - 24 kHz
Częstotliwość próbkowania	48 kHz
Ciśnienie akustyczne	Maks. 120 dB
Filtry częstotliwości	wąskie pasmo, 1/3 oktawy i oktawy
3 tryby skalowania	wyłączony, automatyczny, inteligentny
Kąt rozwarcia	70°
Ustawienia odległości	Od 10 cm do 350 cm
Dokładność	± 1dB



Rys. 21. Miernik poziomu natężenia dźwięku – Brüel&Kjær 2250 Light [120]

Miernik Brüel & Kjær 2250 Light spełnia wymogi norm: IEC 61672-1 (2002 – 05) klasa 1, IEC 60651 (1979) ze zmianą 1 (1993 – 02) oraz 2 (2000 – 10) typ 1, IEC 60804 (2000 – 10) typ 1.

Tabl. 9. Parametry techniczne miernika poziomu natężenia dźwięku – Brüel&Kjær 2250 Light [120]

Cecha	Wartość
Zakres częstotliwości pomiarowych	5,6 Hz – 20 kHz ze standardowym wstępnie spolaryzowanym mikrofonem pola swobodnego ½” typ 4950 o czułości 50 mV/Pa
Zakres pomiarowy	16,4 - 140,0 dB(A); 43,0 - 142,8 dB(C) wartość szczytowa
Zakres dynamiczny	120 dB
Napięcie polaryzacji mikrofonu	0 lub 200 V
Charakterystyki korekcji częstotliwościowej	A, B, C, Z
Stałe czasowe	F, S, I
Całkowity poziom szumów własnych analizatora	16,4 dB(A)
Czułość mikrofonu	50 mV/Pa (odpowiadająca -26 dB w odniesieniu do 1 V/Pa) $\pm$ 1,5 dB
Dokładność pomiarowa	$\pm$ 0,5 dB
Zapis wyników	w pamięci wewnętrznej (20 MB), na 2 kartach SD/SDHC lub na zewnętrznej pamięci USB

5.3.2. Pomiary stanowiskowe hałasu

Kamera akustyczna jest urządzeniem pozwalającym na rejestrację obrazów i przebiegów ciśnienia akustycznego. Matryca kamery składa się z kilkudziesięciu lub nawet kilkuset mikrofonów odpowiednio rozmieszczonych względem siebie, a także centralnie

umieszczonego rejestratora wideo. Każdy z mikrofonów rejestruje i zapisuje ciśnienie akustyczne, a więc ważne jest, aby przed pomiarem wprowadzić dane takie jak odległość urządzenia od źródła dźwięku czy temperaturę otoczenia. Kamera pozwala na pokazanie rozkładu ciśnienia akustycznego nałożonego na obraz. Jest to tak zwana mapa akustyczna. SoundCam Bionic XS to urządzenie które lokalizuje źródła dźwięku w czasie rzeczywistym i wyświetla je na obrazie. Kamera ma średnicę 28 cm i składa się ze 112 mikrofonów. Zoptymalizowane rozmieszczenie mikrofonów pozwala na dokładną lokalizację źródła dźwięku i wysoki zakres dynamiki.

Metoda kształtowania wiązki polega na określaniu głównego kierunku dźwięku poprzez sumowanie sygnałów ciśnienia akustycznego. Matryca pomiarowa złożona z M mikrofonów znajdujących się w odległościach r_m ($m = 1, 2, \dots, M$) w płaszczyźnie układu współrzędnych x - y . Sygnały zmierzonego ciśnienia P_m są opóźnione następnie zsumowane, a w_m jest zbiorem współczynników wag zastosowanych do indywidualnych sygnałów z mikrofonów. Indywidualne czasy opóźnień Δ_m zostają dobrane w celu osiągnięcia wysokiej czułości, w kierunku określonym przez wektor κ . Sygnały pochodzące z innych kierunków nie będą zgodne, a więc nie będą dodawane. Wzory (17, 18) przedstawiono poniżej [57]:

$$b(\kappa, t) = \sum_{m=1}^M w_m P_m(t - \Delta_m(\kappa)) \quad (17)$$

$$\Delta_m = \frac{\kappa * r_m}{c} \quad (18)$$

gdzie:

M – liczba mikrofonów, szt,

r_m – odległości mikrofonów, mm,

w_m – zbiór współczynników wag,

P_m – zmierzone ciśnienie, Pa,

Δ_m – czasy opóźnień, s,

κ – wektor określający kierunek,

c – prędkość rozchodzenia się dźwięku, m/s.

Pomiary stanowiskowe zostały przeprowadzone pracowni badań pojazdów samochodowych na Wydziale Transportu i Inżynierii Lotniczej Politechniki Śląskiej. Podczas badań samochody zostały umieszczone na podnośniku. Wykonano badania hałasu w okolicy silnika oraz od spodu

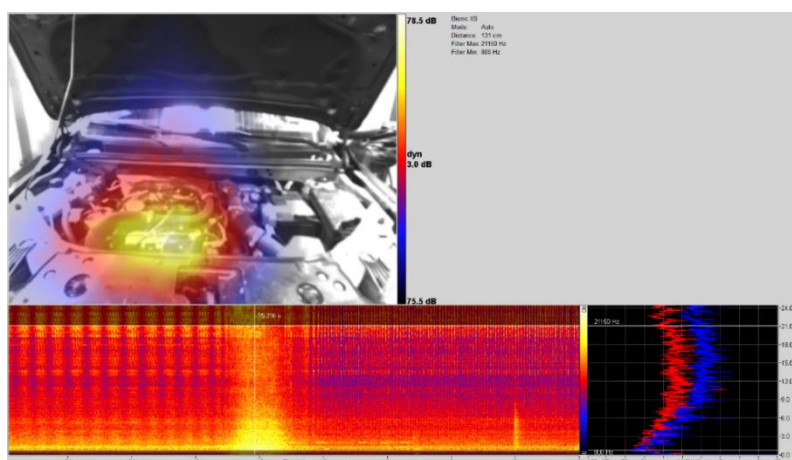
pojazdu, czyli w okolicy układu napędowego. Podczas pomiarów włączony był napęd więc koła wykonywały ruch obrotowy z prędkością 20 km/h. Przebieg pomiarów przedstawia rysunek 22.



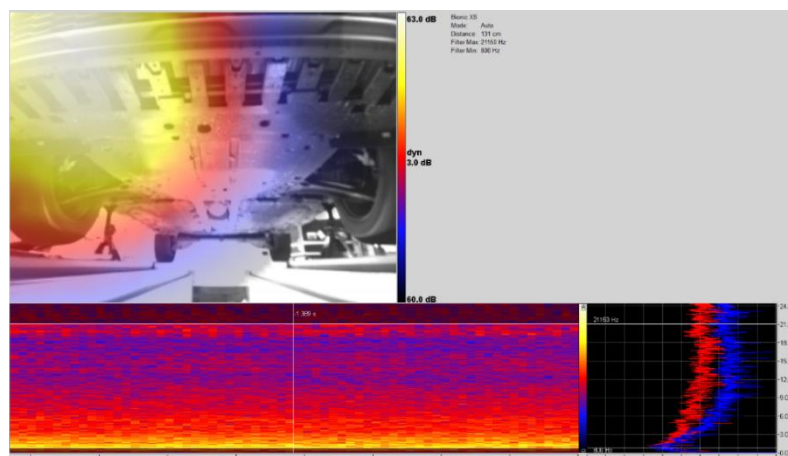
Rys. 22. Ustawienie kamery akustycznej podczas pomiaru poziomu natężenia dźwięku w badanych pojazdach [opracowanie własne]

a) Pomiary za pomocą kamery akustycznej w pojeździe z napędem konwencjonalnym

Przykładowe obrazy uzyskane podczas badań za pomocą kamery akustycznej przedstawiono na rysunkach 23 i 24.



Rys. 23. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika – zwiększanie obrotów wału korbowego [opracowanie własne]

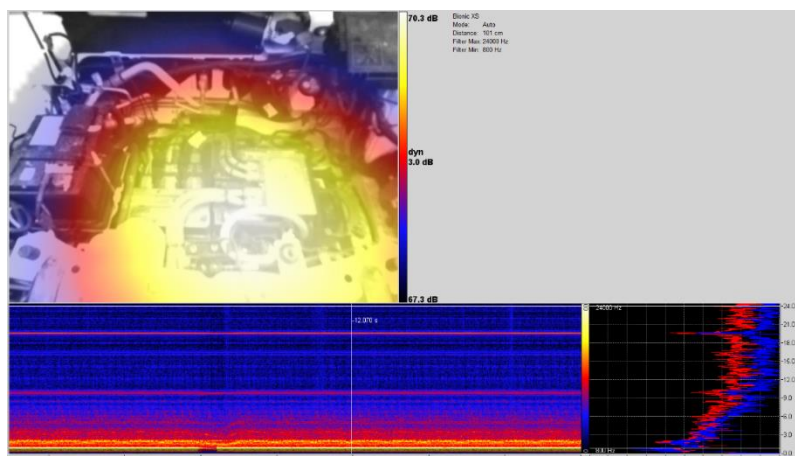


Rys. 24. Widok z kamery akustycznej – układ napędowy [opracowanie własne]

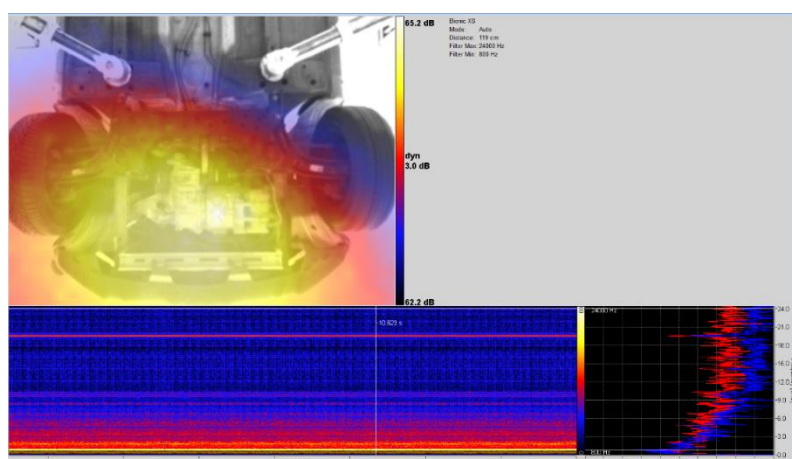
Wyniki pomiarów przeprowadzonych za pomocą kamery akustycznej prezentują się następująco. Hałas pochodzący z silnika pracującego na biegu jałowym wyniósł 69,9 dB. Podczas zwiększania prędkości obrotowej wału korbowego silnika hałas osiągał wartość 78,5 dB. Analiza częstotliwości wykazała, iż w samochodzie spalinowym hałas obejmuje szerokie spektrum częstotliwości, zaczynając od niskich (poniżej 100 Hz) aż do częstotliwości około 2000-2500 Hz. To szerokie pasmo jest efektem pracy wielu mechanicznych elementów silnika spalinowego oraz układu napędowego. Praca silnika spalinowego wytwarzała drgania w niskim zakresie częstotliwości (około 100-300 Hz) dla warunków pracy przy jeździe z prędkością 20 km/h. Drgania przy zwiększaniu prędkości obrotowej wału korbowego silnika pojawiają się w zakresie średnich i wysokich częstotliwości (powyżej 600 Hz). Spowodowane jest to występującym w silniku zapłonem i suwem pracy.

b) Pomiar za pomocą kamery akustycznej w pojeździe z napędem elektrycznym

Przykładowe obrazy uzyskane podczas badań za pomocą kamery akustycznej przedstawiono na rysunkach 25 i 26.



Rys. 25. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego [opracowanie własne]



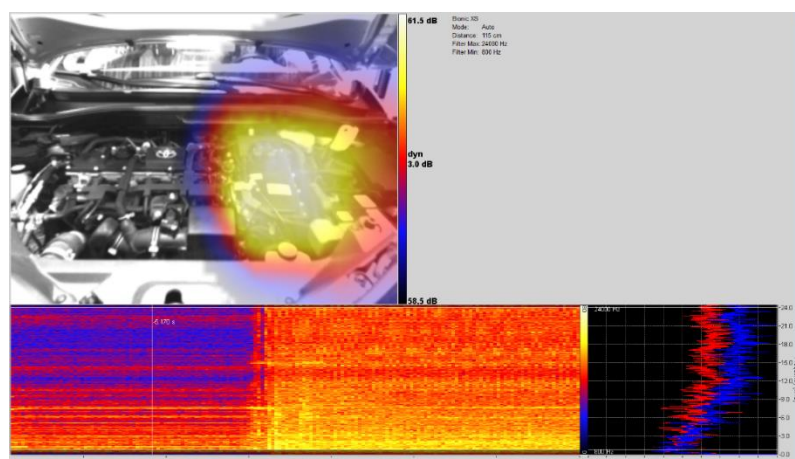
Rys. 26. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego i układu napędowego [opracowanie własne]

W samochodzie z napędem elektrycznym zauważyć można, że hałas pochodzący z silnika i elementów układu wysokiego napięcia podczas włączonego napędu wyniósł 70,3 dB. Jest to hałas o wyższej częstotliwości niż w przypadku pojazdu z napędem konwencjonalnym. Źródłem tego hałasu w dużej mierze jest system AVAS, który emituje hałas przy prędkości około 20 km/h. System ten według danych literaturowych emituje hałas o wartości od 56 dB do 75 dB, co pokrywa się z uzyskanymi wynikami badań.

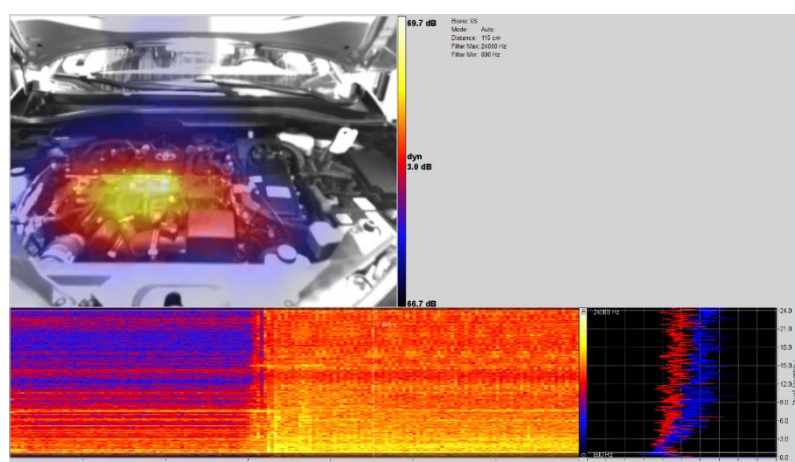
W samochodzie elektrycznym zakres obserwowanych częstotliwości jest wąski i mało zróżnicowany. Najbardziej widoczne pasmo to częstotliwości poniżej 500 Hz, które są charakterystyczne dla pracy silnika elektrycznego. Wyższe częstotliwości (do 5 kHz), wynikają z pracy systemu AVAS. Wykresy wskazują na niższy poziom natężenia dźwięku (mniej intensywny kolor) niż w przypadku samochodu spalinowego.

c) Pomiary za pomocą kamery akustycznej w pojeździe z napędem hybrydowym

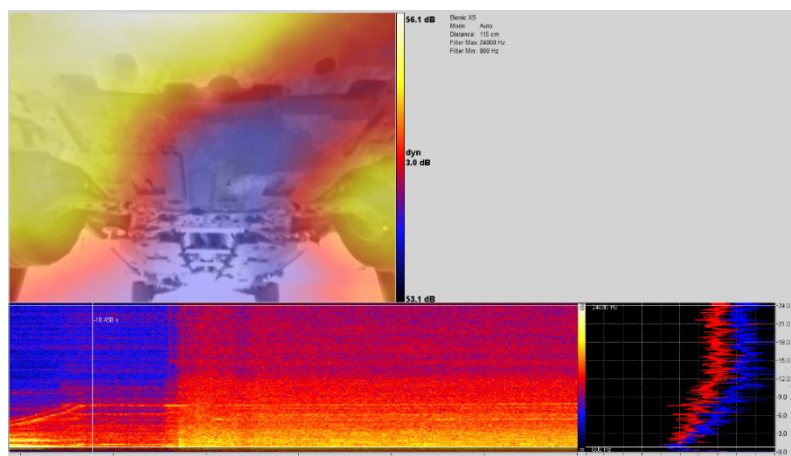
Przykładowe obrazy uzyskane podczas badań za pomocą kamery akustycznej przedstawiono na rysunkach 27-30.



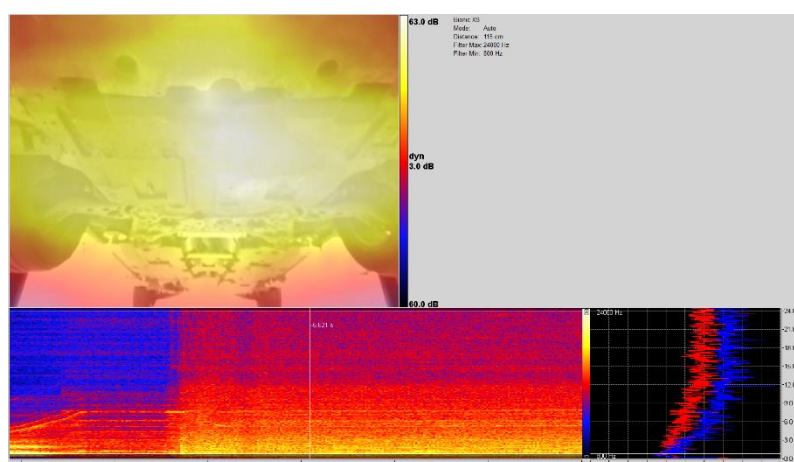
Rys. 27. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego w napędzie hybrydowym [opracowanie własne]



Rys. 28. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika spalinowego w napędzie hybrydowym [opracowanie własne]



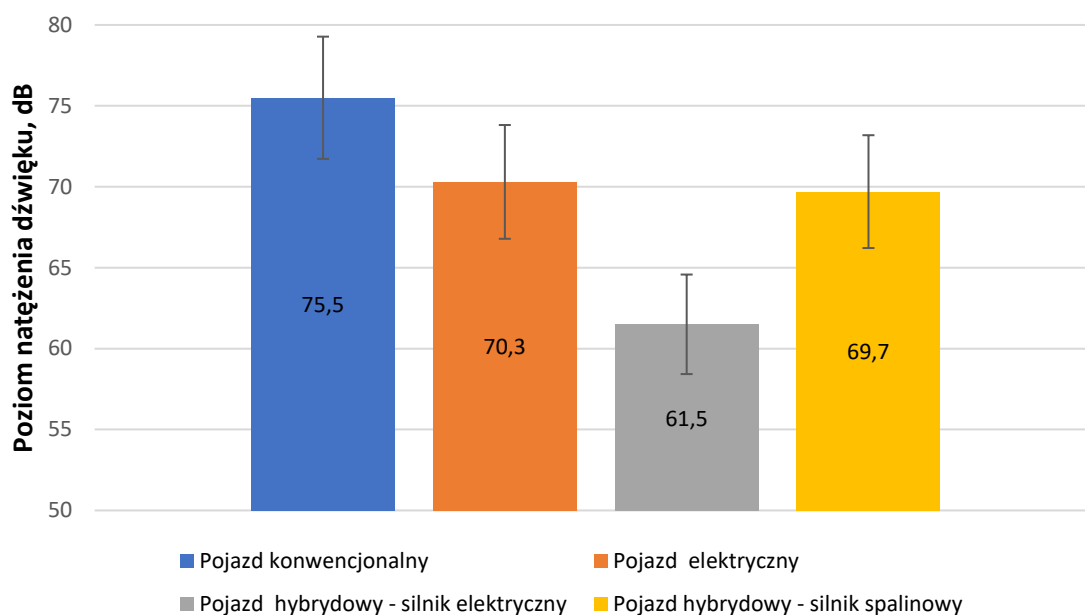
Rys. 29. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego i układu napędowego w pojeździe hybrydowym [opracowanie własne]



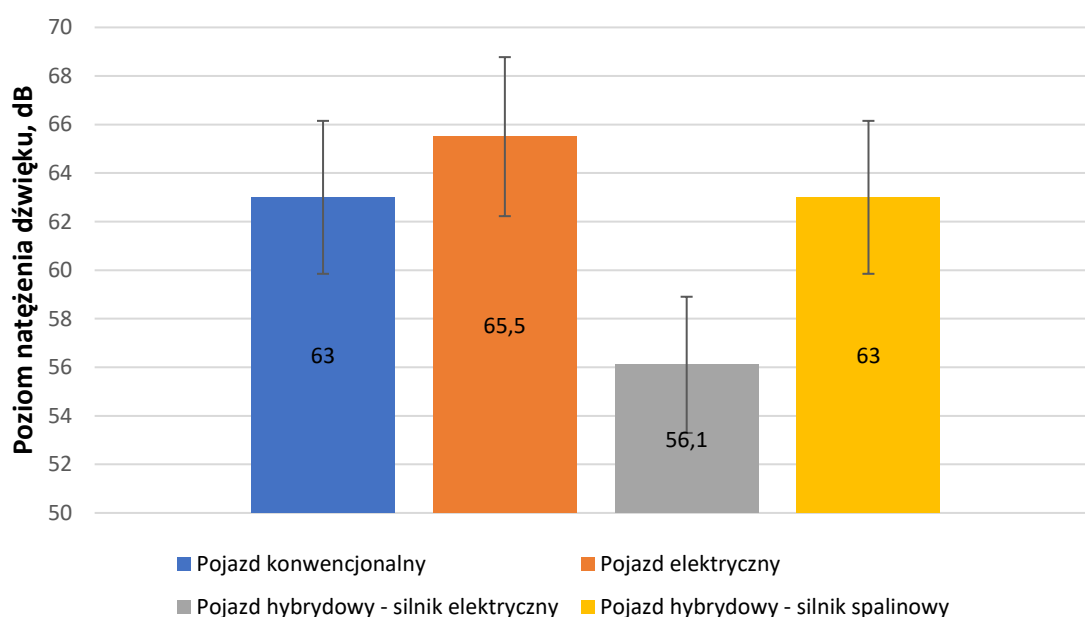
Rys. 30. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika spalinowego i układu napędowego w pojeździe hybrydowym [opracowanie własne]

Pomiary hałasu w pojeździe z napędem hybrydowym w przypadku uruchomionego silnika elektrycznego wykazały wartość 61,5 dB, natomiast podczas pracy silnika spalinowego 69,7 dB. Na podstawie wykresów (Rys. 27-30) można przeanalizować różnice w częstotliwościach i poziomie natężenia dźwięku generowanego przez samochód hybrydowy w zależności od uruchomionego napędu. W przypadku napędu elektrycznego (Rys. 27 i 28) dominują niskie częstotliwości. Postać widma (brak charakterystycznych wysokich częstotliwości w sygnale) sugeruje, że główne źródła hałasu pochodzą z (komponentów elektrycznych i mechanicznych układ napędowy), poza częstotliwością charakterystyczną dla systemu AVAS. Z kolei widmo opisujące pracę napędu spalinowego w samochodzie hybrydowym (Rys. 29 i 30) posiada wartości charakterystyczne w szerokim częstotliwości.

Na rysunkach 31 i 32 przedstawiono maksymalne wartości poziomu natężenia dźwięku uzyskane podczas pomiarów dla poszczególnych pojazdów wytypowanych do badań.



Rys. 31. Maksymalne wartości poziomu natężenia dźwięku zarejestrowane przez kamerę dźwięku podczas pracy silników przy prędkości 20 km/h – komora silnika [opracowanie własne]



Rys. 32. Maksymalne wartości poziomu natężenia dźwięku zarejestrowane przez kamerę dźwięku podczas pracy układów napędowych (podwozie) na podnośniku przy prędkości 20 km/h [opracowanie własne]

Pomiary poziomu natężenia dźwięku zarejestrowanego w komorze silnika wykazały, iż przy uruchomionym napędzie przy prędkości 20 km/h hałas pochodzący z silnika w odległości

około 1 metra wyniósł 75,5 dB w pojeździe z napędem konwencjonalnym (Pojazd 1), 70,3 dB w pojeździe z napędem elektrycznym (Pojazd 2) oraz w samochodzie z napędem hybrydowym (Pojazd 3) 61,5 dB dla silnika elektrycznego i 69,7 dB dla silnika spalinowego.

Pomiary poziomu natężenia dźwięku wykonane od podwozia pojazdów (na podnośniku) wykazały, iż uruchomionym napędzie przy prędkości 20 km/h hałas pochodzący z silnika i układu napędowego w odległości około 1 metra wyniósł 63 dB w pojeździe z napędem konwencjonalnym (Pojazd 1), 65,2 dB w pojeździe z napędem elektrycznym (Pojazd 2) oraz w samochodzie z napędem hybrydowym (Pojazd 3) 56,1 dB dla silnika elektrycznego i 63 dB dla silnika spalinowego.

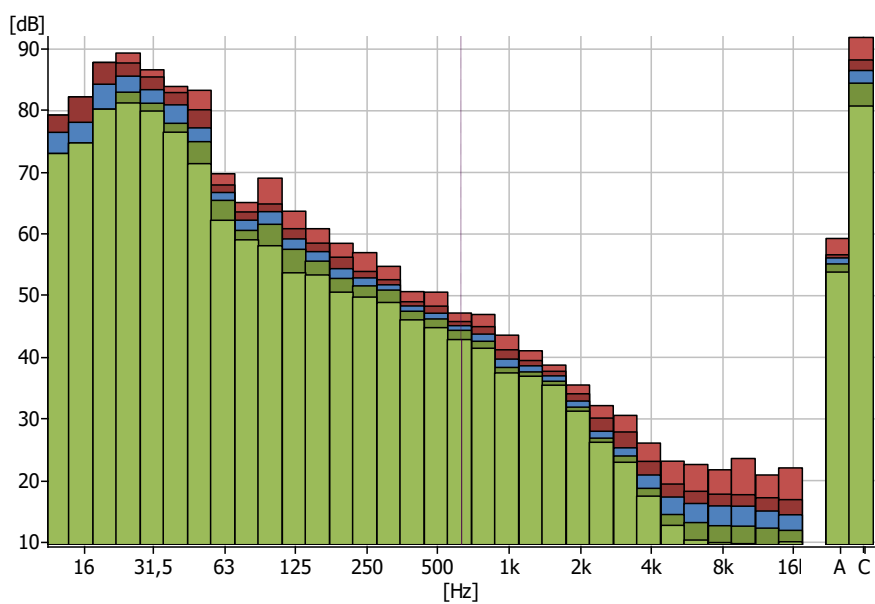
5.3.3. Pomiary hałasu wewnątrz pojazdów

Pomiary hałasu wewnątrz pojazdów prowadzono w samochodzie z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym w ruchu miejskim i autostradowym. Wykonano pomiary przy prędkościach 30 km/h oraz 50 km/h w ruchu miejskim oraz przy prędkościach 100 km/h i 140 km/h w ruchu autostradowym. Miernik umieszczony był w okolicy zagłówka fotela kierowcy. Za każdym razem wykonano po 10 pomiarów, z czego każdy trwał około 10 sekund. Temperatura podczas pomiarów wynosiła około 10° C. Było bezwietrznie i bez opadów. Nie zalegała pokrywa śnieżna. Na rysunku 33 przedstawiono sposób przeprowadzenia pomiarów hałasu wewnętrznego. Wyniki pomiarów przedstawiono jako średnią arytmetyczną zebranych wyników, odrzucając wartości najniższe i najwyższe. Na wykresach zaznaczono słupki błędów. W celu rozróżnienia warunków użytkowania pojazdów wyniki na wykresach oznaczono ramkami. Zielona ramka oznacza pojazdy przeznaczone dla użytku współdzielonego, natomiast fioletowa oznacza pojazd użytkowany prywatnie.

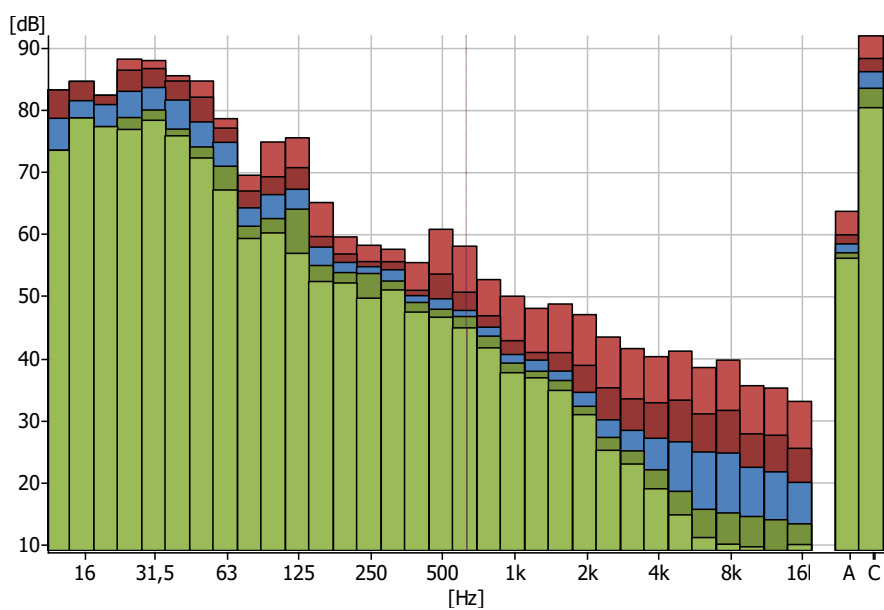


Rys. 33. Pomiary hałasu wewnętrznego – po lewej stronie urządzenie pomiarowe, po prawej stronie umiejscowienie miernika [opracowanie własne]

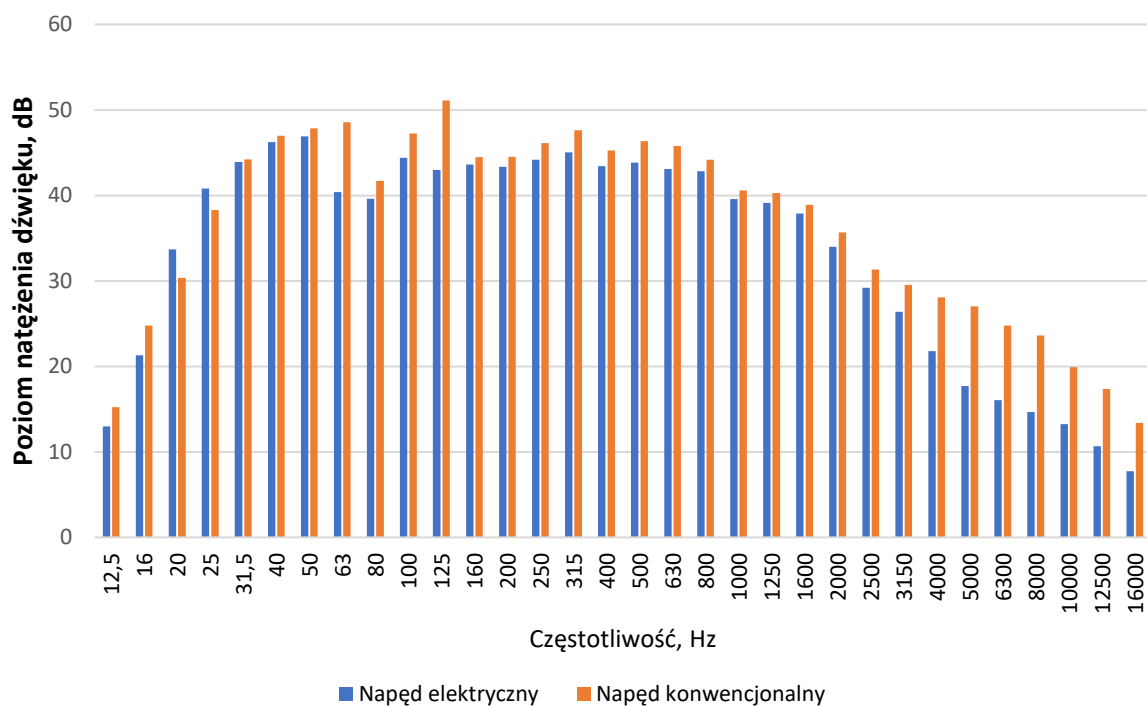
Dokonano analizy częstotliwościowej dźwięku z użyciem filtrów 1/3-oktawowych. Na rysunkach 34 i 35 przedstawiono przykładowe analizy częstotliwości hałasu wewnętrznego podczas jazdy dla różnych typów napędu, bez zastosowania korekcji. Następnie skorygowano zebrane wyniki, stosując filtry korekcyjne A i C, które wykorzystano także w kolejnych pomiarach poziomu natężenia dźwięku. Wykresy po korekcji za pomocą krzywych A i C przedstawiono na rysunkach 36 i 37.



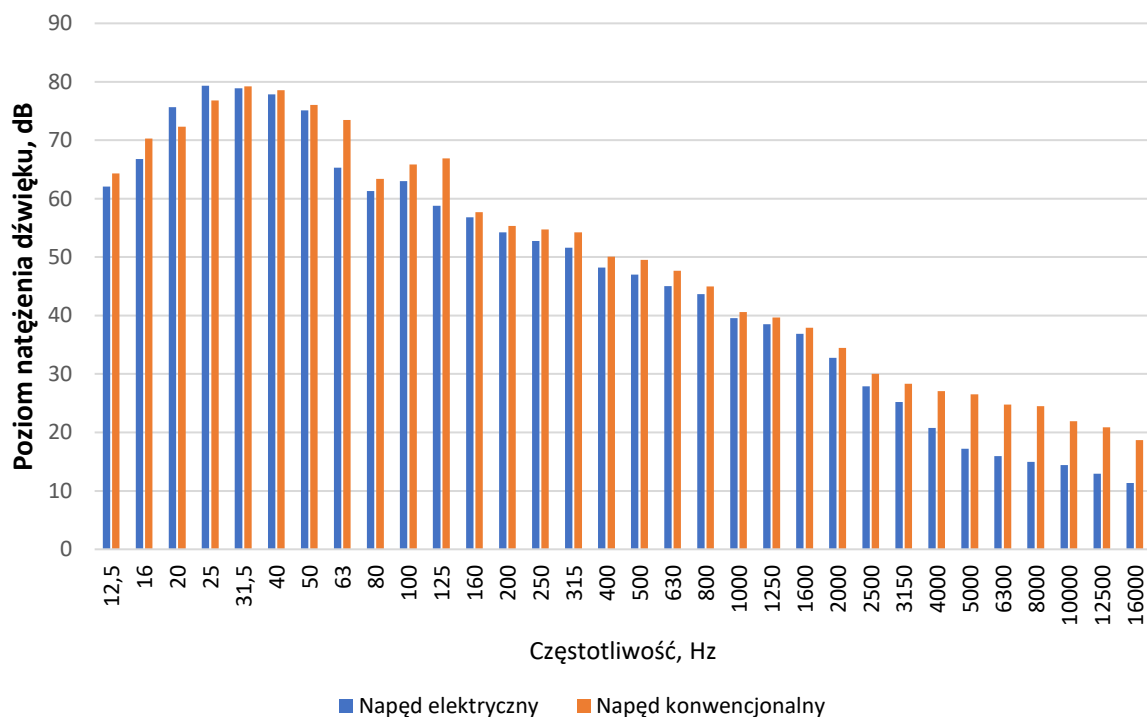
Rys. 34. Przykładowe wyniki analizy częstotliwościowej dźwięku dla napędu elektrycznego [opracowanie własne]



Rys. 35. Przykładowe wyniki analizy częstotliwościowej dźwięku dla napędu konwencjonalnego [opracowanie własne]



Rys. 36. Poziom natężenia dźwięku w pasmach tercjowych dla napędu elektrycznego oraz konwencjonalnego scharakteryzowana krzywą korekcyjną A [opracowanie własne]



Rys. 37. Poziom natężenia dźwięku w pasmach tercjowych dla napędu elektrycznego oraz konwencjonalnego scharakteryzowana krzywą korekcyjną C [opracowanie własne]

Na rysunkach 34 i 35 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe bez krzywych ważenia. Na rysunku 36 przedstawiono te same wykresy, jedna po uwzględnieniu korekcji za pomocą krzywej A oraz na rysunku 37 z uwzględnieniem korekcji C. Analiza częstotliwości wykazała, iż najwyższe wartości w niskich częstotliwościach (około 25-63 Hz) spowodowane są głównie hałasem pochodzącym w pracy układu napędowego, ze współpracy opon z nawierzchnią oraz hałasem aerodynamicznym. Jednak w napędzie spalinowym widmo hałasu jest bardziej równomiernie rozłożone i widoczne w szerszym zakresie częstotliwości (do ok. 4 kHz). Dla napędu elektrycznego widoczne są wyraźne szczyty przy niskich częstotliwościach, a poziomy powyżej 1 kHz są niższe, co potwierdza cichszą i bardziej jednolitą charakterystykę hałasu. W zakresie od 125 Hz do 500 Hz różnica jest bardziej zauważalna – samochód spalinowy generuje wyższy poziom hałasu. W szczególności dla pasm 125 Hz i 250 Hz, słupki na wykresie dla napędu spalinowego są wyższe niż dla napędu elektrycznego, co świadczy o tym, że w tym zakresie samochód spalinowy generuje bardziej intensywny hałas spowodowany pracą jednostki napędowej. Powyżej 500 Hz dla samochodu spalinowego wartości są nadal stosunkowo wysokie, podczas gdy dla napędu elektrycznego wyraźnie opadają. W zakresie powyżej 1 kHz hałas generowany przez samochód elektryczny jest znacznie niższy. Dla samochodu spalinowego słupki w wysokich częstotliwościach (do około 4 kHz) są nadal obecne, choć niższe niż dla niskich częstotliwości, co sugeruje obecność dźwięków o wyższych częstotliwościach, które są związane z pracą mechanicznych elementów silnika. Powyżej 4 kHz poziom hałasu dla obu napędów jest niski, jednak samochód spalinowy nadal wykazuje wyższą intensywność.

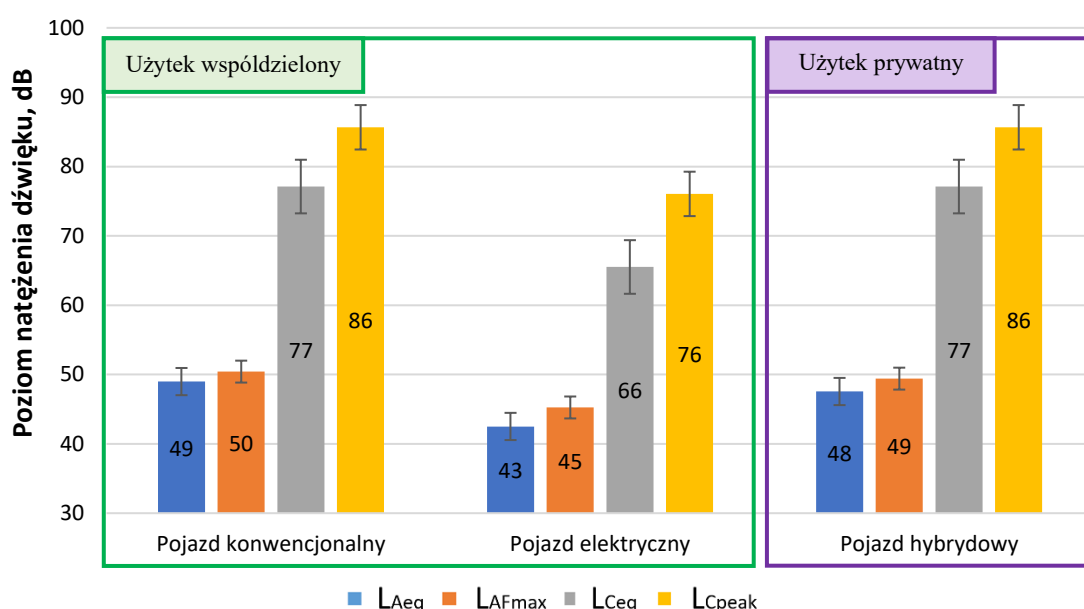
Dla obu napędów poziomy dźwięku stopniowo zmniejszają się w wyższych częstotliwościach, ale ten spadek jest bardziej zauważalny dla napędu elektrycznego. Powyżej 1000 Hz różnice między L_{Aeq} i L_{Ceq} stają się niewielkie w obu przypadkach, ale są bardziej jednolite w napędzie elektrycznym. W napędzie spalinowym różnice są większe w całym zakresie, co wskazuje na obecność dodatkowych komponentów hałasu związanych z pracą silnika i spalaniem. Zbliżone wartości przy niskich i średnich częstotliwościach związane są z hałasem pochodzącym z opon oraz powietrza opływającego samochód.

a) Pomiar hałasu w ruchu miejskim przy prędkości jazdy wynoszącej 30 km/h

Za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku wykonano pomiary hałasu wewnątrz wszystkich pojazdów podczas jazdy w ruchu miejskim przy prędkości 30 km/h. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 10) oraz w formie wykresu (Rys. 38).

Tabl. 10. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 30 km/h [opracowanie własne]

Poziom natężenia dźwięku	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
L_{Aeq} , dB	48,98	42,51	47,55
L_{AFmax} , dB	50,42	45,25	49,41
L_{Ceq} , dB	77,11	65,51	76,95
L_{Cpeak} , dB	85,66	76,05	86,7



Rys. 38. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h [opracowanie własne]

Badania hałasu wewnątrz pojazdów wykazały, że hałas (L_{Aeq}) w ruchu miejskim przy niskich prędkościach około 30 km/h był najniższy w pojazdach z napędem elektrycznym (Pojazd 2) i wynosił około 43 dB(A). Dla pojazdów z napędem hybrydowym (Pojazd 3) i konwencjonalnym (Pojazd 1) hałas kształtował się bardzo podobnie (48 dB(A) i 49 dB(A)). W przypadku maksymalnej chwilowej wartości dźwięku L_{Cpeak} najniższą wartość odnotowano w Pojeździe 2 i wyniosła ona 76 dB(C). W Pojeździe 1 wyniosła ona 86 dB(C). Natomiast najwyższą wartość szczytową odnotowano w Pojeździe 3 (86 dB(C)). Najwyższa emisja hałasu wewnętrznego z napędu hybrydowego może wynikać z faktu, że pojazd podczas

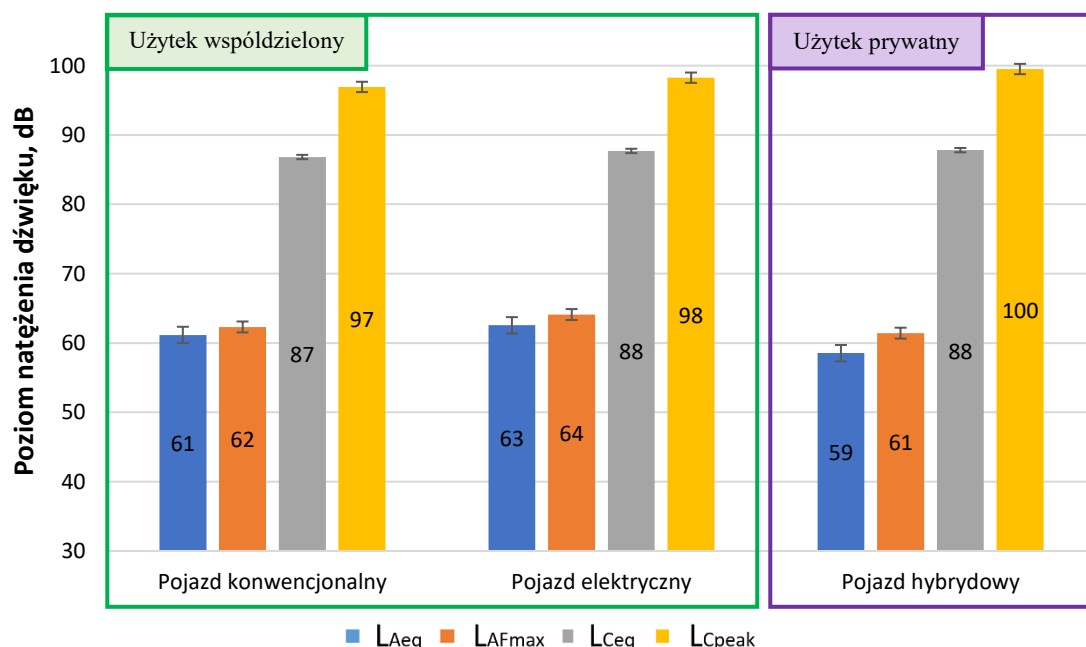
jazdy z tą prędkością wykorzystywał zarówno silnik spalinowy, jak i silnik elektryczny, co mogło przełożyć się na wyższy poziom hałasu z obu tych źródeł.

b) Pomiar hałasu w ruchu miejskim przy prędkości jazdy wynoszącej 50 km/h

Za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku wykonano pomiary hałasu wewnątrz wszystkich pojazdów podczas jazdy w ruchu miejskim przy prędkości 50 km/h. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 11) oraz w formie wykresu (Rys. 39).

Tabl. 11. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 50 km/h [opracowanie własne]

Poziom natężenia dźwięku	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
L_{Aeq} , dB	61,16	62,55	58,53
L_{AFmax} , dB	62,31	64,1	61,42
L_{Ceq} , dB	86,82	87,7	87,81
L_{Cpeak} , dB	96,93	98,26	99,51



Rys. 39. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h [opracowanie własne]

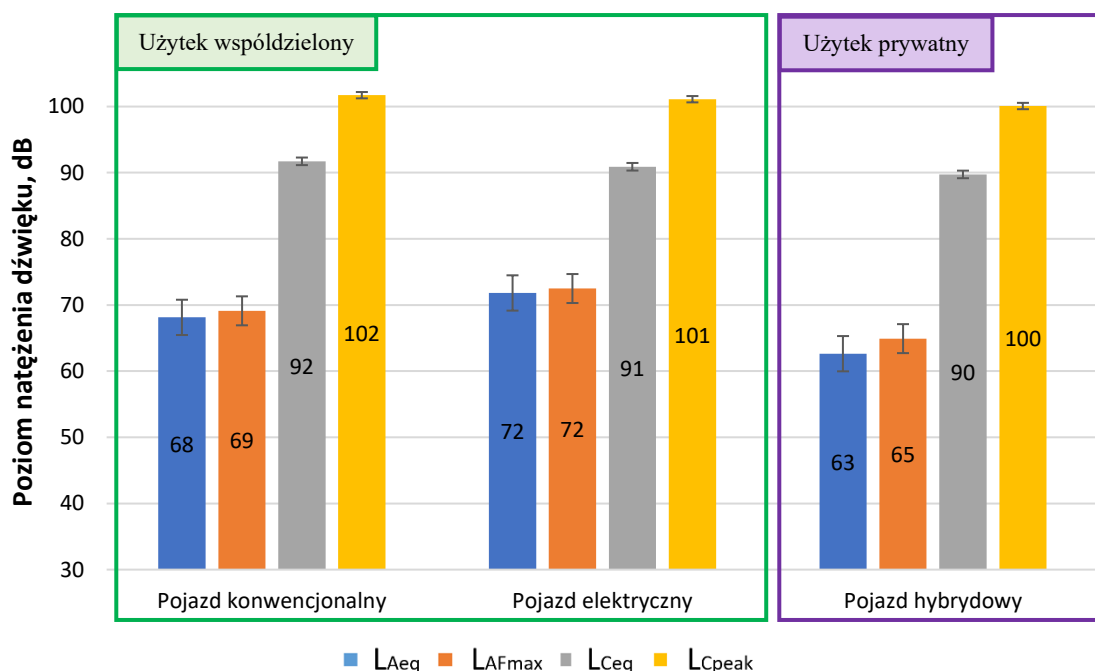
Podczas jazdy z prędkością 50 km/h najmniejszą emisję hałasu (L_{Aeq}) zmierzono w pojeździe hybrydowym (59 dB(A)), następnie w pojeździe spalinowym (61 dB(A)), a w pojeździe elektrycznym zarejestrowano najwyższy hałas (63 dB(A)). W przypadku maksymalnej chwilowej wartości dźwięku L_{Cpeak} była zbliżona dla wszystkich pojazdów. W Pojeździe 1 wyniosła ona 97 dB(C), w Pojeździe 2 – 98 dB(C) oraz w Pojeździe 3 – 100 dB(C).

c) Pomiar hałasu w ruchu autostradowym przy prędkości jazdy wynoszącej 100 km/h

Za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku wykonano pomiary hałasu wewnątrz wszystkich pojazdów podczas jazdy w ruchu autostradowym przy prędkości 100 km/h. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 12) oraz w formie wykresu (Rys. 40).

Tabl. 12. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 100 km/h [opracowanie własne]

Poziom natężenia dźwięku	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
L_{Aeq} , dB	68,13	71,82	62,64
L_{AFmax} , dB	69,12	72,49	64,92
L_{Ceq} , dB	91,72	90,9	89,74
L_{Cpeak} , dB	101,72	101,11	100,08



Rys. 40. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h [opracowanie własne]

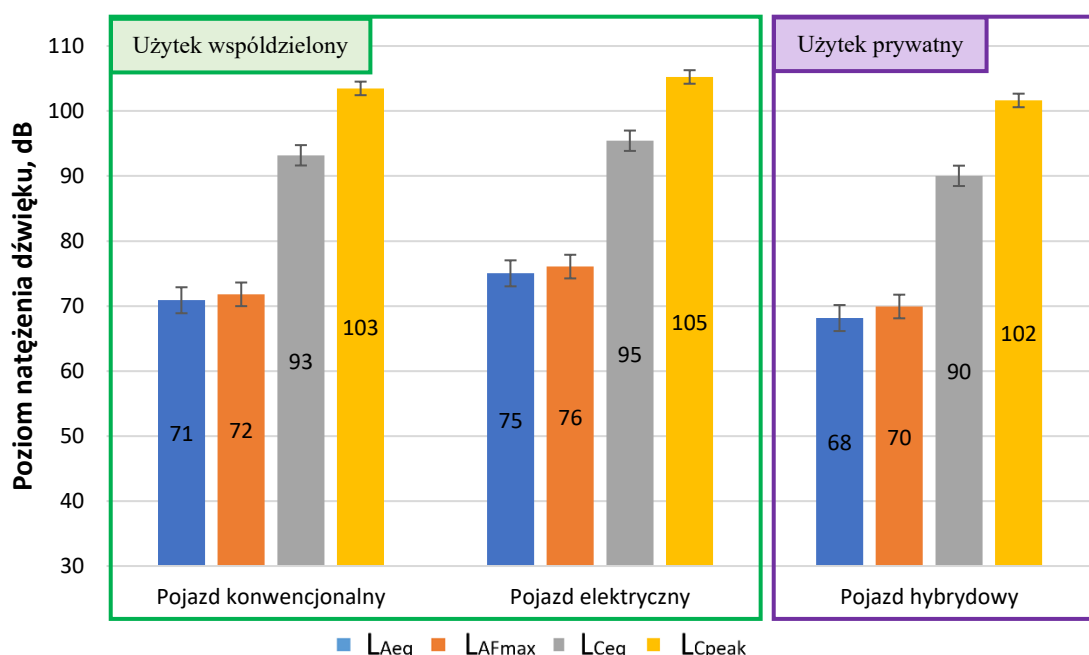
Badania w ruchu autostradowym przy prędkości 100 km/h wykazały, iż najniższy hałas (L_{Aeq}) wewnątrz samochodu zarejestrowano w samochodzie z napędem hybrydowym (63 dB(A)), natomiast w samochodzie elektrycznym zarejestrowano wartości wyższe o prawie 10 decybeli (72 dB(A)). Samochód z silnikiem spalinowym (Pojazd 1) emitował hałas pomiędzy wartościami zmierzonymi w pozostałych samochodach (68 dB(A)). Powodem niższej emisji hałasu przez samochód hybrydowy jest wyższa klasa pojazdu i lepsze wygłuszenie. W pojeździe elektrycznym ze względu na niską cenę zostały zastosowane materiały gorszej jakości oraz zauważono braki w wygłuszeniu drzwi oraz innych elementów. Samochód z napędem konwencjonalnym posiadał wygłuszenie lepszej jakości od pojazdu elektrycznego, co też wykazały pomiary emisji hałasu przy wyższych prędkościach. W przypadku maksymalnej chwilowej wartości dźwięku L_{Cpeak} była zbliżona dla wszystkich pojazdów. W Pojeździe 1 wyniosła ona 102 dB(C), w Pojeździe 2 – 101 dB(C) oraz w Pojeździe 3 – 100 dB(C).

d) Pomiar hałasu w ruchu autostradowym przy prędkości jazdy wynoszącej 140 km/h

Za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku wykonano pomiary hałasu wewnątrz wszystkich pojazdów podczas jazdy w ruchu autostradowym przy prędkości 140 km/h. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 13) oraz w formie wykresu (Rys. 41).

Tabl. 13. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 140 km/h [opracowanie własne]

Poziom natężenia dźwięku	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
L_{Aeq} , dB	70,89	75,03	68,15
L_{AFmax} , dB	71,8	76,07	69,93
L_{Ceq} , dB	93,19	95,43	90,03
L_{Cpeak} , dB	103,48	105,24	101,63



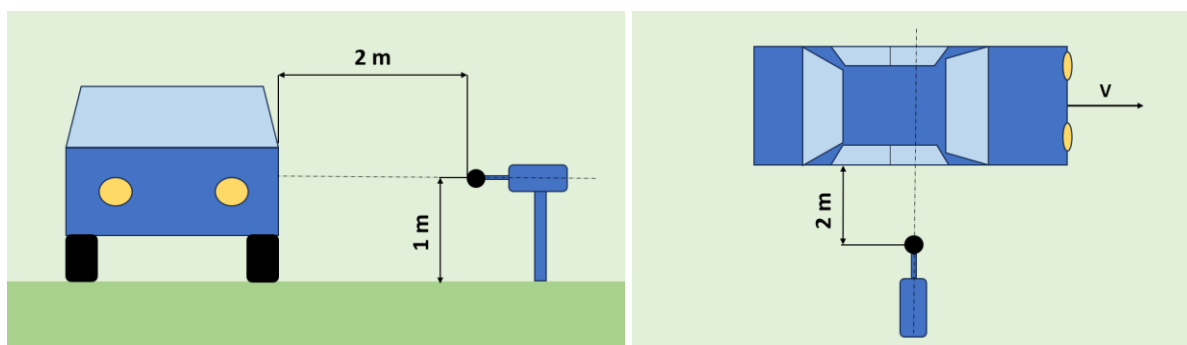
Rys. 41. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h [opracowanie własne]

Badania w ruchu autostradowym przy prędkości 140 km/h wykazały, iż najniższy hałas (L_{Aeq}) wewnątrz samochodu zarejestrowano w samochodzie z napędem hybrydowym (Pojazd 3 – 68 dB(A)), natomiast w samochodzie elektrycznym (Pojazd 2) zarejestrowano wartość 75 dB(A). Samochód z silnikiem spalinowym (Pojazd 1) emitował hałas pomiędzy wartościami zmierzonymi w pozostałych samochodach (68 dB(A)). Powodem niższej emisji hałasu przez samochód hybrydowy może być wyższa klasa pojazdu i lepsze materiały dźwiękochłonne. W pojeździe elektrycznym ze względu na niską cenę zostały zastosowane materiały gorszej jakości oraz zauważono braki w wygłuszeniu drzwi oraz innych elementów. Samochód z napędem konwencjonalnym posiadał materiały dźwiękochłonne lepszej jakości od pojazdu elektrycznego, co też wykazały pomiary emisji hałasu przy wyższych prędkościach.

W przypadku maksymalnej chwilowej wartości dźwięku L_{Cpeak} była zbliżona dla wszystkich pojazdów. W Pojeździe 1 wyniosła ona 103 dB(C), w Pojeździe 2 – 105 dB(C) oraz w Pojeździe 3 – 102 dB(C).

5.3.4. Pomiary hałasu na zewnątrz pojazdów podczas jazdy

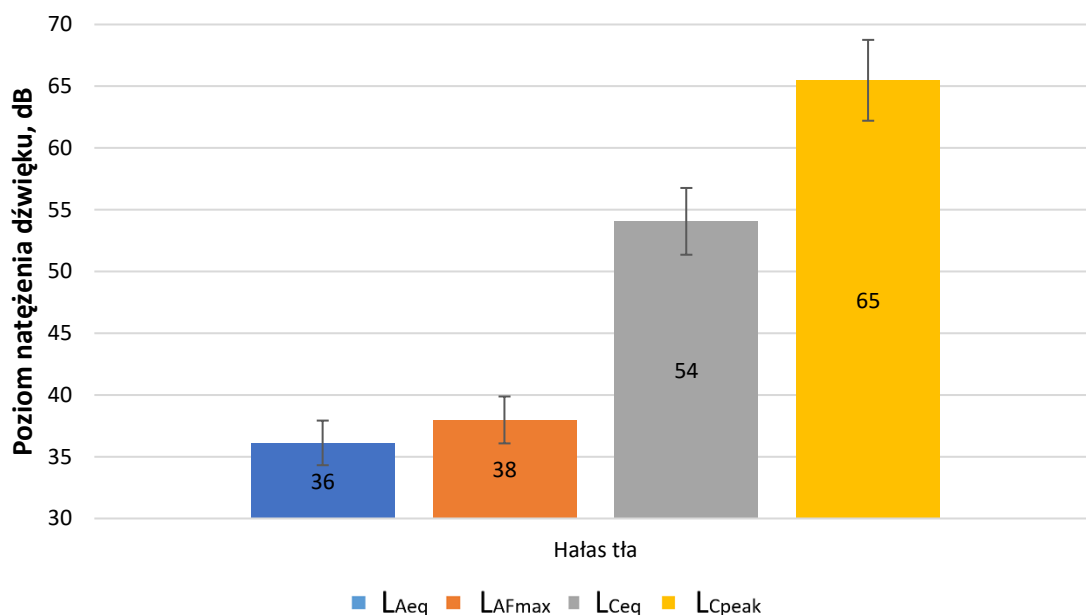
Pomiary hałasu na zewnątrz wykonano na prostej, asfaltowej nawierzchni, na zamkniętej drodze w kontrolowanych warunkach. Podczas pomiarów w obszarze nie przejeżdżały żadne inne pojazdy. Pomiary wykonano w godzinach 16:00-19:00 w niedzielę, podczas zmniejszonego hałasu tła. Wykonano po 10 pomiarów pojazdów przejeżdżających z prędkościami 20 km/h, 50 km/h oraz 80 km/h w odległości 2 m, prostopadłe od przejeżdżających pojazdów. Temperatura podczas pomiarów wynosiła około 10° C. było bezwietrznie i bez opadów deszczu oraz śniegu. Wyniki pomiarów przedstawiono jako średnią arytmetyczną zebranych wyników, odrzucając wartości najniższe i najwyższe. Na wykresach zaznaczono słupki błędów. Na rysunku 42 przedstawiono schemat przeprowadzonych pomiarów. Wyniki badań przedstawiono poniżej. Przed przystąpieniem do badań hałasu z zewnątrz pojazdu wykonano pomiary hałasu tła (Tabl. 14 i Rys. 43).



Rys. 42. Schemat pomiaru hałasu zewnętrznego [opracowanie własne]

Tabl. 14. Poziom natężenia dźwięku tła otoczenia przed przeprowadzeniem pomiarów [opracowanie własne]

	Poziom natężenia dźwięku			
	L_{Aeq} , dB	L_{AFmax} , dB	L_{Ceq} , dB	L_{Cpeak} , dB
Tł	32,62±3,01	34,84±3,09	48,2±0,5	59,28±1,7



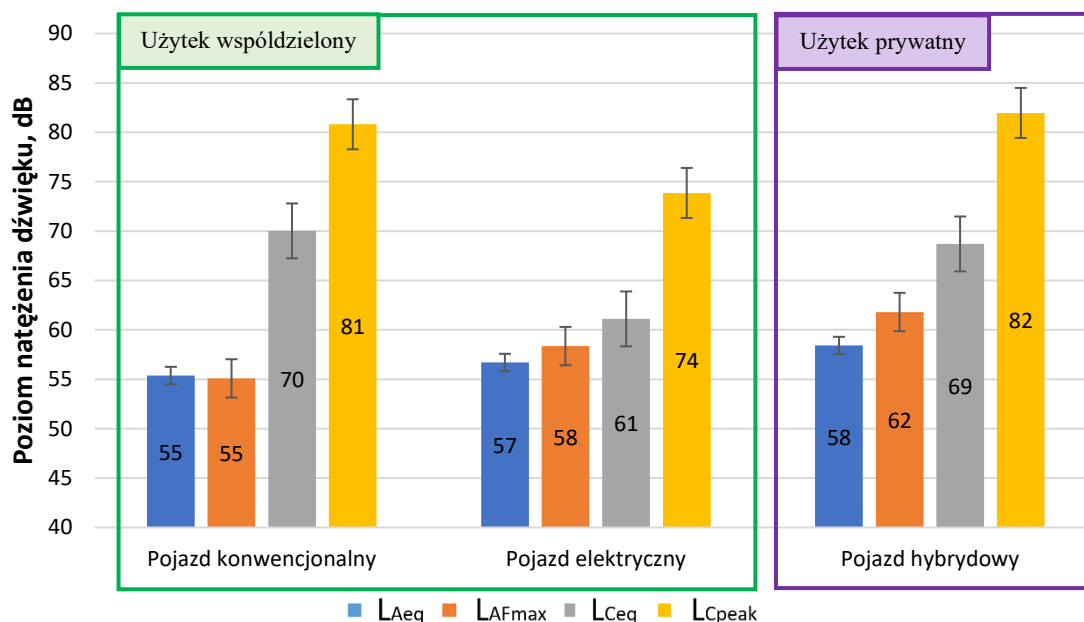
Rys. 43. Poziom natężenia dźwięku tła otoczenia podczas prowadzenia badań [opracowanie własne]

a) Pomiar hałasu przy prędkości jazdy wynoszącej 20 km/h

Za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku wykonano pomiary na zewnątrz wszystkich pojazdów przy ich prędkości jazdy wynoszącej 20 km/h. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 15) oraz w formie wykresu (Rys. 44).

Tabl. 15. Poziom natężenia dźwięku z zewnątrz pojazdów przy prędkości 20 km/h [opracowanie własne]

Poziom natężenia dźwięku	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
L_{Aeq} , dB	55,38	56,70	58,42
L_{AFmax} , dB	55,09	58,36	61,81
L_{Ceq} , dB	70,02	61,11	68,70
L_{Cpeak} , dB	80,81	73,86	81,96



Rys. 44. Poziom natężenia dźwięku emitowanego przez przejeżdżające pojazdy przy prędkości jazdy pojazdów 20 km/h [opracowanie własne]

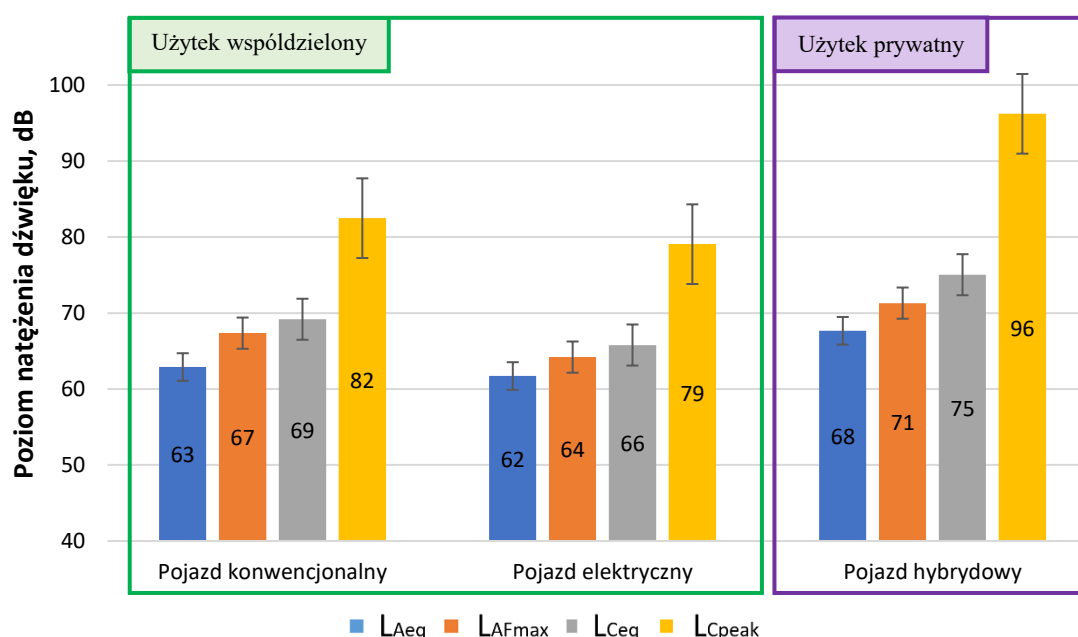
Badanie hałasu zewnętrznego pojazdów testowych przejeżdżających z prędkością 20 km/h wykazało, że poziom hałasu L_{Aeq} był niższy w przypadku Pojazdu 1 (55 dB(A)), podczas gdy w pojeździe 2 wynosił 57 dB(A), a w pojeździe 3, 58 dB(A). Wynika to z faktu, że przy prędkości 20 km/h w samochodach elektrycznych i hybrydowych hałas emitowany jest przez system AVAS. Różnica w hałasie nie była duża, ponieważ system AVAS ma emitować hałas o podobnym poziomie natężenia do hałasu silnika spalinowego. W przypadku maksymalnej chwilowej wartości dźwięku L_{Cpeak} najniższą wartość odnotowano w Pojeździe 2 i wynosiła ona 74 dB(C). W przypadku Pojazdu 1 i Pojazdu 3 wartości były podobne i wyniosły odpowiednio 81 dB(C) i 82 dB(C). Odchylenie standardowe było niewielkie dla wartości równoważnego średniego poziomu dźwięku L_{Aeq} , natomiast dla chwilowych wartości szczytowych L_{Cpeak} było ono wyższe.

b) Pomiar hałasu przy prędkości jazdy wynoszącej 50 km/h

Za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku wykonano pomiary na zewnątrz wszystkich pojazdów przy ich prędkości jazdy wynoszącej 50 km/h. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 16) oraz w formie wykresu (Rys. 45).

Tabl. 16. Poziom natężenia dźwięku z zewnątrz pojazdów przy prędkości 50 km/h [opracowanie własne]

Poziom natężenia dźwięku	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
L_{Aeq} , dB	62,89	61,71	67,66
L_{AFmax} , dB	67,35	64,2	71,3
L_{Ceq} , dB	69,18	65,79	75,04
L_{Cpeak} , dB	82,48	79,06	96,21



Rys. 45. Poziom natężenia dźwięku emitowanego przez przejeżdżające pojazdy przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h [opracowanie własne]

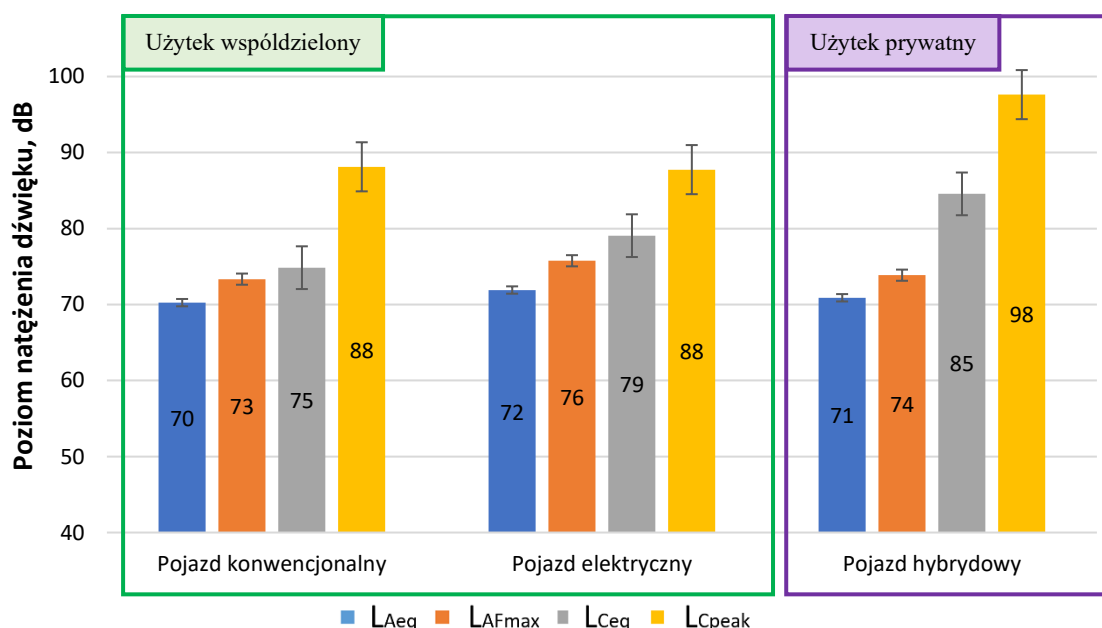
Przy prędkości 50 km/h poziom hałasu L_{Aeq} dla Pojazdu 1 i Pojazdu 2 był bardzo podobny i wynosił 62 dB(A) dla napędu konwencjonalnego i 63 dB(A) dla napędu elektrycznego. W przypadku Pojazdu 3 emisja hałasu wyniosła 68 dB(A) dla napędu hybrydowego. W przypadku maksymalnej chwilowej wartości dźwięku L_{Cpeak} najniższą wartość odnotowano w Pojeździe 2 i wyniosła ona 79 dB(C). W Pojeździe 1 wyniosła ona 82 dB(C). Natomiast najwyższą wartość szczytową odnotowano w Pojeździe 3 (96 dB(C)). Najwyższa emisja hałasu zewnętrznego z napędu hybrydowego może wynikać z faktu, że pojazd podczas jazdy z tą prędkością wykorzystywał zarówno silnik spalinowy, jak i silnik elektryczny, co mogło przełożyć się na większy hałas z obu tych źródeł zasilania. Odchylenie standardowe było niewielkie w przypadku wartości średniego poziomu dźwięku L_{Aeq} , natomiast w przypadku chwilowych wartości szczytowych L_{Cpeak} było ono wyższe.

c) Pomiar hałasu przy prędkości jazdy wynoszącej 80 km/h

Za pomocą miernika poziomu natężenia dźwięku wykonano pomiary na zewnątrz wszystkich pojazdów przy ich prędkości jazdy wynoszącej 80 km/h. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 17) oraz w formie wykresu (Rys. 46).

Tabl. 17. Poziom natężenia dźwięku z zewnątrz pojazdów przy prędkości 80 km/h [opracowanie własne]

Poziom natężenia dźwięku	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
L_{Aeq} , dB	70,25	71,91	70,89
L_{AFmax} , dB	73,34	75,65	73,86
L_{Ceq} , dB	74,85	72,87	84,56
L_{Cpeak} , dB	88,12	87,75	97,62



Rys. 46. Poziom natężenia dźwięku emitowanego przez przejeżdżające pojazdy przy prędkości jazdy pojazdów 80 km/h [opracowanie własne]

Podobne wyniki pomiarów odnotowano przy prędkości 70 km/h. Niższy poziom hałasu odnotowano dla Pojazdu 1 (70 dB(A)), natomiast dla Pojazdu 2 był on o 2 dB wyższy (72 dB(A)). W pojeździe hybrydowym (Pojazd 3) poziom hałasu mieścił się pomiędzy dwoma wcześniej wymienionymi napędami i wyniósł 71 dB(A). Wyniki testów wskazują, że dominują

hałas opon i hałas aerodynamiczny. W przypadku maksymalnej chwilowej wartości dźwięku L_{Cpeak} , taką samą wartość odnotowano dla Pojazdów 1 i 2 i wyniosła ona 88 dB(C). W pojeździe z napędem hybrydowym (Pojazd 3) wartość ta była o 10 dB wyższa i wyniosła 98 dB(C). Może to wynikać z faktu, że Pojazd 3 korzystał z obu napędów (elektrycznego i hybrydowego) podczas jazdy i miał największe opony i nadwozie. Odchylenie standardowe było bardzo niskie dla wartości równoważnego średniego poziomu dźwięku L_{Aeq} , natomiast dla chwilowych wartości szczytowych L_{Cpeak} było ono wyższe.

5.3.5. Analiza i interpretacja wyników z pomiarów hałasu

Pomiary hałasu przeprowadzone na stanowisku za pomocą kamery akustycznej potwierdziły, iż praca silnika spalinowego jest głośniejsza od pracy silnika elektrycznego. Zmierzono maksymalne wartości poziomu natężenia dźwięku oraz ich źródła. Poziom natężenia dźwięku w okolicy silnika (komora silnika) spowodowane jest pracą jednostki napędowej w przypadku samochodu z napędem konwencjonalnym oraz hybrydowym, gdy uruchomiony jest silnik spalinowy. W przypadku napędu elektrycznego hałas spowodowany był dźwiękiem pochodzącym z systemu AVAS. Podczas badań podwozia pojazdów, głównym źródłem hałasu był układ napędowy. Najwyższą wartość poziomu natężenia dźwięku uzyskano podczas pracy napędu elektrycznego. Powodem tego były praca systemu AVAS oraz brak osłony, która tłumiłaby hałas jak w przypadku pozostałych pojazdów. Samochód z napędem konwencjonalnym oraz samochód hybrydowy posiadały osłony silnika od spodu, które ograniczały emisję hałasu. Analiza częstotliwości hałasu w samochodach wykazała, że silnik spalinowy generuje hałas w szerokim zakresie częstotliwości (do 2500 Hz), szczególnie intensywny w niskich i średnich pasmach (100–300 Hz oraz powyżej 600 Hz) z powodu pracy mechanicznych elementów i zapłonu. W samochodach elektrycznych hałas jest bardziej jednolity, skupiony głównie poniżej 500 Hz, co skutkuje niższym poziomem głośności i mniejszą różnorodnością częstotliwości. Wyższe częstotliwości wynikają z systemu AVAS. Samochody hybrydowe wykazują różnice w hałasie w zależności od źródła napędu – elektryczny hałas jest stabilny i skoncentrowany w niskich częstotliwościach, podczas gdy spalinowy generuje szersze i głośniejsze spektrum częstotliwości.

Zarówno pomiary hałasu wewnątrz, jak i na zewnątrz pojazdów, wykazały, że hałas pochodzący ze współpracy opon z nawierzchnią oraz aerodynamiczny są głównymi źródłami hałasu. W obszarach miejskich, przy niskich prędkościach około 30 km/h hałas wewnątrz środków transportu samochodowego z napędem elektrycznym jest niewiele niższy

w stosunku do pojazdów z napędem konwencjonalnym. Głównym źródłem hałasu w przypadku pojazdów z napędem elektrycznym przy niskich prędkościach jest system AVAS. W przypadku prędkości powyżej 50 km/h hałas pochodzący ze współpracy opona – nawierzchnia staje się dominujący i nie ma zasadniczej różnicy w emisji hałasu. Oznacza to, że na drogach szybkiego ruchu oraz na autostradach emisja hałasu z samochodów elektrycznych i hybrydowych nie ulegnie zmniejszeniu w porównaniu do samochodów napędzanych wyłącznie silnikami spalinowymi. Hałas wewnątrz pojazdu zależy od jego klasy wykonania i wygłuszenia.

W warunkach miejskich przy niskiej prędkości (30 km/h) najcichszym pojazdem okazał się pojazd z napędem elektrycznym, co można wyjaśnić brakiem silnika spalinowego. Jednak przy wzroście prędkości pojazd elektryczny generuje wyższe wartości hałasu wewnętrznego (L_{Aeq}) w porównaniu do pozostałych pojazdów, szczególnie na autostradzie. Jest to prawdopodobnie związane z zastosowaniem materiałów gorszej jakości i brakiem odpowiedniego wygłuszenia. Pojazd hybrydowy generował najniższe poziomy hałasu przy wyższych prędkościach, co może być wynikiem bardziej zaawansowanego wygłuszenia i użycia lepszych materiałów dźwiękochłonnych. Samochody hybrydowe często oferują wyższą klasę pojazdu, a dodatkowo ich konstrukcja umożliwia bardziej efektywne tłumienie drgań i hałasów, zwłaszcza przy prędkościach autostradowych. Przy niskich prędkościach jednak pojazd hybrydowy generował hałas porównywalny z pojazdem spalinowym, co może być spowodowane pracą obu napędów (spalinowego i elektrycznego), które mogą generować dodatkowy hałas. Samochody z wyższej klasy materiałami dźwiękochłonnymi wykazywały niższy poziom hałasu wewnętrznego. Pojazd elektryczny, mimo cichego napędu, nie był w stanie skutecznie tłumić hałasów zewnętrznych przy wyższych prędkościach, co wskazuje, że niski koszt produkcji może ograniczać zastosowanie zaawansowanego wygłuszenia. Z kolei pojazd konwencjonalny posiadał lepsze wygłuszenie niż pojazd elektryczny, co pozwoliło mu generować średni poziom hałasu wewnętrznego w porównaniu do pozostałych pojazdów.

Maksymalne chwilowe wartości dźwięku (L_{Cpeak}) były zbliżone we wszystkich pojazdach, jednakże przy wyższych prędkościach pojazd elektryczny często wykazywał nieznacznie wyższe wartości szczytowe, co może być spowodowane słabszym tłumieniem nagłych impulsów dźwiękowych z otoczenia i wewnątrz pojazdu. Pojazdy hybrydowy i spalinowy, mimo różnych poziomów hałasu ciągłego (L_{Aeq}), uzyskiwały podobne wartości szczytowe dźwięku, co sugeruje, że maksymalne wartości hałasu mogą wynikać z zewnętrznych źródeł hałasu, niezależnych od rodzaju napędu.

Napęd spalinowy generuje wyższy hałas we wszystkich zakresach częstotliwości, z dominacją w paśmie niskich częstotliwości oraz znaczącą różnicą w zakresie od 125 Hz do

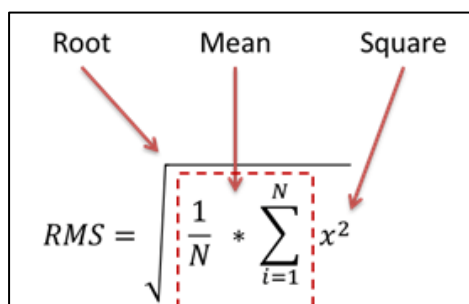
około 4 kHz. Napęd elektryczny charakteryzuje się niższym poziomem hałasu, szczególnie w średnich i wysokich częstotliwościach (powyżej 1 kHz), a więc jest bardziej jednolity i cichszy.

Dyrektywa Rady 70/157/EWG określa dopuszczalny poziom hałasu emitowanego przez pojazd do 74 dB(A) dla samochodów osobowych. Norma ISO 5128 określa pomiary hałasu wewnątrz pojazdów, nie określa jednak wartości dopuszczalnych. Hałas wewnątrz pojazdów podczas jazdy miejskiej mieści się w przedziale 35-70 dB(A) co może prowadzić do spadku koncentracji, a podczas jazdy autostradowej poziom hałasu przekracza nawet 70 dB(A), co może powodować bóle głowy oraz osłabienie słuchu podczas długotrwałej jazdy. Pomiary emisji hałasu wewnątrz pojazdu określa norma ISO 5128. Norma ta opisuje metody pomiaru hałasu wewnątrz pojazdów, ale nie definiuje konkretnych dopuszczalnych poziomów. Wyiki pomiarów nie przekraczają jednak wartości maksymalnej określonej w rozporządzeniu, która dla L_{Aeq} wynosi 80 dB(A).

5.4. Pomiary drgań

Podczas pomiaru drgań mierzy się wielkości fizyczne: przyspieszenie, prędkość i przemieszczenie drgań mechanicznych. Dla każdej z tych wartości można podać amplitudę drgań. Będzie to różnica pomiędzy najmniejszym i największym chwilowym poziomem drgań (tzw. amplituda „Peak-Peak” PP) lub połowa tej wielkości (tzw. amplituda „Zero-Peak” ZP). Amplituda nie jest jednak najpopularniejszą miarą drgań. Najczęściej używana jest wartość opisywana jako RMS. W analizie sygnałów drgań jest to najpopularniejsza wartość liczbową opisująca średni „poziom drgań” danej maszyny, jest to tzw. wartość skuteczna sygnału.

Znaczenie wskaźnika RMS jest opisane w jego nazwie, tj. Root Mean Square. Człon Root oznacza obliczenie pierwiastka, drugi człon Mean obliczenie wartości średniej, a trzeci Square, że każda wartość sygnału jest podniesiona do kwadratu (Rys. 47) [121].

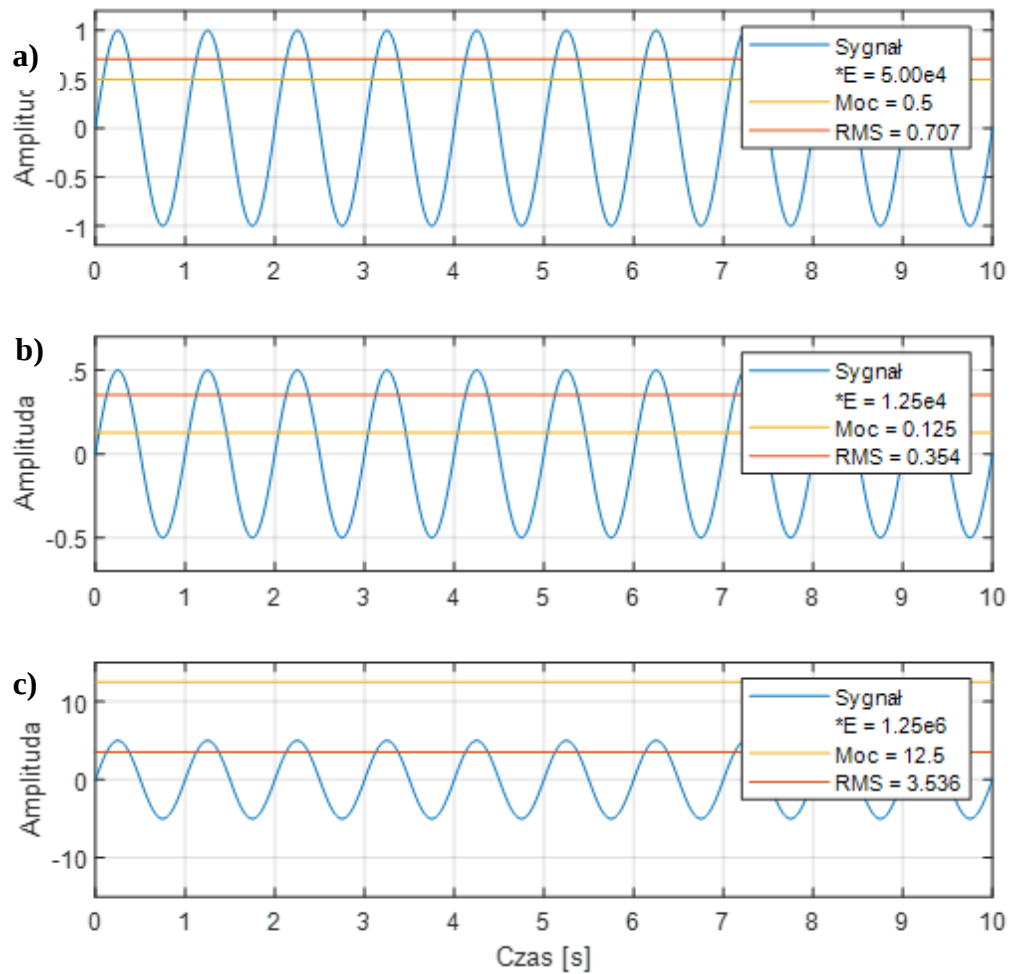


The diagram shows the mathematical formula for the Root Mean Square (RMS) value. The formula is $RMS = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N x^2}$. Three red arrows point from labels above to parts of the formula: 'Root' points to the square root symbol ($\sqrt{}$), 'Mean' points to the fraction $\frac{1}{N}$, and 'Square' points to the x^2 term in the summation. The summation part, including the fraction and the sum, is enclosed in a dashed red box.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N x^2}$$

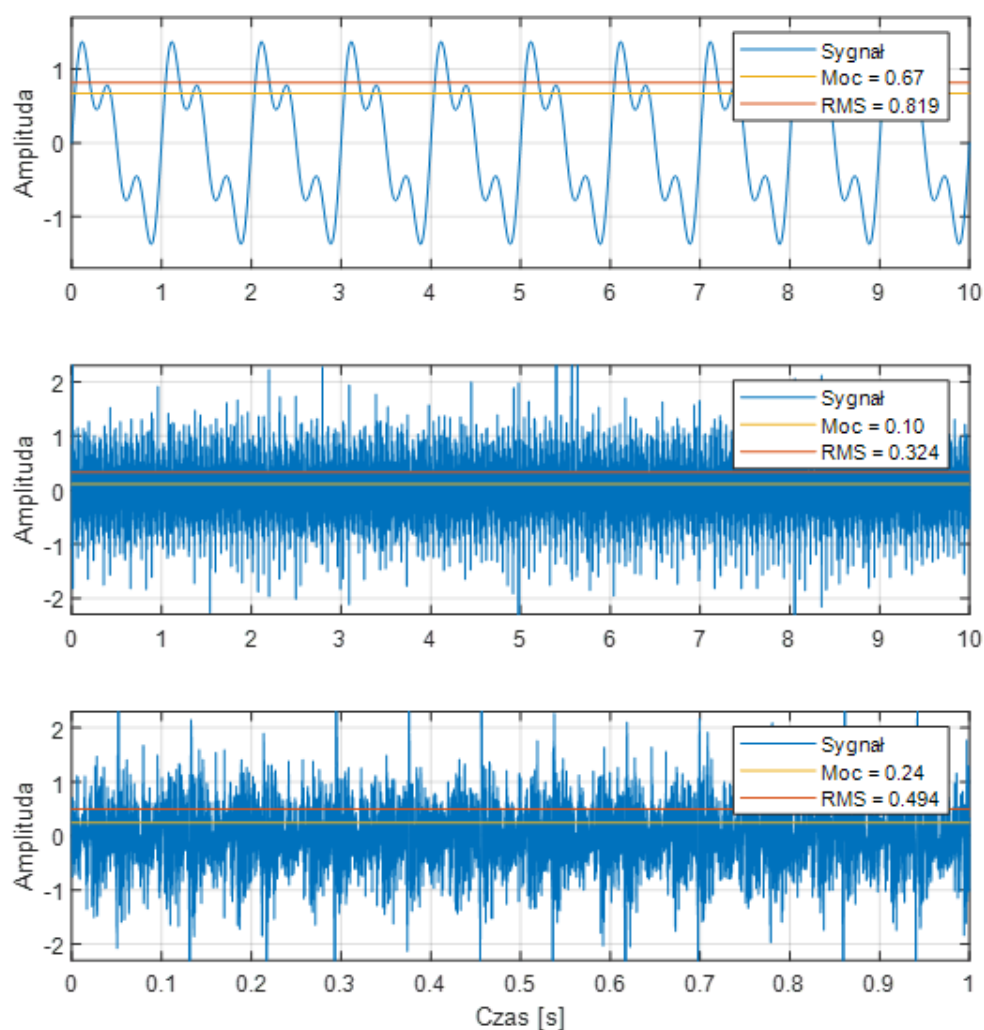
Rys. 47. Formuła matematyczna wskaźnika RMS [121]

Wskaźnik RMS w prosty sposób szacuje wartość poziomu drgań niezależnie od wartości amplitudy. Kwadrat wartości sygnału we wzorach na energię, moc i RMS sygnału jest istotny nie tylko z uwagi na ujemne wartości sygnałów ale również z uwagi na możliwość analogicznych obliczeń w dziedzinie częstotliwości [121].



Rys. 48. Wartości energii, mocy i RMS sygnału dla różnych poziomów amplitud Zero-Peak: a) 1; b) 0,5; c) 5 [121]

W przypadku sygnału harmonicznego oraz rzeczywistego, duże zmiany w poziomie mocy sygnału zależą nie tylko od jego wartości szczytowej, ale również od jego charakteru, czyli rozkładu widmowego. Wartości wskaźnika RMS są bardziej przewidywalne dla sygnałów okresowych dowolnej klasy, z czego wynika że RMS jest wskaźnikiem wygodnym w użyciu.



Rys. 49. RMS dla przykładowych sygnałów [121]

5.4.1. Urządzenia pomiarowe do pomiaru drgań

W badaniach wykorzystano układ pomiaru drgań Simcenter SCADAS XS. Jest to analizator, który dzięki szablonowi akwizycji danych może pracować jako samodzielne urządzenie. W zależności od potrzeb SCADAS XS, może być sterowany bezprzewodowo z tabletu, za pomocą aplikacji Simcenter Testlab Scope App. W niniejszych badaniach wykorzystano tę aplikację do pomiaru i zapisu danych. Aplikacja pozwala na konfigurację, uruchomienie, czy też zatrzymanie akwizycji danych [122]. W pomiarach wykorzystano trzy czujniki piezoelektryczne mierzące przyspieszenie drgań oraz trójosiowy siedziskowy czujnik drgań zgodny z normą ISO 10326-1. W celu analizy zebranych wyników wykorzystano środowisko do wykonywania obliczeń naukowych MATLAB. Urządzenie pomiarowe przedstawiono na rysunkach 50-52, natomiast dane techniczne w tabeli 18.



Rys. 50. Układ pomiaru drgań Siemens LMS SCADAS XS [122]



Rys. 51. Układ pomiaru drgań Siemens LMS SCADAS XS z urządzeniem akwizycji danych [opracowanie własne]



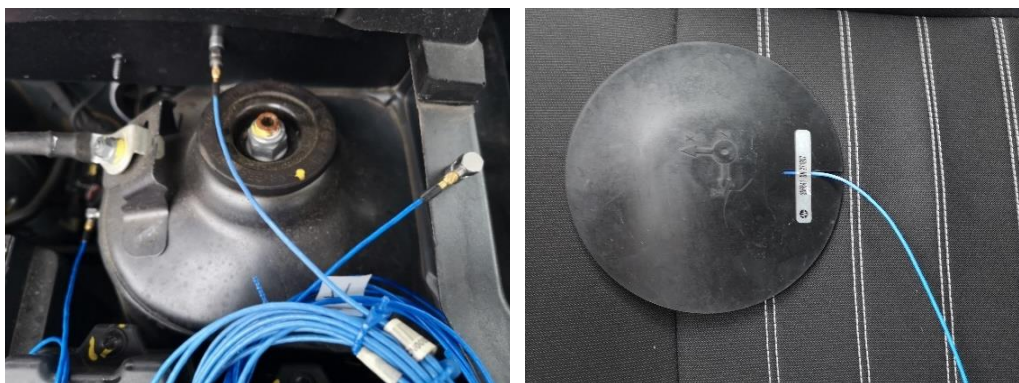
Rys. 52. Przetwornik piezoelektryczny trójosiowy – po lewej stronie, siedziskowy przetwornik drgań – po prawej stronie [122]

Tabl. 18. Parametry techniczne układu pomiaru drgań Siemens LMS SCADAS XS [122]

Cecha	Wartość
Sterowanie	bezprowadowe z aplikacji na tablecie
Wymiary	0,8 x 4,5 x 6,7 cali (23 x 114 x 170 mm)
Waga	ok. 500 g
Kanały pomiarowe	6 lub 12
Próbkowanie	50 kHz na kanał
Czułość	dla siedziskowego przetwornika drgań: 100 mV/g
Złącze BNC	dla mikrofonów lub akcelerometrów jednoosiowych
Złącze LEMO	dla pojedynczych przewodów (z wieloma przewodami wewnątrz), które umożliwiają podłączenie trzech kanałów trójosiowego akcelerometru
CAN-bus	Controller Area Network (CAN) do odczytu magistrali cyfrowej z wbudowanych czujników w pojazdach

5.4.2. Pomiary stanowiskowe drgań

Pomiary przyspieszenia drgań za pomocą układu pomiaru drgań marki Siemens zostały przeprowadzone w pracowni eksploatacji pojazdów na Wydziale Transportu i Inżynierii Lotniczej Politechniki Śląskiej. Podczas badań samochody zostały umieszczone na podnośniku. Wykonano badania przyspieszenia drgań w trzech osiach X, Y oraz Z. Pierwsze pomiary wykonano w okolicy silnika. Czujniki piezoelektryczne zostały zamontowane na lewym kielichu kolumny McPhersona w każdym z pojazdów. Drugie pomiary zostały wykonane za pomocą przetwornika siedziskowego umieszczonego na fotelu kierowcy (drgania ogólne), również w trzech osiach X, Y i Z. W osi X mierzono wartości wzdłuż osi pojazdu, w osi Y – poprzecznie do osi pojazdu, natomiast w osi Z pionowe wartości drgań. Badania wykonywano w pojazdach podczas gdy włączony był napęd z prędkością 20 km/h. Za każdym razem wykonano 10 pomiarów, a każdy z nich trwał 5 sekund. Częstotliwość próbkowania wynosiła 51200 Hz. Przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe i charakterystyki częstotliwościowe. Wyniki pomiarów przedstawiono jako średnią arytmetyczną zebranych wyników, odrzucając wartości najniższe i najwyższe. Na wykresach zaznaczono słupki błędów. Zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań przedstawiono w formie wykresów. W celu rozróżnienia warunków użytkowania pojazdów wyniki na wykresach oznaczono ramkami. Zielona ramka oznacza pojazdy przeznaczone dla użytku współdzielonego, natomiast fioletowa oznacza pojazd użytkowany prywatnie. Na rysunku 53 przedstawiono zamocowanie urządzeń pomiarowych w pojeździe.



Rys. 53. Przetworniki piezoelektryczne zamontowane na kielichu kolumny McPhersona – po lewej stronie, siedziskowy przetwornik drgań zamontowany na fotelu kierowcy – po prawej stronie [opracowanie własne]

a) Drgania na nadwoziu (kielich kolumny McPhersona)

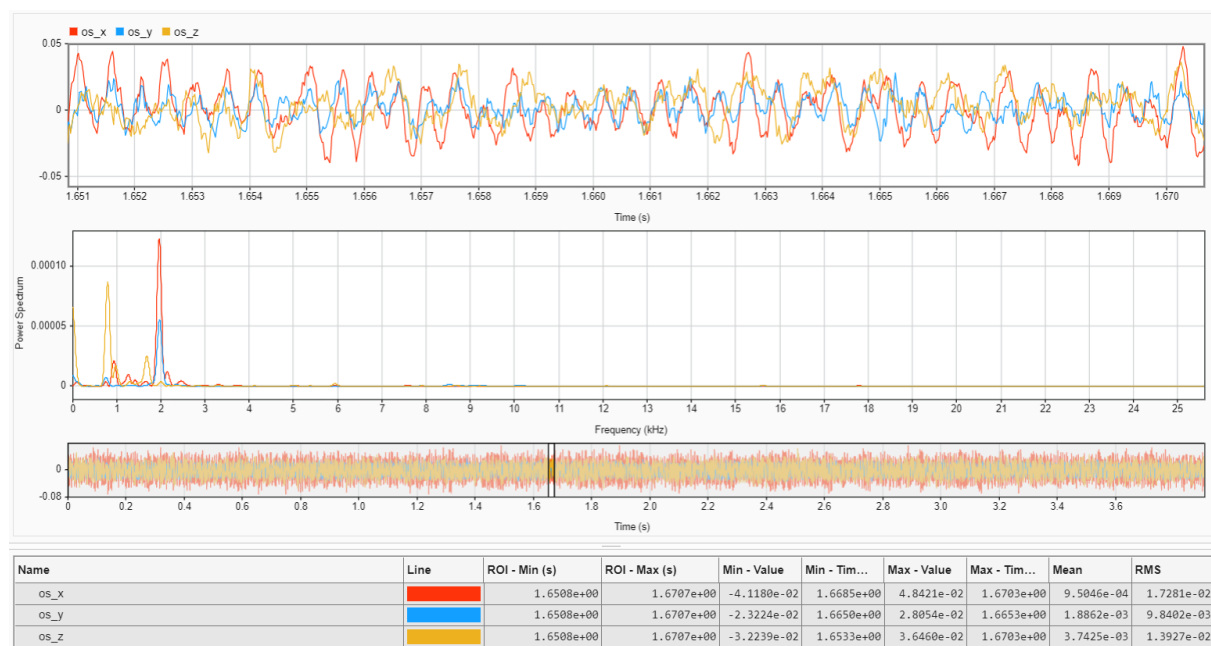
Za pomocą układu pomiaru drgań oraz czujnika piezoelektrycznego trójosiowego zamontowanego na karoserii wykonano pomiary stanowiskowe we wszystkich badanych pojazdach. Przykładowe przebiegi czasowe wartości skutecznej przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z przedstawiono na rysunkach od 54 do 57, natomiast zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań w formie wykresu na rysunku 58.



Rys. 54. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem konwencjonalnym podczas badań na stanowisku [opracowanie własne]



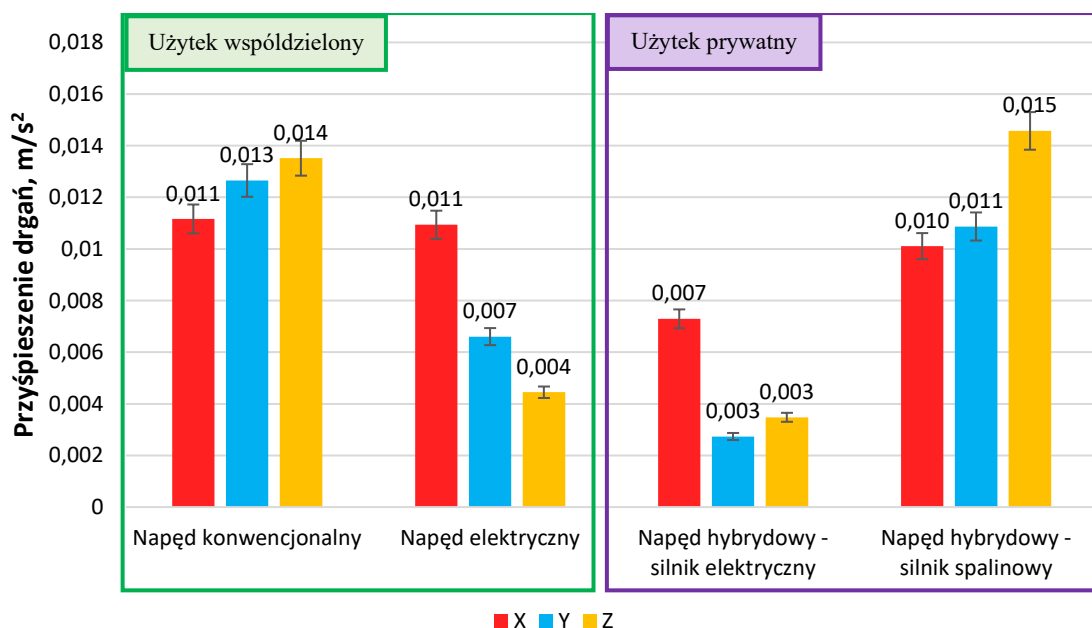
Rys. 55. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem elektrycznym podczas badań na stanowisku [opracowanie własne]



Rys. 56. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem hybrydowym podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd elektryczny [opracowanie własne]



Rys. 57. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem hybrydowym nadwoziu podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd spalinowy [opracowanie własne]



Rys. 58. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z w pojazdach mierzone na nadwoziu podczas badań stanowiskowych [opracowanie własne]

Stanowiskowe pomiary drgań nadwozia wykazały, że najniższe wartości RMS drgań zarejestrowano w pojeździe z napędem hybrydowym (Pojazd 3) podczas pracy napędu elektrycznego przy prędkości 20 km/h. Najwyższe wartości przyspieszenia drgań wyniosły

0,001 m/s², przy częstotliwościach dominujących 1000 Hz i 2000 Hz w osiach X i Y. Źródłem tych drgań była praca silnika elektrycznego i układu napędowego. W pojeździe elektrycznym (Pojazd 2) wartości przyspieszenia drgań były zbliżone i osiągnęły 0,0015 m/s², z dominującą częstotliwością 1000 Hz we wszystkich mierzonych osiach. Drgania te również pochodziły z pracy silnika elektrycznego i układu napędowego, podobnie jak w napędzie elektrycznym pojazdu hybrydowego.

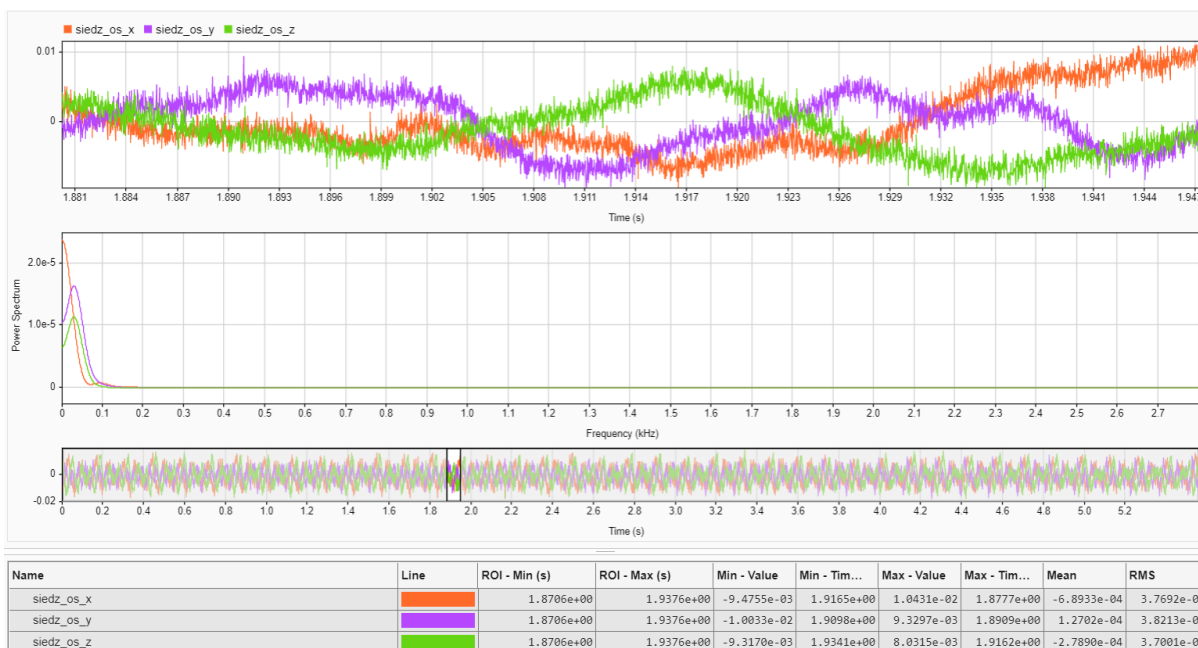
Dla napędu spalinowego wartości drgań były wyższe. W pojeździe hybrydowym, przy uruchomionym napędzie spalinowym i prędkości 20 km/h, zarejestrowano przyspieszenia drgań na poziomie 0,015 m/s², przy częstotliwościach 50 Hz, 500 Hz, 1000 Hz oraz 2000 Hz, przeważających w osiach X i Y. Podobne wartości drgań odnotowano w pojeździe konwencjonalnym (Pojazd 1) z napędem spalinowym przy tej samej prędkości – wyniosły one 0,018 m/s², przy dominujących częstotliwościach 50 Hz, 500 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz oraz 3500 Hz w osiach X i Y.

Częstotliwość 500 Hz w pojazdach z napędem spalinowym wynikała z częstotliwości zapłonu. Podczas pomiarów prędkość obrotowa wału korbowego wynosiła 1500 obr/min, co odpowiada 750 zapłonom na minutę (12,5 Hz na sekundę dla jednego cylindra). Charakterystyczna częstotliwość drgań związana z zapłonem wynosi więc 50 Hz, ponieważ w silnikach czterosuwowych zapłon następuje co dwa obroty wału korbowego. Wyższe częstotliwości drgań są spowodowane działaniem układu napędowego (np. przekładni zębatych).

W pojeździe hybrydowym na wykresach występują częstotliwości związane z pracą silnika elektrycznego, gdyż był on uruchomiony równocześnie z napędem spalinowym.

b) Drgania na siedzisku kierowcy

Za pomocą układu pomiaru drgań oraz przetwornika siedziskowego zamontowanego na fotelu kierowcy wykonano pomiary stanowiskowe we wszystkich badanych pojazdach. Przykładowe przebiegi czasowe wartości skutecznej przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z przedstawiono na rysunkach od 59 do 60, natomiast zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań w formie wykresu na rysunku 61.



Rys. 59. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku [opracowanie własne]



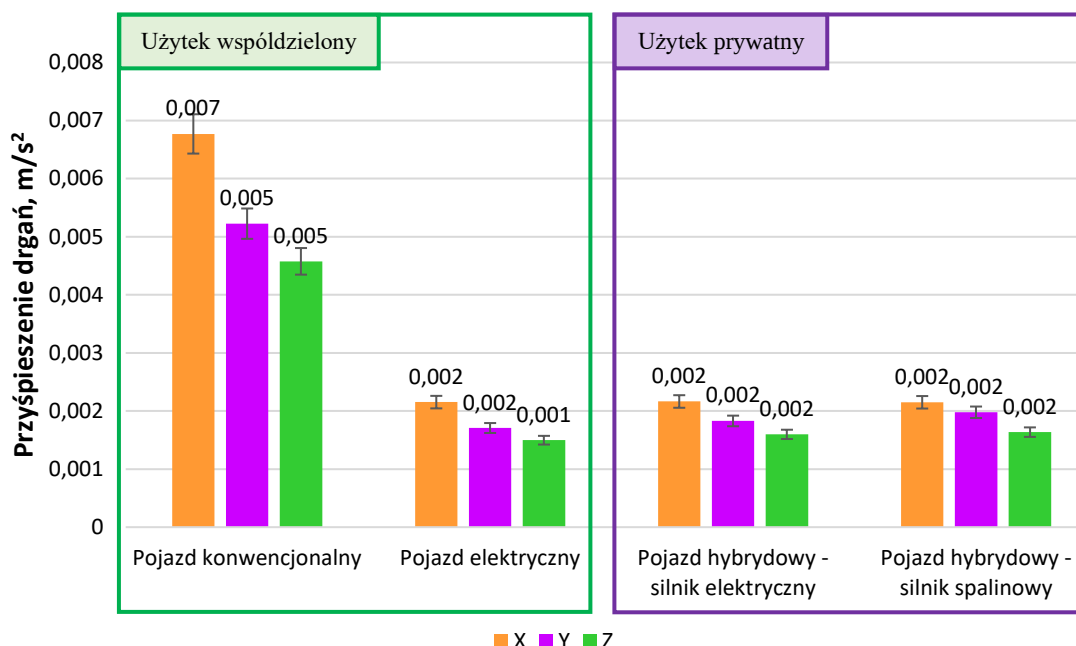
Rys. 60. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku [opracowanie własne]



Rys. 61. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd elektryczny [opracowanie własne]



Rys. 62. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd spalinowy [opracowanie własne]



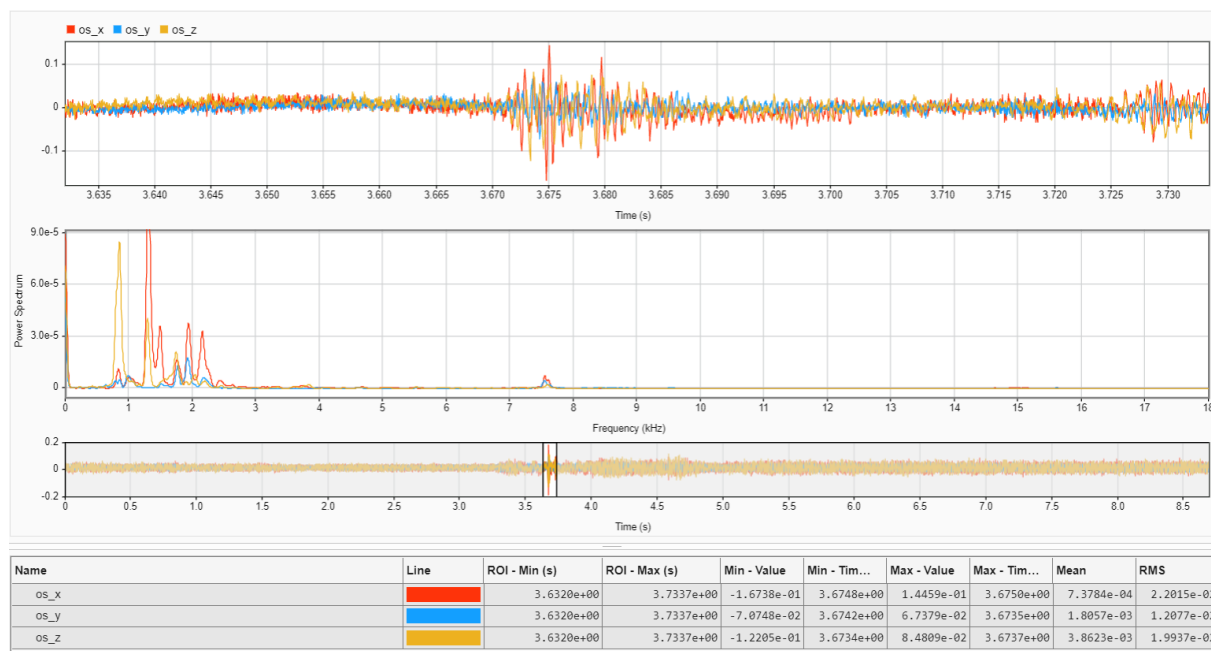
Rys. 63. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań w osiach X, Y Z w pojazdach mierzone na siedzisku kierowcy (drgania ogólne) podczas badań stanowiskowych [opracowanie własne]

Stanowiskowe pomiary drgań na fotelu kierowcy wykazały, że najmniejsze oddziaływanie drgań na kierowcę jest w samochodzie z napędem hybrydowym zarówno podczas pracy wyłącznie silnika elektrycznego ($0,0021 \text{ m/s}^2$), jak i podczas pracy silnika spalinowego ($0,0021 \text{ m/s}^2$). W samochodzie z napędem elektrycznym również zarejestrowano wartości skuteczne przyspieszenia drgań na podobnym poziomie ($0,0021 \text{ m/s}^2$). Najwyższy poziom drgań przenoszone na kierowcę zarejestrowano podczas pracy silnika spalinowego w pojeździe spalinowym. Wartości te wyniosły $0,0067 \text{ m/s}^2$. Wartości przyspieszeń drgań były zbliżone we wszystkich osiach.

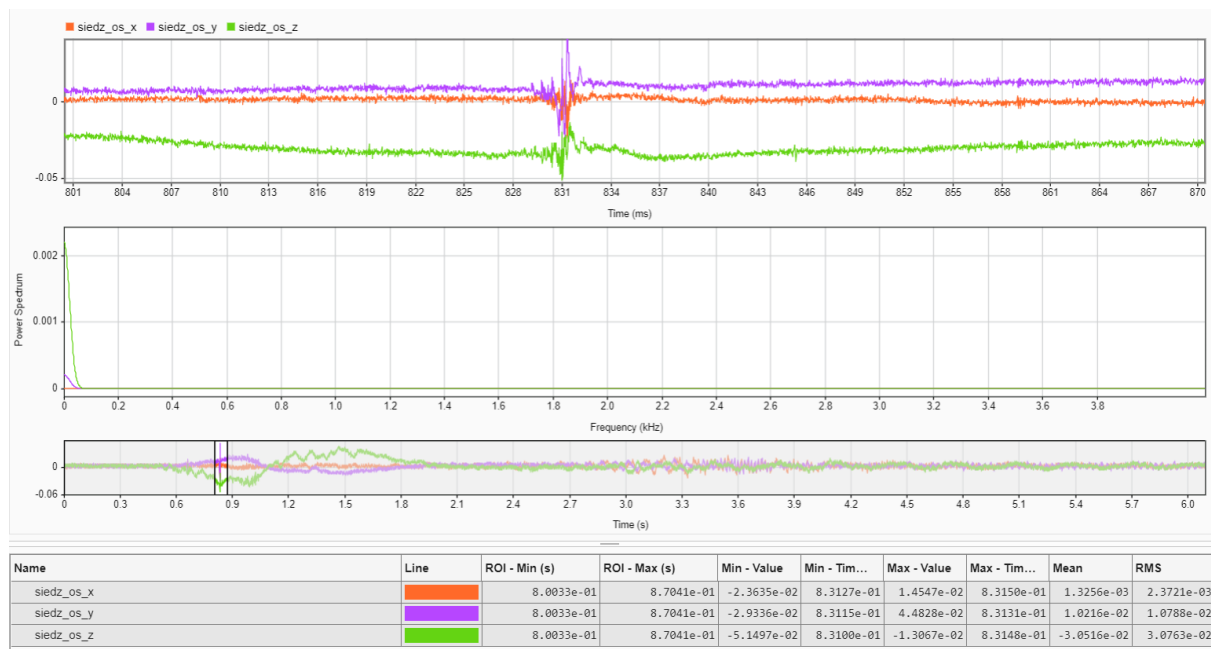
c) Pomiary drgań przełączania napędu elektrycznego na spalinowy w pojeździe hybrydowym

Za pomocą układu pomiaru drgań wraz z czujnikiem piezoelektrycznym trójosiowym zamontowanym na karoserii (Rys. 64) oraz za pomocą przetwornika siedziskowego zamontowanego na fotelu kierowcy (Rys. 65) wykonano pomiary stanowiskowe w samochodzie hybrydowym. Podczas pomiarów zarejestrowano chwilę przełączania napędu elektrycznego na spalinowy przy prędkości obrotowej kół równej około 20 km/h. W osi X mierzono wartości wzdłuż osi pojazdu, w osi Y – poprzecznie do osi pojazdu, natomiast w osi Z pionowe wartości drgań. Przykładowe przebiegi czasowe wartości skutecznej przyspieszenia

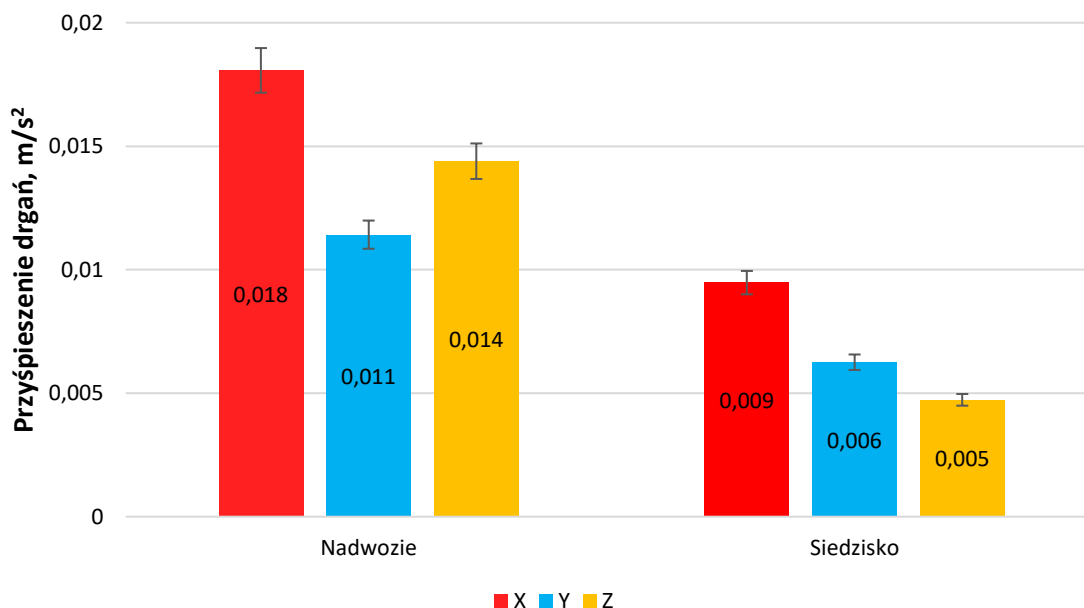
drgań w osiach X, Y, Z przedstawiono na rysunkach 64 i 65, natomiast zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań w formie wykresu na rysunku 66.



Rys. 64. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem hybrydowym podczas badań na stanowisku – moment przełączenia napędu elektrycznego na spalinowy [opracowanie własne]



Rys. 65. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku – moment przełączenia napędu elektrycznego na spalinowy [opracowanie własne]



Rys. 66. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z w pojeździe z napędem hybrydowym podczas przełączania napędu elektrycznego na spalinowy [opracowanie własne]

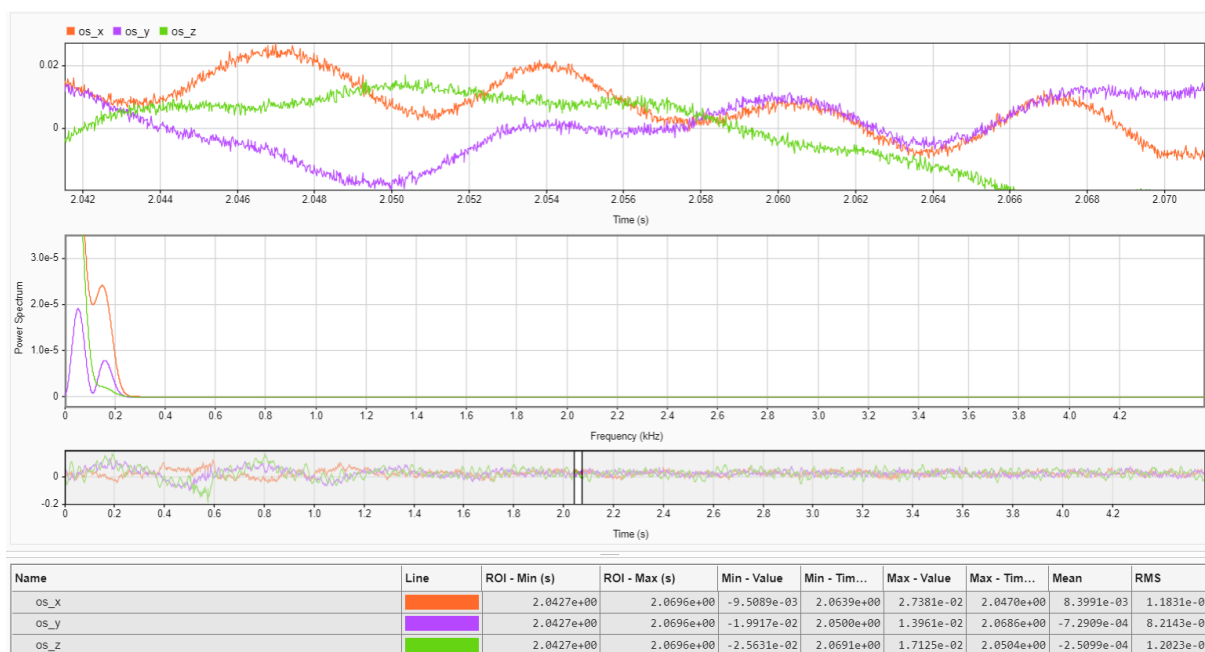
Wartość skutecznych przyspieszeń drgań podczas przełączania napędu elektrycznego na spalinowy w pojeździe hybrydowym na nadwoziu były na poziomie $0,018 \text{ m/s}^2$ w osi X, natomiast na siedzisku kierowcy $0,009 \text{ m/s}^2$ w osi X.

5.4.3. Pomiary drgań wewnątrz pojazdów

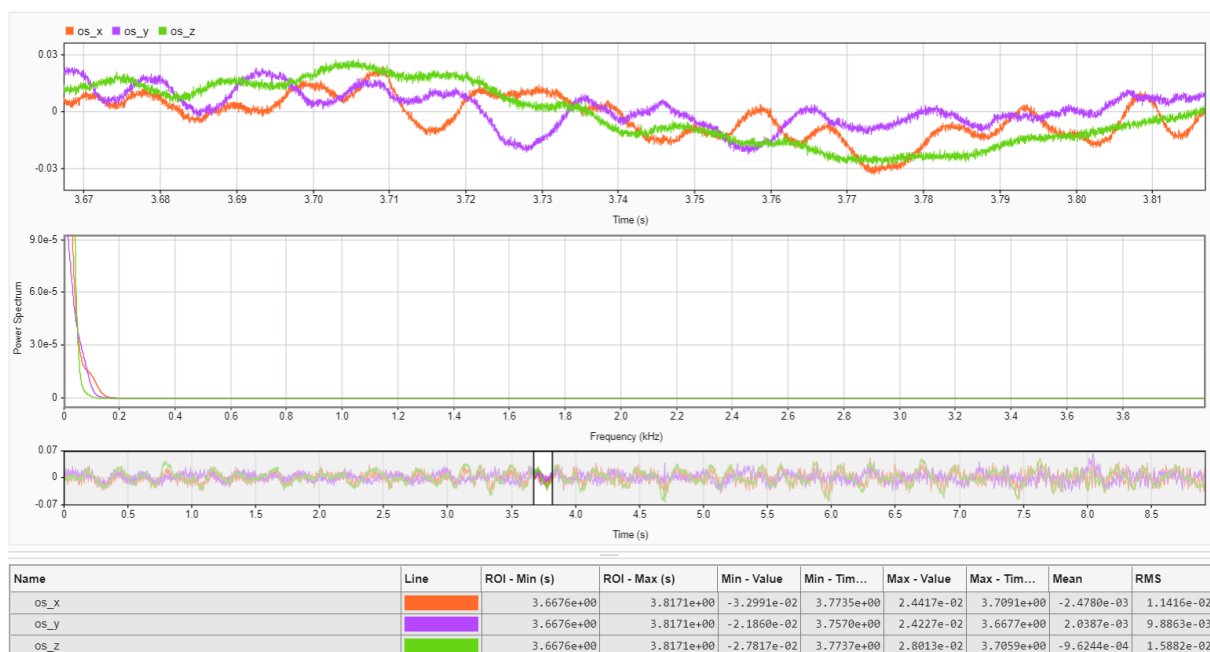
Pomiary drgań ogólnych oddziałujących na człowieka wewnątrz pojazdu prowadzono w ruchu miejskim i autostradowym. Wykonano pomiary przy prędkościach 30 km/h oraz przy 50 km/h w ruchu miejskim oraz przy prędkościach 100 km/h oraz 140 km/h w ruchu autostradowym. Pomiary zostały wykonane za pomocą układu pomiaru drgań marki Siemens wraz z przetwornikiem siedziskowym mierzącym drgania w trzech osiach X, Y i Z, który umieszczony został na fotelu kierowcy. Za każdym razem wykonano po 10 pomiarów, z czego każdy trwał około 10 sekund. Temperatura podczas pomiarów wynosiła około 12° C , Było bezwietrznie i bez opadów. Nie zalegała pokrywa śnieżna. Wyniki pomiarów przedstawiono jako średnią arytmetyczną zebranych wyników, odrzucając wartości najniższe i najwyższe. Na wykresach zaznaczono słupki błędów. Wyniki przedstawiono poniżej.

a) Pomiar drgań w ruchu miejskim przy prędkości 30 km/h

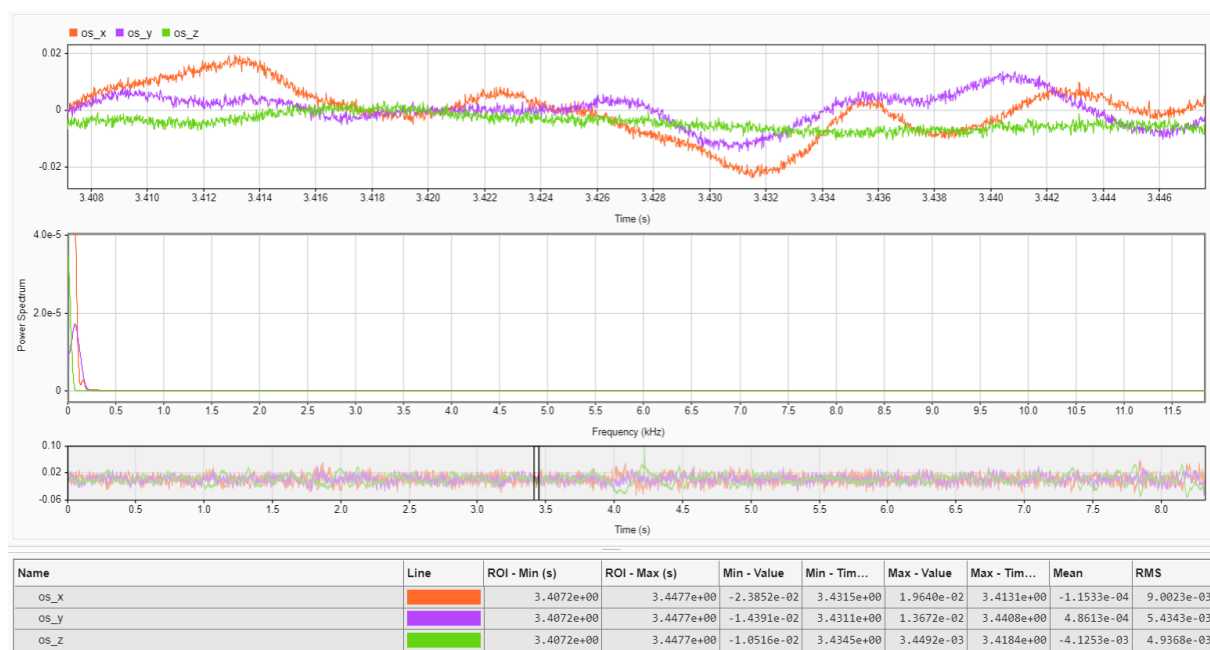
Za pomocą układu pomiaru drgań oraz przetwornika siedziskowego zamontowanego na fotelu kierowcy wykonano pomiary drgań wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu miejskim przy prędkości 30 km/h. Przykładowe przebiegi czasowe wartości skutecznej przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z przedstawiono na rysunkach od 67 do 69, natomiast zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań w formie wykresu na rysunku 70.



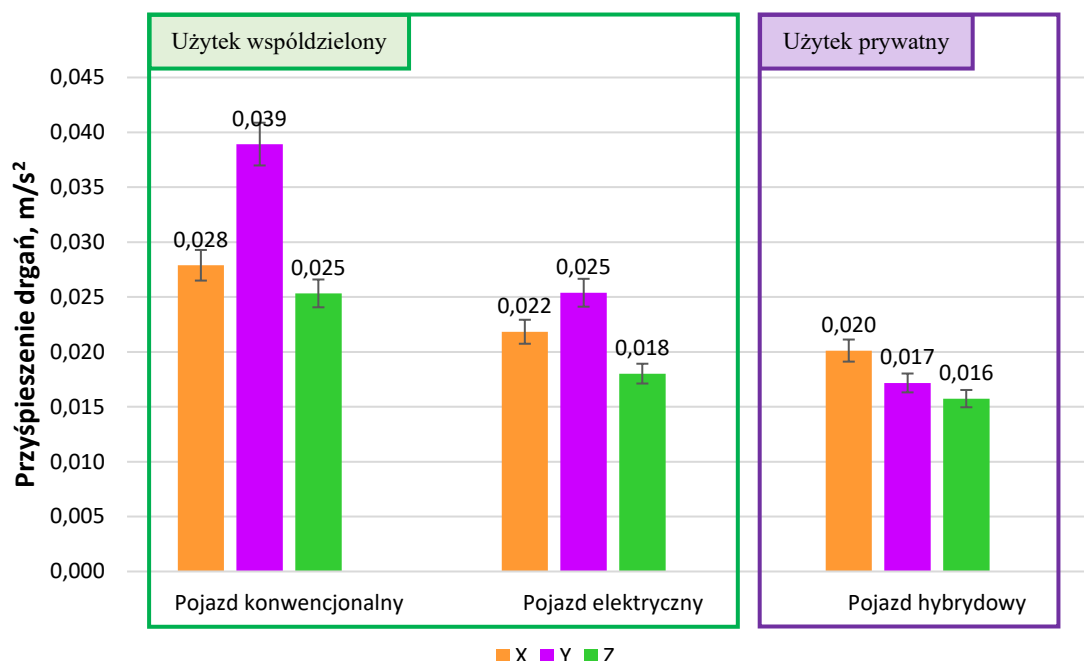
Rys. 67. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 30 km/h [opracowanie własne]



Rys. 68. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 30 km/h [opracowanie własne]



Rys. 69. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 30 km/h [opracowanie własne]



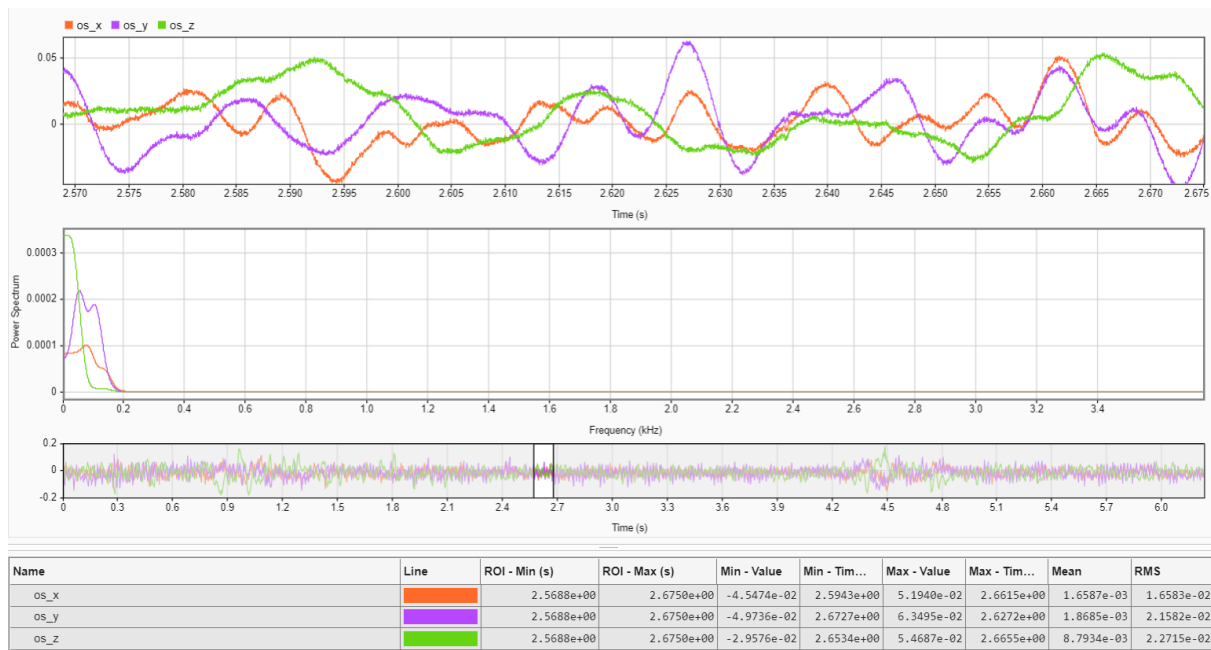
Rys. 70. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) w pojazdach przy prędkości 30 km/h [opracowanie własne]

Podczas jazdy miejskiej wartości skuteczne RMS przyspieszenia drgań w osiach X, Y i Z prezentują się następująco. Przy prędkości 30 km/h najmniejsze drgania zarejestrowano w pojeździe z napędem hybrydowym (Pojazd 3), wynoszące $0,019 m/s^2$ w osi X. W pojeździe z napędem elektrycznym (Pojazd 2) zarejestrowano wartość $0,025 m/s^2$ w osi Y, natomiast najwyższy poziom drgań wystąpił w pojeździe z napędem konwencjonalnym (Pojazd 1) i wyniosły $0,039 m/s^2$ w osi Y.

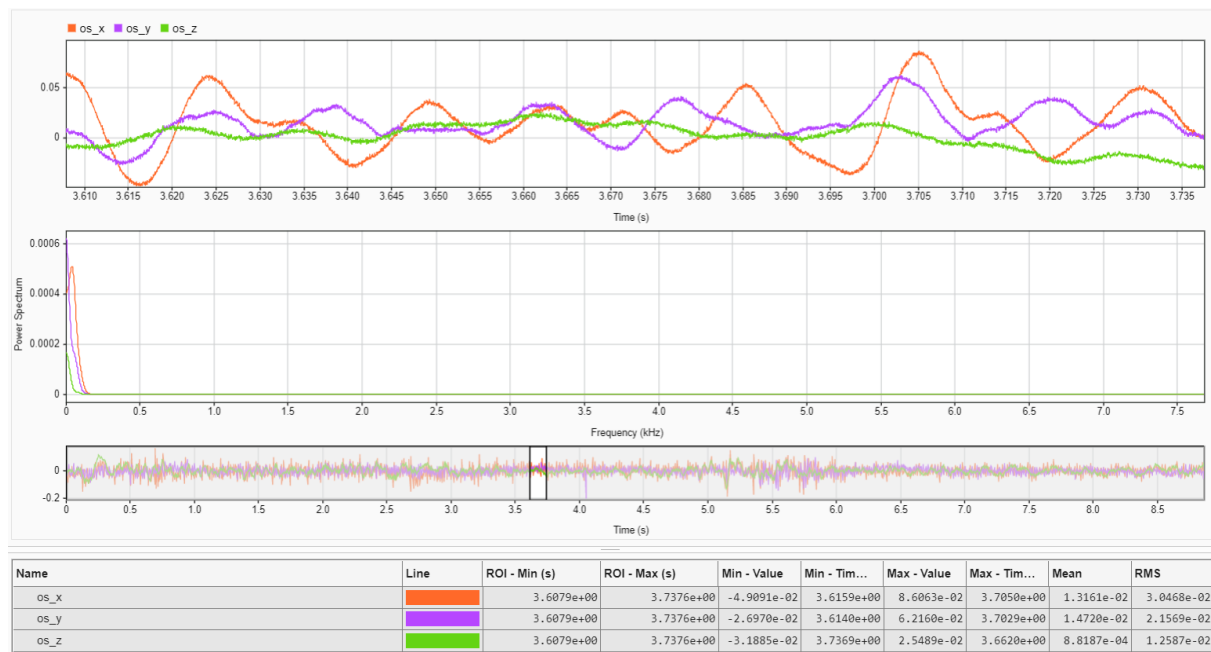
Częstotliwość drgań mieściła się w zakresie od 10 Hz do 200 Hz dla pojazdu z napędem konwencjonalnym oraz od 10 Hz do 100 Hz dla pozostałych napędów. Niskie i średnie częstotliwości były związane z nierównościami nawierzchni oraz drganiami przenoszonymi na nadwozie pojazdu. Wyższe częstotliwości w pojeździe z napędem spalinowym były spowodowane pracą silnika spalinowego.

b) Pomiar drgań w ruchu miejskim przy prędkości 50 km/h

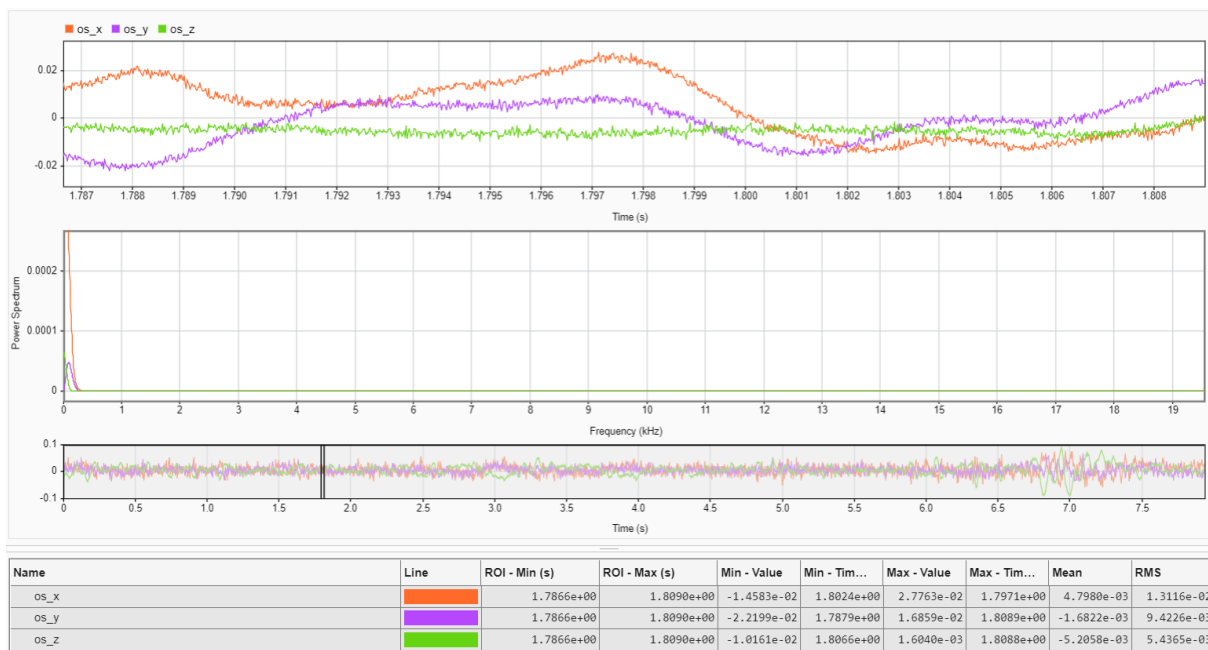
Za pomocą układu pomiaru drgań oraz przetwornika siedziskowego zamontowanego na fotelu kierowcy wykonano pomiary drgań wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu miejskim przy prędkości 50 km/h. Przykładowe przebiegi czasowe wartości skutecznej przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z przedstawiono na rysunkach od 71 do 73, natomiast zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań w formie wykresu na rysunku 74.



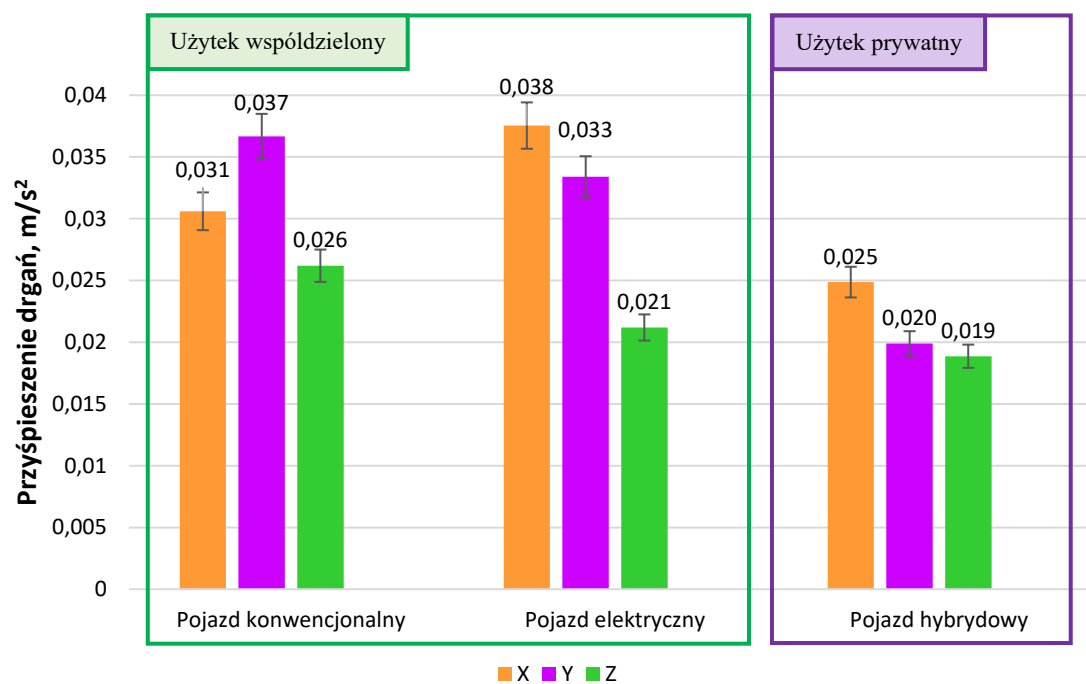
Rys. 71. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h [opracowanie własne]



Rys. 72. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h [opracowanie własne]



Rys. 73. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h [opracowanie własne]



Rys. 74. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h [opracowanie własne]

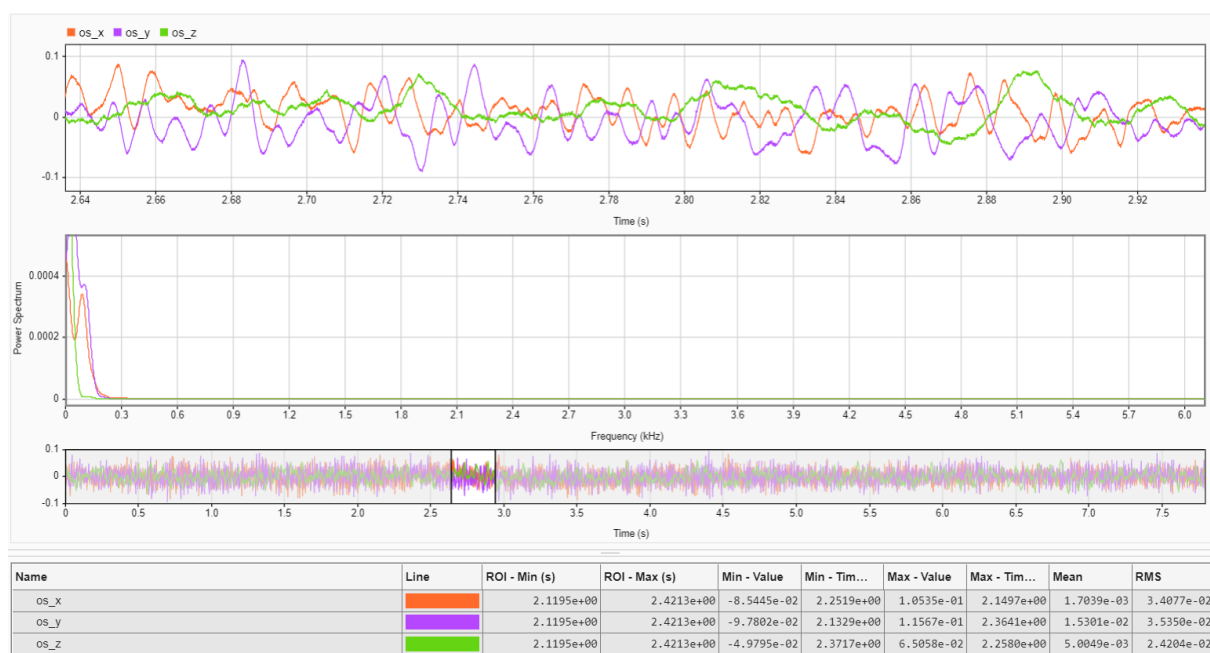
Podczas jazdy z prędkością 50 km/h drgania w pojeździe z napędem konwencjonalnym (Pojazd 1) oraz elektrycznym (Pojazd 2) były bardzo zbliżone. Wartość skuteczna przyspieszenia drgań dla pojazdu z napędem konwencjonalnym wyniosła 0,036 m/s² w osi Y,

a dla pojazdu elektrycznego $0,037 \text{ m/s}^2$ w osi X. W pojeździe hybrydowym (Pojazd 3) zarejestrowano najniższą wartość przyspieszenia drgań, wynoszącą $0,025 \text{ m/s}^2$ również w osi X.

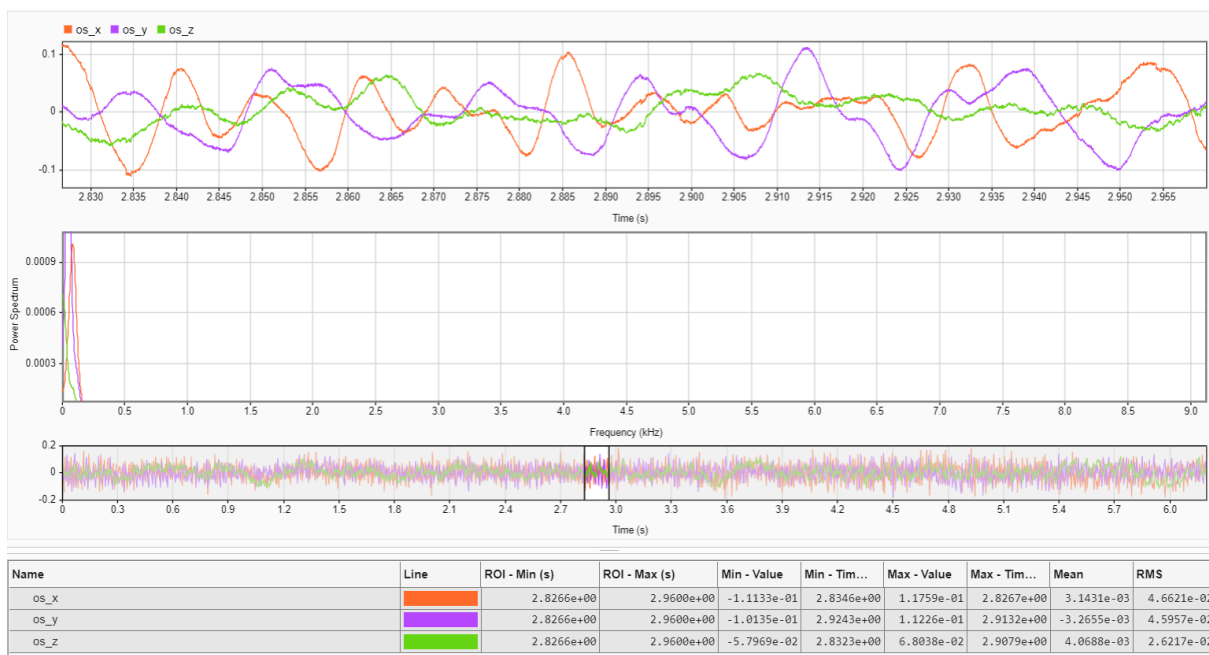
Zakres częstotliwości drgań wynosił od 10 Hz do 200 Hz dla pojazdu konwencjonalnego oraz od 10 Hz do 100 Hz dla pojazdów z napędem elektrycznym i hybrydowym. Niskie i średnie częstotliwości były związane z nierównościami nawierzchni oraz drganiami przenoszonymi na nadwozie. Wyższe częstotliwości drgań w pojeździe z napędem spalinowym były wynikiem pracy silnika.

c) Pomiar drgań w ruchu autostradowym przy prędkości 100 km/h

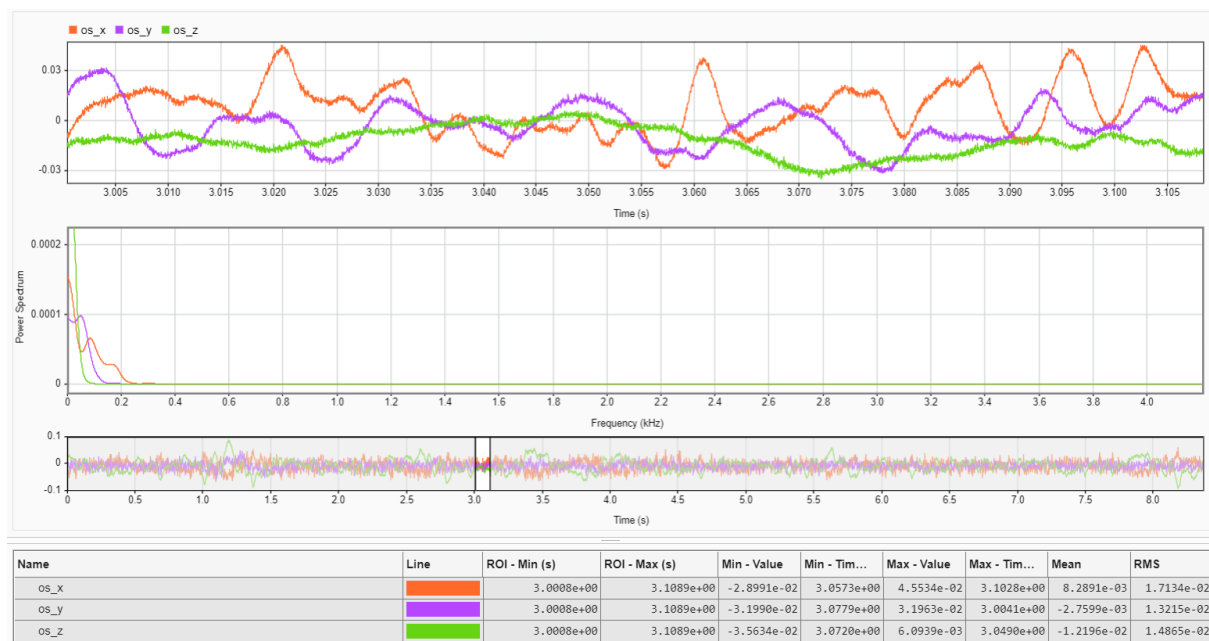
Za pomocą układu pomiaru drgań oraz przetwornika siedziskowego zamontowanego na fotelu kierowcy wykonano pomiary drgań wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu autostradowym przy prędkości 100 km/h. Przykładowe przebiegi czasowe wartości skutecznej przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z przedstawiono na rysunkach od 75 do 77, natomiast zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań w formie wykresu na rysunku 78.



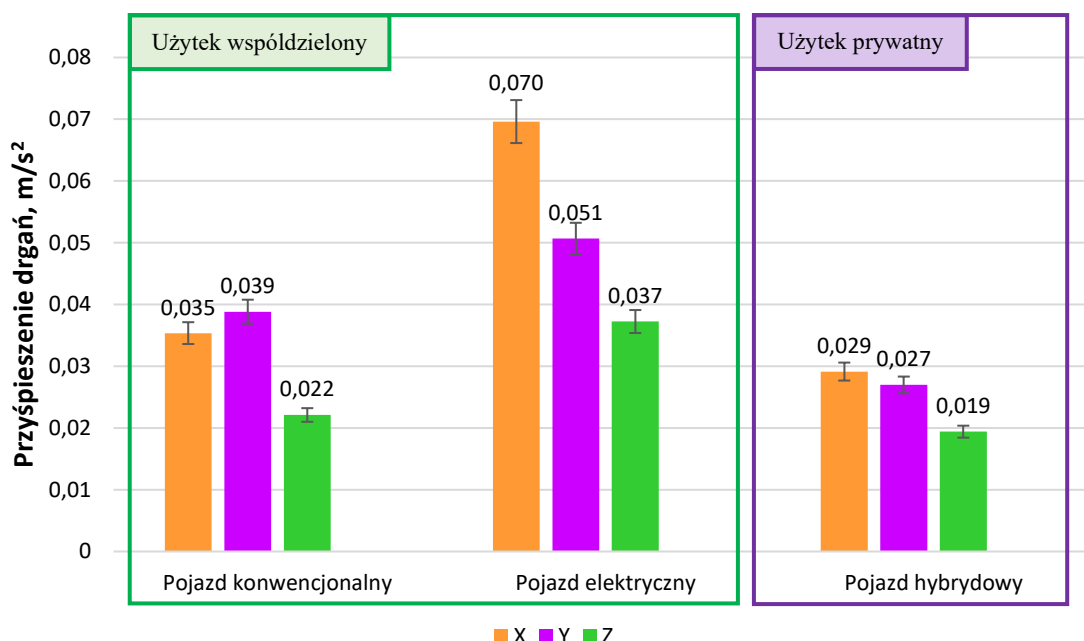
Rys. 75. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h [opracowanie własne]



Rys. 76. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h [opracowanie własne]



Rys. 77. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h [opracowanie własne]



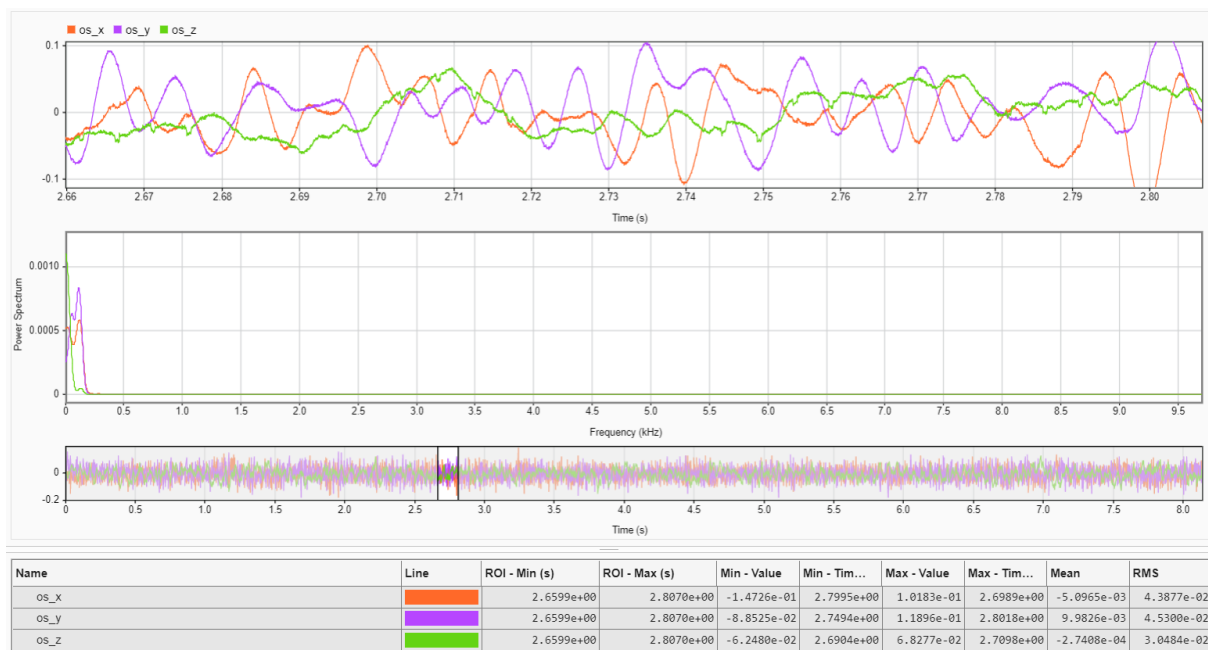
Rys. 78. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h [opracowanie własne]

Podczas jazdy autostradowej z prędkością 100 km/h wartość skuteczna przyspieszenia drgań w samochodzie z silnikiem spalinowym (Pojazd 1) wyniosła 0,037 m/s^2 w osi Y, a w pojeździe hybrydowym (Pojazd 3) 0,028 m/s^2 w osi X. Najwyższe przyspieszenie drgań odnotowano w samochodzie elektrycznym (Pojazd 2), gdzie osiągnęło ono 0,069 m/s^2 w osi X.

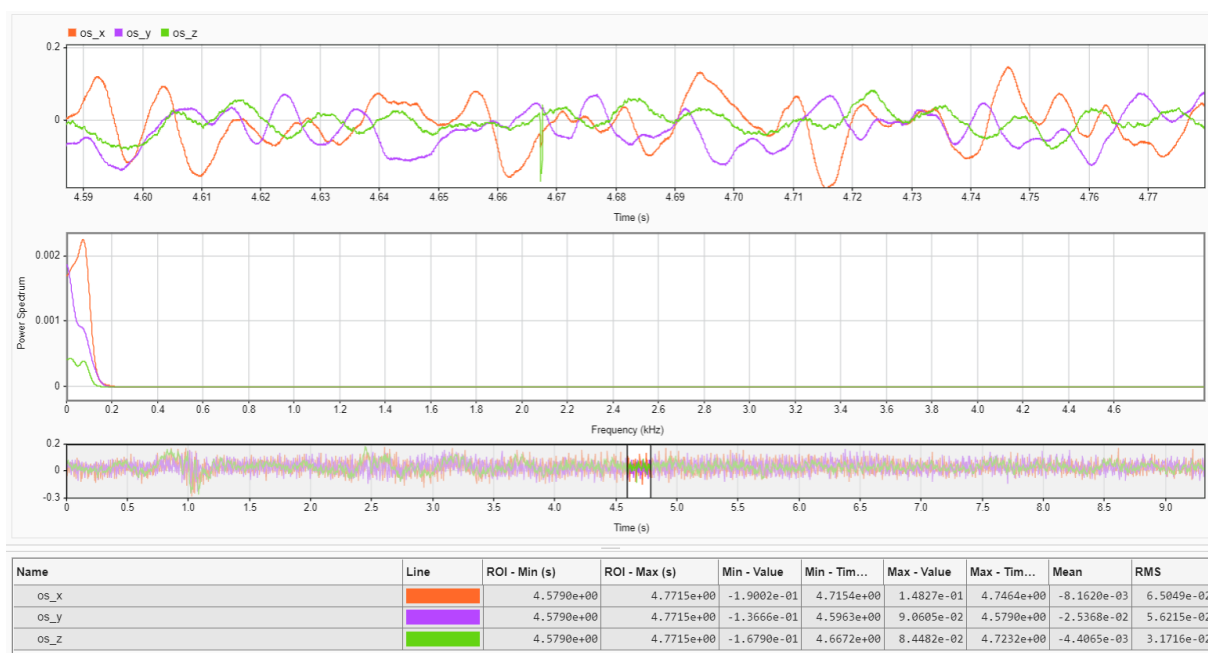
Częstotliwość drgań mieściła się w zakresie od 10 Hz do 200 Hz we wszystkich osiach dla każdego typu napędu. Niskie i średnie częstotliwości były związane z nierównościami nawierzchni oraz drganiami, przy czym dominowały drgania wynikające z nierówności nawierzchni oraz pracy układu zawieszenia.

d) Pomiar drgań w ruchu autostradowym przy prędkości 140 km/h

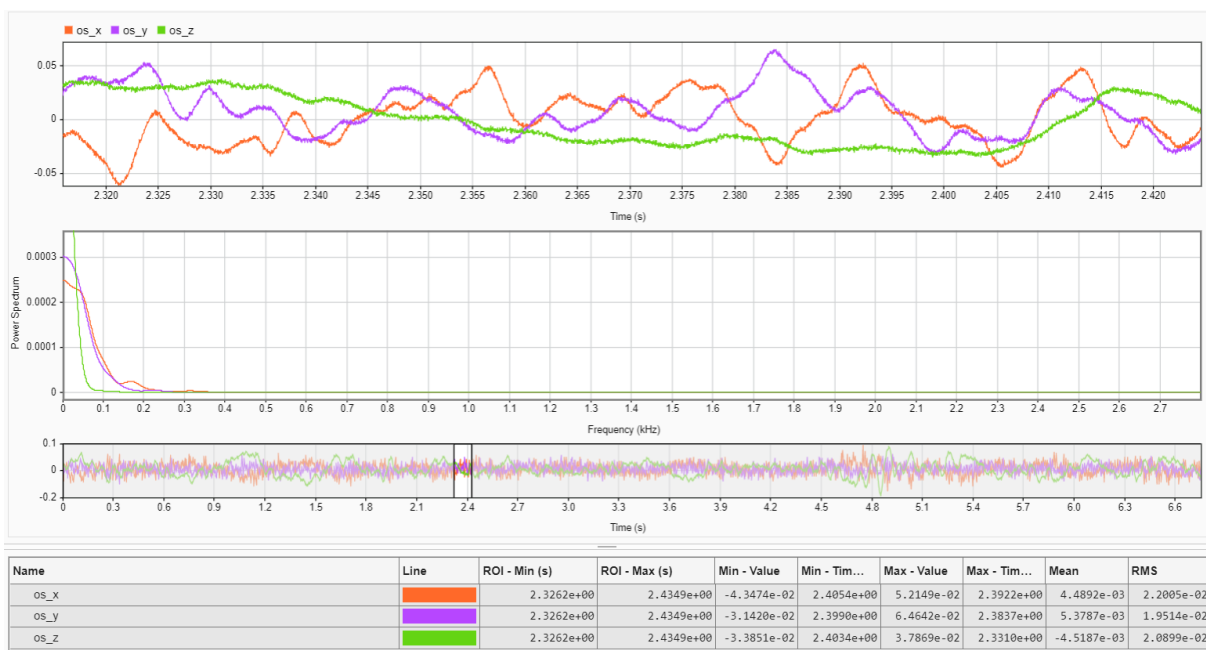
Za pomocą układu pomiaru drgań oraz przetwornika siedziskowego zamontowanego na fotelu kierowcy wykonano pomiary drgań wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu autostradowym przy prędkości 140 km/h. Przykładowe przebiegi czasowe wartości skutecznej przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z przedstawiono na rysunkach od 79 do 81, natomiast zbiorcze wyniki wartości skutecznej przyspieszenia drgań w formie wykresu na rysunku 82.



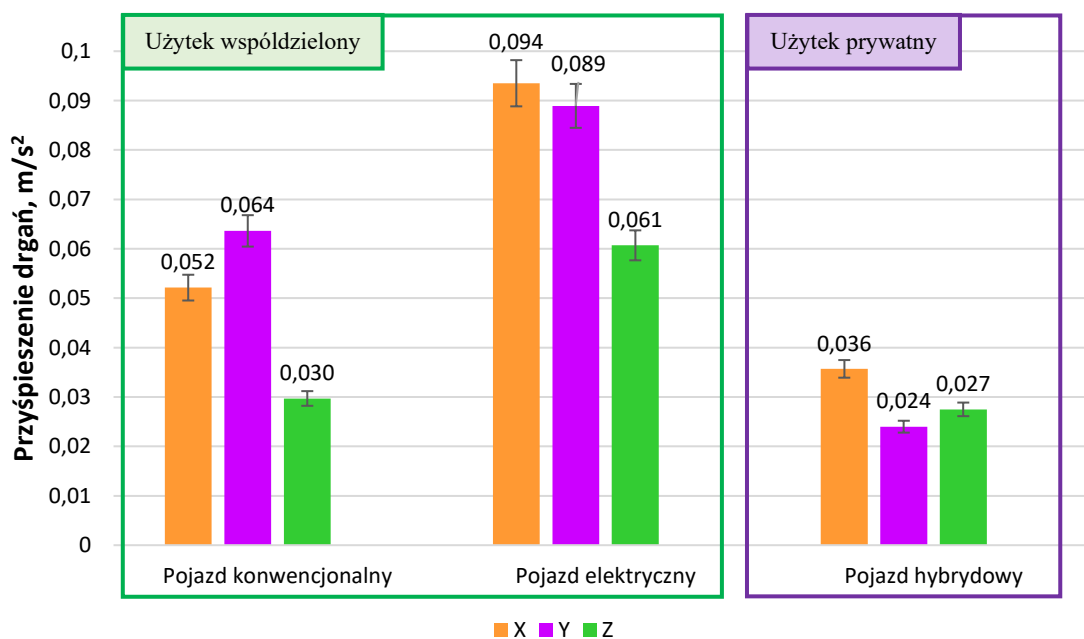
Rys. 79. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h [opracowanie własne]



Rys. 80. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h [opracowanie własne]



Rys. 81. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h [opracowanie własne]



Rys. 82. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h [opracowanie własne]

Podczas jazdy z prędkością 140 km/h najwyższą wartość skuteczną przyspieszenia drgań zarejestrowano w pojeździe z napędem elektrycznym (Pojazd 2), wynoszącą 0,093 m/s² w osi X. W pojeździe z napędem konwencjonalnym (Pojazd 1) odnotowano wartość 0,063 m/s² w osi

Y, natomiast najmniejsze przyspieszenie drgań wystąpiło w pojeździe hybrydowym (Pojazd 3) i wyniosło $0,035 \text{ m/s}^2$ w osi X.

Zakres częstotliwości drgań mieścił się od 10 Hz do 200 Hz we wszystkich osiach dla każdego rodzaju napędu. Niskie i średnie częstotliwości były związane z nierównościami nawierzchni oraz drganiami, przy czym dominowały drgania wywołane nierównościami drogi i pracą układu zawieszenia.

5.4.4. Analiza i interpretacja wyników z pomiarów drgań

Wyniki pomiarów wartości skutecznych przyspieszenia drgań wartości RMS na stanowisku w przypadku drgań na nadwoziu pojazdu oraz drgań na fotelu pasażera, wykazały, że najmniejsze drgania zmierzono w pojeździe z napędem hybrydowym (uruchomiony wyłącznie napęd elektryczny), najwyższe w pojeździe z napędem konwencjonalnym. W samochodzie elektrycznym podczas badań stanowiskowych zarejestrowano nieznacznie wyższy poziom drgań niż w pojeździe hybrydowym.

Głównym źródłem drgań podczas jazdy (miejskiej oraz autostradowej) są drgania wynikające ze współpracy koła z nawierzchnią i nierówności jezdni, które powodują przemieszczanie się kół jezdnych w kierunku osi pionowej i osi poziomych, co jest związane z pracą układu zawieszenia. W konsekwencji tego drgania są przekazywane na elementy konstrukcyjne pojazdu i dalej np. na siedzisko kierowcy. Najwyższy poziom drgań podczas jazdy z wyższą prędkością zarejestrowano dla samochodu z napędem elektrycznym. Samochód z napędem elektrycznym wykazuje bardzo różne wartości przyspieszenia drgań w zależności od prędkości. Przy niskich prędkościach drgania są umiarkowane, ale przy wyższych prędkościach (podczas jazdy autostradowej) wartości drgań wyraźnie rosną. Wynika to z charakterystyki silników elektrycznych, które, mimo że pracują płynnie, mogą generować drgania wynikające z wyższych obrotów przy dużych prędkościach. Dodatkowo, pojazd ten posiadał mało komfortowe zawieszenie oraz inny rozkład masy spowodowany zamontowanymi bateriami, które również mają wpływ na emisję drgań.

Pomiary drgań oddziałujących na kierowcę podczas jazdy wykazały, że emisja drgań wzrasta wraz ze wzrostem prędkości jazdy pojazdów. Wzrost prędkości prowadzi do zwiększenia poziomu drgań, szczególnie w przypadku napędów konwencjonalnych i elektrycznych. Pojazdy hybrydowe są mniej podatne na ten efekt, prawdopodobnie ze względu na możliwość wykorzystania napędu elektrycznego przy niższych prędkościach, co pozwala zredukować drgania. Najmniejsze wartości przyspieszenia drgań odnotowano w pojeździe

z napędem hybrydowym. Wyniki tych badań potwierdzają, że drgania zależą w dużym stopniu od klasy pojazdu oraz jego wykonania. Najwyższej klasy był samochód hybrydowy, posiadał także najbardziej komfortowe zawieszenie. Silniki spalinowe wytwarzają większe drgania mechaniczne niż elektryczne, co szczególnie widać w pojazdach konwencjonalnych.

Te wyniki sugerują, że pojazdy hybrydowe oferują lepszy komfort jazdy pod względem ograniczenia drgań, szczególnie w ruchu miejskim i przy wyższych prędkościach. Elektryczne napędy mają potencjał do minimalizacji drgań przy niskich prędkościach, ale mogą generować wyższe drgania przy dużych prędkościach, co może wpływać na komfort jazdy w trasie.

Wartości skuteczne przyspieszenia drgań uważanych za szkodliwe według rozporządzenia [54] nie powinny przekraczać $3,2 \text{ m/s}^2$ podczas ekspozycji krótkotrwałej oraz $0,8 \text{ m/s}^2$ podczas ekspozycji dziennej. Oznacza to, że wartości przyspieszenia drgań we wszystkich badanych rodzajach napędów oddziałujące zarówno na nadwozie jak i na kierowcę spełniają wymagania i nie stwarzają zagrożenia. Ponadto, uznać należy, że określone podczas badań wartości przyspieszenia drgań odpowiadają warunkom komfortowym (wyniosły poniżej $0,315 \text{ m/s}^2$).

5.5. Pomiary emisji pola elektromagnetycznego

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych (PEM) w środowisku, pomiary poziomów PEM należy wykonywać przy dobrej pogodzie, czyli przy dodatniej temperaturze i bez opadów, w miejscach dostępnych dla ludności i w taki sposób, aby sam proces wykonania pomiaru nie zaburzał uzyskiwanego wyniku. Podczas pomiaru antena przyrządu pomiarowego powinna być przemieszczana wzdłuż linii pionowej (w pionach pomiarowych) na wysokościach od 0,3 m do 2 m nad powierzchnią ziemi albo nad inną powierzchnią. Jak wynika z tego samego aktu prawnego, za wynik pomiaru pola elektromagnetycznego należy przyjąć wartości maksymalne. Nie stosuje się uśredniania wyników pomiarów pola elektromagnetycznego, ani w czasie, ani też w przestrzeni [124].

Liczne czynniki stanowią źródła niepewności wykonywanego pomiaru i składają się na budżet niepewności, który zwykle szacuje się na poziomie ufności 95% [124, 125].

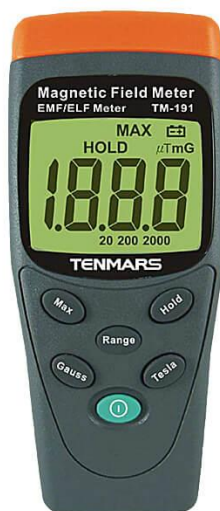
Uwzględnianie niepewności pomiaru należy postrzegać pozytywnie, gdyż tworzy pewien przedział, w którym, z określonym prawdopodobieństwem, mieści się wynik pomiaru. Zmierzone wartości natężenia pola elektrycznego natężenia pola elektrycznego z uwzględnieniem oszacowanej rozszerzonej niepewności pomiaru na poziomie 95%, podlegają ocenie zgodności poprzez porównanie z dopuszczalną wartością natężenia pola elektrycznego, określoną w odpowiednich normatywach higienicznych [91].

Podczas pomiarów należy użyć właściwego przyrządu zwracając uwagę na zakres częstotliwości, w których dokonuje się pomiarów. W pomiarach zastosowano mierniki zarówno wysokich częstotliwości (czyli radiowych) oraz mierniki niskiej częstotliwości (mierzące zakresy PEM urządzeń elektrycznych dołączonych do sieci 50 Hz). Pole elektromagnetyczne wytwarzają każde urządzenia zasilane energią elektryczną, a nie tylko urządzenia radiowe [91, 124, 125].

Po wykonaniu pomiaru, uzyskany wynik porównuje się z odpowiednimi, obowiązującymi prawnie poziomami dopuszczalnymi. W zakresie częstotliwości radiowych zazwyczaj odnosi się do poziomów dopuszczalnych wyrażonych w V/m, więc wynik pomiaru natężenia pola elektrycznego również powinien być wyrażony w V/m. Jeżeli uzyskany wynik pomiaru jest wyrażony w jednostce podwielokrotnej (mV/m, $\mu\text{W}/\text{m}^2$), należy ją przeliczyć na jednostkę podstawową (V/m, W/m^2) i dopiero wówczas porównać z poziomem dopuszczalnym. W innym przypadku ocena wyniku zostanie przeprowadzona nieprawidłowo [93, 124, 125].

5.5.1. Urządzenia pomiarowe do pomiaru PEM

Pomiary przeprowadzono przy użyciu dwóch mierników pola elektromagnetycznego TM-191 oraz TM-196. Miernik TM-191 jest przyrządem pracującym w zakresie 30Hz-300Hz, natomiast miernik TM-196 pracuje w zakresie 10MHz-8GHz. W tabelach 19 i 20 przedstawiono parametry techniczne mierników, a urządzenia pomiarowe przedstawiono na rysunkach 83 i 84.



Rys. 83. Miernik pola elektromagnetycznego TM-191 [126]

Tabl. 19. Parametry techniczne miernika elektromagnetycznego TM-191 [126]

Cecha	Wartość
Mierzone pole	Pole magnetyczne o bardzo niskiej częstotliwości (LF) 30Hz - 300Hz
Metoda pomiaru	Sensor jednoosiowy
Pomiary	Dla częstotliwości 30 - 300Hz
H (pole magnetyczne)	200,0 / 2000mG; 20,00 / 200,0 μ T
Dokładność	$\pm(2,5\%)$ dla częstotliwości 50/60Hz
Pomiar X, Y, Z	brak



Rys. 84. Miernik pola elektromagnetycznego TM-196 [127]

Tabl. 20. Parametry techniczne miernika elektromagnetycznego TM-196 [127]

Cecha	Wartość
Mierzone pole	Pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowej 10MHz - 8GHz
Metoda pomiaru	Pomiar cyfrowy 3-osiowy
Charakterystyka kierunkowa	Izotropowa, trójosiowa
Współczynnik CAL	Ustawiany w zakresie 0,10 - 9,99 (domyślnie 1)
Pomiary	Sygnał CW ($f > 50\text{MHz}$)
E (pole elektryczne)	38,0 mV/m; 11,0 V/m
H (pole magnetyczne)	53,0 $\mu\text{A/m}$; 28,64 mA/m
S (gęstość mocy)	0,1000 $\mu\text{W/m}^2$; 309,3 mW/m ² ; 0,1000 $\mu\text{W/cm}^2$; 30,93 $\mu\text{W/cm}^2$
Zakresy dynamiki	75 dBm
Dokładność	Błąd absolutny $\pm 0,1$ dBm dla 1 mV/m i 2,45 GHz
Dewiacja izotropowości	± 1 mW dla 1 mV/m i 2,45 GHz
Pomiar X, Y, Z	Wybór: wszystkie osie, oś X, oś Y albo oś Z

5.5.2. Pomiary PEM wewnątrz pojazdów

Pomiary pola elektromagnetycznego zostały przeprowadzone wewnątrz każdego z trzech pojazdów przy czterech warunkach jazdy. Pomiary wykonano trójosiowym miernikiem pola elektromagnetycznego TM-196, działającym w zakresie wysokich częstotliwości. Pierwsze pomiary przeprowadzono w ruchu miejskim przy prędkościach jazdy pojazdów 30 km/h i 50 km/h, następnie przeprowadzono pomiary w ruchu autostradowym przy prędkościach 100 km/h oraz 140 km/h. Podczas przeprowadzania pomiarów z prędkością 30 km/h w samochodzie hybrydowym uruchomiony był wyłącznie silnik elektryczny, natomiast podczas przeprowadzania pomiarów przy innych prędkościach jazdy w samochodzie hybrydowym

uruchomiony był silnik spalinowy. Za każdym razem wykonano 20 pomiarów. Pomiary przeprowadzane były w godzinach popołudniowych i wieczornych, temperatura wynosiła około 15° C. Było bezwietrznie i bez opadów. Nie zalegała pokrywa śnieżna. Miernik był zamontowany w okolicy fotela kierowcy. W celu wykluczenia zakłóceń pomiarów radio oraz inne sprzęty elektroniczne na czas pomiaru były wyłączone. Przedstawione wyniki są wypadkową osi X, Y, Z (suma geometryczna). Pomiary przedstawiono jako średnią arytmetyczną zebranych wyników, odrzucając wartości najniższe i najwyższe. Na wykresach zaznaczono słupki błędów. W celu rozróżnienia warunków użytkowania pojazdów wyniki na wykresach oznaczono ramkami. Zielona ramka oznacza pojazdy przeznaczone dla użytku współdzielonego, natomiast fioletowa oznacza pojazd użytkowany prywatnie.



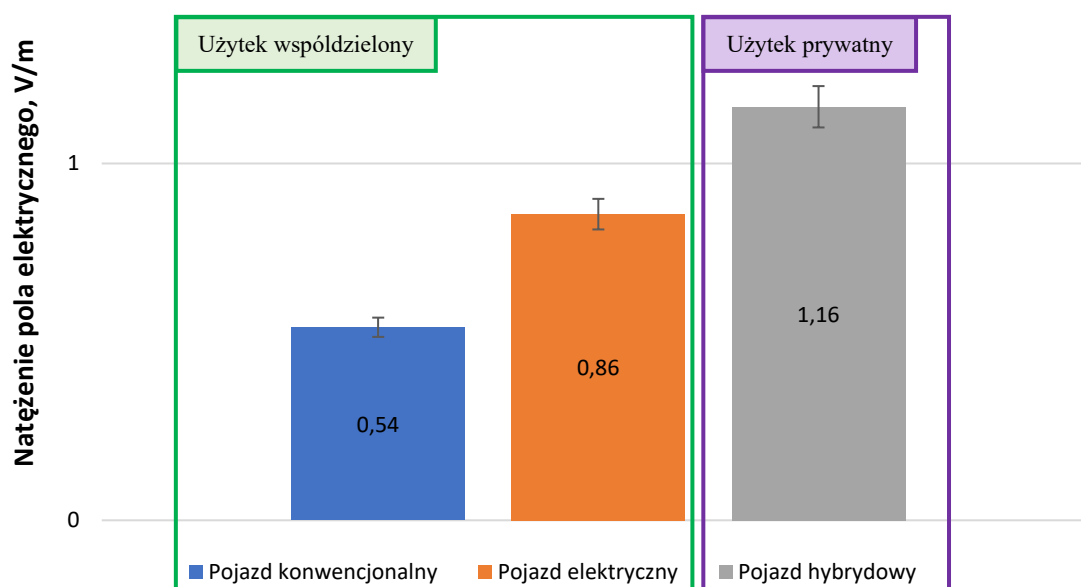
Rys. 85. Przykładowe wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego wewnątrz pojazdów [opracowanie własne]

a) Pomiary PEM w ruchu miejskim przy prędkości 30 km/h

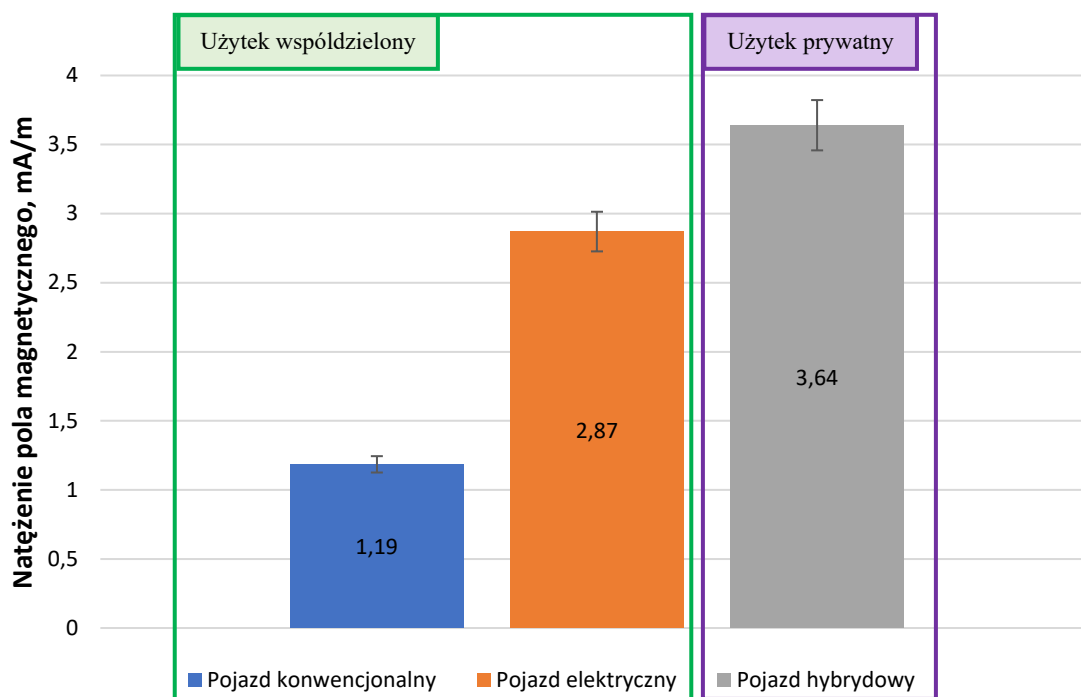
Za pomocą miernika TM-196 wykonano pomiary pola elektromagnetycznego wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu miejskim przy prędkości 30 km/h. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 21) oraz wykresów (Rys. 86-88).

Tabl. 21. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 30 km/h
[opracowanie własne]

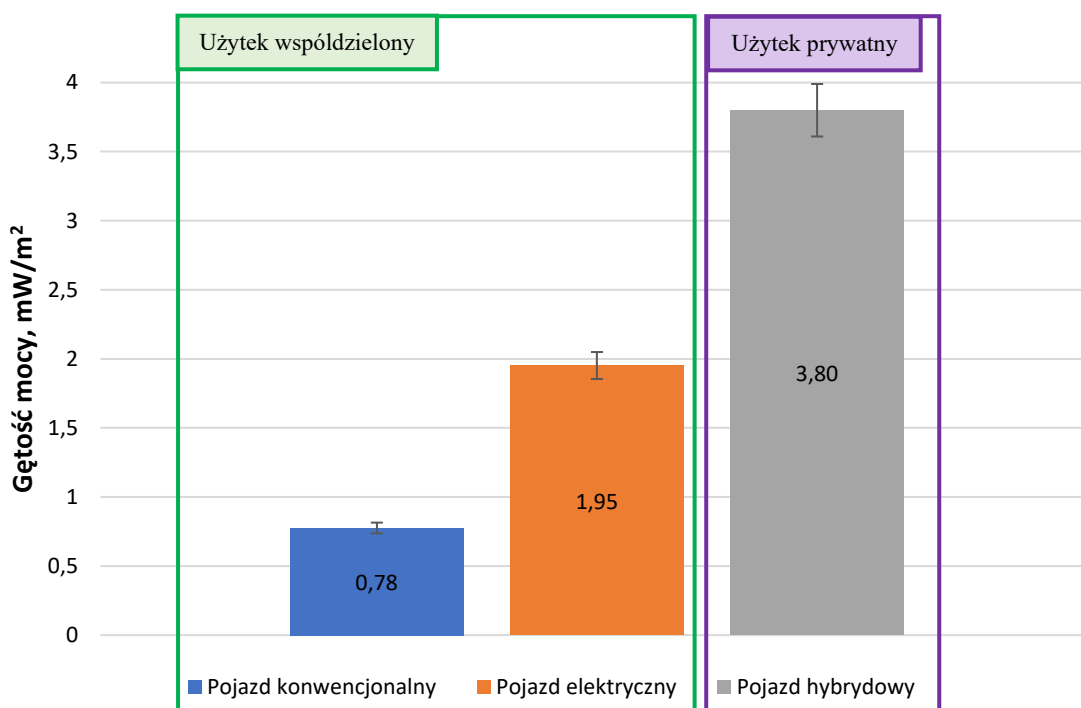
Natężenie pola elektromagnetycznego	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
Natężenie pola elektrycznego, V/m	0,54	0,86	1,16
Natężenie pola magnetycznego, mA/m	1,19	2,87	3,64
Gęstość mocy, mW/m ²	0,78	1,95	3,8



Rys. 86. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h [opracowanie własne]



Rys. 87. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h [opracowanie własne]



Rys. 88. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h [opracowanie własne]

Podczas jazdy miejskiej z prędkością 30 km/h zmierzono natężenie pola elektrycznego wynoszące 0,5 V/m dla pojazdu konwencjonalnego, 0,8 V/m dla samochodu elektrycznego oraz 1,1 V/m dla pojazdu hybrydowego. Natężenie pola magnetycznego było najwyższe

w przypadku pojazdu hybrydowego (3,6 mA/m), nieco niższe dla elektrycznego (2,8 mA/m) i najniższe dla konwencjonalnego (1,2 mA/m). Podobny trend zaobserwowano w gęstości mocy – najniższa wartość dotyczyła auta spalinowego (0,8 mW/m²), wyższa elektrycznego (1,9 mW/m²), a najwyższa hybrydowego (3,8 mW/m²).

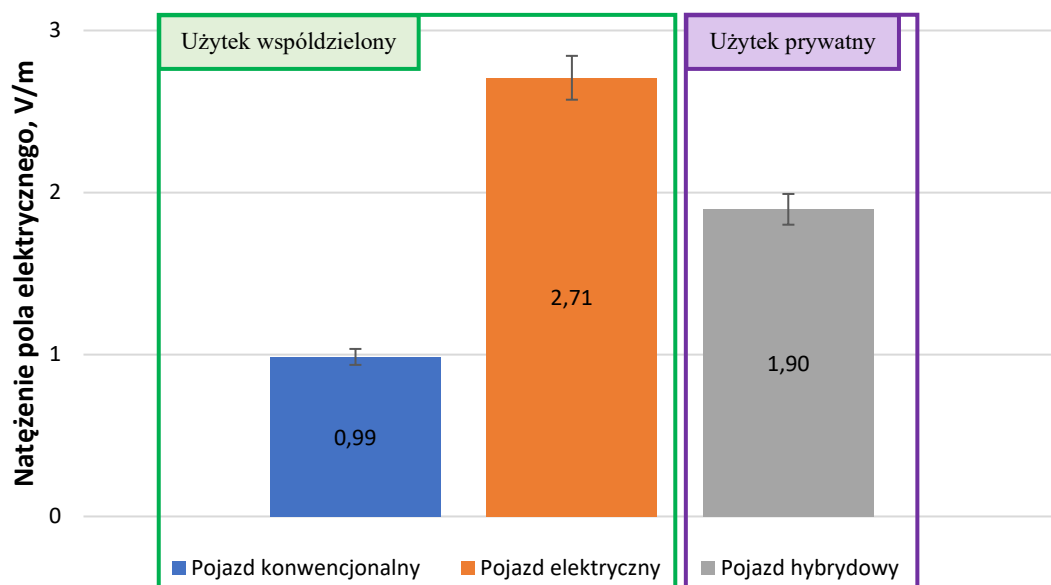
Wyższe wartości natężenia pól elektrycznego i magnetycznego w pojazdach elektrycznych i hybrydowych wynikają z obecności układów wysokiego napięcia oraz pracy silników elektrycznych i przetworników mocy. Prąd płynący przez przewody i podzespoły tych układów generuje silniejsze pola elektromagnetyczne w porównaniu do pojazdów spalinowych. Badany pojazd hybrydowy posiadał silnik elektryczny o większej mocy, co dodatkowo zwiększa emisję pola elektromagnetycznego.

b) Pomiary PEM w ruchu miejskim przy prędkości 50 km/h

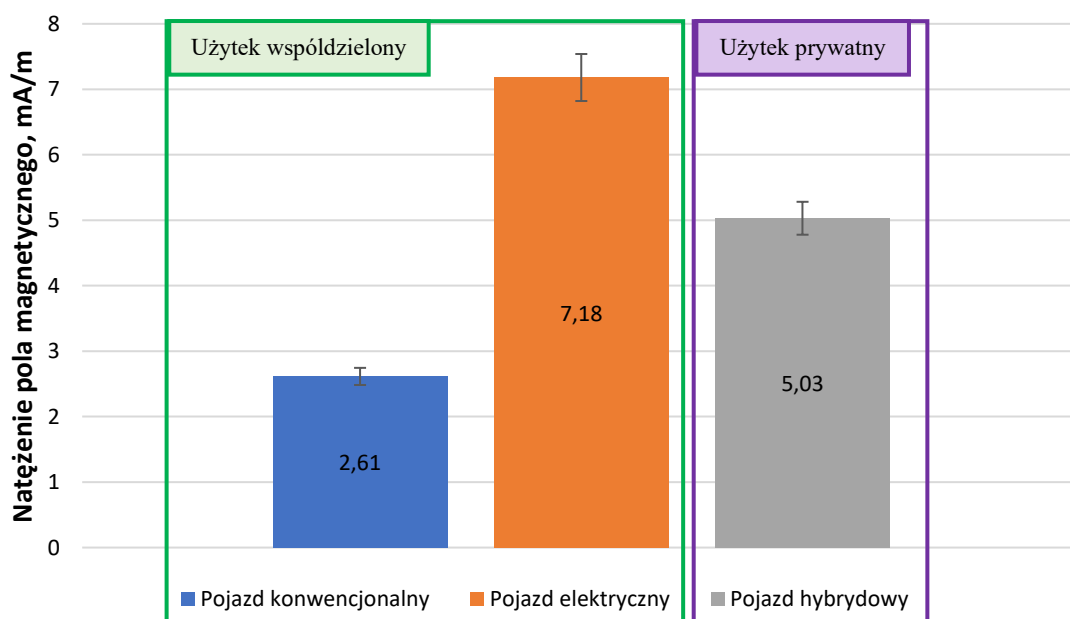
Za pomocą miernika TM-196 wykonano pomiary pola elektromagnetycznego wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu miejskim przy prędkości 50 km/h. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 22) oraz wykresów (Rys. 89-91).

Tabl. 22. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 50 km/h
[opracowanie własne]

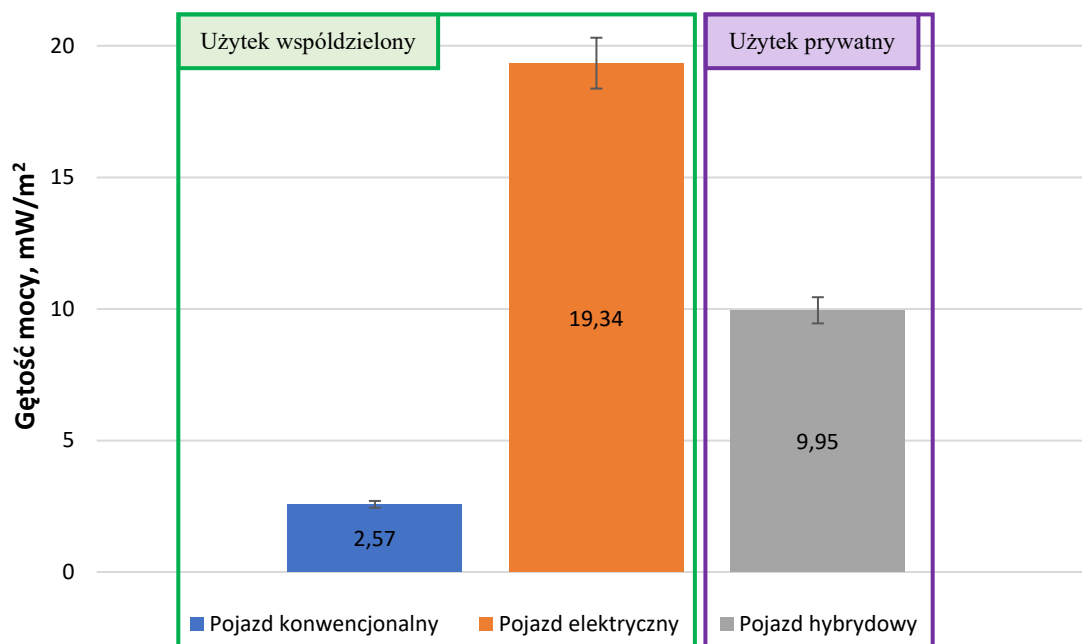
Natężenie pola elektromagnetycznego	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
Natężenie pola elektrycznego, V/m	0,99	2,71	1,9
Natężenie pola magnetycznego, mA/m	2,61	7,18	5,03
Gęstość mocy, mW/m ²	2,57	19,34	9,95



Rys. 89. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h [opracowanie własne]



Rys. 90. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h [opracowanie własne]



Rys. 91. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h [opracowanie własne]

Podczas jazdy miejskiej z prędkością 50 km/h zmierzono natężenie pola elektrycznego wynoszące 1 V/m dla pojazdu konwencjonalnego, 2,7 V/m dla samochodu elektrycznego oraz 1,9 V/m dla hybrydowego. Natężenie pola magnetycznego było najwyższe w przypadku pojazdu elektrycznego (7,8 mA/m), następnie hybrydowego (5 mA/m), a najniższe dla konwencjonalnego (2,6 mA/m). Gęstość mocy również była najmniejsza w pojeździe spalinowym (2,6 mW/m²), wyższa dla hybrydy (9,9 mW/m²) i najwyższa dla auta elektrycznego (19,3 mW/m²).

Wyższe wartości natężenia pól elektrycznego i magnetycznego w samochodach elektrycznych i hybrydowych wynikają z intensywnej pracy układów wysokiego napięcia, przetworników mocy oraz silników elektrycznych. Wzrost prędkości powoduje zwiększenie przepływu prądu w układzie napędowym, co skutkuje silniejszymi polami elektromagnetycznymi. Badany pojazd hybrydowy wykazuje wartości pośrednie, ponieważ przy prędkości 50 km/h uruchomiony zostaje napęd spalinowy. Najniższe emisje odnotowano w pojeździe spalinowym.

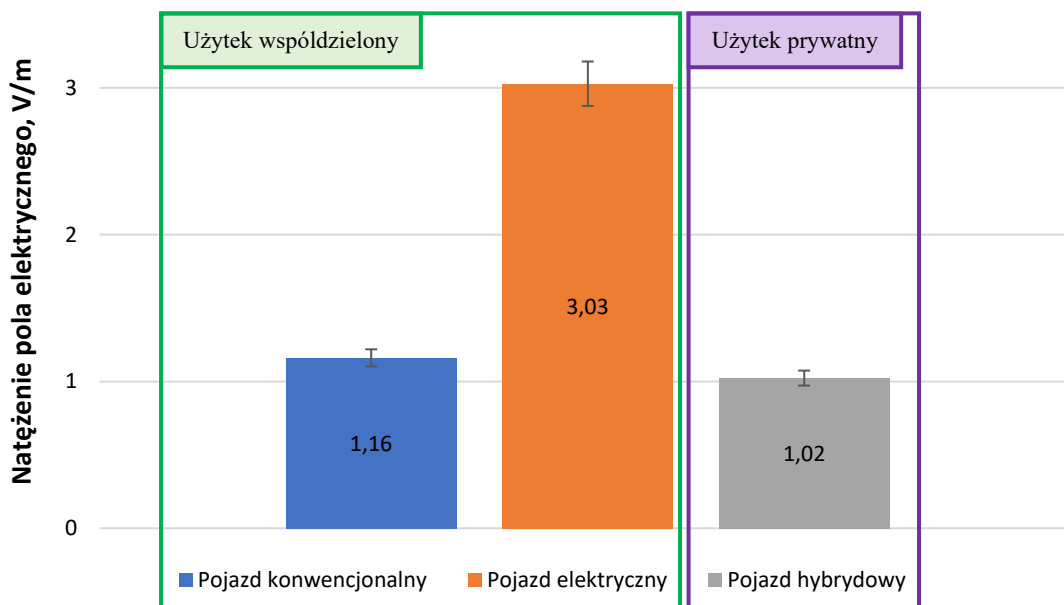
c) Pomiary PEM w ruchu autostradowym przy prędkości 100 km/h

Za pomocą miernika TM – 196 wykonano pomiary pola elektromagnetycznego wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu autostradowym przy prędkości 100 km/h. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 23) oraz wykresów (Rys. 92-94).

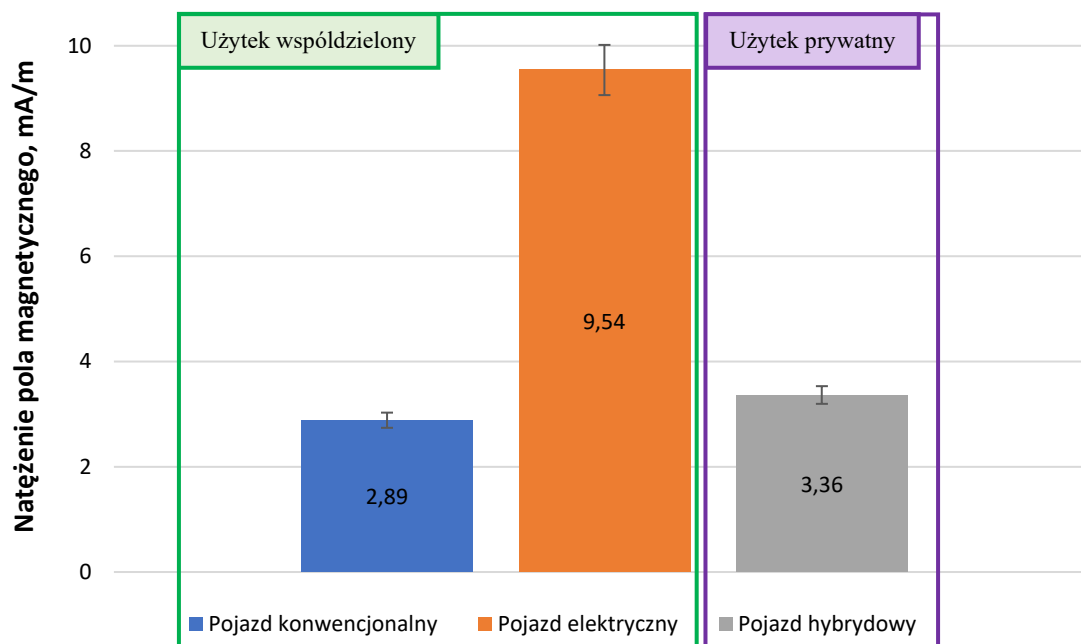
Tabl. 23. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 100 km/h

[opracowanie własne]

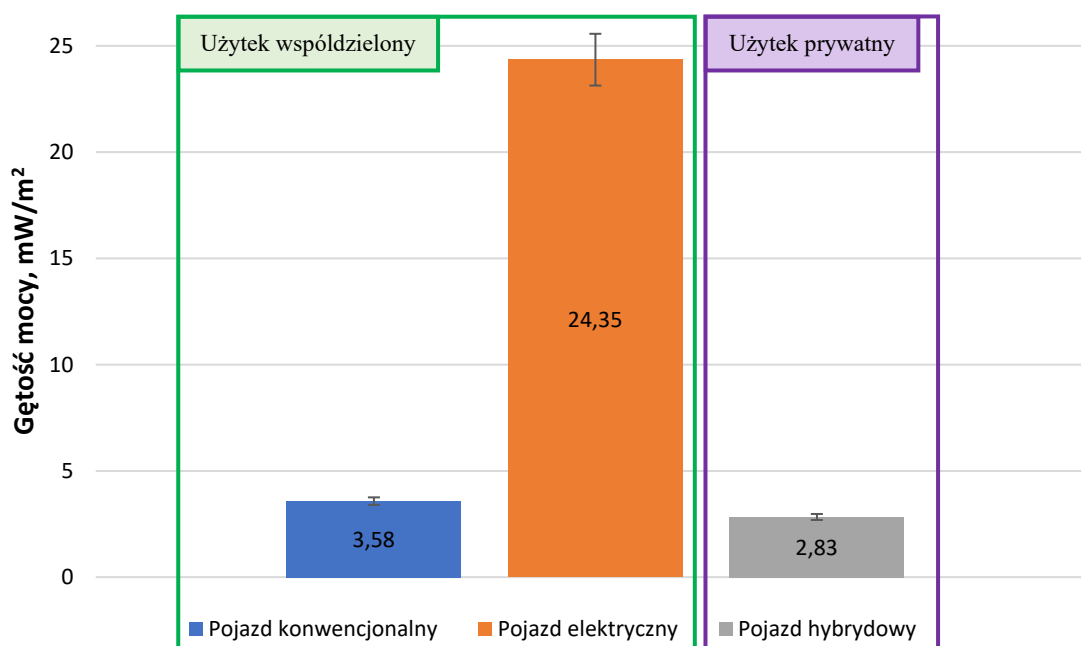
Natężenie pola elektromagnetycznego	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
Natężenie pola elektrycznego, V/m	1,16	3,03	1,02
Natężenie pola magnetycznego, mA/m	2,89	9,54	3,36
Gęstość mocy, mW/m ²	3,58	24,35	2,83



Rys. 92. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h [opracowanie własne]



Rys. 93. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h [opracowanie własne]



Rys. 94. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h [opracowanie własne]

Podczas jazdy autostradowej z prędkością 100 km/h zmierzono natężenie pola elektrycznego wynoszące 1,2 V/m dla pojazdu konwencjonalnego, 3 V/m dla samochodu elektrycznego oraz 1 V/m dla hybrydowego. Natężenie pola magnetycznego było najwyższe

w przypadku pojazdu elektrycznego (9,7 mA/m), niższe dla hybrydy (3,4 mA/m) i najniższe dla konwencjonalnego (2,9 mA/m). Gęstość mocy była najmniejsza w pojeździe hybrydowym (2,8 mW/m²), nieco wyższa dla spalinowego (3,6 mW/m²) i najwyższa dla elektrycznego (24,3 mW/m²).

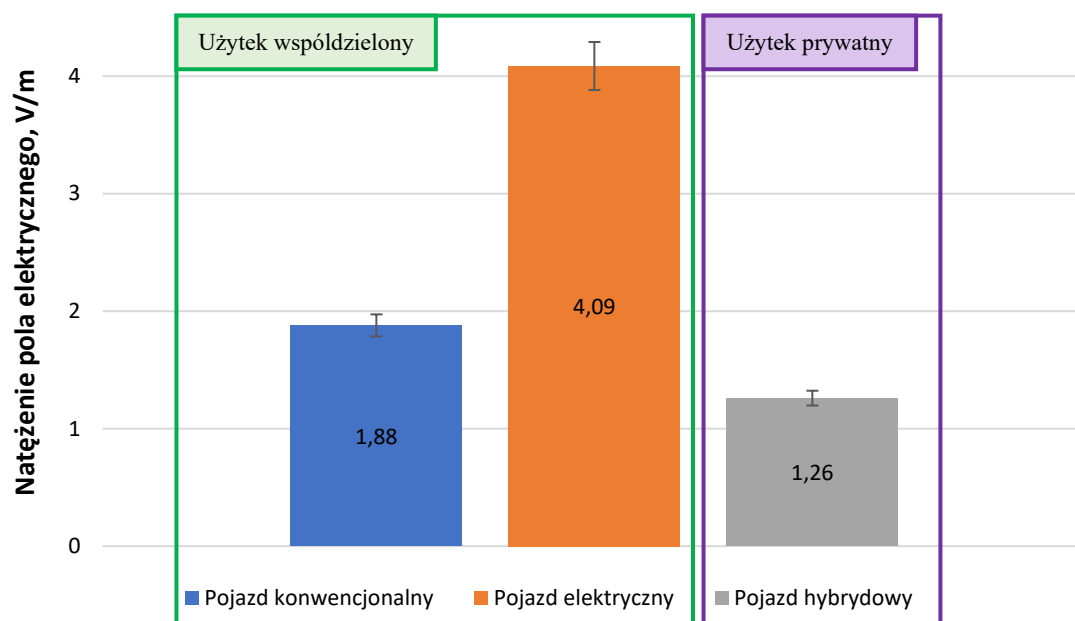
Wyższe wartości natężenia pól elektrycznego i magnetycznego w samochodach elektrycznych wynikają z pracy układów wysokiego napięcia, przetworników mocy oraz silników elektrycznych. Wzrost prędkości zwiększa przepływ prądu, co skutkuje silniejszymi polami elektromagnetycznymi. Pojazd hybrydowy wykazuje niższe wartości niż przy niższych prędkościach, ponieważ na autostradzie napęd elektryczny jest mniej aktywny, natomiast silnik spalinowy jest uruchomiony. Najniższe emisje odnotowano w pojeździe konwencjonalnym, gdzie źródłem pola są jedynie instalacje elektryczne o niższym napięciu oraz alternator.

d) Pomiary PEM w ruchu autostradowym przy prędkości 140 km/h

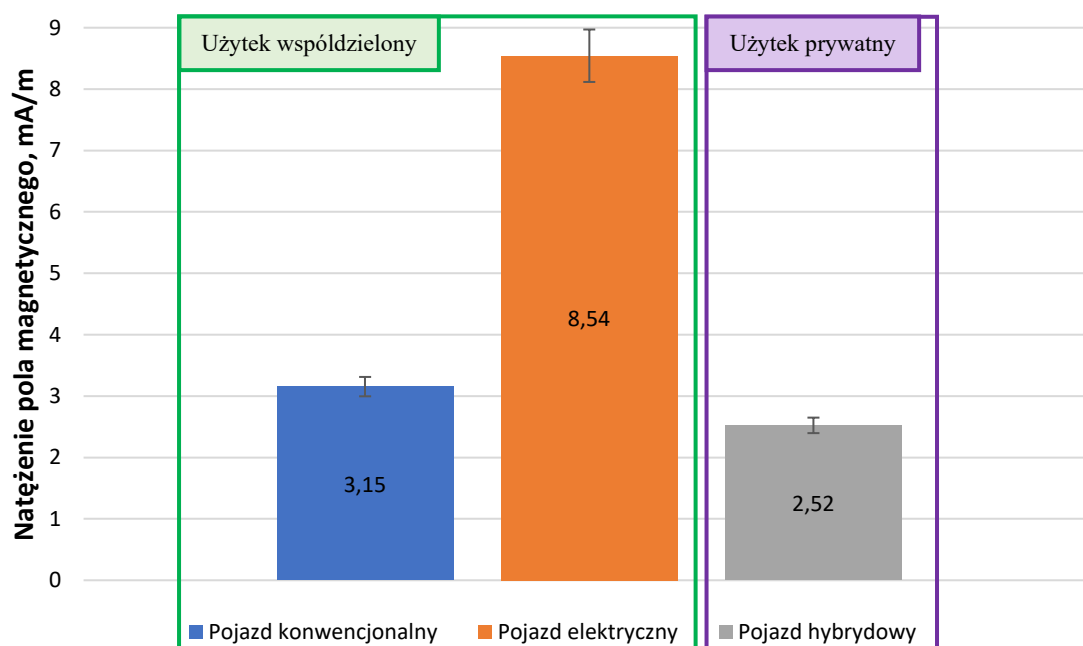
Za pomocą miernika TM – 196 wykonano pomiary pola elektromagnetycznego wewnątrz pojazdów podczas jazdy w ruchu autostradowym przy prędkości 140 km/h. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 24) oraz wykresów (Rys. 95-97).

Tabl. 24. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 140 km/h
[opracowanie własne]

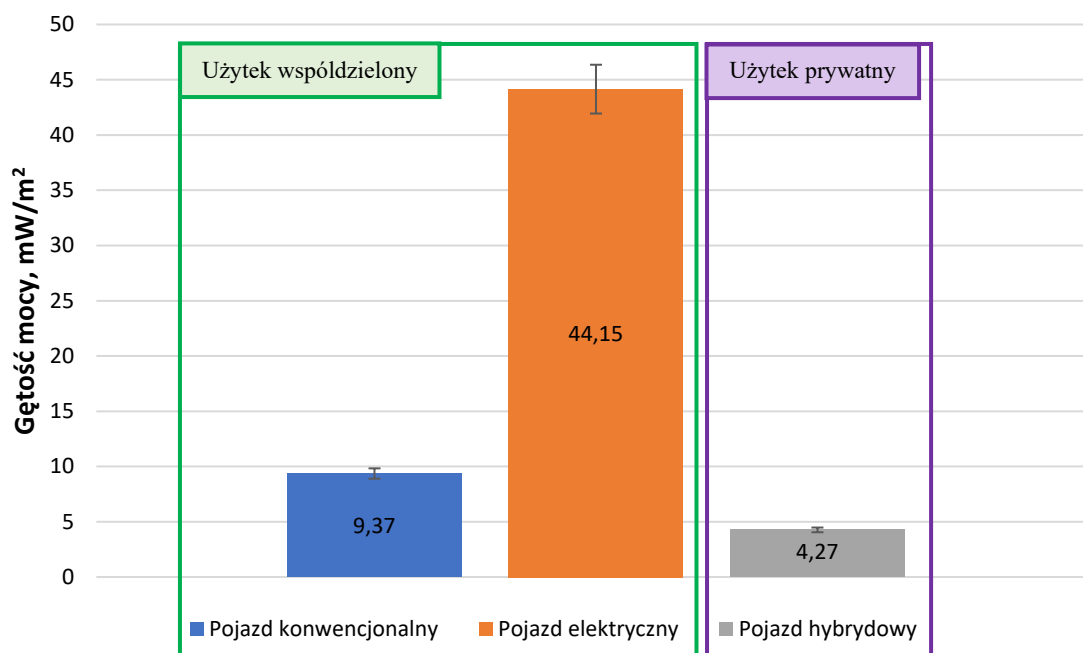
Natężenie pola elektromagnetycznego	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
Natężenie pola elektrycznego, V/m	1,88	4,09	1,26
Natężenie pola magnetycznego, mA/m	3,15	8,54	2,52
Gęstość mocy, mW/m ²	9,37	44,15	4,27



Rys. 95. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h [opracowanie własne]



Rys. 96. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h [opracowanie własne]



Rys. 97. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h [opracowanie własne]

Podczas jazdy autostradowej z prędkością 140 km/h zmierzono natężenie pola elektrycznego wynoszące 1,9 V/m dla pojazdu konwencjonalnego, 4 V/m dla samochodu elektrycznego oraz 1,3 V/m dla hybrydowego. Natężenie pola magnetycznego było najwyższe w przypadku pojazdu elektrycznego (8,5 mA/m), niższe dla konwencjonalnego (3,1 mA/m) i najniższe dla hybrydowego (2,5 mA/m). Gęstość mocy wyniosła najmniej w pojeździe hybrydowym (4,3 mW/m²), więcej w konwencjonalnym (9,4 mW/m²) i najwięcej w elektrycznym (44,1 mW/m²).

Wyższe wartości natężenia pól elektrycznego i magnetycznego w samochodach elektrycznych wynikają z pracy układów wysokiego napięcia, przetworników mocy oraz silników elektrycznych. Wzrost prędkości zwiększa przepływ prądu, co skutkuje silniejszymi polami elektromagnetycznymi. Pojazd hybrydowy wykazuje niższe wartości niż przy niższych prędkościach, ponieważ na autostradzie napęd elektryczny jest mniej aktywny, natomiast silnik spalinowy jest uruchomiony. Najniższe emisje odnotowano w pojeździe konwencjonalnym, gdzie źródłem pola są jedynie instalacje elektryczne o niższym napięciu oraz alternator.

5.5.3. Pomiary PEM podczas ładowania baterii

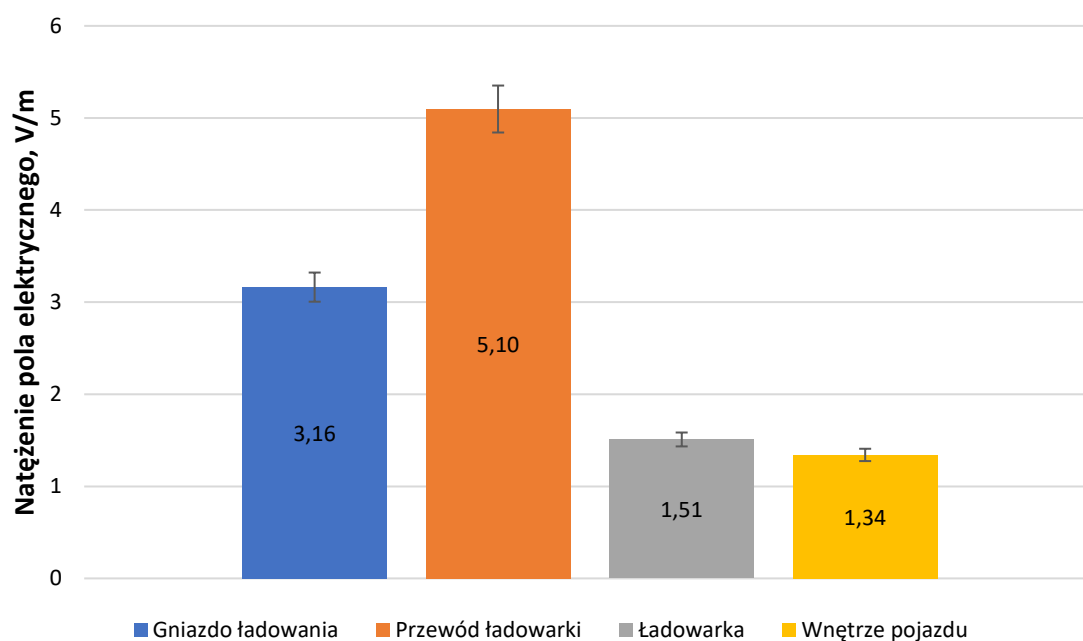
Pomiary pola elektromagnetycznego podczas ładowania pojazdu zostały przy stacji ładowania znajdującej się na parkingu podziemnym centrum handlowego Silesia City Center (Rys. 98). Wybrano to miejsce, ponieważ ładowarka przy centrum handlowym M1 Bytom znajdowała się blisko urządzeń elektrycznych, które wpływały negatywnie na pomiar. Za każdym razem wykonano 20 pomiarów. Pomiary przeprowadzane były w godzinach popołudniowych i wieczornych, temperatura wynosiła około 15° C. W celu wykluczenia zakłóceń pomiarów radio oraz inne sprzęty elektroniczne na czas pomiaru były wyłączone. Przedstawione wyniki są wypadkową osi X, Y, Z (suma geometryczna). Pomiary przedstawiono jako średnią arytmetyczną zebranych wyników, odrzucając wartości najniższe i najwyższe. Na wykresach zaznaczono słupki błędów. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli 25 oraz wykresów (Rys. 99-101).



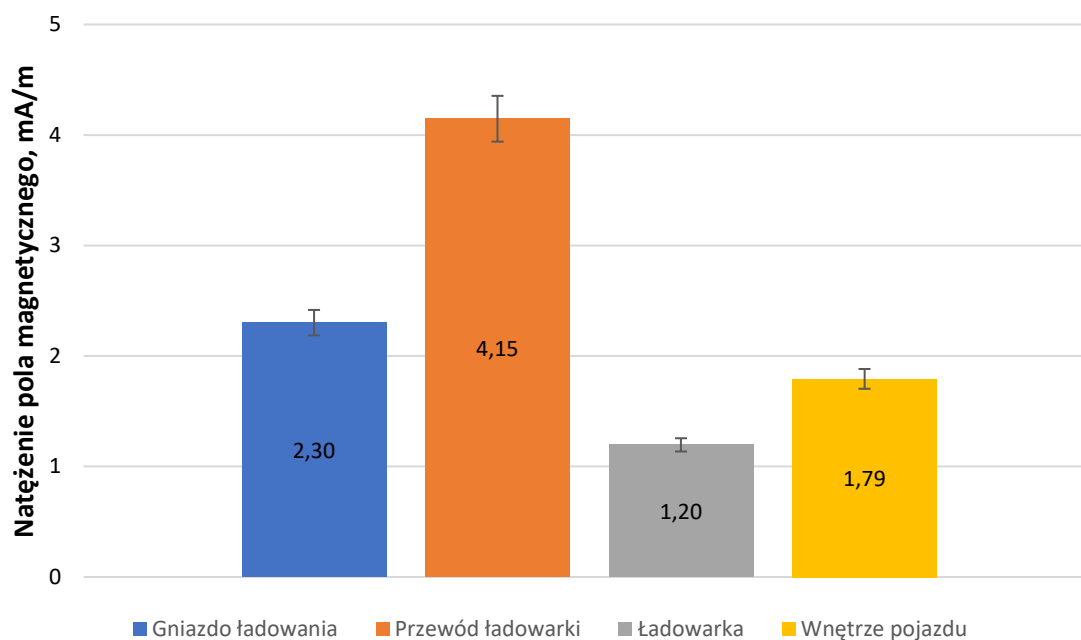
Rys. 98. Pomiary pola elektromagnetycznego podczas ładowania samochodu elektrycznego [opracowanie własne]

Tabl. 25. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego podczas ładowania samochodu elektrycznego
[opracowanie własne]

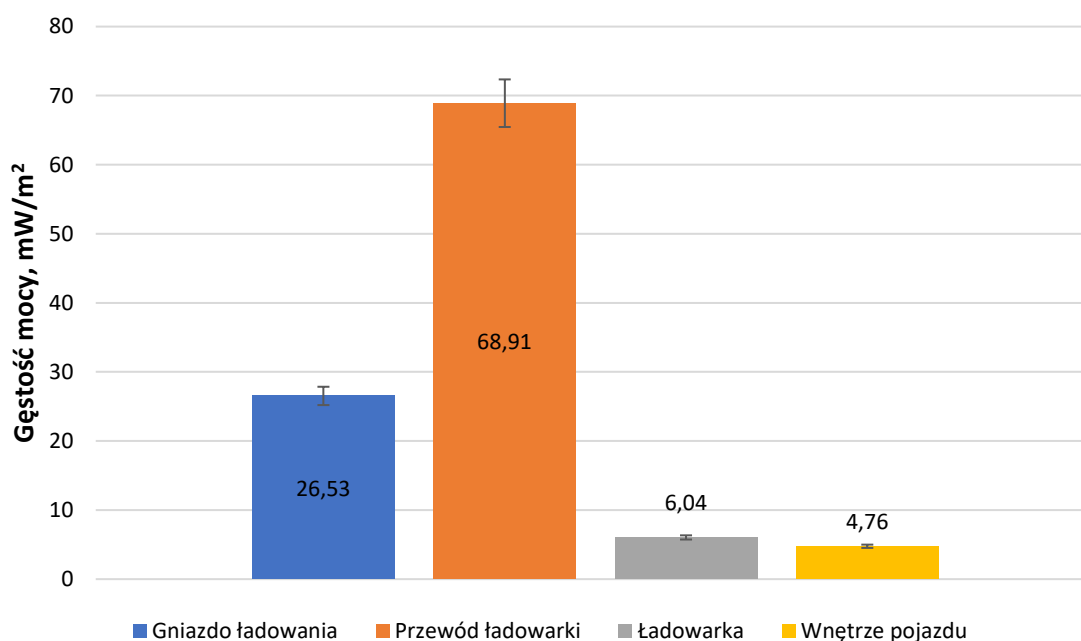
	Gniazdo ładowania	Przewód ładowarki	Ładowarka	Wnętrze pojazdu
Natężenie pola elektrycznego, V/m	3,16	5,10	1,51	1,34
Natężenie pola magnetycznego, mA/m	2,30	4,15	1,2	1,79
Gęstość mocy, mW/m ²	26,53	68,91	6,04	4,76



Rys. 99. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego podczas ładowania pojazdu elektrycznego [opracowanie własne]



Rys. 100. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego podczas ładowania pojazdu elektrycznego [opracowanie własne]



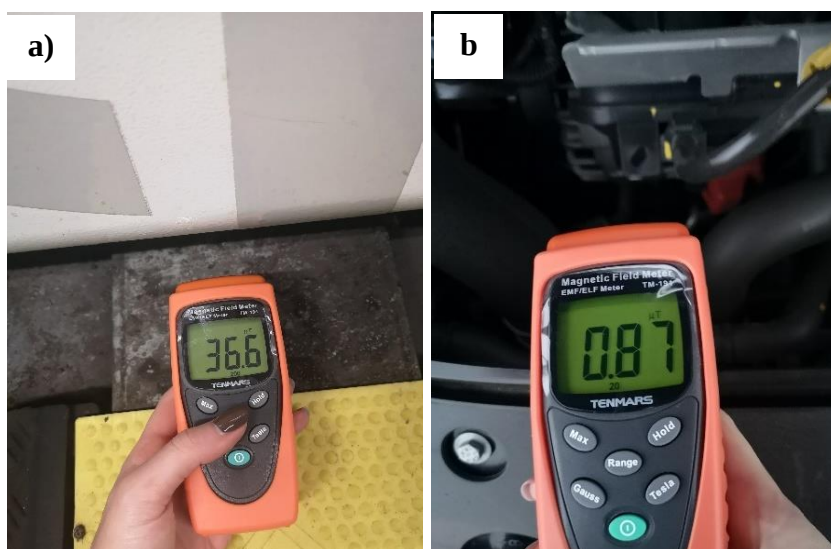
Rys. 101. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy podczas ładowania pojazdu elektrycznego [opracowanie własne]

Badania natężenia pola elektrycznego, natężenia pola magnetycznego oraz gęstości mocy podczas ładowania samochodu elektrycznego wykazały, wartości są najwyższe w okolicy przewodów wysokiego napięcia i dla składowej elektrycznej wynoszą 5 V/m,

następnie w okolicy gniazda ładowania (3 V/m) oraz przy samej ładowarce (1,5 V/m). Wewnątrz pojazdu podczas ładowania zarejestrowano wartość 1,3 V/m. Gęstość mocy wyniosła 69 mW/m² w okolicy przewodu ładowarki, 26,5 mW/m² przy gnieździe ładowania oraz 6 mW/m² przy samej ładowarce.

5.5.4. Pomiary indukcji magnetycznej

Pomiary indukcji magnetycznej zostały przeprowadzone w każdym z trzech pojazdów. Wykonano pomiary stanowiskowe w pracowni eksploatacji pojazdów samochodowych na Wydziale Transportu i Inżynierii Lotniczej Politechniki Śląskiej. Następnie wykonano pomiary emisji indukcji magnetycznej podczas ładowania pojazdu elektrycznego przy stacji ładowania znajdującej się na parkingu podziemnym centrum handlowego Silesia City Center. Przykładowe zdjęcia z pomiarów przedstawiono na rysunku 102. Pomiary wykonano za pomocą miernika pola elektromagnetycznego TM-191. Do badań indukcji magnetycznej w pojazdach z napędem konwencjonalnym i hybrydowym wybrano alternator, ponieważ jest to urządzenie generujące prąd oraz tylko w jego okolicy stwierdzono znaczącą emisję indukcji magnetycznej. Nie stwierdzono natomiast obecności pól elektromagnetycznych wyższych częstotliwości. W celu wykluczenia zakłóceń pomiarów radio oraz inne sprzęty elektroniczne na czas pomiaru były wyłączone. Pomiary przedstawiono jako średnią arytmetyczną zebranych wyników, odrzucając wartości najniższe i najwyższe. Na wykresach zaznaczono słupki błędów. Wyniki przedstawiono poniżej.



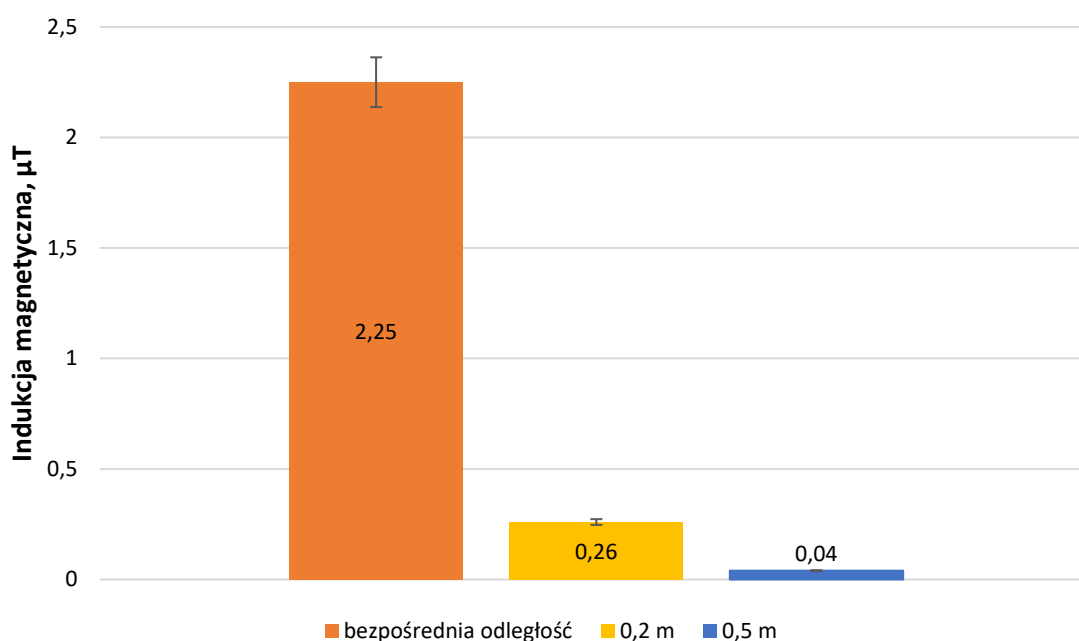
Rys. 102. Przykładowe pomiary indukcji magnetycznej: a) przy ładowarce, b) przy alternatorze [opracowanie własne]

a) Samochód z napędem konwencjonalnym

W samochodzie z napędem konwencjonalnym pomiary indukcji magnetycznej za pomocą miernika TM-191 przeprowadzono w okolicy alternatora. Za każdym razem wykonano 20 pomiarów bezpośrednio przy urządzeniu oraz w odległościach 0,2 m oraz 0,5 m. Podczas pomiarów temperatura wynosiła około 15° C. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli 26 oraz wykresu (Rys. 103).

Tabl. 26. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej pojeździe spalinowym – alternator [opracowanie własne]

	Bezpośrednia odległość	0,2 m	0,5 m
Indukcja magnetyczna, μT (tło: 0.01)	2,25	0,26	0,04



Rys. 103. Indukcja magnetyczna w okolicy alternatora – pojazd konwencjonalny [opracowanie własne]

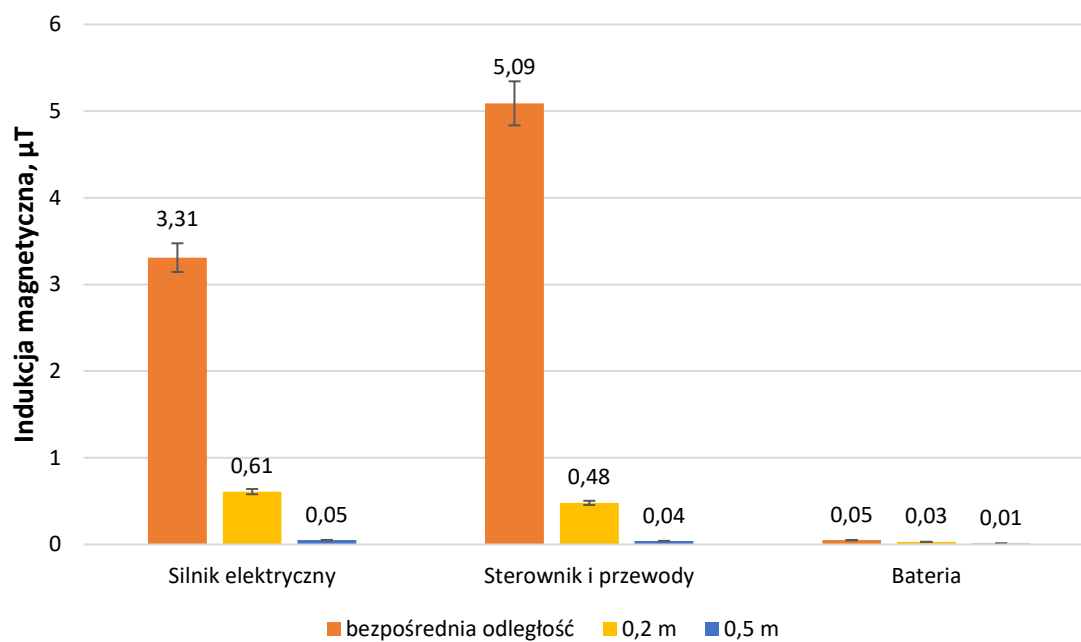
Podczas badań stanowiskowych zarejestrowano indukcje magnetyczną w samochodzie spalinowym w okolicy alternatora na poziomie 2,25 μT , która w odległości 20 cm wynosi już poniżej 1 μT .

b) Samochód z napędem elektrycznym

Pomiary indukcji magnetycznej zostały przeprowadzone podczas ładowania pojazdu przy stacji ładowania znajdującej się na parkingu podziemnym centrum handlowego Silesia City Center. Wybrano to miejsce, ponieważ ładowarka przy centrum handlowym M1 Bytom znajdowała się blisko urządzeń elektrycznych, które mogły wpłynąć negatywnie na pomiary. Za każdym razem wykonano 20 pomiarów bezpośrednio przy urządzeniu oraz w odległościach 0,2 m oraz 0,5 m. Podczas pomiarów temperatura wynosiła około 15° C. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 27 i 28) oraz wykresów (Rys. 104 i 105).

Tabl. 27. Wyniki pomiarów stanowiskowych indukcji magnetycznej w pojeździe elektrycznym
[opracowanie własne]

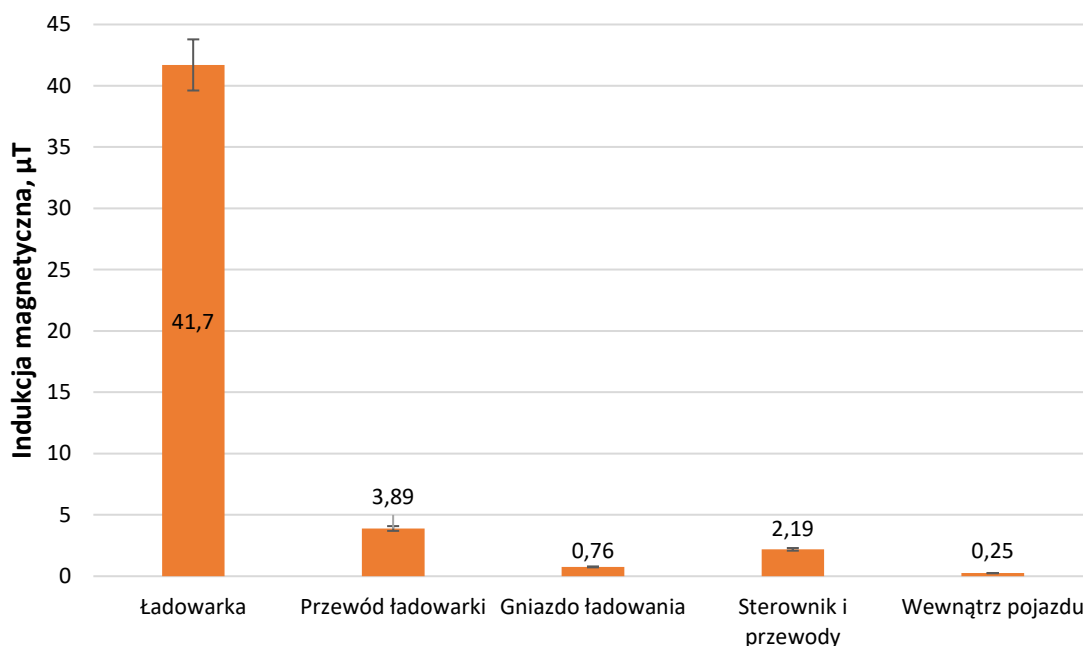
Miejsce pomiaru	Odległość, m	Indukcja magnetyczna, μT (tło: 0,01 μT)
Silnik elektryczny	bezpośrednia odległość	3,31
	0,2	0,61
	0,5	0,05
Sterownik i przewody	bezpośrednia odległość	5,09
	0,2	0,48
	0,5	0,04
Bateria	bezpośrednia odległość	0,05
	0,2	0,02
	0,5	0,01



Rys. 104. Indukcja magnetyczna – pojazd elektryczny [opracowanie własne]

Tabl. 28. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej podczas ładowania pojazdu elektrycznego
[opracowanie własne]

Miejsce pomiaru	Odległość	Indukcja magnetyczna, μT (tło: 0,01 μT)
Ładowarka	bezpośrednia odległość	41,7
Przewód ładowarki		3,89
Gniazdo ładowania		0,76
Sterownik i przewody		2,19
Wewnątrz pojazdu		0,25



Rys. 105. Indukcja magnetyczna w okolicy ładowarki podczas ładowania pojazdu elektrycznego [opracowanie własne]

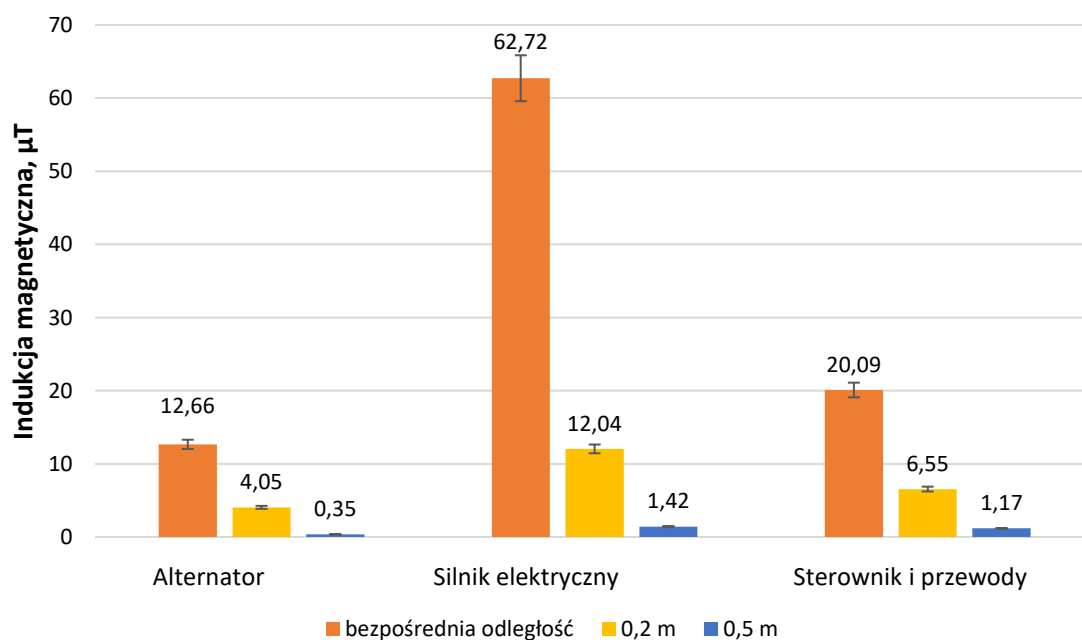
W samochodzie elektrycznym na badaniu stanowiskowym indukcja magnetyczna wystąpiła w okolicy sterownika i przewodów ($5 \mu\text{T}$) oraz przy silniku ($3,3 \mu\text{T}$), natomiast jak w przypadku alternatora w pojeździe spalinowym po oddaleniu od źródła o 20 cm wynosiła już tylko od $0,4 \mu\text{T}$ do $0,6 \mu\text{T}$. Najwyższą indukcję magnetyczną zarejestrowano podczas ładowania samochodu elektrycznego w okolicy ładowarki i przewodów wysokiego napięcia. Wyniosła ona $41,7 \mu\text{T}$. Przy przewodzie ładowarki wynosiła $3,9 \mu\text{T}$, a w okolicy sterownika i przewodów w pojeździe $2,2 \mu\text{T}$.

c) Samochód z napędem hybrydowym

W samochodzie z napędem hybrydowym pomiary indukcji magnetycznej przeprowadzono w okolicy alternatora oraz silnika elektrycznego, sterownika i przewodów wysokiego napięcia. Za każdym razem wykonano 20 pomiarów bezpośrednio przy urządzeniu oraz w odległościach 0,2 m oraz 0,5 m. Podczas pomiarów temperatura wynosiła około 15°C . Wyniki pomiarów przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 29) oraz wykresu (Rys. 106).

Tabl. 29. Wyniki pomiarów stanowiskowych indukcji magnetycznej w pojeździe hybrydowym
[opracowanie własne]

Miejsce pomiaru	Odległość	Indukcja magnetyczna, μT (tło: 0,01 μT)
Alternator	bezpośrednia odległość	12,66
	0,2 m	4,05
	0,5 m	0,35
Silnik elektryczny	bezpośrednia odległość	62,72
	0,2 m	12,04
	0,5 m	1,42
Sterownik i przewody	bezpośrednia odległość	20,09
	0,2 m	6,55
	0,5 m	1,17



Rys. 106. Indukcja magnetyczna – pojazd hybrydowy [opracowanie własne]

Podczas badań w samochodzie hybrydowym w okolicy silnika elektrycznego zarejestrowano indukcje magnetyczną na poziomie 62,7 μT , w okolicy sterownika i przewodów 20 μT , a w okolicy alternatora 12,6 μT . W odległości 20 cm od źródeł wynosiła kolejno: 12,4 μT dla silnika, 6,5 μT dla sterownika oraz 4 μT dla alternatora.

5.5.5. Analiza i interpretacja wyników dla pomiarów PEM

Rozporządzenie Ministra w sprawie dopuszczalnych parametrów dla pól o częstotliwościach od 10 MHz do 300 GHz określa wartości bezpieczne dla składowej elektrycznej od 28 V/m do 61 V/m, dla składowej magnetycznej 0,073 A/m do 0,16 A/m oraz dla gęstości mocy 2 do 10 W/m^2 w zależności od częstotliwości. Pole magnetyczne o natężeniu 1 A/m charakteryzuje jednocześnie indukcja magnetyczna o wartości ok. 1,25 μT , a więc wartość dopuszczalna dla niskich częstotliwości (od 50 Hz do 10 kHz dla pracy silnika elektrycznego oraz około 60 Hz dla alternatora) wynosi 100 μT . W przypadku stacji ładowania pojazdów elektrycznych (50 kHz do 100 kHz) wartość maksymalna to 50 μT [90, 91, 95].

Badania emisji pola elektromagnetycznego w pojeździe z napędem elektrycznym wykazały, że wartości natężenia pola elektrycznego podczas jazdy są najwyższe wewnątrz pojazdu z napędem elektrycznym. Wartości te rosną wraz ze wzrostem prędkości pojazdu, a zatem wraz z obciążeniem silnika. Zauważyć można spadek emisji PEM w samochodzie hybrydowym podczas jazdy z wyższą prędkością w ruchu autostradowym, podczas gdy napęd elektryczny zostaje wyłączony, a samochód porusza się za pomocą napędu konwencjonalnego. Niższe wartości PEM podczas jazdy samochodem hybrydowym z uruchomionym silnikiem spalinowym względem samochodu spalinowego spowodowane mogą być zastosowaniem lepszego ekranowania przewodów i zabezpieczeń, ze względu na wyższą klasę pojazdu. Wartości natężenia pola elektrycznego, magnetycznego oraz gęstość mocy nie przekraczają wartości dopuszczalnych, określonych jako bezpieczne.

Indukcja magnetyczna w samochodzie z napędem konwencjonalnym jest mniejsza, niż w samochodzie elektrycznym. Wartości te, mieściły się w normie ustalonej w Rozporządzeniu oraz uznawanej za bezpieczną. Najwyższą indukcją magnetyczną stwierdzono w pojeździe hybrydowym, w bezpośredniej okolicy silnika elektrycznego. Spowodowane może to być zastosowaniem napędu o większej mocy, niż w przypadku badanego samochodu elektrycznego. Warto dodać, że wartości indukcji magnetycznej znacznie spadały już w odległości 20 cm.

Według ICNIRP wartości indukcji magnetycznej nie mogą przekraczać 40 μT wewnątrz pojazdu i około 100 μT w bezpośrednim otoczeniu stacji ładowania. W bezpośredniej okolicy

ładowarki pojazdu elektrycznego stwierdzono indukcje magnetyczną na poziomie 42 μT (w okolicy przewodów ładowarki). Wartość ta nie przekracza wartości dopuszczalnej jednak bezpośrednie przebywanie w okolicy ładowarki może wpływać negatywnie na zdrowie.

Na wielkość emisji pola elektromagnetycznego wysokich i radiowych częstotliwości oraz indukcje magnetyczną duży wpływ ma moc układu napędowego. Ocena ekspozycji na pole elektromagnetyczne wyższych częstotliwości związane z użytkowaniem pojazdów wykazała ich relatywnie niski poziom podczas jazdy. Warto zwrócić uwagę na znaczną złożoność charakterystyk tych pól (udział składowych o różnych częstotliwościach oraz znaczną dynamikę zmienności w czasie). W przypadku pomiarów indukcji magnetycznej emitowanej przez instalację zasilającą i układy napędowe samochodu o napędzie całkowicie elektrycznym oraz o napędzie hybrydowym badania wykazały również, że lokalizacja elementów takich jak przetwornik DC/AC i przewody łączące przetwornik z silnikiem elektrycznym i ich odległość od foteli kierowcy i pasażerów znacząco wpływa na poziom ich ekspozycji.

Badania pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik elektryczny oraz przewody wysokiego napięcia w pojeździe elektrycznym podczas jazdy oraz podczas ładowania nie przekraczały wartości określonych jako dopuszczalne ze względu na ochroną zdrowia i życia pracowników, które zostały określone w rozporządzeniu [90]. Pomiary indukcji magnetycznej również spełniają normy. Indukcja magnetyczna w okolicy przewodów wysokiego napięcia ładowarek pojazdów elektrycznych była na wysokim poziomie, jednak mieściła się w granicach normy. Przebywanie w bezpośrednim otoczeniu ładowarek w dłuższym czasie może powodować bóle głowy, zaburzenia koncentracji oraz złe samopoczucie. Należy zauważyć jak ważną kwestią jest wiedza na temat szkodliwego oddziaływania pola elektromagnetycznego.

5.6. Pomiary zapylenia

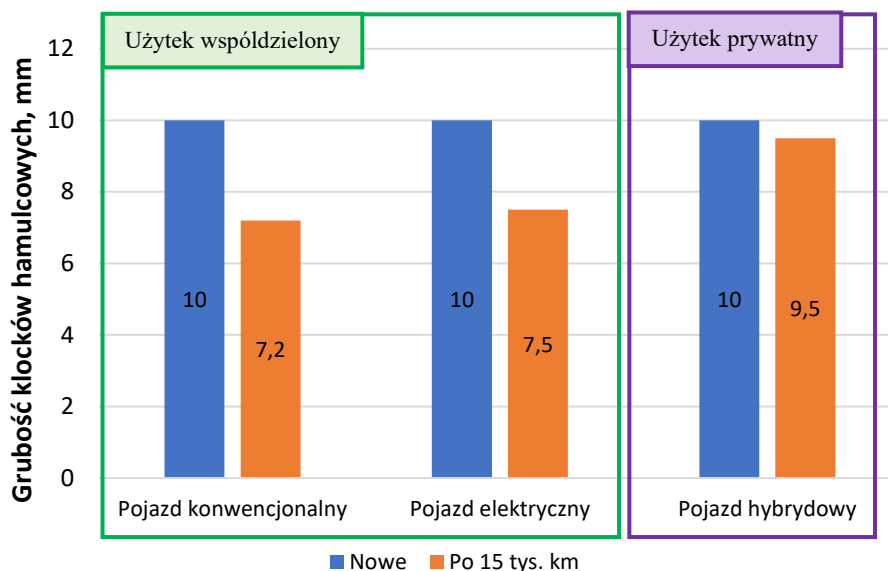
Wykonanie pomiaru zapylenia jest trudnym zadaniem, ze względu na złożone działanie układów hamulcowych oraz układu napędowego (w przypadku zużywania się opon). Dodatkowo trudne jest zasymulowanie wszystkich możliwych scenariuszy przyspieszania i hamowania. Utrudnia to porównanie ilościowe pomiędzy różnymi pojazdami. Kolejnym problemem jest zastosowanie układów hamulcowych, okładzin ciernych, tarcz hamulcowych oraz opon różnych rodzajów i producentów [128-130].

Porównanie emisji pyłów z pojazdów z napędem alternatywnym do pojazdów z napędem konwencjonalnym, jest skomplikowane ze względu na szereg kwestii. Możliwe są

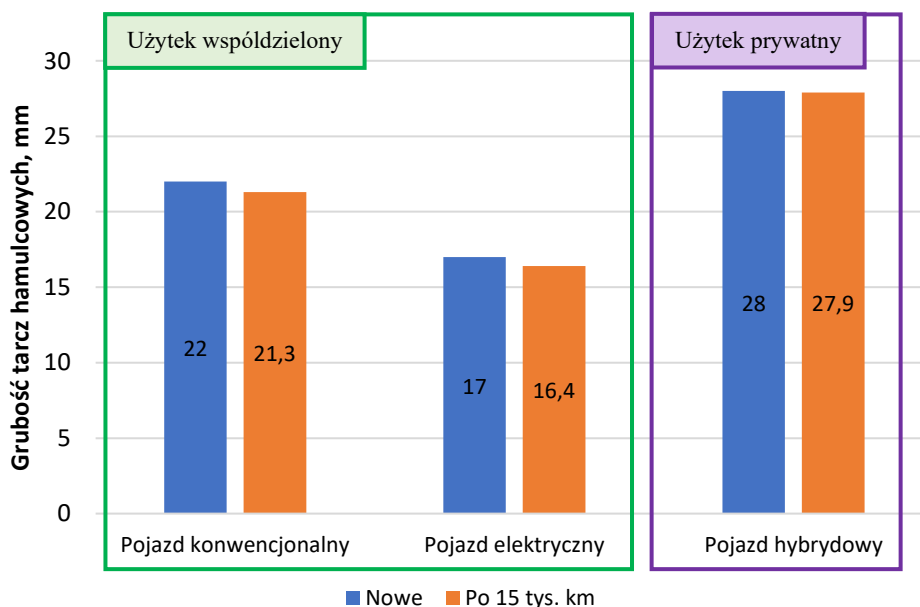
różne systemy klasyfikacji, na przykład ze względu na segment, ze względu na klasę oraz ze względu na wielkość i masę samego pojazdu. Kolejnym problemem jest to, iż pojazdy elektryczne nie zawsze pasują do określonej klasy dla pojazdów spalinowych. Często też pojazdy różnią się od siebie, nawet gdy są w tej samej klasie. Minimalizacją uniknięcia błędów podczas pomiarów, jest porównanie pojazdów tej samej marki, aby zapewnić jak największe podobieństwo pojazdów. Należy jednak pamiętać, że pojazdy elektryczne często mają inne specyfikacje pod względem zastosowanych materiałów, prędkości maksymalnej, rozłożenia masy, a także typu opon i układów hamulcowych. Gdy porównano masę tych samych pojazdów z napędem elektrycznym i ich odpowiedników z napędem konwencjonalnym, stwierdzono, że masa pojazdu elektrycznego jest średnio o 24% większa niż w przypadku samochodu spalinowego, a zużycie opon i nawierzchni rośnie liniowo wraz z masą pojazdu [131-137].

5.6.1. Dane eksploatacyjne zużycia hamulców i opon

W niniejszej pracy w celu porównania ilości pyłów pochodzących z samochodu o napędzie elektrycznym oraz o napędzie konwencjonalnym wykorzystano informacje dotyczące wartości grubości klocków oraz tarcz hamulcowych, a także głębokości bieżnika. Dane zostały pozyskane z autoryzowanych stacji obsługi marek odpowiadającym pojazdom wytypowanym do badań. Porównanie dotyczyło zarówno pojazdów z napędem elektrycznym, jak i konwencjonalnym oraz hybrydowym. Uwzględniano zużycie hamulców osi przedniej, ponieważ hamulce osi tylnej były różnej konstrukcji (tarczowe lub bębnowe). Samochody, których dotyczyła analiza wyprodukowane zostały w 2021 roku, a badania zostały przeprowadzone podczas obsługi technicznej, przypadającej pod koniec drugiego roku użytkowania pojazdów. W celu przeprowadzenia analizy uzyskanych wyników w poprawny sposób dokonano kalkulacji uwzględniającej różne przebiegi pojazdów wytypowanych do badań. Jako przykład reprezentatywny wybrano przebieg wynoszący 15 tys. km. Wyniki badań dotyczące zużycia elementów układu hamulcowego przedstawiono na rysunkach 107 i 108. W celu rozróżnienia warunków użytkowania pojazdów wyniki na wykresach oznaczono ramkami. Zielona ramka oznacza pojazdy przeznaczone dla użytku współdzielonego, natomiast fioletowa oznacza pojazd użytkowany prywatnie.



Rys. 107. Zużycie klocków hamulcowych po 15 tys. kilometrów przebiegu [opracowanie własne]



Rys. 108. Zużycie tarcz hamulcowych po 15 tys. kilometrów przebiegu [opracowanie własne]

W samochodzie z napędem konwencjonalnym po przebiegu 15 tysięcy kilometrów stwierdzono zużycie klocków hamulcowych hamulców przednich wynoszące 2,8 mm oraz przednich tarcz hamulcowych wynoszące 0,7 mm. W samochodzie elektrycznym zużycia te wynosiły odpowiednio 2,5 mm oraz 0,6 mm. W pojeździe z napędem hybrydowym zużycie przednich klocków hamulcowych wyniosło 0,5 mm, a przednich tarcz hamulcowych 0,1 mm.

Powierzchnię badanych klocków oraz tarcz hamulcowych, a także objętość pyłu powstałego w wyniku ich zużycia przedstawiono w formie tabeli (Tabl. 30).

Tabl. 30. Powierzchnie badanych klocków i tarcz hamulcowych oraz objętościowe ich zużycie
[opracowanie własne]

	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
Powierzchnia robocza klocka hamulcowego (4 szt. klocków), cm²	237,1	189,7	254,6
Powierzchnia robocza tarczy hamulcowej (2 szt. tarczy), cm²	795,8	624,3	1 035,8
Objętość pyłu klocków hamulcowych, cm³	66,3	47,4	12,7
Objętość pyłu tarcz hamulcowych, cm³	55,7	37,4	10,3

Biorąc pod uwagę gęstość materiałów stosowanych na klocki hamulcowe założono średnią gęstość materiału ciernego klocka wynoszącą 2,7 g/cm³. Gęstość materiału stosowanego na tarcze hamulcowe (żeliwo) określono na 7,3 g/cm³ obliczono masę pyłu powstałego w wyniku eksploatacji pojazdów podczas przebiegu 15 tys. kilometrów (Tabl. 31).

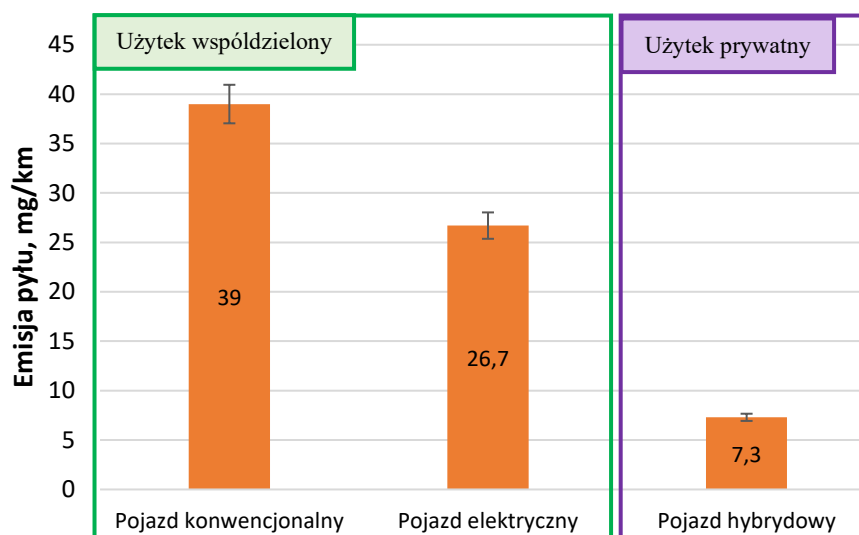
Tabl. 31. Masa pyłu z klocków i tarcz hamulcowych [opracowanie własne]

	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
Masa pyłu klocków hamulcowych, g	179	127,9	34,3
Masa pyłu tarcz hamulcowych, g	406,6	273	75,2

W odniesieniu do 1 kilometra przebiegu, emisja pyłu powstałego w wyniku eksploatacji różnych środków transportu w warunkach mieszanych (ruch miejski i autostradowy), w przeliczeniu na miligramy, prezentuje się następująco (Tabl. 32 i Rys. 109).

Tabl. 32. Emisja pyłu z klocków i tarcz hamulcowych w odniesieniu do 1 km [opracowanie własne]

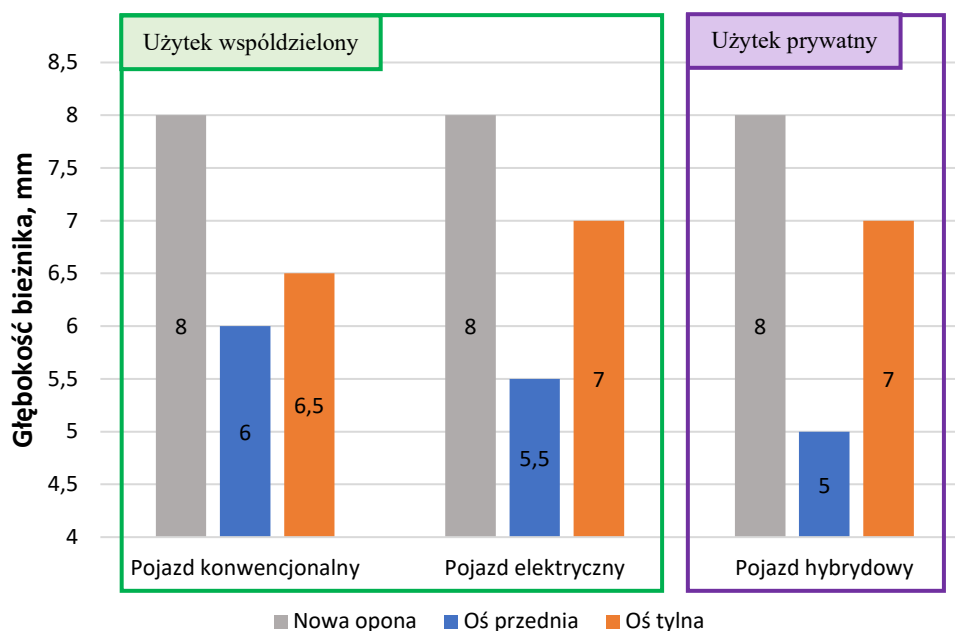
	Pojazd konwencjonalny	Pojazd elektryczny	Pojazd hybrydowy
Masa pyłu klocków hamulcowych, mg/km	11,9	8,5	2,3
Masa pyłu tarcz hamulcowych, mg/km	27,1	18,2	5



Rys. 109. Emisja pyłu z klocków i tarcz hamulcowych w odniesieniu do 1 km [opracowanie własne]

Sumaryczna emisja zapylenia z układu hamulcowego (z jednoczesnym uwzględnieniem klocków i tarcz hamulcowych) kształtowała się następująco: 39 mg/km w pojeździe konwencjonalnym, 26,7 mg/km w pojeździe elektrycznym oraz 7,3 mg/km w przypadku samochodu hybrydowego. W kontekście emisji pyłu warto wspomnieć, iż planowane jest wprowadzenie normy Euro 7, która będzie określała maksymalną wartość emisji pyłu z układu hamulcowego pojazdu na poziomie odpowiednio: 0,7 mg/km dla pojazdów z napędem konwencjonalnym i hybrydowym oraz 0,3 mg/km dla pojazdów z napędem elektrycznym. Biorąc pod uwagę powyższe kalkulacje, emisje pyłów z pojazdów wytypowanych do badań wszystkie te wartości przekraczają te określone przez normę Euro 7, już przy uwzględnieniu układu hamulcowego przedniej osi.

Następnie wykonano pomiary głębokości bieżnika opon w badanych pojazdach. Zużycie bieżnika opon po przejechaniu 15 tys. kilometrów przebiegu przedstawiono na rysunku 110.



Rys. 110. Zużycie opon po 15 tys. kilometrów przebiegu [opracowanie własne]

Nowe opony posiadają bieżnik o głębokości około 8 mm. Zużycie opon zbadane zostało po przebiegu 15 tys. km. W pojazdach zaobserwowano większe zużycie hamulców na przedniej (napędowej) osi. W samochodzie z napędem konwencjonalnym bieżnik opon na obu osiach zużył się o 3,5 mm. W przypadku pojazdu elektrycznego zużycie wyniosło również 3,5 mm, jednak było bardziej intensywne na osi przedniej. Natomiast w samochodzie hybrydowym łączne zużycie bieżnika osiągnęło 4 mm. Parametry zastosowanych opon zestawiono w tabeli 33.

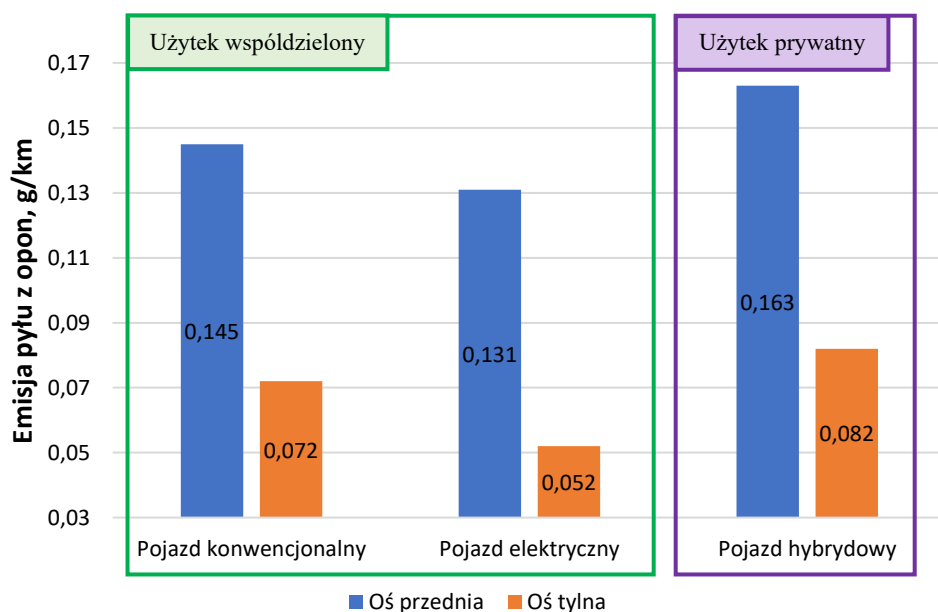
Tabl. 33. Parametry opon zastosowanych w pojazdach [opracowanie własne]

	Napęd konwencjonalny	Napęd elektryczny	Napęd hybrydowy
Rodzaj opon	Opony wielosezonowe Goodride AllSeason Elite 205/60 R16 96V	Opony wielosezonowe Barum Quartaris 5, 165/70 R14 94V	Opony letnie Michelin Primacy 3, 225/50 R18 95V

Średnie wartości emisji pyłu pochodzącego ze zużycia opon zamontowanych w pojazdach zostały zaprezentowane w tabeli 34. Emisję pyłu dla osi przedniej (napędowej) oraz tylnej przedstawiono na rysunku 111. Ze względu na strukturę bieżnika przyjęto 80% obliczonych wartości. Do wyliczenia masy pyłu powstałego w wyniku ścierania opon założono średnią gęstość materiału opony na poziomie 1,3 g/cm³.

Tabl. 34. Emisja pyłu z opon [opracowanie własne]

	Napęd konwencjonalny		Napęd elektryczny		Napęd hybrydowy	
Oś	Przednia	Tylna	Przednia	Tylna	Przednia	Tylna
Emisja pyłu z opon zamontowanych w pojazdach, g/km	0,145	0,072	0,131	0,052	0,163	0,082



Rys. 111. Emisja pyłu z opon w odniesieniu do 1 km [opracowanie własne]

Emisja pyłu ze zużycia opon w badanych pojazdach dla osi przedniej wynosi: 0,163 g/km dla pojazdu hybrydowego, 0,145 g/km dla pojazdu konwencjonalnego oraz 0,131 g/km dla pojazdu elektrycznego. Natomiast dla osi tylnej: 0,082 g/km dla pojazdu hybrydowego, 0,072 g/km dla pojazdu konwencjonalnego oraz 0,052 g/km dla pojazdu elektrycznego.

Warto wspomnieć, że zużycie ogumienia pojazdu jest zjawiskiem normalnym i zachodzi w czasie jego użytkowania. Intensywność tego zużycia jest jednak różna i zależy od takich czynników jak np.: moment obrotowy generowany przez jednostkę napędową (np. rodzaj silnika – elektryczny, spalinowy), masa pojazdu (współpraca opony z nawierzchnią; proces hamowania), warunki ruchu (miejskie i pozamiejskie).

Zużycie opon jest proporcjonalne do momentu obrotowego oraz masy pojazdów. Im większy moment obrotowy oraz masa pojazdu, tym większe zużycie opon.

5.6.2. Badanie składu chemicznego pyłów pochodzących z eksploatacji pojazdów

Następnym etapem badań było zebranie próbek pyłu z filtrów powietrza oraz porównanie ich składu chemicznego z produktami zużycia pochodzącymi z układu hamulcowego oraz opon. Celem tego badania było określenie ilości pyłów pochodzących ze zużywających się hamulców i opon w całościowej ilości pyłów znajdujących się w środowisku. Analizę próbek pyłu prowadzono za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego model Hitachi S – 4200 (Rys. 112) z wykorzystaniem detektorów elektronów wtórnych (SE). Badania składu chemicznego wykonano za pomocą spektrometru rentgenowskiego z dyspersją energii EDS Thermo Novan przy napięciu przyspieszającym wiązkę elektronów 15 kV. Spektrometr ten jest sprzężony z mikroskopem Hitachi S – 4200.



Rys. 112. Elektronowy mikroskop skaningowy [opracowanie własne]

a) Sposób poboru próbek do badań

Próbki pyłu do badań zostały pobrane z filtrów powietrza różnych pojazdów poruszających się zarówno w ruchu miejskim, jak i autostradowym. Zdecydowano na taki rodzaj pozyskania materiału do badań, ze względu na to, iż filtry powietrza z celulozy (papieru), włókniny z tworzywa sztucznego lub kombinacji tych materiałów zatrzymują prawie wszystkie zanieczyszczenia stałe znajdujące się w powietrzu. Nie przepuszczają one aż do 99,98% szkodliwych cząstek pyłu i sadzy oraz drobinek startych opon i klocków hamulcowych. Najdokładniejsze filtry zatrzymują prawie wszystkie cząstki zanieczyszczeń znajdujących się w środowisku powyżej 3 μm . Obecnie dla samochodów osobowych za optymalną uważa się przepuszczalność filtra powietrza sięgającą dwóch mikrometrów. Należy też zaznaczyć, że pył

bardzo drobny jest najbardziej szkodliwy. Cząstki o tak małej średnicy mogą być przenoszone na znaczne odległości, a także są szkodliwe dla układu oddechowego człowieka. Ważne jest więc zebranie materiału do badań o jak najmniejszej średnicy [139].

Do porównania składu chemicznego pierwiastków znajdujących się w zebranym pylu, zdecydowano się także na pobranie próbek z układu hamulcowego oraz opon. Próbki z układu hamulcowego zostały pobrane z otworów w nawiercanej tarczy hamulcowej. Zebranie pyłu z tego miejsca powoduje, że znajdują się tam głównie produkty zużycia klocka oraz tarczy. Do porównania pobrano także fragmenty opon. Na rysunku 113 zostały przedstawione próbki do badań.

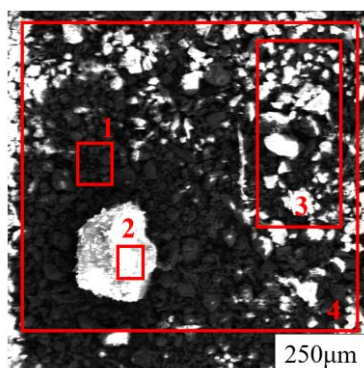


Rys. 113. Próbki pyłu – a), b) próbka opony samochodu osobowego, c) próbka pyłu zebrana z filtra powietrza, d) próbka pyłu z układu hamulcowego [opracowanie własne]

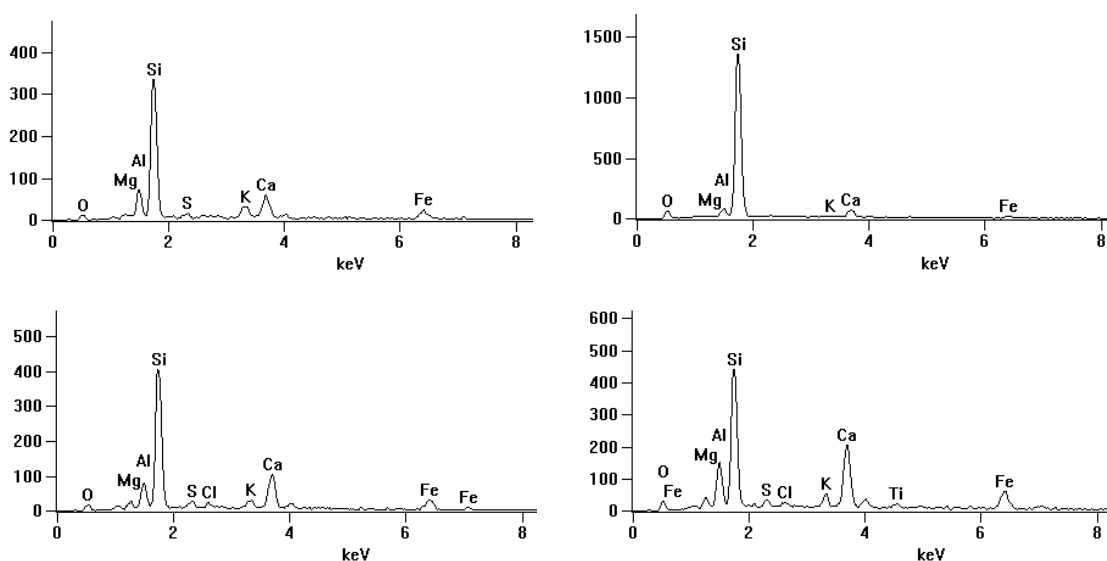
b) Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbek

Materiał do badań został zebrany w postaci 4 próbek. Próbki pyłów zostały naniesione na podstawki z elementem klejącym. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego próbek wraz z tabelą ilościową składu pierwiastkowego zostały przedstawione poniżej (Rys. 114 -116).

a)



b)



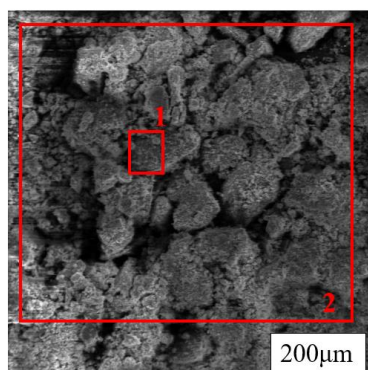
c)

	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Cl-K	K-K	Ca-K	Ti-K	Fe-K
Obszar 1	12,1	1,1	7,7	46,9	2,2	-	5,2	12,8	-	12,0
Obszar 2	21,9	0,6	2,8	63,2	-	-	0,9	6,4	-	4,1
Obszar 3	15,1	1,9	6,7	41,0	2,7	1,4	3,4	16,1	-	11,7
Obszar 4	13,8	2,3	9,8	30,5	2,0	1,1	3,0	19,5	1,8	16,2

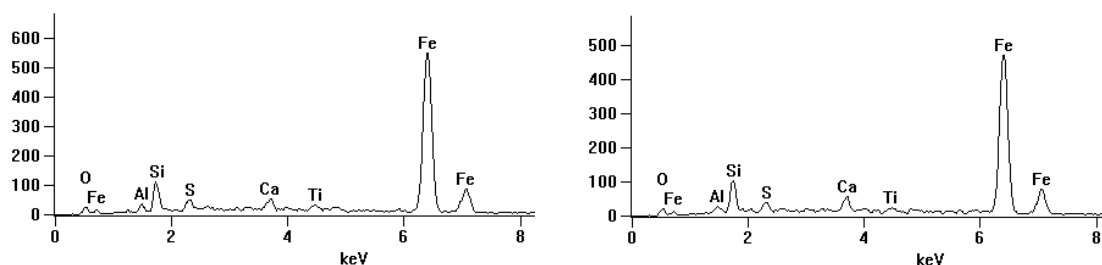
Rys. 114. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbki pyłu zebranego z filtrów powietrza a) z zaznaczonymi obszarami, b) widmo promieniowania (1 – 4), c) tabela z analizą ilościową [opracowanie własne]

Uzyskane wyniki badań składu chemicznego w całym obszarze pyłu zebranego za pomocą filtra powietrza wskazują na największą obecność pierwiastków takich jak: 30,5% krzem (Si), 19,5% wapń (Ca), 16,2% żelazo (Fe) oraz 9,8% glin (Al). Stwierdzono także obecność magnezu (Mg) na poziomie 2,3% oraz siarki (S) – 2%.

a)



b)



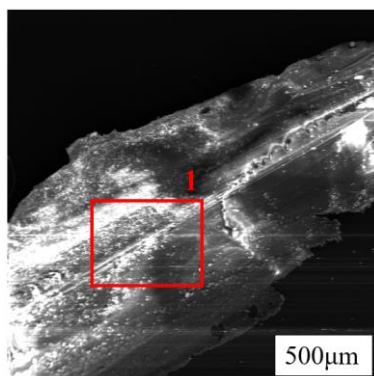
c)

	O-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Ti-K	Fe-K
Obszar 1	2,4	1,2	4,9	1,9	1,8	0,6	87,1
Obszar 2	2,6	1,1	5,7	2,0	2,4	1,8	84,4

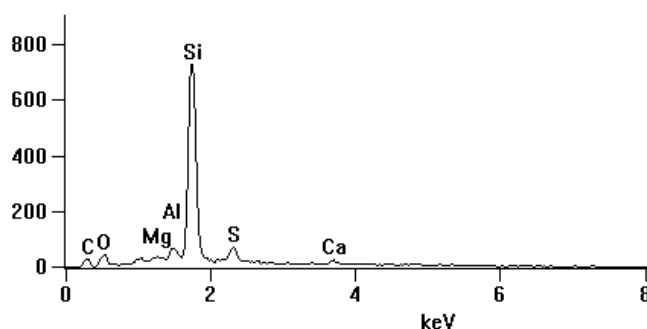
Rys. 115. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbki pyłu zebranego układu hamulcowego a) z zaznaczonymi obszarami, b) widmo promieniowania (1 – 2), c) tabela z analizą ilościową [opracowanie własne]

Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbki pyłu zebranego układu hamulcowego wykazała, iż dominującym pierwiastkiem w całym badanym obszarze próbki jest żelazo (Fe) na poziomie 84,4%. Stwierdzono także obecność 5,7% krzemu (Si) oraz śladowe ilości innych pierwiastków takich jak 2,4% wapń (Ca), 1,8% tytan (Ti) oraz 1,1% glin (Al). Tarcze hamulcowe zazwyczaj składają się z perlitycznego szarego żeliwa, a w niektórych przypadkach ze stali, co potwierdza przeprowadzona analiza składu chemicznego.

a)



b)



c)

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K
Obszar 1	29,3	22,8	0,9	2,3	39,3	4,2	1,2

Rys. 116. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbki opony a) z zaznaczonymi obszarami, b) widmo promieniowania (1), c) tabela z analizą ilościową [opracowanie własne]

Badanie produktów zużycia opon samochodowych ukazało, że głównymi pierwiastkami wchodzącymi w skład opony są krzem (Si) – 39,3% i węgiel (C) – 29,3% w postaci sadzy, oraz siarka (S) – 4,2%. Stwierdzono także obecność aluminium (Al.), wapnia (Ca) i magnezu (Mg). Cząstki zużywających się opon składają się z plastyfikatorów, olejów, polimerów, sadzy i minerałów.

5.6.3. Analiza i interpretacja wyników badań emisji pyłów

Zużycie elementów układu hamulcowego oraz opon w dużym stopniu zależy od rodzaju napędu pojazdu, ale także stylu jazdy. W kontekście planowanej normy Euro 7 obecne emisje pyłów powstających na skutek zużycia układu hamulcowego są przekroczone. Hamowanie

rekuperacyjne ma wpływ na zmniejszenie zużycia elementów ciernych układu hamulcowego. Styl jazdy oraz warunki drogowe, takie jak jazda miejska czy autostradowa, mają istotny wpływ na zużycie elementów układu hamulcowego. Zużycie elementów układu hamulcowego w pojazdach w dużej mierze zależy od rodzaju i jakości materiałów, z jakich wykonane są klocki oraz tarcze hamulcowe. W samochodach marki Dacia stosowano komponenty niższej jakości, co mogło wpływać na ich szybsze zużycie i większą emisję pyłu. Z kolei w pojeździe hybrydowym (Toyota) zastosowano elementy hamulcowe klasy premium, co nie tylko zwiększa ich trwałość, ale także znacząco ogranicza emisję zanieczyszczeń.

Badania samochodów marki Dacia (zarówno konwencjonalnych, jak i elektrycznych) wykazały, że były one prowadzone przez różne osoby i w różnych warunkach drogowych. Pojazd hybrydowy, użytkowany przez jedną osobę głównie na tych samych trasach, był najbliższy spełnienia wymagań normy, co można przypisać zastosowaniu elementów układu hamulcowego wyższej jakości oraz bardziej jednolitym warunkom eksploatacji.

Analiza zużycia opon wykazała, że ich zużycie w dużej mierze zależy od wielkości i klasy opony, stylu jazdy, warunków atmosferycznych, rodzaju nawierzchni, topografii terenu oraz cech pojazdu [106, 140]. W pojazdach elektrycznych i hybrydowych zużycie opon może być większe ze względu na wysoki moment obrotowy dostępny już od zerowej prędkości oraz większą masę wynikającą z obecności baterii. Większa masa pojazdów elektrycznych może powodować intensywniejsze zużycie opon. Warto jednak zauważyć, że badany pojazd elektryczny miał mniejszą masę niż pojazd konwencjonalny, co stanowi wyjątek w przypadku tych samych modeli oferowanych z różnymi rodzajami napędu.

Analiza składu chemicznego pyłu wykazała obecność krzemu i siarki, co może wskazywać na pył naturalnego pochodzenia (cząstki mineralne, piasek) oraz fragmenty zużytych opon. Obecność żelaza sugeruje, że część pyłu pochodzi z układu hamulcowego. Zarówno w pyłe zebrany przez filtry powietrza ze środowiska, jak i w próbkach pochodzących ze zużycia tarcz, klocków hamulcowych oraz opon, nie wykryto metali ciężkich takich jak miedź, ołów, kadm czy nikiel, które są uważane za wysoce szkodliwe.

Podsumowując analizę literaturową oraz wyniki badań własnych, należy stwierdzić, że całkowita emisja pyłu może być wyższa w przypadku pojazdów z napędem elektrycznym i hybrydowym w porównaniu do pojazdów z napędem konwencjonalnym, ze względu na intensywniejsze zużycie opon. Należy jednak zwrócić uwagę, że poziom emisji w dużej mierze zależy od rozmiaru i klasy opon, warunków eksploatacyjnych oraz masy pojazdu i momentu obrotowego.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowując działania dotyczące realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej, zarówno pod względem przeprowadzonych kompleksowych badań literaturowych w zakresie literatury przedmiotu, jak i przebiegu oraz uzyskanych wyników badań własnych stwierdzić należy, że trudne są do jednoznacznego określenia kwestie emisji pochodzących z pojazdów z napędem elektrycznym i hybrydowym w porównaniu do emisji pochodzących z pojazdów o napędzie konwencjonalnym (spalinowym). Niektóre z emisji bardzo silnie zależą od warunków eksploatacji na przykład od prędkości jazdy. Niskie emisje przeważające na korzyść pojazdów z napędem niekonwencjonalnym przy niskich prędkościach jazdy rosną wydatnie przy wysokich prędkościach jazdy. Taka sytuacja utrudnia wnioskowanie i wymusza określenie danej zależności wyłącznie dla specyficznych warunków.

Na podstawie kompleksowej analizy literaturowej podjętego w niniejszym opracowaniu tematu oraz biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań wraz z analizą uzyskanych wyników, sformułowano następujące wnioski:

- a) Wyniki badań wykazały, że samochody elektryczne z segmentu ekonomicznego emitują mniej hałasu niż samochody konwencjonalne tej samej kategorii, podczas pomiarów stanowiskowych oraz przy niskich prędkościach jazdy, co potwierdza przyjętą tezę dla tej grupy pojazdów.
- b) Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkościach do 30 km/h był najniższy w samochodzie elektrycznym, a nieco wyższy w hybrydowym i konwencjonalnym. Dla tych warunków teza została potwierdzona.
- c) Przy wyższych prędkościach jazdy dominują hałas opon i hałas aerodynamiczny, a poziomy dźwięku wewnątrz wszystkich pojazdów były zbliżone, jednak najkorzystniejsze wyniki dał napęd hybrydowy. Badania obejmowały pojazdy elektryczne z segmentu ekonomicznego oraz pojazd z napędem hybrydowym o wyższym standardzie, co wpływa na wyniki. Te warunki badań negują postawioną tezę.
- d) Poziom natężenia dźwięku na zewnątrz pojazdów był podobny dla wszystkich badanych modeli. Niższa emisja hałasu w samochodzie elektrycznym była niwelowana przez system AVAS, generujący dodatkowy dźwięk do prędkości jazdy wynoszącej 20 km/h. Powyżej tej prędkości różnice w emisji hałasu były niewielkie, co neguje postawioną tezę w tym zakresie.

- e) Przy prędkościach autostradowych poziom natężenia dźwięku wewnątrz wszystkich badanych pojazdów przekraczał 70 dB(A), ale nie osiągał 80 dB(A). Samochód hybrydowy wyróżniał się lepszym wygłuszeniem kabiny, natomiast pojazdy dla użytku współdzielonego miały zbliżone wartości hałasu, co może wynikać z ich ekonomicznej konstrukcji i intensywniejszej eksploatacji.
- f) Badania stanowiskowe wykazały, że poziom drgań nadwozia pojazdu oddziałujących na kierowcę jest mniejszy w przypadku napędów elektrycznych niż konwencjonalnych. Wynik ten potwierdzono na podstawie pomiarów wykonanych w samochodach należących do użytku współdzielonego. Warto jednak zauważyć, że analizowane pojazdy reprezentują ekonomiczny segment rynku, co może wpływać na ich ogólną charakterystykę w zakresie tłumienia drgań. Wyniki badań potwierdzają przyjętą tezę.
- g) Analiza emisji drgań w trakcie jazdy wykazała zależność od prędkości i klasy pojazdów. Przy niskich prędkościach miejskich (do 30 km/h) wartości drgań w pojazdach elektrycznych były niższe niż w pojazdach konwencjonalnych. Potwierdza to postawioną tezę.
- h) Przy zwiększeniu prędkości do 50 km/h wartości drgań były podobne we wszystkich badanych pojazdach, niezależnie od rodzaju napędu. Natomiast w warunkach autostradowych (powyżej 120 km/h) pojazd elektryczny wykazywał najwyższy poziom drgań, co może wynikać z konstrukcji zawieszenia oraz masy pojazdu. Warto dodać, że samochód hybrydowy jako jedyny był pojazdem prywatnym i reprezentował wyższą klasę, co mogło wpłynąć na bardziej efektywne tłumienie drgań w porównaniu do pojazdów z segmentu ekonomicznego. Wyniki badań dla negują przyjętą tezę.
- i) Wartości skuteczne przyspieszenia drgań w badanych pojazdach (zarówno do użytku współdzielonego, jak i prywatnym hybrydowym) spełniają normy. Nie stwierdzono zagrożenia dla kierowców, a warunki jazdy uznano za komfortowe.
- j) Podczas jazdy pojazdy elektryczne generują najwyższe pola elektromagnetyczne, zwłaszcza przy wyższych prędkościach, ze względu na układy wysokiego napięcia. Pojazd z napędem hybrydowym wykazuje wartości pośrednie, malejące przy wyższych prędkościach, gdy uruchomiony jest silnik spalinowy. Najniższe emisje odnotowano w pojazdach konwencjonalnych. W badanych samochodach nie odnotowano jednak wartości przekraczających normy bezpieczeństwa. Wyniki badań potwierdzają przyjętą tezę.
- k) Badania stanowiskowe wykazały, że najwyższa indukcja magnetyczna występuje w pojazdach elektrycznych i hybrydowych, a w spalinowych jest znacznie niższa i szybko

maleje wraz ze wzrostem odległości od źródła. Najwyższą wartość zmierzono w pojeździe hybrydowym przy silniku elektrycznym, co może wynikać z jego większej mocy. Wyniki potwierdzają, że indukcja magnetyczna w pojazdach elektrycznych jest wyższa.

- l) Hamowanie rekuperacyjne ma wpływ na zmniejszenie zużycia elementów ciernych układu hamulcowego. We wszystkich badanych pojazdach wartości emisji pyłów z układu hamulcowego przekraczały dopuszczalne limity przewidziane w przyszłej normie Euro 7. W pojazdach do użytku współdzielonego, ze względu na zróżnicowany sposób eksploatacji i częstą zmianę kierowców, zużycie układu hamulcowego może być intensywniejsze, co dodatkowo wpływa na zwiększoną emisję pyłów. Wyniki badań potwierdzają przyjętą tezę.
- m) Emisja pyłu z opon była uzależniona od masy pojazdu oraz momentu obrotowego. Samochody elektryczne i hybrydowe, ze względu na większą masę oraz wysoki moment obrotowy dostępny od zerowej prędkości, wykazywać mogą intensywniejsze zużycie opon w porównaniu do samochodów konwencjonalnych. Im większy moment obrotowy oraz masa pojazdu, tym większe zużycie opon. Wyniki badań potwierdzają przyjętą tezę.

Na zakończenie warto zaznaczyć, że należy przewidzieć dalsze badania i analizy dotyczące emisji pochodzących z pojazdów o napędzie niekonwencjonalnym (elektrycznym i hybrydowym). Jak wykazano, spodziewane w ich przypadku mniejsze emisje spalinowe niekoniecznie idą w parze z niskimi wartościami innych emisji (hałas, drgania, pole elektromagnetyczne i zapylenie). Ważne jest to szczególnie przy uwzględnieniu, iż parametry techniczne napędów niekonwencjonalnych cechują się coraz to większymi wartościami mocy i momentu obrotowego silników elektrycznych, co wpływać będzie bezsprzecznie na wartości przedmiotowych emisji.

7. LITERATURA

- [1] Licznik Elektromobilności: po polskich drogach jeździ więcej osobowych BEV niż PHEV - PSNM - Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności. PSNM - Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności. 2024 <https://psnm.org/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-po-polskich-drogach-jezdzi-wiecej-osobowych-bev-niz-phev/>, dostęp: 15.12.2024.
- [2] Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2023. stat.gov.pl. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-rzeczypospolitej-polskiej-2023,2,23.html>, dostęp: 23.07.2024.
- [3] Regulamin nr 85 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ)- Prawo.pl. <https://www.prawo.pl/akty/dz-u-ue-l-2014-323-52,68469138.html>, dostęp: 14.10.2022.
- [4] Schmidt T.: Pojazdy hybrydowe i elektryczne w praktyce warsztatowej. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2020.
- [5] Fic B.: Samochody Elektryczne. Wydawnictwo KaBe, Krosno 2019.
- [6] Węgrzyn B.: Samochody z napędem elektrycznym. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1970.
- [7] Samochody elektryczne – kompendium wiedzy. EFL.pl. <https://efl.pl/pl/biznes-i-ty/artykuly/samochody-elektryczne-szybko-rozwijajaca-sie-galaz-motoryzacji>, dostęp: 14.10.2022.
- [8] HEV, FHEV, PHEV, MHEV - czyli o rodzajach hybryd - Grupa Euro-Car. <https://www.eurocar.pl/blog/baza-wiedzy/rodzaje-napedow-hybrydowych/>, dostęp: 15.01.2024.
- [9] Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych, tj. Dz.U. 2018 poz. 317.
- [10] Rostocki A. M.: „Historia starych samochodów”. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 1988.
- [11] Wójtowicz S.: Pojazdy z napędem elektrycznym. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 258, 2012.
- [12] Duer S., Zajkowski K.: Silniki elektryczne stosowane w napędach samochodów. Autobusy, str. 99 – 102, 2013.

- [13] Kwiatkiewicz P., Szczerbowski R., Śledzik W.: Elektromobilność – środowisko infrastrukturalne i techniczne wyzwania polityki intraregionalnej. Wydawnictwo Naukowe FNCE, Poznań 2020.
- [14] Jak wygląda bateria samochodu elektrycznego. www.elektrowoz.pl. <https://elektrowoz.pl/tag/jak-wyglada-bateria-samochodu-elektrycznego>, dostęp: 15.01.2024.
- [15] Jakie gniazdko mają samochody elektryczne? Jakie są typy wtyczek w autach elektrycznych? www.elektrowoz.pl. <https://elektrowoz.pl/porady/jakie-gniazdko-maja-samochody-elektryczne-jakie-sa-typy-wtyczek-w-autach-elektrycznych-objasniamy>, dostęp: 26.01.2023.
- [16] Przewód ładujący AC 230V 16A 3.6kW. Preis zone. <https://preis-zone.pl/kable-do-ladowania-samochodow-elektrycznych/4979-kabel-do-ladowania-samochodow-elektrycznych-ac-230v-16a-36kw-5m-typ-2-ip54-3213-5907589333213.html>, (dostęp: 15.01.2024).
- [17] Wsparcie infrastruktury do ładowania pojazdów elektrycznych i infrastruktury do tankowania wodoru - Portal Gov.pl. Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa. <https://www.gov.pl/web/arimr/wsparcie-infrastruktury-do-ladowania-pojazdow-elektrycznych-i-infrastruktury-do-tankowania-wodoru4>, dostęp: 26.01.2023.
- [18] Emil Król: Emisja zanieczyszczeń pojazdów z napędem elektrycznym. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe nr 3/2016, str 211 – 216, Katowice 2016.
- [19] Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce. www.pwc.pl. <https://www.pwc.pl/pl/artykuly/2016/plan-rozwoju-elektromobilnosci-w-polsce.html> , dostęp: 27.01.2023.
- [20] Heidrich, O., Hill, G., Neaimeh, M., Huebner, Y., Blythe, P. i Dawson, R. How do cities support electric vehicles and what difference does it make? Technological Forecasting & Social Change, no. 123, 2017.
- [21] Krawiec, S. i Krawiec, K., Rozwój elektromobilności w Polsce. Uwarunkowania, cele i bariery. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, nr 332, 2017.
- [22] Licznik elektromobilności - PSNM - Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności. Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności. <https://pspa.com.pl/tag/licznik-elektromobilnosci/>, dostęp: 26.07.2023.

- [23] Kolejny rekordowy rok na rynku pojazdów elektrycznych - PSNM - Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności. PSNM - Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności. <https://pspa.com.pl/2023/raport/kolejny-rekordowy-rok-na-ryнку-pojazdow-elektrycznych>, dostęp: 15.01.2024.
- [24] Zajkowski K.: Reactive power compensation in a three-phase power supply system in an electric vehicle charging station, „Journal of Mechanical and Energy Engineering" 2018, vol. 2(42), no. 1., 2018.
- [25] Biała Księga transportu: Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu - dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu, doi:10.2832/34321, 2011.
- [26] Bojda K., Sołtysik M.: Wpływ elektromobilności na rozwój gmin i klastrów energii przy wykorzystaniu możliwości stymulacji cennikowej, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, nr 107, s. 119-134, 2018, DOI: 10.24425/123717, 2018.
- [27] Sustainable Urban Mobility in the UE: No substantial improvement is possible without Member State's commitment, doi: 10.2865/1094, 2020.
- [28] GreenWay. Twój partner w zakresie elektromobilności w Europie Środkowo-Wschodniej - GreenWay. <https://greenwaypolska.pl/uslugi-ladowania>, dostęp: 05.11.2023.
- [29] Ile kosztuje ładowanie samochodu elektrycznego? Inter Cars Blog. <https://intercars.pl/blog/poradnik-kierowcy/ile-kosztuje-ladowanie-samochodu-elektrycznego>, dostęp: 30.01.2023.
- [30] Samochody elektryczne - WysokieNapiecie.pl. [https://wysokienapiecie.pl/kategoria/e-mobilnosc/samochody-elektryczne /](https://wysokienapiecie.pl/kategoria/e-mobilnosc/samochody-elektryczne/), dostęp: 15.01.2024.
- [31] CO₂ emission performance standards for cars and vans. Climate Action. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en, dostęp: 05.11.2023.
- [32] Special report 01/2024: Reducing carbon dioxide emissions from passenger cars. European Court of Auditors. <https://www.eca.europa.eu/en/publications?ref=SR-2024-01>, dostęp: 05.11.2023.
- [33] Gazda-Grzywacz M., Burchart-Korol D., Smoliński A., Zarębska K.: Environmental protection - greenhouse gas emissions from electricity production in Poland. Journal of Physics: Conference Series, III Alternative Fuels Forum, 1398 (2019) 012004, doi:10.1088/1742-6596/1398/1/012004, 2019.

- [34] Kuczyński K.: Podstawowe wymagania dla stacji ładowania pojazdów elektrycznych, elektro.info, 12/2018.
- [35] Burchart – Korol D., Folęga P.: Environmental Footprints of Current and Future Electric Battery Charging and Electric Vehicles in Poland. *Transport Problems*, 2020 Volume 15 Issue 1, DOI: 10.21307/tp-2020-006, 2020.
- [36] Heidrich, O., Hill, G., Neaimeh, M., Huebner, Y., Blythe, P. i Dawson, R. How do cities support electric vehicles and what difference does it make?; *Technological Forecasting & Social Change*, no. 123, 2017.
- [37] Dobrzycki A., Filipiak M., Jajczyk J.: Zasilanie układów ładowania akumulatorów autobusów elektrycznych, *Poznan University Of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, no 92/2017, DOI 10.21008/j.1897-0737.2017.92.0002, 2017.
- [38] Kłos M.: Elektromobilność w Polsce - rozwój elektromobilności i związane z tym wyzwania dla systemu elektroenergetycznego, *Sektor elektroenergetyczny*, 1/2018
- [39] Tomaszewski R.: Sieć do zmiany - Jak zreformować polski sektor dystrybucji energii elektrycznej, *Polityka Insight* 2019.
- [40] Small World Consulting. Sustainability Consultancy. Mike Berners-Lee. Lancaster University, UK. sw-consulting. <https://www.sw-consulting.co.uk>, dostęp: 24.11.2022.
- [41] Brodacki D., Polaszczyk J.: Emisyjność dwutlenku węgla przez samochody elektryczne w kontekście strategicznych celów rozwoju elektromobilności w Polsce i Holandii. *Polityka Energetyczna*, Tom 21, Zeszyt 1, 99-116, 2018.
- [42] Morfeldt J., Davidsson S., Kurland D., Johansson J. A.: Carbon footprint impacts of banning cars with internal combustion engines. *Transport Research Part D*, Volume 95, June 2021.
- [43] Szczerbowski R., Kornobis D.: The proposal of an energy mix in the context of changes in Poland's energy policy. Propozycja miksu energetycznego w kontekście zmian polityki energetycznej Polski. *Polityka Energetyczna*, tom 22, z. 3. Wyd. Instytutu GSMIE PAN, Kraków, s. 5-18. PL ISSN 1429-6675. 2019.
- [44] Jóźwiak D., Drechny M.: Analysis of the possibilities of using V2G technology for power system balancing, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 95 NR 10/2019, doi:10.15199/48.2019.10.12, 2019.
- [45] Only 5 percent of EV charging happens at public charging points, <https://www.transportenvironment.org/press/only-5-percent-ev-charging-happens-public-charging-points>, (dostęp: 05.11.2023).

- [46] Crashed electric cars: what happens to the batteries? The world's leading platform for remanufacturing. Rematec. <https://www.rematec.com/news/equipment-and-parts/crashed-electric-cars>, dostęp: 05.11.2023.
- [47] EVUE Elektryczne Pojazdy w Miejskiej Europie, <https://www.ure.gov.pl/download/9/6430/EVUEraportpol-skipodglad.pdf> Analiza zmiany miejskiego transportu samochodowego na oparty o EV i Car-Sharing, dostęp: 27.01.2023.
- [48] Berners – Lee M.: The Carboon Footprint of Everything. Greystone Books, 2020.
- [49] Recykling baterii do samochodów elektrycznych jest możliwy. Business Insider Polska. <https://businessinsider.com.pl/technologie/nowe-technologie/recykling-baterii-do-samochodow-elektrycznych-jest-mozliwy/xe2cxhd>, dostęp: 24.11.2022.
- [50] Nowy raport TU Eindhoven: Elektryki emitują znacznie mniej CO₂, nawet po doliczeniu produkcji baterii. www.elektrowoz.pl. <https://elektrowoz.pl/auta/nowy-raport-tu-eindhoven-elektryki-emituja-znacznie-mniej-co2-nawet-po-doliczeniu-produkcji-baterii>, dostęp: 16.01.2024.
- [51] Gronowicz J.: Ochrona środowiska w transporcie lądowym. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2004.
- [52] Ronowski G.: Analiza poziomu hałasu generowanego przez samochód osobowy oparta na modelu VENOM. Czasopismo Techniczne Mechanika, Kraków 2004.
- [53] Pojazdy silnikowe z przyczepą: dopuszczalny poziom hałasu. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/PL/legal-content/summary/motor-vehicles-with-trailers-permissible-sound-level.html>, dostęp: 07.03.2024.
- [54] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, tj. Dz.U. 2018 poz. 1286.
- [55] PN-S-04052:1990. Pojazdy drogowe. Dopuszczalne poziomy hałasu wewnętrznego. Polski Komitet Normalizacyjny, 1990.
- [56] Fiebig W.: Drgania i hałas w inżynierii maszyn. Wydawnictwo WNT. Warszawa 2020.
- [57] Nader M.: Drgania i hałas w transporcie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016. ISBN 978-83-7814-543-1, 2016.
- [58] Cebulska W., Pasek D., Cebulski J.: Porównanie emisji hałasu w samochodach z napędem konwencjonalnym, elektrycznym i hybrydowym. Autoexpert, 6/2024, p. 36 – 39, Katowice 2024.
- [59] World Health Organization (WHO). (2021). Environmental Noise Guidelines for the European Region. Retrieved from WHO

- [60] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2020). Vehicle Noise Control. Retrieved from EPA
- [61] Hassel, J., & D'Ambrosio, D. (2019). Vehicle Noise Emissions and Their Impact on Urban Environments. *Journal of Acoustical Society of America*, 146(4), 3005-3020. DOI: 10.1121/1.5136000. System AVAS. Obowiązkowy od 1 lipca 2021 roku. Mariusz Michalak. 2021. <https://motofakty.pl/system-avas-obowiazkowy-od-1-lipca-2021-roku/ar/c4-16286879>, dostęp: 19.12.2022.
- [62] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2017/1576 z dnia 26 czerwca 2017 r. zmieniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 540/2014 w odniesieniu do wymogów dotyczących dźwiękowego systemu informującego o pojeździe na potrzeby homologacji typu UE pojazdu, (dostęp: 19.12.2022).
- [63] E.N.G. Verheijen | J. Jabben: Effect of electric cars on traffic noise and safety. Report 680300009/2010. National Institute for Public Health and the Environment, 2010.
- [64] Qin Y., Tang X., Jia T., Duan Z., Zhang J., Li Y., Zheng L.: Noise and vibration suppression in hybrid electric vehicles: State of the art. An challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 124 (2020), 109782 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109782>, 2020.
- [65] Sandberg U., Goubert L., Mioduszeński P.: Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals, *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, 23-27 August 2010, Sydney, Australia, 2010.
- [66] Manjunatha.: Vibration Analysis of Electric Motor Using FFT. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 8(7), 44-48. 2018. DOI: 10.9790/9622-0807024448.
- [67] Kerber S., Fastl H., "Prediction of perceptibility of vehicle exterior noise in background noise", *Proceedings DAGA'08*, Dresden, 2008.
- [68] Shuanggui Y., Chenchen D., Qi D.: Noise pollution in the re-use of the electric vehicles. *Procedia Engineering* 21 (2011), 239 – 242, 2011.
- [69] Lou X., Zhang S., Chen X, Gao Y., Ji W.: Improvement and application of electromagnetic vibration and noise suppression method for electric vehicle motor. Henan Polytechnic, Zhengzhou, 450046, China, 2023.
- [70] Campello-Vicente H., Peral-Orts R., Campillo-Davo N., Velasco-Sanchez E.: The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics* 116 (2017) 59–64, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018>, 2017.

- [71] Adamczyk J., Targosz J.: Drgania drogowe. Wydaw. KRIDM AGH, Kraków 2003, s. 181.
- [72] Bishop, R. E. D., & Sutherland, H. J.: Vibration Analysis and Control. Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-1-4020-4187-0.
- [73] R. L. B. Schmid & S. M. O. Zubek.: Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications. 2017, Wiley.
- [74] Harazin B., Grzesik J.: The transmission of vertical whole-body vibration to body segments of standing subjects. Journal of Sound and Vibration, Vol. 215(4), August 1998, pp. 775-787, 1998.
- [75] Nader M.: Badanie oddziaływań dynamicznych w systemie człowiek - techniczne środki transportu, tom 5, Biomechanika i Inżynieria Rehabilitacyjna, w: Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, ISBN 83-87674-67-2, ss. 725-746, Warszawa, 2004.
- [76] Hyundai i Kia patentują wibracje w kabinie. www.elektrowoz.pl. <https://elektrowoz.pl/auta/hyundai-i-kia-patentuja-wibracje-w-kabinie-zeby-elektryk-byl-jak-samochod-spalinowy-pyr-pyr-pyrrr>, dostęp: 30.03.2023.
- [77] J. Mercola: Pole Elektromagnetyczne EMF. Wydawnictwo Vital, ISBN 978-83-8168-587-0, Białystok, 2020.
- [78] ICNIRP. <https://www.icnirp.org>, dostęp: 19.12.2022.
- [79] Wertheimer N, Leeper E, Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer, „American Journal of Epidemiology” 109, nr 3 (marzec 1979): 273-284, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112681, 1979.
- [80] Wartenberg D, Residential Magnetic Fields and Childhood Leukemia: a Me-ta-Analysis, „American Journal of Public Health” 88, nr 12 (1998): 1787-1794, doi:10.2105/ajph.88.12.1787, 1998.
- [81] Zaimin Z., Xiaobin W., Xinjian W., Zhixiong J.: Finite element analysis based on PKE system of electromagnetic fields inside the vehicle. Procedia Engineering 24 (2011), 505 – 509, 2011.
- [82] Frey AH, Feld SR, Frey B, Neural Function and Behavior: Defining the Relationship, „Annals of the New York Academy of Sciences” 247, nr 1 (luty 1975): 433-439, doi: 10.1111/j.1749-6632.1975.tb36019.x.
- [83] Gumieła J., Stanik L., Szafrowski D.: Pomiarowa identyfikacja emisji pola elektromagnetycznego przez samochód elektryczny. Politechnika Wrocławska, doi:10.15199/48.2019.12.27, 2019.

- [84] Parathath SR., Parathath S., Tsirka SE., Nitric Oxide Mediates Neurodegeneration and Breakdown of the Blood-Brain Barrier in tPA-Dependent Excitotoxic Injury in Mice, *Journal of Cell Science* 119 (15 stycznia 2006): 339-349, doi: 10.1242/jcs.02734, 2006.
- [85] Tang J., Zhang Y., Yang L., Chen Q., Tan L., Zuo S., Feng H., Chen Z., Zhu G., Exposure to 900 MHz Electromagnetic Fields Activates the mmp-1/ERK Pathway and Causes Blood-Brain Barrier Damage and Cognitive Impairment in Rats, *Brain Research* 1601 (19 marca 2015): 92-101, doi: 10.1016/j.brainres.2015.01.019., 2015.
- [86] Gryz K., Karpowicz J., Zradziński P., Tokarski T., Kapcia Ł.: Ekspozycja na pole elektromagnetyczne podczas użytkowania pojazdów samochodowych z napędem elektrycznym lub hybrydowym. *Bezpieczeństwo pracy* 12/2020, 18 – 21, DOI: 10.5604/01.3001.0014.5756, 2020.
- [87] Celaya-Echarri, M., Azpilicueta, L., Karpowicz J., Ramos V., Lopez-Iturri P., Falcone, F.: From 2G to 5G Spatial Modelling of Personal RF-EMF Exposure Within Urban Public Trams, *IEEE Access* 2020, 8:100930-100947, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997254, 2020.
- [88] Celaya-Echarri, M., Azpilicueta, L., Lopez-Iturri, P. i wsp.: Spatial Characterization of Personal RF-EMF Exposure in Public Transportation Buses, *IEEE Access* 2019, 7:33038-33054. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2903405, 2019.
- [89] Zhao L., Liu X., Wang C., Yan K., Lin X., Li S., Bao H.: Magnetic Fields Exposure and Childhood Leukemia Risk: A Meta-Analysis Based on 11,699 Cases and 13,194 Controls, *Leukemia Research* 38, nr 3 (2014): 269-274, doi:10.1016/j.leukres.2013.12.008, 2014.
- [90] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, tj. Dz.U. 2019 poz. 2448.
- [91] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów, tj. Dz.U. 2003 nr 192 poz. 1883.
- [92] Czyłetko Ł.: Dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych idą w górę. <https://sozosfera.pl/prawo/dopuszczalne-poziomy-pol-elektromagnetycznych-ida-w-gore/>, (dostęp: 19.12.2022).
- [93] Olabi A.G., Ali Abdelkareem M., A., Wilberforce T., Alkhalidi A., Salameh T, Abo-Khalil A., Mutasim Hassan M., Taha Sayed E.: Battery electric vehicles: Progress, power electronic converters, strength (S), weakness (W), opportunity (O), and threats (T). *International Journal of Thermofluids*, Volume 16, November 2022, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100212>.

- [94] Priya A., Kumar S.: Review on Converters used in Electric Drive System. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, January 2023, 9(1):1-09. doi: 10.46501/IJMTST0901001.
- [95] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pola elektromagnetyczne, tj. Dz.U. 2018, poz. 331.
- [96] CORDIS. 2015. Samochody elektryczne: badanie potencjalnych zagrożeń dla życia ludzkiego. [cordis.europa.eu](https://cordis.europa.eu/article/id/156586-electric-cars-no-risk-for-human-health/pl). <https://cordis.europa.eu/article/id/156586-electric-cars-no-risk-for-human-health/pl>, dostęp: 22.11.2022.
- [97] Ntziachristos L. Samaras Z.: COPERT III. Computer programme to calculate emissions from road transport. Methodology and emissions factors. Technical report No 49. November 2000.
- [98] Watson J. Chow J.: Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border. *The Science of the Total Environment* 276 (2001) 33-47, 2001.
- [99] Adachi K., Tainosho Y.: Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust, *Environment International* 2004, 30: 1009 – 1017, 2004.
- [100] Stosunek stężeń pyłu PM2.5 i PM10 [life-mappingair.pl](https://mappingair.pl). <https://mappingair.meteo.uni.wroc.pl/2020/05/stosunek-stezen-pylu-pm2-5-i-pm10>, dostęp: 21.11.2022.
- [101] Poziomy dopuszczalne zanieczyszczeń w powietrzu ze względu na ochronę zdrowia ludzi i ochronę roślin, terminy ich osiągnięcia oraz okresy, dla których uśrednia się wyniki pomiarów. Bieżące dane pomiarowe - GIOŚ. https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/annual_assessment_air_acceptable_level, dostęp: 23.11.2022.
- [102] Praca zespołowa pod redakcją Katarzyny Judy-Rezler i Barbary Toczko: „Pyły drobne w atmosferze Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce”. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 2016.
- [103] Środowisko. stat.gov.pl. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko>, dostęp: 06.09.2022.
- [104] Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport. OECD. <https://www.oecd.org/environment/non-exhaust-particulate-emissions-from-road-transport-4a4dc6ca-en.htm>, dostęp: 17.04.2023.

- [105] Alemani, M. et al.: “A Study on Emission of Airborne Wear Particles from Car Brake Friction Pairs”, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 9/1, <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-2665>, 2016.
- [106] Tyre wear particles in the environment. Tyre abrasion: wear and burden on the environment. 07.01.172 | 31940 RMU, Erstellt: 12/2021, Aktualisiert: 03/2022. ADAC e.V.. 81360 München.
- [107] Posmyk A., Iwaniak A., Adamus M., Goczoł K.: T-01m Tester Adaptation for Wear Debris Collection and Analysis. Quarterly Tribologia 2024; 307 (1): 99-104, DOI: 10.5604/01.3001.0054.4660.
- [108] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych i silników oraz układów, komponentów i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do tych pojazdów w odniesieniu do emisji i trwałości akumulatorów (Euro 7) oraz uchylecia rozporządzeń (WE) nr 715/2007 i (WE) nr 595/2009.
- [109] <https://smog.radom.pl/baza-wiedzy,4,27>, (dostęp: 16.01.2024).
- [110] Chełmiński J.: SMOG Diesle, kopciuchy, kominy, czyli dlaczego w Polsce nie da się oddychać? Wydawnictwo Poznańskie, 2019.
- [111] Kole, Pieter Jan; Löhr, Ansje J.; Van Belleghem, Frank G.A.J.; Ragas, Ad M.J.: Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. Int. J. Environ. Res. Public Health 14, no. 10: 1265, 2017.
- [112] Krasodamski M., Stępień Zb., Mazur-Baduła X.: Badanie emisji cząstek stałych. Biuletyn ITN Nr 3/2004.
- [113] Łazowska H., Mysłowski J.: Wpływ skażenia powietrza wybrane wskaźniki zdrowia populacji aglomeracji miejskiej. Monografia. Ekologiczne aspekty stosowania nowych technologii w transporcie. Politechnika Koszalińska. Koszalin, 2012.
- [114] Dacia Polska. <https://www.dacia.pl/obsługa-techniczna.html>, dostęp: 06.12.2022.
- [115] Sezonowa Wyprzedaż Toyoty. Toyota PL. <https://www.toyota.pl/oferty-specjalne/klient-indywidualny>, dostęp: 06.12.2022.
- [116] Sandero. DACIA Polska. <https://www.dacia.pl/samochody/sandero.html>, dostęp: 12.09.2023.
- [117] Nowy miejski samochód elektryczny Spring – Dacia. DACIA Polska. <https://www.dacia.pl/samochody/nowy-spring.html>, dostęp: 12.09.2023.
- [118] Toyota C-HR. Konfigurator. Toyota PL. <https://www.toyota.pl/nowe-samochody/nowa-toyota-c-hr/konfigurator>, dostęp: 12.09.2023.

- [119] SoundCam Bionic XS. CAE Software und Systems GmbH. <https://www.cae-systems.de/en/products/acoustic-camera-sound-source-localization/soundcam-bionic-xs.html>, dostęp: 08.01.2024.
- [120] B&K Type 2250-L Sound Level Meter / Analyzer | Brüel & Kjær. <https://www.bksv.com/en/instruments/handheld/sound-level-meters/2250-series/type-2250-l>, dostęp: 30.03.2023.
- [121] Co to jest RMS i po co go liczymy? AMC VIBRO. <https://amcvibro.pl/publications/2-co-to-jest-rms-i-po-co-go-liczymy>,
dostęp: 14.07.2023.
- [122] Simcenter SCADAS XS: wszystko, co musisz wiedzieć! I EC TEST Systems. <https://www.ects.pl/artukul/simcenter-scadas-xs-wszystko-co-musisz-wiedziec>, dostęp: 10.09.2023.
- [123] 1999/519/EC: Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields <https://www.prawo.pl/akty/dz-u-ue-l-1999-199-59,68183446.html>, dostęp: 27.03.2023.
- [124] Pomiary PEM w środowisku ogólnym – zagadnienia wybrane. Portal Gov.pl. <https://www.gov.pl/web/5g/pomiary-pem-w-srodowisku-ogolnym--zagadnienia-wybrane>, dostęp: 20.05.2023.
- [125] Ekspozycja na pole elektromagnetyczne w samochodach elektrycznych. SEKA S.A. <https://www.seka.pl/ekspozycja-na-pole-elektromagnetyczne-w-samochodach-elektrycznych>, dostęp: 25.06.2024.
- [126] Miernik pola magnetycznego TM-191. Unitor s.c. <https://unitor.com.pl/mierniki-pola-elektromagnetycznego/198-miernik-pola-elektromagnetycznego-tm-191.html>, dostęp: 30.03.2023.
- [127] TM 196 Miernik 3-osiowy natężenia pola elektromagnetycznego 10MHz do 8GHz. ELMER. <https://mierniki.com/pl/p/TM-196-Miernik-3-osiowy-natezenia-pola-elektromagnetycznego-10MHz-do-8GHz/455>, dostęp: 30.03.2023.
- [128] Quamar D., Sarkar C.: Modelling of performance parameters of phenolic base resins Non-Asbestos Organic (NAO) friction material in brake pad using machine learning algorithms. Tribology International Volume 191, March 2024, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109188>, 2024.
- [129] Europejska homologacja ECE R90 na klocki i tarcze hamulcowe. ABE. <https://www.abebrakes.com/pl/wiedza/europejska-homologacja-ecer90/>,
dostęp: 07.01.2024.

- [130] Timmers, V. and P. Achten: Non-Exhaust PM Emissions From Battery Electric Vehicles”, in Non-Exhaust Emissions, <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-811770-5.00012-1>, 2018.
- [131] Timmers, V. and P. Achten: “Non-exhaust PM emissions from electric vehicles”, *Atmospheric Environment*, Vol. 134, pp. 10-17, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>, 2016.
- [132] Requia, W. et al.: “How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health”, *Atmospheric Environment*, Vol. 185/May, pp. 64-77, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.040>, 2018.
- [133] Carslaw, D.: “New Directions: A heavy burden for heavy vehicles: Increasing vehicle weight and air pollution”, *Atmospheric Environment*, Vol. 40/8, pp. 1561-1562, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.039>, 2006.
- [134] Van Zeebroeck, B. and G. De Ceuster: Elektrische auto zorgt voor evenveel fijn stof als conventionele auto, 2013.
- [135] Electro-mobility, P. (2016), “Briefing: Non-Exhaust Emissions of Electric Cars”, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>, 2016.
- [136] Kaczmar J., Pietrzak K., Włosiński W.: The production and application of metal matrix composite material. *Journal of Materials Processing Technology* 106, 2000.
- [137] Emisja pyłu z dróg nieutwardzonych. Pylenie drogi - jak ograniczyć? <https://wszystkooemisjach.pl/286/emisja-pylu-z-drog-nieutwardzonych-pylenie-drogi-jak-ograniczyc>, dostęp: 20.10.2023.
- [138] Filtry powietrza. <https://www.dobierzfiltr.pl/artykuly-i-informacje/filtry-powietrza/>, dostęp: 12.09.2023.
- [139] Kole, Pieter Jan; Löhr, Ansje J.; Van Belleghem, Frank G.A.J.; Ragas, Ad M.J., 2017, “Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment.” *Int. J. Environ. Res. Public Health* 14, no. 10: 1265.
- [140] Panko, Julie M.; Hitchcock, Kristen M.; Fuller, Gary W., Green D.: Evaluation of Tire Wear Contribution to PM_{2.5} in Urban Environments. 2019. *Atmosphere* 10, no. 2: 99.

8. SPIS RYSUNKÓW

- Rys. 1. Zmiana liczby pojazdów z napędem elektrycznym (pojazdy EV oraz PHEV) w Polsce w latach 2020 – 2024
- Rys. 2. Pierwszy pojazd hybrydowy Lohner Porsche Mixte Hybrid z 1900 roku
- Rys. 3. Rodzaje napędów hybrydowych [8]: a) szeregowy, b) równoległy, c) mieszany (szeregowo – równoległy)
- Rys. 4. Pojazd elektryczny w kształcie pocisku La Jamais Contente z 1899
- Rys. 5. Przykładowe samochody elektryczne jako eksponaty w Muzeum Techniki w Austrii
- Rys. 6. Przykład baterii trakcyjnej w samochodach elektrycznych
- Rys. 7. Liczba samochodów elektrycznych w roku 2023 w polskich miastach liczących powyżej 300 tys. mieszkańców
- Rys. 8. Przyczyny wzrostu zużycia energii w samochodzie elektrycznym
- Rys. 9. Schemat przedstawiający wielkość cząstek PM10 i PM2,5
- Rys. 10. Plan badań rozprawy doktorskiej
- Rys. 11. Samochód z napędem konwencjonalnym Dacia Sandero
- Rys. 12. Samochód z napędem konwencjonalnym Dacia Sandero – widok na przedział silnika
- Rys. 13. Samochód z napędem elektrycznym Dacia Spring
- Rys. 14. Samochód z napędem elektrycznym Dacia Spring – widok na przedział silnika
- Rys. 15. Samochód z napędem hybrydowym Toyota C-HR
- Rys. 16. Samochód z napędem hybrydowym Toyota C-HR – widok na przedział silnika
- Rys. 17. Deklaracja producenta odnośnie emisji hałasu – Dacia Sandero
- Rys. 18. Deklaracja producenta odnośnie emisji hałasu – Dacia Spring
- Rys. 19. Deklaracja producenta odnośnie emisji hałasu – Toyota C-HR
- Rys. 20. Kamera akustyczna SoundCam Bionic XS
- Rys. 21. Miernik poziomu natężenia dźwięku – Bruel&Kjaer 2250 Light
- Rys. 22. Ustawienie kamery akustycznej podczas pomiaru poziomu natężenia dźwięku w badanych pojazdach
- Rys. 23. Widok z kamery akustycznej pracy silnika pojazdu z napędem konwencjonalnym
- Rys. 24. Widok z kamery akustycznej – układ napędowy pojazdu z napędem konwencjonalnym
- Rys. 25. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego
- Rys. 26. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego i układu napędowego

- Rys. 27. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego w napędzie hybrydowym
- Rys. 28. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika spalinowego w napędzie hybrydowym
- Rys. 29. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika elektrycznego i układu napędowego w pojeździe hybrydowym
- Rys. 30. Widok z kamery akustycznej pracującego silnika spalinowego i układu napędowego w pojeździe hybrydowym
- Rys. 31. Maksymalne wartości poziomu natężenia dźwięku zarejestrowane przez kamerę dźwięku podczas pracy silników przy prędkości 20 km/h – komora silnika
- Rys. 32. Maksymalne wartości poziomu natężenia dźwięku zarejestrowane przez kamerę dźwięku podczas pracy układów napędowych (podwozie) na podnośniku przy prędkości 20 km/h
- Rys. 33. Pomiary hałasu wewnętrznego – po lewej stronie urządzenie pomiarowe, po prawej stronie umiejscowienie miernika
- Rys. 34. Przykładowe wyniki analizy częstotliwościowej dźwięku dla napędu elektrycznego
- Rys. 35. Przykładowe wyniki analizy częstotliwościowej dźwięku dla napędu konwencjonalnego
- Rys. 36. Poziom natężenia dźwięku w pasmach tercjowych dla napędu elektrycznego oraz konwencjonalnego scharakteryzowana krzywą korekcyjną A
- Rys. 37. Poziom natężenia dźwięku w pasmach tercjowych dla napędu elektrycznego oraz konwencjonalnego scharakteryzowana krzywą korekcyjną C
- Rys. 38. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h
- Rys. 39. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h
- Rys. 40. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h
- Rys. 41. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h
- Rys. 42. Schemat pomiaru hałasu zewnętrznego
- Rys. 43. Poziom natężenia dźwięku tła otoczenia podczas prowadzenia badań
- Rys. 44. Poziom natężenia dźwięku emitowanego przez przejeżdżające pojazdy przy prędkości jazdy pojazdów 20 km/h

- Rys. 45. Poziom natężenia dźwięku emitowanego przez przejeżdżające pojazdy przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h
- Rys. 46. Poziom natężenia dźwięku emitowanego przez przejeżdżające pojazdy przy prędkości jazdy pojazdów 80 km/h
- Rys. 47. Formuła matematyczna wskaźnika RMS
- Rys. 48. Wartości energii, mocy i RMS sygnału dla różnych poziomów amplitud Zero-Peak: a)1; b) 0,5; c) 5
- Rys. 49. RMS dla przykładowych sygnałów
- Rys. 50. Układ pomiaru drgań Siemens LMS SCADAS XS
- Rys. 51. Układ pomiaru drgań Siemens LMS SCADAS XS z urządzeniem akwizycji danych
- Rys. 52. Przetworniki piezoelektryczne trójosiowe – po lewej stronie, trójosiowa poduszka siedziska – po prawej stronie
- Rys. 53. Przetworniki piezoelektryczne zamontowane na kielichu kolumny McPhersona – po lewej stronie, siedziskowy przetwornik drgań zamontowany na fotelu kierowcy – po prawej stronie
- Rys. 54. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem konwencjonalnym podczas badań na stanowisku
- Rys. 55. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem elektrycznym podczas badań na stanowisku
- Rys. 56. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem hybrydowym podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd elektryczny
- Rys. 57. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem hybrydowym podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd spalinowy
- Rys. 58. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań w osi X, Y, Z w pojazdach mierzone na nadwoziu podczas badań na stanowisku
- Rys. 59. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku
- Rys. 60. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku

- Rys. 61. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd elektryczny
- Rys. 62. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku – uruchomiony napęd spalinowy
- Rys. 63. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z w pojazdach mierzone na siedzisku kierowcy (drgania ogólne) podczas badań stanowiskowych
- Rys. 64. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań nadwozia samochodu z napędem hybrydowym podczas badań na stanowisku – moment przełączenia napędu elektrycznego na spalinowy
- Rys. 65. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas badań na stanowisku – moment przełączenia napędu elektrycznego na spalinowy
- Rys. 66. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań w osiach X, Y, Z w pojeździe z napędem hybrydowym podczas przełączania napędu elektrycznego na spalinowy
- Rys. 67. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę podczas jazdy z prędkością 30 km/h
- Rys. 68. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę podczas jazdy z prędkością 30 km/h
- Rys. 69. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę podczas jazdy z prędkością 30 km/h
- Rys. 70. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) w pojazdach przy prędkości 30 km/h
- Rys. 71. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h
- Rys. 72. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h

- Rys. 73. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h
- Rys. 74. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 50 km/h
- Rys. 75. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h
- Rys. 76. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h
- Rys. 77. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h
- Rys. 78. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 100 km/h
- Rys. 79. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem konwencjonalnym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h
- Rys. 80. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem elektrycznym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h
- Rys. 81. Przebieg czasowy wraz z charakterystyką częstotliwościową przyspieszenia drgań samochodu z napędem hybrydowym przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h
- Rys. 82. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań przenoszonych na kierowcę (drgania ogólne) podczas jazdy z prędkością 140 km/h
- Rys. 83. Miernik pola elektromagnetycznego TM-191
- Rys. 84. Miernik pola elektromagnetycznego TM-196
- Rys. 85. Przykładowe wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego wewnątrz pojazdów
- Rys. 86. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h
- Rys. 87. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h

- Rys. 88. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 30 km/h
- Rys. 89. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h
- Rys. 90. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h
- Rys. 91. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 50 km/h
- Rys. 92. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h
- Rys. 93. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h
- Rys. 94. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 100 km/h
- Rys. 95. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h
- Rys. 96. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h
- Rys. 97. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy przy prędkości jazdy pojazdów 140 km/h
- Rys. 98. Pomiary pola elektromagnetycznego podczas ładowania samochodu elektrycznego
- Rys. 99. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola elektrycznego podczas ładowania pojazdu elektrycznego
- Rys. 100. Wyniki zbiorcze pomiarów natężenia pola magnetycznego podczas ładowania pojazdu elektrycznego
- Rys. 101. Wyniki zbiorcze pomiarów gęstości mocy podczas ładowania pojazdu elektrycznego
- Rys. 102. Przykładowe pomiary indukcji magnetycznej: a) przy ładowarce, b) przy alternatorze
- Rys. 103. Indukcja magnetyczna w okolicy alternatora – napęd konwencjonalny
- Rys. 104. Indukcja magnetyczna – pojazd elektryczny
- Rys. 105. Indukcja magnetyczna w okolicy ładowarki podczas ładowania pojazdu elektrycznego
- Rys. 106. Indukcja magnetyczna – pojazd hybrydowy
- Rys. 107. Zużycie klocków hamulcowych po 15 tys. kilometrów przebiegu
- Rys. 108. Zużycie tarcz hamulcowych po 15 tys. kilometrów przebiegu
- Rys. 109. Emisja pyłu z klocków i tarcz hamulcowych w odniesieniu do 1 km
- Rys. 110. Zużycie opon po 15 tys. kilometrów przebiegu
- Rys. 111. Emisja pyłu z opon w odniesieniu do 1 km
- Rys. 112. Elektronowy mikroskop skaningowy

- Rys. 113. Próbki pyłu – a), b) próbka opony samochodu osobowego, c) próbka pyłu zebrana z filtra powietrza, d) próbka pyłu z układu hamulcowego
- Rys. 114. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbki pyłu zebranego z filtrów powietrza a) z zaznaczonymi obszarami, b) widmo promieniowania (1 – 4), c) tabela z analizą ilościową
- Rys. 115. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbki pyłu zebranego układu hamulcowego a) z zaznaczonymi obszarami, b) widmo promieniowania (1 – 2), c) tabela z analizą ilościową
- Rys. 116. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego EDS próbki opony a) z zaznaczonymi obszarami, b) widmo promieniowania (1), c) tabela z analizą ilościową

9. SPIS TABLIC

- Tabl. 1. Wartości dopuszczalne dla pola elektromagnetycznego
- Tabl. 2. Dane techniczne samochodu Dacia Sandero
- Tabl. 3. Dane techniczne samochodu Dacia Spring
- Tabl. 4. Dane techniczne samochodu Toyota C-HR
- Tabl. 5. Ceny samochodu Dacia Sandero z 2021 roku
- Tabl. 6. Ceny samochodu Dacia Spring z 2021 roku
- Tabl. 7. Ceny samochodu Toyota C-HR z 2021 roku
- Tabl. 8. Parametry techniczne kamery akustycznej SoundCam Bionic XS
- Tabl. 9. Parametry techniczne miernika poziomu natężenia dźwięku – Bruel&Kjaer 2250 Light
- Tabl. 10. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 30 km/h
- Tabl. 11. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 50 km/h
- Tabl. 12. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 100 km/h
- Tabl. 13. Poziom natężenia dźwięku wewnątrz pojazdów przy prędkości 140 km/h
- Tabl. 14. Poziom natężenia dźwięku tła otoczenia przed przeprowadzeniem pomiarów
- Tabl. 15. Poziom natężenia dźwięku z zewnątrz pojazdów przy prędkości 20 km/h
- Tabl. 16. Poziom natężenia dźwięku z zewnątrz pojazdów przy prędkości 50 km/h
- Tabl. 17. Poziom natężenia dźwięku z zewnątrz pojazdów przy prędkości 80 km/h
- Tabl. 18. Parametry techniczne układu pomiaru drgań Siemens LMS SCADAS XS
- Tabl. 19. Parametry techniczne miernika elektromagnetycznego TM – 191
- Tabl. 20. Parametry techniczne miernika elektromagnetycznego TM – 196
- Tabl. 21. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 30 km/h
- Tabl. 22. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 50 km/h
- Tabl. 23. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 100 km/h
- Tabl. 24. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego pojazdów przy prędkości 140 km/h
- Tabl. 25. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego podczas ładowania samochodu elektrycznego
- Tabl. 26. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej w pojeździe spalinowym – alternator
- Tabl. 27. Wyniki pomiarów stanowiskowych indukcji magnetycznej w pojeździe elektrycznym
- Tabl. 28. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej podczas ładowania pojazdu elektrycznego
- Tabl. 29. Wyniki pomiarów stanowiskowych indukcji magnetycznej w pojeździe hybrydowym
- Tabl. 30. Powierzchnie badanych klocków i tarcz hamulcowych oraz objętościowe ich zużycie

- Tabl. 31. Masa pyłu z klocków i tarcz hamulcowych
- Tabl. 32. Emisja pyłu z klocków i tarcz hamulcowych w odniesieniu do 1 km
- Tabl. 33. Parametry opon zastosowanych w pojazdach
- Tabl. 34. Emisja pyłu z opon

STRESZCZENIE

Podczas realizacji pracy doktorskiej zbadano emisję zanieczyszczeń pochodzących z użytkowania środków transportu z napędem alternatywnym, czyli elektrycznym i hybrydowym. Emisje te porównano z zanieczyszczeniami pochodzącymi z użytkowania środków transportu z napędem konwencjonalnym. Kryteria jakimi kierowano się w wyborze pojazdów do badań, to najtańsze dostępne na rynku pojazdy z napędem konwencjonalnym oraz elektrycznym. Wytypowano 10 pojazdów marki Dacia. Z uwagi na fakt, iż marka ta nie posiadała w ofercie samochodu hybrydowego, zdecydowano się na uzupełnienie badań samochodem z napędem hybrydowym marki Toyota. Pojazdy marki Dacia były pojazdami do użytku współdzielonego (carsharing), pojazd Toyota C-HR była samochodem prywatnym, co pozwalało dodatkowo przeanalizować wpływ eksploatacji i stylu użytkowania na wyniki badań. Badania przeprowadzono na następujących samochodach osobowych: Dacia Spring z napędem elektrycznym, Dacia Sandero z napędem konwencjonalnym oraz Toyota C-HR z napędem hybrydowym. Pomiary wykonano w ruchu miejskim i autostradowym. Podczas badań zmierzono hałas wewnątrz podczas jazdy oraz z zewnątrz przejeżdżających pojazdów, wykonano pomiary drgań wewnątrz pojazdów, zmierzono emisje pola elektromagnetycznego w badanych pojazdach podczas jazdy oraz podczas ładowania (w przypadku pojazdu elektrycznego). W celu określenia emisji zapylenia przez pojazdy zebrano informacje w serwisach ASO na temat częstotliwości wymian opon i elementów układu hamulcowego oraz przeprowadzono analizę ich zużycia. Zebrano próbki pyłu pochodzącego z otoczenia oraz próbki pyłu pochodzącego z opon i układu hamulcowego, następnie wykonano badania za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego z mikroanalizą rentgenowską w celu porównania ich składu chemicznego.

Wyniki pomiarów hałasu wykazały, że przy prędkości do 30 km/h hałas jest niższy w pojeździe z napędem elektrycznym, natomiast przy prędkościach powyżej 50 km/h emisja hałasu we wszystkich pojazdach jest zbliżona, ponieważ hałas pochodzący ze współpracy opony z nawierzchnią oraz aerodynamiczny stają się dominujące. Dotyczy to zarówno hałasu wewnątrz pojazdu jak i na zewnątrz. Głównym źródłem hałasu podczas jazdy z niską prędkością (około 20 km/h) w samochodzie elektrycznym jest system AVAS, natomiast w samochodzie z napędem konwencjonalnym jest silnik spalinowy. W przypadku oddziaływania hałasu na kierowcę i pasażerów duże znaczenie ma wygłuszenie samochodu.

Pomiary drgań na stanowisku wykazały, że drgania oddziałujące na nadwozie samochodu oraz kierowcę i pasażerów pochodzące z napędu elektrycznego są mniejsze, niż w przypadku

napędu konwencjonalnego. Podczas jazdy miejskiej przy prędkości do 30 km/h są mniejsze w pojazdach z napędem elektrycznym, natomiast powyżej 50 km/h drgania we wszystkich pojazdach mają podobne wartości, a podczas jazdy autostradowej drgania w pojeździe elektrycznym są największe. Wynika to z faktu, iż głównym źródłem drgań podczas jazdy jest układ napędowy, układ zawieszenia, amortyzacja oraz stan nawierzchni po której porusza się pojazd, a także rozkład masy (np. akumulatory w samochodzie elektrycznym). Najmniejsze drgania zarejestrowano w samochodzie z napędem hybrydowym ze względu na najbardziej komfortowe zawieszenie.

Badania emisji pola elektromagnetycznego wykazały, iż największe wartości natężenia pola elektrycznego, natężenia pola magnetycznego oraz gęstość mocy zostały zmierzone w samochodzie z napędem elektrycznym, nie przekraczają one jednak wartości określonych w Rozporządzeniu Ministra z grudnia 2019 roku jako bezpieczne. Emisja pola elektromagnetycznego wzrastała wraz ze zwiększaniem prędkości we wszystkich badanych pojazdach. Największe wartości indukcji magnetycznej zostały zarejestrowane w okolicy ładowarki, sterownika i przewodów wysokiego napięcia w napędzie elektrycznym oraz w okolicy alternatora w napędzie konwencjonalnym.

Pomiary emisji pyłów wykazały, iż hamowanie rekuperacyjne ma wpływ na zmniejszenie zużycia elementów ciernych układu hamulcowego. We wszystkich badanych pojazdach wartości emisji pyłów z układu hamulcowego przekraczały dopuszczalne limity przewidziane w przyszłej normie Euro 7. W pojazdach do użytku współdzielonego, ze względu na zróżnicowany sposób eksploatacji i częstą zmianę kierowców, zużycie układu hamulcowego może być intensywniejsze, co dodatkowo wpływa na zwiększoną emisję pyłów. Emisja pyłu z opon była uzależniona od masy pojazdu oraz momentu obrotowego. Samochody elektryczne i hybrydowe, ze względu na większą masę oraz wysoki moment obrotowy dostępny od zerowej prędkości, wykazują intensywniejsze zużycie opon w porównaniu do samochodów konwencjonalnych. Badania składu chemicznego próbki pyłu zebranej z drogi wykazały, że największą część pyłu stanowi pył pochodzenia organicznego oraz krzemionka, pył pochodzący ze opon oraz pył z układu hamulcowego.

Podsumowując działania dotyczące realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej, zarówno pod względem badań literaturowych w zakresie literatury przedmiotu, jak i przebiegu oraz uzyskanych wyników badań własnych stwierdzić należy, że badane emisje bardzo silnie zależą od warunków użytkowania na przykład od prędkości jazdy.

ABSTRACT

During the implementation of the doctoral thesis, the emission of pollutants from the use of means of transport with alternative drive, i.e. electric and hybrid, was examined. These emissions were compared with pollutants from the use of means of transport with conventional drive. The criteria used in the selection of vehicles for testing were the cheapest conventional and electric vehicles available on the market. 10 Dacia vehicles were selected. Due to the fact that this brand did not have a hybrid car in its offer, it was decided to supplement the tests with a Toyota hybrid car. The Dacia vehicles were carsharing vehicles, the Toyota C-HR was a private car, which allowed for an additional analysis of the impact of operation and style of use on the test results. The tests were carried out on the following passenger cars: Dacia Spring with electric drive, Dacia Sandero with conventional drive and Toyota C-HR with hybrid drive. The measurements were taken in city and motorway traffic. During the tests, the noise inside and outside the passing vehicles was measured, vibration measurements inside the vehicles were taken, and the electromagnetic field emissions in the tested vehicles were measured while driving and while charging (in the case of an electric vehicle). In order to determine the dust emissions from the vehicles, information was collected in authorized service stations on the frequency of tire and brake system replacements and an analysis of their wear was carried out. Samples of dust from the environment and samples of dust from tires and the brake system were collected, then tests were performed using a scanning electron microscope with X-ray microanalysis to compare their chemical composition.

The noise measurement results showed that at speeds up to 30 km/h the noise is lower in the electric vehicle, while at speeds above 50 km/h the noise emission in all vehicles is similar, because the noise from the interaction of the tire with the road surface and aerodynamic noise become dominant. This applies to both the noise inside the vehicle and outside. The main source of noise when driving at low speed (around 20 km/h) in an electric car is the AVAS system, while in a car with a conventional drive it is the combustion engine. In the case of noise impact on the driver and passengers, soundproofing the car is of great importance.

Vibration measurements at the test stand showed that vibrations affecting the car body and the driver and passengers from the electric drive are smaller than in the case of a conventional drive. During city driving at speeds up to 30 km/h they are smaller in electric vehicles, while above 50 km/h the vibrations in all vehicles have similar values, and during motorway driving the vibrations in the electric vehicle are the greatest. This is due to the fact that the main source of vibrations while driving is the drive system, suspension system, shock

absorption and the condition of the surface on which the vehicle is moving, as well as the weight distribution (e.g. batteries in an electric car). The smallest vibrations were recorded in the car with a hybrid drive due to the most comfortable suspension.

Electromagnetic field emission tests showed that the highest values of electric field intensity, magnetic field intensity and power density were measured in an electric car, but they do not exceed the values specified in the Ministerial Regulation of December 2019 as safe. Electromagnetic field emission increased with increasing speed in all tested vehicles. The highest magnetic induction values were recorded in the area of the charger, controller and high-voltage cables in the electric drive and in the area of the alternator in the conventional drive.

Dust emission measurements showed that regenerative braking has an impact on reducing the wear of friction elements of the brake system. In all tested vehicles, the values of dust emissions from the brake system exceeded the permissible limits provided for in the future Euro 7 standard. In vehicles for shared use, due to the different methods of use and frequent change of drivers, the wear of the brake system may be more intense, which additionally affects increased dust emissions. Dust emission from tires depended on the vehicle weight and torque. Electric and hybrid cars, due to their greater mass and high torque available from zero speed, show more intensive tire wear compared to conventional cars. Studies of the chemical composition of a dust sample collected from the road showed that the largest part of the dust is organic dust and silica, tire dust and brake dust.

To sum up the activities related to the implementation of this doctoral dissertation, both in terms of literature research on the subject and the course and results of our own research, it should be stated that the emissions tested depend very strongly on the conditions of use, for example on the driving speed.