

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

mgr inż. Kamil Kubiak

**Wpływ specyfikacji samochodów osobowych na emisję
szkodliwych składników spalin**

Rozprawa doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Siedlecki

Poznań 2023

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract	5
Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	7
1. Wstęp.....	9
2. Wprowadzenie.....	18
2.1. Charakterystyka składników szkodliwych spalin silników	18
2.2. Metody homologacji pojazdów klasy PC	24
3. Specyfikacja techniczna nowoczesnych pojazdów.....	32
4. Cel i zakres pracy.....	45
5. Zapotrzebowanie energetyczne układów pojazdu.....	48
5.1. Wprowadzenie	48
5.2. Metodyka pomiarów i badane układy.....	49
5.3. Pomiar i analiza poboru energii przez systemy pojazdów.....	50
6. Analiza emisji składników toksycznych na hamowni podwoziowej	52
6.1. Badane obiekty i metodyka badań	52
6.2. Wyniki i analiza emisji składników toksycznych.....	58
7. Analiza emisji składników toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji	61
7.1. Metodyka badań.....	61
7.2. Badane obiekty	64
7.3. Wyniki i analiza badań	65
7.3.1. Pojazd SUV ZI 4.....	65
7.3.2. Pojazd SUV ZS 2.....	79
7.3.3. Pojazd hybrydowy	90
7.4. Podsumowanie działu	101
8. Wnioski	104
8.1. Podsumowanie	104
8.2. Wnioski ogólne	105
8.3. Wnioski szczegółowe	106
8.4. Wnioski prognostyczne	107
Literatura	108

Streszczenie

W ciągu ostatnich dekad rozwój technologii znacznie zmienił transport indywidualny, w tym pojazdy należące do grupy PC (ang. Passenger Car). Obecne samochody osobowe wyposażane są w liczne podzespoły i systemy zwiększające bezpieczeństwo osób korzystających z pojazdu oraz innych uczestników ruchu. Istotną staje się również kwestia wygody korzystania z tego środka transportu, dlatego producenci oferują możliwość wyposażenia swoich pojazdów w coraz to większą liczbę systemów komfortu. Jednak układy takie zwiększają masę pojazdu oraz pobór mocy prądu z silnika. Rozwój aparatury pomiarowej oraz sposobów przeprowadzania badań umożliwiają dokładną ocenę wpływu różnych czynników na emisję związków szkodliwych do atmosfery. Ze względu na powyższe, w niniejszej rozprawie doktorskiej podjęto się określenia wpływu specyfiki samochodów osobowych na emisję szkodliwych związków gazów wylotowych do atmosfery. Wcześniejsze, wielokrotne badania udowodniły wpływ m. in. zwiększonej masy na charakter emisji związków toksycznych, jednak temat ten w literaturze jest, zdaniem autora niniejszej pracy, opisany niewystarczająco.

We wstępie przedstawiono tendencje rozwoju osobowego transportu drogowego oraz omówiono wpływ pojazdów osobowych na stan środowiska naturalnego. Przybliżono przyczyny powstawania poszczególnych związków szkodliwych w spalinach oraz sposób ich oddziaływania na człowieka. Omówiono również metody homologacji pojazdów PC oraz przedstawiono zmiany wartości granicznych limitów emisji poszczególnych związków w kolejnych latach. Następnie szczegółowo scharakteryzowano wyposażenie dzisiejszych pojazdów osobowych, skupiając się głównie na przedstawieniu specyfiki systemów komfortu i bezpieczeństwa stosowanych w pojazdach klasy premium.

Poddano też analizie zapotrzebowanie energetyczne poszczególnych systemów stosowanych w pojazdach osobowych. Przedstawiono metodykę badawczą oraz obiekty badawcze, którymi były: należący do segmentu E pojazd wyposażony w silnik o zapłonie samoczynnym oraz pojazdy typu SUV (ang. Sport Utility Vehicle) kolejno z silnikiem o zapłonie samoczynnym i zapłonie iskrowym. Opisano również aparaturę pomiarową, a na podstawie uzyskanych danych obliczono chwilowe zużycie mocy przez poszczególne systemy, które przedstawiono w formie graficznej.

Następnie przeanalizowano emisję związków szkodliwych w badaniach przeprowadzonych na certyfikowanej hamowni podwoziowej, gdzie obiektami badawczymi były pojazdy typu SUV, wyposażone w silniki o zapłonie iskrowym, które różniły się od siebie między innymi objętością skokową oraz ułożeniem i liczbą cylindrów. W tej części rozprawy przybliżono również zastosowaną w badaniach laboratoryjnych aparaturę oraz parametry techniczne hamowni. Badania emisji związków szkodliwych przeprowadzono zgodnie z procedurą stosowaną do homologacji – NEDC (ang. New European Driving Cycle) i przy zachowaniu zawartych w niej wytycznych. Przed badaniami pojazdy były przygotowywane przez jednokrotny przejazd testu po zimnym rozruchu. Na podstawie uzyskanych wyników emisji

drogowej porównano wpływ zastosowania systemów komfortu na wartość natężenia emisji poszczególnych związków spalin oraz natężenia zużycia paliwa oddzielnie dla każdego obiektu badawczego. Kolejną częścią dysertacji jest analiza emisji zanieczyszczeń w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego. Badania te przeprowadzono z wykorzystaniem mobilnej aparatury należącej do grupy PEMS (ang. Portable Emission Measurement System). W ich ramach, analizie poddano trzy pojazdy różniące się zastosowanymi układami napędowymi. Należały do nich: pojazd typu SUV wyposażony w silnik ZS, SUV z silnikiem ZI oraz samochód segmentu E z napędem hybrydowym. Prace badawcze przeprowadzono w centrum miasta Poznań, liczącego około 500 tys. mieszkańców. Trasa badawcza została dobrana w taki sposób, aby jak najlepiej odwzorować różne warunki poruszania się osobowych pojazdów samochodowych w aglomeracjach miejskich. Przy doborze wzięto pod uwagę dopuszczalną prędkość poruszania się oraz infrastrukturę drogową. Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono szczegółową analizę parametrów pracy jednostek napędowych oraz parametrów ruchu poszczególnych obiektów badawczych. Następnie poddano analizie natężenia emisji węglowodorów, tlenków azotu, tlenku węgla oraz dwutlenku węgla. Wyniki pogrupowano w stosowne zakresy i na ich podstawie przedstawiono graficznie charakterystyki emisji poszczególnych związków w funkcji prędkości i przyspieszenia oraz obciążenia i prędkości obrotowej silnika w zadanych uprzednio przedziałach. Analizę przeprowadzono dla każdego pojazdu i obejmowała ona emisję uzyskaną dla jazdy z uruchomionymi systemami komfortu oraz bez tych systemów, a także dla jazdy po aktywacji trybu sportowego.

Podsumowanie rozdziału stanowi ocena wpływu zastosowanych w poszczególnym obiekcie układów bezpieczeństwa i komfortu na emisję oraz zużycie paliwa przez pojazd. Zestawiono także wnioski ogólne wypływające z przeprowadzonej analizy, wnioski szczegółowe oraz kierunki dalszych prac.

Przedstawiona rozprawa doktorska dostarcza nowej wiedzy w zakresie dotychczasowych rozważań nad emisyjnością pojazdów samochodowych. Dysertacja wpisuje się w ogólny trend, w którym producenci pojazdów samochodowych dążą do maksymalizacji komfortu podczas podróży. Wykonane analizy pozwoliły stwierdzić, że duży wpływ na energochłonność, emisję tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu oraz zużycie paliwa mają układy zwiększające bezpieczeństwo i komfort podróży.

Przeprowadzone badania dowiodły, że stosowanie systemów komfortu potrafi zwiększyć zużycie paliwa nawet o 69%, a ww. gazowych związków toksycznych o przeszło 100%, jednak mocno powiązane jest to z użytym układem napędowym pojazdu.

Abstract

The impact of passenger car specifications on the exhaust emission

Over the past decades, technological developments have significantly changed personal transport, including PC (Passenger Cars). Today's passenger cars are equipped with numerous components and systems that increase the safety of the vehicle occupants and other road users. Convenience issues for passenger cars are also becoming important. Manufacturers are therefore offering to equip their vehicles with an increasing number of comfort systems. Developments in measuring instruments and test methods make it possible to accurately assess the impact of all kinds of factors on the emission of harmful compounds into the atmosphere. In view of the above, this dissertation is concerned with determining the influence of passenger car specifications on the emission of harmful exhaust gas compounds into the atmosphere. Previous, repeated studies have proven the existence of the influence of, among other things, increased mass on the emission of toxic compounds, but this topic is, in the author's opinion, insufficiently described in the literature.

In the introduction, the development trends of passenger road transport are presented and the impact of passenger vehicles on the environment is discussed. The causes of the formation of individual harmful compounds in exhaust gases and the way in which they affect humans are discussed. Methods of approval of PC vehicles were also discussed and changes in emission limits for individual compounds that followed the introduction of Euro standards in successive years were presented. The specification of passenger vehicles was then characterised in detail, focusing mainly on presenting the specifics of the comfort and safety systems used in premium vehicles. The aim of the thesis was then defined and the main theses of the thesis were formulated.

The next chapter analyses the energy requirements of the various systems used in passenger vehicles. The research methodology and test subjects are described: a diesel E-segment vehicle and a Sport Utility Vehicle (SUV) with a diesel engine and a spark-ignition engine, respectively. The measuring equipment is also described, and the instantaneous power consumption of the various systems is calculated from the data obtained and presented

The next chapter is devoted to the analysis of harmful emissions in tests carried out on a certified chassis dynamometer. In this case, the test subjects were SUVs equipped with spark-ignition engines, which differed from each other in terms of displacement and the arrangement and number of cylinders, among other things. This part of the dissertation also gives an overview of the apparatus used in the laboratory tests and the technical parameters of the dynamometer. The test was carried out in accordance with the procedure used for homologation – NEDC (New European Driving Cycle) and in compliance with the guidelines contained therein. This included testing the vehicle after a cold start as well as a warmed-up drive unit. The impact of the use of comfort systems

on emissions and fuel consumption was then compared on the basis of the emission factors obtained. The analysis was divided according to the test object.

The next part of the dissertation is the analysis of emissions under real traffic conditions. These tests were carried out using mobile equipment from the PEMS (Portable Emission Measurement System) group. As part of this, three vehicles differing in the powertrains used were analysed. These included an SUV with a ZS engine, an SUV with a ZI engine and a hybrid car. The test work was carried out in the centre of the city of Poznan, with a population of over 500,000. The test route was selected so as to best replicate the driving conditions for passenger cars in urban areas. On the basis of the results obtained, a detailed analysis was carried out of the performance of the drive units and the traffic parameters of the individual test objects. Second-by-second emissions of hydrocarbons, nitrogen oxides, carbon monoxide and carbon dioxide were then analysed. For this purpose, the emission characteristics of the individual compounds were drawn up as a function of speed and acceleration, as well as engine load and speed in pre-set intervals. The analysis was carried out for each vehicle. This included the emissions obtained for driving without and with the comfort systems activated, as well as for driving after activation of the sport mode. In addition, the mileage fuel consumption was determined for each vehicle. The chapter concludes with an assessment of the impact of the safety and comfort systems used in each vehicle on emissions and vehicle fuel consumption. The conclusion summarises the general conclusions of the analysis, specific conclusions and directions for further work.

The dissertation presented here provides new knowledge in terms of previous considerations of motor vehicle emissions. The dissertation is part of a general trend in which motor vehicle manufacturers aim to maximise comfort and feel when travelling. The analyses carried out have identified how energy intensity, THC, NO_x, CO emissions and fuel consumption are affected by systems that increase safety and comfort during travel.

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

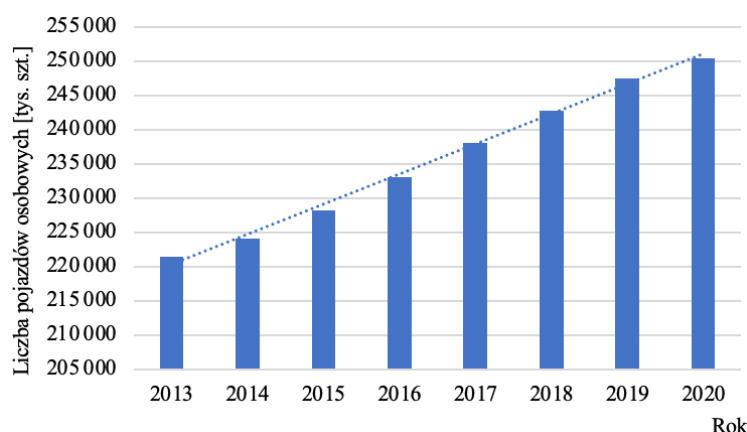
- a – przyspieszenie
- AdBlue – nazwa handlowa 32,5% roztworu wodnego mocznika
- AC – *Air Conditioning* – układ klimatyzacji
- ASC – *Ammonia Slip Catalyst* – filtr nieprzereagowanego amoniaku
- BEV – *Battery Electric Vehicle* – pojazd elektryczny wykorzystujący akumulatory
- CO – tlenek węgla
- CO₂ – dwutlenek węgla
- CPSI – *Cells Per Square Inch* – liczba cel na cal kwadratowy
- C_x – współczynnik oporu ruchu w kierunku wzdłużnym
- D – średnica
- DC – *Direct Current* – prąd stały
- DI – *Direct Injection* – bezpośredni wtrysk paliwa
- DOC – *Diesel Oxidation Catalyst* – dwufunkcyjny reaktor utleniający
- DPF – *Diesel Particulate Filter* – filtr cząstek stałych
- EEPS – *Exhaust Emission Particulate Sizer* – aparatura do pomiaru rozkładu średnic cząstek stałych
- EGR – *Exhaust Gas Recirculation* – system recyrkulacji gazów wylotowych
- EUDC – *Extra Urban Driving Cycle* – cykl przeznaczony do badania emisji w warunkach pozamiejskich
- Euro – normy emisji spalin
- GPF – *Gasoline Particulate Filter* – filtr cząstek stałych przeznaczony do silnika z zapłonem iskrowym
- GPS – *Global Positioning System* – globalny system wyznaczania pozycji
- HC – *Hydrocarbons* – węglowodory
- HDV – *High Duty Vehicles* – klasa pojazdów ciężkich
- HEV – *Hybrid Electric Vehicle* – pojazd hybrydowy z silnikiem elektrycznym
- HUD – *Head Up Display* – system wyświetlający dane na szybie pojazdu
- HVAC – *Heating Ventilating Air Conditioning* – układ kondycjonowania powietrza w pojazdach
- LDV – *Light Duty Vehicle* – klasa pojazdów lekkich
- LED – *Light Emitting Diode* – dioda emitująca promieniowanie świetlne
- M₀ – moment obrotowy
- M₁ – pojazdy do przewozu osób niemające więcej niż osiem miejsc poza siedzeniem kierowcy
- M₂ – pojazdy do przewozu osób o liczbie miejsc siedzących większej niż 9 i masie większej niż 5 t
- N₁ – pojazd do przewozu ładunków o maksymalnej masie całkowitej 3,5 t
- N₂ – pojazd do przewozu ładunków o maksymalnej masie całkowitej z zakresu 3,5-12 t

- MSS – *Micro Soot Sensor* – aparatura przeznaczona do pomiarów sadzy w spalinach
- n – prędkość obrotowa wału korbowego silnika
- NEDC – *New European Driving Cycle* – homologacyjny cykl badawczy przeznaczony do pomiaru pojazdów PC
- NO_x – *Nitrogen Oxides* – tlenki azotu
- OBD – *On Board Diagnostics* – system diagnostyki pokładowej pojazdu
- PAH – *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
- PC – *Passenger Car* – pojazd osobowy
- PEMS – *Portable Emissions Measurement System* – mobilny system do badań emisji spalin
- PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* – hybrydowy pojazd z możliwością ładowania z sieci elektrycznej
- PM – *Particulate Mass* – cząstki stałe
- PN – *Particulate Number* – liczba cząstek stałych
- RDE – *Real Driving Emission* – wytyczne do badań emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji
- SO_x – *Sulphur Oxides* – tlenki siarki
- SCR – *Selective Catalytic Reduction* – selektywna redukcja katalityczna
- SUV – *Sport Utility Vehicle* - samochód sportowo-użytkowy
- t – czas
- THC – *Total Hydrocarbons* – węglowodory
- TWC – *Three Way Catalyst* – trójfunkcyjny reaktor katalityczny
- UDC – *Urban Driving Cycles*
- UE – Unia Europejska
- V – prędkość
- WLTC – *Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycles* – światowe zharmonizowane cykle do badania pojazdów lekkich
- WLTP – *Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure* – światowa zharmonizowana procedura badania pojazdów lekkich
- Z – obciążenie
- ZI – zapłon iskrowy
- ZS – zapłon samoczynny

1. Wstęp

Transport samochodowy cieszy się coraz większym zainteresowaniem społeczeństwa, a same pojazdy samochodowe stają się coraz bardziej dostępne dla przeciętnego mieszkańca. Obecnie trudno znaleźć gospodarstwo domowe bez własnego pojazdu, a sytuacja zawodowa i rodzinna często zmusza do posiadania dwóch lub większej liczby samochodów. Zwiększa się również czas, jaki spędzany jest przez społeczeństwo w środkach transportu. Wybór samochodu jako podstawowego źródła transportu zależy głównie od jego zalet: możliwości przemieszczania się bezpośrednio do punktu docelowego rozbudowaną infrastrukturą drogową, niskich kosztów podróży i eksploatacji pojazdu oraz zwykle zwiększonego komfortu w stosunku do innych środków przemieszczania się. Należy również podkreślić zwiększenie dostępności pojazdów dla potencjalnych użytkowników przez rozbudowany rynek pojazdów używanych, których cena potrafi być wielokrotnie mniejsza od cen pojazdów nowych. Powyższe czynniki przyczyniają się do nieustannego wzrostu liczby eksploatowanych pojazdów osobowych. W Polsce na przestrzeni lat 2015-2020 zaobserwowano dwudziestojednoprocentowy wzrost liczby pojazdów osobowych. Ostatecznie liczba samochodów PC (ang. Passenger car) w wspomnianym okresie osiągnęła ponad 25 mln 113 tys. sztuk, a wzrost na poziomie przekraczającym 20% spowodował, iż Polska była na 4 miejscu wśród krajów Unii Europejskiej z największym przyrostem liczby pojazdów osobowych [109].

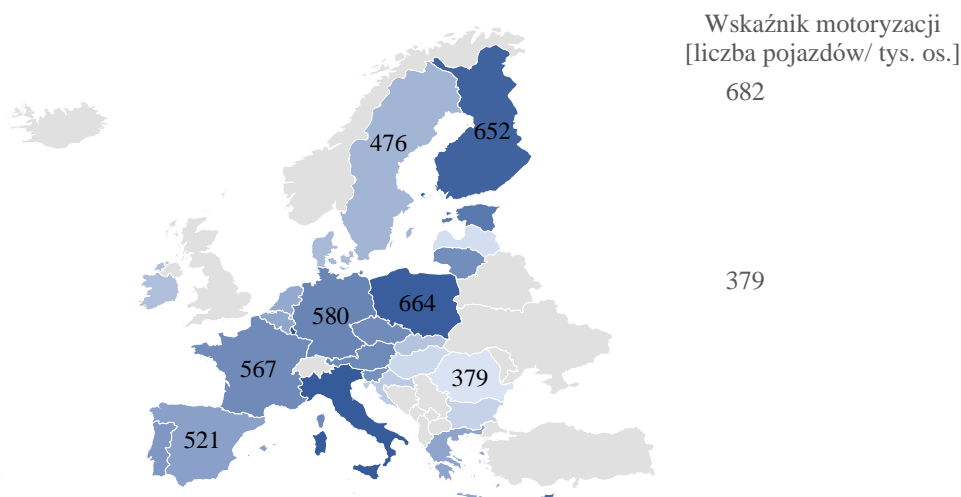
Podobne tendencje można zauważyć w całej Wspólnocie Europejskiej. Według danych Europejskiego Urzędu Statystycznego Eurostat liczba pojazdów z roku na rok jest coraz większa. W 2020 roku zanotowano przeszło 13% wzrost liczby pojazdów osobowych względem roku 2015 (rys. 1.1). Jedną z miar odnoszących się do liczby pojazdów eksploatowanych na danym terenie jest wskaźnik motoryzacji wyrażający stosunek liczby zarejestrowanych pojazdów osobowych do liczby mieszkańców danego terytorium – zazwyczaj w odniesieniu do tysiąca osób.



Rys. 1.1. Liczba pojazdów osobowych w Unii Europejskiej [109]

Wskaźnik ten, będący miarą statystyczną, powszechnie stosowany jest do określenia poziomu motoryzacji (rozwoju motoryzacji) danego regionu (kraju,

województwa, gminy itp.) [70, 116]. Według aktualnie dostępnych danych, w 2020 roku Polska znajdowała się na trzecim miejscu wśród państw w Unii Europejskiej pod względem liczby pojazdów przypadających na 1000 mieszkańców – wskaźnik wyniósł 664 pojazdy na 1000 mieszkańców (rys. 1.2). Większy wskaźnik motoryzacji występuje tylko w Luksemburgu oraz we Włoszech [109].



Rys. 1.2. Wskaźnik motoryzacji państw członkowskich UE w 2020 roku [109]

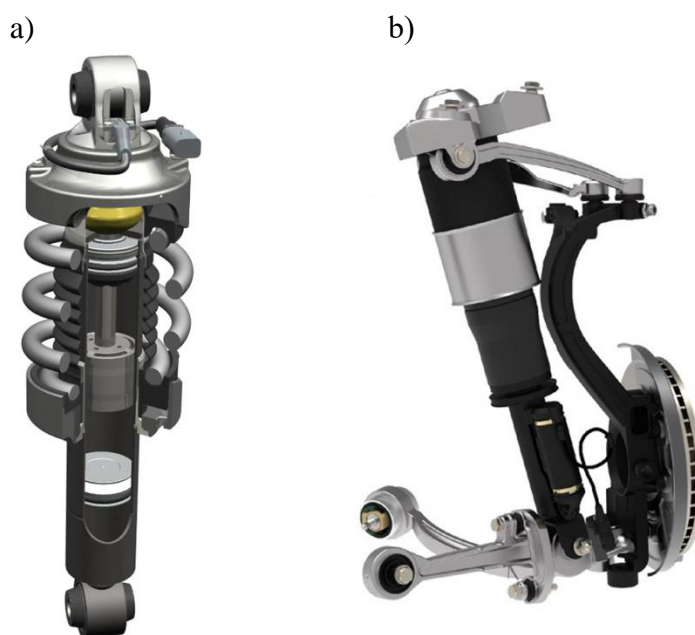
Zwiększenie liczby pojazdów na drogach jest jedną z przyczyn wydłużania się czasu dojazdu do miejsc docelowych. Aby utrzymać dominującą rolę transportu drogowego niezbędne jest zatem podejmowanie działań ukierunkowanych na podtrzymanie konkurencyjności w stosunku do pozostałych gałęzi transportu i zapewnienie maksymalnego poziomu satysfakcji użytkowników. Jednym z takich aspektów jest stopniowe zwiększenie komfortu podróżowania, który skłania do wyboru pojazdu samochodowego jako źródła lokomocji.

Współczesne pojazdy mają wiele możliwości dostosowania się do wymagań kierowcy oraz pasażerów. Lista seryjnego wyposażenia pod kątem bezpieczeństwa stale zwiększa się przez wprowadzanie kolejnych norm, w ramach których zwiększa się zakres obowiązkowego wyposażenia pojazdów w systemy bezpieczeństwa i komfortu [29, 44, 54]. W zakresie komfortu zauważyć można nie tylko trend zwiększania się udogodnień, ale także transferu technologii do pojazdów niższych segmentów, choć często przy ograniczaniu zakresu używania danego udogodnienia (np. zmniejszenie maksymalnej prędkości aktywnego tempomatu, bądź brak funkcji jazdy w kongestii) [54]. Systemy, które kilkanaście lat temu były nowością w pojazdach luksusowych dziś stanowią wyposażenie opcjonalne w pojazdach kompaktowych [93].

Standardem są systemy, w których dobór temperatury nawiewającego powietrza wewnątrz kabiny pojazdu mierzony jest w kilku miejscach, uwzględnione jest nasłonecznienie oraz temperatura zewnętrzna. I choć systemy klimatyzacji obecnie są niemal standardowym wyposażeniem pojazdów osobowych, niegdyś stanowiły o prestiżu i klasie samochodu. Precyzyjne ustawienie temperatury oraz utrzymanie

odpowiedniej wilgotności powietrza wewnątrz zwiększa nie tylko komfort podróży, lecz bezpośrednio zwiększa bezpieczeństwo, utrzymując kierowcę w odpowiedniej kondycji psychofizycznej [25]. Systemy klimatyzacji umożliwiają również zachowanie odpowiednich warunków wilgotności w pojeździe przez odparowywanie kropel wody, które osadziły się na szybach wewnątrz [4]. Standardem stają się także regulowane w kilku lub kilkunastu płaszczyznach elementy wyposażenia takie jak fotele, kierownica, lusterka czy poziom natężenia i barwa oświetlenia wewnętrznego w pojeździe. Pokładowe systemy multimedialne poprawiają wygodę podróżnych, oferując bezprzewodowy zestaw głośnomówiący, możliwość odtwarzania muzyki, dostępne bezpośrednio z Internetu lub z urządzenia mobilnego i asystentów głosowych.

Kolejną i zarazem jedną z najważniejszych możliwości pojazdów jest adaptacyjny system zawieszenia kół poprawiający właściwości jezdne i komfort podróży. Działania kierowcy ograniczają się do wyboru jednego z predefiniowanych ustawień i pozwalają na wybór trybu zawieszenia zazwyczaj od komfortowego ustawienia przez standardowe, aż do sportowego. Zmiana ustawień polegać może jedynie na zmianie charakterystyki tłumienia przez amortyzatory układu zawieszenia kół (rys. 1.3a) – aktywny amortyzator z opiłkami, zwykle przez aktywację elektryczną opiłków metali w medium tłumiącym (zazwyczaj oleju), bądź przez stosowanie kompletnego układu pneumatycznego zamiast sprężyny i amortyzatora jednocześnie (rys. 1.3b). To ostatnie rozwiązanie najczęściej umożliwia wybór wielkości prześwitu pojazdu, co jest pomocne przy przejeżdżaniu przez nierówności, zwiększając prześwit pojazdu.



Rys. 1.3. Adaptacyjny system zawieszenia kół: a) aktywny amortyzator z opiłkami w płynie tłumiącym, b) pneumatyczny układ zawieszenia kół [54]

Wszystkie rozwiązania mające na celu poprawę komfortu oraz bezpieczeństwa jazdy (zarówno czynnego, jak i biernego) zwykle wiążą się ze zwiększeniem masy

pojazdu na skutek montażu dodatkowych elementów. Jest to jeden z czynników który bezpośrednio wpływa na siły oporu występujące w trakcie poruszania się pojazdu.

Rozważając opory działające na pojazd wyróżnić można:

a) Opór bezwładności

Stanowi on iloczyn masy i przyspieszenia pojazdu i związany jest z usiłowaniem ciał do utrzymania obecnego stanu (zatrzymania, bądź poruszania się). Wspomniane wyżej dodatkowe wyposażenie będzie wpływało głównie na ten rodzaj oporu i to w eksploatacji, gdzie występują często procesy rozpędzania i hamowania, czyli podczas jazdy miejskiej, gdy zwykle zużycie paliwa jest największe [3]. Przy projektowaniu pojazdów obserwuje się dążenie do ograniczania masy i niejednokrotnie, wraz z kolejnymi, coraz większymi pod względem wymiarów generacjami konkretnego modelu pojazdu, masa utrzymywana jest na tym samym poziomie, bądź zmniejsza się. Jest to możliwe przede wszystkim dzięki postępom w dziedzinie materiałów oraz łączeniu różnego rodzaju materiałów (np. stali i aluminium) w określonych, bardziej lub mniej obciążonych elementach nadwozia. To natomiast umożliwia postęp technik komputerowych, w szczególności programów do symulacji obciążeń w ramach inżynierii wirtualnej. Wpływa na to także unifikacja płyt podłogowych pojazdów w ramach różnych marek jednego koncernu, co zmniejsza koszty jednostkowe konstrukcji. Na zwiększenie masy wpływ może mieć również rodzaj nadwozia. Na przykład zastosowanie nadwozia otwartego typu kabriolet lub targa powoduje zmniejszenie sztywności nadwozia samonośnego i w efekcie konieczność zastosowania dodatkowych wzmocnień bocznych w pojeździe i płycie podłogowej, co może wiązać się ze zwiększeniem masy nawet o 200 kg do nadwozia zamkniętego [54]. Masę mogą zwiększyć też dodatkowe elementy ozdobne nadwozia czy koła o większej średnicy obręczy, które dodatkowo zwiększają inercje układu napędowego.

b) Opór aerodynamiczny

Stanowi on iloczyn kilku składników, tj. oporu (oznaczany zwykle w literaturze jako C_x), gęstości powietrza, powierzchni czołowej pojazdu oraz przede wszystkim prędkości podniesionej do kwadratu. Współczynnik oporu aerodynamicznego nadwozi pojazdów różni się i wynosi od około 0,23 do 0,35, w zależności od parametrów geometrycznych nadwozia [79]. Wpływ na to ma także wersja nadwoziowa i w pojazdach osobowych występujących w kilku wariantach jest on zwykle największy dla nadwozia kombi, mniejszy dla sedana, a najmniejszy dla odmiany hatchback (podobnie jak ich masa). W naturze najmniejszym wskaźnikiem na poziomie 0,05 cechuje się spadająca kropla deszczu [73]. Gęstość powietrza przy powierzchni ziemi można uznać za stałą, będzie się ona zmieniała proporcjonalnie do zmiany ciśnienia, np. podczas jazdy górskiej opór będzie mniejszy. Powierzchnia czołowa pojazdu stanowi rzut nadwozia na płaszczyznę prostopadłą do osi wzdłużnej pojazdu. Wraz z kolejnymi generacjami pojazdów obserwuje się wzrost wielkości nadwozia, co wpływa na zwiększenie tego parametru. Jednym ze sposobów na jego ograniczenie jest zastąpienie bocznych lusterek kamerami, jednak do tej pory

w seryjnie produkowanych pojazdach takie rozwiązanie jeszcze nie zostało wprowadzone. Najważniejszym czynnikiem jest jednak prędkość pojazdu, której wzrost zwiększa siłę oporu z jej kwadratem (a moc oporów ruchu w trzeciej potęgze prędkości) i jest to główna składowa oporów ruchu podczas poruszania się w warunkach pozamiejskich/autostradowych. Widoczne jest to to w samochodach sportowych, gdzie zwiększenie mocy maksymalnej silnika o 40% zwiększa prędkość maksymalną o niecałe 10% [54].

c) Opór wzniesienia

Determinowany jest on iloczynem masy i sinusem kąta nierówności, pod które podejżdza pojazd. Niekoniecznie musi to być wzniesienie, ale np. poprzeczna nierówność drogi. W przypadku tego oporu masa jest wprost proporcjonalna do jego wartości, podobnie jak dla oporu bezwładności i jedynym sposobem na jego zmniejszenie jest zmniejszenie masy pojazdu.

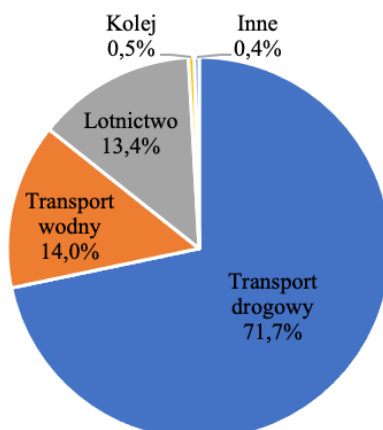
d) Opór toczenia

Związany jest przede wszystkim z siłą tarcia w układzie napędowym oraz odkształcaniem się opon. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej opory w układzie napędowym rosną, krzywa zwykle ma charakter zbliżony do wykładniczego. Na jego wielkość wpływ ma też szerokość opon i ciśnienie w ogumieniu. W pojazdach z alternatywnymi układami napędowymi obserwuje się stosowanie kół i opon o ograniczonych oporach i szerokości, co bezpośrednio wpływa na zasięg takiego pojazdu, który zwykle jest mniejszy niż dla pojazdów na paliwa płynne [59].

Stosowanie dodatkowych systemów komfortu przyczynia się do zwiększenia masy pojazdów osobowych. Istotny jest również fakt, że dodatkowe układy elektroniczne wymagają także zasilania prądem elektrycznym. W pojeździe do generowania prądu elektrycznego wykorzystywany jest silnik spalinowy, co wpływa na zwiększenie zużycia paliwa. Prąd elektryczny wytwarzany jest w obecnie produkowanych silnikach w alternatorze, który jest bezpośrednio połączony z wałem korbowym zwykle, za pomocą paska wielorowkowego [60]. Generowanie prądu powoduje więc wzrost zużycia paliwa.

Zużycie paliwa jest szczególnie ważne dla użytkowników pojazdów, gdyż bezpośrednio wpływa na koszty eksploatacji oraz ważne jest ze względu na ochronę środowiska, na którą ukierunkowane są od wielu lat pojazdy samochodowe. Negatywnym skutkiem spalania całkowitego paliw ropopochodnych jest emisja dwutlenku węgla, który jest jednym z głównych gazów cieplarnianych [30, 58]. Przez długi czas emisja dwutlenku węgla z sektora transportowego nie była w żaden sposób kontrolowana. Zgodnie z danymi Parlamentu Europejskiego [111] na przestrzeni lat 1990-2016 niemal wszystkie sektory gospodarki, z wyjątkiem transportu, wykazywały malejący poziom emisji dwutlenku węgla. Istotne jest również, że w 2019 roku emisja dwutlenku węgla z sektora transportu wyniosła ok. 1 103 Gg [110]. Spośród wszystkich rodzajów transportu największy wpływ na wartość emisji dwutlenku węgla do atmosfery miał transport drogowy (rys. 1.4). Ponad 60% całkowitej emisji związku

z transportu drogowego pochodziło z samochodów osobowych, natomiast 38% z transportu towarów lekkimi i ciężkimi samochodami ciężarowymi [111].



Rys. 1.4. Struktura emisji CO₂ z sektora transportu we Wspólnocie Europejskiej w 2019 roku [111]

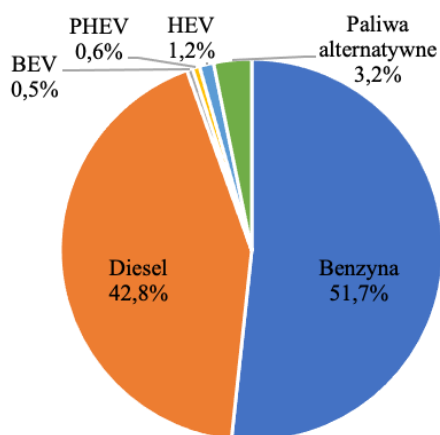
Masa emitowanego dwutlenku węgla z układu wylotowego jest bezpośrednio związana z masą spalanego paliwa w silniku. Paliwo zazwyczaj stanowią łańcuchy węglowodorowe oznaczane jako C_xH_y, ze względu na używanie mieszaniny różnych frakcji ropy naftowej w ramach stosowanych paliw. Emisję drogową dwutlenku węgla można wyznaczyć przez zużycie drogowe paliwa, gdyż węgiel w tym związku pochodzi z reakcji utleniania paliwa opartego na węglowodorach i wydalany jest z silnika ze spalinami. W silniku energia chemiczna zawarta w paliwie jest przekształcana na moc użyteczną w stosunkowo niewielkiej ilości. Maksymalna sprawność ogólna silnika spalinowego w pojazdach samochodowych na ogół nie przekracza 50%, jednak podczas standardowej eksploatacji wartość ta wynosi 20% i mniej [37]. Oznacza to, że około 80% energii zawartej w paliwie nie jest wykorzystywane do napędu i trafia do atmosfery w postaci strat ciepła i entalpii gazów wylotowych. Wartości sprawności stale zwiększają się, jednak brak jest widocznej rewolucji w tym zakresie i obecny postęp w budowie silników nie zapowiada żadnej radykalnej zmiany w aspekcie zwiększenia sprawności w najbliższych latach (i w efekcie zmniejszenia emisji dwutlenku węgla) [54].

Zgodnie z najnowszymi prognozami, w ciągu kolejnych lat emisja tego związku ma zmniejszać się tak, by w 2035 r. być na poziomie 1 089 Gg (przy zachowaniu obecnego trendu) lub 906 Gg (jeżeli państwa UE wprowadzą działania mające na celu na zmniejszenie emisji dwutlenku węgla) [109]. Do zmniejszenia powyższego wskaźnika w ramach analiz znacznie przyczynia się elektryfikacja oraz hybrydyzacja pojazdów. Takie konstrukcje wraz z pojazdami w pełni elektrycznymi są w coraz większej liczbie widoczne w ofercie producentów i w ruchu ulicznym. Pojazdy z napędami alternatywnymi w ramach testu homologacyjnego uzyskują wyraźnie mniejsze wartości zużycia paliwa w stosunku do rozwiązań konwencjonalnych. Uzyskane w ramach homologacji wartości zużycia paliwa nie zawsze są możliwe do uzyskania w rzeczywistej eksploatacji, na co wskazują m. in. wcześniejsze badania

autora niniejszej dysertacji [46, 47], jednak zjawisko takie występuje także w tradycyjnych napędach. Ewentualne zwiększenie emisji dwutlenku węgla powyżej limitów wiąże się z karą dla producenta wynoszącą 100 euro za każdy 1 g emisji nadmiaru dla każdego sprzedanego pojazdu. W praktyce przenoszona jest ona na odbiorcę końcowego i zawarta w cenie pojazdu. Przepis ten nie dotyczy produkcji małoseryjnej – do 1000 sztuk na rok.

Najnowsze doniesienia dotyczące przyszłości pojazdów z silnikami spalinowymi są niejednoznaczne i niektórzy producenci zapowiadają zakończenie ich produkcji, podczas gdy inni utrzymują, że kolejne konstrukcje będą powstawały [54]. Pierwotnie w ramach Wspólnoty Europejskiej od roku 2035 miał istnieć zakaz rejestracji pojazdów z silnikami spalinowymi, ale obecnie przepis został odrzucony.

Liczba pojazdów elektrycznych sukcesywnie rośnie od 2013 roku. Warto zaznaczyć, iż obecnie w państwach Unii Europejskiej nadal dominują pojazdy z konwencjonalnym napędem – szczególnie zasilane olejem napędowym lub benzyną (rys. 1.5). Samochody z napędem alternatywnym – BEV (ang. Battery Electric Vehicle – pojazd elektryczny wykorzystujący akumulatory), HEV (ang. Hybrid Electric Vehicle – Hybrydowy pojazd elektryczny) oraz PHEV (ang. Plug-in Hybrid Electric Vehicle – pojazd hybrydowy doładowywany z sieci elektrycznej) stanowią niewiele ponad 2% udziału w rynku pojazdów osobowych [82]. Niniejsza praca ma za zadanie zbadanie rzeczywistego wpływu stosowania urządzeń bezpieczeństwa i komfortu na zużycie paliwa oraz przede wszystkim emisję składników toksycznych spalin.

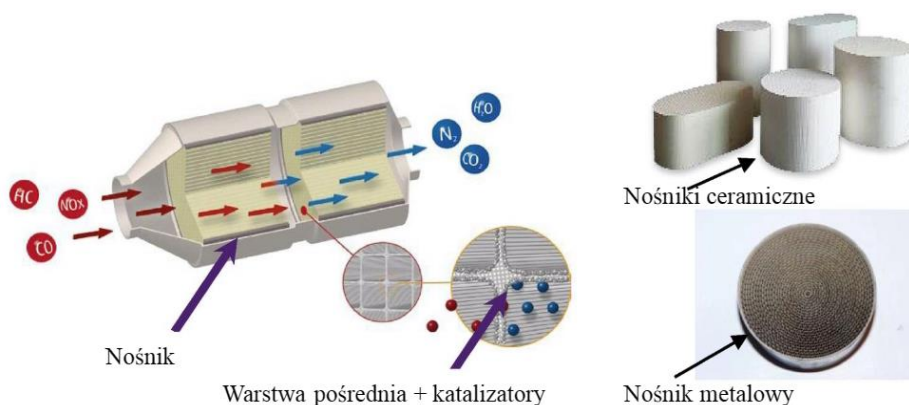


Rys. 1.5. Udział poszczególnych napędów pojazdów PC użytkowanych w krajach Unii Europejskiej w 2022 roku [82]

Składniki toksyczne są obecne w spalinach i wymagają oczyszczania poza silnikiem w celu spełnienia limitów homologacyjnych. Podstawowym elementem dla silników ZI jest reaktor trójfunkcyjny (ang. TWC – Three Way Catalyst), a dla silników ZS, m. in. ze względu na inne wartości współczynnika nadmiaru powietrza, reaktor utleniający (ang. DOC – Diesel Oxidation Catalyst). Obecnie w silnikach obydwu rodzajów powszechne są filtry cząstek stałych (odpowiednio ang. DPF – Diesel Particulate Filter i ang. GPF – Gasoline Particulate Filter) i selektywna redukcja katalityczna. Reaktory są powszechnie stosowane w układach wylotowych prawie od

początku powstania norm emisji spalin Euro, zaś filtr cząstek stałych wprowadzany był w silnikach ZS w celu spełniania normy Euro 5, a dla silników benzynowych od normy Euro 6c [56].

Systemy te do skutecznego działania wymagają osiągnięcia określonej temperatury, różniącej się w zależności od konstrukcji i materiałów użytych jako nośnik – warstwy pośrednia oraz katalityczna. Temperatura ta uzyskiwana jest przez podgrzewanie nośników przepływającymi spalinami. Przykład budowy reaktora katalitycznego oraz schemat jego działania przedstawiono na rys. 1.6. Do silnika podczas zimnego rozruchu zwykle używana jest wzbogacona w stosunku do normalnej pracy, mieszanka (która dodatkowo wpływa na zwiększenie jego emisyjności) w celu szybszego rozgrzania zarówno silnika, jak i układu wylotowego [3]. Temperatura spalin wpływa bezpośrednio na temperaturę nośnika, a zależy ona głównie od punktu pracy silnika, a konkretniej jest proporcjonalna do jego obciążenia.



Rys. 1.6. Budowa oraz schemat działania samochodowego reaktora katalitycznego [56]

Ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko pojazdów klasy PC zostało wprowadzone w postaci norm emisji danego składnika toksycznego na jednostkę odległości. Do limitowanych związków zgodnie z obecną normą Euro 6d należy emisja drogowa tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu oraz cząstek stałych (w zakresie masy PM – ang. Particulate Mass) oraz liczby drogowej PN (ang. Particulate Number)). Wraz z rozwojem technologii związki te były dzielone na pomniejsze grupy, a przykładem takich działań jest uszczegółowienie emisji cząstek stałych. Ich emisja wcześniej była limitowana w silnikach o zapłonie samoczynnym (ZS) głównie przez właściwości oleju napędowego, który wolniej odparowuje niż benzyna i w efekcie trudniej jest spalić całą jego dostarczoną do cylindra objętość [78]. Rozwój techniki i wprowadzenie bezpośredniego wtrysku benzyny w produkowanych seryjnie silnikach o zapłonie iskrowym (ZI) w roku 1999 przez firmę Mitsubishi poza zaletami, jak zwiększenie sprawności, wiąże się również z wadami. Główna wada spowodowana była skróceniem czasu odparowania benzyny i intensyfikacją tworzenia się cząstek stałych. Pomimo wzrostu ciśnienia wtrysku i uzyskania mniejszych kropeł paliwa eksploatacja takich silników wiąże się ze zwiększoną emisją cząstek stałych. W porównaniu do silników ZS powstające cząstki mają mniejsze średnice i są bardziej niebezpieczne dla zdrowia ludzi [56, 57].

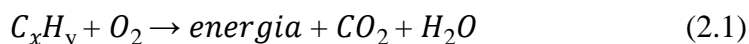
Problem ten został zauważony przez ośrodki badawcze w kraju i na świecie [2, 41, 62, 75]. We wrześniu 2017 roku dla nowych silników i pojazdów zaczęła obowiązywać norma emisji Euro 6c, która ograniczyła emisję drogową cząstek stałych do tego samego poziomu jak dla pojazdów z silnikami ZS i wyniosła 6×10^{11} /km. Dla większości jednostek silnikowych spełnienie tego limitu jest utrudnione bez zastosowania dodatkowego, pozasilnikowego układu oczyszczania spalin. Spowodowało to wycofanie na jakiś czas niektórych jednostek benzynowych i doposażenie ich w filtr cząstek stałych. Filtr przeznaczony dla silników ZI z wtryskiem bezpośrednim charakteryzuje się zbliżoną budową i zasadą działania jak konstrukcje dla silników ZS. Różne są warunki pracy, przede wszystkim temperatura, zawartość tlenu, natężenie przepływu gazów wylotowych oraz rozkład średnic cząstek stałych. Mniejsze są też zwykle kanały wewnętrzne wyrażane jako liczba cel na cal kwadratowy (ang. CPSI – Cells Per Square Inch) [92].

2. Wprowadzenie

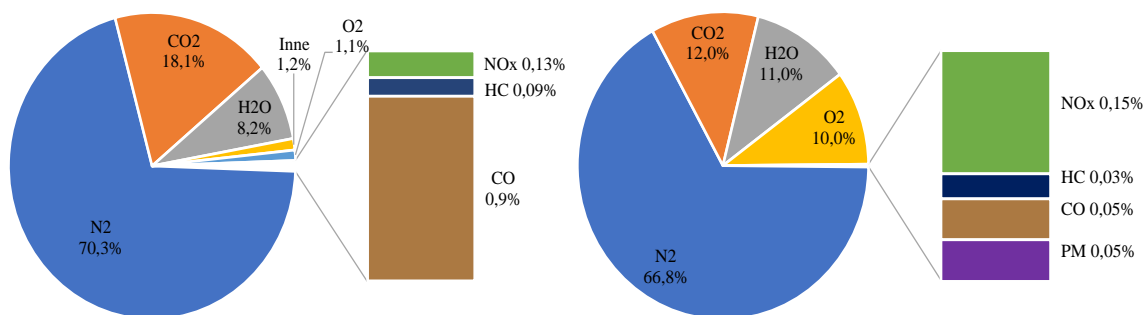
2.1. Charakterystyka składników szkodliwych spalin silników

Głównym negatywnym skutkiem stosowania spalinowych jednostek napędowych w pojazdach jest emisja związków szkodliwych do atmosfery, która negatywnie wpływa zarówno na środowisko, jak i zdrowie człowieka. Związki te obniżają odporność, powodują choroby serca, układu krążenia, płuc i dróg oddechowych, a także zwiększają wady wzroku [89].

Istotą działania silników spalinowych stosowanych w pojazdach jest wytworzenie energii mechanicznej z energii chemicznej zawartej w paliwie. Wskutek spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, zgodnie z reakcją przedstawioną w równaniu (2.1.), powstaje energia cieplna, która dzięki układowi korbowo-tłokowemu zostaje przekształcona na energię mechaniczną.



Przedstawiona w powyższym równaniu reakcja spalania, w wyniku której powstają wyłącznie dwutlenek węgla i woda w postaci pary wodnej, zachodzi podczas spalania mieszanki stechiometrycznej. Jest to mieszanka paliwowo-powietrzna, w której ilość powietrza dostarczonego do spalania odpowiada teoretycznej ilości powietrza koniecznej do całkowitego i zupełnego spalania paliwa [39]. Opisana reakcja spalania jest czysto teoretyczna ponieważ niejednorodności składu mieszanki powodują tworzenie się innych związków. Konsekwencją niedoskonałości procesu jest powstawanie związków toksycznych, do których zalicza się między innymi tlenek węgla, węglowodory, tlenki azotu czy cząstki stałe. Struktura ilościowa oraz jakościowa związków toksycznych w spalinach zależna jest od wielu czynników, do których zalicza się warunki pracy jednostki, sposób jej eksploatacji, rodzaj spalanego paliwa i silnika oraz, jak wspomniano wcześniej, współczynnik nadmiaru powietrza [77, 113]. Przykładowe różnice w składzie spalin silników o zapłonie iskrowym oraz samoczynnym przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Skład gazów wylotowych a) silnika ZI b) silnika ZS [55, 97]

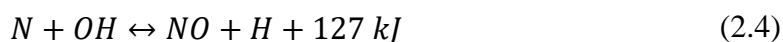
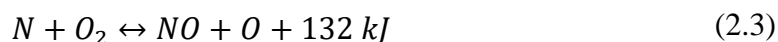
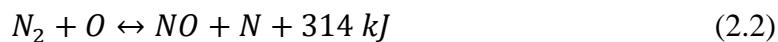
Zarówno w silnikach o zapłonie samoczynnym, jak i iskrowym największy udział w składzie gazów wylotowych ma azot, co wynika bezpośrednio ze składu powietrza atmosferycznego, które zawiera około 78% tego pierwiastka, natomiast znaczna ilość tlenu w spalinach silników ZS wynika z faktu, że podczas ich pracy utrzymywana jest mieszanka uboga. Jest to spowodowane celowym wprowadzeniem nadmiaru tlenu, aby zmniejszyć tworzenie się związków toksycznych, przede wszystkim cząstek stałych na skutek nieodparowania i niewymieszania się całości paliwa [77]. Pomimo tych działań w spalinach znajduje się wiele składników toksycznych dla środowiska i ludzi.

Tlenek węgla (CO) jest rezultatem niepełnego spalania paliwa w silniku. Związek ten należy do pierwszych składników gazów spalinowych, których emisję zaczęto limitować (miało to miejsce w Niemczech w 1971 r.) [55]. Tlenek węgla to bezwonny i bezbarwny gaz, który jest skrajnie niebezpieczny dla człowieka. Wykazuje on ponad 200-krotnie większe powinowactwo do hemoglobiny niż tlen, co w przypadku nadmiernego narażenia ludzi na oddziaływanie związku prowadzi do niedoboru tlenu w organizmie i zaburzenia prawidłowego procesu wewnątrzkomórkowej wymiany gazów [55]. Już niewielkie stężenie tlenu węgla w wdychanym powietrzu, wynoszące 0,02%, oddziałuje w sposób negatywny na zdrowie człowieka, a stężenie w powietrzu na poziomie 0,1% stanowi zagrożenie dla życia ludzi i zwierząt nim oddychających [94]. Długa ekspozycja na tlenek węgla nawet o niewielkim stężeniu prowadzi do zatrucia organizmu, które objawia się m. in. rozdrażnieniem. Konsekwencją zatrucia tlenkiem węgla są również zaburzenie oraz upośledzenie funkcji poznawczych człowieka [104]. W przypadku większego stężenia tlenu węgla zatrucie objawia się bólem głowy, nudnościami, drgawkami, a w konsekwencji może doprowadzić nawet do śmierci, która następuje, gdy stężenie karboksyhemoglobiny we krwi wynosi 60-70% [55, 115]. Główną przyczyną powstawania tlenu węgla podczas spalania węglowodorowych paliw jest lokalny bądź globalny brak tlenu spowodowany wspomnianą już niejednorodnością mieszanki [3].

Z tej przyczyny, ze względu na charakter pracy oraz inny współczynnik nadmiaru powietrza spalanej mieszanki, zawartość tlenu węgla jest różna w silnikach ZI i ZS, w tych drugich stężenie związku jest zazwyczaj mniejsze. Czynnikiem sprzyjającym powstawaniu tlenu węgla są również nieodpowiednie wymieszanie paliwa z powietrzem czy spalanie niskotemperaturowe, dlatego również zastosowanie systemu EGR (ang. Exhaust Gas Recirculation – system recyrkulacji gazów wylotowych) sprzyja zwiększaniu jego stężenia [74, 77].

Tlenki azotu (NO_x) to grupa związków uważana za jedną z bardziej toksycznych substancji występujących w gazach wylotowych spalinowych jednostek napędowych. Związki te powstają w komorze spalania wskutek reakcji utleniania atomów azotu zawartych w powietrzu atmosferycznym, tworząc tlenek azotu (NO), dwutlenek azotu (NO_2), trójtlenek azotu (N_2O_3), cztero- i pięcioletek azotu (N_2O_4 , N_2O_5) oraz podtlenek azotu (N_2O). Dzieje się to pomimo że azot uznawany jest za gaz obojętny, jednak zmiana temperatury i ciśnienia prowadzi do zachodzenia reakcji łączenia się tlenu z cząsteczkami azotu [33]. Istotne jest także, że w komorze spalania powstaje głównie tlenek azotu (II) oraz zazwyczaj mniejsze stężenie dwutlenku azotu, który jest efektem utleniania powstałego wcześniej tlenu węgla [55, 77]. Emisja tlenków węgla jest

zależna bezpośrednio od temperatury w cylindrze i rośnie wraz z jej wzrostem w czasie procesu spalania (szczególnie ze wzrostem temperatury frontu płomienia). Istotny wpływ ma również wysokie ciśnienie panujące wewnątrz komory spalania. Tlenek azotu powstaje zgodnie z mechanizmem, który powszechnie znany jest jako rozszerzony model Zeldowicza, który składa się z następujących reakcji [55]:



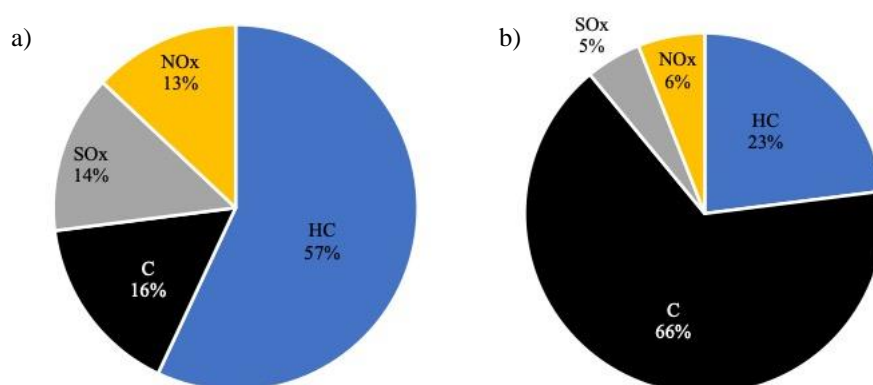
Powstały w ten sposób tlenek w strefie płomienia ulega przemianie na dwutlenek azotu. Tak powstały tlenek azotu (IV) reaguje ponownie z tlenem, tworząc ponownie tlenek azotu, a reakcje przebiegają aż do momentu obniżenia temperatury spowodowanego przez dwutlenek azotu na skutek wymieszania z zimniejszymi gazami [55]. Duże stężenie tlenków azotu jest wskaźnikiem dużej sprawności silnika spalinowego na skutek wystąpienia wysokiej temperatury.

Tlenki azotu, podobnie jak tlenek węgla, są zazwyczaj bezbarwnym oraz bezwonnym gazem o bardzo dużym powinowactwie do hemoglobiny. Zatrucie tą grupą związków prowadzi do ogólnego osłabienia organizmu, zawrotów głowy, odrętwienia nóg, a przy silniejszym zatruciu sinicy ust i dreszczów. Dwutlenek azotu natomiast ma charakterystyczny, ostry zapach, jest on skrajnie toksyczną substancją, a przy stężeniu w powietrzu wynoszącym 0,38-1,33 mg/dm³ powoduje bardzo szybko zatrucie się organizmu, które może skończyć się zgonem. W mniejszych stężeniach powoduje kaszel i podrażnienia błon śluzowych gardła. Tlenek azotu (IV), wchodząc w reakcję z wodą, tworzy kwas azotowy oraz azotawy [55]. Tlenki azotu bowiem przyczyniają się do powstawania kwaśnych deszczy, biorą również udział w tworzeniu się smogu oraz przyczyniają się do zaburzenia warstwy ozonowej [5, 55]

Istotną grupą związków toksycznych występujących w spalinach są także węglowodory. Stanowią one najbardziej różnorodną grupę związków wchodzących w skład gazów wylotowych, wśród których wymienić można m.in. węglowodory nasycone, węglowodory nienasycone (alkany, alkiny) i węglowodory aromatyczne. Przeprowadzone dotychczas badania umożliwiły wyodrębnić ponad 200 typów węglowodorów w spalinach [98]. Można wyróżnić dwa źródła emisji węglowodorów. Pierwsze to węglowodory emitowane z pojazdu wskutek niecałkowitego spalania dostarczanego paliwa. Drugie źródło emisji to skrzynia korbowa, parowanie paliwa ze zbiornika lub nieszczelności układów smarowania, bądź zasilania. Na niecałkowite spalanie paliwa wpływa wiele czynników, w tym lokalny i globalny brak tlenu, parowanie paliwa i oleju oraz wypadanie zapłonów, które jest jednym z objawów złego stanu technicznego jednostki napędowej. Istotny wpływ mają również efekt przyścienny i szczelinowy. Pierwszy z mechanizmów polega na obniżaniu temperatury spalanej mieszanki w pobliżu ścianek komory spalania do takiego poziomu, że niemożliwy jest jej zapłon. Drugi polega na wygaszaniu płomieni w wąskich szczelinach komory

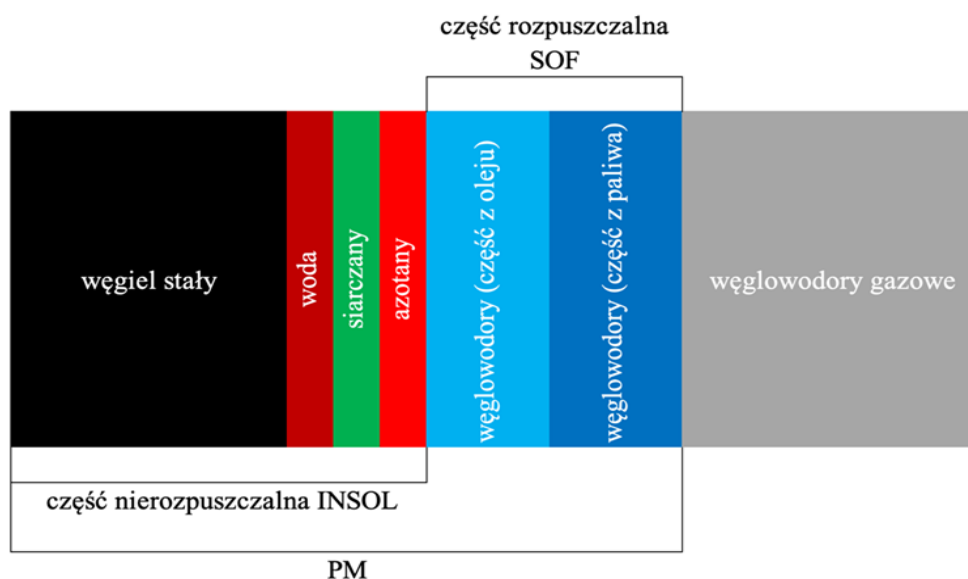
spalania, co jest konsekwencją gwałtownego odprowadzania ciepła w tych miejscach i możliwości penetracyjnych płomienia [77]. Ze względu na różnorodność, wpływ węglowodorów na człowieka nie jest jednoznaczny. Węglowodory, które nie rozpuszczają się w krwi nie wykazują silnie toksycznego działania na organizm człowieka. Inne, np. węglowodory nienasycone szeregu etylowego, mogą mieć działanie silnie narkotyczne oraz powodować podrażnienie dróg oddechowych [61]. Ze wszystkich typów węglowodorów najbardziej toksyczne i niebezpieczne działanie na człowieka wykazują aromatyczne węglowodory wielopierścieniowe PAH (ang. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons). Mają one działanie narkotyczne i rakotwórcze. Ponadto zatrucie PAH może spowodować uszkodzenie takich narządów, jak nerki, wątroba i szpik kostny, doprowadzając w konsekwencji do zgonu [55, 61].

Analiza literatury oraz liczne dostępne wyniki badań pozwalają stwierdzić, iż obecnie jednym z najbardziej istotnych problemów, oprócz emisji tlenków azotu, jest emisja cząstek stałych, [1, 9, 10, 11, 26, 51]. Za cząstkę stałą emitowaną ze źródeł motoryzacyjnych uważa się nierozpuszczalny węgiel (sadzę) wraz z częścią rozpuszczalną uzyskaną w wyniku reakcji adsorpcji i absorpcji [78]. Dla pojazdów z silnikiem o zapłonie iskrowym problem stanowi duża liczba cząstek stałych o małych wymiarach. Dla pojazdów z silnikiem o zapłonie samoczynnym natomiast problem stanowi masa cząstek stałych. W budowie pojedynczej cząstki wyróżnia się frakcje stałą – zwaną Insol oraz rozpuszczalną SOF. PM Insol składa się z sadzy (głównie w formie zbliżonej do grafitu) oraz w niewielkim stopniu z azotanów, siarczanów, metali oraz wody będącej częścią siarczanów. Frakcja rozpuszczalna stanowiąca część organiczną PM, składa się z zaabsorbowanych węglowodorów pochodzących zarówno z paliwa, jak i oleju silnikowego [77]. Istnieje szereg problemów w szczegółowym określeniu składu frakcyjnego cząstek stałych pochodzenia motoryzacyjnego. Ich skład różni się w zależności od tego, czy pochodzą one ze spalania benzyny w silnikach ZI, czy ze spalania oleju napędowego w silnikach ZS (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Skład frakcyjny cząstki stałej silnika ZS: a) PM2.5, b) PM10 [61]

Należy również podkreślić, że silnik pracuje stochastycznie i nawet w tym samym punkcie pracy tworzone cząsteczki mogą być różne. Budowa cząstek stałych zależy także od miejsca poboru próbki spalin. Im w większej odległości od kolektora wylotowego silnika w układzie wylotowym pobierane są cząstki, tym cechują się większą średnicą aerodynamiczną m. in. na skutek wychładzania się spalin (wykraplanie węglowodorów) czy łączenia się ze sobą w większe frakcje. Istotne jest również, że znaczne różnice w składzie frakcyjnym cząstek stałych występują także pomiędzy cząstkami z tego samego silnika, lecz charakteryzują się różnymi rozmiarami. Obrazowo różnice pomiędzy składem cząstek PM_{2.5} i PM₁₀ przedstawiono na rys. 2.3.

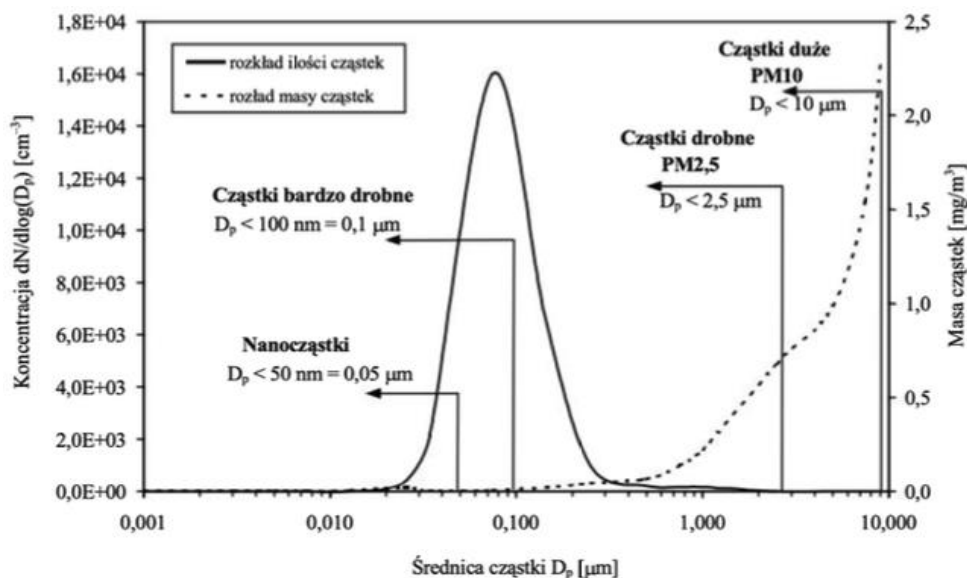


Rys. 2.3. Podglądowy schemat budowy cząstki stałej [61]

Cząstki stałe pochodzące ze spalania paliwa w silnikach spalinowych stanowią tzw. system polidispersyjny. Różnią się one wielkością, kształtem, masą oraz składem chemicznym. Rozkład wymiarowy PM zbliżony jest do rozkładu normalnego, dokładniej ujmując – odpowiada rozkładowi logarytmiczno-normalnemu. Najważniejszym parametrem opisującym cząstkę stałą jest jej wielkość, którą określa się na podstawie średnicy aerodynamicznej oraz tzw. zastępczej średnicy według gęstości. Średnica cząstki stałej (D) jest parametrem, który decyduje o przyporządkowaniu jej do konkretnej kategorii wielkości. Wyróżnić można cząstki duże PM₁₀ ($D < 10 \mu\text{m}$), cząstki drobne PM_{2,5} ($D < 2,5 \mu\text{m}$), cząstki bardzo drobne ($D < 100 \text{nm}$) oraz nanocząstki ($D < 50 \text{nm}$).

Liczba oraz wielkość emitowanych cząstek stałych zależy od różnorodnych czynników, do których zalicza się m.in. sposób wykorzystywania silnika i jego rodzaj. Przykładowo zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa umożliwia zmniejszenie otworów we wtryskiwaczu przy tej samej wtryskiwanej dawce, jednak powoduje, że powstają PM o mniejszych średnicach. To właśnie najmniejsze wielkościowo cząstki stanowią największe zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi, gdyż łatwiej dostają się do układu oddechowego, a następnie krwionośnego człowieka [49]. Wyróżnia się trzy

podstawowe sposoby powstawania cząstek stałych emitowanych wraz z gazami wylotowymi spalinowych jednostek napędowych (rys. 2.4).



Rys. 2.4. Rozkład wielkości cząstek stałych silników ZS [77]

W wyniku mechanizmu akumulacyjnego powstają duże zbiory cząstek stałych o wielkości 0,08-1,0 μm . Najmniejsze wielkościowo PM (zakres średnic 1-80 nm) powstają podczas ochładzania i rozcieńczania gazów wylotowych w momencie wydostawania się do środowiska zewnętrznego. Powstają one według tzw. mechanizmu nukleacyjnego [77]. Największe cząstki stałe (2,5-40 μm) wydostają się do atmosfery wskutek oderwania się ich aglomeratów osiadłych na ścianach układu wylotowego. Cząstki te powstają w trakcie mechanizmu akumulacyjnego, a oderwanie aglomeratów następuje w wyniku przepływu gazów wylotowych [77, 78]. W starszych pojazdach z silnikami ZS, w których układ wylotowy zwykle skierowany był w kierunku nawierzchni, po której poruszałyby się pojazd, cząstki te trafiały na nawierzchnie, a nie były bezpośrednio emitowane do powietrza. Dzisiaj takie ukształtowanie jest w wielu nowych pojazdach z silnikami ZI.

Wśród związków występujących w gazach wylotowych silników spalinowych mogą wystąpić niewielkie ilości amoniaku. Jednym ze źródeł emisji amoniaku jest system selektywnej redukcji katalitycznej (ang. SCR – Selective Catalytic Reduction – selektywna redukcja katalityczna), który stosowany jest do zmniejszenia emisji tlenków azotu. Wykorzystywany w systemie 32,5-procentowy wodny roztwór mocznika, w wyniku hydrolizy, przekształca się w amoniak, który na skutek reakcji z tlenkami azotu powoduje ich rozpad na cząsteczkowy azot i wodę. Niewykorzystany w reakcji amoniak emitowany jest do atmosfery. Z tego powodu w pojazdach z układem SCR celem zmniejszenia jego stężenia w spalinach stosuje się m.in. filtry amoniakalne oraz amoniakalne reaktory katalityczne ASC (ang. Ammonia Slip Catalyst – reaktor nieprzereagowanego amoniaku) [23, 62]. Nowe badania wskazują, że amoniak wytwarza się również w przypadku zastosowania TWC [106]. Jest to także związek,

którego zawartość w spalinach jest limitowana na skutek jego negatywnego wpływu na organizmy żywe.

Inną grupą związków występujących w spalinach silników są tlenki siarki SO_x , wśród których wyróżnia się głównie dwutlenek siarki SO_2 oraz trójtlenek siarki SO_3 . Drugi z wymienionych związków stanowi gaz, który łatwo się rozpuszcza tworząc kwas siarkowy. W momencie gdy dojdzie do rozpuszczenia tlenków siarki w wydzielinach błon śluzowych, dochodzi do ich podrażnienia. Długotrwałe i przewlekłe narażenie na działanie dwutlenku siarki objawia się m.in. katarą oraz podrażnieniem i zapaleniem spojówek. Wdychanie powietrza, w którym stężenie dwutlenku siarki waha się od 0,4 do 0,5 mg/dm³ stanowi zagrożenie dla życia człowieka. Stężenie tlenku siarki (IV) wynoszące (1,4-1,7) mg/dm³ w ciągu 1 godziny może natomiast doprowadzić, bezpośrednio bądź wskutek następstw zatrucia, do śmierci [55]. Ze względu na stosowanie obecnie paliw niskosiarkowych (zawartość siarki poniżej 10 mg/kg paliwa) nie ma problemu emisji tlenków siarki.

Marginalnym składnikiem toksycznym jest ołów (Pb). Dodawanie do paliwa tego pierwiastka pod postacią czteroetylku ołowiu powoduje zwiększenie liczby oktanowej i w efekcie możliwość zwiększenia mocy użytecznej silnika. Obecnie dodawany jest on jedynie do benzyn lotniczych. Jest to jednak toksyczny związek, który w wyniku zatrucia wywołuje u człowieka bóle głowy i nudności. Ostre zatrucie związkiem powoduje niewydolność istotnych organów takich jak wątroba, nerki czy układu nerwowego. Istotny jest fakt, iż obecnie problem emisji tlenków siarki oraz ołowiu ze źródeł motoryzacyjnych niemal nie występuje. Ponieważ obecne paliwo zawiera marginalne ilości tych związków. Ograniczenie to jest zawarte w normach dotyczących ich składu – zamiast eliminować toksyczne związki zapobiega się ich tworzeniu przez oczyszczanie paliw, wpływając na przyczyny ich powstawania.

2.2. Metody homologacji pojazdów klasy PC

Eksploracja spalinowych środków transportu wiązała się zawsze z niekorzystnym wpływem na środowisko naturalne przez emisję spalin do atmosfery. Wraz z rozwojem tych środków wzrastała znajomość negatywnych skutków ich oddziaływania na organizmy żywe. Spowodowało to działania mające na celu redukcję emisji z pojazdów drogowych. W większości państw obecnie funkcjonują regulacje, które bardzo szczegółowo definiują warunki dopuszczenia środków transportu do eksploatacji, określając między innymi metody homologacji, wartości graniczne emisji poszczególnych związków, testy badawcze oraz warunki ich przeprowadzania, a także przebieg realizacji okresowych badań ich stanu technicznego. Za prekursora wprowadzania norm emisji spalin uważa się Stany Zjednoczone Ameryki. Już w roku 1950 w Los Angeles wprowadzono pierwsze akty prawne mające na celu zmniejszenie emisji związków szkodliwych. Pierwsze federalne akty wprowadzono natomiast w latach 1960-1970. Główną przyczyną ich uchwalenia był nasilający się problem coraz częściej i intensywniej występującego smogu [63]. Jako smog rozumie się zanieczyszczenie powietrza powstałe wskutek emisji do atmosfery związków

szkodliwych, takich jak tlenki azotu i siarki, węglowodory oraz cząstki stałe [81]. Problemu wzmożonego występowania smogu natomiast spowodowany był znacznym wzrostem liczby eksploatowanych pojazdów. Wśród przyczyn wprowadzania kolejnych norm można wyróżnić nie tylko troskę o środowisko, ale również kryzys ekonomiczny i wzrost ceny ropy naftowej (przyczyniło się to m.in. do wprowadzania standardów zużycia paliwa). W odniesieniu do państw europejskich kontrolę emisji, przez wprowadzanie prawnych restrykcji, wprowadzono w późniejszym czasie i początkowo dotyczyła bezpieczeństwa eksploatowanych pojazdów drogowych [67]. Jednym z pierwszych rozporządzeń wprowadzonych na terenie Europy była dyrektywa 70/156/EWG z dnia 6 lutego 1970 r., która dotyczyła homologacji pojazdów silnikowych oraz przyczep. Pierwsze akty odnoszące się bezpośrednio do poziomu emisji związków szkodliwych gazów wylotowych silników pojazdów drogowych wprowadzono w 1990 roku i nazwano je Euro z późniejszym oznaczeniem cyfrą arabską dla pojazdów PC i LDV oraz cyfrą rzymską dla pojazdów HDV [12].

Obecnie każda z grup pojazdów posiada odrębne przepisy dotyczące uzyskania homologacji i dopuszczenia silników/pojazdów do sprzedaży. W ramach dysertacji autor skupia się na pojazdach klasy PC. Zgodnie z [100] definiowane są one jako pojazdy samochodowe konstrukcyjnie przeznaczone do przewozu maksymalnie dziewięciu osób wraz z kierowcą oraz ich bagażem. Zgodnie z obowiązującą normą pojazdy te zaliczane są do kategorii pojazdów M_1 [86]. Normom dotyczącym emisji z pojazdów lekkich podlegają również pojazdy należące do kategorii M_2 , N_1 oraz N_2 .

Na terenie Unii Europejskiej w zakresie homologacji pojazdów klasy PC pod względem spełnienia standardów emisyjnych, wprowadzone zostały od 1992 roku normy nazwane Euro. Pierwsza dyrektywa 91/441/EWG, potocznie zwana normą Euro 1, wprowadziła ograniczenie emisji tlenków węgla, sumy węglowodorów oraz tlenków azotu. Dodatkowo, dla pojazdów z silnikami o zapłonie samoczynnym, wspomniana Dyrektywa wprowadzała limit emisji cząstek stałych [18]. W kolejnych normach prawnych poddano ograniczeniom emisyjnym nowe związki oraz zmniejszono limity emisji poszczególnych związków toksycznych. Obowiązująca od 2000 roku norma Euro 3 uszczegółowiła limit emisji tlenków azotu i węglowodorów dla pojazdów z silnikami ZI. Do wprowadzenia tego aktu prawnego limitom emisyjnym podlegała wspomniana wcześniej suma emisji węglowodorów. W przypadku pojazdów o zapłonie samoczynnym, oprócz limitu sumy węglowodorów i tlenków azotu, pomiarom zaczęła podlegać dodatkowo emisja tlenków azotu [16]. Obowiązująca od 2009 roku norma Euro 5 wprowadziła limit emisji masy cząstek stałych dla pojazdów z silnikami iskrowymi, natomiast od roku 2011, wraz z normą Euro 5b obowiązującą dla silników o zapłonie samoczynnym, limity rozszerzono o emisję PN. Wraz z obowiązującą od 2014 roku normą Euro 6, na mocy Rozporządzenia 715/2007 [83], limit ten również zaczął obowiązywać silniki o zapłonie iskrowym. W tabeli 2.1. chronologicznie zestawiono kolejne dyrektywy, które wprowadzono dla pojazdów typu PC w Unii Europejskiej.

Tabela 2.1. Chronologiczne zestawienie poszczególnych norm emisji spalin [107]

Numer dyrektywy	Data wprowadzenia	Nazwa	Opis
Dyrektywa 91/441/EWG	07.1992	Euro 1	Wprowadzenie limitu emisji drogowej tlenku węgla oraz sumy emisji drogowej węglowodorów i tlenków azotu dla pojazdów ZI oraz w przypadku silników ZS dodatkowo limitu emisji drogowej cząstek stałych
Dyrektywa 94/12/WE, Dyrektywa 96/69/WE	01.1996	Euro 2	Zmniejszenie limitów emisji drogowej tlenku węgla oraz sumy emisji drogowej węglowodorów i tlenków azotu dla pojazdów z silnikiem ZI oraz obniżenie emisji cząstek stałych dla pojazdów z silnikiem ZS
Dyrektywa 98/69/WE	01.2000	Euro 3	Dla silników ZI zastąpienie limitu emisji drogowej tlenku węgla oraz sumy emisji drogowej węglowodorów i tlenków azotu osobnymi wartościami, dla silników ZS wprowadzenie dodatkowo limitu emisji tlenków azotu
Dyrektywa 98/69/WE, 2002/80/WE	01.2005	Euro 4	Wprowadzenie limitu emisji cząstek stałych dla silników ZI o wtrysku bezpośrednim
Rozporządzenie 715/2007,	09.2009	Euro 5	Wprowadzanie limitu liczby cząstek stałych dla silników ZS (Euro 5b)
Rozporządzenie 715/2007	09.2014	Euro 6	Wprowadzenie limitu liczby cząstek stałych dla silników ZI

Limity emisji poszczególnych związków gazów wylotowych pojazdów osobowych przedstawiono w tabelach 2.2 i 2.3.

Tabela 2.2. Wartości limitów emisji drogowej poszczególnych związków spalin wprowadzanych w kolejnych normach dla pojazdów wyposażonych w silniki o zapłonie iskrowym [13–18]

Norma Euro	CO [g/km]	HC [g/km]	HC+NO _x [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [#/km ¹¹]
Euro 1	2,72 (3,16)	–	0,97 (1,13)	–	–	–
Euro 2	2,20	–	0,50	–	–	–
Euro 3	2,30	0,20	–	0,15	–	–
Euro 4	1,00	0,10	–	0,08	–	–
Euro 5	1,00	0,10	–	0,06	0,005	–
Euro 6	1,00	0,10	–	0,06	0,005	6x10 ¹¹

Tabela 2.3. Wartości limitów emisji drogowej poszczególnych związków spalin wprowadzanych w kolejnych normach dla pojazdów wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym [13-18]

Norma Euro	CO [g/km]	HC [g/km]	HC+NO _x [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [1/km]
Euro 1	2,72 (3,16)	–	0,97 (1,13)	–	0,14 (0,18)	–
Euro 2 (pojazdy z wtryskiem pośrednim)	1,00	–	0,70	–	0,08	–
Euro 2 (pojazdy z wtryskiem bezpośrednim)	1,00	–	0,90	–	0,10	–
Euro 3	0,64	–	0,56	0,50	0,05	–
Euro 4	0,50	–	0,30	0,25	0,025	–
Euro 5a	0,50	–	0,23	0,18	0,005	–
Euro 5b	0,50	–	0,23	0,18	0,005	6x10 ¹¹
Euro 6	0,50	–	0,17	0,08	0,005	6x10 ¹¹

Wprowadzanie coraz bardziej restrykcyjnych norm emisji spalin przynosi wymierne korzyści. Warto zaznaczyć, że w stosunku do pierwszych wprowadzonych ograniczeń, obecna norma Euro 6 dla silników spalinowych o zapłonie iskrowym ograniczyła emisję tlenku węgla o ponad 63%. Wartość graniczną emisji węglowodorów oraz tlenków azotu zmniejszono kolejno o 50% i 60% (względem normy Euro 3 wprowadzonej w 2000 roku). W przypadku pojazdów o zapłonie samoczynnym limit emisji tlenku węgla zmniejszono o ponad 63%. Wartość graniczną emisji węglowodorów oraz tlenków azotu o ponad 82%, masy cząstek stałych o ponad 96%. Norma Euro 6 zmniejszyła również o 84% limit emisji tlenków azotu, który został wprowadzony w 2005 roku wraz z normą Euro 4. Istotne jest również to, iż norma Euro 6 wyrównuje poziom emisji zarówno masy, jak i liczby cząstek stałych pomiędzy silnikami o zapłonie samoczynnym a silnikami o zapłonie iskrowym [107]. Obecnie obowiązująca norma ulegała modyfikacjom. Kolejne zmiany (jak w przypadku poprzedniej normy Euro 5) oznaczane były literami alfabetu łacińskiego (Euro 6a-d). Aktualizacje normy Euro 6 nie zmieniały wartości granicznych emisji poszczególnych związków szkodliwych, lecz odnosiły się do zmiany i ujednoczenia metody ich pomiaru. Obecnie, od 2021 roku obowiązuje czwarty wariant normy nazywany Euro 6d (UE) 2016/646 [84], zmieniający rozporządzenie (WE) nr 692/2008. Norma ta bezpośrednio odnosi się do emisji dwutlenku węgla i ustanawia limit średniej emisji drogowej dwutlenku węgla na poziomie 95 g/km dla wszystkich produkowanych pojazdów.

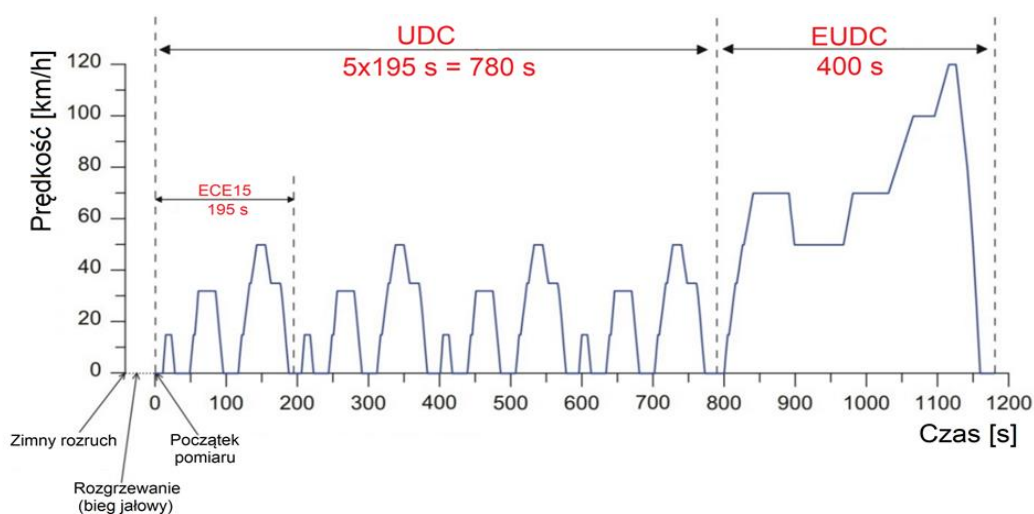
Według informacji Unii Europejskiej w najbliższych latach wprowadzona ma zostać bardziej rygorystyczna norma emisji, która obowiązywać będzie między innymi pojazdy osobowe. Norma ta ma zmniejszyć emisję tlenku węgla do 0,3 g/km oraz tlenków azotu do 0,030 g/km [54].

Wraz ze zmianami limitów emisji związków szkodliwych spalin oraz wprowadzaniem nowszych, kolejnych norm Ustawodawcy uaktualniali testy badawcze, według których określa się emisję związków szkodliwych spalin. Badania homologacyjne przeprowadzane są na rolkowych hamowniach podwoziowych (rys. 2.5). Do obowiązywania normy Euro 3 pomiar emisji odbywał się zgodnie z procedurą ECE15 podzielony na: UDC (ang. UDC – Urban Driving Cycles) i EUDC (ang. Extra Urban Driving Cycle).

Test ECE15 to czterofazowa metoda pomiaru, w której prędkość odpowiadała przejazdowi drogami miejskimi. Po tej części następował pomiar stężenia podczas jazdy z większą prędkością, co miało odpowiadać stylowi jazdy po drogach pozamiejskich. Wprowadzenie w 2000 roku nowego standardu zapoczątkowało zmianę w pomiarze stężenia związków szkodliwych spalin. Dotychczasowy test kontrolny zastąpiono nowym europejskim testem jeźdnym NEDC (rys. 2.6).



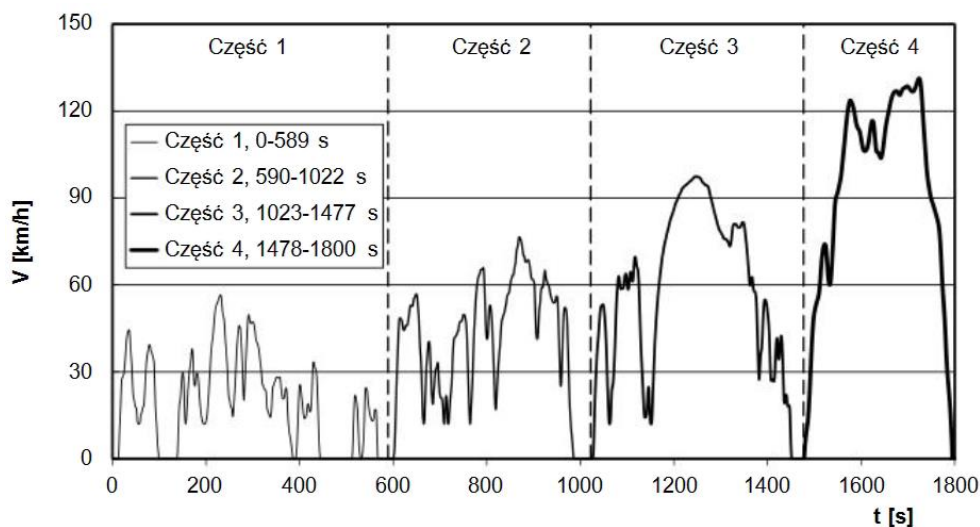
Rys. 2.5. Badanie emisji na hamowni podwoziowej [54]



Rys. 2.6. Przebieg prędkości w teście NEDC [74]

Z założenia nowa procedura miała jednak w bardziej wiarygodny sposób odzwierciedlać styl jazdy w rzeczywistych warunkach. Osiągnięto to między innymi rozpoczynając test od tzw. zimnego rozruchu, czyli stanu, gdzie temperatura całego silnika równa jest temperaturze otoczenia, bez wcześniejszej 40-sekundowej fazy początkowej pracy na biegu jałowym.

Rozwój motoryzacji oraz infrastruktury transportowej wymusił na kierowcach zmianę stylu jazdy. Nowe pojazdy osiągały znacznie większe prędkości. Powszechne stało się wyposażanie samochodów w coraz to większą liczbę nowych systemów oraz elementów wyposażenia, które również wpływały na poziom emisji. Występowały także znaczne różnice w sposobie eksploatacji pojazdów w różnych rejonach globu [54]. Zatem celem ujednoczenia sposobu badania pojazdów lekkich na świecie w 2017 roku w ramach procedury WLTP (ang. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure – Światowa zharmonizowana procedura badania pojazdów lekkich) wprowadzono cykl badawczy WLTC (ang. Worldwide Harmonized Light Vehicles test Cycle – Światowy zharmonizowany cykl testowy lekkich pojazdów). Nowa metoda pomiarowa miała za zadanie między innymi w bardziej rzeczywisty sposób odzwierciedlić emisję związków szkodliwych spalin przez uwzględnienie nowych schematów prowadzenia pojazdu oraz warunków panujących na drogach [64]. Obowiązujący obecnie test składa się z czterech głównych etapów (nazywanych „low”, „medium”, „high” oraz „extra high”), których 52% odwzorowuje jazdę miejską, a 48% jazdę pozamiejską (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Przebieg prędkości w teście WLTC [74]

Ostatnia z faz ma za zadanie symulować jazdę autostradową. W odróżnieniu od NEDC nowa procedura badawcza jest bardziej dynamiczna, przejazd odbywa się z większą wartością przyspieszenia, większą średnią prędkością oraz prędkością maksymalną. Jego czas to 1800 s, przejechany dystans 23262 m, a średnia prędkość 46,6 km/h. Z założenia cykl obejmował różną charakterystykę zmiany przełożenia zależną od homologowanego modelu pojazdu oraz uwzględniał wpływ dodatkowego wyposażenia na wielkość zużycia paliwa. W procedurze zmieniono również wymogi

dotyczące warunków, przy których odbywa się badanie. Przykładowo, podczas homologacji według testu WLTC badanie odbywa się przy temperaturze 23°C (w przypadku NEDC badanie odbywało się w temperaturze wynoszącej 20°C do 30°C).

Wiele publikacji potwierdza, że emisja w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych znacznie odbiega od wartości uzyskiwanych podczas badań laboratoryjnych [57]. Emisja jest zależna od wielu czynników, które bardzo trudno odzwierciedlić na laboratoryjnym stanowisku badawczym. Ze względu na powyższe od 2017 roku w Unii Europejskiej podczas homologacji pojazdu, obok testu na hamowni podwoziowej, przeprowadza się również weryfikację emisji w rzeczywistych warunkach ruchu. Badania te powszechnie są znane pod nazwą RDE (ang. Real Driving Emission – badania w rzeczywistych warunkach ruchu) i przeprowadzane są z wykorzystaniem zaawansowanej mobilnej aparatury zaliczanej do grupy urządzeń PEMS (ang. Portable Emissions Measurement System – mobilny zestaw analizatorów do pomiaru emisji spalin). Badanie RDE umożliwia bliższe rzeczywistości odzwierciedlenie prawdziwej emisji związków szkodliwych, szczególnie dwutlenku węgla oraz tlenków azotu.

Choć z założenia procedura ma za zadanie odzwierciedlić emisję w rzeczywistych warunkach użytkowania pojazdów, obarczona jest szeregiem wytycznych. Rozporządzenie (UE) 2016/427 [85] szczegółowo określa warunki i sposób w jakich należy przeprowadzać test. Badanie składa się z trzech podstawowych etapów: miejskiego (34%), pozamiejskiego (33%) oraz autostradowego (33%). Pomiar powinien trwać od 90 do 120 minut, maksymalna prędkość wynosi 145 km/h. Część miejska powinna zostać przejechana z prędkością do 60 km/h, pozamiejska z prędkością od 60 km/h do 90 km/h, natomiast autostradowa powyżej 90 km/h. Trasa badawcza dobierana jest tak, aby umożliwić przeprowadzenie badania w sposób ciągły, bez przerw; wysokość nad poziomem morza wynosiła do 700 m n.p.m. a temperatura mieściła się w przedziale od 0°C do 30°C. Minimalna długość przejechanych odcinków wynosi 16 km. Konieczne jest, aby trasa badawcza umożliwiła spełnienie wszystkich wytycznych zawartych w dyrektywie. Gdy część warunków (temperatura lub wysokość) nie zostanie spełnionych ustawodawca wyznaczył tzw. warunki rozszerzone. Zestawienie warunków testów laboratoryjnych (NEDC i WLTC) oraz RDE zaprezentowano w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Zestawienie wybranych parametrów testów NEDC, WLTC oraz RDE [21, 78, 85]

Parametr	NEDC	WLTC	RDE
Stanowisko badawcze	Hamownia podwoziowa	Hamownia podwoziowa	Rzeczywiste warunki ruchu
Czas trwania	1180 s	1800 s	5400-7200 s
Dystans	10,931 km	23,27 km	Powyżej 48 km; min. 16 km dla każdej z części
Udział poszczególnych części testu	–	–	miejska: 29%-44% testu pozamiejska: 33% ± 10% testu autostradowa: 33% ± 10% testu

Średnia prędkość	33,6 km/h	46,5 km/h	miejska: do 60 km/h pozamiejska: 60 - 90 km/h autostradowa: pow. 90 km/h (do 110 km/h)
Maksymalna prędkość	120 km/h	131,3 km/h	145 km/h (+15 km/h nie więcej niż 3 minuty)
Liczba postojów	14	9	–
Średnie przyspieszenie	0,506 m/s ²	0,41 m/s ²	–
Maksymalne przyspieszenie	1,04 m/s ²	1,67 m/s ²	–
Udział postojów w całym teście	23,7%	12,6%	–
Udział przyspieszenia	20,9%	43,8%	–
Udział hamowania	15,1%	39,9%	–
Udział jazdy ze stałą prędkością	40,3%	3,7%	–
Temperatura badania	20-30°C	23°C	0-30°C
Sposób rozpoczęcia testu	Zimny rozruch		

3. Specyfikacja techniczna nowoczesnych pojazdów

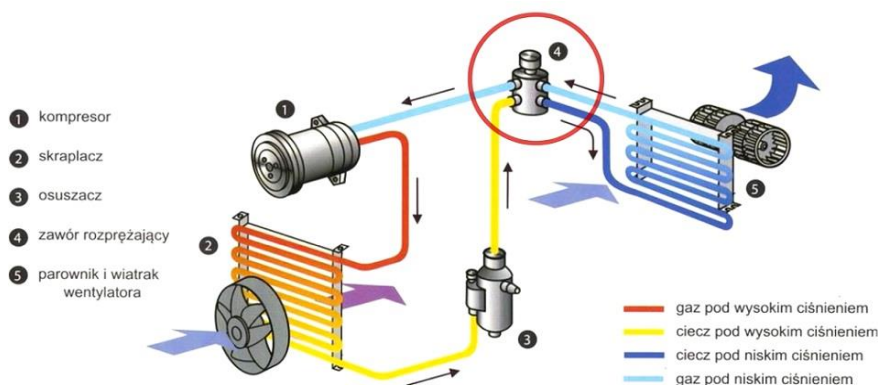
Pojazdy samochodowe są środkiem transportu, bez którego trudno sobie wyobrazić funkcjonowanie dzisiejszego świata. Od początku istnienia pojazdów osobowych dąży się do poprawy bezpieczeństwa ich użytkowania. Obecny rozwój spowodował, że zwiększa się liczba systemów w pojazdach osobowych zwiększających zarówno bezpieczeństwo jak i komfort podróży. Część z nich, która niegdyś była innowacją obecnie staje się standardem wyposażenia. Do najbardziej rozpowszechnionych układów bezpieczeństwa i komfortu należą:

- a) **układy wentylacji, ogrzewania i klimatyzacji,**
- b) **systemy multimedialne,**
- c) **regulowane i podgrzewane fotele,**
- d) **wielofunkcyjna kierownica,**
- e) **układy zawieszenia o zmiennej charakterystyce,**
- f) **szyby atermiczne, izolujące,**
- g) **poduszki powietrzne, pirotechniczne pasy oraz czujniki i wzmocnienia odpowiadające za bezpieczeństwo czynne i bierne,**
- h) **wspomaganie układu kierowniczego,**
- i) **centralny zamek,**
- j) **czujniki ciśnienia w kołach.**

Wymienione systemy nie wyczerpują listy udogodnień stosowanych w pojazdach samochodowych. Stosowanie ich nie tylko zwiększa bezpieczeństwo oraz komfort jazdy, lecz przyczynia się również do znacznego wzrostu masy pojazdu co bezpośrednio przekłada się na zużycie paliwa oraz emisję składników toksycznych. Masa w bezpośredni sposób wpływa na opory ruchu przez zwiększenie bezwładności oraz w mniejszym stopniu, oporów toczenia. Wpływ na opór powietrza mogą mieć także elementy zewnętrzne związane z wersjami stylistycznymi zwykle zwiększające pole powierzchni czołowej pojazdu. Zwłaszcza w pojazdach wyższych segmentów lista ta jest większa. Dopuszczenie pojazdów, często związane z niemal dwukrotnym zwiększeniem ceny zakupu wpływa na ich masę. Silnik w pojeździe poza wytwarzaniem siły napędowej musi zasilić układy znajdujące się na jego wyposażeniu. W pojazdach wzrasta liczba urządzeń komfortu, które zazwyczaj działają elektrycznie. Do przykładów komfortowego wyposażenia pojazdów luksusowych należą np. wentylowane fotele, wielostrefowa klimatyzacja automatyczna, pneumatyczne zawieszenie czy systemy automatycznej jazdy. Aby wszystkie systemy działały prawidłowo, dodatkowa moc musi zostać wytworzona przez alternator, obciążając dodatkowo wał korbowy silnika i wpływając na zużycie paliwa. To z kolei bezpośrednio wiąże się ze zwiększeniem emisji CO₂. Jednakże nie został jeszcze zbadany ich wpływ na emisje pozostałych składników, tym bardziej w pojeździe hybrydowym, gdzie to komputer decyduje o punkcie pracy silnika spalinowego w zakresie prędkości obrotowej oraz obciążenia.

Systemy ogrzewania i klimatyzacji

Istotnymi systemami stosowanymi w pojazdach samochodowych są urządzenia ogrzewania, wentylacji oraz klimatyzacji, tzw. HVAC (ang. Heating, Ventilation and Air Conditioning – systemy ogrzewania, wentylacji oraz klimatyzacji). Ich głównym zadaniem jest kontrola oraz utrzymanie odpowiednich warunków termicznych wewnątrz pojazdu. Warunki te są kluczowe nie tylko ze względu na zapewnienie wygody pasażerów, lecz także bezpieczeństwa przez zachowanie odpowiedniego stanu psycho-fizycznego kierowcy. O ważności problemu świadczy fakt, iż wpływ temperatury na jakość podróży oraz bezpieczeństwo był tematem badań i analiz opisanych m.in. w publikacjach [8, 80]. Dla samochodów odpowiednie warunki cieplne są trudne do osiągnięcia ze względu na początkowe nierównomierne rozłożenie temperatury wewnątrz pojazdu. Ponadto kierowca doświadcza asymetrycznego przenoszenia ciepła, miejscowego i rozproszonego promieniowania słonecznego oraz nierównomiernego rozprzestrzeniania się powietrza wewnątrz kabiny. Czynniki te są istotne w odpowiednim doborze układów grzewczych w pojazdach [6, 7, 40]. Klimatyzacja początkowo była manualnym jednostrefowym systemem. Obecnie bardzo często stanowi zaawansowany, wielostrefowy układ sterowany automatycznie, który po uruchomieniu jest jednym z największych dodatkowych systemów obciążających silnik pojazdu [36]. Głównym zadaniem wspomnianego systemu jest podniesienie komfortu termicznego kierowcy oraz współpasażerów podczas podróży przez odpowiednie uregulowanie temperatury panującej wewnątrz kabiny pojazdu. Powszechnie stosowane układy klimatyzacji są lewobieżnymi, zamkniętymi układami. Pozwalają one na zmianę temperatury przez wykorzystanie termodynamicznych właściwości czynnika roboczego, które umożliwiają wymianę ciepła między wnętrzem kabiny a czynnikiem pracującym. Ze względu na to, substancje te muszą być niskowrzące. Obecnie głównymi substancjami roboczymi w układach klimatyzacyjnych pojazdów są R134a oraz R1234yf [99]. Czynniki chłodnicze, ze względu na możliwość negatywnego oddziaływania na środowisko, przez rozkład ozonu i pogłębianie zjawiska globalnego ocieplenia, zaliczane są do substancji kontrolowanych. Oznacza to, że proces wytwarzania, rozpowszechniania oraz eksploatacji jest ściśle kontrolowany [99]. Na rysunku 3.1 przedstawiono uproszczony schemat klasycznych systemów klimatyzacyjnych.



Rys. 3.1. Schemat układu klimatyzacji stosowanego w pojazdach osobowych [54]

Klimatyzacja powszechnie jest użytkowana w porach letnich, gdy temperatura powietrza jest zbyt wysoka, ale sprawdza się również w miesiącach chłodniejszych, nie tylko do podniesienia temperatury wewnątrz kabiny, ale także do redukcji wilgoci i zapewnienia prawidłowego stanu powietrza wewnątrz kabiny (pozbawionego mikroorganizmów jak bakterie i grzyby oraz cząstek stałych) [28]. Jak podkreślono w artykule [95], wspomniane układy stanowią bardzo istotny system bezpieczeństwa i w szybki sposób umożliwiają pozbycie się wilgoci oraz zapobiegają osiadaniu pary wodnej na szybach wewnątrz pojazdu, poprawiając tym samym widoczność. W tym przypadku klimatyzacja jest znacznie wydajniejsza od standardowego nawiewu, który do usunięcia pary wodnej z szyb potrzebuje znacznie więcej czasu. Użytkowanie systemów klimatyzacyjnych, szczególnie w skrajnych warunkach atmosferycznych, dodatkowo znacznie wpływa na zużycie paliwa w konwencjonalnych pojazdach oraz zasięg w przypadku pojazdów elektrycznych [36]. Dla pojazdów luksusowych systemy klimatyzacji są znacznie bardziej rozbudowane – umożliwiają precyzyjną regulację temperatury oraz nawiewu powietrza w kilku strefach wewnątrz samochodu. Przykładowy sposób funkcjonowania czterostrefowej klimatyzacji przedstawiono na rys. 3.2.



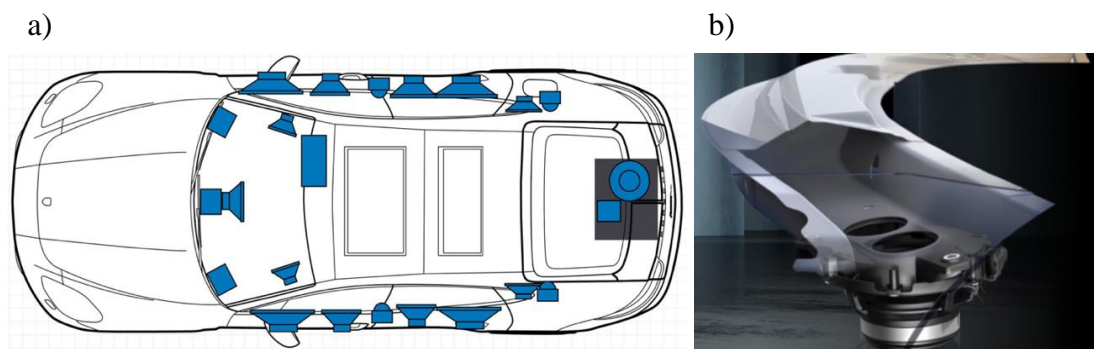
Rys. 3.2. Przykład czterostrefowego układu klimatyzacji [54]

Systemy multimedialne

Systemami poprawiającymi komfort podróży zarówno kierowcy, jak i pasażerów są także systemy multimedialne. Początkowo składały się z radiodbiorników wraz z kilkoma głośnikami montowanymi zazwyczaj w drzwiach pojazdu. Obecnie stanowią zaawansowane systemy umożliwiające zarówno odtwarzanie muzyki z radia bądź internetowych serwisów streamingowych. Coraz częściej standardem w pojazdach są aplikacje bezprzewodowo integrujące systemy multimedialne pojazdu z telefonem komórkowym. Ułatwia to zarówno sterowanie wszelkimi systemami multimedialnymi, jak i odbieranie połączeń telefonicznych z poziomu systemów audiowizualnych pojazdu za pomocą telefonu komórkowego, bądź poleceń głosowych w kilku językach. Systemy te przez integrację z komputerem

podstawowym stają się bardziej zaawansowanymi systemami multimedialno-informacyjnymi.

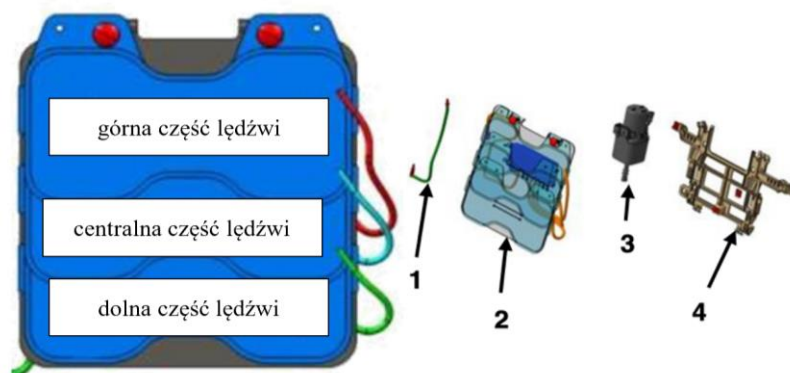
Przy projektowaniu systemów audio w pojazdach producenci spotykają z kilkoma problemami, z których jednym z najważniejszych jest odpowiednie rozmieszczenie źródeł dźwięku. Jak wskazano w publikacji [66], główną cechą systemów audio w pojazdach osobowych jest asymetria źródeł dźwięku – prawe i lewe głośniki znajdują się w różnych odległościach od słuchacza. Istotny problem dodatkowo stanowi dźwięk odbity, który ze względu na budowę kabiny pojazdu szybciej trafia do kierowcy, przyczyniając się do tego, iż obraz dźwiękowy jest bardziej rozmyty i mniej wyraźny. Dla samochodów należących do klasy premium producenci stosują systemy dźwiękowe, które projektowane są pod konkretne modele danej marki. Bardzo często opracowywane są one przy współpracy z czołowymi producentami systemów nagłośnieniowych i obejmują nawet kilkadziesiąt głośników naraz. Umożliwiają one odtwarzanie dźwięku wielokanałowego (tzw. dźwięku przestrzennego) oraz dostosowują akustykę do wnętrza pojazdu, a także aktualnie panującej sytuacji na drodze. Wiele systemów stosowanych w pojazdach luksusowych pozwala na automatyczne bądź manualne sterowanie każdym z zastosowanych głośników. Przykładowe rozwiązania zaawansowanego systemu audio w samochodzie osobowym zaprezentowano na rys. 3.3a. Bardzo zaawansowane oraz rozbudowane systemy dźwiękowe w znaczny sposób mogą zwiększyć masę całego pojazdu i dlatego istotny jest dobór materiałów stosowanych w budowie składowych układów audio. Celem zapewnienia najwyższej jakości dźwięku w pojazdach premium stosowane są głośniki wykonane m.in. z odlewanej ciśnieniowo aluminium oraz z neodymowymi magnesami. Materiały te pozwalają na otrzymanie najwyższej efektywności urządzeń. Wspomniane aluminium wykorzystywane jest również do wytłumiania obszarów membrany [54]. Szerokie zastosowanie pierwiastek ten zawdzięcza między innymi swojej niedużej masie – aluminium zaliczany jest do tzw. metali lekkich, a jego gęstość wynosi około $2,7 \text{ g/cm}^3$ [54, 43]. Producenci pojazdów starają się zmniejszyć masę pojazdów również przez odpowiednie projektowanie systemów nagłośnieniowych. Przykładowo niemiecki producent pojazdów premium – Porsche w swoich produktach stosuje zintegrowany z karoserią głośnik niskotonowy (rys. 3.3b).



Rys. 3.3. Przykładowy system nagłośnienia stosowany w grupie pojazdów premium: a) umiejscowienie głośników w pojeździe, b) zintegrowany niskotonowy głośnik [54]

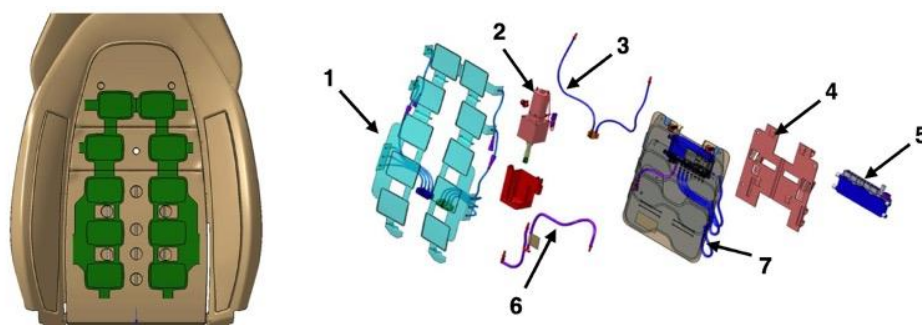
Fotele

Odpowiednio wyprofilowane siedzenia stanowią obowiązkowe wyposażenie każdego z pojazdów. Ergonomiczne siedziska pozwalają zachować kierowcy odpowiednią pozycję w czasie podróży. Ich zadaniem jest również umożliwienie łatwego i komfortowego kierowania pojazdem z łatwym dostępem do wszystkich niezbędnych elementów wyposażenia samochodu. Ze względu na indywidualną budowę oraz preferencje kierowcy standardowe fotele umożliwiają regulację odległości fotela od kierownicy, wysokości siedziska i zagłówka oraz pochylenia oparcia. W pojazdach klasy premium fotele są dużo bardziej rozwinięte. Poza wymienionymi wcześniej parametrami kierowca ma możliwość automatycznej, elektrycznej regulacji fotela w różnych kierunkach – na przykład podparcia odcinka lędźwiowego kręgosłupa bądź długości siedziska i szerokości oparcia fotela. Przykład regulacji odcinka lędźwiowego fotela kierowcy przedstawiono na rys. 3.4.



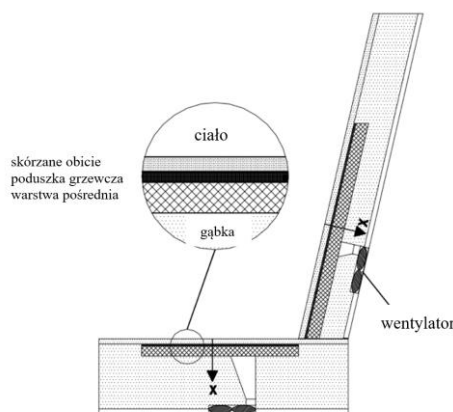
Rys. 3.4. Regulacja elektryczna części lędźwiowej fotela kierowcy (1 – przewód zasilający, 2 – mata lędźwiowa, 3 – pompa, 4 – wspornik) [54].

Układ ten składa się z maty lędźwiowej z blokadą zaworów, pompy i przewodu zasilającego. Celem zapewnienia komfortu pasażerom oraz kierowcy, miejsca siedzące wyposażane są dodatkowo w układy masujące. W konsekwencji tego, fotele składają się ze znacznej liczby komponentów, które w znaczny sposób wpływają na masę całego siedziska [54]. Przykład układu masującego przedstawiono na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Elementy funkcji masażu stosowane w fotelach samochodowych (1 – mata masująca, 2 – pompa, 3 – przewody zasilające, 4 – wsporniki, 5 – blok zaworowy, 6 – przewód zasilający, 7 – mata lędźwiowa) [54]

Istotnym elementem komfortu pojazdu w podróży jest również układ grzania i wentylowania foteli. Jak wykazały symulacje przedstawione w [27], ogrzewanie bądź wentylowanie siedzenia znacznie poprawia komfort termiczny, szczególnie w obszarach styku ciała z miejscem siedzącym. Dzięki temu zwiększa się ogólny komfort termiczny kierowcy bądź pasażerów, co bezpośrednio wpływa na dobre doznania z podróży. Bardzo często zaawansowane fotele w ciepłych miesiącach dostarczają przez wentylację zimne powietrze, w okresach zimowych natomiast są podgrzewane. Podstawowy uniwersalny fotel z siedziskiem ze zintegrowaną matą grzewczą przedstawiono na rysunku 3.6. Technologia ogrzewania fotela oparta jest na przepuszczaniu prądu elektrycznego przez wykonaną z włókien węglowych poduszkę (podkładkę) grzewczą umieszczoną pod zazwyczaj skórzanym pokryciem. Działanie przykładowego rozwiązania jest stosunkowo mało złożone. Zasysane przez niewielkie wentylatory powietrze z otoczenia przepływa przez kolejne warstwy fotela (materiał dystansowy, matę grzewczą, perforowaną skórę), a następnie wchodzi w kontakt z ciałem kierowcy, zwiększając komfort podróży [27].

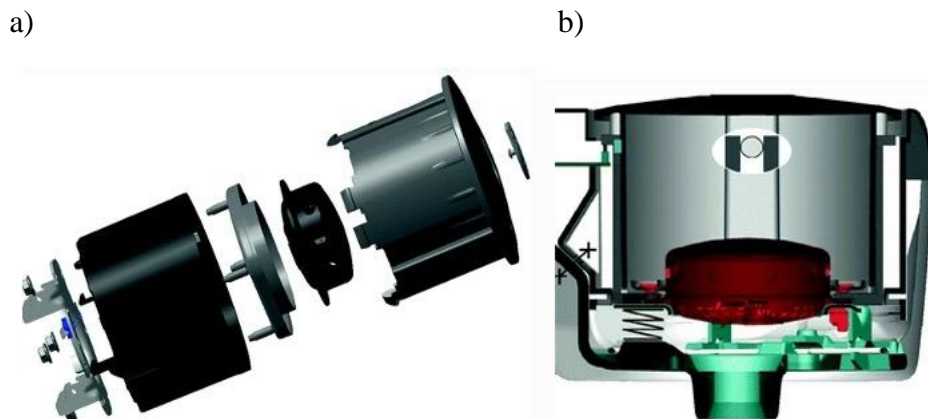


Rys. 3.6. Jeden z przykładów rozwiązania wentylowanego oraz grzanego fotela stosowanego w pojazdach samochodowych [27]

Kierownica

Producenci pojazdów klasy premium oferują użytkownikom bardzo wysoki stopień indywidualizacji wyposażenia pojazdów. Przykładem tego może być kierownica, której głównym zadaniem jest umożliwienie sterowania kierunkiem jazdy oraz zapewnienie bezpieczeństwa kierowcy w sytuacji wypadku, m.in. przez poduszki powietrzne, łamaną kolumnę kierownicy oraz klakson (rys. 3.7). W dużym uproszczeniu – podstawowa wersja kierownicy składała się z korpusu, osłony z funkcją klaksonu oraz poduszki powietrznej (rys. 3.8).

Obecnie kierownice doposażane są w wiele dodatkowych funkcji, dzięki czemu stanowią one centrum umożliwiające sterowanie niemalże każdym systemem pojazdu. Wyposażane są one między innymi w wielofunkcyjne przełączniki (służące do kontrolowania komputera pokładowego, nawigacji czy systemu audio-wizualnego), przełączniki zmiany biegów (przełączniki łopatkowe) bądź w wyświetlacze [103].



Rys. 3.7. Poglądowy schemat budowy: a) systemu poduszki powietrznej, b) klaksonu [103]



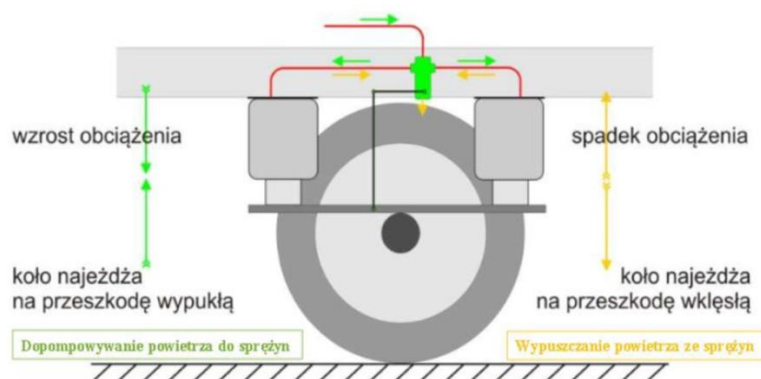
Rys. 3.8. Schemat podstawowej wersji kierownicy pojazdu osobowego [103]

Wśród zestawów doposażenia kierownicy, zwiększających komfort korzystania z pojazdów osobowych szczególnie w okresie zimowym, jest system jej podgrzewania. Ze względu na bezpośrednie oraz wyłączone oddziaływanie na kierowcę, system ten jest rodzajem osobistego zarządzania termicznego. W warunkach zimowych, przy niskiej temperaturze powietrza, system pozwala osiągnąć odpowiednie odczucie ciepłe dłoni [31]. Bezpośrednio przyczynia się to do zwiększenia komfortu kierowania pojazdem. Pośrednio natomiast może przyczynić się do wzrostu bezpieczeństwa na drogach. Obecnie stosowane metody pozwalają zwiększyć temperaturę kierownicy w niespełną minutę. Rozwiązania technologiczne stosowane w grzanych kierownicach są zbliżone do tych stosowanych w fotelach. W ich konstrukcji również stosuje się maty grzewcze, których temperatura zwiększa się na skutek przepływu prądu dostarczanego z instalacji elektrycznej samochodu.

Układ zawieszenia

Zawieszenie pojazdu jest układem współpracujących ze sobą elementów (sprężystych, tłumiących oraz prowadzących), których zadaniem jest przeniesienie sił występujących pomiędzy kołem a nadwoziem pojazdu, zmniejszając tym samym obciążenia dynamiczne działające na samochód podczas jazdy. Ze względu na to, zawieszenie bezpośrednio wpływa na komfort odczuwany w czasie użytkowania

samochodu [22]. Nieodpowiednia wartość drgań działająca na pasażera bądź kierowcę może być przyczyną nasilenia się objawów choroby lokomocyjnej [65]. Zbyt duża częstotliwość drgań (od 3 Hz do 10 Hz) negatywnie wpływa na stan psychofizyczny człowieka, powodując jego rozdrażnienie, rozproszenie uwagi. Drgania o niskiej częstotliwości (około 0,5 Hz) mogą natomiast powodować wystąpienie mdłości oraz zawrotów głowy zwanych potocznie chorobą morską [22]. Konstrukcje zawieszenia różnią się od siebie i są nieustannie rozwijane celem poprawy komfortu oraz bezpieczeństwa między innymi przez utrzymanie odpowiedniej trójki jazdy pojazdu. Jednym z głównych rodzajów zawieszenia stosowanych w pojazdach luksusowych jest zawieszenie pneumatyczne, w którym środkiem roboczym jest gaz (zazwyczaj sprężony azot) [76]. Zawieszenia pneumatyczne zapewnia odpowiednie parametry trakcyjne pojazdu oraz skutecznie tłumi drgania. Ten typ zawieszenia zapewnia stały prześwit pojazdu, przez który rozumie się odległość między najniższym położonym elementem maksymalnie obciążonego pojazdu a poziomem podłoża. Umożliwia ono również automatyczne poziomowanie pojazdu [22, 96]. W pojazdach, szczególnie wyższej klasy, sprawdza się również tzw. zawieszenie adaptacyjne, które umożliwia zmianę konfiguracji zawieszenia w zależności od warunków technicznych drogi bądź wybranego stylu jazdy. Takie działanie możliwe jest dzięki zastosowaniu amortyzatorów o zmiennej sile tłumienia. Schematyczne działanie elementu tłumiącego drgania w zawieszeniu przedstawiono na rys 3.9.



Rys. 3.9. Schematyczne przedstawienie gumowego elementu tłumiącego stosowanego w zawieszeniach pneumatycznych [35]

W zależności od warunków adaptacyjne rozwiązanie pneumatyczne może zapewnić elastyczne zawieszenie poprawiające komfort jazdy bądź zawieszenie sztywne przyczyniające się do poprawy prowadzenia pojazdu. Jak wskazano w [69], możliwe jest bardzo szybkie przełączanie się między wspomnianymi konfiguracjami zawieszenia. Istnieją dwa podstawowe, teoretyczne rozwiązania aktywnych układów zawieszenia. Pierwszy – zgodny z ideą „sky-hook” zakłada, że element tłumiący umieszczony jest pomiędzy nieruchomym układem odniesienia a nadwoziem pojazdu. W drugim rozwiązaniu sterowanie odbywa się według teorii zwanej „ground-hook”, w której fikcyjny element tłumiący znajduje się między abstrakcyjnym punktem na ziemi a kołem pojazdu. W porównaniu do pierwszego konceptu, rozwiązanie „ground-

hook” znacznie bardziej poprawia bezpieczeństwo jazdy kosztem mniejszego tłumienia drgań, co bezpośrednio wpływa na komfort użytkownika samochodu [35].

Jednym z bardziej zaawansowanych technicznie rozwiązań stosowanych w pojazdach osobowych jest zawieszenie elektromagnetyczne. Elementem tłumiącym drgania w tym przypadku jest tak zwana kolumna elektromagnetyczna składająca się ze stałych magnesów oraz owiniętych wokół rdzenia cewek. Przepływ prądu przez cewki przyczynia się do przesunięcia się rdzenia, co w konsekwencji powoduje powstanie siły, której zadaniem jest tłumienie drgań powstałych wskutek jazdy po nierównościach. Kolumnę elektromagnetyczną przedstawiono na rys. 3.10.



Rys. 3.10. Kolumna elektromagnetyczna przedniej osi pojazdu [35]

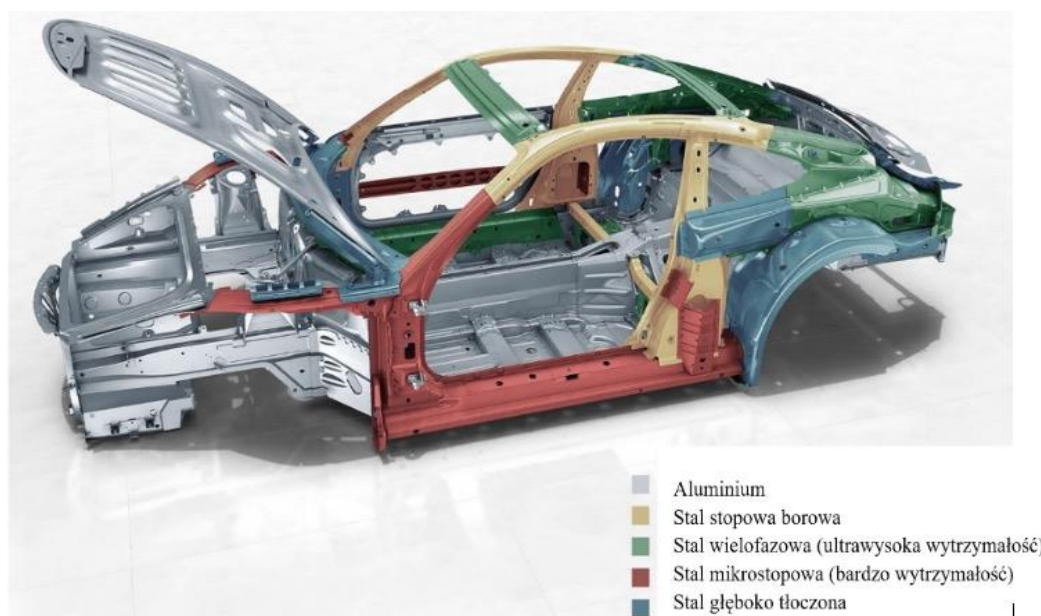
Element ten umieszczany jest przy każdym z kół pojazdu. Rozwiązanie elektromagnetyczne zapewnia bardzo dobre tłumienie drgań, dzięki czemu zwiększa się komfort podróży. Technologia ta powoduje jednak zwiększenie zapotrzebowania na moc oraz jest stosunkowo kosztowna w produkcji [35].

Nadwozie

Istotny wpływ na masę pojazdu, poza wyżej omówionymi systemami i układami, ma dobór poszczególnych materiałów nadwozia. Jak zdefiniowano w [72], nadwozie stanowi zewnętrzną obudowę pojazdu, w skład której wchodzi przestrzeń z miejscem dla kierowcy oraz do przewozu pasażerów bądź ładunków. Jego konstrukcja ma zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo jazdy. Odpowiednia budowa struktury nośnej pojazdu oraz zastosowane materiały nie tylko zapewniają komfort podróżnym, ale przede wszystkim zwiększają ich bezpieczeństwo w trakcie wypadku. Ze względu na to, konstrukcja nadwozia powinna być skonstruowana w taki sposób, aby konkretne jej części były sztywne oraz nieodkształcalne bądź energochłonne, by podczas wypadku pochłaniały jak najwięcej energii [38, 72].

Odpowiednią sztywność oraz właściwości nośne nadwozi zapewniają elementy blaszane o właściwym kształcie, wykonane z materiałów o stosowanych własnościach. Elementami nadwozi, które wymagają szczególnego usztywnienia są miejsca łączenia elementów podwozia z nadwoziem oraz szkielet dachu. Głównym materiałem

wykorzystywanym w produkcji nadwozia jest tłoczona stalowa blacha, której poszczególne elementy łączy się za pomocą spawów [72]. Zastosowanie w produkcji znalazły także stop aluminium (głównie aluminium wzbogacone o pierwiastki takie jak miedź, mangan, krzem, cynk), stop magnezu (będący jednym z najłżejszych konstrukcyjnych stopów), wzmocniona stal oraz tworzywa kompozytowe [20, 24, 50, 68, 114]. Materiały te są wykorzystywane ze względu na stosunkowo wysoką sztywność, zdolność do pochłaniania energii uderzenia bądź małą masę co pozwala zmniejszyć ogólną masę pojazdu [91]. Rodzaj użytego materiału odgrywa kluczową rolę w zmniejszaniu masy pojazdu. Jak wypunktowano w artykule [50], celem zmniejszenia masy pojazdu dużo skuteczniejsza jest wymiana materiałów na lżejsze niż modyfikacja samej konstrukcji nadwozia. Potwierdzają to również badania opisane między innymi w publikacjach [48, 52, 114]. Wykorzystanie materiałów różnej wytrzymałości i sztywności w konstrukcji nadwozia przedstawiono na rys. 3.11.



Rys. 3.11. Materiały wykorzystywane w budowie poszczególnych elementów nadwozia pojazdu osobowego [54]

Aluminium, cechujące się stosunkowo małą sztywnością, wykorzystywane jest w konstrukcji podłogi oraz strefie zgniotu, której odpowiednia struktura umożliwia pochłonięcie energii wynikającej ze zderzenia i przekształcenie jej na odkształcenia plastyczne. Stal wzmocniona stosowana jest do produkcji między innymi progów drzwi oraz słupka A pojazdów. Najbardziej wytrzymała, głęboko tłoczona stal wykorzystywana jest w budowie nadkola tylnego oraz wzmocnienia porzecznego podszycia. Powyżej opisane systemy oraz układy są kluczowe w prawidłowym funkcjonowaniu pojazdu, zapewniają bezpieczeństwo eksploatacji oraz zwiększają komfort podróżowania. Obecnie pojazdy premium wyposażane są w dodatkowe udogodnienia zgodnie z wymaganiem klienta. Przykładem tego są między innymi okna dachowe, które dostarczają więcej naturalnego światła do wnętrza pojazdu oraz (w przypadku szyberdachu) ułatwiają wentylację pojazdu. Rozwiązanie to zmniejsza

jednak wysokość kabiny pasażerskiej, a także zwiększa masę własną pojazdu. Ponadto jazda z otwartym oknem dachowym wiąże się ze wzmożonym hałasem, powstającym wskutek przepływu powietrza i tworzenia jego zawirowań. Utrudnia to znacznie kontrolę hałasu w kabinie pojazdu. Stosowane okna dachowe otwierane i zamykane są w sposób zautomatyzowany, stąd ważna jest również kwestia sterowania. [32, 42, 71]. Układy w postaci siłowników również przyczyniają się do wzrostu masy całego pojazdu.

Szyby

Istotny ze względów bezpieczeństwa oraz komfortu korzystania z pojazdów jest również rodzaj zastosowanych szyb. Na przednie okna powszechnie stosowane są dwa rodzaje szkła. Szyby laminowane, których konstrukcja zapewnia bezpieczeństwo w sytuacji wypadku, tworzy się z dwóch lub więcej warstw szkła, które nie są wstępnie naprężone. Te szklane tafle są sklejone ze sobą za pomocą warstw plastiku pomiędzy nimi. W przypadku pęknięcia tego typu szyby powstają pęknięcia przypominające kształtem pajęczynę, pozostawiając dużą część pola widzenia nienaruszoną. Większość drobnych uszkodzeń, takie jak te spowodowane odpryskami kamieni, można naprawić bez wpływu na wytrzymałość całego elementu.

Drugi rodzaj szkła stosowany w pojazdach to szyby bezpieczne jednotaflowe. Ten rodzaj szyb stosowany jest do szyb bocznych i czasami do szyb tylnych. W trakcie produkcji szkło jest w dużym stopniu naprężane przez szybkie chłodzenie. W przypadku pęknięcia tego typu szkła powstają odłamki o tępych krawędziach. Cała powierzchnia szkła ulega rozbiciu, co sprawia, że nie nadaje się ono do oszklenia przedniej szyby, ponieważ rozbicie mogłoby poważnie pogorszyć widoczność kierowcy, a w razie wypadku odłamki szkła wpadające z dużą prędkością do pojazdu mogłyby zranić jego pasażerów [45, 105]. Szkło ma jednak szereg wad, w związku z czym szyby stosowane w pojazdach posiadają szereg własności dodanych. Mają one za zadanie głównie zwiększyć bezpieczeństwo korzystania z pojazdów w trudnych warunkach atmosferycznych. Zastosowanie w produkcji okien w pojazdach znalazły m.in. szyby akustyczne (potrafiące tłumić hałasy do 10 dB przez nałożenie warstwy folii akustycznej), szyby pochłaniające (objające bądź absorbujące promieniowanie słoneczne), szyby hydrofobowe (pokryte powłoką hydrofobową), szyby antyodblaskowe (pokryte antyrefleksową powłoką redukującą do 40% odbłasków przy kącie nachylenia wynoszącym 60°), szyby elektrochromowe (umożliwiające rozjaśnianie lub przyciemnianie warstwy szkła w zależności od natężenia światła), bądź antywłamaniowe. Modyfikacją szyb ze względu na komfort jazdy są systemy wyświetlacza HUD (ang. Head-Up Display), który umożliwia wyświetlanie informacji (m.in. prędkości pojazdu, nawigacji itp.) przed kierowcą; coraz częściej jest on spotykany w pojazdach średniej klasy [101]. Przykładową szybę z wyświetlaczem HUD przedstawiono na rysunku 3.12. Dodatkowo, jak wykazano w badaniach [90] stosowanie w pojazdach odpowiednio zaprojektowanych wyświetlaczy typu head-up zwiększa nie tylko komfort jazdy, ale również przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa.



Rys. 3.12. Przykład wyświetlacza typu head-up w pojazdach osobowych [90]

Podsumowanie

Stosowane w pojazdach układy i systemy mają za zadanie zwiększyć bezpieczeństwo jazdy oraz komfort podróży. Obecne pojazdy, szczególnie te najwyższej klasy, wyposażane są w szereg innowacyjnych rozwiązań, które potęgują pozytywne odczucia z użytkowania pojazdu. Rozwój techniki spowodował, iż są one coraz bardziej złożone. Obecnie wiele systemów posiada szereg komponentów, których zadaniem jest zapewnienie poprawności funkcjonowania. Wiele z układów cechuje mnogość elementów składowych, skomplikowana budowa lub konieczność stosowania konkretnych materiałów, co bezpośrednio wpływa na zwiększenia masy samochodu, zużycie energii oraz w konsekwencji większą emisję związków szkodliwych do atmosfery, a także zużycie paliwa [112]. W tabeli 3.5. przedstawiono porównanie wpływu wybranych układów bezpieczeństwa i komfortu na zwiększenie masy samochodu oraz zużycie energii.

Tabela 3.5. Porównanie wpływu wybranych układów bezpieczeństwa i komfortu na masę pojazdu oraz zużycie energii (im ciemniejsza barwa, tym istotniejsze zwiększenie masy lub zużycia energii)

Nazwa układu	Istotne zwiększenie:	
	masy	zużycia energii
ogrzewane, wentylowane fotele z masażem		
ogrzewane, elektryczne, fotochromatyczne lusterka		
zaawansowane systemy audio		
czterostrefowa automatyczna klimatyzacja		
podgrzewana, wielofunkcyjna kierownica		
dach panoramiczny		
aktywny układ wylotowy		
aktywny tempomat		
utrzymanie pasa ruchu		

asystent martwego pola		
elektryczne, dźwiękochłonne szyby		
system automatycznego hamowania		
czujniki parkowania wraz z asystentem, kamery 360 stopni		
lampy matrycowe oparte o technologie LED/laserową		
asystent jazdy z przyczepą		
ekrany zamiast tablicy zegarów		
tablety dla pasażerów		

Dodatkowe systemy wpływają w znacznym stopniu na masę pojazdu, która już w standardzie, w pojazdach premium może być znaczna m in. przez stosowanie silników spalinowych o znacznej objętości skokowej, których masa też musi być zwiększona. Mnogość systemów, może powodować przyrost masy o około 100 kg, ale przede wszystkim znaczne zwiększenie zapotrzebowania na energie elektryczną. Największa chwilowa moc odbiorników przypada na zmianę temperatury wnętrza, odpowiednio chłodząc je lub ogrzewając.

4. Cel i zakres pracy

Rozwój pojazdów obserwowany w ostatnich latach jest ukierunkowany na ograniczenie emisji związków toksycznych spalin i zużycie paliwa. Rozwój technologii oraz konkurencja na rynku motoryzacyjnym, szczególnie w segmencie pojazdów należących do grupy PC sprawiły, że współczesne pojazdy są wyposażone w liczne systemy poprawiające komfort i bezpieczeństwo. Jest oczywiste, że układy te zwiększają energochłonność pojazdów, poprzez swoje działanie oraz zwiększając masę pojazdu. Zużycie paliwa wynikające z działania wspomnianych systemów jest zależne od szeregu czynników, m.in. rodzaju pojazdu i jego wyposażenia, warunków otoczenia, warunków ruchu na drodze. Jak wykazano wyżej, w poprzednich rozdziałach pracy, wpływ zastosowania systemów komfortu i bezpieczeństwa na zużycie paliwa i emisję związków toksycznych spalin nie jest jednoznacznie opisany w literaturze. Należy podkreślić, że szczególnie brakuje informacji odnośnie wspomnianych zależności w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów, w ruchu drogowym. Współczesna aparatura pomiarowa typu PEMS daje duże możliwości pomiarowe odnośnie wyznaczenia zużycia paliwa i emisji związków toksycznych w zależności od różnych czynników, w tym także zastosowania systemów komfortu i bezpieczeństwa w pojazdach. Uwzględniając powyższe, w niniejszej rozprawie podjęto temat określenia wpływu zastosowania systemów i układów komfortu oraz bezpieczeństwa na zużycie paliwa i emisję związków toksycznych spalin, z wykorzystaniem różnych metod badawczych, laboratoryjnych i w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Zdaniem Autora, zależności te nie są wystarczająco opisane w literaturze światowej, a ich ustalenie będzie cennym uzupełnieniem wiedzy.

Przeprowadzone studium literatury oraz doświadczenia własne autora pozwalały na sformułowanie następującego celu pracy:

Ocena zastosowania systemów bezpieczeństwa i komfortu na zużycie paliwa i emisję związków toksycznych spalin pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Osiągnięcie celu pracy wymagało przeprowadzenia badań literaturowych oraz eksperymentalnych, które opisano w ośmiu rozdziałach dysertacji, a zakres pracy schematycznie przedstawiono na rysunku 4.1.

Rozdział pierwszy to wprowadzenie, opis genezy tematu i problemu naukowego. Uzasadnienie podjęcia tematu pracy wynika m.in. z tendencji rozwoju środków transportu, co opisano we wstępie, ponadto scharakteryzowano wpływ środków transportu na stan środowiska naturalnego. Negatywne oddziaływanie pojazdów na środowisko naturalne jest kolejnym czynnikiem motywującym do podjęcia tematu pracy. W rozdziale tym przedstawiono także metody pomiarów emisji związków szkodliwych spalin oraz wartości dopuszczalne dla poszczególnych składników toksycznych. Wykazano, że przepisy nie uwzględniają w pełni specyfikacji pojazdu, jego wyposażenia, co może mieć istotny wpływ na poziom emisji związków toksycznych i zużycie paliwa. Uzupełnieniem wprowadzenia jest opis przyczyn powstawania związków toksycznych spalin.

W kolejnym rozdziale opisano systemy i układy komfortu oraz bezpieczeństwa, które są stosowane we współczesnych pojazdach. Opis ten jest ukierunkowany głównie na samochody klasy premium, to właśnie ta grupa pojazdów zwykle posiada największą liczbę układów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i komfort pasażerów. To jest również grupa pojazdów, które były przedmiotem badań wykonanych w ramach niniejszej pracy.

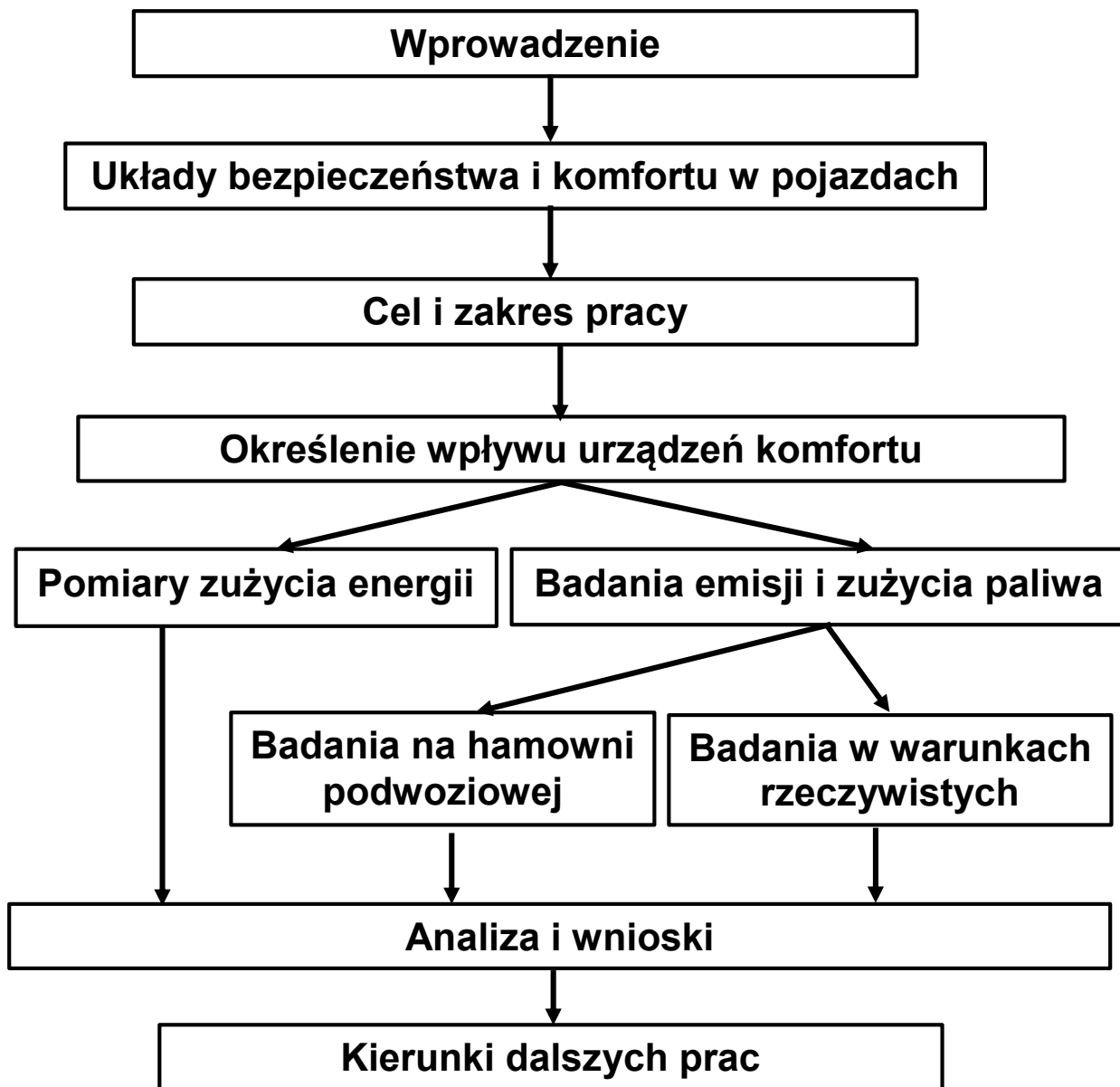
Osiągnięcie sformułowanego celu pracy wymagało przeprowadzenia badań eksperymentalnych, które są opisane w kolejnych rozdziałach. Rozdział piąty to opis badań zapotrzebowania energetycznego układów pojazdu. Opisano metodykę pomiarów, obiekty badawcze, aparaturę wykorzystaną do pomiarów oraz warunki przeprowadzenia pomiarów. Rozdział zawiera także wyniki pomiarów i ich analizę, wyznaczone moce wybranych układów i systemów pojazdu.

W kolejnym rozdziale, szóstym, opisano badania emisji związków szkodliwych spalin wykonywane w warunkach laboratoryjnych na hamowni podwoziowej. Badania te nawiązują wprost do sformułowanego celu pracy. Opisano metodykę badań, obiekty, aparaturę i warunki pomiarów. Badania obejmowały związki gazowe spalin oraz liczbę cząstek stałych. Uzyskane wyniki i ich analiza potwierdziły, że zastosowanie systemów i układów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i komfort znacznie wpływa na emisję związków toksycznych oraz zużycie paliwa. Należy podkreślić, że wyniki badań opisane w niniejszym rozdziale świadczą o osiągnięciu sformułowanego celu pracy, natomiast zgodnie z najnowszymi wymogami, w kolejnym etapie postanowiono przeprowadzić także badania mające na celu ustalenie wpływu zastosowania układów komfortu i bezpieczeństwa na emisję związków szkodliwych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów, co opisano w kolejnym rozdziale.

Analiza emisji związków toksycznych i zużycia paliwa w warunkach rzeczywistej eksploatacji opisana została w rozdziale siódmym. Podobnie jak w poprzednich rozdziałach dotyczących badań eksperymentalnych, struktura rozdziału siódmego to metodyka badań, następnie wyniki badań i ich analiza. Pomiary przeprowadzono zgodnie z wytycznymi procedury RDE. W analizie wyników badań uwzględniono natężenie emisji poszczególnych związków, a ich analizę przeprowadzono jako funkcję czasu oraz parametrów ruchu pojazdu, prędkości i przyspieszenia. Ważną częścią tego rozdziału jest analiza emisji drogowej, którą przedstawiono jako wartości względne. Wyniki badań opisane w tym rozdziale potwierdzają osiągnięcie celu pracy. Należy podkreślić zatem, że cel pracy został osiągnięty potwierdzono, że zastosowanie układów komfortu i bezpieczeństwa wpływa na emisję związków toksycznych i zużycie paliwa. Przyjęty w pracy program badań jest kompletny, obejmuje zarówno badania laboratoryjne, jak i badania w rzeczywistych warunkach eksploatacji pojazdów, a uzyskane wyniki są jednoznaczne i świadczą o osiągnięciu celu pracy.

Ostatnia część merytoryczna pracy to sformułowane wnioski, które podzielono na ogólne, szczegółowe i prognostyczne. Wnioski ogólne nawiązują do sformułowanego celu pracy i problemu naukowego, którego dotyczy dysertacja. Natomiast, wnioski szczegółowe odnoszą się wprost do uzyskanych wyników badań

i objaśniają uzyskane zależności. Wnioski prognostyczne świadczą o konieczności kontynuowania prac naukowych w zakresie podjętego problemu i definiują dalsze kierunki badań. Schemat realizacji pracy przedstawiono na rys. 4.1.



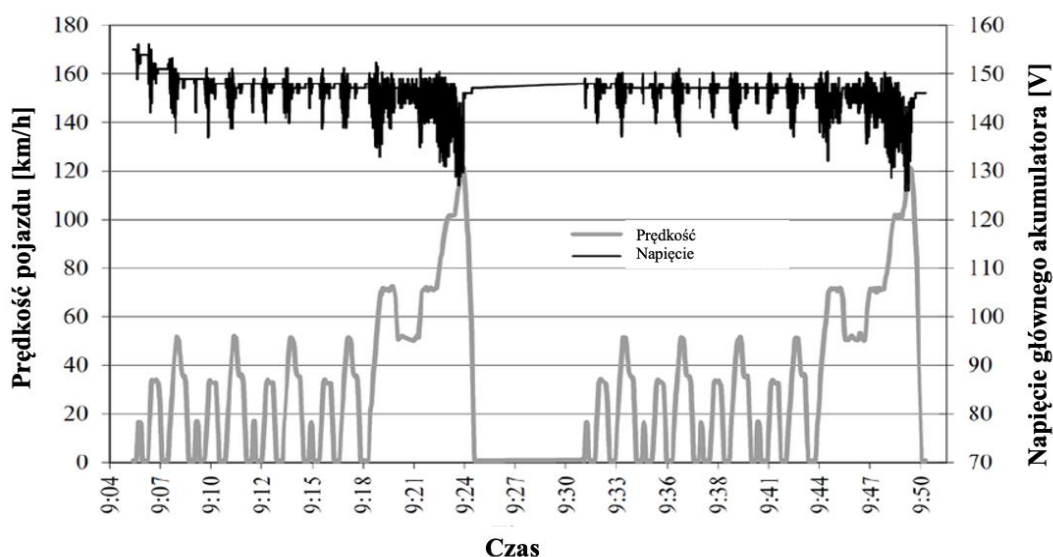
Rys. 4.1. Koncepcja realizacji celu naukowego

5. Zapotrzebowanie energetyczne układów pojazdu

5.1. Wprowadzenie

Każdy z omówionych w rozdziale 3 układów zasilany jest w sposób elektryczny. Pierwotnie prądnica odpowiadała za wytwarzanie energii potrzebnej do działania systemów pomocniczych silnika. Obecnie za produkcję energii elektrycznej w pojeździe odpowiada alternator, który jest bezpośrednio, mechanicznie połączony z wałem korbowym silnika, przez co generuje zwiększony opór dla silnika. Jego działanie powoduje więc zwiększenie zużycia paliwa. Wytwarzany prąd trafia do akumulatora elektrochemicznego, który zasila urządzenia znajdujące się w pojeździe oraz osprzęt silnika.

Akumulator już od dawna nie jest wykorzystywany jedynie do rozruchu silnika spalinowego. Analizując rynek (rys. 5.1), można zauważyć wyraźne zwiększenie pojemności i mocy maksymalnych stosowanych akumulatorów, a także postęp w technologii ich wytwarzania. W niektórych pojazdach osobowych stosowanych jest kilka akumulatorów, zwykle o różnej wielkości [53, 54, 88]. Związane jest to z rozpowszechnieniem systemów start-stop i koniecznością zwiększenia częstotliwości rozruchów silnika, a także stosowania układów mikrohybrydowych, które podczas procesu hamowania silnikiem przez alternator odzyskują część energii zużytej do rozpędzania pojazdu. Analizując wykres napięcia akumulatora w zależności od czasu podczas poruszania się nowoczesnego pojazdu, zauważa się, że występuje znacznie większa zmienność wartości, niż w starszych konstrukcjach silników spalinowych (rys. 5.1) [102]. W ramach tego rozdziału przedstawione zostały pomiary natężenia prądu poszczególnych systemów bezpieczeństwa i komfortu w pojazdach klasy PC.



Rys 5.1. Zależność napięcia akumulatora od czasu w nowoczesnym pojeździe podczas przejazdu cyklu NEDC [102]

5.2. Metodyka pomiarów

Do pomiarów wybrano 3 pojazdy klasy premium, które posiadały liczne systemy komfortu. Był to pojazdy segmentu E z silnikiem ZS (zwany dalej limuzyną ZS) oraz dwa pojazdy typu SUV, jeden z silnikiem ZI (nazwany SUV ZI), a drugi z silnikiem ZS (oznaczony jako SUV ZS). Wszystkie posiadały elektrochemiczne akumulatory rozruchowe (rys. 5.2).



Rys. 5.2 Widok pojazdów poddanych badaniom zużycia energii elektrycznej: a) limuzyna ZS, b) SUV ZI, c) SUV ZS

Pomiary zostały przeprowadzone za pomocą miernika prądowego wraz z cęgami prądowymi, podłączonego w pobliżu akumulatora elektrochemicznego. Jego dane techniczne zawarto w tab. 5.1.

Tabela 5.1. Dane techniczne wykorzystanego miernika

Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy napięcia [V]	0,1-1000
Zakres pomiarowy natężenia [A]	0,1-1500
Zakres pomiaru rezystancji [kΩ]	0,1-100
Zakres pomiarowy częstotliwości [kHz]	5-20
Opór wewnętrzny DC i AC [MΩ]	10
Dokładność podstawowa (+/-)	1%
Zakres częstotliwości	5 Hz-2 kHz

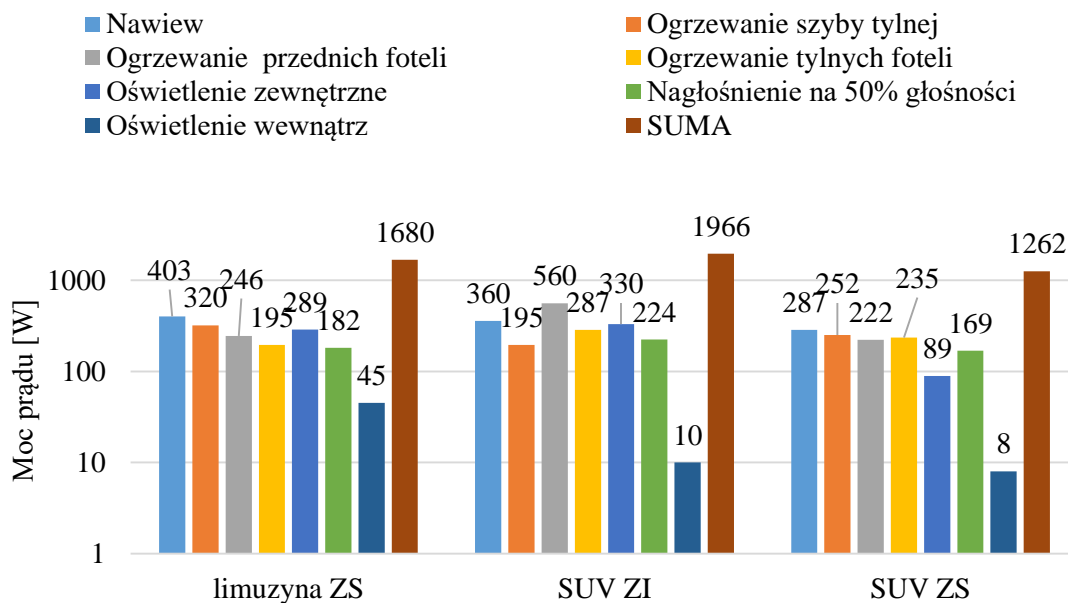
Pomiar oparto na wykorzystaniu cęgów prądowych, które umożliwiają pomiar natężenia prądu przez pomiar pola magnetycznego (rys. 5.3). Jego wartość jest wprost zależna od ilości przepływających ładunków w czasie i w efekcie możliwe jest określenie natężenia prądu. Na potrzeby badań zostały zdemontowane osłony akumulatorów, gdyż te, ze względu na rozkład masy, znajdowały się w tylnych częściach badanych obiektów. Pobieraną moc prądu przez dany element uzyskano jako iloczyn monitorowanego napięcia akumulatora i zmierzonego natężenia prądu.



Rys. 5.3. Sposób przeprowadzania pomiarów zużycia prądu w pojeździe SUV ZS

5.3. Pomiary i analiza poboru energii przez systemy pojazdów

W ramach badania wykonano pomiary poszczególnych układów. Wartości natężenia prądu elektrycznego przeliczono na chwilową moc prądu i wyrażono w watach. W stosunku do pierwotnych założeń pomiarów wyniki musiały zostać uproszczone do kilku systemów (rys. 5.4).



Rys. 5.4. Graficzne przedstawienie zużycia energii w badanych pojazdach w zależności od systemu

Było to spowodowane brakiem możliwości wyodrębnienia jedynie jednego systemu na postoju. Nie uruchamiano jednostki napędowej, gdyż powodowało to znaczne wahania odczytów chwilowego napięcia w układzie na skutek działania silnika spalinowego i ładowania akumulatora przez alternator.

Wykonane pomiary we wszystkich analizowanych przypadkach wykazały zbliżone wyniki. Najmniejszą wartość chwilowej mocy wykazało oświetlenie wewnętrzne, które w pojazdach SUV nie przekroczyło wartości 10 W, a dla limuzyny ZS było to 45 W, ze względu na zwiększoną liczbę i rodzaj zastosowanych źródeł światła. Tak małe wartości wynikają z zastosowania diod LED, co jest standardem w obecnie produkowanych pojazdach. Wartości maksymalne różnią się dla poszczególnych pojazdów: dla limuzyny ZS i SUV ZI był to nawiew, a dla SUV ZS podgrzewanie foteli. Same wartości różnią się dość znacznie od siebie i przy uwzględnieniu oświetlenia zewnętrznego zauważa się, że moc waha się od 89 W (SUV ZS) do 289 W (limuzyna ZS). Podobnie jest dla ogrzewania tylnej szyby, gdzie dla pojazdu SUV ZS wynosi to 195 W, a dla limuzyny ZS 320 W.

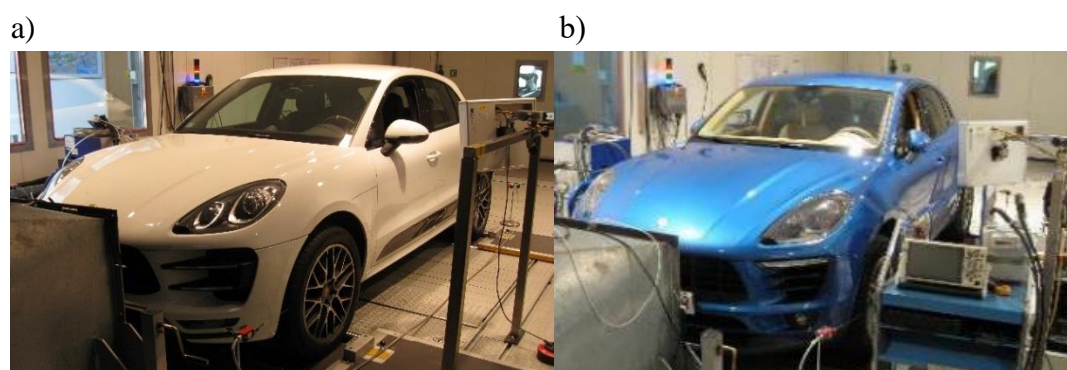
Sumaryczne wartości zużycia energii elektrycznej wahają się od 1,3 kW do niemal 2 kW. Są to wartości, które w istotny sposób mogą wpłynąć na emisję składników toksycznych oraz zużycie paliwa w eksploatacji miejskiej, kiedy średnia moc jednostki napędowej pojazdu kompaktowego z silnikiem o objętości skokowej 1,3 dm³ wynosi 10,3 kW [87]. Należy podkreślić, że subiektywna ocena podgrzewania foteli wydawała się bardziej intensywna po uruchomieniu silnika i co, jak już wspomniano, nie mogło zostać zmierzone w sposób miarodajny. W tym miejscu należy także podkreślić, że pomiar pierwotnie planowanego do analizy pojazdu hybrydowego przy pomocy cęgów prądowych nie był możliwy z powodu okresowego działania silnika i wykorzystywania akumulatorów.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że moc prądu zużywana do urządzeń komfortu może być znaczna i w wyraźny sposób wpłynąć na zużycie paliwa i emisję składników toksycznych, co zostanie przedstawione w dalszych rozdziałach.

6. Analiza emisji składników toksycznych na hamowni podwoziowej

6.1. Badane obiekty i metodyka badań

Pomiary przeprowadzono na podwoziowym stanowisku hamownianym w kontrolowanych warunkach. Odtwarzany był cykl NEDC, a badania zostały wykonane zgodnie z wymogami zawartymi w normie Euro przez certyfikowaną jednostkę BOSMAL w Bielsku-Białej. Badane były zbliżone pojazdy klasy SUV wyposażone w silniki ZI, zasilane benzyną, o objętości skokowej 2,0 i 3,6 dm³. W celu czytelności pracy oznaczono je jako SUV ZI 2 i SUV ZI 3 (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Widok pojazdu: a) SUV ZI 2, SUV ZI 3

Badane pojazdy wyposażone były w nowoczesne, turbodoładowane silniki, które w zależności od punktu pracy realizują wtrysk 1, 2 lub 3 dawek paliwa na cykl spalania. Większa liczba dawek stosowana jest podczas pracy silnika poniżej prędkości obrotowej 2000 obr/min i przy dużym obciążeniu silnika [54]. Układ oczyszczania spalin pojazdów składa się z dwóch ceramicznych reaktorów, zawartych w jednej metalowej obudowie. Dla SUV ZI 2 ze względu na silnik widlasty układ ten jest zdublowany. W silnikach badanych pojazdów zastosowano sterownik układu chłodzenia oraz funkcję odzysku energii przez zespół alternatora w czasie procesu hamowania silnikiem. Szczegółowe dane zawarto w tab. 6.1.

Tabela 6.1. Dane techniczne SUV ZI 2 i SUV ZI 3

Parametr	SUV ZI 2	SUV ZI 3
Rodzaj zapłonu / paliwo	Zapłon iskrowy/ benzyna	
Objętość skokowa [dm ³]	3,6	2,0
Ułożenie i liczba cylindrów/ liczba zaworów	Widlaste, 6/24	Rzędowe, 4/16
Rodzaj doładowania	Układ dwóch turbosprężarek typu biturbo	Trubosprężarka typu Twin Scroll
Stopień sprężania	10,5:1	9,6:1

Moc maksymalna	294 kW przy 6000 obr./min	185 kW przy 5000 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	550 Nm w zakresie 1350-4500 obr/min	400 Nm w zakresie 1800-4500 obr/min
Układ oczyszczania spalin	Dwa trójfunkcyjne reaktory katalityczne, po jednym na dany rząd cylindrów	Trójfunkcyjny reaktor katalityczny
Norma emisji spalin	Euro 6	Euro 6
Rodzaj napędu	Stały, na 4 koła	
Rodzaj przekładni	Automatyczna, dwusprzęgłowa, 7 biegowa	
Masa własna	1945 kg	1887 kg

Pomiary dla poszczególnych pojazdów zostały wykonane tego samego dnia, przy temperaturze otoczenia i ciśnieniu odpowiednio 24°C i 980 hPa dla pojazdu SUV ZI 2 i 20°C i 984 hPa dla pojazdu SUV ZI 3. Dane wykorzystanej aparatury zestawiono w tabelach 6.2 oraz 6.3.

Tabela 6.2. Dane aparatury Horiba 7000NT

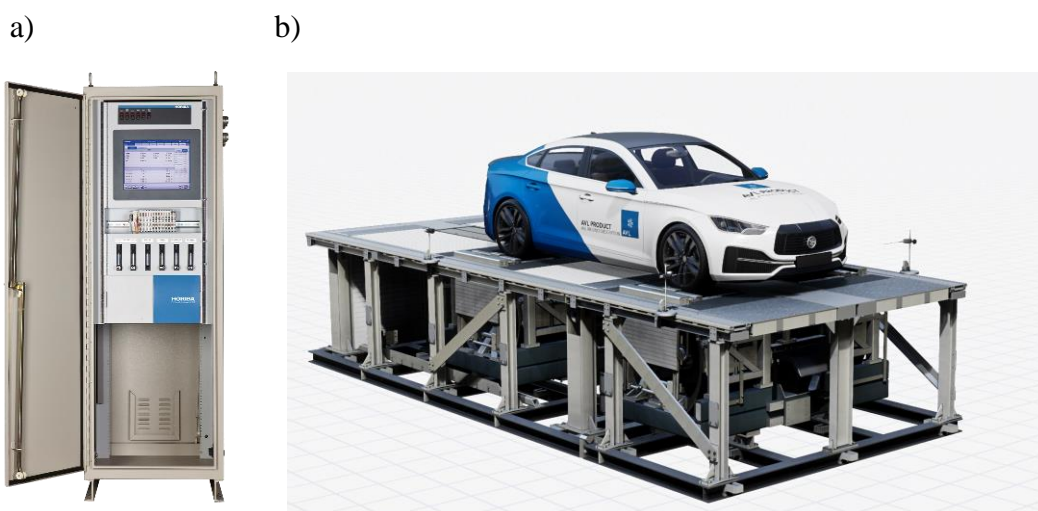
Parametr	Metoda pomiarowa	Zakres pomiarowy
NO _x (w dolnym zakresie pomiarowym)	CLD	0-5/5000 ppm (podwójny zakres)
NO _x	NDIR	0-200/5000 ppm (podwójny zakres)
SO ₂ (w dolnym zakresie pomiarowym)	NDUV	0-10/1000 lub 0-5/1000 ppm
SO ₂	NDIR	0-200/5000 ppm (podwójny zakres)
CO (w dolnym zakresie pomiarowym)	NDIR	0-5/500 ppm (podwójny zakres)
CO	NDIR	0-100/5000 ppm (podwójny zakres)
CO (w górnym zakresie pomiarowym)	NDIR	0-5% objętości
CO ₂	NDIR	0-5/50% objętości
O ₂	MPA	0-5/25% objętości
NH ₃	CLD	0-10/100 ppm (podwójny zakres)

Tabela 6.3. Dane techniczne hamowni AVL Dyno 48 4x4

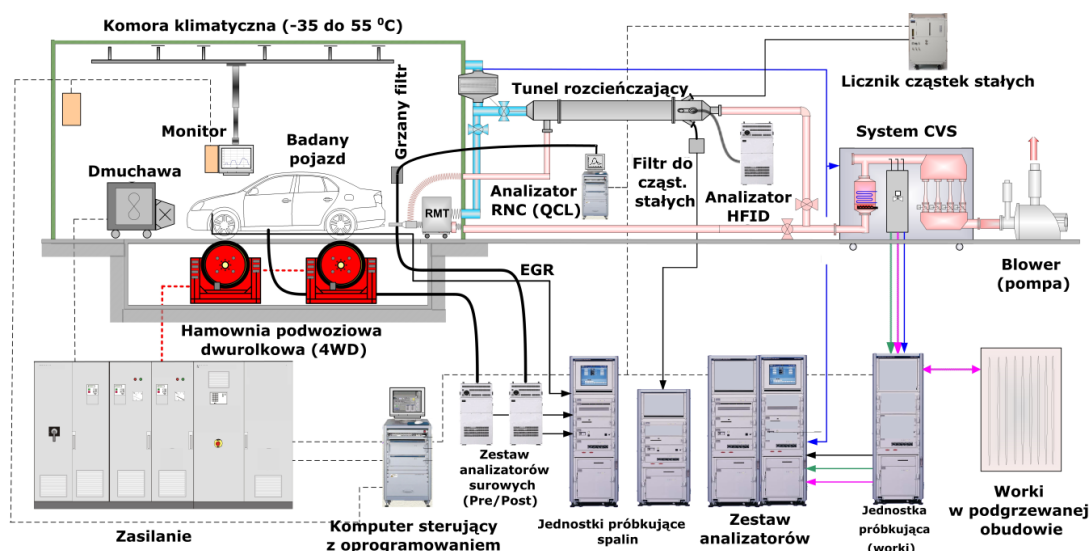
Dane	Wartość
Powtarzalność	±0.5% pełna skala; ±0.1% pełna skala (zakres rozszerzony)
Złącza komunikacyjne	USB, Ethernet
Temperatura otoczenia	5-40°C

Czas odpowiedzi	45 sekund (maksymalna wartość na wlocie do system (T ₉₀))
Maksymalna odchyłka	±2,0% całego zakresu
Wymiary	651x813x1905 mm
Masa	Ok. 318 kg

Na rysunkach 6.2 i 6.3 przedstawiono aparaturę pomiarową oraz schemat wykorzystanej hamowni.

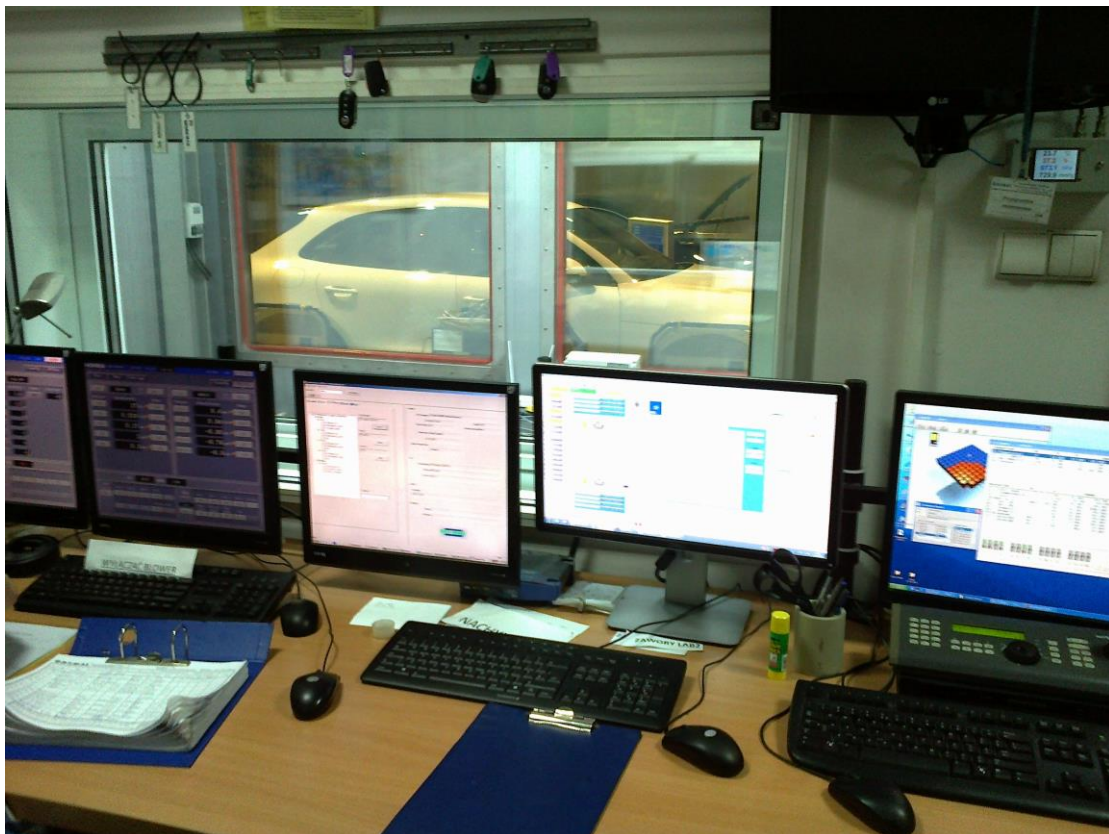


Rys. 6.2. Aparatura zastosowana do pomiaru: Analizator Horiba 7000NT, b) hamownia AVL Dyno 48 4x4



Rys. 6.3. Schemat działania stanowiska zastosowanego do badań [106]

Układ poboru spalin oraz widok pojazdu podczas badania zaprezentowano na rysunku 6.4 i 6.5.



Rys. 6.4. Widok pojazdu w czasie badań na hamowni

Pomiar wykonano w trzech cyklach, w zależności od stanu cieplnego oraz użycia odbiorników komfortu i trybów jazdy:

1. silnik rozgrzany – jazda rozpoczyna się po osiągnięciu przez silnik temperatury roboczej w zakresie płynu chłodniczego i oleju smarującego,
2. silnik rozgrzany i włączone układy komfortu – jak wyżej plus włączenie wszystkich możliwych układów komfortu pojazdu,
3. silnik rozgrzany i włączone układy komfortu, układ napędowy w trybie „Sport” – jak wyżej plus aktywny tryb jazdy sport.
- 4.



Rys. 6.5. Widok układu poboru spalin podczas badań na hamowni

Tryb sport pod kątem działania układu napędowego umożliwia utrzymywanie większych prędkości obrotowych wału korbowego oraz szybszy proces zmiany biegów i przyspieszonej reakcji na poziom nacisku pedału przyspieszenia. Sprawia to, że sprawność silnika powinna się zmniejszać.

Podczas pomiarów zostało zbadane powietrze otoczenia, tak by uwzględnić to przy pomiarach stężenia szkodliwych składników w spalinach. Badania prowadzone były zgodnie z wytycznymi legislacyjnymi pozwalającymi na odniesienie się do limitów zawartych w normach, co przedstawiono w kolejnym podrozdziale. Przykład raportu z przeprowadzonych badań przedstawia rysunek 6.6.

Obiekt badań: Porsche Macan 2.0 I 185 kW		Strona:	Stron:					
POMIAR EMISJI SPALIN - TEST NEDC [UDC+EUDC] - ROZPORZADZENIE 715/2007 - 692/2008/WE								
Data:	Godz:							
Nr próby	VETS_20181004_010							
Typ samochodu	Porsche Macan 2.0 I 185 kW	Kierowca:						
Nr nadwozia		Wykonawca:						
Nr silnika								
Przebieg (km)	2 671							
Opony	Michelin Latitude Sport3, przod: 235/60 R18, tył: 255/55 R18							
Rodzaj paliwa	E5_BH	Hamownia 4WD AVL 48"						
Gęstość paliwa [kg/dm ³]	0.7460	Masa bezwładności [kg]: 1810						
		FD [N]: 8.2						
		F1 [N/(km/h)]: 0						
		F2 [N/(km/h) ²]: 0.0557						
	UDC	EUDC	NEDC					
Temperatura otoczenia [°C]	23,9	24,8	24,3					
Wilgotność względna [%]	38,9	36,6	37,8					
Wilgotność bezwzględna [g/kg]	7,4	7,3	7,3					
Ciśnienie barometryczne [hPa]	980,8	980,9	980,9					
			System emisji HORIBA V7000NT					
			Zwężka [m ³ /min] faza I: 9,3					
			faza II: 9,3					
			Moc abs. przy 80 km/h [kW, 8.1					
	UDC	EUDC	NEDC					
Objętość mieszanki [m ³ dla 0°C]	104,15	53,40	157,5					
Objętość PM [m ³ dla 0°C]	0,97	0,50	1,5					
Współczynnik rozcieńczenia	25,63	9,43						
Droga w teście [km]	3,905	6,896	10,800					
WYNIKI POMIARU EMISJI								
	UDC	THC	CH4	CO	NO _x	CO ₂	Masa PM	Liczba PN
		ppm	[ppm]	ppm	ppm	%	mg	
Koncentracja w mieszaninie:		8,402	2,402	18,433	0,279	0,520	m1 0,026	4,83E+12
Koncentracja w powietrzu:		2,659	1,980	-0,376	0,012	0,044		
	EUDC	3,400	1,798	15,196	1,349	1,419		4,55E+12
Koncentracja w mieszaninie:		2,752	1,954	-0,053	0,012	0,046		
Koncentracja w powietrzu:								9,38E+12
	NEDC (UDC+EUDC)							
	EMISJA	THC	NMHC	CO	NO _x		PM	PN
		[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]		[mg/km]	[#/km]
UDC		98,4	90,0	626,6	13,2		0,71	1,24E+12
EUDC		4,6	4,3	147,5	19,1			6,60E+11
UDC+EUDC		38,5	35,3	320,7	17,0		0,25	8,68E+11
	EMISJA SUMARYCZNA W TEŚCIE NEDC [g/km]	THC	NMHC	CO	NO _x		PM	PN
		[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]		[mg/km]	[#/km]
Emisja [mg/km]		38,5	35,3	320,7	17,0		0,25	8,68E+11
Współczynnik D.F.		1,3	1,3	1,5	1,6		1,0	1,0
Emisja * D.F. [mg/km]		50,1	45,9	481,1	27,2		0,25	8,68E+11
Limit EURO HValue::convert(HUnit&): Incompatible		100	68	1000	60		5,0	6,00E+11
	Pomiar CO ₂ i zużycia paliwa wg Rozp. 692/2008 (WE)			CO ₂	CO ₂ xEC (-8%)	Zużycie paliwa		
				[g/km]	[g/km]	[l/100km]		
				UDC	250,3	230,3	10,86	
				EUDC	209,6	192,8	9,06	
				UDC+EUDC	224,3	206,4	9,71	
Uwagi:	1142	Nr rejestracyjny:						
	Test bez odbiorników mocy							
Wykonujący badania (data, podpis):				Zweryfikował:				

Każda poprawka musi być zaparatowana przez wykonującego badania:

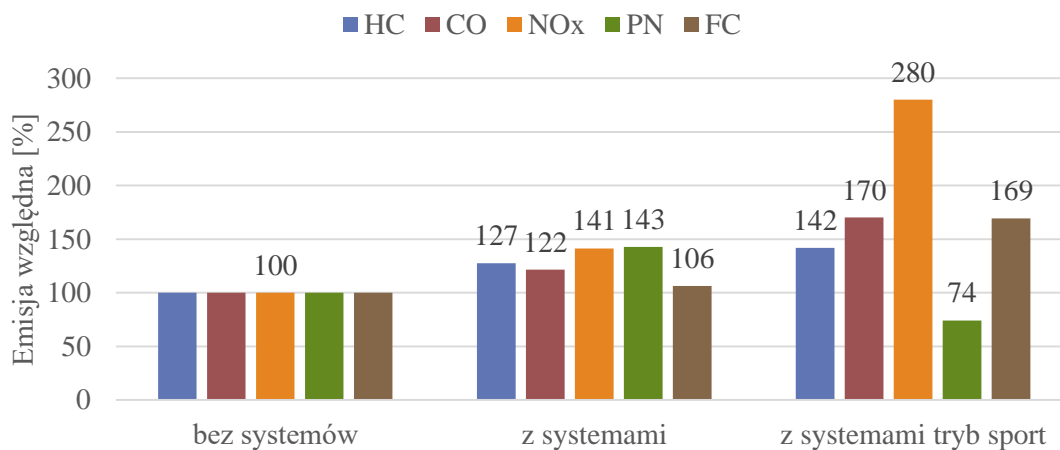
Wynik testu w emisji Porsche Macan 2.0 T - pomiar do worku wZimny bez odbiorników.xls

Rys. 6.6. Przykładowy raport z badań na hamowni

6.2. Wyniki i analiza emisji składników toksycznych

Uzyskane wyniki podzielono ze względu na badany obiekt. Pierwszymi analizowanymi związkami były węglowodory. W ramach badań zmierzono wszystkie węglowodory (THC – ang. Total hydrocarbons) oraz węglowodory niemetanowe (ang. NMHC – ang. Non-methane Hydrocarbons), gdyż tak zakłada norma. Test każdego pojazdu przeprowadzono trzykrotnie – z wyłączonymi systemami komfortu, po ich uruchomieniu oraz z włączonym trybem sportowym. Analizy dokonano w zakresie emisji przebiegowej uzyskanej podczas badania pojazdu z wyłączeniem systemów komfortu („bez systemów”). W tym przypadku emisję poszczególnych związków spalin oraz zużycie paliwa potraktowano jako poziom odniesienia i oznaczono jako 100%.

Analizując emisję samochodu SUV ZI 2 (rys. 6.7), można zauważyć, iż uruchomienie systemów komfortu spowodowało wzrost emisji wszystkich związków toksycznych od 22% do 43%.



Rys. 6.7. Emisja względna w teście NEDC z SUV ZI 2

Największy wzrost emisji odnotowano w przypadku liczby cząstek stałych. Warto podkreślić, iż włączenie wyżej wspomnianych systemów spowodowało również zwiększenie zużycia paliwa o 6%. Uruchomienie trybu sport miało niejednoznaczny wpływ na emisję związków toksycznych. W przypadku tego wariantu badania zaobserwowano znaczny (około 180%) wzrost emisji tlenków azotu. Większa emisję odnotowano również dla węglowodorów oraz tlenku węgla. Odnośnie do badania z wyłączonymi systemami, była ona większa kolejno o 42% i 70%. Zużycie paliwa natomiast uległo zwiększeniu o istotną wartość 69%. Co ciekawe, uruchomienie trybu sportowego w cyklu NEDC spowodowało zmniejszenie liczby cząstek stałych o około 26%. Parametr ten jest szczególnie istotny, gdyż udowodniono negatywny wpływ zwłaszcza małych cząstek na zdrowie i życie ludzi. Zmniejszenie liczby cząstek stałych może być efektem zintensyfikowania procesów utleniania na skutek większej temperatury w pozasilnikowych systemach oczyszczania spalin.

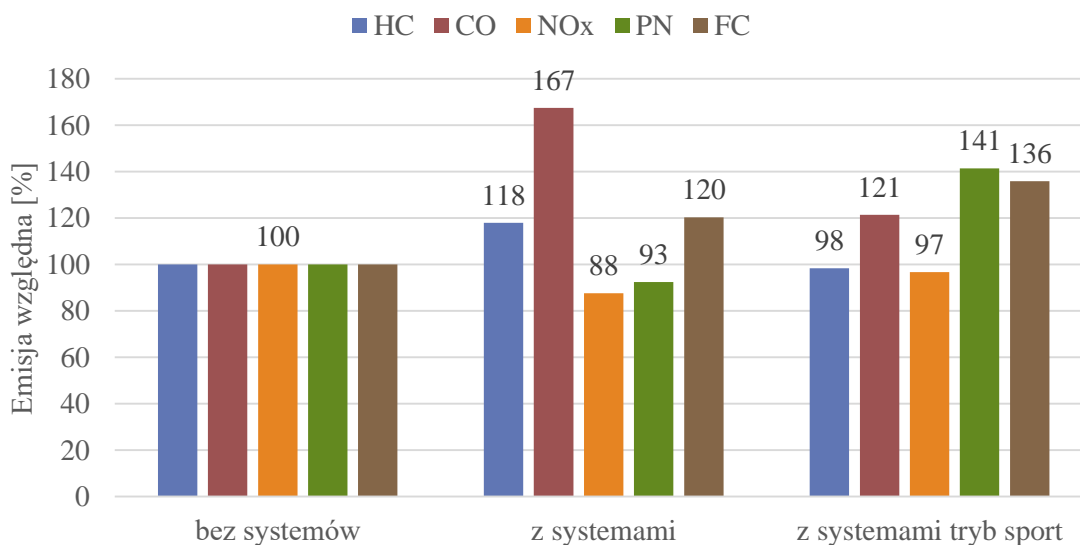
Tabela 6.4. Wyniki emisji drogowej składników toksycznych dla pojazdu SUV ZI 2

Stan pojazdu/ emisja	THC	[mg/km]		CO	[mg/km]		NO _x	[mg/km]		CO ₂	[g/km]		PM	[mg/km]		PN	[#/km]	
		EUDC	NEDC		UDC	EUDC		NEDC	UDC		EUDC	NEDC		UDC	EUDC		NEDC	UDC
Zimny	98,4	4,6	38,5	627	147,5	320,7	13,2	19,1	17	250	209,6	224,3	0,71	-	0,25	1,24E+12	6,60E+11	8,68E+11
Rozgrzany bez systemów	1,9	4,2	3,4	237	171	195,1	6,1	19,2	14,4	236	198,5	212,2	1,52	-	0,55	2,21E+11	1,26E+12	8,82E+11
Rozgrzany systemy	4	4,4	4,3	480	98,7	237,1	6,4	28,5	20,5	363	219,4	271,5	2,47	-	0,9	1,30E+12	1,24E+12	1,26E+12
Rozgrzany z systemami	0,6	0,7	0,6	450	269,6	335,4	15,7	54,7	40,5	410	238,7	301,2	2,71	-	0,99	7,13E+10	9,92E+11	6,57E+11

Tabela 6.5. Wyniki emisji drogowej składników toksycznych dla pojazdu SUV ZI 3

Stan pojazdu/ emisja	THC	[mg/km]		CO	[mg/km]		NO _x	[mg/km]		CO ₂	[g/km]		PM	[mg/km]		PN	[#/km]	
		EUDC	NEDC		UDC	EUDC		NEDC	UDC		EUDC	NEDC		UDC	EUDC		NEDC	UDC
Zimny	92,3	0,5	34	874	92,7	476,3	22,9	66,2	50,4	376	265	305,6	5,85	-	2,13	1,28E+13	1,83E+12	5,82E+12
Rozgrzany bez systemów	24,5	0,6	9,3	117	52,1	75,9	9,7	140,2	92,6	304	254,6	272,5	1,51	-	0,55	1,53E+12	5,85E+11	9,28E+11
Rozgrzany systemy	28,1	0,8	10,8	79	89,7	85,8	7,6	138,2	90,5	461	279,2	345,7	3,33	-	1,22	2,75E+12	4,90E+11	1,32E+12

Podobną analizę przeprowadzono dla pojazdu SUV ZI 3. Dla tego obiektu uruchomienie systemów komfortu spowodowało wzrost emisji węglowodorów o 18% oraz tlenku węgla o 67% (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Emisja względna w cyklu NEDC z SUV ZI 3

Zmniejszeniu uległa natomiast emisja drogowa tlenków azotu oraz liczba cząstek stałych. Warto podkreślić, iż uruchomienie systemów komfortu przyczyniło się do 20% wzrostu zużycia paliwa. W odniesieniu do SUV ZI 2 jest to wartość większa o 14 punktów procentowych. Emisja względna SUV ZI 3, dla badania przeprowadzonego z włączonymi systemami w trybie sport, znacznie różni się od wartości emisji uzyskanych dla pojazdu SUV ZI 2. W tym przypadku zaobserwowano 2% zmniejszenie emisji drogowej węglowodorów oraz 3% zmniejszenie emisji tlenków azotu. Wzrostowi uległa natomiast emisja tlenku węgla (o 21%) oraz liczba cząstek stałych (o 41%). W trakcie tego badania odnotowano również 36% wzrost zużycia paliwa. Wartość ta była jednak mniejsza o 33% od wartości uzyskanej dla pojazdu SUV ZI 2, który dysponował silnikiem o większej objętości skokowej.

7. Analiza emisji składników toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji

7.1. Metodyka badań

Postępy w dziedzinie elektroniki i technik pomiarowych pozwoliły na zwiększenie dokładności pomiarowej oraz miniaturyzację aparatury badawczej. Niedysiejsze analizatory mogły swoimi wymiarami wypełniać pomieszczenia hamowniane, a ich zakres pomiarowy był ograniczony. Obecne analizatory ulegały znacznej miniaturyzacji, przez co niektóre mogą być przenoszone przez jedną osobę, a ich wielkość pozwala na montaż nawet na pojazdach jednośladowych (rys. 7.1). Z tego względu powstała idea PEMS jako do tej pory najlepsze narzędzia do pomiaru emisyjności pojazdów.

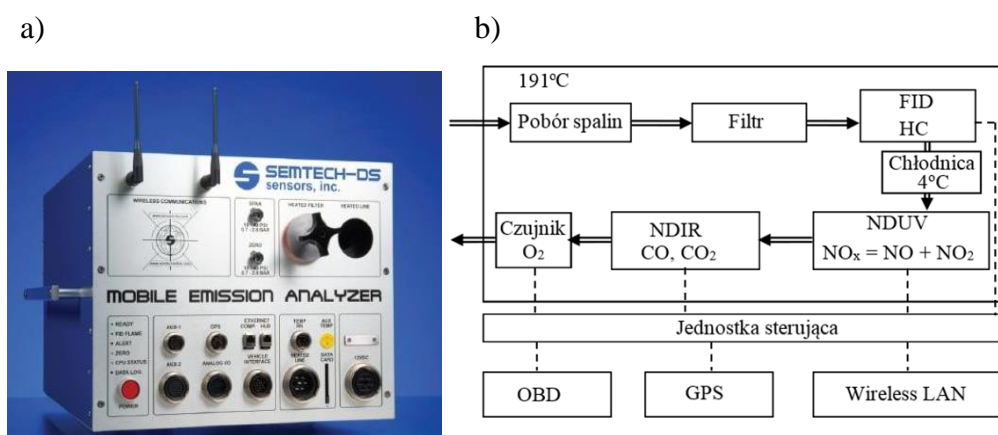


Rys. 7.1. Przykład badania pojazdu jednośladowego aparaturą PEMS [98]

Badania zostały wykonane w warunkach rzeczywistych aparaturą do pomiaru z grupy PEMS. Grupa ta stanowi zestaw analizatorów, które określają stężenie związków toksycznych z pobieranej próbki spalin. Zestawienie stężenia z chwilowym przepływem spalin podłączonym do układu wylotowego pozwala na wyznaczenie masy związku, a informacja o prędkości poruszania się pojazdu z systemu diagnostycznego pojazdu bądź układu GPS na określenie jego prędkości i w efekcie drogowej emisji. Przepływomierz działa na zasadzie rurki Prandtla, gdzie pomiar ciśnienia w określonych miejscach pozwala na wyznaczenie strumienia masy spalin. Innym sposobem określania przepływu jest informacja z przepływomierza silnika oraz oparcie się na współczynniku nadmiaru powietrza występującego w silniku w czasie pracy. Liczne badania i publikacje dowiodły różnic w emisyjnościach uzyskiwanych w ramach homologacji w stosunku do ich późniejszej eksploatacji. Podczas użytkowania różnice te są widoczne m. in. w zużyciu paliwa. Powodem tego są inne punkty pracy silnika wynikające z innych profili prędkości w warunkach homologacyjnych oraz rzeczywistych. Z tego powodu badania

w warunkach rzeczywistych zyskały na popularności i do tej pory nie znaleziono lepszego sposobu na ocenę emisji pojazdu. Analizatory natomiast mogą też być używane w sposób stacjonarny, m. in. w czasie badań na hamowni, jak to opisano dla prac opisanych w poprzednim rozdziale dysertacji. Analizatory działają na zasadzie pośredniego pomiaru zawartości danego związku toksycznego w spalinach. W zakresie gazowych składników toksycznych spalin mierzone jest pochłanianie promieniowania o określonych parametrach. Długość fali emitowanej wiązki dobierana jest w zależności od właściwości jego pochłaniania przez mierzony związek.

Uszczegółowiając, w ramach badań przedstawionych w niniejszej pracy wykorzystano analizator należący do grupy PEMS. Do pomiaru związków gazowych spalin wykorzystano analizator SEMTECH DS. firmy Sensors Inc (rys. 7.2).



Rys. 7.2. Analizator SEMTECH DS: a) widok analizatora, b) schemat działania urządzenia [34]

Urządzenie ze względu na swoją masę i kubaturę musi być przenoszone przez 2 osoby i zawiera w sobie zestaw analizatorów. Analiza przeprowadzana jest w kilku krokach. Pomiar ciśnienia w kilku miejscach badanego strumienia spalin, działający na zasadzie rury Prandtla, pozwala na wyznaczenie natężenia przepływu masowego spalin. Z przepływomierza pobierana jest próbka spalin, która poddawana jest analizie. Transportowana jest ona drogą grzaną, która przed rozpoczęciem pomiarów jest rozgrzewana do temperatury ok 191°C, co ma zapobiegać wykrapaniu się węglowodorów. W ramach norm homologacyjnych poziomy toksyczności spalin wyznacza się jako emisję drogową (g/km), albo emisję jednostkową (g/kWh). Do ich określenia mierzone są odpowiednio prędkość pojazdu i obciążenie silnika spalinowego

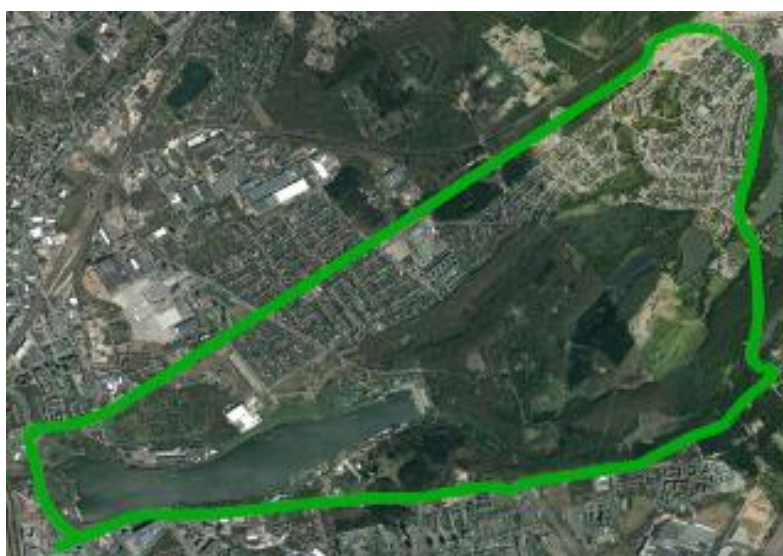
Analizatory typu PEMS zasilane są najczęściej napięciem 12 V, tak by dało się je zasilać bezpośrednio z badanego pojazdu, bądź zewnętrznego akumulatora elektrochemicznego. Ponadto zazwyczaj producenci dostarczają stosowne przetwornice, przez co możliwe jest zasilanie ze standardowej sieci elektrycznej. Jest to szczególnie ważne przy montażu wewnątrz hali, gdzie aparatura może zostać rozgrzana do temperatury roboczej, wtedy gdy potrzebuje najwięcej mocy prądu, a następnie przełączona na zasilanie akumulatorowe lub agregatowe. Przed rozpoczęciem pomiarów analizatory zostały skalibrowane gazami wzorcowymi zgodnie z wytycznymi producentów. Przed samymi pomiarami dodatkowo nastąpiło zerowanie odczytów przy

użyciu powietrza z otoczenia (rys. 7.3). W czasie badań aparatura nie wykazywała żadnych błędów w działaniu.

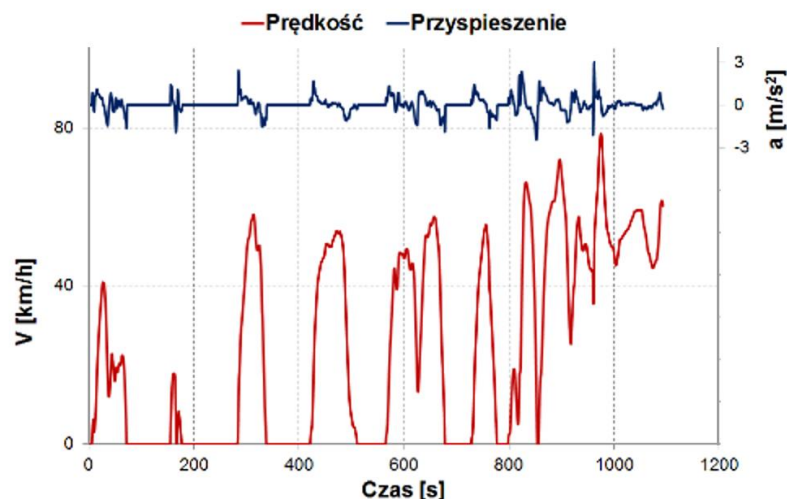


Rys. 7.3. Widok aparatury zamontowanej w pojeździe

Trasa wykorzystana do badań znajdowała się w centrum Poznania (rys. 7.4). Charakteryzuje się ona różnymi dopuszczalnymi prędkościami poruszania się i dobrze odwzoruje warunki poruszania się pojazdów samochodowych w aglomeracji miejskiej. Występują na niej liczne elementy infrastruktury, jak kilka pasów ruchu oraz skrzyżowania sterowane sygnalizacją świetlną. Trasę przejechano dwukrotnie, tego samego dnia, przez co uzyskano zbliżone warunki poruszania się pojazdu oraz wyeliminowano ewentualny wpływ zmiany środowiska na wyniki pomiarów. Przykładowy uzyskany profil prędkości oraz przyspieszenia podczas przejazdu trasy badawczej zamieszczono na rys. 7.5.



Rys. 7.4. Widok trasy badawczej [źródło: Google Maps]



Rys. 7.5. Zależność prędkości i przyspieszenia od czasu dla przykładowego przejazdu trasą badawczą

7.2. Badane obiekty

Do badań wybrano 3 obiekty badawcze, które różniły się zastosowanymi układami napędowymi. Użyto pojazdów z silnikiem ZI, ZS, które były SUVami i limuzyny – hybrydy z silnikiem ZI. Ich dane i stosowane w dalszej części pracy oznaczenia zamieszczono w tab. 7.1, a widok zamontowanej na nich aparatury przed pomiarami na rys 7.6. Dwa pierwsze pojazdy spełniały normę emisji Euro 5, a trzeci Euro 6. Pojazdy miały znikomy przebieg, do 1000 km i były sprawdzane przez serwis producenta przed i po pomiarach w celu potwierdzenia ich sprawności. Każdy był maksymalnie wyposażony w zakresie systemów bezpieczeństwa i komfortu.

Tabela 7.1. Dane techniczne pojazdów badanych w warunkach rzeczywistych

Badany obiekt:	SUV ZI 4	SUV ZS 2	Hybryda
Objętość skokowa	2,0 dm ³	3,0 dm ³	4,0 dm ³
Liczba i układ cylindrów	4, rzędowy	6, widlasty	8, widlasty +elektryczny
Maksymalna moc układu:	182 kW/5000 obr/min	180 kW/3800 obr/min	404 kW/5750-6000 obr/min
Maksymalny moment obrotowy:	370 Nm/1600-4500 obr/min	550 Nm/1750-2750 obr/min	700 Nm/1960-4500 obr/min
Układy oczyszczania spalin	TWC	DOC, DPF, SCR	TWC
Norma homologacyjna	Euro 5	Euro 5	Euro 6



Rys. 7.6. Widok pojazdów wraz z aparaturą badawczą: a) SUV ZI 4, b) SUV ZS 2, c) hybryda

7.3. Wyniki i analiza badań

7.3.1. Pojazd SUV ZI 4

Pomiary przeprowadzono na wytyczonej trasie, z tym że różnił się stan pojazdu w czasie ich trwania. Przed pomiarami pojazd był rozgrzewany, tj. nastąpił przejazd trasy, z którego wyniki nie zostały poddane analizie w ramach niniejszej dysertacji. Następnie dokonano przejazdu bez włączonych systemów, który w dalszej części jest poziomem odniesienia do kolejnych dwóch przejazdów, tj. po włączeniu systemów i po aktywacji trybu sport oraz włączonych systemach. Wyniki zostały zgrupowane i najpierw przedstawiono parametry ruchu podczas przejazdów, następnie natężenie emisji dwutlenku węgla, która odpowiada w bardzo dużej mierze zużyciu paliwa, kolejno udział czasu pracy silnika a także emisję składników w zależności od prędkości i przyspieszenia pojazdu. Kolejność wyników jest zgodna z tab. 7.1.

Analizując dane w tabelach 7.2-7.4, można zauważyć kilka podobnych parametrów jak i różnic. W zakresie prędkości oraz wartości przyspieszenia zauważa się niewielkie różnice: przy przejeździe w trybie sport maksymalna wartość przyspieszenia jest mniejsza ($2,03 \text{ m/s}^2$), podobnie hamowanie wykazało najmniejszą wartość opóźnienia ($-1,97 \text{ m/s}^2$). W parametrach pracy silnika widoczny jest natomiast wzrost wartości zarówno prędkości obrotowej wału korbowego (z 2309 obr/min do 3297 obr/min), jak i obciążenia (z 58,8% do 87,2%) przy kolejnych pomiarach. Analiza maksymalnych wartości emisji związków szkodliwych wskazuje, że wyniki różnią się w zależności od związku. Dla tlenku węgla widoczny jest wyraźny przyrost po włączeniu systemów i podobny, niemal dwukrotnie większy, wynik dla trybu sport ($107,9 \text{ mg/s}$). Dla węglowodorów jedynie tryb sport powoduje około dwukrotny przyrost wartości do ponad 4 mg/s . Dla tlenków azotu największą wartości natężenia emisji osiągnięto dla przejazdu odniesienia ($111,6 \text{ mg/s}$), a włączenie systemów i trybu sport powodują przeszło czterokrotnie mniejsze natężenie emisji, prawdopodobnie przez rozgrzanie układów oczyszczania spalin i w efekcie zwiększone zmniejszenie emisji tlenków azotu. Charakterystykę przejazdów dobrze oddaje emisja dwutlenku węgla, której wartość

maksymalna zwiększa się o około 50% po włączeniu systemów oraz niemal 100% po zastosowaniu trybu sport.

Tabela 7.2. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenia emisji spalin dla SUV ZI 4 z wyłączonymi systemami

	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-2,51	0	0	0	0	0	0
maksimum	21,3	2,92	2309	58,8	56,22	2,08	111,66	10,76

Tabela 7.3. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenia emisji spalin dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami

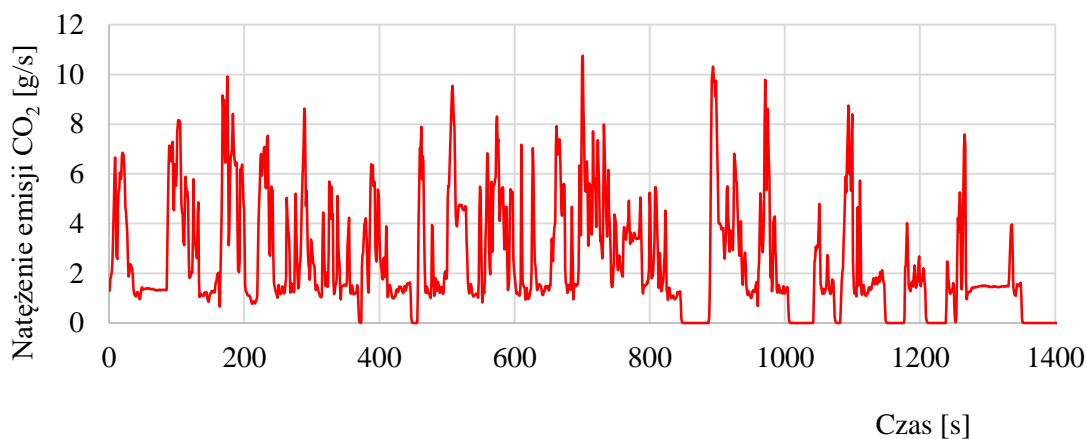
	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-2,64	0	0	0	0	0	0
maksimum	21	2,9	2605	76,7	113,07	2,18	24,94	15,58

Tabela 7.4. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenia emisji spalin dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami w trybie sport

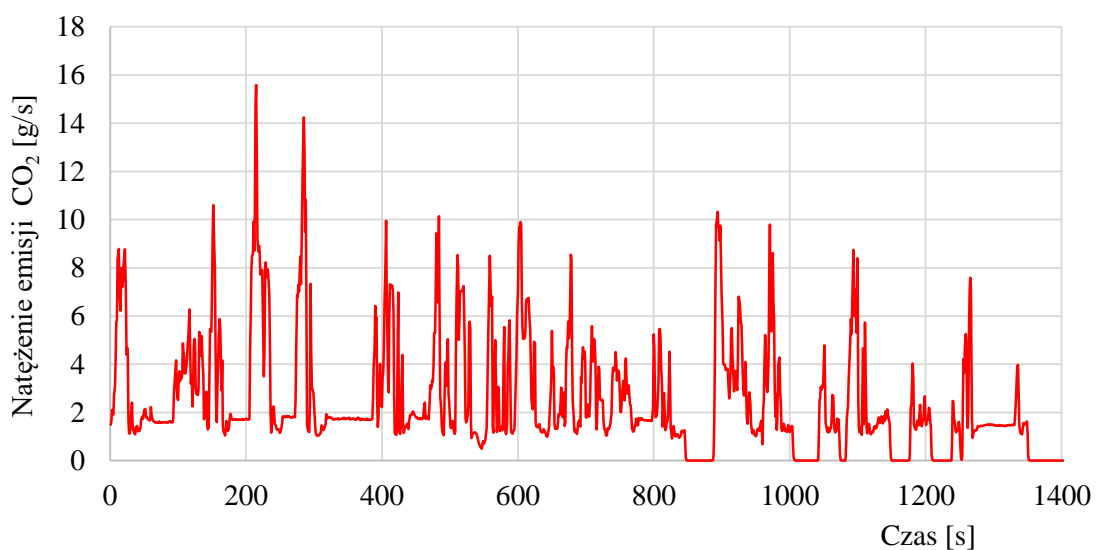
	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-1,97	0	0	0	0	0	0
maksimum	24	2,03	3297	87,2	107,9	4,2	28,31	21,42

Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla potwierdza wyniki zawarte w tabeli. Każdy z przejazdów charakteryzuje się pikami wartości w ciągu całego pomiaru (rys. 7.7-7.9). Dla dwóch pierwszych trybów widoczne jest także działanie „start-stop”, gdy natężenie emisji zmniejsza się do 0. W trybie sport natomiast widać stabilizację w okolicach minimum, która oznacza pracę na biegu jałowym. Dla trybu sport obserwuje się o wiele większe wartości maksymalne (do 22 g/s), jednak natężenie emisji we wszystkich cyklach przebiega głównie poniżej natężenia emisji drogowej, na poziomie 10 g/s dwutlenku węgla.

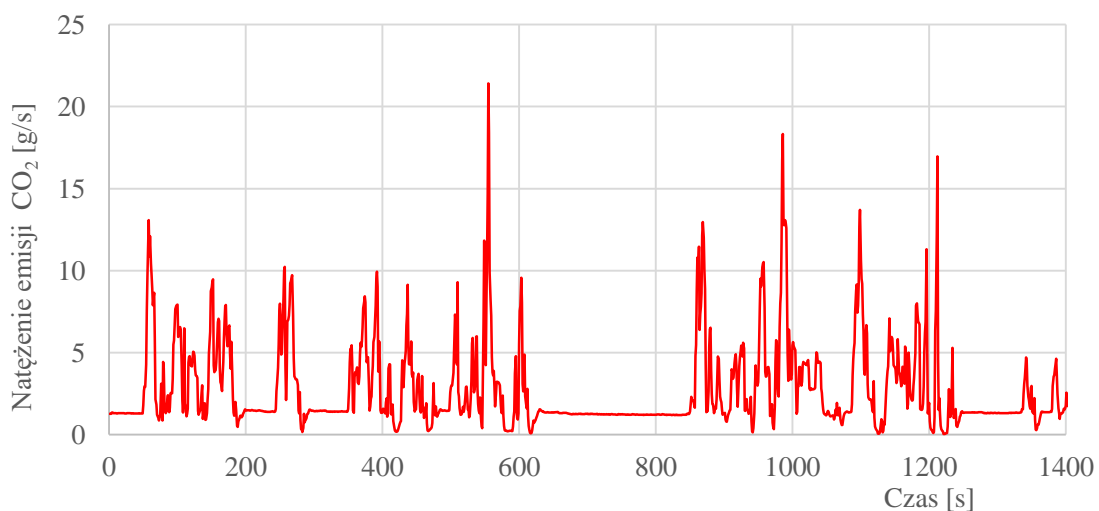
W odniesieniu do wszystkich badanych pojazdów przeanalizowano także prędkość pojazdu i stan silnika w aspekcie prędkości obrotowej wału korbowego oraz obciążenia. Każdy z badanych pojazdów wyposażony był w automatyczną przekładnię, która sprawia, że można spodziewać się dużych różnic w punktach pracy silnika, pomimo zbliżonych parametrów ruchu. Praca przekładni jest mocno związana z trybem pracy silnika, ale także użycie systemów komfortu jako odbiorników energii powinno sprawić powstanie różnic w chwilach zmiany przełożeń.



Rys. 7.7. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla w czasie dla SUV ZI 4 z wyłączonymi systemami

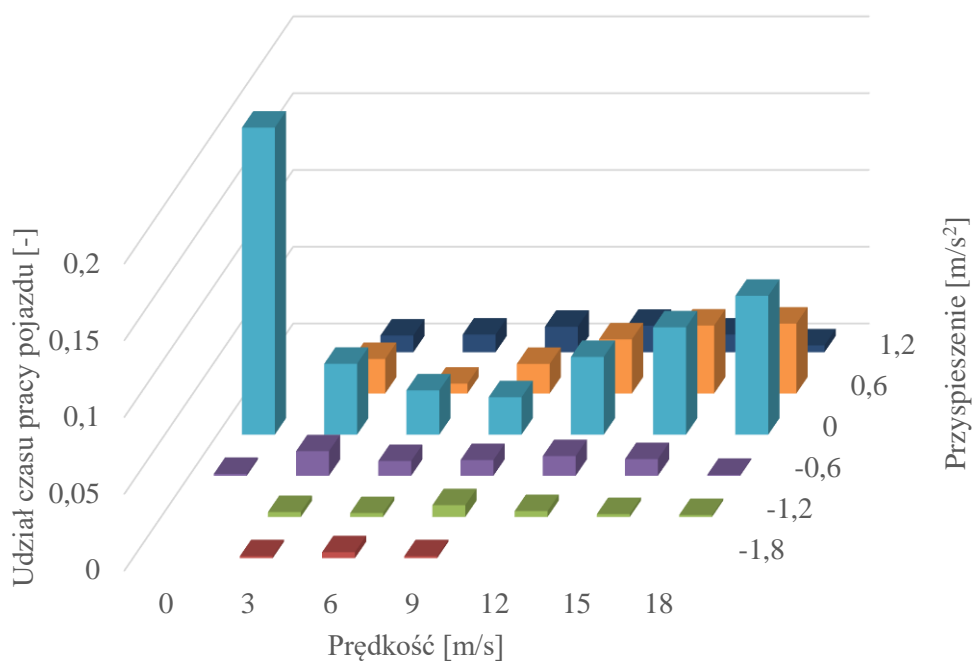


Rys. 7.8. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla w czasie dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami

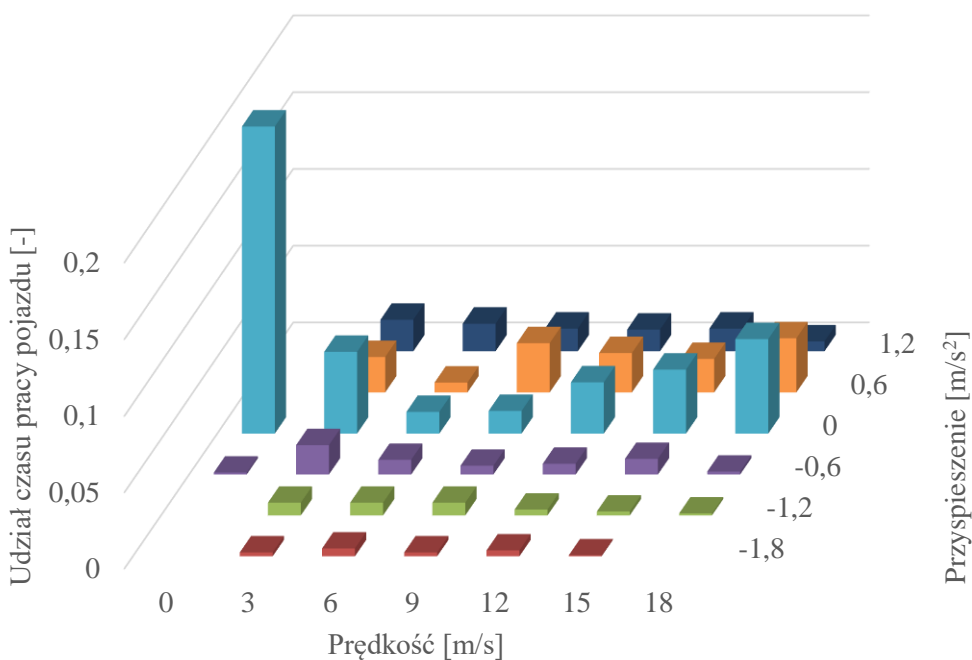


Rys. 7.9. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla w czasie dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami w trybie sport

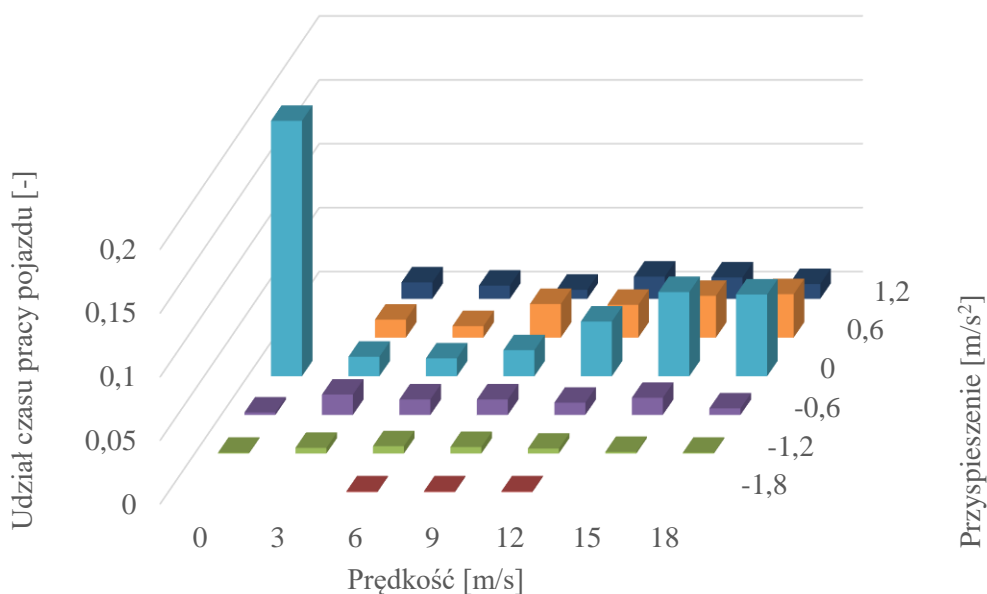
Rozszerzając analizę do udziału czasu pracy, w zależności od wartości przyspieszenia/opóźnienia i prędkości pojazdu, wszystkie 3 przejazdy w warunkach rzeczywistych są bardzo do siebie zbliżone (rys. 7.10-7.12).



Rys. 7.10. Udział czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami



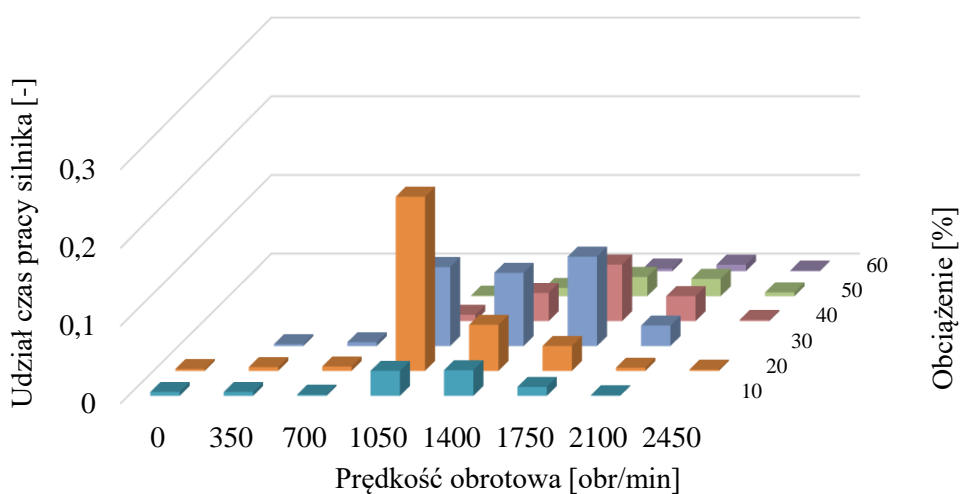
Rys. 7.11. Udział czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z wyłączonymi systemami



Rys. 7.12. Udział czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości i przyspieszenia dla hybrydy dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami i w trybie sport

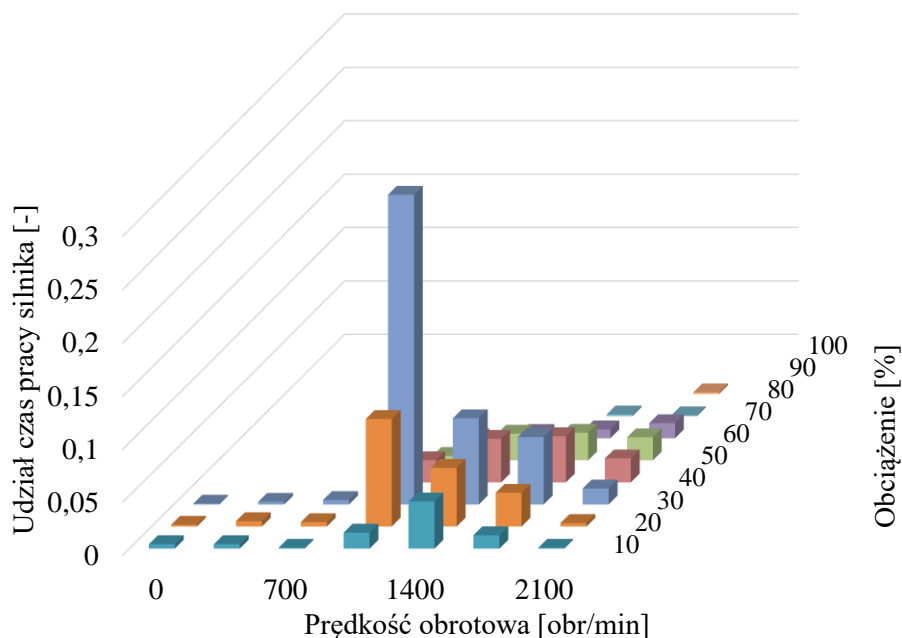
Największy udział czasu pracy pojazdu stanowi poruszanie się z niewielkim przyspieszeniem w zakresie $(-0,6-0,6 \text{ m/s}^2)$. Jest to zdeterminowane ruchem ulicznym oraz stanowi komfortowy przejazd dla pasażerów w pojeździe. Różnice są widoczne dla zakresu prędkości od 3 m/s do 18 m/s i zapewne spowodowane były chwilowymi warunkami ruchu oraz infrastrukturą. Taki udział czasowy pracy pojazdu podczas wszystkich trzech przejazdów potwierdza zasadność i możliwość porównania wyników emisji w zależności od użycia systemów komfortu.

Przy analizie pracy silnika w zależności od zakresu prędkości obrotowej i obciążenia dla przejazdu bez systemów widoczne jest skupienie w zakresie (1050-1750) obr/min oraz obciążenie z zakresu 0-40% (rys. 7.13).



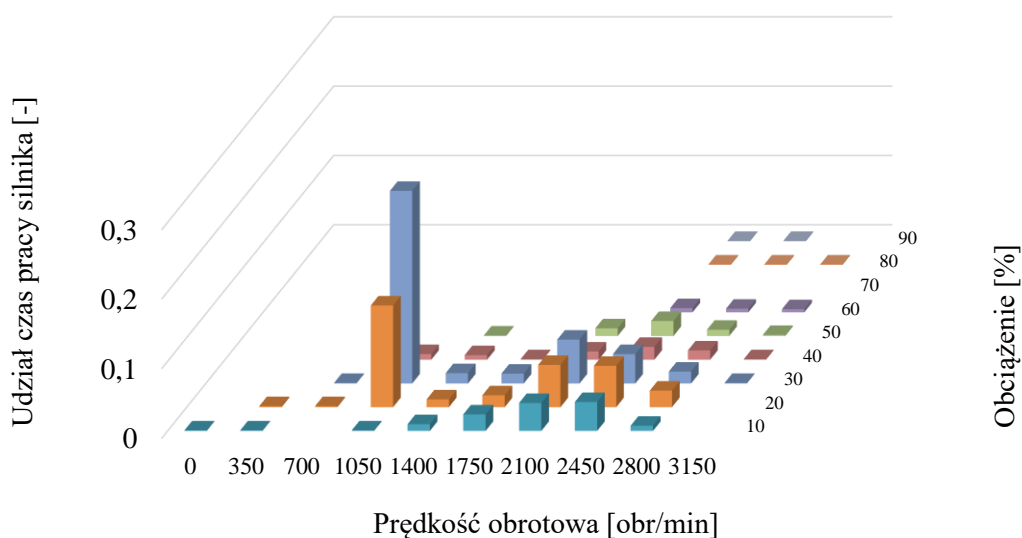
Rys. 7.13. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia dla SUV ZI 4 z wyłączonymi systemami

Włączenie systemów przesunęło punkty pracy do obszaru zwiększonego obciążenia (rys. 7.14). Jednostka pracowała głównie w zakresie prędkości (1050-1400) obr/min oraz obciążenia od 20-30%. Stanowi to ponad 25% całego czasu przejazdu (bez aktywnych systemów punkt ten stanowił 7%). Ponadto silnik pracował w zakresie obciążenia 60% i więcej, bez systemów stanowiło ono jedynie około 1% czasu pracy.



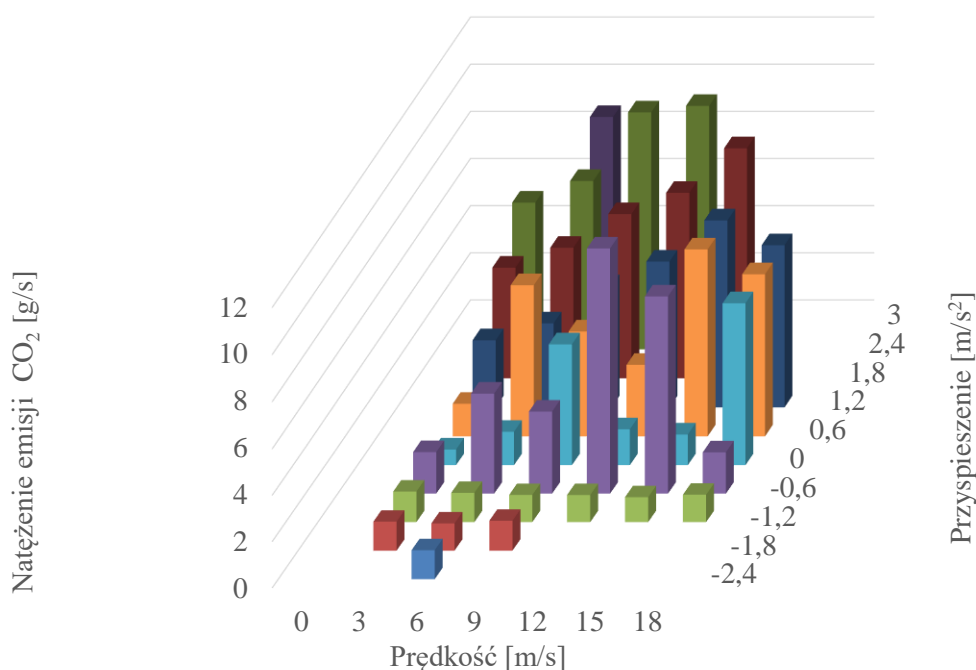
Rys. 7.14. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami

Aktywacja trybu sport (rys. 7.15) natomiast w stosunkowo niewielkim stopniu wpłynęła na punkty pracy silnika.



Rys. 7.15. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami i trybie sport

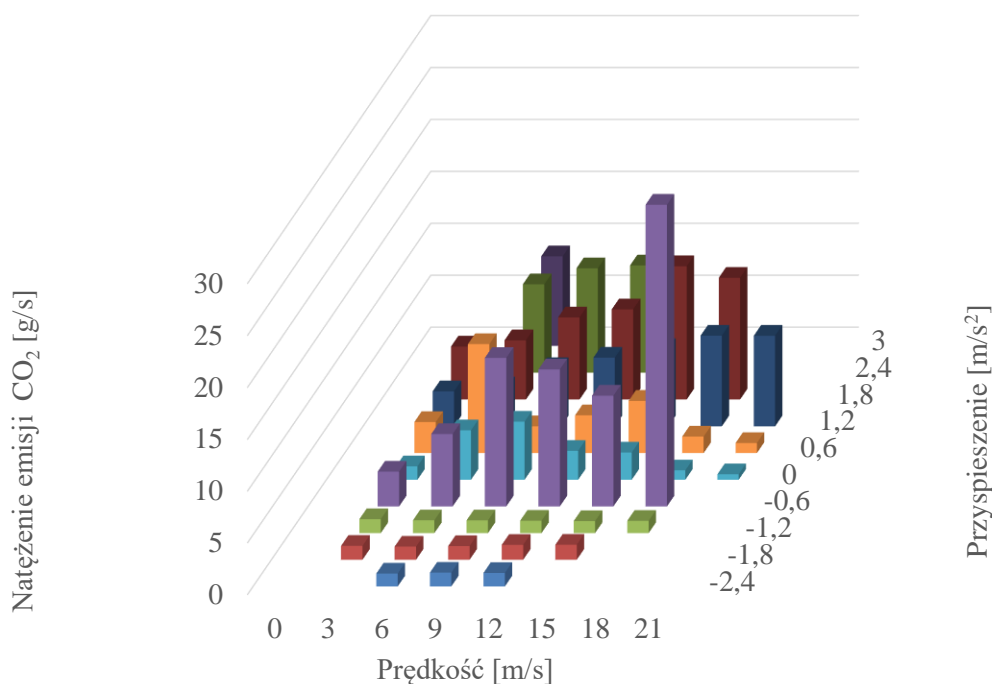
Udział zakresu prędkości obrotowej (1050-1400) obr/min jest bardzo podobny do poprzedniego obiektu badawczego. Warty podkreślenia jest, że jednak zakres (1400-1750) obr/min ma bardzo niewielki udział w czasie pracy jednostki napędowej podczas włączonego trybu sport, co nie miało miejsca bez włączenia tego trybu. Poza tym aktywne są pola dla prędkości większej niż 2450 obr/min i obciążenia powyżej 80%, co nie wystąpiło dla dwóch pierwszych przejazdów badawczych. Wskazuje to na wykorzystywanie mniejszych przełożeń przekładni podczas pomiarów, co powinno wpłynąć przede wszystkim na zwiększoną emisję dwutlenku węgla wskutek mniej efektywnej pracy silnika. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od stanu pojazdu zachowuje się zgodnie z teorią tj. dla tych samych zakresów przyspieszenia/opóźnienia zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości (rys. 7.16). Jest to związane ze wzrostem oporów ruchu. Ponadto zwiększenie przyspieszenia więcej niż $1,8 \text{ m/s}^2$ powoduje zwiększenie natężenia emisji dwutlenku węgla do przeszło 10 g/s .



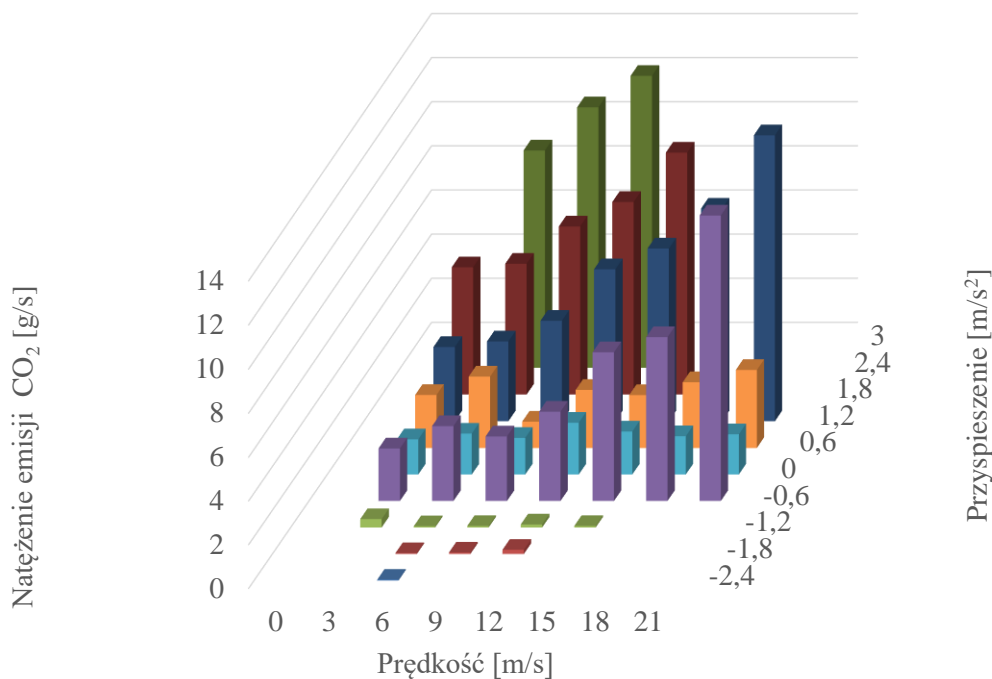
Rys. 7.16. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 bez aktywnych systemów

Włączenie systemów powoduje zwiększenie prawie wszystkich wyników natężenia emisji (rys. 7.17), a szczególnie zauważalne jest to dla prędkości poruszania się z zakresu (15-18) m/s, gdzie występują maksimum natężenia emisji dwutlenku węgla. Poza tym, pole zwiększyło się i nawet podczas hamowania z większą intensywnością występuje natężenie emisji dwutlenku węgla (przyspieszenie z zakresu $-1,8 \text{ m/s}^2$ i mniejsze, łącznie z opóźnieniem). Dla zakresu prędkości (0-9) m/s włączenie trybu sport nie powoduje prawie żadnych zmian (rys. 7.18). Jednakże wszystkie pozostałe obszary pracy silnika cechują się większą emisją dwutlenku węgla, większe są również zarejestrowane maksima. Zauważa się to szczególnie dla przyspieszeń o wartości powyżej $1,5 \text{ m/s}^2$. Wyróżnia się punkt pracy silnika w zakresie prędkości (9-12) m/s i przyspieszenia

(1,8- 2,4) m/s², w którym zarejestrowana jest druga największa wartość emisji. Porównanie przejazdów bez systemów i z systemami, wykazuje że wyniki emisji były bardziej wyrównane.

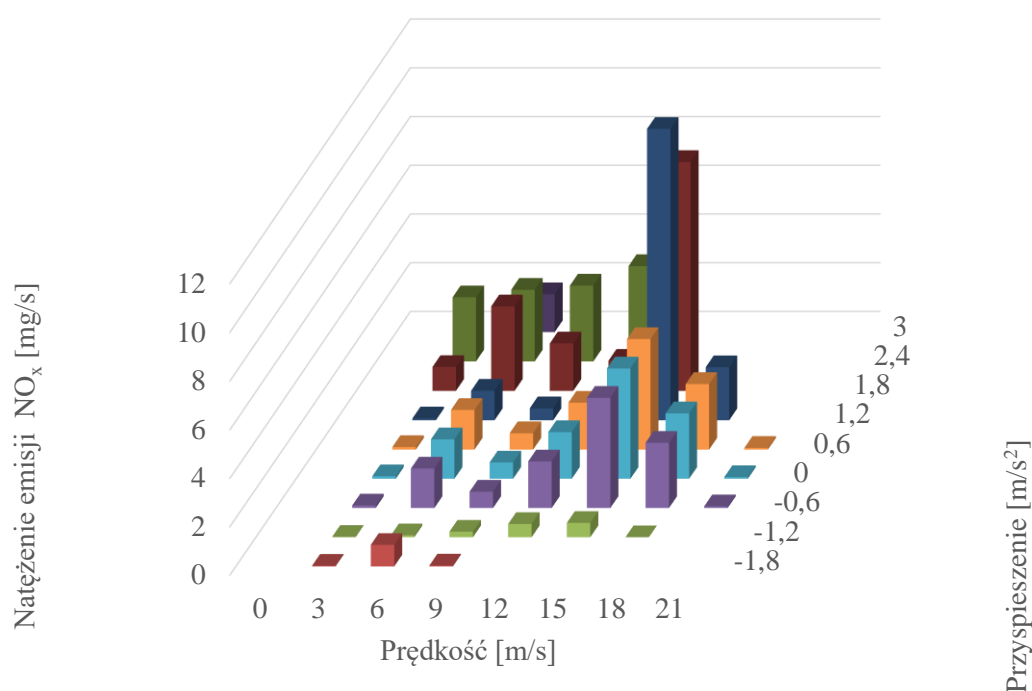


Rys. 7.17. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami



Rys. 7.18. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla hybrydy dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami i w trybie sport

Kolejnym analizowanym składnikiem spalin były tlenki azotu. Dla przejazdu bez systemów (rys. 7.19) zauważa się inny rozkład natężenia ich emisji niż dla dwutlenku węgla. Widoczne są największe wartości dla zakresu prędkości (12-15) m/s i przyspieszenia z zakresu (1,2-2,4) m/s². Natężenie emisji przekracza tam 10 mg/s, poza tym obszarem natężenie emisji w podanych zakresach nie przekracza 5 mg/s. Zgodnie z założeniami teoretycznymi, maksimum natężenia emisji powinno wystąpić przy największych wartościach przyspieszenia, co nie ma odzwierciedlenia w pomiarach i wynikać może ze zwiększonej konwersji w pozasilnikowych układów oczyszczania spalin.

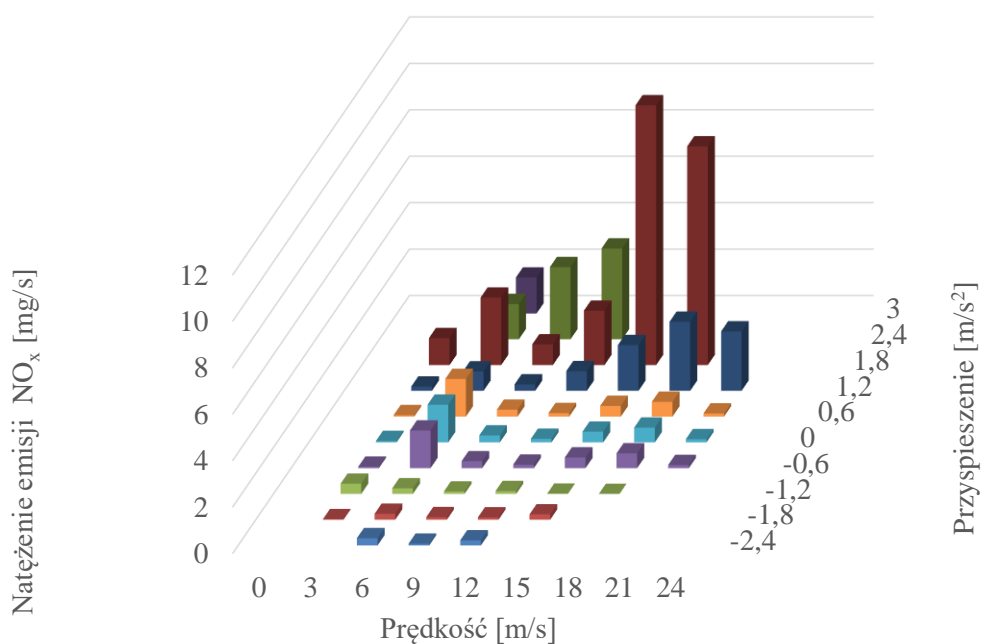


Rys. 7.19. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z wyłączonymi systemami

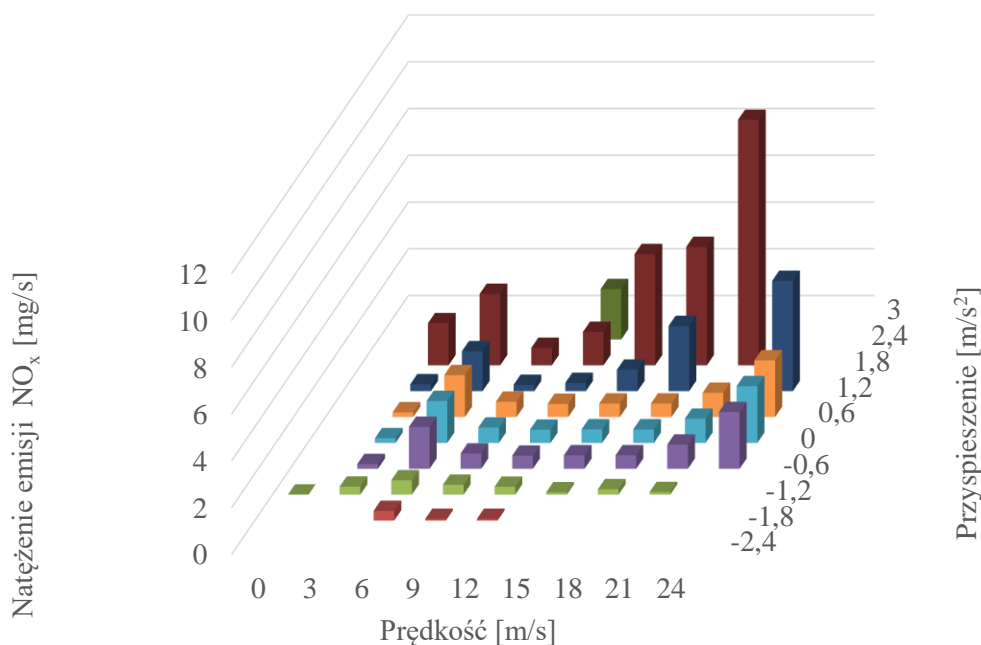
Założeniom teoretycznym dotyczącym natężenia emisji tlenków azotu bardziej odpowiada przejazd z włączonymi systemami (rys. 7.20). Natężenie emisji tlenków azotu przy wszystkich rejestrowanych prędkościach oraz przyspieszeniu 0,6 m/s² i mniejszym, osiąga marginalne wartości. Powyżej 1,2 m/s² natężenie emisji zaczyna jednak wzrastać, a dla zakresu (1,8-2,4) m/s² zarejestrowano lokalne i globalne maksima natężenia emisji. Przy przyspieszeniu powyżej wartości 2,4 m/s² ponownie natężenie emisji zmniejsza się, niemal trzykrotnie.

Przebieg natężenia emisji tlenków azotu z włączonym trybem sport (rys. 7.21) przypomina połączenie wyników z przejazdu bez systemów i z systemami. Również w tym przypadku, natężenie emisji tlenków azotu jest największe dla zakresu przyspieszenia (1,2-1,8) m/s², jednak wartości są mniejsze niż dla przejazdu bez aktywacji tego trybu. Znaczące natężenie emisji NO_x wystąpiło dla większego obszaru pracy jednostki napędowej. W tym przypadku zaobserwowano natężenie emisji związku

przy przyspieszeniu wynoszącym $1,2 \text{ m/s}^2$ i większym. Nie występuje zwiększenie maksimum natężenia emisji.

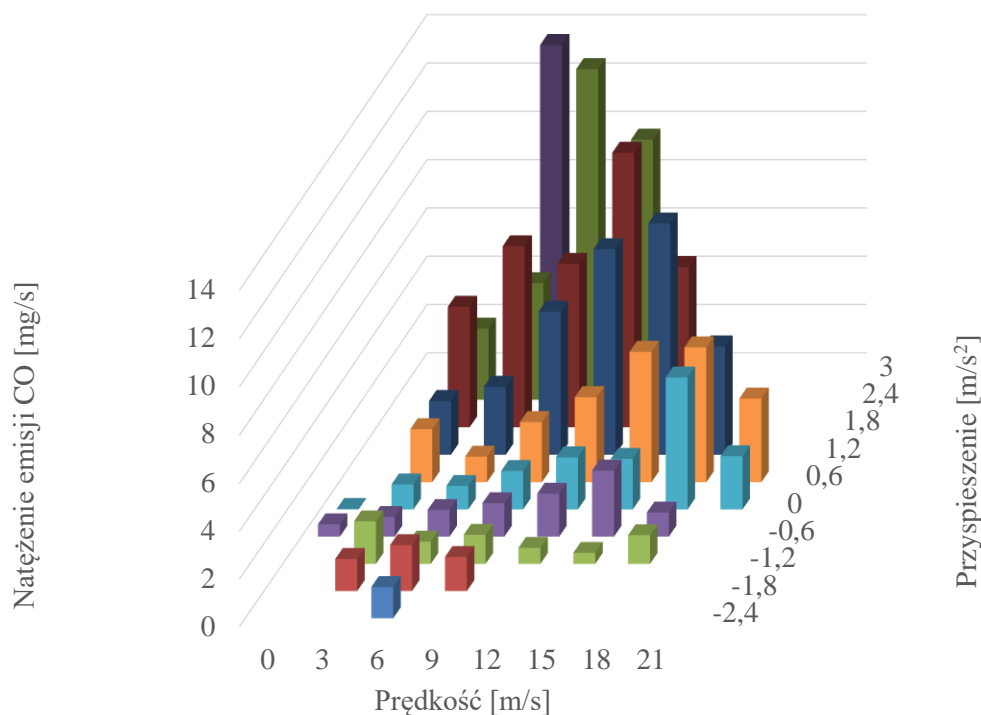


Rys. 7.20. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami



Rys. 7.21. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami i w trybie sport

Następnym badanym składnikiem gazów wylotowych jest tlenek węgla, który powinien mieć odmienny charakter względem tlenków azotu. Działanie układów oczyszczających spaliny może jednak w znaczący sposób wpływać na wyżej wspomniany charakter. Dla przejazdu bez włączonych systemów można zauważyć wyraźny wpływ przyspieszenia na natężenie emisji tlenku węgla. Najwięcej emitowanego jest go dla maksymalnego przyspieszenia z zakresu (2,4-3) m/s^2 , choć także jego natężenie emisji jest duże dla przyspieszenia do wartości 1,2 m/s^2 (rys. 7.22).

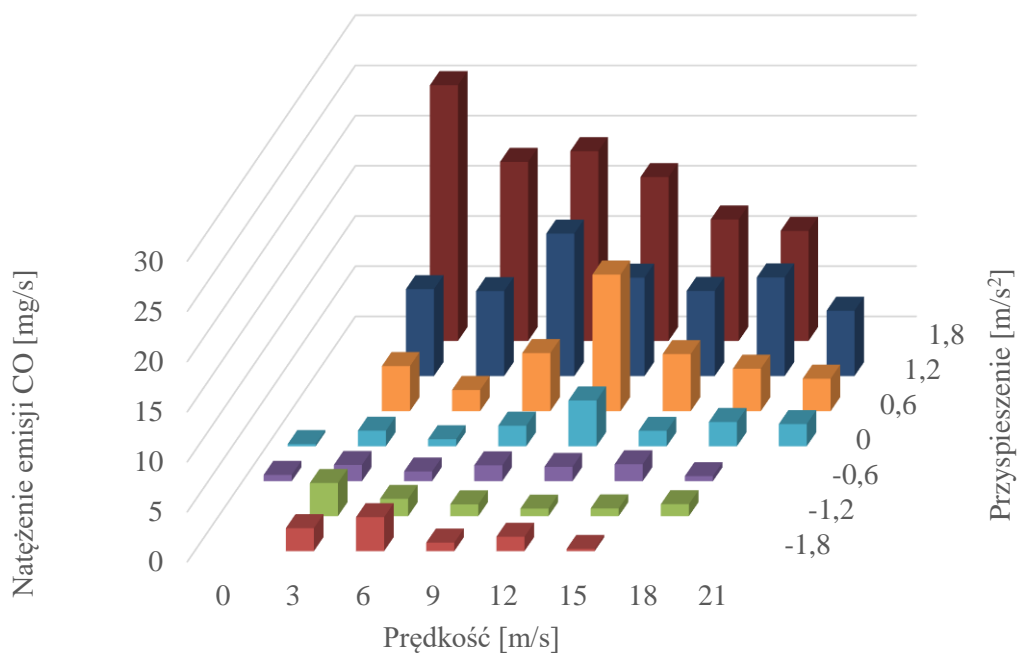


Rys. 7.22. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z wyłączonymi systemami

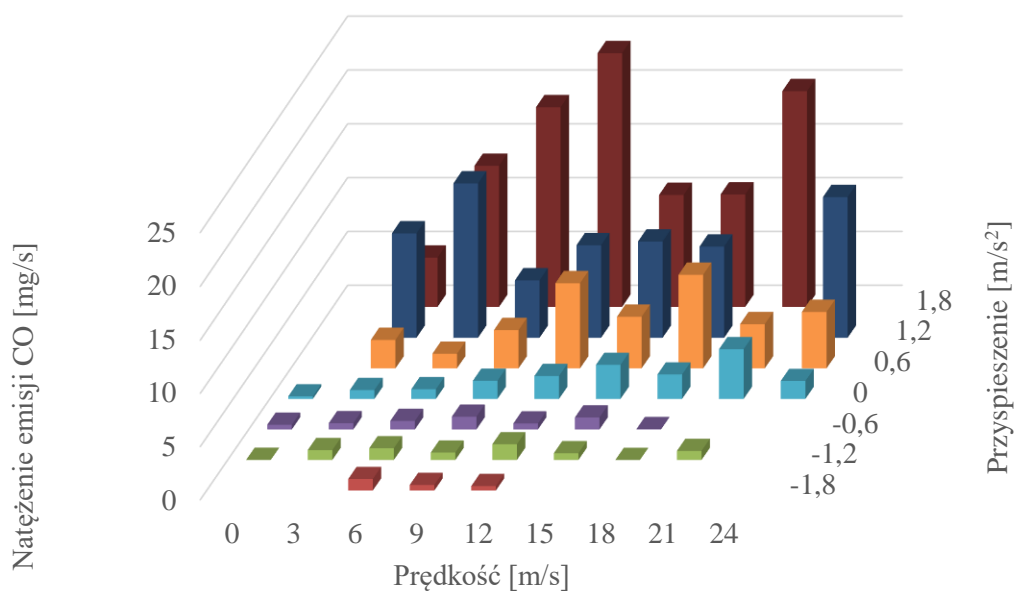
Prawie w każdym przypadku maksimum natężenia emisji znajduje się przed ostatnim zakresem zmierzonej prędkości (jest to widoczne choćby dla zakresu 18-21 m/s oraz przyspieszenia 0-1,2 m/s^2) (rys. 7.23 i 7.24).

Aktywacja trybu sport bardzo wpływa na natężenie emisji tlenku węgla. Zarejestrowane maksimum natężenia emisji jest ponad dwukrotnie większe, a prawie wszystkie wyniki dla przyspieszenia z zakresu (1,2-1,8) m/s^2 wykazują większe natężenie emisji niż maksimum w czasie jazdy bez włączonych systemów. Ponadto dla różnych zakresów prędkości wartości natężenia emisji są względnie równe i nie jest widoczny główny obszar pracy jednostki ze zwiększonym natężeniem emisji, jak dla przejazdu pierwszego. Wartości natężenia emisji uzyskane dla opóźnień są zbliżone, w całym badanym zakresie, do przejazdu bez aktywnych systemów. Aktywacja trybu sport zmniejsza wartości maksymalne natężenia emisji oraz zmienia ich przebieg, w zależności od przyspieszenia. Sumarycznie wartość natężenia emisji jest jednak zwiększona. Maksymalne wartości występują dla przyspieszenia (1,2-1,8) m/s^2 . Dla

zakresu przyspieszenia (0-1,2) m/s^2 przebieg i wartości natężenia emisji są podobne dla wszystkich przejazdów, różnice dotyczą większej zmiany prędkości w czasie.

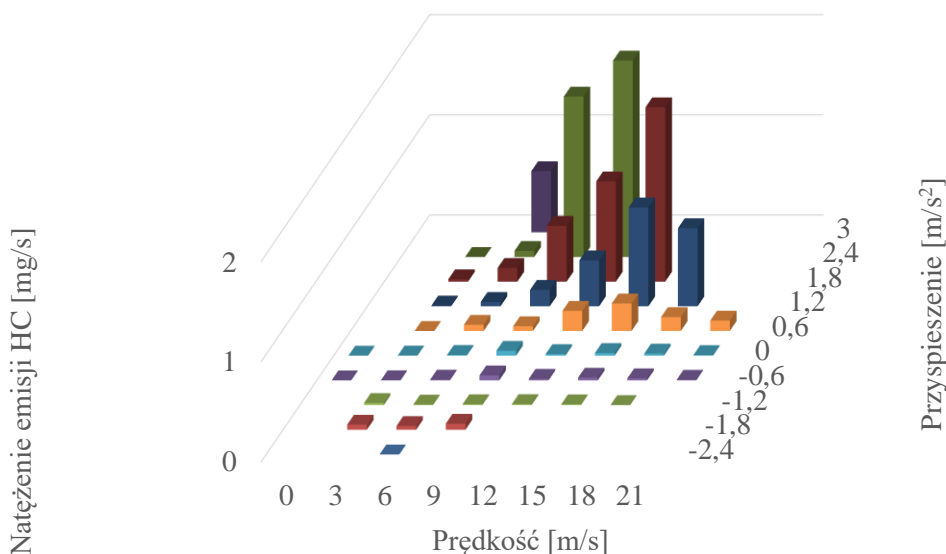


Rys. 7.23. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami



Rys. 7.24. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami i trybie sport

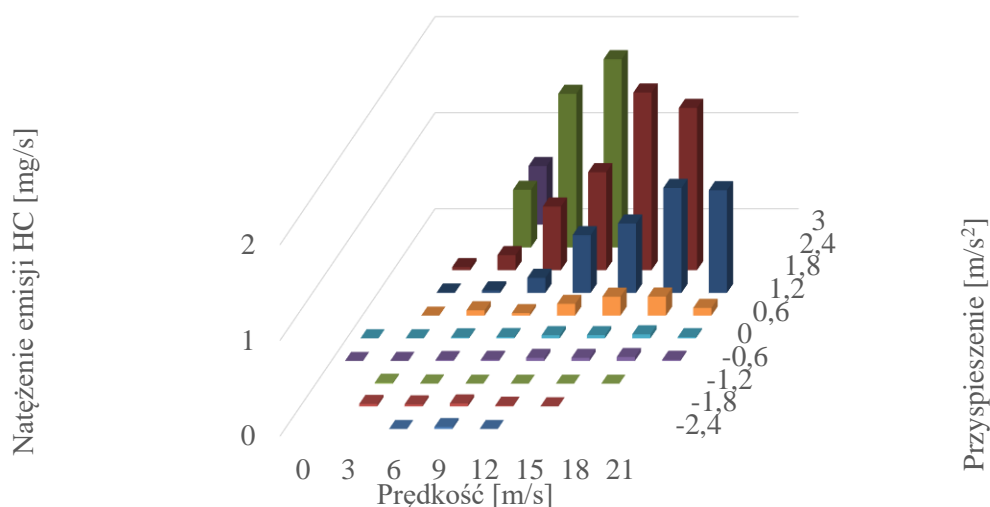
Ostatnim zmierzonym w ramach badań związkami toksycznymi spalin były węglowodory. Analizując ich emisję dla przejazdu bez systemów, można zauważyć, że natężenie emisji występuje jedynie podczas procesów przyspieszania pojazdu (rys 7.25).



Rys. 7.25. Natężenie emisji węglowodorów w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z wyłączonymi systemami

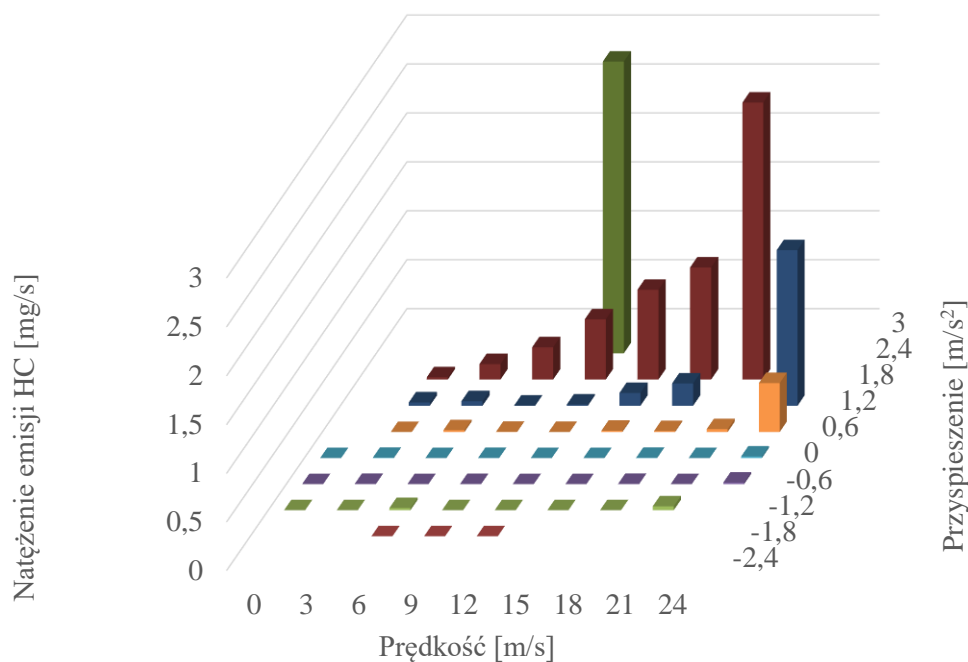
Niewielkie natężenie emisji węglowodorów na poziomie 0,08 mg/s podczas zmniejszania prędkości rejestrowano jedynie dla zakresu $(-1,8-2,4)$ m/s². Analizując rozkład emisji dla przyspieszenia, zauważa się także wpływ prędkości poruszania się. Zwiększenie prędkości powyżej 9 m/s powoduje znaczne zwiększenie natężenia emisji do niemal 2 mg/s dla zakresu przyspieszenia $(1,8-3)$ m/s². Zauważyć także można zależność natężenia emisji od przyspieszenia, szczególnie dla zakresu prędkości $(12-15)$ m/s.

Przejazd z aktywnymi systemami komfortu, prawie nie wpływa na natężenie emisji węglowodorów dla zakresu opóźnień i pozostaje ona znikoma (rys. 7.26).



Rys. 7.26. Natężenie emisji węglowodorów w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami

Zauważalne są natomiast zmiany dla przyspieszenia podczas jazdy z prędkości ok. 9 m/s i większą. Wartości maksymalne natężenia emisji pozostają takie same jak w przypadku jazdy z wyłączonymi systemami. Warto zaznaczyć, że wyniki pośrednie zwiększają się, szczególnie dla prędkości powyżej 18 m/s. Dla pierwszego przejazdu natężenie emisji HC powyżej tej prędkości niemal nie występowało. Analizując wyniki można doszukać się proporcji między przyspieszeniem a wartością natężenia emisji, choć dla wartości powyżej 3 m/s² natężenie emisji zmniejsza się. Przy zastosowaniu trybu sport przebieg natężenia emisji węglowodorów z przejazdu nr 3 różni się bardzo od dwóch pierwszych. Natężenie emisji rejestrowane jest przy prędkości powyżej 24 m/s jedynie dla przyspieszenia o wartości 1,2 m/s² i większej (rys. 7.27). Dla przyspieszenia z zakresu (1,8-2,4) m/s² widoczny jest proporcjonalny wzrost natężenia emisji w zależności od prędkości poruszania się. Maksimum natężenia emisji dochodzi do 2 mg/s i zachodzi dla prędkości poruszania się z zakresu (12-15) m/s² oraz przyspieszenia (2,4-3) m/s².



Rys. 7.27. Natężenie emisji węglowodorów w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZI 4 z włączonymi systemami i w trybie sport

7.3.2 Pojazd SUV ZS 2

Dla pojazdu SUV ZS 2, właściwości fizyczne ruchu były zbliżone do opisanego wcześniej pojazdu SUV ZI 4 (tab. 7.5). Analizując wartości skrajne podane w tabelach można zauważyć, że wartości prędkości i przyspieszenia dla przejazdu z systemami (tab. 7.6) oraz w trybie sport (tab. 7.7) są większe i przekraczają 2 m/s^2 oraz wartość prędkości 20 m/s .

Tabela 7.5. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenie emisji spalin dla SUV ZS 2 z wyłączonymi systemami

	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-1,81	0	0	0	0	0	0
maksimum	17,9	1,66	1972	96,5	153,7	0,48	72,8	11,786

Tabela 7.6. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenie emisji spalin dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami

	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-2,31	0	0	0	0	0	0
maksimum	24,03	1,70	2710	94,1	170,23	1,18	157,5	16,1

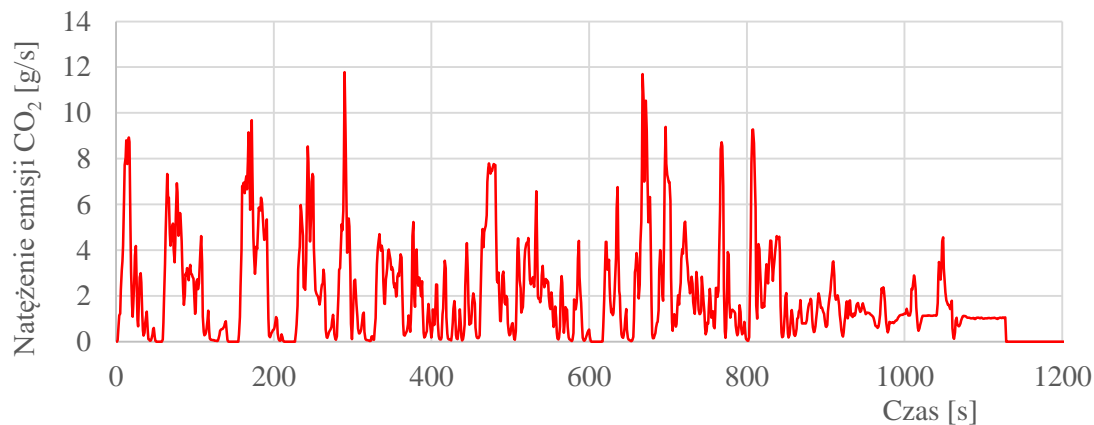
Tabela 7.7. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenie emisji spalin dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami w trybie sport

	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-2,42	0	0	0	0	0	0
maksimum	22,33	2,22	2301	95,8	67	0,5	158,5	0,049

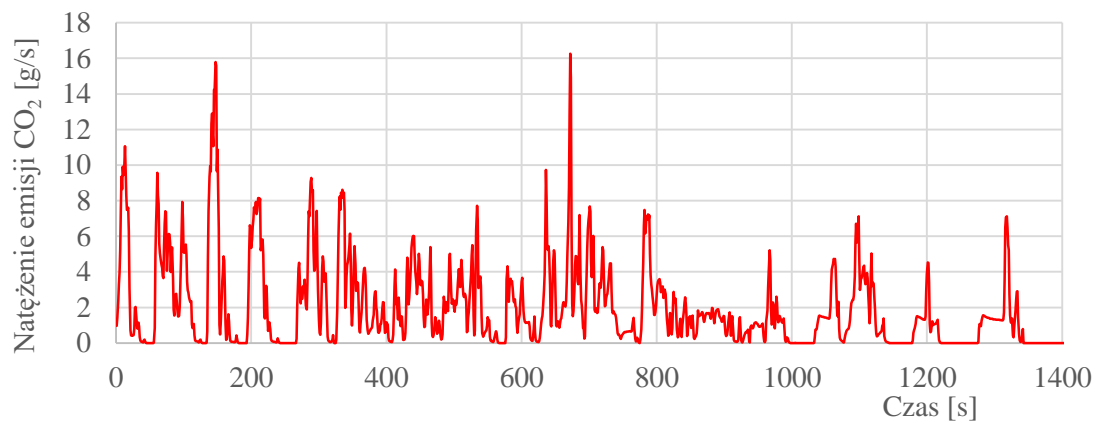
Porównując prędkość obrotową we wszystkich trzech cyklach widoczna jest znaczna różnica maksymalnych wartości, które wynoszą niecałe 2000 obr/min dla dwóch pierwszych przejazdów, a dla przejazdu z włączonymi systemami ponad 2700 obr/min. Natomiast we wszystkich przypadkach maksymalne obciążenie silnika jest na bardzo wysokim poziomie i przekracza 94%. Różnice w obciążeniu wpływają na skrajne wartości natężenia emisji i dla tlenku węgla występuje tendencja spadkowa przy kolejnych przejazdach. Natężenie emisji tlenku węgla wzrasta po włączeniu systemów o około 10%, a dla trybu sport zmniejsza się o przeszło 50%. Podobne tendencje zachodzą dla natężenia emisji węglowodorów, a dla tlenków azotu widoczny jest niemal dwukrotny wzrost po włączeniu systemów oraz niewielki wzrost po aktywacji trybu sport. Natężenie emisji dwutlenku węgla, związana ze zużyciem paliwa, wzrasta podczas kolejnych przejazdów, co zgadza się z teoretycznymi założeniami podanymi we wstępie dysertacji.

Porównując przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla zauważa się różnice ich przebiegu w czasie. Przede wszystkim w przejeździe bez włączonych systemów (rys. 7.28) osiągnęte są mniejsze wartości (poniżej 12 g/s). Po aktywacji systemów

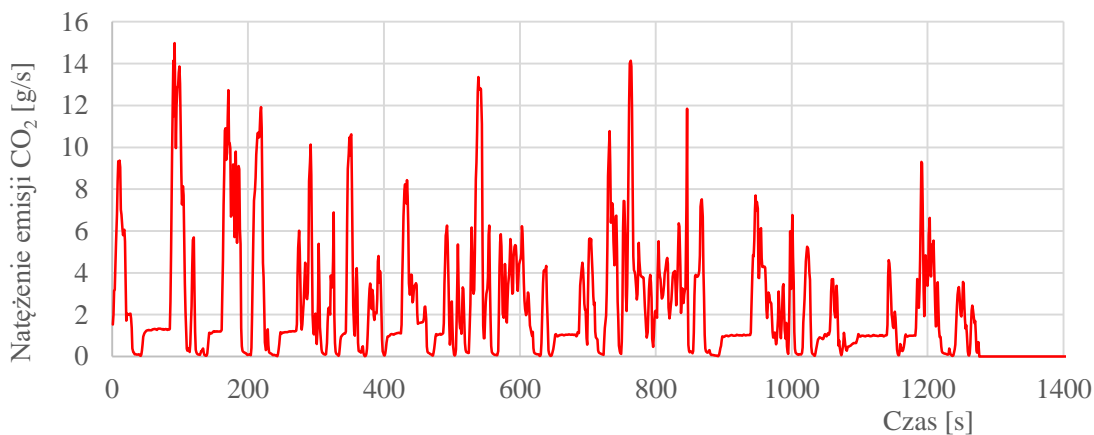
natężenie emisji zwiększa się do ponad 16 g/s (rys. 7.29), a w trybie sport wartość maksymalna zmniejsza się do 11 g/s (rys. 7.30). Przebieg natężenia emisji dla sytuacji bez i z systemami jest bardzo podobny: kilkadziesiąt punktów pomiarowych nie przekracza wartości 6 g/s, a dla przejazdu z systemami widoczne jest działanie systemu start stop przy końcu cyklu badawczego.



Rys. 7.28. Natężenie emisji dwutlenku węgla w czasie dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami



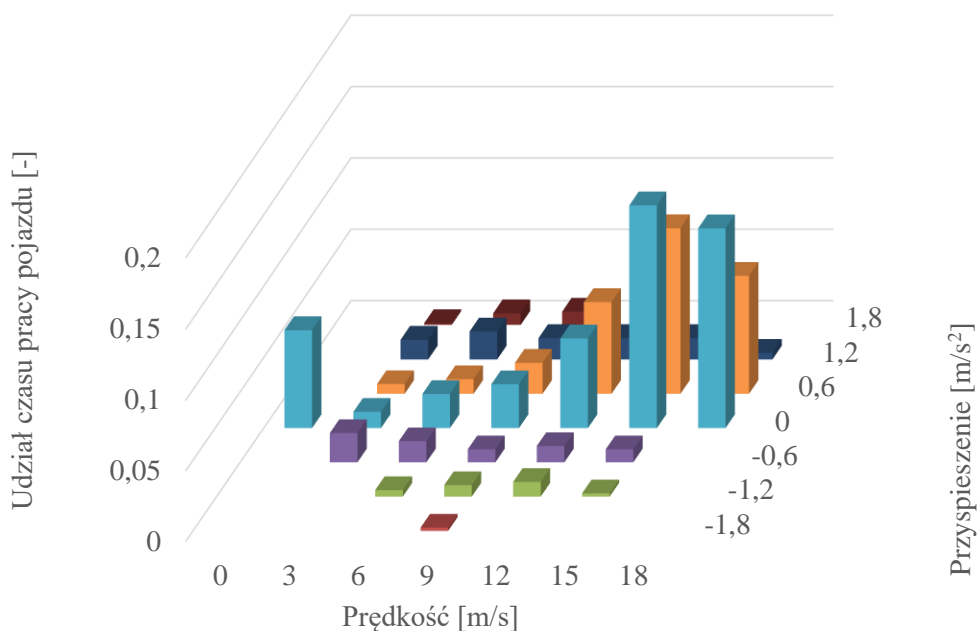
Rys. 7.29. Natężenie emisji dwutlenku węgla w czasie dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami



Rys. 7.30. Natężenie emisji dwutlenku węgla w czasie dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami w trybie sport

Aktywacja trybu sport w dużym stopniu zmienia przebieg natężenia emisji w zawartych przedziałach. Znacznie krótsze są odcinki, gdzie natężenie emisji jest zbliżone do zera i dotyczy ona jedynie dłuższego hamowania silnikiem. Zwiększa się także liczba pików powyżej wartości natężenia emisji 8 g/s. Ponadto widoczną różnicą jest praca silnika na biegu jałowym, przez co pojawiają się segmenty, w których krzywa na wykresie zbliża się do linii poziomej.

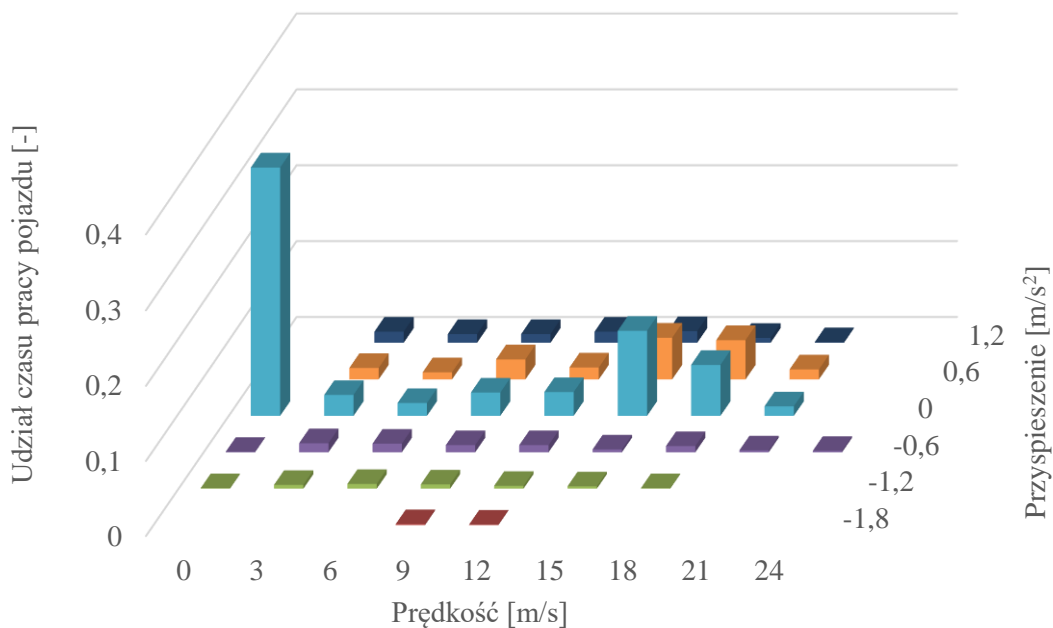
Odnosnie do udziału czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości przyspieszenia podczas pomiarów bez włączonych systemów (rys. 7.31), szczególnie często stosowany jest zakres przyspieszenia (0-0,6) m/s² w całym zakresie prędkości (0-18 m/s). Ponadto przez znaczny czas, poszczególne udziały do 0,1 ogółu czasu przejazdu, pojazd porusza się z prędkością powyżej 12 m/s przy przyspieszeniu (0,6-1,2) m/s².



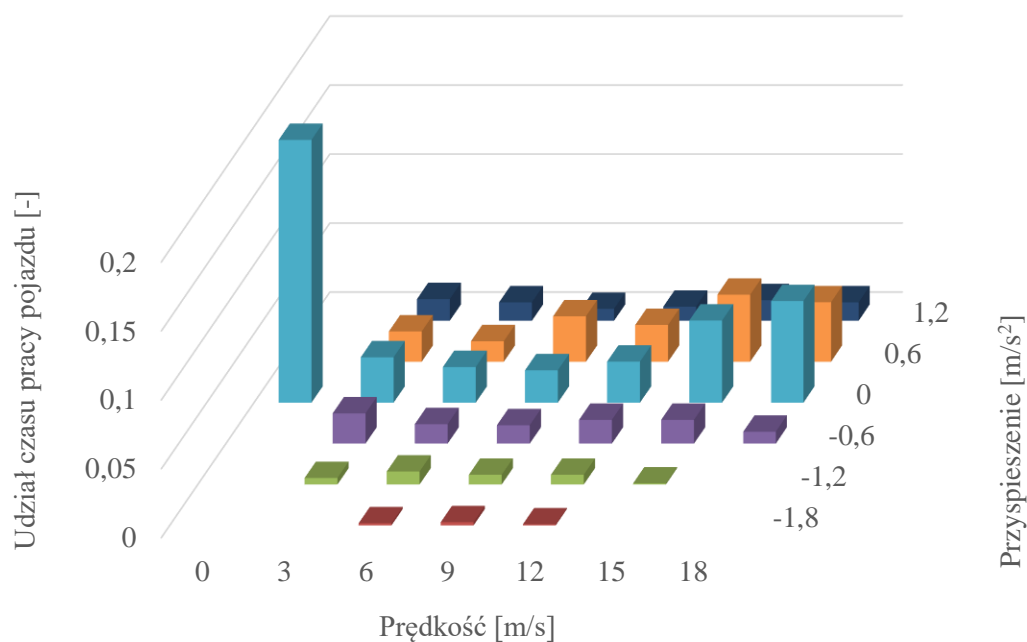
Rys. 7.31. Udział czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z wyłączonymi systemami

Po aktywacji systemów (rys. 7.32) udział czasu pracy pojazdu wzrasta około sześciokrotnie podczas pracy w zakresie prędkości (0-3) m/s. Zapewne związane jest to z wyłączeniem bądź ograniczeniem działania systemu start-stop. Poza tym udział czasu pracy jest bardziej wyrównany w zadanych zakresach (różni się skalą na obydwu wykresach).

Po aktywacji programu sport (rys. 7.33) około dwukrotnie zmniejsza się punkt pracy związany z postojem i bardzo wolną jazdą. Reszta punktów zachowuje się podobnie, jak w przypadku pomiarów z włączonymi systemami, jednak większe udziały przypadają na zakres przyspieszenia (0-0,6) m/s² oraz powyżej 1,2 m/s². Lokalne maksimum zmienia położenie z zakresu prędkości (15-18) m/s do wartości powyżej 18 m/s.

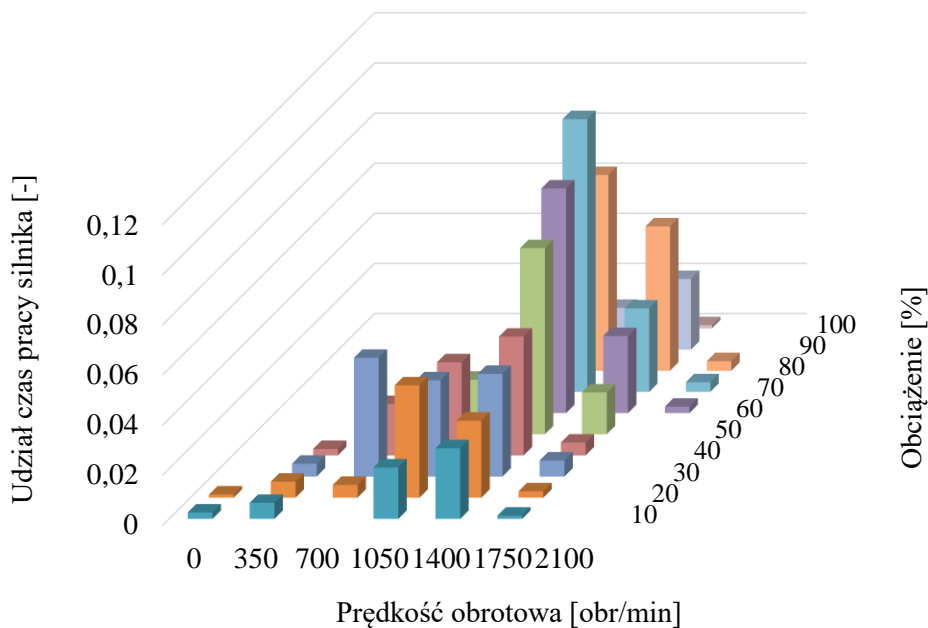


Rys. 7.32. Udział czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami



Rys. 7.33. Udział czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami w trybie sport

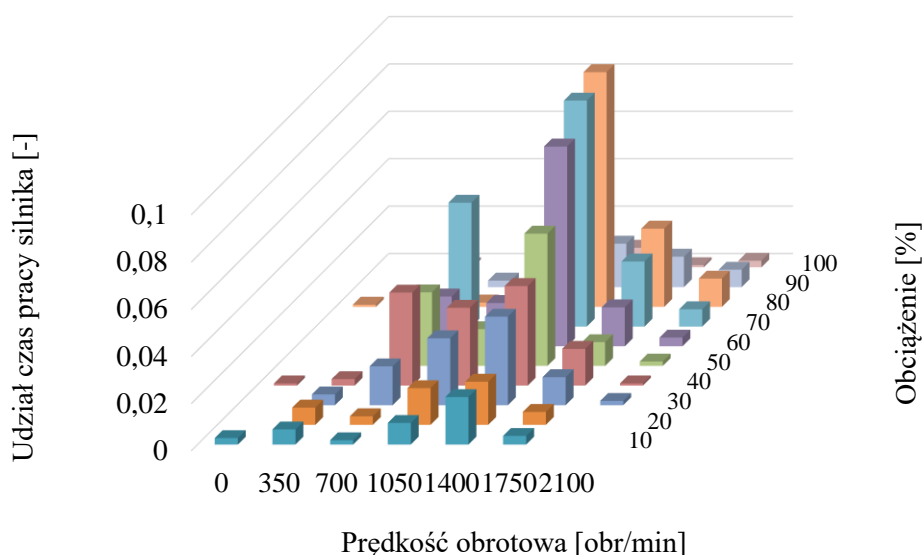
Przy pracy silnika spalinowego (rys. 7.34) podczas przejazdu bez aktywnych systemów uwagę zwraca głównie praca dla prędkości obrotowej z zakresu (1400-1750) obr/min w czasie jazdy.



Rys. 7.34. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia dla SUV ZS 2 z wyłączonymi systemami

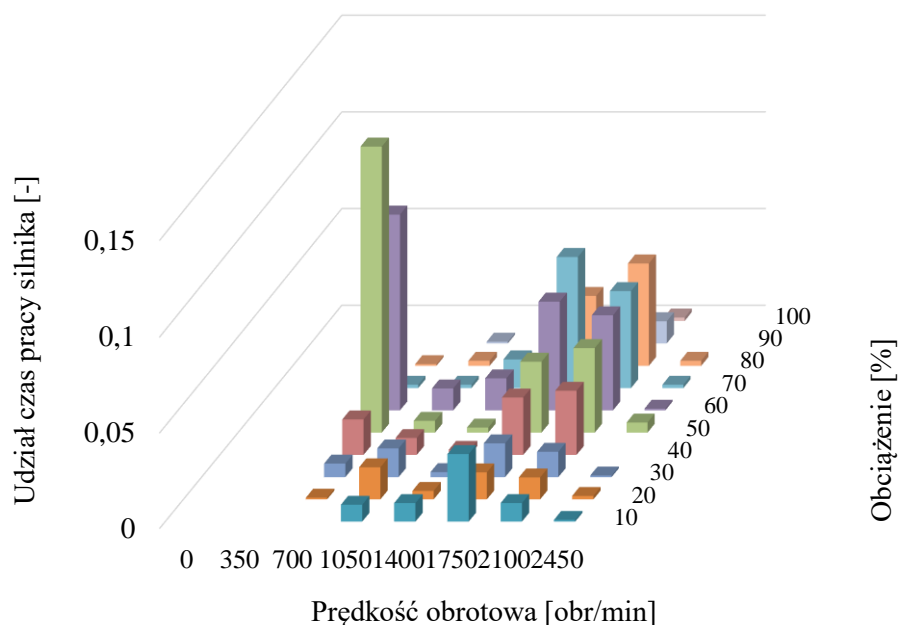
Uwagę zwraca również korzystanie z prawie całego pola pracy w zakresie obciążenia od 0 do maksimum. Większe wartości prędkości obrotowej wału zwykle stosowane były podczas przyspieszenia, bo podczas ich występowania prawie nie były obecne obciążenia silnika poniżej poziomu 40%.

Po aktywacji systemów komfortu wykres (rys. 7.35) zmienia się w niewielkim stopniu oraz zmniejszają się poszczególne wartości udziału czasu pracy, jednak charakter przejazdu jest bardzo zbliżony do tego bez aktywnych systemów.



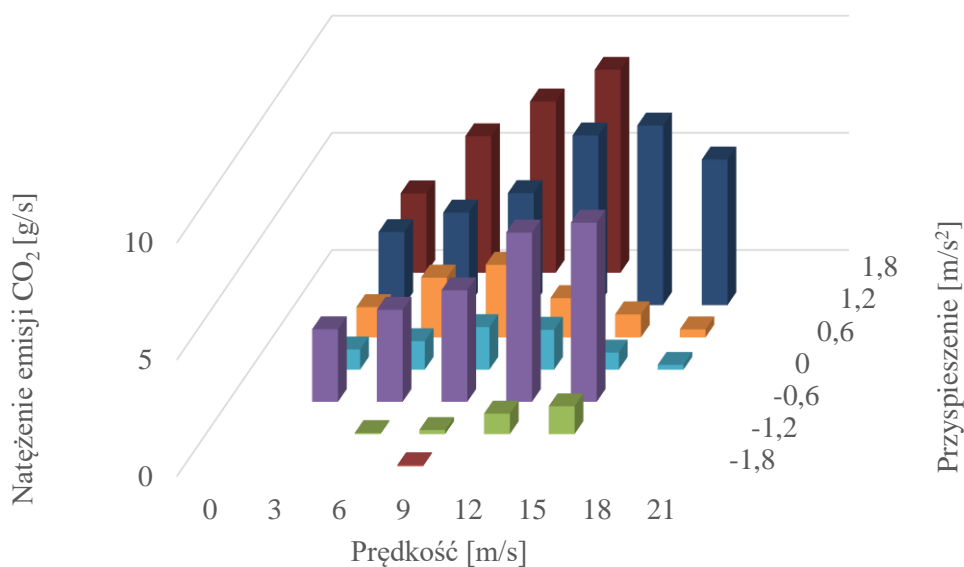
Rys. 7.35. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami

Aktywacja trybu sport (rys. 7.36) powoduje, dość duże zróżnicowanie wartości w poszczególnych zakresach. Podczas ostatniego cyklu pojazd zmieniał przełożenia przy zwiększonej prędkości obrotowej, ponadto udział czasu pracy wydaje się być bardziej proporcjonalny do wartości obciążenia.

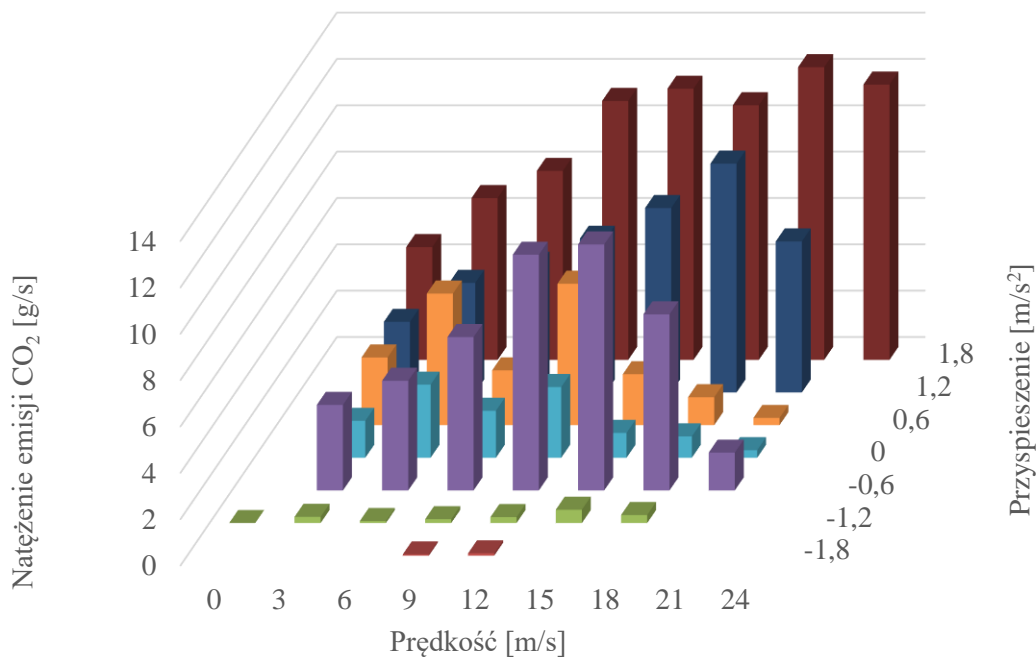


Rys. 7.36. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami w trybie sport

Analiza natężenia emisji dwutlenku węgla w zadanych przedziałach, w ramach przejazdu bez i z włączonymi systemami (rys. 7.37 i 7.38), wskazuje że wartości dla przyspieszenia powyżej $-1,2 \text{ m/s}^2$ są bardzo do siebie zbliżone, przy tych samych zakresach prędkości poruszania się.



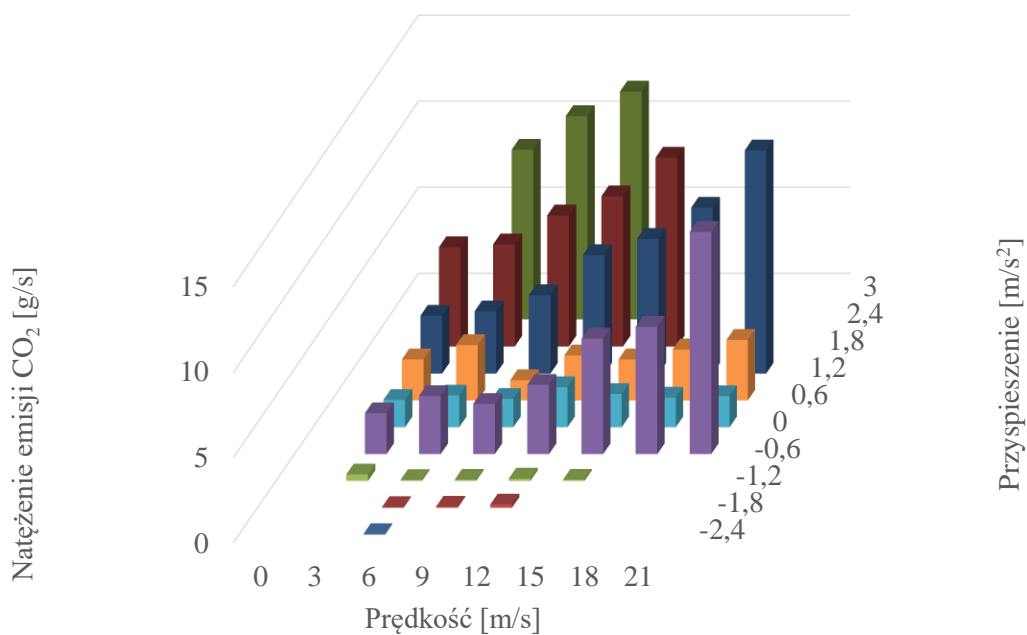
Rys. 7.37. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z wyłączonymi systemami



Rys. 7.38. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami

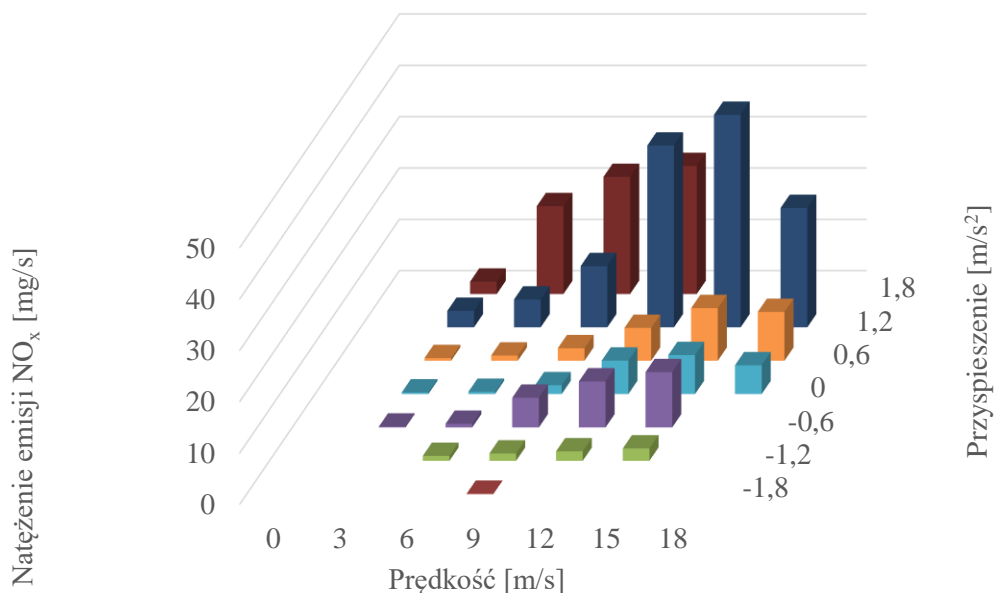
Maksima występują dla prędkości poruszania się z zakresu 14-18 m/s, dla mniejszych i większych prędkości poziom natężenia emisji zmniejsza się. Punktem charakterystycznym jest duża wartość natężenia emisji dla zakresu przyspieszenia 0,6-0 m/s², czyli dla procesu łagodnego hamowania i hamowania silnikiem. Sytuacja ta zachodzi dla wszystkich analizowanych cykli badawczych pojazdu SUV ZS2. Dla cyklu pierwszego bardzo zbliżone do siebie wartości natężenia emisji dla przyspieszenia z zakresu 1,2-1,8 m/s², a dla wartości większych natężenie emisja osiąga swoje lokalne maksimum w danych przedziałach prędkości. Wyniki natężenia emisji uzyskane w cyklu po włączeniu systemów proporcjonalnie zwiększyły się. Jest to widoczne zwłaszcza dla całego zakresu prędkości oraz zakresu przyspieszenia od -0,6-1,2 m/s². Kolejny wzrost widoczny jest dla wartości przyspieszenia powyżej 1,8 m/s², gdzie występujące maksimum natężenia emisji jest większe o około 60%.

W przypadku cyklu z systemami włączonymi i trybu sport (rys. 7.39) widoczna jest zależność wzrostowa między prędkością poruszania się a natężeniem emisji dwutlenku węgla. Wartość natężenia emisji jest większa niż dla przejazdu bez aktywnego trybu sport w założonych zakresach, ale wartości maksymalne są zbliżone do siebie. Wartości maksymalne występują dla maksymalnego przyspieszenia, powyżej 1,8 m/s², jednak uzyskiwane wartości są na zbliżonym lub mniejszym poziomie do emisji dla przejazdu bez aktywnego trybu sport.



Rys. 7.39. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami i w trybie sport

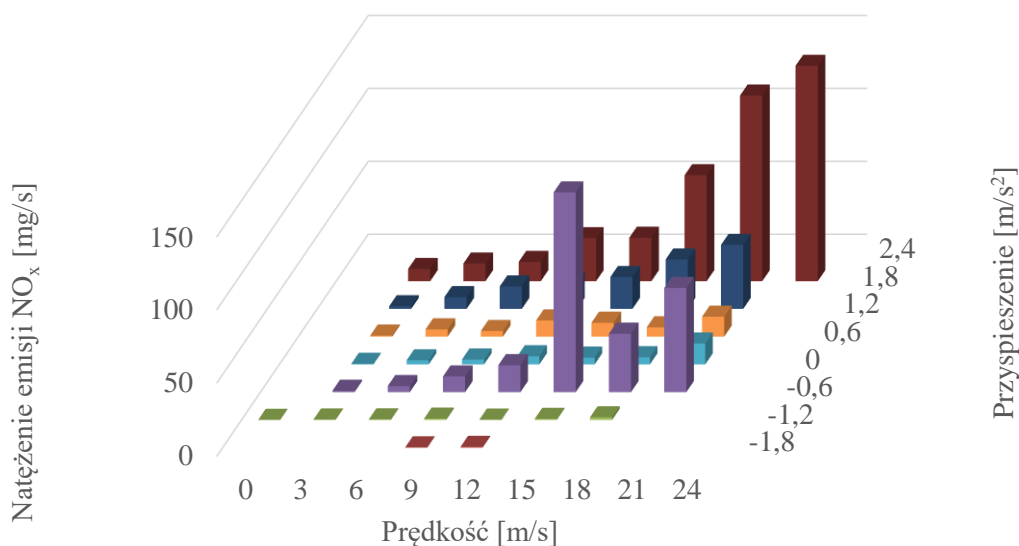
Następny analizowany składnik spalin to tlenki azotu. W ramach przejazdu bez aktywnych systemów (rys. 7.40) dopatrywać się można tendencji zbliżonych do natężenia emisji dwutlenku węgla, tzn. w zakresie przyspieszenia (0-1,2) m/s² widoczne jest zwiększanie natężenia emisji wraz ze wzrostem prędkości.



Rys. 7.40. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z wyłączonymi systemami

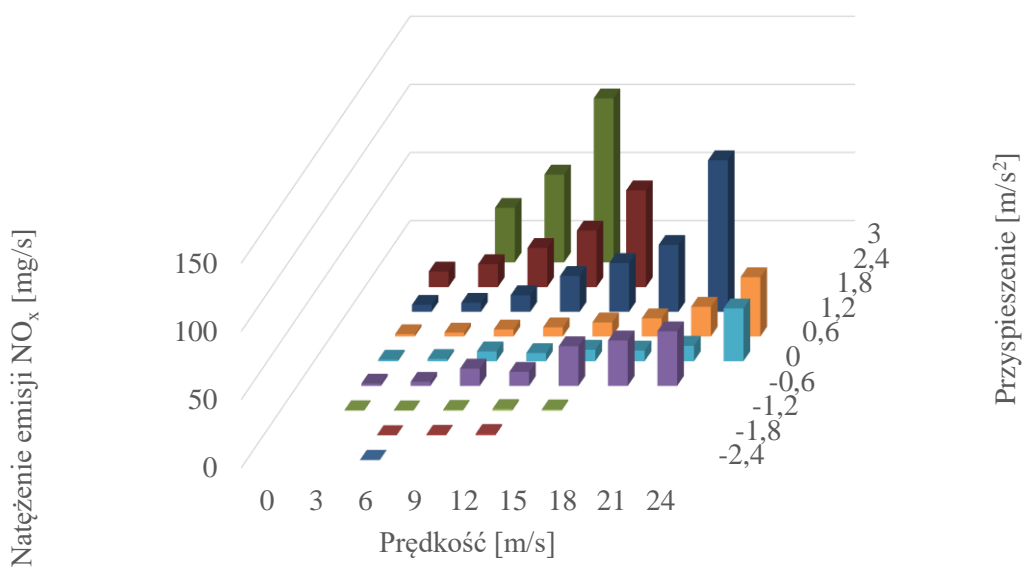
Poza tym dla procesu przyspieszenia wartości są większe. Maksyma uzyskiwane są dla przyspieszenia powyżej 1,2 m/s². Widoczne jest, zgodnie z teorią, zwiększone

natężenie emisji tlenków azotu przy zwiększonym przyspieszeniu pojazdu SUV ZS 2. Po użyciu systemów komfortu (rys. 7.41) maksymalne wartości natężenia emisji tlenków azotu zwiększają się przeszło 3-krotnie, jednak występują jedynie dla prędkości poruszania się 15 m/s i większej oraz przyspieszeniu w zakresie $(-1,2-0,6)$ i $1,8$ m/s², i więcej.



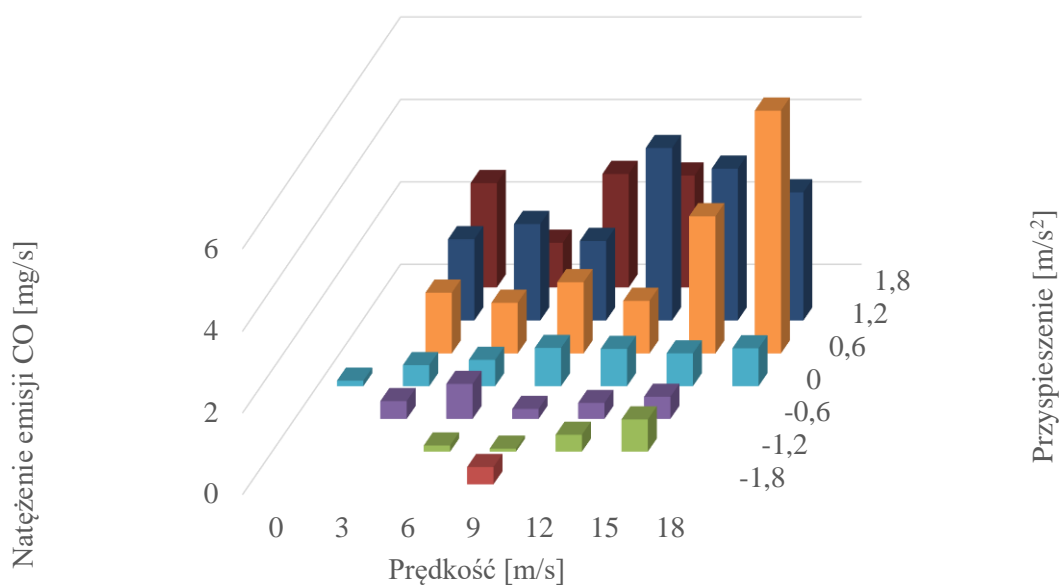
Rys. 7.41. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami

Aktywacja trybu sport (rys. 7.42) wpływa na rozkład natężenia emisji tlenków azotu. Zwiększa się natężenie emisji dla prędkości poruszania się poniżej 15 m/s, przede wszystkim dla największego rejestrowanego przyspieszenia, czyli zakresu $(1,8-3)$ m/s².

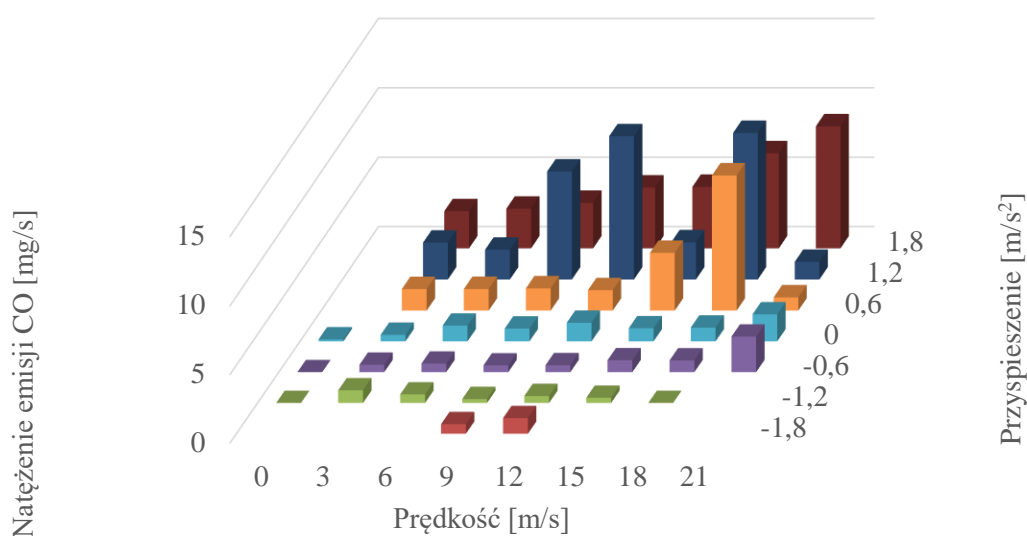


Rys. 7.42. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami i w trybie sport

Ostatnim analizowanym składnikiem w pomiarach pojazdu SUV ZS 2 był tlenek węgla. Podczas przejazdu bez aktywnych systemów (rys. 7.43) zauważyć można wyraźne proporcje między przyspieszeniem pojazdu a natężeniem emisji. Przy zwiększaniu się przedziałów wartości przyspieszenia od 0 m/s^2 do $1,8 \text{ m/s}^2$ większość wyników wzrasta. Zmniejszają się dopiero dla wartości powyżej $1,8 \text{ m/s}^2$. Rysunek 7.43 przedstawia zależność zgodną z teorią, gdzie zwiększanie prędkości powoduje wystąpienie stanów niestabilnych w pracy silnika oraz stopniowe zwiększanie się natężenia emisji. Aktywacja systemów komfortu (rys. 7.44) powoduje wzrost natężenia emisji w większości zakresów od wartości przyspieszenia 0 m/s^2 . Szczególnie duży wzrost zachodzi w zakresie przyspieszenia $1,2\text{-}1,8 \text{ m/s}^2$ (tam też występuje przeszło 2-krotnie większe maksimum).

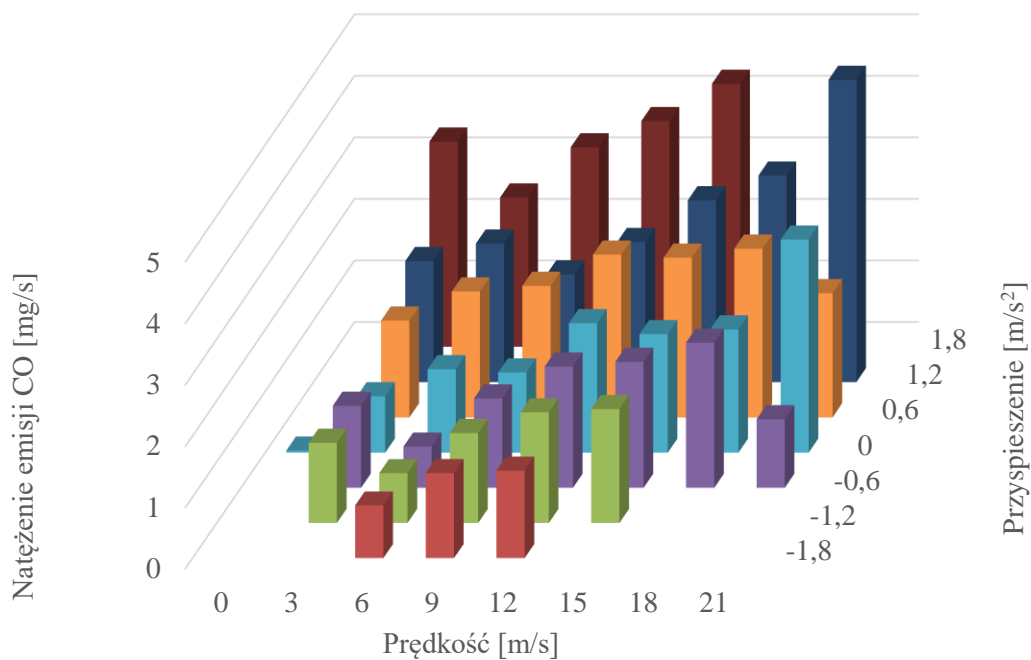


Rys. 7.43. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z wyłączonymi systemami



Rys. 7.44. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami

Aktywacja trybu sport (rys. 7.45) powoduje znaczny wzrost natężenia emisji dla wartości przyspieszenia poniżej 1 m/s^2 i poziomy te są względnie równe, zapewne jest to związane z pracą silnika na biegu jałowym. Same wartości są jednak na takim samym poziomie jak dla pojazdu bez włączonych systemów, znacznie mniejsze niż dla przejazdu bez trybu sport, co ponownie związane może być ze zwiększoną skutecznością pozasilnikowych układów oczyszczania spalin.



Rys. 7.45. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia dla SUV ZS 2 z włączonymi systemami w trybie sport

7.3.3. Pojazd hybrydowy

Analogiczne jak w przypadku poprzednich obiektów badawczych, w tabelach 7.8-7.10 zestawiono wartości minimalne oraz maksymalne wskaźników zarejestrowanych w trakcie badań pojazdu hybrydowego.

Tabela 7.8. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenia emisji spalin pojazdu hybrydowego z wyłączonymi systemami

	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-2,25	0	0	0	0	0	0
maksimum	19,6	1,89	1851	47,4	107	0	13,05	4,16

Tabela 7.9. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenia emisji spalin pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami

	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-2,25	0	0	0	0	0	0
maksimum	21,9	1,66	2232	51,9	53,02	0	14,53	10,26

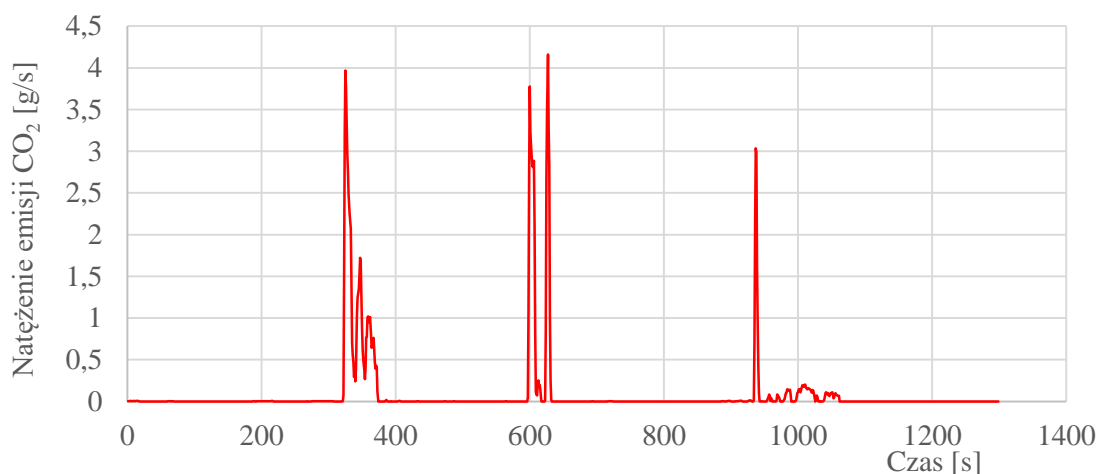
Tabela 7.10. Wartości maksymalne i minimalne przejazdu oraz natężenia emisji spalin pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami w trybie sport

	V	a	n	Z	CO	HC	NO_x	CO₂
	m/s	m/s ²	obr/min	%	mg/s	mg/s	mg/s	g/s
minimum	0	-2,14	0	0	0	0	0	0
maksimum	20,1	1,94	2911	54,6	9,7	0	9,1	8,23

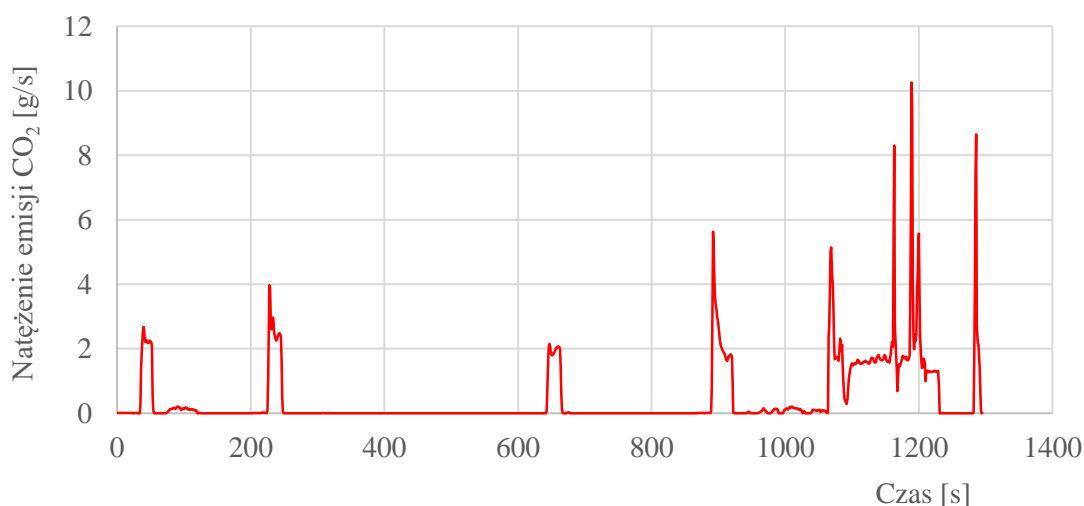
Podczas przejazdu z wyłączonymi systemami komfortu zaobserwowano największą wartość natężenia emisji tlenku węgla (106,73 mg/s) oraz najmniejszą wartość maksymalnego natężenia emisji dwutlenku węgla (4,16 g/s). Maksymalne natężenie emisji tlenków azotu zarejestrowano podczas jazdy z włączonymi systemami komfortu i bezpieczeństwa, natomiast najmniejsza wartość natężenia emisji tlenku węgla wystąpiła podczas przejazdu z aktywnym trybem sportowym. W trakcie tego przejazdu osiągnięto maksymalną wartość obciążenia jednostki napędowej wynoszącą 54,6%. Wartość ta była większa kolejno o ok. 15% względem przejazdu bez systemów komfortu oraz o ok. 5% względem jazdy z tymi systemami. Ze względu na charakter trasy badawczej, która przebiegała w obszarze zabudowanym, maksymalne wartości prędkości w każdym z wariantów badania są do siebie zbliżone.

Analogicznie do poprzednich obiektów badawczych, także dla pojazdu hybrydowego przeprowadzono szczegółową analizę natężeń emisji związków szkodliwych gazów wylotowych. Przeanalizowano przebiegi natężenia emisji dwutlenku węgla dla kolejno następujących po sobie wariantów przejazdu. W przypadku przejazdu z wyłączonymi (rys. 7.46) oraz z włączonymi (rys. 7.47)

systemami komfortu natężenie emisji dwutlenku węgla w dużej części wynosiło 0 g/s, co wynika z faktu, iż układ hybrydowy wykorzystywał głównie silnik elektryczny do napędu pojazdu podczas przejazdu trasy badawczej.

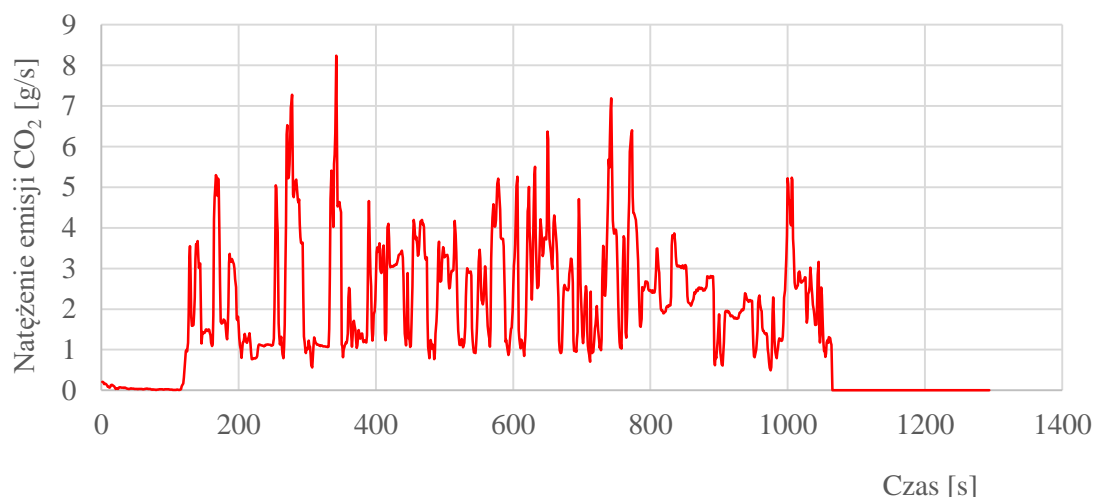


Rys. 7.46. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla w czasie dla pojazdu hybrydowego z wyłączonymi systemami



Rys. 7.47. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla w czasie dla pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami

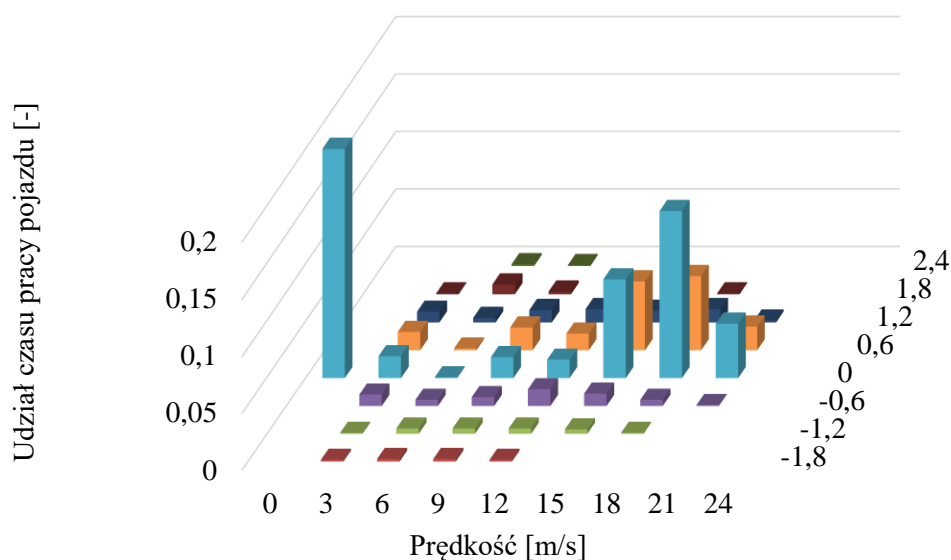
Dla omawianych przebiegów charakterystyczne są nieregularne piki natężenia emisji związku, które odpowiadają wykorzystaniu obciążonego silnika spalinowego. Istotne jest także, że przejazd z włączonymi układami komfortu cechował się częstszym wykorzystaniem spalinowej jednostki napędowej, o czym świadczy większa liczba pików natężenia emisji. W trakcie przejazdu w trybie sportowym układ napędowy z kolei całkowicie korzystał z energii wytworzonej przez silnik spalinowy (rys. 7.48).



Rys. 7.48. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla w czasie dla pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami w trybie sport

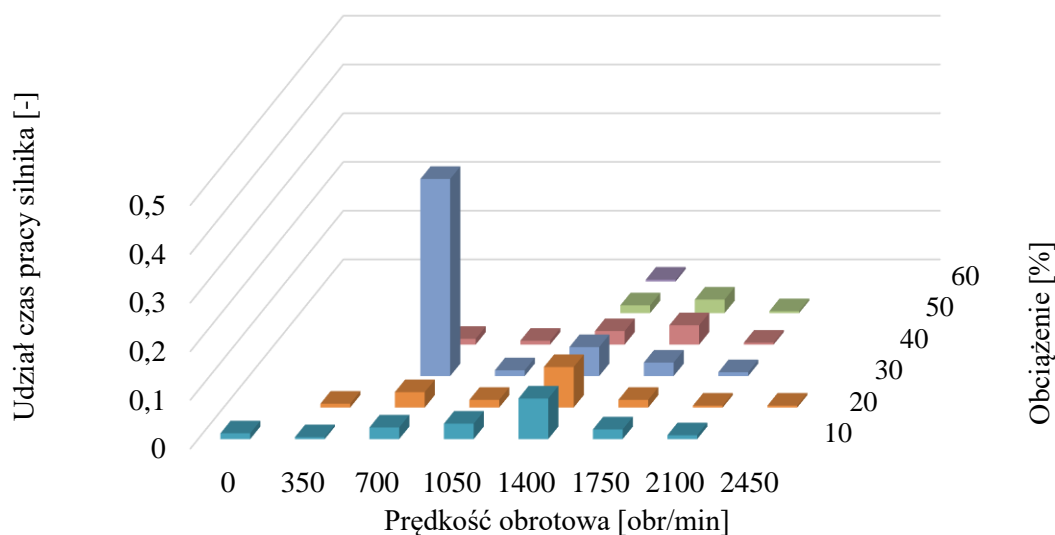
Celem dalszej analizy sporządzono również charakterystyki czasu pracy w zależności od prędkości oraz przyspieszenia pojazdu. Należy zauważyć, iż charakterystyki są do siebie zbliżone, co jest konsekwencją podobnych (powtarzalnych) warunków panujących na trasie badawczej. Potwierdza to zasadność porównywania ze sobą wszystkich trzech wariantów przejazdów. W analizowanym teście badawczym znaczący udział miały zatrzymania pojazdu, które były konsekwencją wzmożonego ruchu. Udział postojów wynosił dla opisywanych przejazdów kolejno 30%, 21% oraz 24%. Dla przejazdu bez i z włączonymi systemami znaczący obszar obejmował zakres prędkości od 15-21 m/s oraz przyspieszenia 0-0,6 m/s².

Należy zauważyć, iż otrzymane wykresy udziału czasu pracy są do siebie podobne dla przejazdów z włączonymi oraz wyłączonymi systemami komfortu (rys. 7.49).



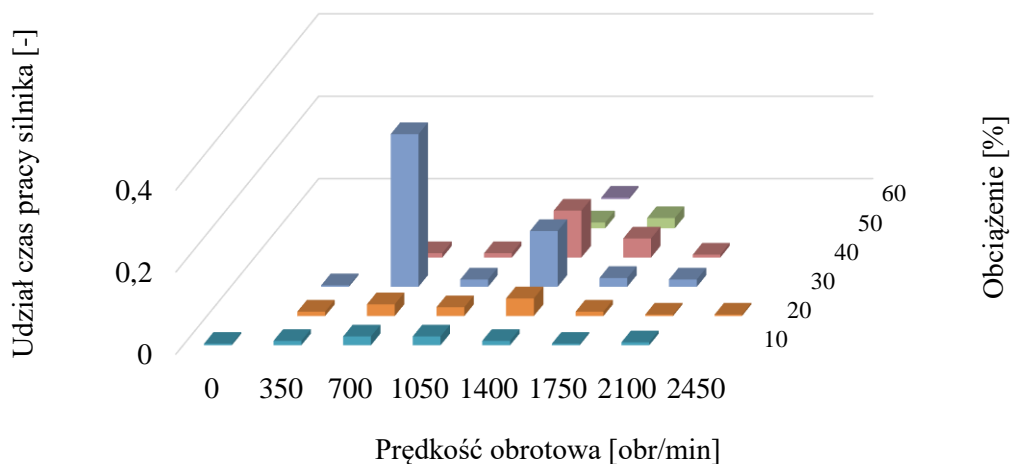
Rys. 7.49. Udział czasu pracy pojazdu w zależności od prędkości i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z wyłączonymi systemami

Wynika to bezpośrednio z faktu, iż w trybie tym badany pojazd hybrydowy pracował głównie z wykorzystaniem silnika spalinowego. W trakcie tego przejazdu zaobserwowano prędkość obrotową z zakresu (0-3150) obr/min, jednak obiekt pracował przede wszystkim na prędkościach obrotowych z zakresu (700-2800) obr/min oraz obciążeniu wynoszącym do 40%. Największy udział czasu pracy (11%) wystąpił dla prędkości obrotowej równej 2100 obr/min oraz 30% obciążenia. W trybie sport skupiając się na pracy samego silnika spalinowego, zauważa się, że najczęściej występuje zakres prędkości obrotowej (750-1000) obr/min oraz 30-40% obciążenia (rys. 7.52).

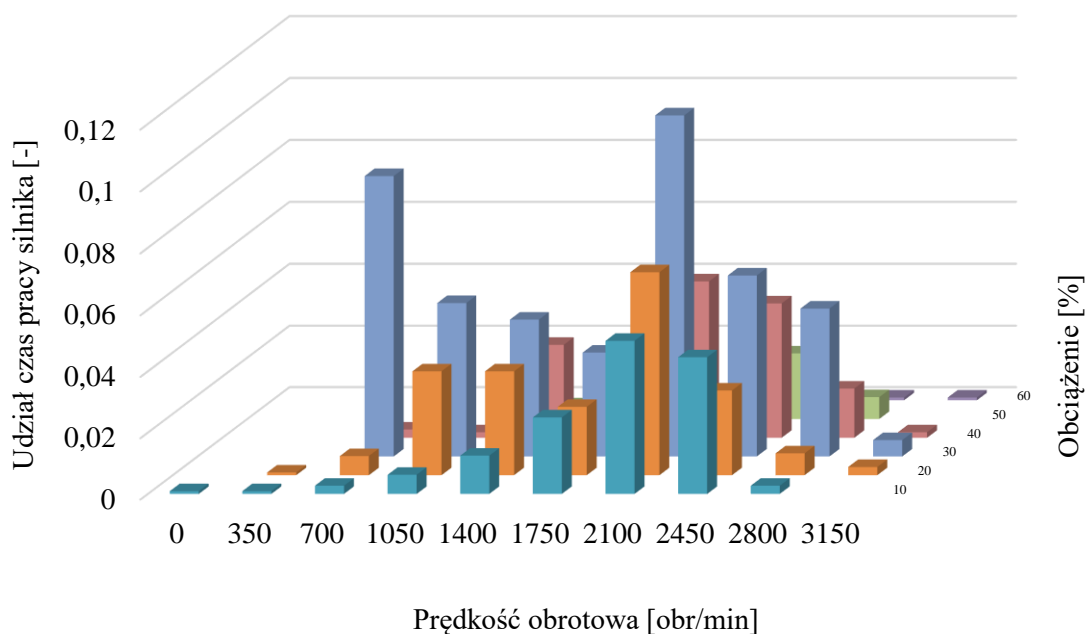


Rys. 7.52. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami

Ponadto uwidacznia się zakres (1400-1750) obr/min przy obciążeniu 40% i mniejszym. Zauważalny jest tu wpływ przekładni, która zmienia biegi na wyższe przy prędkości obrotowej nie większej niż 2100 obr/min i niejednokrotnie utrzymuje punkty pracy jak w pierwszym wspomnianym polu pracy. Włączenie systemów nieznacznie wpływa na otrzymane charakterystyki (rys. 7.53 i rys. 7.54).

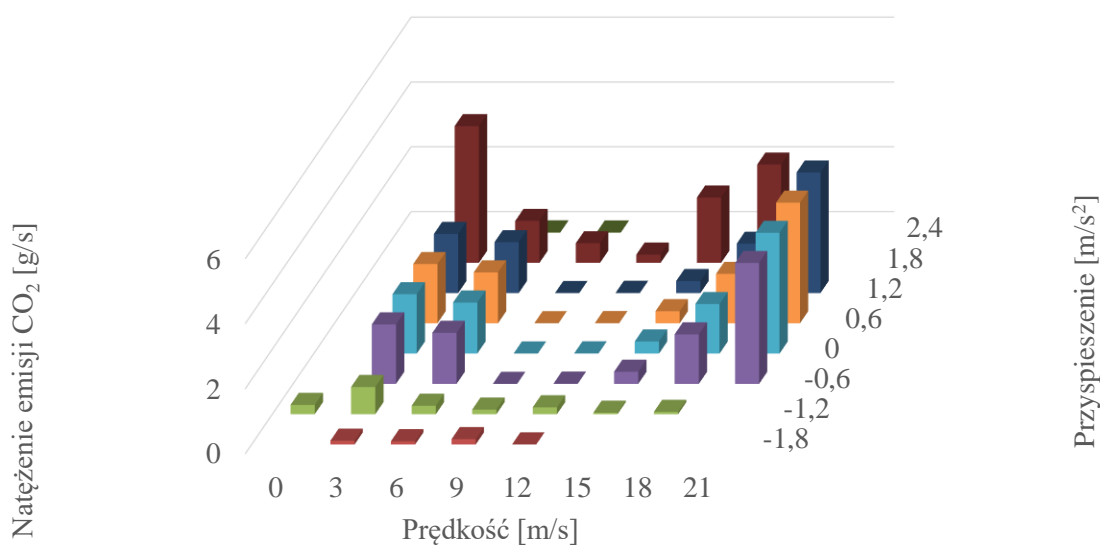


Rys. 7.53. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia pojazdu hybrydowego z wyłączonymi systemami



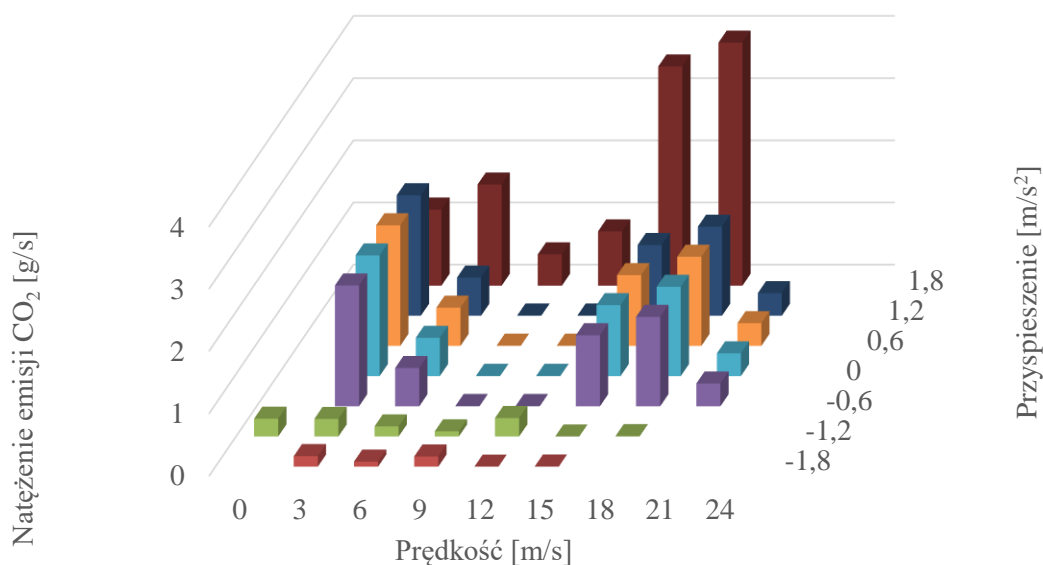
Rys. 7.54. Udział czasu pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami w trybie sport

Następnie przeanalizowano natężenie emisji dwutlenku węgla w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu hybrydowego. Dla przejazdu, w którym systemy komfortu były wyłączone, można zaobserwować trzy główne obszary ze zwiększonym natężeniem emisji związku. Obszary te zawierają się w prędkościach z zakresu (3-6) m/s, (15-18) m/s i (18-21) m/s oraz przyspieszeniu z zakresu $(-1,2-1,8)$ m/s², $-0,6$ m/s² i $(1,2-1,8)$ m/s² (rys. 7.55). Maksymalna wartość natężenia emisji dwutlenku węgla wynosząca 7,4 g/s wystąpiła dla prędkości z zakresu (18-21) m/s oraz przyspieszenie wynoszącego $(-0,6-0)$ m/s².



Rys. 7.55. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z wyłączonymi systemami

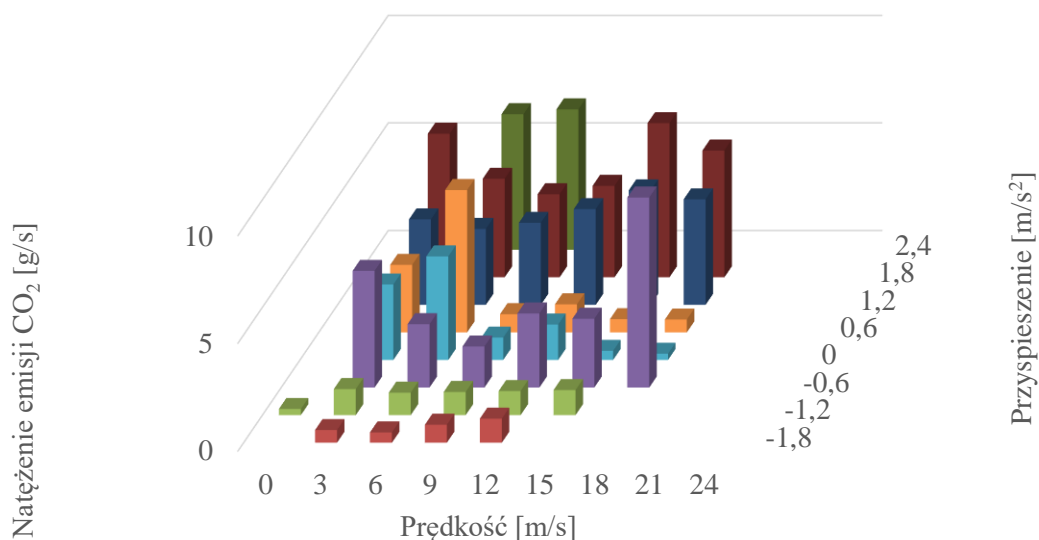
Zbliżone obszary natężenia emisji CO₂ można zaobserwować dla części testu badawczego, w której pojazd poruszał się z uruchomionymi systemami komfortu (rys. 7.56).



Rys. 7.56. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami

Istotne jest, iż w przypadku tego wariantu znaczne natężenie emisji wystąpiło również dla maksymalnego przejazdu przyspieszenia (1,8 m/s²) i prędkości wynoszącej od 3 do 21 m/s. Największe wartości natężenia emisji związku odnotowano dla największego przyspieszenia oraz prędkości z przedziału (15-18) m/s. Wynosiły one kolejno 3,5 g/s oraz 3,9 g/s.

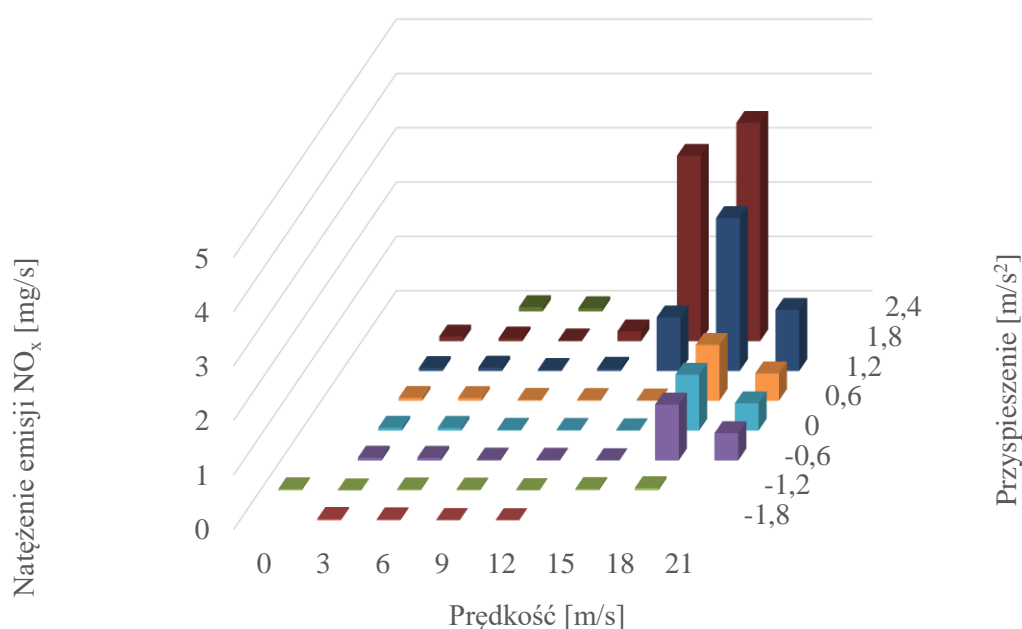
Odmienne rozkład natężeń otrzymano dla przejazdu, w którym pojazd poruszał się w trybie sportowym (rys. 7.57).



Rys. 7.57. Natężenie emisji dwutlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami w trybie sport

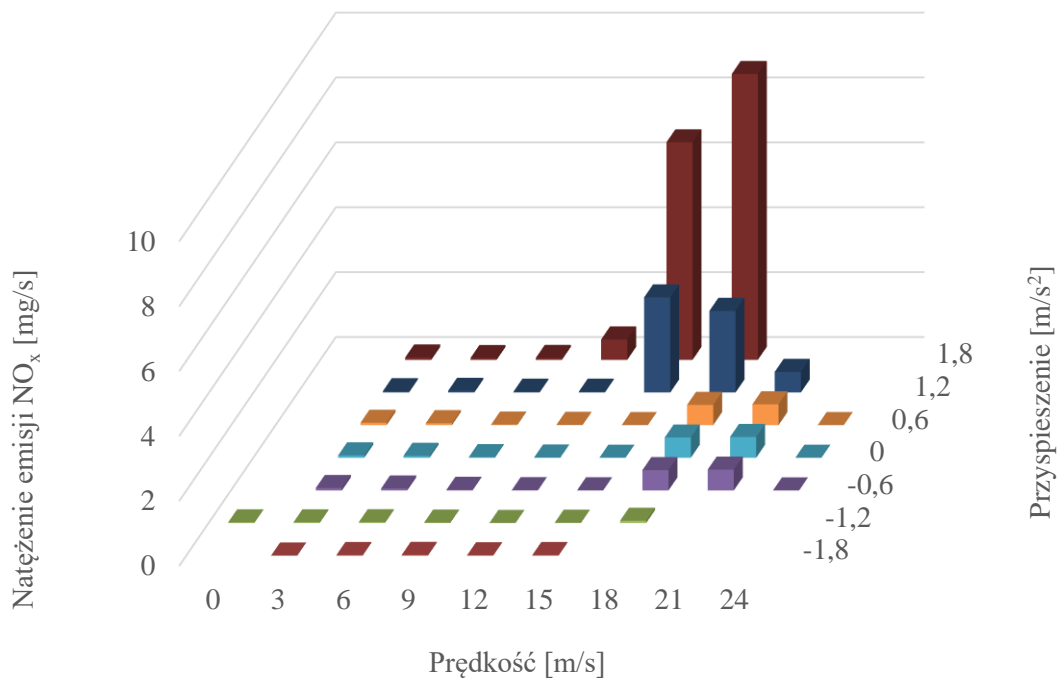
W tym przypadku natężenia emisji dwutlenku węgla wystąpiło dla prędkości z zakresu (0-18) m/s oraz w całym zakresie przyspieszenia. Potwierdza to, iż w chwili zwiększonego zapotrzebowania na energię główną rolę w jej wytworzeniu odgrywa jednostka spaliniowa, co wynika także z proporcji mocy obydwu jednostek (różnica jest niemal czterokrotna). Analizując otrzymane charakterystyki, można zauważyć, że znaczne natężenie emisji zaobserwowano dla przyspieszenia wynoszącego $(-0,6-2,4)$ m/s² oraz całego wskazanego wcześniej zakresu prędkości. Wyjątek stanowi obszar prędkości z zakresu (9-18) m/s oraz przyspieszenia (0-0,6) m/s². Największe wartości natężenia emisji wynoszące ponad 8 g/s zarejestrowano dla maksymalnych wartości prędkości oraz przyspieszenia na poziomie $-0,6$ m/s².

Zestawienie charakterystyki natężenia emisji tlenków azotu w zależności od prędkości i przyspieszenia dla przejazdu bez uruchomionych systemów przedstawiono na rys. 7.58.



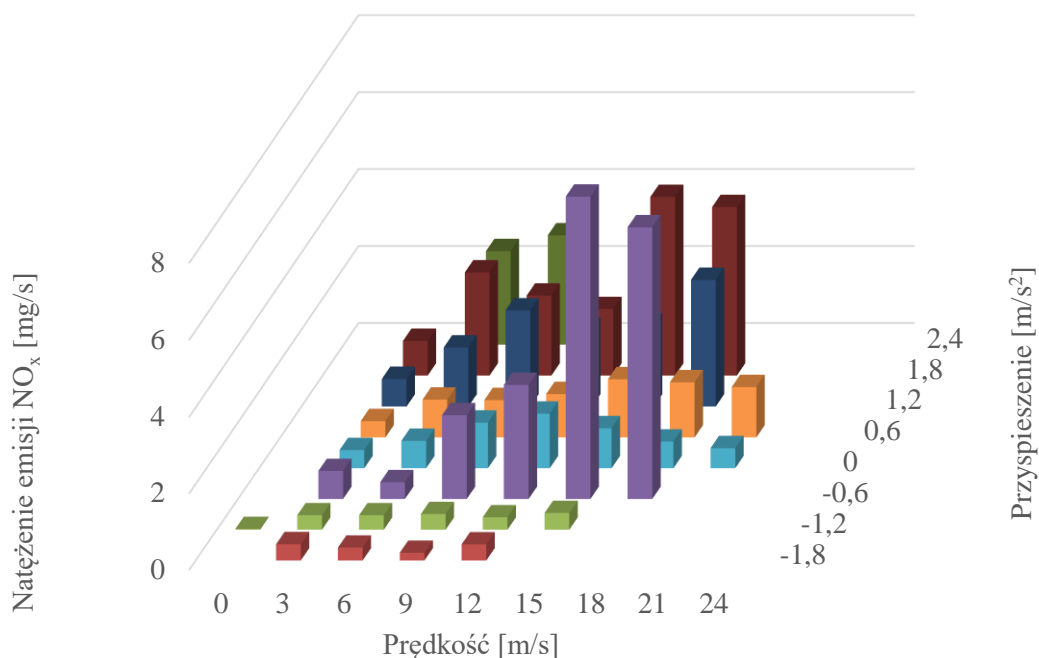
Rys. 7.58. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z wyłączonymi systemami

Podobnie do rozkładów natężeń emisji dwutlenku węgla, także w przypadku tlenków azotu można zaobserwować, iż charakterystyki otrzymane dla jazdy z włączonymi i wyłączonymi systemami komfortu są do siebie zbliżone (rys. 7.59). Główne obszary ze zwiększonym natężeniem emisji związku wystąpiły dla prędkości z zakresu 18-21 m/s i przyspieszenia z zakresu $(-0,6-0,6)$ m/s² oraz prędkości wynoszących (15-21) m/s i przyspieszenia z zakresu (1,2-1,8) m/s². Również w obu przypadkach największą wartość natężenia emisji tlenków azotu zaobserwowano dla prędkości 18 m/s oraz przyspieszenia równego 1,8 m/s². Dla jazdy bez systemów komfortu wynosiła ona ok. 4 mg/s. Dla przejazdu z uruchomionymi systemami komfortu wartość maksymalna była przeszło 2-krotnie większa.



Rys. 7.59. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami

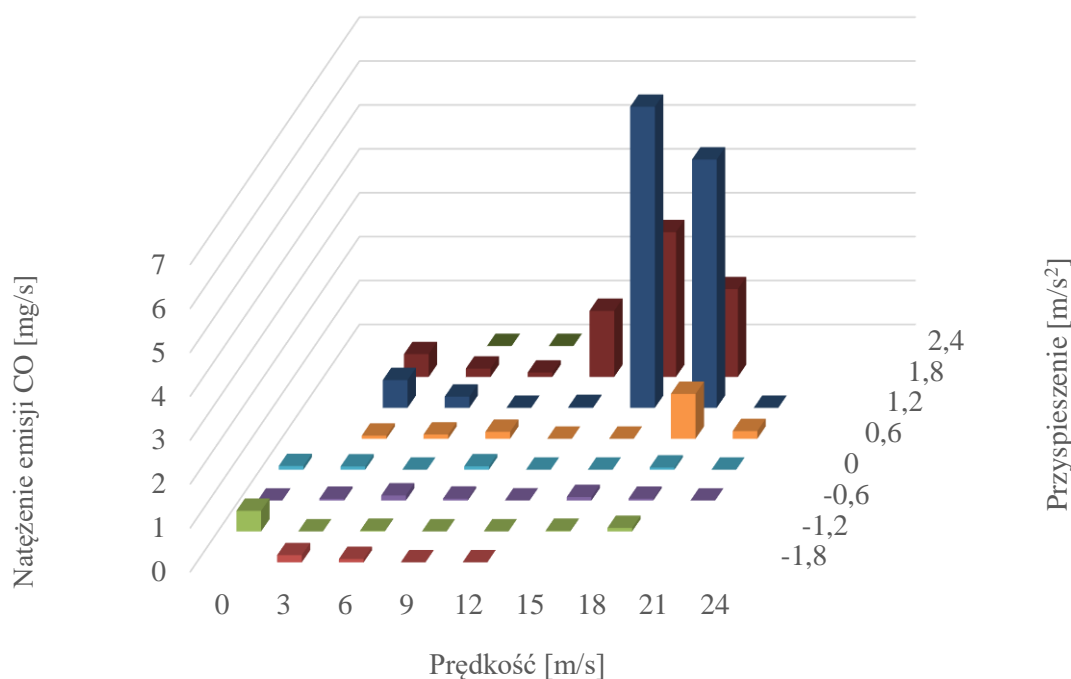
W odniesieniu do przejazdu z włączonym trybem sportowym, charakterystyka wskazuje wzrost natężenia emisji tlenków azotu wraz ze wzrostem wartości prędkości oraz przyspieszenia (rys. 7.60).



Rys. 7.60. Natężenie emisji tlenków azotu w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami w trybie sport

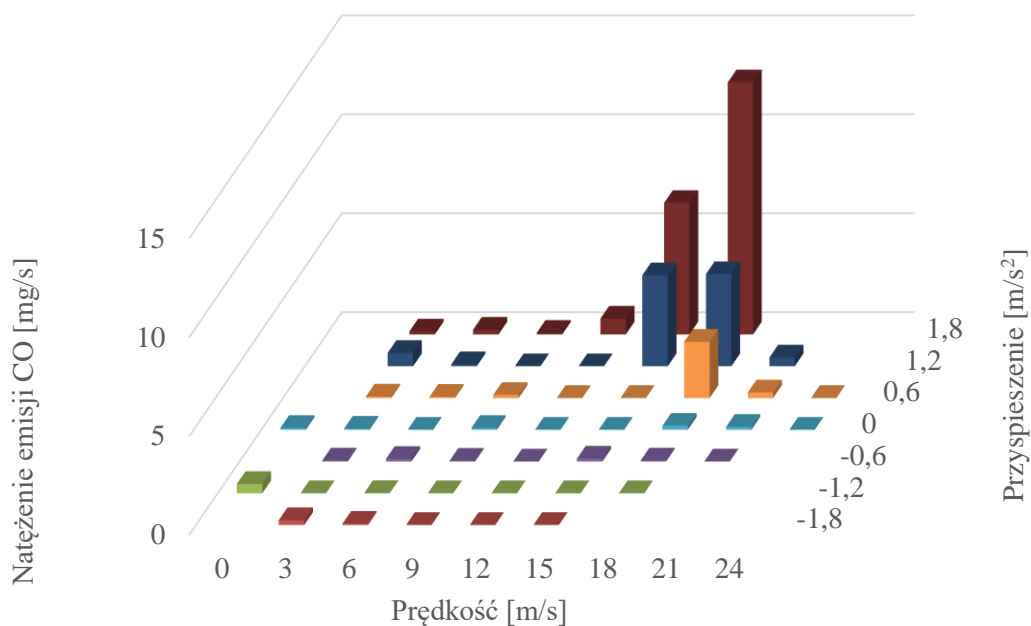
Wynika to z wcześniej opisanego mechanizmu powstawania tego związku w komorze spalania. W tym przypadku obszar ze znacznym natężeniem emisji jest większy w porównaniu do dwóch poprzednich charakterystyk. Otrzymanie takiej charakterystyki było możliwe, gdyż w trybie sport silnik spalinowy pracował przez cały okres badania, a nie jak w przypadku wcześniejszych przejazdów jedynie okresowo. Analizując charakterystykę, wyróżnić można dwa główne obszary pracy ze wzmożonym natężeniem emisji związku. Zachodzą one dla prędkości z przedziałów (3-6) m/s i (12-18) m/s oraz przyspieszenia z przedziałów $(-0,6-0,6)$ m/s² i $(1,2-1,8)$ m/s². Istotne znaczenie w natężeniu emisji tlenków azotu miał również obszar maksymalnego przyspieszenia oraz prędkości z zakresu (6-9) m/s. Maksymalna wartość natężenia wyniosła 7,7 mg/s.

Przedstawiona charakterystyka tlenku węgla (rys. 7.61) wskazuje, że głównym obszarem pracy pojazdu, w którym wystąpiło znaczne natężenie emisji tego związku, jest pole opisane przez prędkość z zakresu (15-18) m/s oraz przyspieszenie z przedziału $(1,2-1,8)$ m/s².



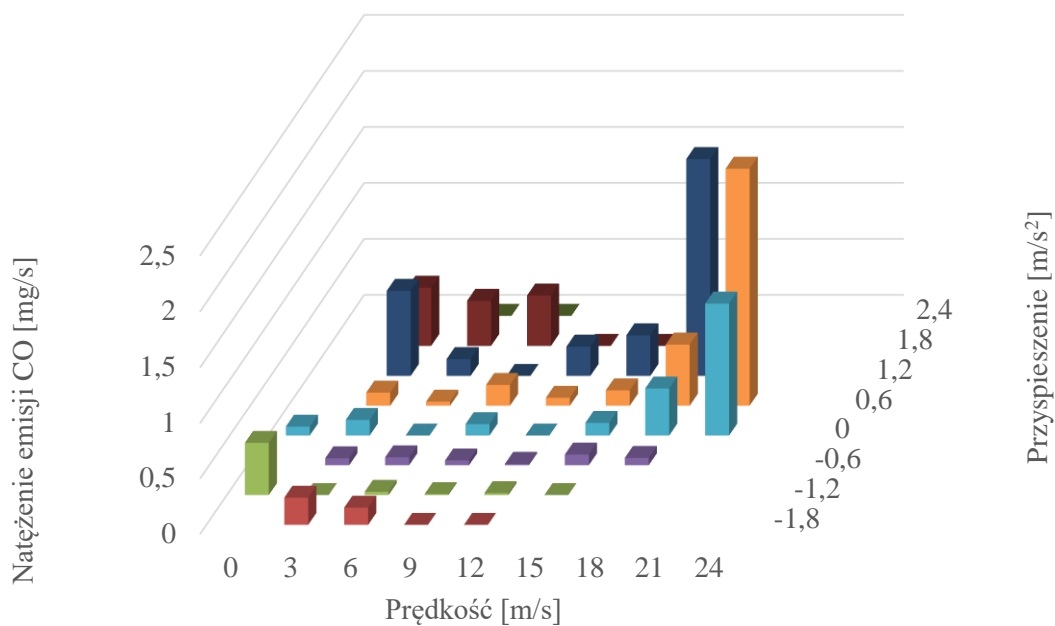
Rys. 7.61. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z wyłączonymi systemami

Zakresy te obecne są zarówno podczas przejazdu z włączonymi jak i wyłączonymi systemami (rys. 7.62). Dla pierwszego wariantu, maksymalne natężenie emisji CO (6,9 mg/s) wystąpiło przy parametrach pracy równych zakresom odpowiednio (12-15) m/s oraz $(0,6-1,2)$ m/s². W odniesieniu do przejazdu z użyciem systemów komfortu, maksimum natężenia (12,7 mg/s) odnotowano dla parametrów ruchu odpowiednio z zakresu (15-18) m/s oraz $(1,2-1,8)$ m/s².



Rys. 7.62. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami

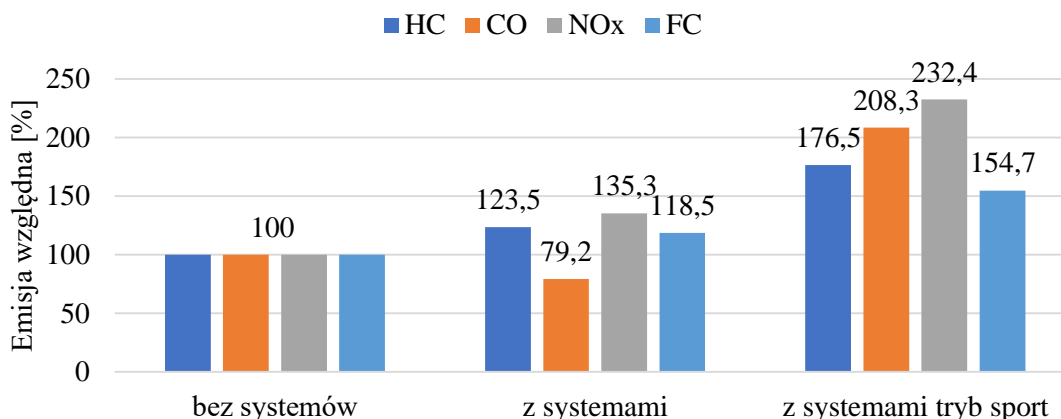
W przypadku rozkładu natężenia odnoszącego się do jazdy w trybie sportowym bardzo trudno jest wyodrębnić jeden główny obszar, w którym wystąpiło znaczące natężenie emisji tlenku węgla. Największe wskaźniki zarejestrowano dla zakresów pracy: (18-21) m/s i (0,6-1,2) m/s² oraz (21-24) m/s i (0-1,2) m/s². Ich wartości one kolejno 1,9 mg/s, 1,18 mg/s i 2,12 mg/s (rys. 7.63).



Rys. 7.63. Natężenie emisji tlenku węgla w zależności od prędkości poruszania się i przyspieszenia pojazdu hybrydowego z włączonymi systemami w trybie sport

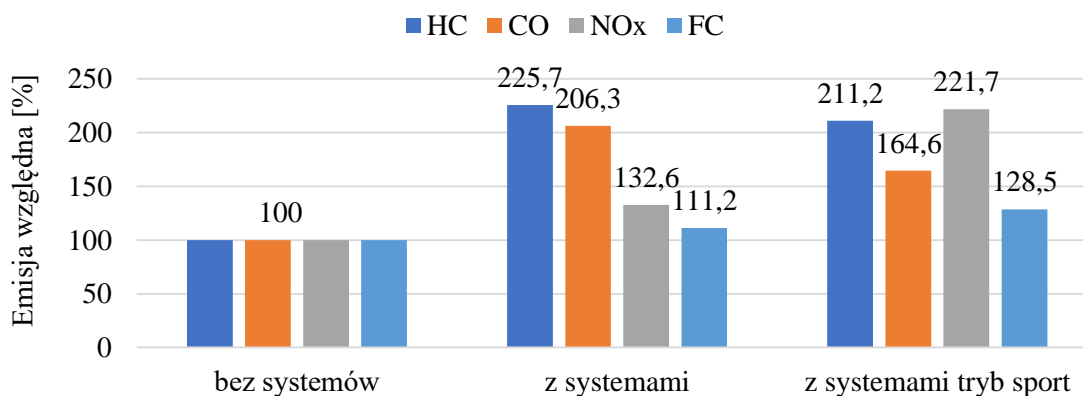
7.4. Podsumowanie działu

Uzyskane wyniki emisji przebiegowej uśredniono dla każdego przejazdu pojazdów badanych w warunkach rzeczywistych, przeliczono je na wartości względne w poszczególnych cyklach, gdzie odniesieniem był przejazd pojazdu z uprzednio rozgrzanym silnikiem/układem napędowym. Emisję poszczególnych związków toksycznych w tym przejeździe oznaczono jako 100% i w odniesieniu do nich komentowano użycie systemów komfortu. Uśrednione wyniki emisji związków toksycznych i zużycia paliwa dla SUV ZI 4 zamieszczono na rys. 7.64.



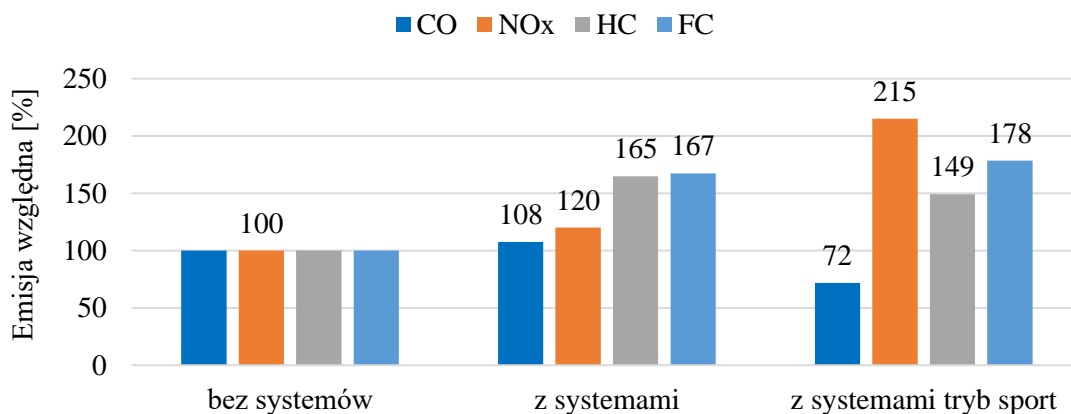
Rys. 7.64. Względna emisja składników toksycznych i zużycie paliwa dla pojazdu SUV ZI 4

Zastosowanie systemów komfortu zwiększa emisję węglowodorów i tlenków azotu o odpowiednio 23,5% i 35,5%. Użycie trybu sport zwiększa te wartości o ponad 50 punktów dla CO i prawie 100 punktów procentowych dla tlenków azotu. Dla tlenku węgla włączenie systemów zmniejsza wartość o prawie 20%, ale w trybie sport zwiększa się ona ponad dwukrotnie. Zużycie paliwa zwiększa się po zastosowaniu systemów o prawie 20%, a w trybie sport o prawie 55%. Dla pojazdu SUV ZI 4 wpływ systemów ma wyraźne odzwierciedlenie w charakterystykach emisji i niemal w każdym z badanych związków zwiększa wartości emisji oraz zużycie paliwa. W przypadku pojazdu SUV ZS 2 wyniki przedstawiają się inaczej (rys. 7.65).



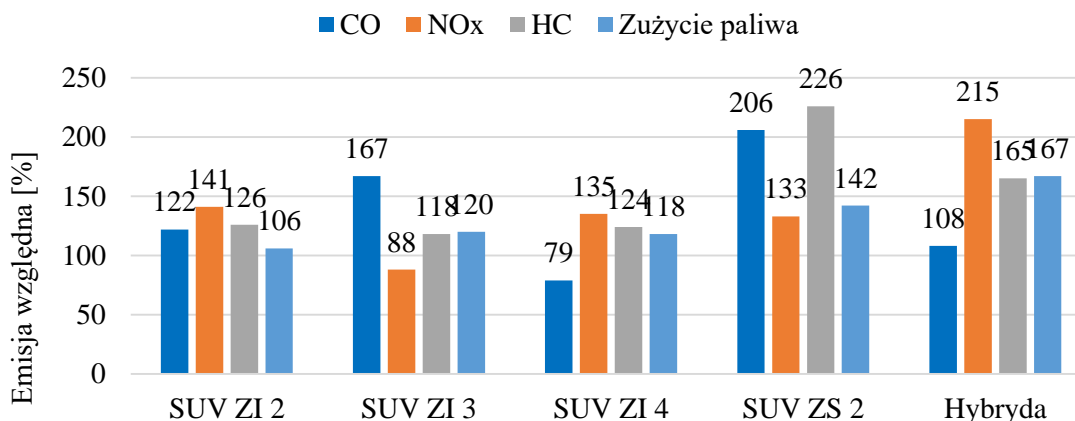
Rys. 7.65. Względna emisja składników toksycznych i zużycie paliwa dla SUV ZS 2

Analizując emisję związków toksycznych i zużycie paliwa pojazdu SUV ZS 2 stwierdzono, że we wszystkich badanych związkach następuje wzrost emisji. Dla węglowodorów i tlenku węgla przyrosty odnotowane po włączeniu systemów są większe bez aktywnego trybu sport. Wynoszą one odpowiednio przeszło 125% i 105%. W trybie sport zmniejszają się one do niecałych 112% i 65%. Dla tlenków azotu sytuacja jest odwrotna i użycie systemów zwiększa emisję o prawie 33%, a dodatkowe włączenie trybu sport o przeszło 120%. Dla zużycia paliwa wzrost wynosi odpowiednio ponad 11% i 28%. Kolejnym analizowanym pojazdem była hybryda (rys. 7.66).



Rys. 7.66. Emisja składników toksycznych i zużycie paliwa dla pojazdu hybrydowego

Dla pojazdu hybrydowego emisja związków toksycznych i zużycie paliwa wzrasta. Po zastosowaniu systemów komfortu przyrosty natężenia emisji tlenku węgla i tlenków azotu są stosunkowo niewielkie i wynoszą odpowiednio 8% i 20%. Przyrost zużycia paliwa i emisji węglowodorów jest zbliżony i wynosi około 65%, co jest wartością największą we wszystkich badanych obiektach. Aktywacja trybu sport zmniejsza emisję CO o 28%, a węglowodorów o 49%, co jest mniejszym przyrostem niż w standardowym trybie. Natomiast emisja tlenków azotu przyrasta niemal dwukrotnie, a zużycie paliwo niemal o 80%, co jest największą zarejestrowaną różnicą w jego zużyciu w ramach przeprowadzonych badań. Uzyskane wyniki użycia systemów zostały zestawione w ramach jednego wykresu (rys. 7.67).



Rys. 7.67. Względna zmiana emisji składników toksycznych i zużycia paliwa dla wszystkich badanych pojazdów

Dla każdego ze współczynników punktem odniesienia była emisja uzyskana podczas badania rozgrzanego silnika z wyłączonymi systemami komfortu pojazdu. W przypadku badania na hamowni podwoziowej SUV ZI 2 wyposażony w silnik ZI cechował się wzrostem emisji każdego ze związków. Największy, ponad 40% wzrost zaobserwowano dla tlenków azotu. Emisja tlenku węgla wzrosła o 22%, a węglowodorów o 26%. Zużycie paliwa wzrosło stosunkowo niewiele – o 6 punktów procentowych. Zupełnie inne tendencje zaobserwowano dla SUV ZI 3, który również był badany na hamowni. W przypadku tego pojazdu zaobserwowano 12% zmniejszenie emisji tlenków azotu. Wzrosła zatem emisja dwutlenku węgla, a badanie wykazało 20% wzrost zużycia paliwa. Zaobserwowano również większą emisję tlenku węgla oraz węglowodorów. Emisja tlenku węgla była o 25 punktów procentowych większa względem SUV ZI 1. W przypadku węglowodorów zanotowana emisja była natomiast mniejsza o 8 punktów procentowych względem SUV ZI 2.

Badanie RDE z włączonymi systemami bezpieczeństwa i komfortu pojazdu z silnikiem benzynowym (SUV ZI 4) wykazało 35% wzrost emisji tlenków azotu oraz 24% wzrost emisji węglowodorów. Odnotowano natomiast 21% zmniejszenie emisji tlenku węgla, co zapewne wynika z działania TWC. O 18% wzrosło również zużycie paliwa przez jednostkę napędową. Dodatkowe obciążenie pojazdu skutkowało wzrostem emisji każdego ze związków toksycznych. Zwiększenie emisji wynosiło kolejno 41%, 72% oraz 30% dla tlenku węgla, tlenków azotu i węglowodorów. Największy wskaźnik wystąpił dla tlenków azotu, gdzie zarejestrowano mniejszą emisję dwutlenku węgla oraz w konsekwencji stosunkowo mniejsze zużycie paliwa względem badania bez obciążenia. Natomiast nadal było ono większe o 11% w porównaniu do zużycia paliwa przez pojazd, który poruszał się z wyłączonymi systemami komfortu.

Pojazd typu SUV wyposażony w silnik o zapłonie samoczynnym (SUV ZS 2) charakteryzował się największym wzrostem emisji węglowodorów spośród obiektów badawczych (o 126%). Uruchomienie wszystkich systemów bezpieczeństwa i komfortu skutkowało również wzrostem emisji tlenku węgla o 106% oraz tlenków azotu o 33%. Zużycie paliwa w przypadku tego obiektu badawczego wzrosło natomiast o 42%. Największym wzrostem zużycia paliwa oraz emisji tlenków azotu po uruchomieniu systemów komfortu charakteryzował się samochód z napędem hybrydowym (hybryda). Zgodnie z pomiarami emisja tlenków azotu wzrosła o 115%, węglowodorów o 65%, natomiast zużycie paliwa zwiększyło się o 67%. Badanie RDE pojazdu hybrydowego wykazało również, że uruchomienie wszelakich systemów nie wpływa znacząco na zwiększenie emisje tlenku węgla, w przypadku którego zaobserwowano nieduży – 8% wzrost.

Podsumowując, uruchomienie systemów komfortu spowodowało wzrost zużycia paliwa w zakresie 6%-67%. Zwiększeniu uległa również emisja węglowodorów (18%-126%). W przypadku badania SUV ZI 4 w warunkach drogowych emisja tlenku węgla spadła o 21% względem jazdy bez systemów komfortu. Dla pozostałych pojazdów zaobserwowano natomiast wzrost emisji tego związku (od 8% do 106%). Emisja tlenków azotu również uległa zwiększeniu w granicach 33%-115%. Wyjątek od tej zależności stanowi SUV ZI 2 badany w warunkach laboratoryjnych.

8. Wnioski

8.1. Podsumowanie

Pojazdy samochodowe używane są masowo, a ich dostępność stale wzrasta. Użytkowanie ich wiąże się z wieloma zaletami, a ich rozwój dotyczy zarówno układów napędowych, jak i używanych systemów bezpieczeństwa i komfortu. Ich liczba stale się powiększa, jak wymagania normatywne do ich stosowania w nowych konstrukcjach. Widoczne jest stopniowe zwiększanie ich liczby oraz transfer technologii z pojazdów klasy premium i z wyższych segmentów do niższych.

Systemy komfortu powodują wzrost masy oraz przede wszystkim zwiększenie zużycia energii elektrycznej, która jest wytwarzana podczas reakcji spalania paliwa w silniku. Przeprowadzona analiza wykazała wzrost masy pojazdów przez doposażanie ich w systemy komfortu. Analiza taka jest jednak utrudniona gdyż producent nie podaje dokładnej masy poszczególnych elementów i całych podsystemów, które posiadają elementy wspólne.

Pomiary zużycia energii elektrycznej są utrudnione ze względu na budowę wiązek przewodów, mnogość systemów oraz dużą zmienność parametrów w czasie pracy. Ponadto niektóre systemy działają tylko po włączeniu silnika. Zaprezentowane wyniki chwilowej mocy prądu wynoszące kilka kilowatów są wartością znaczną względem średniej mocy silnika podczas użytkowania w warunkach miejskich.

Postęp w dziedzinie pomiarów oraz normy emisji związków toksycznych i rosnąca świadomość ludzi spowodowały znaczne postępy w aspekcie ekologii pojazdów. Wyznaczono związki toksyczne, a także objęto pojazdy stosownymi limitami emisji.

W dysertacji dokonano pomiarów nowoczesnych pojazdów klasy premium na hamowni podwoziowej w obowiązującym dla nich cyklu NEDC. Literatura dotycząca poruszanej tematyki jest dość uboga i autor nie znalazł w niej wyników badań podobnych do wyników badań własnych. Przeprowadzone pomiary za pomocą specjalistycznej aparatury wykazały znaczny wpływ zastosowania systemów komfortu na zużycie paliwa, co jest zrozumiałe, ale także na emisje związków toksycznych, takich jak tlenek węgla, węglowodorowy i tlenki azotu. Uzyskane przyrosty były znaczne i szczegółowo zostały opisane w pracy i we wnioskach. Wykazano również, że na emisje ma wpływ tryb jazdy, a ustawienie trybu sport powoduje taki sam skutek, czyli dalsze zwiększanie emisji składników toksycznych i zużycia paliwa przez układ napędowy pojazdu.

Testy homologacyjne, jak wykazały liczne badania, często w niewielkim stopniu odwzorowują warunki rzeczywistej eksploatacji pojazdów samochodowych, zwłaszcza tych podlegających testom w dziś już nieużywanym cyklu NEDC. W ramach badań na hamowni wykorzystano ten cykl, gdyż taki był używany do homologacji przedstawionych obiektów badawczych.

Z tego powodu badania zostały rozszerzone o pomiary w warunkach rzeczywistych przy wykorzystaniu aparatury PEMS. Wyznaczono do badań trzy pojazdy

charakteryzujące się różnymi układami napędowymi. Przetestowane je w trzech cyklach pomiarowych, w których podobnie jak na hamowni, systemy były odpowiednio nieaktywne, aktywne i aktywne w trybie sportowym.

Uzyskane wyniki szczegółowo opisano, wykazując bezpośredni wpływ systemów komfortu na zwiększenie emisji składników toksycznych przez ich zastosowania, niejednokrotnie znaczny, przekraczający dwukrotność wartości początkowej. Zużycie paliwa również zwiększało się o przeszło połowę, co było wyraźnie widoczne, a także istotne dla kierowcy, gdyż bezpośrednio wiąże się z kosztami eksploatacji pojazdu.

Zaprezentowane dane ukazują, że liczba systemów komfortu powiększa się. Producenci próbują minimalizować masę pojazdów przez tworzenie wspólnych płyt podłogowych z nowoczesnych, lekkich materiałów, jednak zwiększenie przez nie masy i zużycie energii będzie postępować. Jest to szczególnie istotne w aspekcie postępującej elektryfikacji, gdzie pojazdy o zwykle mniejszym zasięgu w stosunku do swoich odpowiedników spalinowym tym bardziej uzyskują mniejszy możliwy zasięg. Z tego powodu taka tematyka jest istotna, a ostatnie tendencje wskazują, że pojazdy mają być już w fabryce maksymalnie wyposażane a aktywne dla użytkownika mają być jedynie systemy za które zapłacił przy zakupie, bądź płaci abonament. Takie działanie sprawi, że wiele aut będzie „wozić” niepotrzebną masę w postaci nieaktywnych systemów i w efekcie emitować więcej składników toksycznych do atmosfery oraz zużywać więcej paliwa.

8.2. Wnioski ogólne

Na podstawie przedstawionych badań wysnuto następujące wnioski ogólne:

1. Użycie systemów bezpieczeństwa i komfortu wpływa na zużycie paliwa oraz emisję składników toksycznych.
2. Użycie systemów bezpieczeństwa i komfortu zwiększa zużycie paliwa, a w aspekcie emisji składników toksycznych jest niejednoznaczne, jednak w większości powoduje zwiększenie emisji węglowodorów, tlenków azotu oraz masy cząstek stałych.
3. Profil zmian emisji składników toksycznych różni się dla różnych układów napędowych. Dla ZI zwiększa emisje wszystkich składniki, dla ZS zwiększa emisję tlenków azotu oraz zmniejsza pozostałe składniki, a w układzie hybrydowym zwiększa emisje tlenków azotu oraz węglowodorów.
4. Zmiana profili w zakresie charakterystyk natężenia emisji związków szkodliwych zwykle w niewielkim stopniu zmienia się po aktywacji systemów, jedynie rosną wartości maksymalne. Aktywacja trybu sport w znaczny sposób wpływa na charakterystykę emisji.
5. Moc prądu pobierana przez poszczególne urządzenia jest trudna do określenia przez powiązanie poszczególnych podukładów systemu elektrycznego pojazdu.

8.3. Wnioski szczegółowe

Wnioski szczegółowe podzielono w zależności od rodzaju badań:

Zużycie energii:

1. W zależności od analizowanego układu napędowego zmierzona moc prądu pobierana przez włączone poszczególne układy na postoju wynosi od 45 do 560 W i w sumie dochodzi do 2000 W.

Hamownia

1. Emisja dwutlenku węgla (zużycie paliwa) na hamowni zwiększa się po zastosowaniu systemów komfortu od 6% do 69%.
2. Emisja gazowych związków toksycznych na hamowni poza jednym przypadkiem zwiększa się o 18%-42%, tlenku węgla od 22% do 67%, a tlenków azotu dla jednego przypadku zmniejsza się do 12%, a dla drugiego zwiększa do 180%.
3. Emisja masy cząstek stałych w zależności od punktu zmniejsza się o 24%, a wzrasta o 41% po użyciu systemów komfortu

Badania w warunkach rzeczywistych ZI:

1. Zużycie paliwa dla pojazdu SUV ZI 4 po użyciu systemów w warunkach rzeczywistych wzrasta od 11% do 55% po rozgrzaniu i włączeniu systemów komfortu.
2. Emisja tlenku węgla w zależności od pojazdu zmniejsza się o 21% i zwiększa o 106%, węglowodorów zwiększa się od 23% do 126%, tlenków azotu zwiększa się od 33% do 123%.
3. Dodatkowe obciążenie pojazdu zwiększa zużycie paliwa od 2% do 23%, emisję węglowodorów od 3% do 24%, tlenku węgla od 26% do 395% i zmniejsza emisję tlenków azotu od 37% do 47%.

Badania w warunkach rzeczywistych ZS:

1. Zużycie paliwa dla pojazdu SUV ZS 2 w badaniach w warunkach rzeczywistych po zastosowaniu systemów wzrasta od 43% do 62%.
2. Emisja tlenku węgla dla ZS zwiększa się od 65% do 106%, węglowodorów zwiększa się od 111% do 116%, a tlenków azotu od 32% do 122%.

Badania w warunkach rzeczywistych hybrydy:

1. Zużycie paliwa dla pojazdu hybrydowego w badaniach w warunkach rzeczywistych wzrasta o 67% do 78%.
2. Emisja tlenku węgla zmienia się od 28% do 8%, węglowodorów zwiększa się od 49% do 65%, a tlenków azotu od 20% do 115%.

8.4. Wnioski prognostyczne

Niniejsza praca nie wyczerpuje zadanej tematyki, w związku z czym zaproponowano kierunki dalszych badań:

1. Zbadanie wpływu urządzeń komfortu na rozkład średnic i masę cząstek stałych w rzeczywistych warunkach eksploatacji
2. Analiza emisji w cyklu WLTC
3. Analiza emisji zgodnie z wytycznymi RDE
4. Analiza pojazdów elektrycznych
5. Rozszerzenie pomiarów o pojazdy HDV i autobusy

Literatura

1. Barrios C.C., Domínguez-Sáez A., Rubio J.R., Pujadas M., Factors influencing the number distribution and size of the particles emitted from a modern diesel vehicle in real urban traffic, *Atmospheric Environment* 56, 2012, 16-25, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.078>
2. Bergmann M., Kirchner U., Vogt R., Benter T., On-road and laboratory investigation of low-level PM emissions of a modern diesel particulate filter equipped diesel passenger car, *Atmospheric Environment* 11, 2009, 1908-1916
3. Bielaczyc P., Merkisz J., Pielecha J., Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych, wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001
4. Boguta A., Wpływ działania układu klimatyzacji automatycznej na właściwości fizyczne powietrza w klimatyzowanym samochodzie, *TTS Technika Transportu Szybnego* 12, 2015, 177-180
5. Boningari T., Smirniotis P. G., Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO_x abatement, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 13, 2016, 133-141, <https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.09.004>
6. Bouzidi M., Mezrhab A., Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment, *Applied Thermal Engineering* 14-15, 2006, 1697-1704
7. Brodzik K., Faber J., Jakość powietrza w samochodzie – aktualne trendy w wymaganiach i metodach badań, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 12, 2017, 37-41
8. Chakroun W., Al-Fahed S., Thermal comfort analysis inside a car, *International Journal of Energy Research* 21/4, 1997
9. Chłopek Z., Skibiński F., Wprowadzenie w tematykę emisji cząstek stałych PM_{2,5} powodowanej transportem samochodowym, *Transport Samochodowy* 3, 2012, 73-87
10. Chłopek Z., Suchocka K., Modelowanie emisji i imisji frakcji wymiarowych cząstek stałych związanych z ruchem samochodowym, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Politechnika Warszawa* 97, 2014, 5-20
11. Chłopek Z., Żegota M., Problemy modelowania emisji cząstek stałych PM₁₀ w ruchu drogowym, *Archiwum Motoryzacji* 7, 2014, 25-42
12. Delphi technologies, *Worldwide emissions standards on and off-highway commercial vehicles 2018-2019*, 2018
13. Dyrektywa 70/156/EWG
14. Dyrektywa 94/12/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 marca 1994 r. odnosząca się do środków, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych i zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG
15. Dyrektywa 96/69/We Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 8 października 1996 r. zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez spaliny z silników o zapłonie iskrowym pojazdów silnikowych
16. Dyrektywa 98/69/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 października 1998 r. odnosząca się do środków mających zapobiegać zanieczyszczeniu powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych i zmieniająca dyrektywę Rady 70/220/EWG

17. Dyrektywa 2002/80/WE z dnia 3 października 2002 r. dostosowująca do postępu technicznego dyrektywę Rady 70/220/EWG odnoszącą się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych
18. Dyrektywa Rady 91/441/EWG zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych
19. Farrington R., Rugh J., Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range, National Renewable Energy Lab. (NREL): Golden, CO, USA, 2000
20. Fuchs E., Field F., Roth R., Kirchain E., Strategic materials selection in the automobile body: Economic opportunities for polymer composite design, Composites Science and Technology 9, 2008, 1989-2002
21. Fuć P., Lijewski P., Ziółkowski A., Siedlecki M., Trends in the type-approval regulations in terms of exhaust gas emissions for vehicles of category PC and LDV, Combustion Engines 3, 2015, 417-424
22. Fundowicz P., Radzimierski M., Wieczorek M., Konstrukcja pojazdów samochodowych, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2010
23. Gabrielsson P.L.T., Urea-SCR in Automotive Applications, Topics in Catalysis 28, 2004, 177-184
24. Galán J., Samek L., Verleysen P., Verbeken K., Houbaert Y., Advanced high strength steels for automotive industry, Revista DE Metalurgia 48(2), 2012, 118-131 doi: 10.3989/revmetalm.1158
25. Galant-Gołębiewska M., Rozprawa doktorska – Ograniczenie ryzyka zagrożeń w lotnictwie ogólnym przez zastosowanie systemu monitorującego stan psychofizyczny pilota, Poznań 2017
26. Gallas D., Szymlet N., Siedlecki M., Sokolnicka-Popis B., The impact of particulate filter substrate type on the gaseous exhaust components emission, Combustion Engines 183(4), 2020, 58-62
27. Gholamreza K., Linjacki I., Culham J. R., Chan E.C., Thermal Comfort Analysis of an Automobile Driver with Heated and Ventilated Seat. 10.4271/2002-01-0222
28. Gołofit-Szymczak M., Stobnicka-Kupiec A., Mikrobiologiczna jakość powietrza w klimatyzowanych samochodach osobowych, Rocznik Ochrona Środowiska 2, 2018, 1564-1582
29. Goniewicz K., Goniewicz M., Europejskie inicjatywy na rzecz poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego, Bezpieczeństwa Pracy: nauka i praktyka 9, 2014, 24-29
30. Gozdek A., Szaruga E., Analiza dekompozycyjna wzrostu emisji gazów cieplarnianych z transportu samochodowego na przykładzie Polski i Rumunii, Zeszyty Naukowe. Problemy Transportu i Logistyki / Uniwersytet Szczeciński 29, 2015, 371-383
31. Gwi Taek K., Jung J. Y., Effect of steering wheel heating system on hand thermal sensation, Journal of Mechanical Science and Technology, 36, 2022, 3717-3725
32. Hu Y., Liu C., Zhang J., Ding G., Wu Q., Research on carbon fiber-reinforced plastic bumper beam subjected to low-velocity frontal impact, Advances in Mechanical Engineering 7(6), 2015, 1-15, doi:10.1177/1687814015589458
33. Jankowska S., Powstawanie i redukcja NO_x w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, Materiały konferencyjne – debata o przyszłości energetyki, 2010

34. Jasiński R., Pielecha J., Magdziak A., Practicability of passenger vehicle driving emission tests according to new European Union procedures, *MATEC Web of Conferences* 118, 00021 (2017)
35. Jaśkiewicz M., Więckowski D., Rozwiązania konstrukcyjne aktywnych zawieszzeń stosowanych w pojazdach, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 9, 2018, 225-229
36. Jeffers M., Chaney L., Rugh J., Climate Control Load Reduction Strategies for Electric Drive Vehicles in Cold Weather: Preprint. United States, 2016. doi:10.4271/2016-01-0262
37. Kalociński T., Rymaniak Ł., Fuć P., Powertrain technology transfer between F1 and the automotive industry based on Mercedes-Benz, *Combustion Engines* 1(172), 2018, 2-13
38. Kaszkowiak J., Kurczewski D., Borowski S., Zastempowski M., Ocena uszkodzeń powypadkowych nadwozi samochodów osobowych, *Logistyka* 5, 2014, 709-717
39. Kaszkowiak, J., Zastempowski M., Borowski, S., Kaszkowiak E., Dulec E., Hujo L., Systemy filtrowania powietrza w układach zasilania silników spalinowych maszyn roboczych, *Logistyka* 4, 2015, 1893-1898
40. Kaynakli O., Pulat E., Kilic M., Thermal comfort during heating and cooling periods in an automobile, *Heat and Mass Transfer* 41, 2005, 449-458
41. Kittelson D. B., Watts W.F., Johnson J.P., On-road and laboratory evaluation of combustion aerosols—Part1: Summary of diesel engine results, *Journal of Aerosol Science* 8, 2006, 913-930
42. Kook H-S., Shin S-R., Cho J., Ih K-D., Development of an active deflector system for sunroof buffeting noise control, *Journal of Vibration and Control*, 2014;20(16):2521-2529. doi:10.1177/1077546313479991
43. Kossakowski P., Aluminium – materiał ekologiczny, *Przegląd budowlany*, 84, 2013, 36-41
44. Kozłowski R., Stanik K., Jabłoński J., Zwiększanie bezpieczeństwa ruchu drogowego dzięki wykorzystaniu inteligentnych samochodów i wybranych systemów wspierających kierowców, *Logistyka a bezpieczeństwo. Problemy współczesnej Europy*, Wydawnictwo Akademii Sztuki Wojennej, Warszawa 2017
45. Krzyszkowska P., Nowoczesne systemy bezpieczeństwa stosowane w pojazdach i ich wpływ na bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego, *Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka* 6, 2015, 14-17
46. Kubiak K., Merkisz J., Dobrzyński M., An impact assessment of functional systems in vehicles on CO₂ emissions and fuel consumption, *MATEC Web of Conferences* 118, 2017, DOI: 10.1051/mateconf/201711800030
47. Kubiak K., Siedlecki M., Merkisz J., Impact of the use of comfort devices on the exhaust emission from a hybrid vehicle, *Combustion Engines* 4(179), 2019, 280-285
48. Lai M., Brun R., Latest Developments in Sheet Metal Forming Technologies and Materials for Automotive Application: the Use of Ultra High Strength Steels at Fiat to Reach Weight Reduction at Sustainable Costs, *Key Engineering Materials* 344, 2007, 1-8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.1>
49. Leikauf G.D., Kim S.H., Jang S.A, Mechanisms of ultrafine particle-induced respiratory health effects, *Official journal of the Korean Society for Biochemistry and Molecular Biology* 52, 2020, 329-337
50. Li Y., Lin Z., Jiang A., Chen G., Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body, *Materials & Design* 3, 2003, 177-182

51. Lijewski P., Siedlecki M., Szymlet N., Emisja masy i liczby cząstek stałych z pojazdu hybrydowego w teście RDE, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 6, 2019, 286-290
52. Liu Q., Lin Y., Zong Z., Sun G., Li Q., Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle, *Composite Structures* 97, 2013, 231-238
53. Materiały prasowe firm: Sensor Inc., AVL, Horiba, TSI
54. Materiały prasowe firmy Audi AG, Mercedes, Porsche, Bugatti, Nissan, Varta, Valeo
55. Merkisz J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998
56. Merkisz J., Fuć P., Lijewski P., *Fizykochemiczne aspekty budowy i eksploatacji filtrów cząstek stałych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2016
57. Merkisz J., Fuć P., Pielecha J., *Metody pomiaru emisji związków szkodliwych spalin w rzeczywistych warunkach ruchu pojazdów samochodowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014 ISBN: 978-83-7814-344-4
58. Merkisz J., Kruczyński S., Ślęzak M., *Zanieczyszczenie powietrza spalinami przez transport samochodowy*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2019
59. Merkisz J., Pielecha I., *Alternatywne napędy pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006
60. Merkisz J., Pielecha I., *Układy mechaniczne pojazdów hybrydowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015
61. Merkisz J., Pielecha J., *Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2014
62. Merkisz J., Siedlecki M., Ziółkowski A., Fuć P., Lijewski P., *Metody ograniczenia emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów HDV spełniających normę Euro VI*, *Combustion Engines* 3, 2015, 480-486
63. Merkisz J., Walasik S., *Uwagi o przepisach dotyczących emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych*, *Archiwum Motoryzacji* 1, 2006, 41-51
64. Mock P., Kühlwein J., Tietge U., Franco V., Bandivadekar A., German J., *The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU*, International Council On Clean Transportation, Working Paper 2014-9, 2014
65. Nader M., *Badanie oddziaływań dynamicznych w systemie człowiek - techniczne środki transportu, tom 5, Biomechanika i Inżynieria Rehabilitacyjna*, In: *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000* / Nader Mirosław, 2004, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, ISBN 83-87674- 67-2, 725-746
66. Nakamichi T., Onbe T., Saito K., Nishio Y., *Development of Premium Double Tweeter Sound System for Dealer Option*, *DENSO TEN Technical Review* 3, 2019, 24-33
67. Nesbit M., Fergusson M., *Comparative study on the differences between the EU and US legislation on emissions in the automotive sector*, Directorate General For Internal Policy, Policy Department A: Economic And Scientific Policy, Parlament Europejski 2016
68. Niekurzak M., Kubińska-Jabcoń E., *Wykorzystanie nowoczesnych materiałów stosowanych w motoryzacji w celu poprawy jakości i bezpieczeństwa użytkowania pojazdów mechanicznych*, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 10-11, 2019, 47-52

69. Nieto A., Morales A.L., Pintado P., Chicharro J.M., An adaptive pneumatic suspension system for improving ride comfort and handling, *Journal of Vibration and Control* 6, 2014, 1492-1503, doi: 10.1177/1077546314539717
70. Nycz M., Smieszek M., wielkość przewozów pasażerskich w relacji do wskaźnika motoryzacji w wybranych krajach Unii Europejskiej w latach 2008-2013, *Humanities and Social Sciences* 23 (2/2016), 2016, 153-167
71. Oettle, N., Meskine, M., Senthoran, S., Bissell, A., A Computational Approach to Assess Buffeting and Broadband Noise Generated by a Vehicle Sunroof, *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 8(1):196-204, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-01-1532>
72. Orzełowski S., Budowa podwozi i nadwozi samochodowych, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1998
73. Piechna J., Podstawy aerodynamiki pojazdów, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000
74. Pielecha J., Badania emisji zanieczyszczeń silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2017
75. Pielecha J., Identyfikacja parametrów cząstek stałych z silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012
76. Pierewicz M., Zawieszenie pneumatyczne, *Drwal. Pismo przedsiębiorców leśnych* 2, 2020, 59-62
77. Praca zbiorowa pod redakcją W. Serdeckiego, Badania silników spalinowych, skrypt Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012
78. Praca zbiorowa pod redakcją W. Serdeckiego, Badania silników spalinowych i ich układów funkcjonalnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2017
79. Prochowski L., *Mechanika ruchu*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2016
80. Qi Ch., H., Y., Liu J., Zhang L., Experiment Study on the Thermal Comfort inside a Car Passenger Compartment, *Procedia Engineering*, 2005, 2017, 3607-3614
81. Rabe M., Gawlik A., Wpływ pojazdów osobowych z silnikami benzynowymi na występowanie zanieczyszczenia powietrza, *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Ekonomika i Organizacja Logistyki* 3(4), 2018, 57-63
82. Raport European Automobile Manufacturers Association: Vehivles in use Europe 2022
83. Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów
84. Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/646 z dnia 20 kwietnia 2016 r. zmieniające rozporządzenie (WE) nr 692/2008 w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 6)
85. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG
86. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2018/858
87. Rymaniak Ł., Siedlecki M., Sokolnicka B., Szymlet N., Gallas D., Comparative test of an internal combustion engine ecological indicators in real operating conditions and on a dynamic engine dynamometer, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 421, 2018, Doi 10.1088/1757-899X/421/4/042069

88. Siczek K., Siczek K., Ocena możliwości wykorzystania akumulatora litowo-siarkowego do rozruchu silnika spalinowego, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 12, 2016, 1346-1350
89. Siedlecki M., Rozprawa doktorska - Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofitingu w rzeczywistych warunkach eksploatacji, Poznań 2020
90. Skórksa H., Śladek J., Symulacyjne badanie wpływu interfejsu graficznego wyświetlacza typu head-up na percepcję kierowcy 3-4, 2017, 135-144
91. Słania J., Kuk Ł., Proces łączenia materiałów do budowy pojazdów i nadwozi w przemyśle samochodowym, *Przegląd Spawalnictwa* 3, 2014, 40-46
92. Sokolnicka-Popis B., Rozprawa doktorska - Analiza ograniczenia emisji cząstek stałych z silników o zapłonie iskrowym z wtryskiem bezpośrednim za pomocą techniki filtracyjnej, Poznań 2022
93. Szczepaniak C., Motoryzacja na przełomie epok, Polskie Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2000
94. Szczęsny P., Orlicz-Szczęsna G., Wpływ szkodliwych składników spalin na zdrowie człowieka, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 6, 2016, 425-428
95. Szczygieł M., Hadryś D., Bezpieczne obsługiwanie i użytkowanie współczesnego układu klimatyzacji w pojeździe samochodowym, *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach* 1(15), 2019, 59-67
96. Szczyglak P., Napiórkowski J., Chludziński M., Wpływ ciśnienia w kole pneumatycznym na skuteczność tłumienia drgań w układzie zawieszenia pojazdu, *TTS Technika Transportu Szynowego* 12, 2015, 2137-2144
97. Szpica D., Czaban J., Problematyka badań pojazdów wyposażonych w silniki wysokoprzężne z filtrami cząstek stałych w kontekście obowiązywania normy EURO 5, *Archiwum Motoryzacji* 4, 2009, 261-271
98. Szymlet N., Rozprawa doktorska - Emisja związków toksycznych z miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji, Poznań 2022
99. Tuchowski W., Nikończuk P., Efektywność energetyczna systemu klimatyzacji samochodowej współpracującej z różnymi czynnikami chłodniczymi, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 12, 2016, 746-748
100. Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. Prawo o ruchu drogowym, *Dziennik Ustaw* 1997 Nr 98 poz. 602
101. Uzdowski M., Własności dodane w szybach samochodowych, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 10, 2013, 269-271
102. Wager G., McHenry M. P., Whale J., Thomas B., Testing energy efficiency and driving range of electric vehicles in relation to gear selection, *Renewable Energy* 62, 2014, 303-312 DOI:10.1016/j.renene.2013.07.029
103. Walters M., *Steering Wheel*, Springer International Publishing Switzerland, 2016, https://doi.org/10.1007/978-3-319-05449-0_9
104. Weaver L., Carbon monoxide poisoning, *Critical Care Clinics* 2, 1999, 297-317, [https://doi.org/10.1016/S0749-0704\(05\)70056-7](https://doi.org/10.1016/S0749-0704(05)70056-7)
105. Wicher J., *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004
106. Woodburn J., Rozprawa doktorska - Exhaust emissions of ammonia from spark ignition engines fitted with three-way catalytic converters under transient operating conditions, Poznań 2022
107. www.dieselnet.com, dostęp 03.01.202
108. www.dieselnet.com/standards/eu.php, dostęp: 27.12.2022

109. www.ec.europa.eu/eurostat, dostęp 23.12.2022
110. www.eea.europa.eu, dostęp: 22.12.2022
111. www.europarl.europa.eu, dostęp: 22.12.2022
112. Yamane K., Furuhashi S., *International Journal of Hydrogen Energy* 23/9, 1998, 825-831
113. Zając P., *Silniki pojazdów samochodowych Część 1*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014
114. Zhang W., Xu J., *Advanced lightweight materials for Automobiles: A review*, *Materials & Design* 221, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>
115. Zwierzyńska E., Miłkowska E., Furmanek M., *Zatrucie tlenkiem węgla*, *Polski Przegląd Neurologiczny*, 3, 2014, 127-134
116. Żurkowska J., *Zastosowanie modelu trendu logistycznego do prognozowania wskaźnika motoryzacji w Polsce*, *Archiwum Motoryzacji* 2, 2007, 143-158