

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU

Rozprawa doktorska

Wpływ stosowania umownego współczynnika
rozcieńczenia DF na wskaźniki emisji

mgr inż. Sławomir Taubert

Promotor: dr hab. inż. Wojciech Gis, prof. ITS

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski

Spis treści

Streszczenie.....	4
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	6
Wykaz ważniejszych symboli.....	7
1. Wprowadzenie	9
1.1. Wstęp	9
1.2. Cel i zakres pracy.....	10
2. Metoda pomiaru emisji z układu wylotowego w pojazdach samochodowych z wykorzystaniem układu poboru spalin o stałym natężeniu przepływu	12
2.1. Zasada pomiaru.....	12
2.2. Zależności matematyczne	13
2.3. Układ poboru spalin.....	15
2.4. Rozwój układów poboru spalin w celu zwiększenia dokładności pomiarów emisji w pojazdach o małej emisji zanieczyszczeń.....	17
2.4.1. Układy poboru spalin pozwalające zwiększyć różnicę stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach i w powietrzu rozcieńczającym	17
2.4.2. Układy poboru spalin z możliwością oczyszczania powietrza rozcieńczającego ..	24
2.4.3. Rozwój metod obliczania współczynnika rozcieńczenia spalin	27
2.4.4. Układy poboru spalin umożliwiające wyznaczenie stopnia rozcieńczenia spalin ..	32
3. Tezy pracy.....	34
4. Metodyka badań	36
4.1. System do pomiaru emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego umożliwiający wyznaczenie stopnia rozcieńczenia spalin	36
4.2. Obiekty badań.....	45
4.3. Aparatura pomiarowa.....	46
4.4. Cykle jezdne	52
4.5. Regulacja hamowni podwoziowej.....	56
4.6. Metoda określania wskaźników emisji zanieczyszczeń.....	56
4.6.1. Uwarunkowania wstępne.....	56
4.6.2. Emisja spalin po rozruchu rozgrzanego silnika	57
4.6.3. Masa spalin po rozruchu zimnego lub częściowo nagrzanego silnika.....	57
5. Wyniki badań współczynnika rozcieńczenia spalin.....	64
5.1. Współczynnik nadmiaru powietrza w cyklach jezdnych stosowanych w pomiarach emisji zanieczyszczeń	64
5.2. Stopień rozcieńczenia spalin	79
5.3. Stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym.....	81
5.4. Wyznaczenie wskaźników emisji zanieczyszczeń według zmodyfikowanej procedury pomiarowej	89
5.5. Oszacowanie całkowitej rocznej masy według zmodyfikowanej procedury pomiarowej.....	90
6. Analiza wyników badań	98
6.1. Współczynnik nadmiaru powietrza	98
6.2. Stopień rozcieńczenia spalin	101
6.3. Stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym.....	102
6.4. Wskaźniki emisji zanieczyszczeń i roczna masa związku	105

7. Zakończenie	108
7.1. Wnioski ogólne.....	108
7.2. Wnioski szczegółowe.....	108
7.3. Wnioski perspektywiczne	109
7.4. Kierunki dalszych badań	109
Literatura.....	111

Streszczenie

Celem pracy było określenie wpływu stosowania współczynnik rozcieńczenia w obliczeniach emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego na wskaźniki emisji zanieczyszczeń stosowane do szacowania całkowitej emisji rocznej dla samochodów osobowych i lekkich samochodów dostawczych wyposażonych w silniki spalinowe.

W pracy przedstawiono wyniki badań współczynnika nadmiaru powietrza w cyklach jezdnych ARTEMIS, WLTC i NEDC dla samochodów osobowych wyposażonych w silniki ZI oraz ZS. Na podstawie tych badań dokonano analizy wpływu współczynnika nadmiaru powietrza na błąd określania rzeczywistego stopnia rozcieńczenia spalin w badaniach prowadzonych na hamowni podwoziowej z użyciem układu poboru spalin o stałym natężeniu przepływu. Największe różnice między stopniem rozcieńczenia a współczynnikiem rozcieńczenia stwierdzono dla samochodu z silnikiem ZS o klasie emisji Euro 5. W przypadku tego pojazdu stopień rozcieńczenia był mniejszy od współczynnika rozcieńczenia we wszystkich cyklach jezdnych, a względna różnica procentowa między tymi dwoma wielkościami zawierała się w przedziale od 28% do 167%. Błąd ten miał wpływ na dokładność obliczania masy zanieczyszczeń wyemitowanych z układu wylotowego. Przeprowadzone badania wykazały, że stosowanie współczynnika rozcieńczenia zamiast stopnia rozcieńczenia prowadzi, w przypadku masy tlenku węgla, węglowodorów, metanu i węglowodorów niemietanowych samochodu wyposażonego w silnik ZS, do powstawania błędów systematycznego określenia wskaźników emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego. Dla pozostałych zanieczyszczeń emitowanych przez samochód z silnikiem ZS, tzn. tlenków azotu i dwutlenku węgla, oraz dla obu badanych samochodów z silnikiem ZI błąd ten jest pomijalny.

W celu ograniczenia tego błędów opracowano metodę pomiarową umożliwiającą wyznaczenie stopnia rozcieńczenia. Jest on określany na podstawie jednoczesnego pomiaru stężenia dwutlenku węgla w spalinach, spalinach rozcieńczonych oraz powietrzu rozcieńczającym.

W pracy przedstawiono wyniki badań emisji zanieczyszczeń w cyklach jezdnych ARTEMIS prowadzone według w/wym. metody pomiarowej. Pozwoliły one określić wskaźniki emisji zanieczyszczeń po uruchomieniu całkowicie rozgrzanego silnika, a na ich podstawie wyznaczyć roczną masę zanieczyszczeń emitowanych przez badane pojazdy. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań oszacowano błąd określania wskaźników emisji oraz całkowitej rocznej masy zanieczyszczeń wynikający ze stosowania dotychczasowej metody obliczeniowej wykorzystującej współczynnik rozcieńczenia.

Dla samochodu wyposażonego w silnik ZS względna różnica procentowa między wskaźnikami emisji zanieczyszczeń po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika określonych za pomocą zmodyfikowanej metody w stosunku do wskaźników emisji zanieczyszczeń określonych za pomocą dotychczas stosowanej metody pomiarowej zawierała się między -40% a 100%. Prowadzi to do nieprawidłowego oszacowania całkowitej rocznej masy dla tego pojazdu. Względna różnica procentowa między całkowitą emisją roczną obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą w stosunku do całkowitej rocznej masy obliczonej na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą wynosiła od około -33% dla tlenku węgla do 94% dla metanu. Nie stwierdzono natomiast wpływu stosowania współczynnika rozcieńczenia na całkowitą roczną masę dla badanych samochodów wyposażonych w silniki ZI.

The effect of the usage of the exhaust dilution factor on the emission factors from the road transport

Abstract

The aim of the work was to determine the effect of using in the calculations of the exhaust emissions the dilution factor, to the pollutant emission factors used to estimate total annual emissions for passenger cars and light duty vehicles equipped with combustion engines.

In the work presented the results of tests of the excess air factor in ARTEMIS, WLTC and NEDC driving cycles for passenger vehicles equipped with gasoline and diesel engines. On the basis of these tests, an analysis of the influence of the excess air factor on the error in determining the actual exhaust gas dilution ratio in tests carried out on a chassis dynamometer with the use of a constant flow exhaust gas sampling system was made. The greatest differences between the dilution ratio and the dilution factor were found for a vehicle with a diesel engine with Euro 5 emission class. For this vehicle, the dilution ratio was lower than the dilution factor in all driving cycles, and the relative percentage difference between the two values ranged from 28% to 167%. This error had an impact on the accuracy of calculating the mass of pollutants emitted from the exhaust system. The conducted tests has shown that the use of the dilution factor instead of the dilution ratio, in the case of the mass of carbon monoxide, hydrocarbons, methane and non-methane hydrocarbons of vehicle equipped with diesel engine, causes a systematic error in determining the pollutant emission factors from road transport. For the remaining pollutants emitted by a vehicle with the diesel engine, i.e. nitrogen oxides and carbon dioxide, and for both tested vehicles equipped with a gasoline engine, this error is negligible.

In order to reduce this error, a measurement method was developed that allows the determination of the dilution rate. It is determined by simultaneously measuring the concentration of carbon dioxide in the exhaust gas, the diluted exhaust gas, and the dilution air.

In the work presented the results of the tests of the pollutant emissions in ARTEMIS driving cycles carried out according to the above-mentioned measurement method. They made it possible to determine the pollutant emission factors after starting a fully warmed-up engine, and on their basis to determine the annual mass of pollutants emitted by the tested vehicles. Based on the analysis of the test results, the error in determining the emission factors and the total annual mass of pollutants resulting from use of the current calculation method using the dilution factor was estimated.

For a car equipped with a diesel engine, the relative percentage difference between the pollutant emission factors after starting a fully warmed-up engine determined with the use of the modified method in relation to the pollutant emission factors determined with the use of the current measurement method was between -40% a 102% . This leads to an incorrect estimate of the total annual mass emitted from this vehicle. The relative percentage difference between the total annual mass calculated on the basis of the pollutant emission factors determined with the modified method in relation to the total annual mass calculated on the basis of their indicators determined with the current method, ranged from -33% for CO to 94% for CH₄. However, no effect of the using of the dilution factor on the total annual mass for the tested vehicles equipped with gasoline engines was found.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

ARTEMIS	– <i>Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems</i> – nazwa 5 Projektu Ramowego Komisji Europejskiej dotyczącego opracowania metodologii szacowania emisji ze wszystkich rodzajów transportu na poziomie krajowym i międzynarodowym
CFV	– <i>Critical Flow Venturi</i> – układ poboru spalin wykorzystujący do pomiaru natężenia zwężki krytycznego przepływu
CNG	– <i>Compressed Natural Gas</i> – sprężony gaz ziemny
CVS	– <i>Constant Volume Sampler</i> – układ poboru spalin o stałym natężeniu przepływu
CH ₄	– metan
CO	– tlenek węgla
CO ₂	– dwutlenek węgla
CORINAIR	– <i>CORe INventory of AIR emissions</i> – program mający na celu inwentaryzację emisji zanieczyszczeń powietrza w Europie
COPERT	– <i>Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport</i> – program komputerowy do obliczania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego
DAF	– <i>Dilution Air Filter</i> – filtr powietrza rozcieńczającego
DF	– <i>Dilution Factor</i> – współczynnik rozcieńczenia spalin
DR	– <i>Dilution Ratio</i> – stopień rozcieńczenia spalin
DT	– <i>Dilution Tunnel</i> – tunel rozcieńczający
EEA	– <i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiska
EMEP	– <i>European Monitoring and Evaluation Programme</i> – wspólny program monitorowania i oceny przenoszenia zanieczyszczeń powietrza na dalekie odległości w Europie
LEV	– <i>Low Emission Vehicle</i> – określenie poziomu wymagań w kalifornijskich normach dotyczących emisji obowiązujących do 2003 r.
LPG	– <i>Liquified Petroleum Gas</i> – skroplony gaz ropopochodny
MC	– <i>Mixing Chamber</i> – komora mieszania
MEET	– <i>Methodology for Estimating air pollutant Emissions from Transport</i> – projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach programu Transport BRT 4 Programu Ramowego, mający na celu opracowanie metodologii wykorzystywanej w szacowaniu emisji zanieczyszczeń i zużycia energii przez transport
NEDC	– <i>New European Driving Cycle</i> – cykl jazdy zaprojektowany w celu oceny poziomów emisji silników samochodowych i zużycia paliwa w samochodach osobowych
NMHC	– <i>Non Methane Hydrocarbons</i> – węglowodory niemetaanowe (wszystkie węglowodory z wyłączeniem metanu)
NMVOC	– <i>Non Methane Volatile Organic Compounds</i> – niemetaanowe lotne związki organiczne, w nazewnictwie stosowanym w metodologii COPERT odpowiednik węglowodorów niemetaanowych (NMHC)
NO	– tlenek azotu
NO ₂	– dwutlenek azotu
NO _x	– tlenki azotu
PDP	– <i>Positive Displacement Pump</i> – pompa wyporowa
THC	– <i>Total Hydrocarbons</i> – suma węglowodorów

VOC	– <i>Volatile Organic Compounds</i> – lotne związki organiczne, w nazewnictwie stosowanym w metodologii COPERT odpowiednik sumy węglowodorów (THC)
WLTC	– <i>World Light-duty Transient Cycle</i> – Światowy cykl badania pojazdów lekkich
WLTP	– <i>Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure</i> – Światowa zharmonizowana procedura badania pojazdów lekkich

Wykaz ważniejszych symboli

a	– stężenie dwutlenku węgla w spalinach nierozcieńczonych, mokrych określone przy spalaniu całkowitym i zupełnym stechiometrycznej mieszanki paliwowo-powietrznej, [%]
b	– emisja drogowa, [g/km]
C_{CVS}^c	– stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, [ppm lub % obj.]
C_{CVS}	– stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach (wartość mierzona), [ppm lub % obj.]
C_{roz}	– stężenie zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym przed rozcieńczeniem, [ppm lub % obj.]
C_{roz}^c	– stężenie zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym po rozcieńczeniu, [ppm lub % obj.]
C_{CO_2}	– zmierzone stężenie dwutlenku węgla w rozcieńczonych spalinach, [%]
C_{CO}	– zmierzone stężenie tlenku węgla w rozcieńczonych spalinach, [ppm]
C_{THC}	– zmierzone stężenie węglowodorów całkowitych w rozcieńczonych spalinach, [ppm]
ρ	– gęstość zanieczyszczenia w warunkach odniesienia
m	– masa zanieczyszczenia, [g], [kg]
Q_{CVS}	– natężenie przepływu rozcieńczonych spalin przez układ poboru spalin, [m ³ /min]
Q_{roz}	– natężenie przepływu powietrza rozcieńczającego, [m ³ /min]
Q_{sp}	– natężenie przepływu spalin, [m ³ /min]
d	– droga przebyta podczas testu, [km]
DF	– współczynnik rozcieńczenia, [–]
DF_{NY}	– współczynnik rozcieńczenia DF uwzględniający zanieczyszczenie powietrza rozcieńczającego (zależność opracowana w Departamencie Ochrony Środowiska w Nowym Jorku), [–]
DF_{EPA}	– współczynnik rozcieńczenia DF zdefiniowany w Regulaminie 83 ONZ, [–]
DF_{BAR}	– współczynnik rozcieńczenia DF uwzględniający wpływ składu mieszanki paliwowo-powietrznej (zależność opracowana w California Bureau of Automotive Repair), [–]
DR	– stopień rozcieńczenia, [–]
V_{CVS}	– objętość rozcieńczonych spalin skorygowana do warunków odniesienia, [dm ³]
V_{roz}	– objętość powietrza rozcieńczającego, [dm ³]
V_{sp}	– objętość spalin, [dm ³]
$p_{mix}^{H_2O}$	– ciśnienie parcjale pary wodnej w rozcieńczonych spalinach, [kPa]
$p_{nas}^{H_2O}$	– ciśnienie pary wodnej nasyconej w temperaturze rozcieńczonych spalin, [kPa]

p_{mix}^{total}	– ciśnienie całkowite rozcieńczonych spalin, [kPa]
$[H_2O]_{mix}$	– stężenie pary wodnej w rozcieńczonych spalinach
$[H_2O]_{nas}$	– stężenie pary wodnej nasyconej w najwyższej temperaturze napotkanej przez mieszaninę
$[H_2O]_{roz}$	– stężenie pary wodnej w powietrzu rozcieńczającym
$[H_2O]_{sp}$	– stężenie pary wodnej w spalinach
$[H_2O]_{bag}$	– stężenie pary wodnej w worku z próbką rozcieńczonych spalin
S_A	– procentowy udział ruchu po autostradach i drogach ekspresowych w całkowitym przebiegu rocznym
S_M	– procentowy udział ruchu miejskiego w całkowitym przebiegu rocznym
S_P	– procentowy udział ruchu pozamiejskiego w całkowitym przebiegu rocznym

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Prace dotyczące określenia emisji zanieczyszczeń z pojazdów zostały podjęte w tym samym czasie, co wprowadzenie limitów związków szkodliwych spalin. Metodyka pomiarów ulega ciągłej ewolucji w związku z rozwojem wiedzy w tym zakresie, ulepszeniem metod badań kinematyki pojazdów w ruchu drogowym, wzrostu natężenia ruchu pojazdów, wprowadzenia nowych metod oczyszczania spalin, a także coraz większą liczbą danych doświadczalnych. Szczególnemu nasileniu uległy prace w tej dziedzinie w latach dziewięćdziesiątych XX wieku w związku z tym, że podpisane konwencje nakładają na sygnatariuszy obowiązek określenia emisji zanieczyszczeń w skali całego kraju. Dotyczy to również transportu i inwentaryzacji emisji oraz przekazywania jej wyników do wiadomości pozostałym stronom porozumienia. Te porozumienia międzynarodowe to przede wszystkim:

- „Ramowa konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu” [1],
- „Konwencja w sprawie transgranicznego zanieczyszczenia powietrza na dalekie odległości”, sporządzona w Genewie dnia 13 listopada 1979 r. (DzU z dnia 28 grudnia 1985 r.) [2],
- „Protokół do Konwencji z 1979 r. w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości, dotyczący długofalowego finansowania wspólnego programu monitoringu i oceny przenoszenia zanieczyszczeń powietrza na dalekie odległości w Europie (EMEP)”, sporządzony w Genewie 28 września 1984 r. (DzU z dnia 27 grudnia 1988 r.) [3],
- zalecenia 17/1 „Zmniejszenie emisji zanieczyszczeń z sektora transportu w obszarze Morza Bałtyckiego”,
- „Program wspólnych działań” przyjęty na Regionalnej Konferencji EKG ONZ „Transport a środowisko” w 1997 r.

Pierwszą europejską inicjatywą opracowania metod inwentaryzacji emisji (poza lokalnymi inicjatywami podejmowanymi przez wiele ośrodków badawczych lub na wnioski władz krajowych) była grupa robocza CORINAIR ds. wskaźników emisji spalin i obliczania jej z ruchu drogowego. Grupa robocza, składająca się z pięciu ekspertów ds. emisji z pojazdów samochodowych, rozpoczęła działalność w 1987 r. Jej celem było opracowanie metodologii, w tym odpowiednich wskaźników, do szacowania emisji spalin z pojazdów w roku referencyjnym 1985 [4]. Metodologia została przekształcona w program komputerowy (COPERT), z którego korzystało wiele krajów Unii Europejskiej (UE). W 1991 r. ta sama grupa ekspertów proponowała zrewidowany zestaw wskaźników emisyjnych do wykorzystania w inwentaryzacji z 1990 r., w tym częściową rewizję bazowej metodologii [5]. Na podstawie metodologii z 1985 r. opisanej w [4], został opracowany program komputerowy, który został nazwany COPERT 90 [6]. Nowa wersja modelu została opracowana w 1997 r. Wersję tę nazwano COPERT 2. Wykorzystuje on tymczasowe wyniki badań z poprzedniej wersji.

W podobnym okresie konsorcjum trzech europejskich laboratoriów opracowało model do szacowania emisji spalin z samochodów osobowych zwany MODEM. Model ten był oparty na nowych pomiarach zanieczyszczeń wykonanych z użyciem różnych specjalnie opracowanych cykli jazdy [7]. W 1989 r. Niemcy, do których później dołączyły Szwajcaria i Austria, zainicjowały projekt dostarczenia nowej i kompleksowej bazy danych współczynników emisji spalin [8]. W przypadku samochodów osobowych była to próba połączenia metody COPERT opartej na średniej prędkości z metodą opartą na chwilowej emisji spalin [9]. W przypadku pojazdów ciężkich model oparty jest na wynikach modelu związanego z pojazdem w połączeniu z mapami emisji spalin silnika [10].

Niewielka liczba badaczy, którzy brali udział w projektach CORINAIR i MODEM oraz innych projektach krajowych lub wielostronnych, zapoczątkowała szerszą sieć współpracy

mającą na celu przegląd dostępnej wiedzy na temat emisji spalin w Europie. Współpraca ta, prowadzona w ramach programu COST, zaowocowała opracowaniem nowej metodyki szacowania tej emisji [11].

COPERT jest obecnie używany nie tylko przez państwa członkowskie UE, ale także przez większość krajów Europy Środkowej i Wschodniej. Obecnie stosowana metodyka szacowania emisji zanieczyszczeń została opisana w przewodniku [12]. Jest ona cały czas rozwijana i uzupełniana. Zmiany te publikowane są w kolejnych wydaniach [13–19]. Obliczanie emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego odbywa się na podstawie wskaźników emisyjnych. Wskaźniki takie dla pojazdów benzynowych, niewyposażonych w reaktory katalityczne, zostały opracowane przez Corinair Working Group [4, 5]. Wzięto w nich pod uwagę rezultaty obszernych badań prowadzonych we Francji, Niemczech, Grecji, Włoszech, Holandii i Wielkiej Brytanii. Niektóre dane zebrane na podstawie pomiarów prowadzonych w Austrii, Szwecji i Szwajcarii również zostały uwzględnione w raporcie. Dla pojazdów wyposażonych w silniki ZI, wyposażonych w reaktory katalityczne, oraz samochodów wyposażonych w silniki ZS spełniających wymagania dyrektywy 91/441/EEC i późniejszych [20] oraz pojazdów HDV z silnikami z zapłonem samoczynnym, wartości wskaźników emisji zanieczyszczeń określone zostały w ramach projektu Artemis [21]. Wskaźniki emisji spalin dla lekkich pojazdów użytkowych zamieszczone w przewodnikach pochodzą z projektu MEET [22], natomiast wartości wskaźników dla pojazdów jednośladowych z różnych badań DG Enterprise.

Całkowita emisja zanieczyszczeń z pojazdu obliczana jest jako suma emisji spalin po rozruchu rozgrzanego silnika (tj. gdy silnik i układ oczyszczania pracuje w temperaturze nominalnej) i emisji w okresie przejściowym pracy silnika spalinowego (tzw. rozruch zimnego lub częściowo rozgrzanego silnika). Rozróżnienie emisji zanieczyszczeń w trakcie stabilnej cieplnie fazy pracy silnika i fazy przejściowej, gdy silnik jeszcze nie osiągnął temperatury nominalnej, jest niezbędne ze względu na znaczne różnice wartości emisji poszczególnych substancji w tych dwóch fazach.

Do obliczenia emisji zanieczyszczeń z pojazdów danej kategorii niezbędna jest znajomość wskaźników tej emisji po rozruchu rozgrzanego silnika (e^s) oraz współczynnik określający stosunek emisji w okresie przejściowym pracy silnika do emisji w czasie stabilnej cieplnie fazy pracy (e^z/e^s). Wskaźniki e^s wyznaczone są w trakcie badań prowadzonych na hamowni podwoziowej podczas odtwarzania wybranych cykli jezdnych. Ze względu na wykonywanie tych pomiarów przy całkowicie rozgrzanym silniku i układzie oczyszczania pracującym przy temperaturze nominalnej, mierzone stężenia zanieczyszczeń są bardzo małe. Powoduje to, że błędy wynikające z przyjętych w stosowanej metodzie pomiaru emisji zanieczyszczeń założeń upraszczających zaczynają być znaczące w całkowitym bilansie niepewności pomiaru. Jednym z takich założeń jest stosowanie w obliczeniach umownego współczynnika rozcieńczenia obliczanego na podstawie zależności wyprowadzonej dla stechiometrycznego składu mieszanki paliwowo-powietrznej.

W związku z powyższym celowe staje się poszukiwanie rozwiązań, które mogą zmniejszyć lub całkowicie wyeliminować te błędy.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest określenie wpływu stosowania w obliczeniach emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego zależności na współczynnik rozcieńczenia (DF – *dilution factor*), określony w Regulaminie 83 ONZ [23] oraz Rozporządzeniu Komisji (UE) 2017/1151 [24] na wskaźniki emisji zanieczyszczeń stosowane do szacowania całkowitej emisji rocznej dla samochodów osobowych i lekkich samochodów dostawczych wyposażonych w silniki spalinowe. Badania przeprowadzono na hamowni podwoziowej w laboratorium badania emisji zanieczyszczeń Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie.

Głównym celem pracy jest określenie dokładności pomiarowych metody szacowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego, wynikającego ze stosowania metody obliczeniowej przy wyznaczaniu wskaźników emisji zanieczyszczeń, która jest podana w Regulaminie 83 ONZ [23] oraz Rozporządzeniu Komisji (UE) 2017/1151 [24].

W ramach realizacji celu pracy wykonano:

- badania współczynnika nadmiaru powietrza (λ) w cyklach jezdnych ARTEMIS, WLTC i NEDC dla samochodów osobowych wyposażonych w silniki ZI oraz ZS,
- analizę wpływu współczynnika nadmiaru powietrza (λ) na błąd określania rzeczywistego stopnia rozcieńczenia spalin w badaniach prowadzonych na hamowni podwoziowej z użyciem układu poboru spalin o stałym natężeniu przepływu,
- badania emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego w cyklach jezdnych ARTEMIS, w celu określenia wskaźników emisji zanieczyszczeń dla badanych pojazdów,
- modyfikację metody określania rzeczywistego stopnia rozcieńczenia spalin za pomocą jednoczesnego pomiaru stężenia dwutlenku węgla w spalinach surowych i rozcieńczonych,
- obliczenia rocznej całkowitej emisji zanieczyszczeń dla każdego badanego samochodu,
- analizę błędu systematycznego obliczania rocznej całkowitej emisji zanieczyszczeń wynikającego ze stosowanej w dokumentach normatywnych metody pomiaru emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego.

2. Metoda pomiaru emisji z układu wylotowego w pojazdach samochodowych z wykorzystaniem układu poboru spalin o stałym natężeniu przepływu

2.1. Zasada pomiaru

Bezpośredni pomiar masy wyemitowanego w spalinach zanieczyszczenia nie jest możliwy. Masę tę określa się metodą pośrednią na podstawie zmierzonych wartości stężenia zanieczyszczenia oraz objętości, w której to stężenie zostało wyznaczone. Znając gęstość związku można obliczyć jego masę na podstawie zależności:

$$m = \frac{\rho \times C \times V}{10^6} \quad (2.1)$$

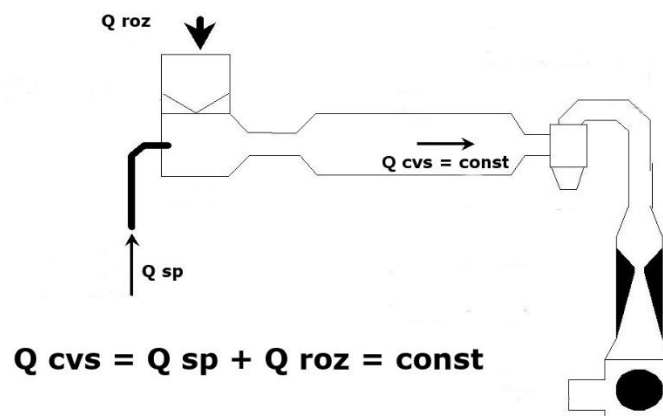
gdzie: m – masa wyemitowanego zanieczyszczenia [g], ρ – gęstość zanieczyszczenia [g/dm^3], C – stężenie zanieczyszczenia w objętości V [ppm], V – objętość, w której określono stężenie zanieczyszczenia [dm^3].

Do obliczenia masy zanieczyszczenia wyemitowanego z układu wylotowego niezbędna jest znajomość dwóch parametrów: stężenia oraz objętości, w której określono to stężenie. W badaniach pojazdów na hamowni podwoziowej nie stosuje się pomiaru objętości za pomocą przepływomierza, zamiast tego używany jest system pomiarowy wyposażony w układ poboru spalin o stałym natężeniu przepływu. Został on wprowadzony w latach siedemdziesiątych XX wieku w przepisach federalnych Stanów Zjednoczonych [25]. Dzięki wykorzystaniu zwężki Venturiego w jednostce czasu przez układ przepływa stała objętość badanego medium. Znając czas trwania cyklu, w którym wyznaczano masę zanieczyszczenia, można obliczyć objętość. Stężenie w objętości jednostkowej jest więc proporcjonalne do masy wyemitowanego zanieczyszczenia.

Ponieważ natężenie spalin zmienia się w zależności od obciążenia silnika, w celu uzyskania stałego natężenia przepływu przez układ poboru, spaliny rozcieńczane są powietrzem z otoczenia. Po zmieszaniu spełniony jest warunek (rys. 2.1):

$$Q_{cvs} = Q_{sp} + Q_{roz} = const \quad (2.2)$$

gdzie: Q_{cvs} – natężenie przepływu rozcieńczonych spalin przez układ poboru spalin, Q_{sp} – natężenie przepływu spalin przez układ wylotowy, Q_{roz} – natężenie przepływu powietrza rozcieńczającego.



Rys. 2.1. Schemat układu poboru spalin o stałym natężeniu przepływu obrazujący zasadę pomiaru

Rozcieńczanie spalin powietrzem z otoczenia ma również na celu zapobieżenie wykraplania się pary wodnej w układzie oraz analizatorach przez obniżenie temperatury punktu rosy.

Do analizy stężenia pobierana jest tylko próbka rozcieńczonych spalin i powietrza rozcieńczającego. Dlatego też układ poboru spalin powinien zapewniać, aby:

- spaliny emitowane z układu wylotowego były w sposób ciągły rozcieńczane powietrzem; natężenie przepływu rozcieńczonych spalin powinno być stałe,
- mierzona była objętość całkowita rozcieńczonych spalin w całym teście,
- próbka rozcieńczonych spalin była pobierana do analizy, a stosunek natężenia przepływu próbki i spalin powinien być stały,
- próbka powietrza rozcieńczającego była pobierana do analizy, a stosunek natężenia przepływu próbki do gęstości powietrza powinien być stały.

2.2. Zależności matematyczne

Emisję drogową zanieczyszczeń gazowych określa się według wzoru:

$$b_i = \frac{V_{CVS} \cdot \rho_i \cdot k_h \cdot C_{CVSi} \cdot 10^{-2}}{d} \quad (2.3)$$

gdzie: b_i – emisja drogową zanieczyszczenia i [g/km], ρ_i – gęstość zanieczyszczenia i w warunkach odniesienia [g/dm³], C_{CVSi} – stężenie zanieczyszczenia i w rozcieńczonych spalinach [ppm], k_h – współczynnik korekcyjny w zależności od wilgotności powietrza (tylko dla tlenków azotu), V_{CVS} – objętość rozcieńczonych spalin, skorygowana do warunków odniesienia [dm³], d – droga przebyta podczas badania [m].

Parametry C_{CVS} , V_{CVS} i d są określane na podstawie badań, a gęstość danego zanieczyszczenia jest podana w przepisach. Dla tlenku węgla, dwutlenku węgla i tlenków azotu wartości ρ są jednakowe dla wszystkich pojazdów lekkich, natomiast dla węglowodorów gęstość zależy od paliwa stosowanego do zasilania.

Powietrze w laboratorium, w którym są prowadzone badania, zawiera pewną ilość zanieczyszczeń objętych pomiarami. Przyjęte jest założenie upraszczające, że powietrze dostarczane do silnika jest czyste, tzn. zawarte w nim zanieczyszczenia nie wywierają żadnego wpływu na wynik pomiaru emisji spalin. Natomiast w przypadku powietrza stosowanego do rozcieńczenia spalin w tunelu rozcieńczającym układu CVS (rys. 2.1) są one uwzględniane. Wyniki pomiarów stężeń w tunelu rozcieńczającym są korygowane o zawartość danego zanieczyszczenia w powietrzu do rozcieńczenia spalin.

W ogólnym przypadku stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym jest określone wzorem:

$$C_{CVS}^c = C_{CVS} - C_{roz}^c \quad (2.4)$$

Z kolei stężenie zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym po rozcieńczeniu jest równe:

$$C_{roz}^c = C_{roz} \times \frac{V_{roz}}{V_{CVS}} = C_{roz} \times \frac{V_{CVS} - V_{sp}}{V_{CVS}} = C_{roz} \times \left(1 - \frac{1}{DR}\right) \quad (2.5)$$

W tym wzorze DR oznacza stopień rozcieńczenia spalin (*dilution ratio*) w tunelu rozcieńczającym równy V_{CVS}/V_{sp} .

Z wzorów (2.4) i (2.5) wynika, że stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach skorygowane ze względu na zawartość zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym jest równe:

$$C_{CVS}^c = C_{CVS} - C_{roz} \times \left(1 - \frac{1}{DR}\right) \quad (2.6)$$

Zgodnie z przepisami nie określa się stopnia rozcieńczenia DR , lecz stosuje się umowny współczynnik rozcieńczenia DF (*dilution factor*). Stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach skorygowane ze względu na zawartość zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym jest określone na podstawie wzoru:

$$C_{CVS}^c = C_{CVS} - C_{roz} \times \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (2.7)$$

Ogólny wzór na określenie DF jest następujący:

$$DF = \frac{a}{C_{CO_2} + 10^{-4} \times (C_{THC} + C_{CO})} \quad (2.8)$$

We wzorze tym a oznacza współczynnik zależny od paliwa. Ogólny wzór na obliczenie wartości a dla paliwa o składzie $C_xH_yO_z$ (C – węgiel, H – wodór, O – tlen) jest następujący [23]:

$$a = 100 \times \frac{X}{X+Y/2+3,76 \times (X+Y/4-Z/2)} \quad (2.9)$$

Oznaczenia przyjęte we wzorach (2.4)–(2.9):

- C_{CVS}^c – stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach skorygowane ze względu na zawartość zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym [ppm] lub [% obj.],
- C_{CVS} – stężenie zanieczyszczenia zmierzone w rozcieńczonych spalinach [ppm] lub [% obj.],
- C_{roz}^c – stężenie zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym po rozcieńczeniu [ppm] lub [% obj.],
- C_{roz} – stężenie zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym przed rozcieńczeniem [ppm] lub [% obj.],
- V_{roz} – objętość powietrza rozcieńczającego [m³],
- V_{sp} – objętość spalin [m³],
- V_{CVS} – objętość rozcieńczonych spalin [m³],
- DR – stopień rozcieńczenia,
- DF – współczynnik rozcieńczenia,
- a – współczynnik zależny od paliwa (tab. 2.1),
- C_{CO_2} – zmierzone stężenie dwutlenku węgla w rozcieńczonych spalinach [% obj.],
- C_{THC} – zmierzone stężenie węglowodorów całkowitych w rozcieńczonych spalinach [ppm],
- C_{CO} – zmierzone stężenie tlenku węgla w rozcieńczonych spalinach [ppm].

Umowny współczynnik rozcieńczenia DF po raz pierwszy został wprowadzony w przepisach amerykańskich [25]. Został on wyprowadzony przy przyjęciu następujących założeń:

- spalanie jest całkowite i zupełne,
- mieszanka paliwowo-powietrzna w silniku ma skład stechiometryczny ($\lambda = 1$).

Współczynnik a we wzorze (2.8) oznacza stężenie dwutlenku węgla w spalinach nierozcieńczonych (mokrych) określone przy wymienionych wyżej założeniach. W tabeli 2.1 podano wartości współczynnika a dla różnych paliw.

Tabela 2.1. Wartości współczynnika a dla poszczególnych paliw [23]

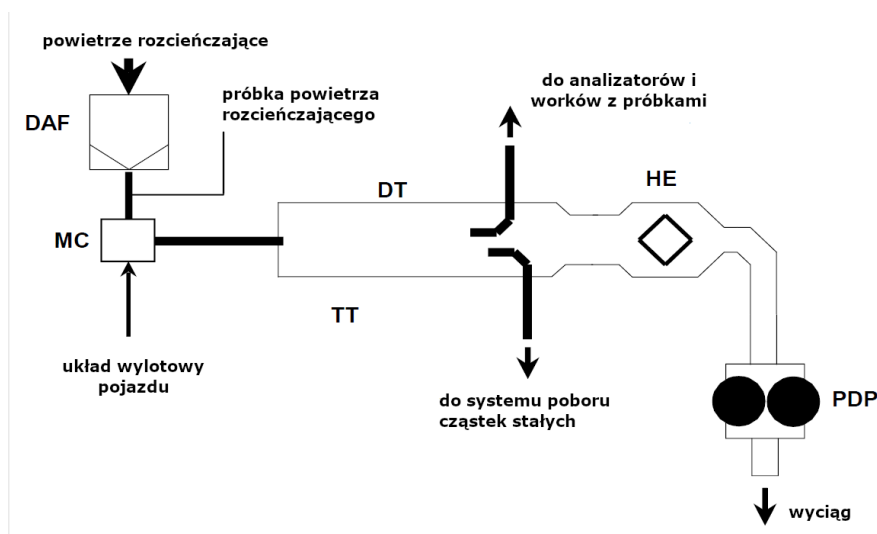
Paliwo	Współczynnik a
Benzyna E5	13,4
Benzyna E10	13,4
Olej napędowy B5	13,5
Olej napędowy B7	13,5
LPG	11,9
Gaz ziemny/biometan	9,5
Etanol E85	12,5
Etanol E75	12,7
E% – udział etanolu	
B% – udział biokomponentów	

2.3. Układ poboru spalin

W badaniach emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego stosuje się pełnoprzepływowy układ rozcieńczania spalin. Wymaga to, aby w kontrolowanych warunkach spaliny pojazdu były stale rozcieńczane powietrzem otoczenia. Mierzona jest całkowita objętość mieszaniny spalin i powietrza rozcieńczającego, a do analizy w sposób ciągły pobierana jest do specjalnych worków proporcjonalna próbka. Masa zanieczyszczeń wyznaczana jest na podstawie ich stężenia w próbce, skorygowana o zawartość tych zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym oraz całkowitej objętości rozcieńczonych spalin, jaka przepłynęła przez układ poboru spalin w całym teście.

Układ rozcieńczania spalin (rys. 2.2 i 2.3) składa się z przewodu przesyłowego (TT), komory mieszania (MC) i tunelu rozcieńczającego (DT), układu do kondycjonowania powietrza rozcieńczającego wraz z filtrami oczyszczającymi (DAF), urządzenia wywołującego przepływ w układzie (BL lub PDP) oraz urządzenia do pomiaru objętości (CFV, PDP). W tunelu rozcieńczającym, w części, w której występuje już przepływ laminarny, umieszczone są sondy do pobierania próbek.

W laboratoriach stosowane są dwa rodzaje układów poboru spalin: z pompą wyporową (PDP – *Positive Displacement Pump*) (rys. 2.2) oraz zwężką Venturiego (CFV – *Critical Flow Venturi*) (rys. 2.3). Najczęściej jest stosowana wersja układu poboru spalin ze zwężką Venturiego.



Rys. 2.2. Schemat pełnoprzepływowego układu poboru spalin z pompą wyporową PDP CVS (*Positive Displacement Pump Constant Volume Sampler*) [23]

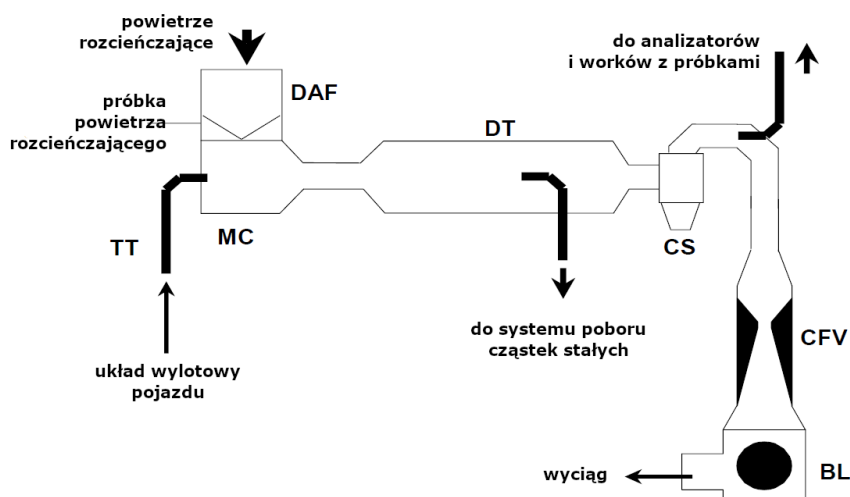
W układzie poboru spalin z pompą wyporową elementem mierzącym całkowitą objętość rozcieńczonych spalin jest pompa wyporowa (PDP). Pomiar odbywa się przez zliczanie liczby obrotów pompy. Pompa wywołuje również przepływ w całym układzie rozcieńczania. Próbkę rozcieńczonych spalin pobierana jest przez sondę. Przepływ próbki wywołany jest przez pompę, a proporcjonalność natężenia przepływu próbki do natężenia przepływu rozcieńczonych spalin jest zapewniana przez zawór regulacyjny sterowany sygnałem z przepływomierza. Układ do rozcieńczania z pompą wyporową składa się z (rys. 2.2):

- filtra powietrza rozcieńczającego (DAF), który w razie potrzeby może być grzany; filtr ten składa się z następujących filtrów: filtra z węglem aktywowanym, opcjonalnego filtra zgrubnego, filtra HEPA; zadaniem filtra z węglem aktywowanym jest ograniczenie i stabilizacja stężenia węglowodorów w powietrzu rozcieńczającym,
- rury (TT) łączącej układ wylotowy pojazdu z tunelem rozcieńczającym (DT), w którym spaliny mieszają się z powietrzem rozcieńczającym i tworzą jednorodną mieszaninę,
- pompy wyporowej (PDP), zadaniem której jest wytworzenie przepływu o stałym natężeniu; liczba obrotów pompy wraz z sygnałami z czujników temperatury i ciśnienia są wykorzystywane do określania natężenia przepływu,
- wymiennika ciepła (HE) o pojemności wystarczającej do zapewnienia, że podczas badania temperatura rozcieńczonych spalin mierzona w punkcie bezpośrednio powyżej pompy wyporowej nie zmienia się o więcej niż 6 K od średniej temperatury roboczej w czasie badania,
- komory mieszania (MC), w której spaliny i powietrze rozcieńczające są mieszane; komora może być umieszczona w pobliżu pojazdu tak, żeby zminimalizować długość rury łączącej układ wylotowy pojazdu z tunelem rozcieńczającym.

W układzie poboru spalin wyposażonego w zwężkę Venturiego wykorzystywane jest zjawisko przepływu krytycznego. Utrzymując w zwężce prędkość przepływu równą prędkości dźwięku osiąga się stałe natężenie przepływu, wprost proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego temperatury rozcieńczonych spalin. Zwężki Venturiego są kalibrowane do określonego natężenia przepływu. Natężenie to jest korygowane ze względu na temperaturę i ciśnienie panujące na wlocie do zwężki. Objętość rozcieńczonych spalin, która przepłynęła przez układ jest zależna od nominalnego natężenia przepływu i czasu trwania testu. Pobór próbki rozcieńczonych spalin również odbywa się przez zwężki Venturiego. Zapewnia to proporcjonalność próbek gazu pobranych z tunelu rozcieńczającego.

Układ rozcieńczania spalin ze zwężką Venturiego składa się z (rys. 2.3):

- filtra powietrza rozcieńczającego (DAF), który w razie potrzeby może być grzany; składa się on z następujących filtrów: filtra z węglem aktywowanym (zadaniem filtra z węglem aktywowanym jest ograniczenie i stabilizacja stężenia węglowodorów w powietrzu rozcieńczającym), opcjonalnego filtra zgrubnego, filtra (HEPA),
- komory mieszania (MC), w której spaliny i powietrze rozcieńczające są mieszane; komora może być umieszczona w pobliżu pojazdu tak, żeby zminimalizować długość rury łączącej układ wylotowy pojazdu z tunelem rozcieńczającym,
- tunelu rozcieńczającego (DT), w którym spaliny mieszają się z powietrzem rozcieńczającym i tworzą jednorodną mieszaninę z którego pobierane są próbki do pomiaru masy zanieczyszczeń i liczby cząstek stałych,
- zwężki(ek) Venturiego (CFV) wraz z czujnikami temperatury i ciśnienia na wlocie do zwężek; razem tworzą układ do pomiaru objętości rozcieńczonych spalin, które przepłynęły w trakcie testu,
- dmuchawy (BL) wywołującej przepływ w całym układzie poboru spalin.



Rys. 2.3. Schemat pełnoprzepływowego systemu poboru spalin ze zwężkami Venturiego CFV CVS (Critical Flow Venturi Constant Volume Sampler) [23]

Konwencjonalny układ poboru spalin CVS stosowany jest z powodzeniem od lat siedemdziesiątych XX wieku, ale z zastosowaną metodą pomiaru związane są pewne problemy. Główne z nich to:

- Optymalne dobranie współczynników rozcieńczenia tak, aby z jednej strony zapobiec kondensacji wody w rozcieńczonych spalinach, a z drugiej, aby uzyskać jak największe wartości mierzonych wartości stężenia zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach. Oba te wymogi nie mogą być spełnione jednocześnie.
- Mierzone wartości stężenia węglowodorów i tlenków azotu zbliżają się do wartości mierzonych w powietrzu rozcieńczającym, co powoduje, że błędy związane z wyznaczeniem stężenia tych związków w powietrzu rozcieńczającym mogą wpływać na wynik pomiaru w stopniu, którego nie będzie można pominąć.
- System CFV opiera się na założeniach dotyczących składu chemicznego spalin. Założenia nie zawsze są prawdziwe dla niektórych technologii pojazdów i testów.

Istnieją cztery metody rozwiązania tych problemów:

- zwiększenie różnicy między stężeniem danego zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach a jego stężeniem w powietrzu rozcieńczającym,
- usunięcie mierzonych zanieczyszczeń z powietrza rozcieńczającego,
- opracowanie zależności na współczynnik rozcieńczenia, które będą ograniczały lub eliminowały błędy określania tego współczynnika wynikające z obecnie przyjętego wzoru,
- wyznaczenie stopnia rozcieńczenia spalin.

2.4. Rozwój układów poboru spalin w celu zwiększenia dokładności pomiarów emisji w pojazdach o małej emisji zanieczyszczeń

2.4.1. Układy poboru spalin pozwalające zwiększyć różnicę stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach i w powietrzu rozcieńczającym

Minimalny możliwy do zastosowania współczynnik rozcieńczenia determinowany jest przez wymóg zapobiegania kondensacji wody w rozcieńczonych spalinach. Zawartość pary wodnej w rozcieńczonych spalinach zależy od następujących parametrów [26]:

- wilgotności powietrza rozcieńczającego,
- rodzaju paliwa,

- objętości nierozcieńczonych spalin wprowadzanych do układu poboru spalin, które zależą od wielkości charakterystycznych dla pojazdu oraz cyklu jezdowego,
- ciśnienia i temperatury w układzie poboru spalin.

Aby zapobiec kondensacji w układzie CVS i przewodach do pobierania próbek, stężenie pary wodnej w rozcieńczonych spalinach $[H_2O]_{mix}$ musi być mniejsze niż stężenie nasycenia pary wodnej $[H_2O]_{nas}$ w najniższej temperaturze napotkanej przez mieszaninę:

$$[H_2O]_{mix} < [H_2O]_{nas} \quad (2.10)$$

W celu wyprowadzenia zależności określającej minimalne natężenie przepływu w układzie poboru spalin Q_{CVS} , przy którym nie wystąpi kondensacja pary wodnej, równanie (2.10) można wyrazić za pomocą ciśnień parcjalnych (2.11):

$$\frac{p_{mix}^{H_2O}}{p_{mix}^{total}} < \frac{p_{nas}^{H_2O}}{p_{mix}^{total}} \quad (2.11)$$

gdzie: $p_{mix}^{H_2O}$ – ciśnienie parcjalne pary wodnej w rozcieńczonych spalinach [kPa], $p_{nas}^{H_2O}$ – ciśnienie pary wodnej nasyconej w temperaturze rozcieńczonych spalin [kPa], p_{mix}^{total} – ciśnienie całkowite rozcieńczonych spalin [kPa].

Natężenie przepływu pary wodnej przez układ poboru spalin określone jest zależnością (2.12):

$$[H_2O]_{mix} \times Q_{CVS} = [H_2O]_{sp} \times Q_{sp} + [H_2O]_{roz} \times Q_{roz} \quad (2.12)$$

gdzie: Q_{CVS} – objętościowe natężenie przepływu rozcieńczonych spalin przez układ poboru [m^3/min], Q_{sp} – objętościowe natężenie przepływu spalin przez układ wylotowy pojazdu [m^3/min], Q_{roz} – objętościowe natężenie przepływu powietrza rozcieńczającego [m^3/min].

Uwzględniając zależności (2.2) oraz (2.12), a także dokonując odpowiednich przekształceń otrzymuje się wzór na natężenie przepływu przez układ poboru spalin jako funkcję natężenia przepływu spalin przez układ wylotowy oraz stężenia pary wodnej w powietrzu rozcieńczającym, spalinach i rozcieńczonych spalinach (2.13):

$$Q_{CVS} = Q_{sp} \times \frac{[H_2O]_{sp} - [H_2O]_{roz}}{[H_2O]_{mix} - [H_2O]_{roz}} \quad (2.13)$$

Zgodnie z zależnością (2.10), w celu zapobiegnięciu kondensacji pary wodnej w układzie poboru spalin, stężenie pary wodnej w rozcieńczonych spalinach musi być mniejsze niż stężenie nasycenia pary wodnej w temperaturze panującej w tym układzie. W związku z tym minimalne natężenie przepływu przez układ poboru spalin określone jest równaniem:

$$Q_{CVS} \geq Q_{sp} \times \frac{[H_2O]_{sp} - [H_2O]_{roz}}{[H_2O]_{nas} - [H_2O]_{roz}} \quad (2.14)$$

Stężenie pary wodnej w rozcieńczonych spalinach oraz stężenie pary wodnej nasyconej można wyrazić przez ich ciśnienia parcjalne:

$$[H_2O]_{roz} = \frac{p_{roz}^{H_2O}}{p_{atm}^{total}} \quad (2.15)$$

$$[H_2O]_{sat} = \frac{P_{nas}^{H_2O}}{P_{mix}^{total}} \quad (2.16)$$

Ponieważ podczas przepływu rozcieńczonych spalin przez układ poboru ciśnienie w układzie jest nieznacznie niższe od ciśnienia atmosferycznego, to można założyć, że:

$$P_{mix}^{total} = P_{atm}^{total} \quad (2.17)$$

Iloraz równania (2.15) i (2.16) określa wilgotność względną powietrza otoczenia:

$$\frac{[H_2O]_{roz}}{[H_2O]_{nas}} = \frac{P_{roz}^{H_2O}}{P_{atm}} \times \frac{P_{atm}}{P_{nas}^{H_2O}} = \frac{P_{roz}^{H_2O}}{P_{nas}^{H_2O}} = H_{roz} \quad (2.18)$$

Podstawiając zależność (2.18) do (2.14) otrzymuje się:

$$Q_{CVS} \geq Q_{sp} \times \frac{[H_2O]_{sp} - H_{roz}}{1 - H_{roz}} \quad (2.19)$$

Objętość nierozcieńczonych spalin zależy od objętości skokowej silnika oraz od obciążenia silnika, które jest zależne od cyklu jezdny i jego parametrów (m.in. maksymalnego przyspieszenia w cyklu lub też prędkości jazdy). Według [27] dla większości pojazdów badanych w cyklu FTP najczęściej stosuje się przepływ przez układ poboru spalin o nominalnym natężeniu 10 m³/min. Wraz z pojawieniem się cyklu US06 uzupełniającego cykl FTP, w którym generowane są znacznie większe przyspieszenia pojazdu, co prowadzi do znacznie większych wartości natężenia przepływu spalin i większej zawartości pary wodnej w rozcieńczonych spalinach, konieczne było zwiększenie natężenia przepływu przez układ poboru spalin do 20 m³/min.

Innym czynnikiem wpływającym na wilgotność rozcieńczonych spalin jest zastosowanie paliw alternatywnych. W przypadku paliw zawierających tlen, takich jak metanol lub etanol, lub paliw gazowych CNG (*Compressed Natural Gas*), LPG (*Liquified Petroleum Gas*), w procesie spalania powstaje znacznie więcej wody. Ta dodatkowa para wodna pojawia się w nierozcieńczonych spalinach, wymuszając tym samym wyższe współczynniki rozcieńczenia w układzie poboru spalin. Niektóre badania [27] wykazały, że przy różnych kombinacjach wielkości pojazdów, w połączeniu z cyklami jezdny o dużej prędkości jazdy, takimi jak cykl US06, oraz z paliwami alternatywnymi, może być konieczne użycie natężenia przepływu przez układ poboru spalin o nominalnym natężeniu przepływu nawet 60 m³/min.

Wymóg, aby para wodna nie uległa wykropleniu w rozcieńczonych spalinach, jest istotny również ze względu na możliwość rozpuszczania się niektórych składników spalin w wodzie. Dotyczy to częściowo dwutlenku azotu oraz węglowodorów, które są w pewnym stopniu rozpuszczalne w wodzie. Dodatkowo według przepisów kalifornijskich od poziomu LEV wymagany jest również pomiar formaldehydów, które są dobrze rozpuszczalne w wodzie. W przeszłości błąd wynikający z powodu rozpuszczania się tych składników spalin w wodzie był pomijalny ze względu na ich relatywnie duże stężenie. Obecnie mierzone stężenie tych zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach zbliża się do wartości mierzonych w powietrzu rozcieńczającym i dlatego w przypadku wystąpienia tego zjawiska, błąd może być znaczący.

Pierwsze układy poboru spalin CFV CVS wyposażone były w jedną zwężkę krytycznego przepływu. Były to tzw. systemy o stałym natężeniu przepływu. Dobór nominalnego natężenia przepływu takiego układu odbywał się na podstawie przewidywanego maksymalnego natężenia spalin w całym cyklu jezdny, a więc w tych fazach, w których występowały największa prędkość jazdy lub fazy przyspieszania bliskie prędkości maksymalnej w cyklu jezd-

nym. Na przykład dla cyklu NEDC fazą decydującą o minimalnym możliwym do zastosowania stopniu rozcieńczenia jest faza przyspieszania od prędkości 100 km/h do prędkości maksymalnej 120 km/h. Z tego powodu stopień rozcieńczenia spalin dla faz o mniejszym natężeniu spalin był za duży, co skutkowało nadmiernym zmniejszeniem stężenia zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach w stosunku do wartości najbardziej odpowiednich.

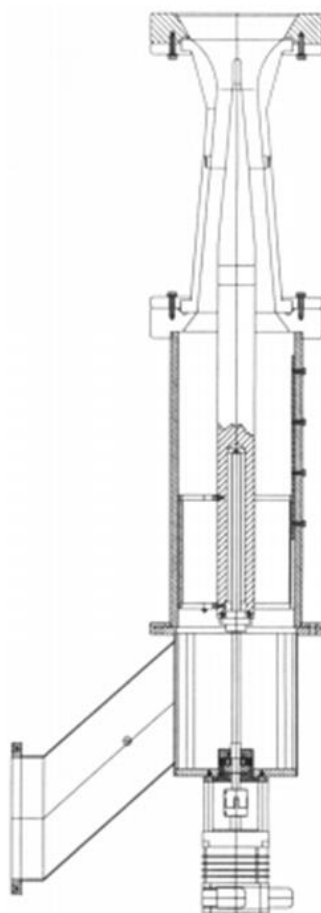
Jednym z rozwiązań tego problemu było wprowadzenie układów poboru spalin CFV CVS o zmiennym natężeniu przepływu. Taki układ wyposażony jest w kilka zwężek Venturiego o różnym nominalnym natężeniu przepływu, a sterowanie pracą tego układu pozwala na przełączanie zwężek między poszczególnymi fazami cyklu jezdnego. Przykładem takiego rozwiązania jest układ poboru spalin CFV CVS typu CVS i60 produkcji firmy AVL stosowany w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie. Wyposażony jest on w 4 zwężki Venturiego o nominalnym natężeniu przepływu 2, 4, 8 i 16 m³/min (rys. 2.4). Zwężki te mogą być wybierane każda oddzielnie lub w zestawach, co umożliwia uzyskanie w układzie poboru spalin nominalnego natężenia przepływu rozcieńczonych spalin w zakresie od 2 m³/min do 30 m³/min z krokiem co 2 m³/min.



Rys. 2.4. Zestaw zwężek Venturiego w układzie poboru spalin CVS i60 stosowanym w ITS

Inną wersją układu poboru spalin o zmiennym natężeniu przepływu jest układ ze zwężką Venturiego wyposażoną w stożkową iglicę zamontowaną w osi zwężki. Iglica sterowana jest za pomocą silnika krokowego. Przez wprowadzanie iglicy do wnętrza zwężki Venturiego następuje zmniejszanie powierzchni czynnej zwężki, co zmniejsza natężenie przepływu przez układ (rys. 2.5). Takie rozwiązanie było testowane przez firmę BMW w kooperacji z Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) [28]. Iglica sterowana jest w tym rozwiązaniu silnikiem krokowym. Badania prototypu wykazały, że możliwe jest uzyskanie zmiany natężenia przepływu o 3 m³/min w czasie krótszym niż 1 s. Dla pięciu położań iglicy wykonano pomiary w celu określenia odtwarzalności uzyskiwanych wartości natężenia przepływu. Otrzymane wyniki wskazują, że błąd określania natężenia przepływu nie powinien przekraczać 1%. Dal-

sze badania powtarzalności prowadzone w PTB potwierdziły, że system pomiaru objętości był co najmniej tak dobry, jak konwencjonalny CVS, z którym to rozwiązanie było porównywane. Różnica między tymi systemami była mniejsza niż 0,1% wartości mierzonej.

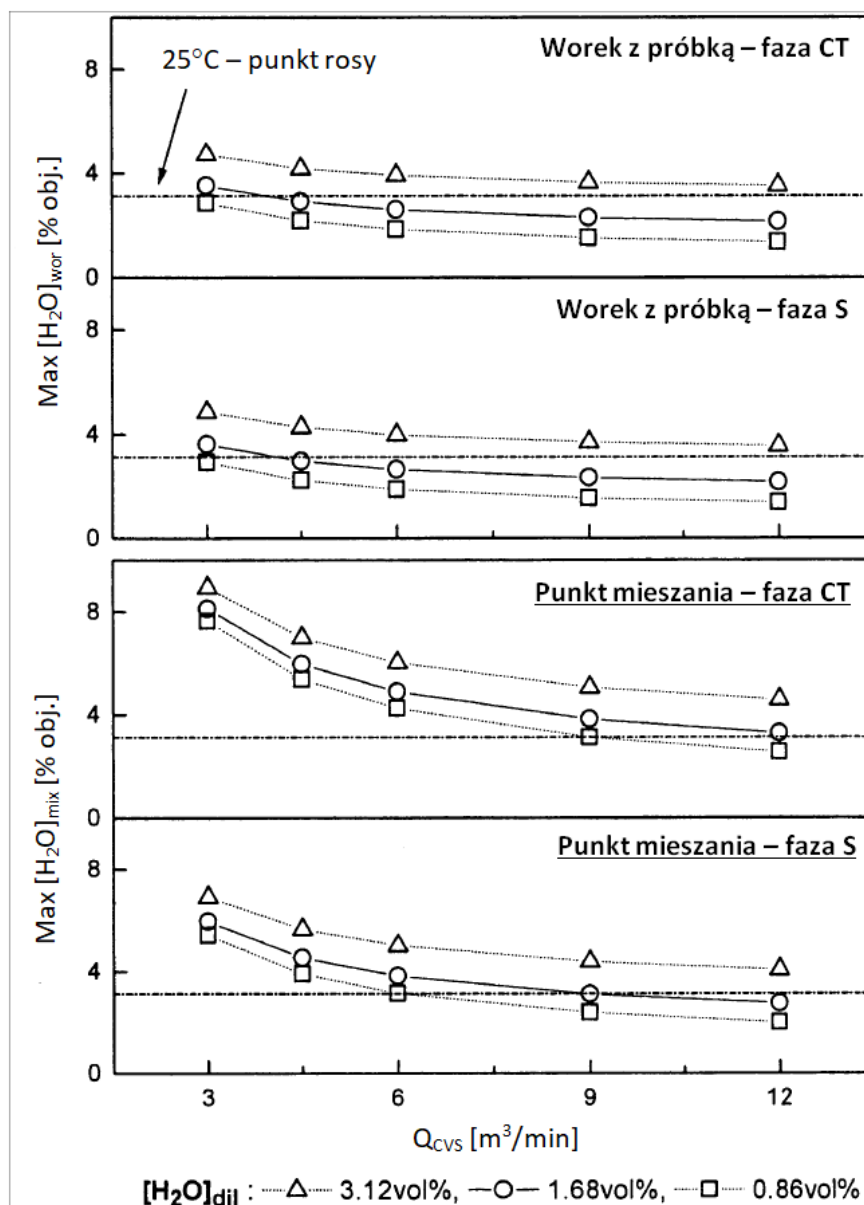


Rys. 2.5. Przekrój poprzeczny przez zwężkę Venturiego o zmiennym natężeniu przepływu [28]

Kolejną metodą zmniejszenia stopnia rozcieńczenia jest uzyskanie w całym układzie poboru spalin temperatury wyższej od temperatury punktu rosy rozcieńczonych spalin. Zgodnie z zależnością (2.19) można to uzyskać na dwa sposoby. Pierwszym jest obniżenie wilgotności powietrza rozcieńczającego H_{roz} . Wraz ze zmniejszaniem się wilgotności powietrza rozcieńczającego zwiększać się będzie wartość wyrażenia w mianowniku w zależności (2.19), a tym samym zmniejszać się będzie minimalne natężenie przepływu przez układ poboru spalin, zapewniające uniknięcie kondensacji pary wodnej.

Na podstawie opracowanego modelu matematycznego układu CVS, opisanego w [29] określono zależność między maksymalną zawartością pary wodnej za punktem mieszania $[H_2O]_{mix}$ oraz w worku z próbką rozcieńczonych spalin $[H_2O]_{wor}$ podczas cyklu FTP75 w fazie 1 (po rozruchu zimnego silnika, faza CT) i fazie 2 (faza stabilizacji temperatury po zimnym rozruchu, faza S), a natężeniem przepływu w układzie poboru spalin Q_{mix} dla różnej wilgotności powietrza rozcieńczającego $[H_2O]_{roz}$ (rys. 2.6). Analizy dokonano dla trzech wartości stężenia pary wodnej w powietrzu rozcieńczającym, dla którego temperatura punktu rosy wynosiła 5, 15 i 25°C, co odpowiada stężeniu $[H_2O]_{roz}$ równym 0,86%, 1,68% oraz 3,12% objętościowo. Na rysunku 2.6 linią poziomą zaznaczono stężenie pary wodnej odpowiadające temperaturze punktu rosy wynoszącej 25°C. Z analizy rysunku wynika, że zmniejszenie wilgotności powietrza rozcieńczającego jest bardziej efektywne w eliminacji kondensacji pary wodnej niż zwiększanie stopnia rozcieńczenia spalin. W rozważanych przypadkach maksy-

malna zawartość pary wodnej w worku z próbką rozcieńczonych spalin $[H_2O]_{wor}$ nigdy nie jest niższa niż stężenie pary wodnej w powietrzu rozcieńczającym $[H_2O]_{roz}$, nawet jeśli używane jest największe natężenie przepływu przez układ poboru spalin Q_{mix} , który w tym przypadku wynosił $12 \text{ m}^3/\text{min}$. Natomiast w przypadku zmniejszenia wilgotności powietrza do wartości odpowiadającej temperaturze punktu rosy 5°C przez odwilżenie powietrza rozcieńczającego, kondensacja pary wodnej nie nastąpi w temperaturze 25°C , nawet gdy natężenie przepływu przez układ poboru spalin wyniesie $3 \text{ m}^3/\text{min}$.



Rys. 2.6. Zależność między maksymalną zawartością pary wodnej za punktem mieszania oraz w worku z próbką rozcieńczonych spalin i natężeniem przepływu w układzie poboru spalin w cyklu FTP75 dla różnej wilgotności powietrza rozcieńczającego [29]

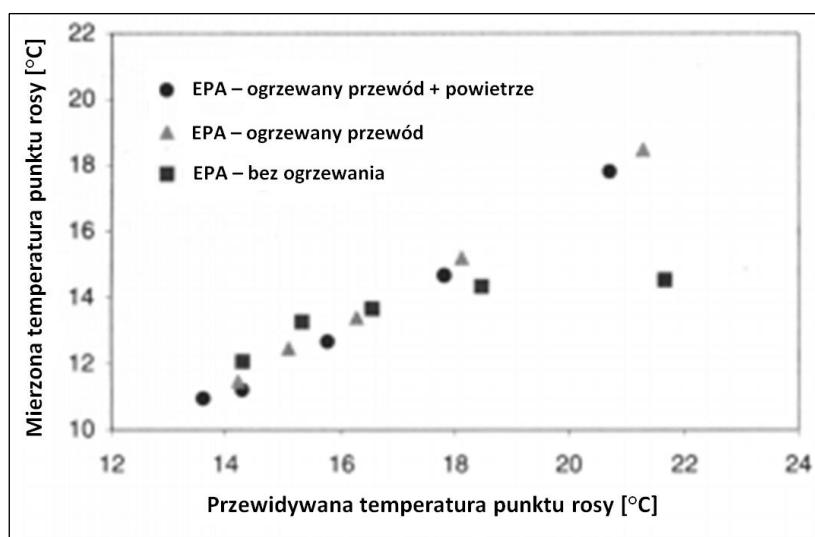
Drugim sposobem jest ogrzanie całego systemu poboru spalin i analizy do temperatury wyższej od przewidywanej temperatury punktu rosy. Dzięki temu zwiększa się wartość stężenia pary nasyconej $[H_2O]_{nas}$ w zależności (2.19).

Aby ocenić przydatność ogrzewania, w Agencji Ochrony Środowiska USA przeprowadzono testy na samochodzie Lincoln Mark VIII z silnikiem o objętości skokowej $4,6 \text{ dm}^3$. Testy

przewodzone przy pięciu natężeniach przepływu CVS w zakresie od 5,66 m³/min do 17,0 m³/min i w trzech warunkach ogrzewania:

- ogrzewanie przewodu próbkującego i powietrza rozcieńczającego,
- tylko ogrzewanie przewodu próbki,
- brak ogrzewania.

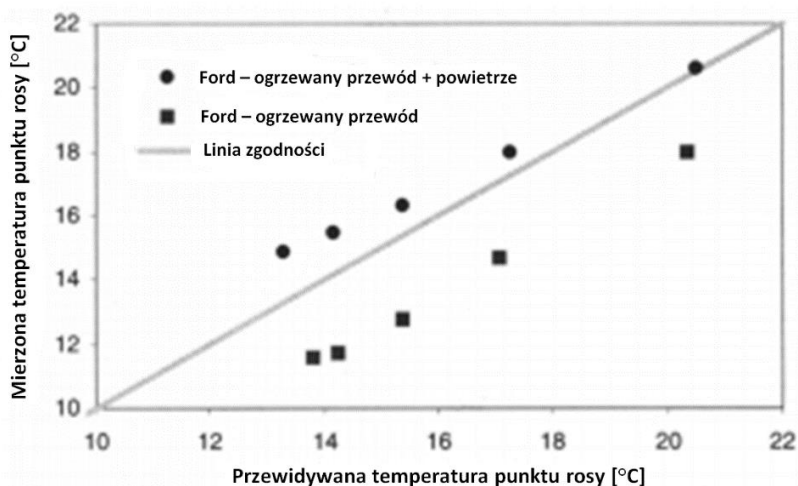
W warunkach pełnego ogrzewania, linie poboru próbek rozcieńczonych spalin ogrzewano od punktu poboru z układu CVS do wlotu do worka, a powietrze rozcieńczające ogrzewano do 40°C. W przypadku ogrzewania linii próbkowania, linie próbkowania powietrza rozcieńczającego były ogrzewane, ale powietrze rozcieńczające utrzymywano w temperaturze 25°C. W warunkach bez ogrzewania przewody do pobierania próbek i powietrze otoczenia miały temperaturę pokojową. Na rysunku 2.7 pokazano, że gdy nie zastosowano ogrzewania, zmierzona temperatura punktu rosy była znacznie niższa niż przewidywana, gdy zastosowano ogrzewanie. Tendencja ta wskazuje, że woda była tracona z próbkowanych spalin przed dotarciem do worka pomiarowego.



Rys. 2.7. Wpływ ogrzewania na kondensację pary wodnej [26]

Aby dokładniej ocenić wpływ ogrzewania, ten sam samochód (Lincoln Mark VIII) został przetestowany w Laboratorium Testów Certyfikacyjnych Forda we wcześniej zdefiniowanych warunkach ogrzewania, tzn. przy pełnym ogrzewaniu zarówno linii poboru i powietrza rozcieńczającego oraz przy ogrzewaniu tylko linii poboru. Na rysunku 2.8 pokazano, że zmierzona średnia temperatura punktu rosy w worku pomiarowym wykazuje lepszą zgodność z wartością przewidywaną w warunkach ogrzewania linii poboru i powietrza rozcieńczającego niż dla ogrzewanej tylko linii poboru. Wskazuje to, że ogrzewanie powietrza rozcieńczającego może odgrywać znaczącą rolę w eliminowaniu kondensacji próbki spalin.

W funkcję podgrzewania powietrza rozcieńczającego wyposażony jest układ poboru spalin stosowany w laboratorium ITS. Na rysunku 2.9 pokazano urządzenie do mieszania spalin z powietrzem rozcieńczającym, wyposażone w trójstopniowe filtry oczyszczające i układ do podgrzewania powietrza rozcieńczającego zastosowane w układzie poboru spalin CVS i60.



Rys. 2.8. Wpływ ogrzewania powietrza rozcieńczającego na kondensację pary wodnej [26]



Rys. 2.9. Urządzenie do mieszania spalin z powietrzem rozcieńczającym, wyposażone w trójstopniowe filtry oczyszczające i układ do podgrzewania powietrza rozcieńczającego zastosowane w układzie poboru spalin CVS i60 będącym na wyposażeniu ITS

Ten typ systemu wymaga bardzo starannej obsługi i konserwacji, tak aby zapewnić, że w układzie nie ma obszarów, które nie są ogrzewane. Brak ogrzewania mógłby spowodować kondensację próbki spalin.

2.4.2. Układy poboru spalin z możliwością oczyszczania powietrza rozcieńczającego

W sytuacji, gdy z powietrza rozcieńczającego usunie się wszystkie mierzone zanieczyszczenia, to wyeliminuje się konieczność korygowania stężenia w rozcieńczonych spalinach o zawartość tych zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym. W takim przypadku nie będzie wymagany współczynnik rozcieńczenia spalin DF , który występuje tylko w zależności (2.7).

Jednym z przykładów układu poboru spalin wykorzystującego tę koncepcję jest system DAR-2200 produkcji firmy Horiba [30, 31]. Zmniejsza on stężenie THC, CO i NO_x w powietrzu rozcieńczającym, zanim zostanie ono wprowadzone do układu poboru spalin. Powietrze rozcieńczające jest zasysane do układu, podgrzewane do kontrolowanej temperatury, a następnie kierowane do dwustopniowego układu katalitycznego. Powietrze jest następnie schładzane przez wymiennik ciepła i ostatecznie przechodzi przez środek utleniający NO_x i węgiel aktywny. Oczyszczone powietrze jest mieszane ze spalinami. System ten umożliwia dostarczenie 22 m³/min oczyszczonego powietrza, zawierającego mniej niż 0,1 ppm THC, CO₂ i NO_x.

Drugim systemem umożliwiającym zlikwidowanie mierzonych zanieczyszczeń z powietrza rozcieńczającego jest tzw. Bag Mini Diluter. W systemie tym odwrócono kolejność rozcieńczania i pobierania próbki spalin w stosunku do klasycznego, pełnoprzepływowego układu poboru spalin. W systemie BMD najpierw następuje pobranie niewielkiej, reprezentatywnej próbki surowych spalin, która następnie jest dokładnie rozcieńczana przy stałym współczynnikiem rozcieńczenia. Ze względu na małą objętość próbki, potrzebna jest mniejsza objętość rozcieńczalnika. Dlatego możliwe jest zastosowanie suchego, wolnego od mierzonych zanieczyszczeń gazu, oczyszczonego powietrza lub azotu [32].

W tabeli 2.2 zamieszczono porównanie stężenia zanieczyszczeń w workach pomiarowych w systemie BMD i układzie CFV CVS w teście FTP. Pomiar przeprowadzono dla samochodu charakteryzującego się zużyciem paliwa o wartości 9,4 dm³/100 km. Wilgotność względna powietrza w laboratorium wynosiła 50%, a temperatura 23,3°C. Natężenie przepływu przez CVS wynosiło 9 m³/min.

Tabela 2.2. Porównanie stężenia zanieczyszczeń w poszczególnych fazach cyklu FTP mierzonych za pomocą systemu BMD i CVS [32]

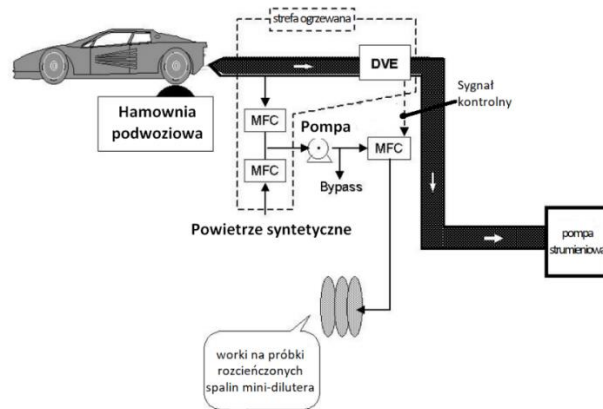
Zanieczyszczenie	System BMD		CVS			
	faza 1	faza 2	faza 1		faza 2	
	próbka	próbka	próbka	tło	próbka	tło
THC [ppm]	34,6	2,1	11,8	2,3	2,7	2,3
CO [ppm]	728,5	1,8	247,7	0,4	0,6	0,4
NO _x [ppm]	52,2	1,5	17,7	0,0	0,5	0,0

W układzie CVS stężenie zanieczyszczeń w workach z próbką spalin jest kilkakrotnie niższe niż w przypadku systemu BMD. Ponadto stężenie zanieczyszczenia zmierzone w fazie 2 cyklu FTP jest prawie takie samo, jak stężenie zmierzone w powietrzu rozcieńczającym, co utrudnia dokładne określenie emisji zanieczyszczeń z pojazdu w tej fazie. Natomiast w przypadku systemu BMD stężenie zanieczyszczenia dla tej fazy jest na tyle duże, że nie zachodzi konieczność stosowania do pomiarów analizatorów przeznaczonych do pomiaru bardzo małego stężenia takiego zanieczyszczenia.

Stosowanie tego systemu wiąże się z dwoma ważnymi wyzwaniem technicznymi. Po pierwsze, stosunek, w jakim się rozcieńcza spaliny, musi być dokładnie znany i stabilny. Po drugie, szybkość pobierania próbki w czasie pomiarów musi być proporcjonalna do przepływu nierozcieńczonych spalin (rys. 2.10).

W systemie tym za stopień rozcieńczenia spalin i jego stałą wartość odpowiadają dwa kontrolery przepływu masowego (MFC). Jeden MFC mierzy przepływ próbki nierozcieńczonych spalin, a drugi MFC mierzy przepływ oczyszczonego powietrza. Kontrolery te wraz z przepływomierzem spalin są podgrzewane do temperatury wyższej od temperatury punktu rosy, co zapobiega wykrapaniu się pary wodnej zawartej w spalinach. W omawianym systemie spaliny mieszane są z oczyszczonym powietrzem z otoczenia, z którego usunięto węglowodory, tlenek węgla i wodę za pomocą konwencjonalnego generatora powietrza zerowego. Do rozcieńczania spalin można też stosować czysty azot, co może jeszcze bardziej poprawić po-

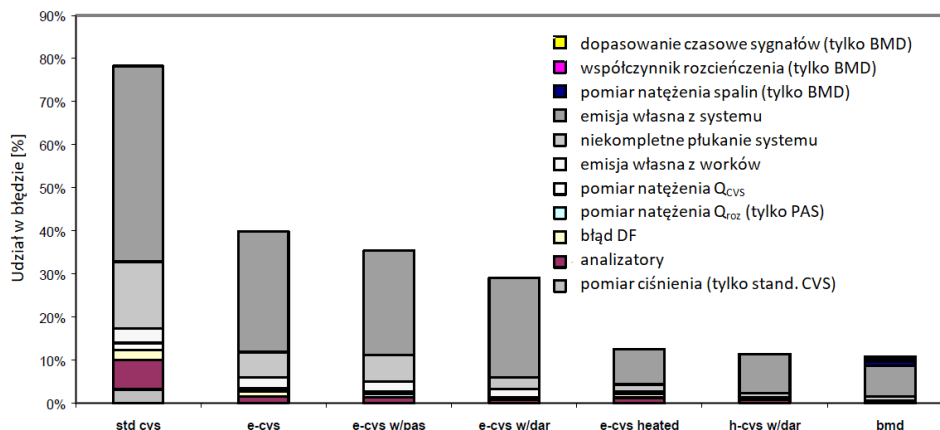
miary, szczególnie tlenków azotu, ponieważ w tym przypadku mniej tlenku azotu zostanie przekształconych w dwutlenek azotu. Rozcieńczone spaliny są następnie transportowane do kontrolera przepływu masowego odpowiedzialnego za napełnianie worków pomiarowych. Kontroler ten jest sterowany sygnałem z przepływomierza natężenia przepływu surowych spalin, tak aby natężenie przepływu próbki do worków było proporcjonalne do natężenia przepływu surowych spalin.



Rys. 2.10. System Bag Mini Diluter z bezpośrednim pomiarem natężenia przepływu spalin [27]

Dzięki takiemu rozwiązaniu zlikwidowano trzy problemy charakterystyczne dla układów poboru spalin o stałym natężeniu przepływu. Po pierwsze istnieje możliwość zaprogramowania współczynnika rozcieńczenia i ustawienia go tak, aby wyeliminować kondensację pary wodnej. Po drugie, współczynnik rozcieńczenia jest zoptymalizowany do najniższej wartości, maksymalizując w ten sposób stężenie rozcieńczonych spalin. Po trzecie, powietrze rozcieńczające jest wolne od zanieczyszczeń, ponieważ nie jest używane powietrze z otoczenia; zamiast tego stosuje się czyste powietrze lub azot, które mają minimalne zanieczyszczenie.

Prace rozwojowe nad tym systemem [31] pozwoliły na zwiększenie dokładności pomiaru związków szkodliwych. Badania wykazały, że korzystając z tego systemu otrzymuje się wyniki porównywalne z układem CFV, zarówno pod względem wartości emisji zanieczyszczeń jak i rozrzutów wyników. Na rysunku 2.11 przedstawiono średni błąd wyznaczenia emisji węglowodorów niemetanowych obliczony na podstawie opracowanego modelu dla sześciu różnych układów poboru spalin [33]. Te wartości procentowe stanowią względny błąd między średnią symulowaną masą ważoną, a rzeczywistą masą ważoną obliczoną na podstawie danych wejściowych pojazdu. Dla porównania 10-procentowy błąd oznacza około 0,8 mg/mil.



Rys. 2.11. Względny błąd wyznaczenia emisji NMHC w cyklu FTP dla różnych systemów poboru spalin oszacowany na podstawie modelu matematycznego opisanego w [33]

2.4.3. Rozwój metod obliczania współczynnika rozcieńczenia spalin

Wartość stopnia rozcieńczenia spalin wyznaczona na podstawie zależności (2.8) jest obarczona błędami wynikającymi z przyjętych założeń upraszczających. W zależności (2.8) nie uwzględniono na przykład wpływu stężenia poszczególnych zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym. Zmodyfikowany wzór na wskaźnik DF uwzględniający zanieczyszczenie powietrza rozcieńczającego opracowano w Departamencie Ochrony Środowiska w Nowym Jorku [34]. Do wyznaczenia dokładniejszej wartości wskaźnika DF wymagane jest dwuetapowe podejście. Po pierwsze, DF oblicza się z użyciem standardowego równania EPA (2.8), dalej oznaczonego w tekście jako DF_{EPA} , a następnie DF_{EPA} stosuje się w połączeniu ze zmierzonymi stężeniami składników w powietrzu rozcieńczającym zawierającymi cząsteczki węgla według zależności (2.20)

$$DF_{NY} = \frac{13,4}{(CO_{2,roz} + CO_{roz} + THC_{roz}) - (CO_{2,tlo} + CO_{tlo} + THC_{tlo}) \times \left(1 - \frac{1}{DF_{EPA}}\right)} \quad (2.20)$$

Dla zobrazowania różnic w wynikach otrzymywanych na podstawie powyższych zależności przeanalizowano następujący przypadek [35]:

- stężenie CO_2 w powietrzu rozcieńczającym wynosi 800 ppm,
- stężenie CO i THC w powietrzu rozcieńczającym wynosi 0 ppm,
- stężenie CO_2 w spalinach wynosi 13,4% (założono skład stechiometryczny mieszanki paliwowo-powietrznej),
- stężenie CO i THC w spalinach wynosi 0 ppm,
- rzeczywisty stopień rozcieńczenia DR wynosi 20.

Dla powyższych danych obliczono stężenie CO_2 w rozcieńczonych spalinach ($CO_{2,roz}$):

$$CO_{2,roz} = \frac{CO_{2,sp} + (DR - 1) \times CO_{2,tlo}}{DR}$$

$$CO_{2-dil} = \frac{13,4 + (20 - 1) \times 0,08}{20} = 0,746\%$$

oraz umowny wskaźnik rozcieńczenia DF_{EPA}

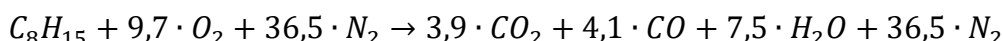
$$DF_{EPA} = \frac{13,4}{0,746 + 0 + 0} = 17,96 \approx 18$$

Na podstawie obliczeń można stwierdzić, że brak uwzględnienia tła w obliczeniach wskaźnika DF_{EPA} daje przewidywany wskaźnik DF równy 18, czyli o 10% poniżej wartości rzeczywistej. Natomiast umowny wskaźnik rozcieńczenia DF_{NY} wyznaczony na podstawie zależności (3.10) wynosi w tym przykładzie:

$$DF_{NY} = \frac{13,4}{(0,746 + 0 + 0) - (0,08 + 0 + 0) \times \left(1 - \frac{1}{18}\right)} = \frac{13,4}{0,6704} = 19,99 \approx 20$$

i był równy rzeczywistemu stopniu rozcieńczenia DR .

Innym problemem z równaniem DF zawartym w FTP jest to, że jest on dokładny tylko dla stosunku powietrze-paliwo w pobliżu stechiometrycznego. Jeśli na przykład stosunek powietrza do paliwa w silniku wynosi 12:1, wówczas równanie spalania (zakładając pomijalną zawartość węglowodorów w spalinach) jest następujące:



W oparciu o to równanie, suma związków zawierających węgiel w spalinach (w tym przypadku suma stężenia CO_2 oraz CO) wynosi 18,0% dla spalin suchych $[(3,9 + 4,1)/(3,9 + 4,1 +$

+ 36,5) i 15,4% dla spalin mokrych [(3,9 + 4,1)(3,9 + 4,1 + 7,5 + 36,5)]. Jak ilustruje to powyższy przykład, współczynnik DF nie może być dokładnie wyrażony jako stała (np. 13,4) podzielona przez sumę związków zawierających węgiel w spalinach. Zmienność współczynnika DF wynika z faktu, że całkowita objętość spalin zmniejsza się wraz ze spadkiem stosunku powietrze-paliwo, ale objętość produktów zawierających węgiel (przede wszystkim CO oraz CO₂) pozostaje na zbliżonym poziomie.

W California Bureau of Automotive Repair opracowano zależność na współczynnik DF uwzględniający wpływ składu mieszanki paliwowo-powietrznej [36], zalecany do używania w badaniach technicznych pojazdów w Kalifornii:

$$DF_{Bar} = \frac{\frac{CO_{2,roz}}{CO_{2,roz} + CO_{roz}}}{CO_{2,roz} \times \left(F_{fuel} + \frac{r_N}{200} \times \frac{CO_{2,roz}}{CO_{2,roz} + CO_{roz}} \right)} \quad (2.21)$$

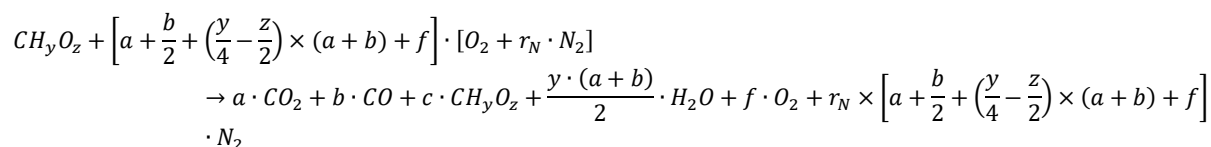
W tym równaniu r_N jest molowym stosunkiem atmosferycznego azotu do tlenu w powietrzu, a F_{fuel} , zwany współczynnikiem paliwa, jest funkcją stosunku wodoru/węgla i tlenu/węgla w paliwie. Wzór na cząsteczkę paliwa zawierającego węgiel, wodór i tlen może być zapisany jako CH_yO_z, gdzie y jest stosunkiem atomowym wodoru do węgla, a z jest stosunkiem atomowym tlenu do węgla. W przypadku tak opisanego cząsteczki paliwa współczynnik paliwa F_{fuel} w zależności (2.11) określa się według następującego wzoru:

$$F_{fuel} = \frac{1 + r_N \times \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right)}{100} \quad (2.22)$$

Równanie (2.21) można wyprowadzić na podstawie podstawowego równania spalania przy założeniu, że stężenie węglowodorów nie jest znaczące w stosunku do CO₂ i CO. Równanie uwzględnia fakt, że w warunkach mieszanki bogatej, potrzeba mniej tlenu, aby utworzyć mol każdego związku zawierającego węgiel w układzie wylotowym. Dzieje się tak, ponieważ nie ma wystarczającej masy tlenu, aby całkowicie spalić cały węgiel (do CO₂), i w związku z czym część węgla pozostaje jako tlenek węgla, który zużywa tylko połowę tlenu na mol.

W równaniu (2.21) nie uwzględnia się wpływu zanieczyszczenia powietrza rozcieńczającego, ponieważ zostało ono opracowane na potrzeby badań technicznych, w których używano stosunkowo prostych analizatorów (BAR-97), które nie są wystarczająco czułe, aby dokładnie zmierzyć stężenia tła.

W Sierra Research, Inc. opracowano zależności, które uwzględniają zarówno stężenie zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym, jak i wpływ składu mieszanki [35]. Opracowano je na podstawie następującej reakcji chemicznej:



Aby równanie to było zbilansowane, suma moli zawierających węgiel po lewej stronie równania musi być równa jednemu molowi węgla w paliwie:

$$a + b + c = 1$$

W powyższym równaniu równowagi chemicznej przyjęto następujące założenia:

- węglowodory w spalinach mają ten sam skład co paliwo,
- zanieczyszczenia śladowe, takie jak wodór i tlenki azotu, nie mają znaczącego wpływu na ilość innych zanieczyszczeń.

Na podstawie tego równania chemicznego oraz przy uwzględnieniu wymienionych wyżej założeń wyprowadzono wzór na współczynnik rozcieńczenia DF , uwzględniający zarówno stężenie zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym, jak i wpływ składu mieszanki:

$$DF_{Sierra} = \frac{K_1 \times CO_{2,tlo} + K_2 \times CO_{tlo} + THC_{tlo}}{100 - K_1 \times (CO_{2,roz} - CO_{2,tlo}) - K_2 \times (CO_{roz} - CO_{tlo}) - (THC_{roz} - THC_{tlo}) - (1 + r_N) \times O_{2,roz}} \quad (2.23)$$

Współczynniki K_1 oraz K_2 określone są poniższymi zależnościami (dla spalin mokrych):

$$K_1 = 1 + \frac{y}{2} + r_N \times \left[1 + \left(\frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) \right] \quad (2.24)$$

$$K_2 = 1 + \frac{y}{2} + r_N \times \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) \right] \quad (2.25)$$

W celu obliczenia współczynnika rozcieńczenia DF na podstawie zależności (2.23) niezbędny jest pomiar stężenia tlenu w rozcieńczonych spalinach. Wymaga to posiadania dodatkowego analizatora stężenia tlenu. W pracy [35] uproszczono więc zależność (2.23) dla przypadków, gdy w spalinach nie ma tlenu lub jego zawartość jest pomijalnie mała (mieszanka bogata lub bliska stechiometrycznej w silnikach ZI). Uproszczona forma zależności (2.23) przedstawia się następująco:

$$DF_{Sierra} = \frac{100 - K_1 \times CO_{2-back} - K_2 \times CO_{back} - THC_{back}}{K_1 \times (CO_{2-dil} - CO_{2-back}) + K_2 \times (CO_{dil} - CO_{back}) + (THC_{dil} - THC_{back})} \quad (2.26)$$

Wartości współczynników K_1 i K_2 dla typowych paliw podano w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Wartości współczynników K_1 i K_2 w zależnościach 2.23 oraz 2.26 [35]

Paliwo	Spaliny suche		Spaliny mokre		Skład paliwa
	K_1	K_2	K_1	K_2	
Benzyna	6,5437	4,6565	7,4812	5,5940	C_8H_{15}
Metanol	6,6616	4,7744	8,6616	6,7744	CH_3OH
M85	6,5926	4,7054	7,9706	6,0834	średnia ważona dla CH_3OH i C_8H_{15}
Etanol	6,6616	4,7744	8,1616	6,2744	C_2H_5OH
E85	6,6128	4,7256	7,8800	5,9928	średnia ważona dla C_2H_5OH i C_8H_{15}
Metan	8,5488	6,6616	10,5488	8,6616	CH_4
Propan	7,2907	5,4035	8,6240	6,7368	C_3H_8

W tabeli 2.4 przedstawiono wyniki obliczeń wskaźnika rozcieńczenia DF dla różnego składu mieszanki paliwowo-powietrznej oraz stężenia zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym. Obliczenia przeprowadzono dla benzyny, dla której przyjęto wzór C_8H_{15} . Do obliczenia wskaźnika rozcieńczenia użyto następujących równań:

- równanie (2.8) – DF_{EPA} ,
- równanie (2.10) – DF_{NY} , z modyfikacją licznika od 13,4 do 15,3,
- równanie (2.11) – DF_{BAR} ,
- równanie (2.16) – DF_{Sierra} .

Wszystkie obliczenia wykonano dla spalin suchych.

Tabela 2.4. Porównanie wartości wskaźnika rozcieńczenia DF obliczonego według różnych zależności [35]

Numer przypadku	1	2	3	4	5	6	7	8
Opis analizowanego przypadku	Bez tła, bez CO i THC	Bez tła, CO i THC	Tłó, bez CO i THC	CO, bez tła i THC	THC, bez tła i CO	Tłó, CO i THC	Tłó, wysokie stężenie CO i THC	Tłó, bardzo wysokie stężenie CO i THC
AFR (masowo)	14,61	13,31	14,61	13,37	14,55	13,31	12,06	10,20
$CO_{2,sp}$ [%]	15,3280	12,3334	15,3280	12,3888	15,2873	12,3334	8,8800	2,4459
CO_{sp} [%]	0,0000	4,1457	0,0000	4,1296	0,0000	4,1457	8,9924	18,0225
THC_{sp} [%]	0,0000	0,1036	0,0000	0,0000	0,0961	0,1036	0,1124	0,1287
$CO_{2,pow}$ [%]	0,0000	0,0000	0,1000	0,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
CO_{pow} [%]	0,0000	0,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0100	0,0100	0,0100
THC_{pow} [%]	0,0000	0,0000	0,0050	0,0000	0,0000	0,0050	0,0050	0,0050
Hipotetyczny stopień rozcieńczenia $DR = 20$								
$CO_{2,CVS}$ [%]	0,7664	0,6167	0,8614	0,6194	0,7644	0,7117	0,5390	0,2173
CO_{CVS} [%]	0,0000	0,2073	0,0095	0,2065	0,0000	0,2168	0,4591	0,9106
THC_{CVS} [%]	0,0000	0,0052	0,0048	0,0000	0,0048	0,0099	0,0104	0,0112
Obliczony wskaźnik rozcieńczenia DF dla $DR = 20$								
$DF_{EPA,suche}$	20,00	18,49	17,50	18,56	19,93	16,33	15,20	13,46
$DF_{NY,suche}$	20,00	18,49	19,98	18,56	19,93	18,46	17,01	14,84
DF_{BAR}	20,00	20,06	17,66	20,00	20,05	17,70	17,70	17,71
DF_{Sierra}	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Hipotetyczny stopień rozcieńczenia $DR = 10$								
$CO_{2,CVS}$ [%]	1,5328	1,2333	1,6228	1,2389	1,5287	1,3233	0,9780	0,3346
CO_{CVS} [%]	0,0000	0,4146	0,0090	0,4130	0,0000	0,4236	0,9082	1,8112
THC_{CVS} [%]	0,0000	0,0104	0,0045	0,0000	0,0096	0,0149	0,0157	0,0174
Obliczony wskaźnik rozcieńczenia DF dla $DR = 10$								
$DF_{EPA,suche}$	10,00	9,24	9,37	9,28	9,96	8,70	8,06	7,09
$DF_{NY,suche}$	10,00	9,24	9,99	9,28	9,96	9,23	8,51	7,42
DF_{BAR}	10,00	10,03	9,41	10,00	10,03	9,43	9,44	9,44
DF_{Sierra}	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Dla wszystkich przypadków pokazanych w tabeli 2.4, zalecana przez Sierra Research, Inc zależność (2.26) do obliczania wskaźnika rozcieńczenia, oznaczona jako DF_{Sierra} , daje prawidłowy wynik. Pierwszy przypadek pokazany w tabeli 2.4 dotyczy stechiometrycznego całkowitego spalania bez zanieczyszczeń w tle. W takim przypadku wszystkie równania DF dają poprawny wynik. Drugi przypadek obrazuje spalanie niestechiometryczne bez tła. Tutaj równania (2.21, DF_{BAR}) oraz (2.26, DF_{Sierra}) zachowują się równie dobrze, ale równania (2.20, DF_{NY}) i (2.8, DF_{EPA}), które nie uwzględniają spalania niestechiometrycznego, dają mniejszą od rzeczywistej wartość stopnia rozcieńczenia. Natomiast trzeci przypadek zawiera całkowicie stechiometryczne spalanie z zanieczyszczeniami tła. Tutaj równanie (2.20, DF_{NY}) i równanie (2.26, DF_{Sierra}) dają poprawny wynik, natomiast równania (2.21, DF_{BAR}) i (2.8, DF_{EPA}), które nie uwzględniają stężenia tła, dają mniejszą od rzeczywistej wartość stopnia rozcieńczenia.

Wpływ węglowodorów na prawidłowość wyznaczania stopnia rozcieńczenia badano w przypadkach 4 i 5. W przypadku 4 przyjęto, że spaliny zawierają CO, ale nie ma innych odchyłeń od idealnego przypadku, jakim jest przypadek 1, natomiast w przypadku 5 spaliny zawierają węglowodory, ale nie ma innych odchyłeń od idealnego przypadku. W przypadku 4, równania (2.21, DF_{BAR}) i (2.26, DF_{Sierra}) dają dokładny wynik. Jednak równania, które nie

uwzględniają spalania niestechiometrycznego, dają niższą od rzeczywistej wartość stopnia rozcieńczenia. W przypadku 5 obecność węglowodorów, które nie są uwzględnione w (2.21, DF_{BAR}), zapewnia mały błąd dla wszystkich równań współczynnika rozcieńczenia, z wyjątkiem równania (2.26, DF_{Sierra}), który daje prawidłowy wynik. Tak więc nieuwzględnienie stężenia węglowodorów jest zwykle dobrym założeniem. Potwierdza to analiza przypadków 2 i 4. Te przypadki mają podobne wartości składu mieszanki paliwowo-powietrznej i brak tła. W przypadku 2, przy obecności węglowodorów, równanie (2.21, DF_{BAR}) ma współczynnik rozcieńczenia o 0,3% większy od prawidłowej wartości. W przypadku 4, który różni się od przypadku 2 tylko brakiem węglowodorów, to równanie zwraca dokładny współczynnik rozcieńczenia. To pokazuje, że mały błąd dla tego równania w przypadku 2 wynika z nieuwzględniania w zależności (2.21, DF_{BAR}) obecności węglowodorów w spalinach.

Ostatnie trzy przypadki (6, 7 i 8) pokazują łączny wpływ składu mieszanki i zanieczyszczenia powietrza rozcieńczającego. Największy błąd we wszystkich trzech przypadkach występuje przy obliczaniu stopnia rozcieńczenia za pomocą równania (2.8, DF_{EPA}). Błąd ten w zależności od rzeczywistego stopnia rozcieńczenia zawiera się w przedziale od $-18,4\%$ do $-32,7\%$ dla $DR = 20$ oraz od $-7,7\%$ do $-25,8\%$ dla $DR = 10$. Wielkość błędu w tym przypadku zależy nie tylko od współczynnika nadmiaru powietrza i stężenia zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym, ale również od rzeczywistego stopnia rozcieńczenia DR . W przypadku obliczania stopnia rozcieńczenia za pomocą równania (2.20, DF_{NY}) błąd jest mniejszy niż dla równania (2.8, DF_{EPA}) i zawiera się w przedziale od $-7,7\%$ do $-25,8\%$. Nie zależy on również od rzeczywistego stopnia rozcieńczenia DR . Błąd wyznaczenia stopnia rozcieńczenia za pomocą równania (2.21, DF_{BAR}) jest niezależny od składu mieszanki paliwowo-powietrznej i praktycznie od stężenia zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym, natomiast na jego wartość ma wpływ rzeczywisty stopień rozcieńczenia DR . Błąd ten wynosi $-11,5\%$ dla $DR = 20$ oraz $-5,6\%$ dla $DR = 10$.

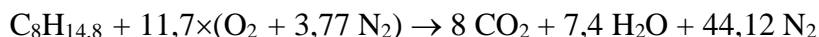
W artykułach [37, 38] zwracano uwagę na wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na prawidłowość obliczonego na podstawie zależności (2.8) współczynnika rozcieńczenia DF . W tych opracowaniach określano różnicę masy zanieczyszczeń obliczanych z wykorzystaniem współczynnika rozcieńczenia DF oraz stopnia rozcieńczenia DR :

$$\Delta m_{ieDF-DR} = m_{ieDF} - m_{ieDR} \quad (2.27)$$

Uwzględniając zależności (2.3), (2.6) i (2.7) różnicę masy można przedstawić w postaci poniższej zależności:

$$\Delta m_{ieDF-DR} = \rho_i \times V_{mix} \times c_{i,pow} \times \left(\frac{1}{DF} - \frac{1}{DR} \right) \quad (2.28)$$

Przy założeniu stechiometrycznego składu mieszanki paliwowo-powietrznej, spalanie 1 mola cząsteczki $C_8H_{14,8}$ reprezentującego benzynę silnikową, powoduje, zgodnie z poniższą reakcją chemiczną, powstanie 59,5 mola spalin:



Na tej podstawie, teoretyczna objętość spalin przy spalaniu stechiometrycznym $V_{sp,DF}$ wynosi 59,5 mola. W tabeli 2.5 pokazano molową objętość spalin V_{sp} dla różnej wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ . Zamieszczono w niej również wartość iloczynu współczynnika nadmiaru powietrza i objętości surowych spalin obliczonej na podstawie współczynnika DF oraz względny błąd procentowy między tymi dwoma wartościami. Porównując obie te wartości można założyć, że:

$$V_{sp} \approx \lambda_{sp} \times V_{sp,DF} \quad (2.29)$$

Mając na uwadze powyższe równanie oraz to, że:

$$DF = \frac{V_{mix}}{V_{sp,DF}} \quad (2.30)$$

$$DR = \frac{V_{mix}}{V_{sp}} \quad (2.31)$$

otrzymuje się zależność na różnicę masy zanieczyszczeń obliczanej z wykorzystaniem współczynnika rozcieńczenia DF oraz stopnia rozcieńczenia DR :

$$\Delta m_{ieDF-DR} \approx \rho_i \times V_{sp} \times c_{i,pow} \times (1 - \lambda) \quad (2.32)$$

Z równania (2.22) wynika, że różnica masy występuje tylko wtedy, gdy $\lambda \neq 1$. Jest ona proporcjonalna do stężenia zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym, objętości spalin oraz współczynnika nadmiaru powietrza λ .

Tabela 2.5. Porównanie objętości molowej spalin V_{sp} oraz obliczonej na podstawie współczynnika λ i objętości spalin obliczonej na podstawie wskaźnika rozcieńczenia DF [37]

λ	[-]	1	1,2	1,5	2	3
CO ₂	[mol]	8	8	8	8	8
H ₂ O	[mol]	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
N ₂	[mol]	44,1	52,9	66,15	88,2	132,3
O ₂	[mol]	0	2,3	5,85	11,7	23,4
Razem (V_{sp})	[mol]	59,5	70,7	87,4	115	171
$\lambda \times V_{sp,DF}$	[mol]	59,5	71,4	89,3	119	179
Błąd względny	[%]	0	1,0	2,1	3,1	4,2

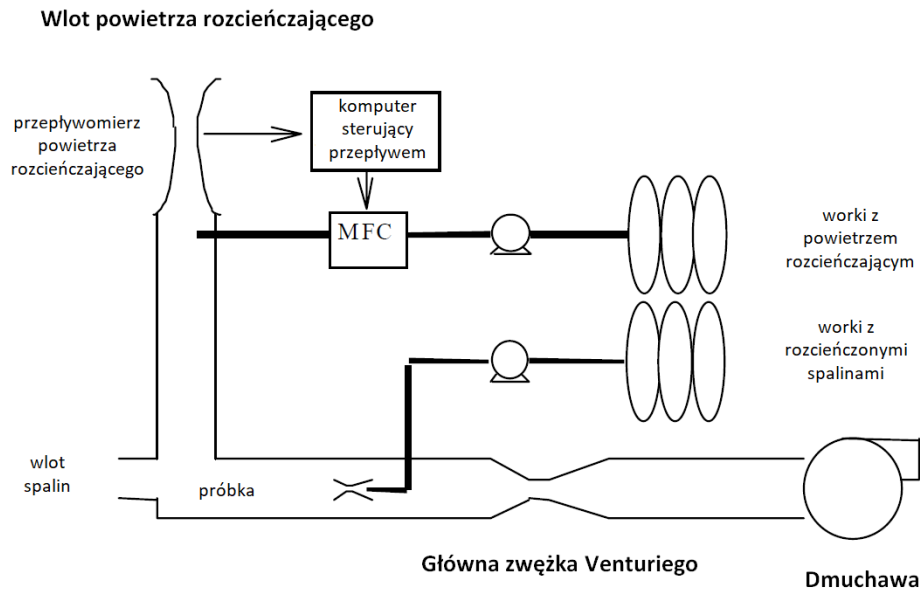
2.4.4. Układy poboru spalin umożliwiające wyznaczenie stopnia rozcieńczenia spalin

W przypadku klasycznego układu poboru spalin o stałym natężeniu przepływu zakłada się, że stężenie zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym jest stałe. W związku z tym możliwe jest pobieranie próbki tego powietrza ze stałym natężeniem przepływu. Teoretycznie szybkość napełniania worków z otoczenia powinna zmieniać się w zależności od ilości powietrza rozcieńczającego wprowadzanego do worków pomiarowych w dowolnej chwili i powinna być proporcjonalna do ilości powietrza otoczenia używanego do rozcieńczania nieoczyszczonych spalin. Dla początkowego okresu stosowania tego układu, gdzie stężenie zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach było znacznie większe od ich stężenia w powietrzu rozcieńczającym, błędy wynikające z tego założenia można pominąć. Dodatkowo, dla zmniejszenia zmian stężenia tła, wprowadzony został w układzie poboru spalin filtr z węglem aktywowanym, który jest odpowiedzialny za niwelowanie zmian stężenia węglowodorów.

Zmniejszająca się różnica między stężeniem zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach a ich stężeniem w powietrzu rozcieńczającym powoduje, że w przypadku zmiennej wartości stężenia tła pobieranie próbki powietrza ze stałym natężeniem przepływu prowadzi do tego, że próbka zgromadzona w worku tła może być niereprezentatywna.

W celu uniknięcia tego błędu opracowano układ poboru spalin o stałym natężeniu przepływu z proporcjonalnym poborem powietrza rozcieńczającego (rys. 2.12) [39]. Do obwodu napełniania worka z powietrzem rozcieńczającym dołożono kontroler przepływu masowego

(MFC), a na wlocie powietrza zastosowano przepływomierz w celu zapewnienia sygnału, który będzie sterował kontrolerem przepływu masowego. Zadaniem tego kontrolera jest regulowanie natężenia, z jakim pobierana jest próbka powietrza rozcieńczającego tak, aby było one proporcjonalne do zmieniającego się natężenia przepływu powietrza rozcieńczającego. Układ ten umożliwi również wyznaczenie stopnia rozcieńczenia DR .



Rys. 2.12. Schemat układu poboru spalin o stałym natężeniu przepływu z proporcjonalnym poborem powietrza rozcieńczającego (CFV CVS-PAS) [39]

3. Tezy pracy

Wskaźniki emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego są określane na podstawie ich pomiarów z układu wylotowego pojazdów w cyklach jezdnych odwzorowujących rzeczywiste warunki ruchu drogowego. Dla samochodów osobowych i dostawczych badania te prowadzone są na hamowni podwoziowej. Większość laboratoriów zajmujących się takimi badaniami wyposażone są w układ poboru spalin o stałym natężeniu przepływu, w którym spaliny mieszane są z powietrzem, co pozwala na uzyskanie stałego natężenia przepływu tej mieszaniny. Stężenie danego zanieczyszczenia mierzone jest w rozcieńczonych spalinach, dlatego do obliczenia jego emisji drogowej niezbędna jest znajomość stopnia, w jakim spaliny rozcieńczane są powietrzem pobieranym z otoczenia.

Po raz pierwszy metodykę pomiaru i obliczania emisji podano w [25]. Ze względu na uproszczenie konstrukcji układu poboru spalin oraz duże wartości mierzonych stężeń zrezygnowano z bezpośredniego pomiaru stopnia rozcieńczenia na rzecz współczynnika rozcieńczenia DF (2.8). Współczynnik ten został opracowany na podstawie założeń upraszczających, że spalanie jest całkowite i zupełne oraz że mieszanka paliwowo-powietrzna w silniku ma skład stechiometryczny. W czasie, gdy opublikowano [25] przyjęcie powyższych założeń upraszczających, w niewielkim stopniu miało to wpływ na dokładność wyznaczania stopnia rozcieńczenia, ponieważ większość samochodów było napędzanych silnikami benzynowymi. Silniki te objęte badaniami homologacyjnymi były zasilane mieszanką stechiometryczną lub bliską stechiometrycznej, a stężenia zanieczyszczeń mierzone w rozcieńczonych spalinach były znacznie większe od ich stężenia w powietrzu rozcieńczającym.

Ograniczanie emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego prowadzi do zmniejszania ich wartości w spalinach, a to z kolei powoduje zwiększanie wpływu przyjętych założeń upraszczających na dokładność wyznaczania stopnia rozcieńczenia. W celu ograniczenia błędu systematycznego metody podejmowano próby zmodyfikowania zależności na obliczenie współczynnika rozcieńczenia DF , co omówiono w punkcie 2.4.3 niniejszej pracy. W metodyce obliczania emisji drogowej zanieczyszczeń, podawanej w dokumentach normatywnych, nie znalazły jednak zastosowania.

Równolegle rozwijano układy poboru spalin, dzięki którym możliwe jest uzyskanie zwiększonej dokładności pomiaru emisji zanieczyszczeń przez eliminację niektórych wad wersji standardowej. Jedną z grup są układy pozwalające na zmniejszenie stopnia rozcieńczenia spalin, co prowadzi do uzyskania większej różnicy między stężeniem zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach a jego stężeniem w powietrzu rozcieńczającym. Układy tego typu opisano w punkcie 2.4.1 niniejszej pracy. Drugą grupą są układy eliminujące lub znacznie ograniczające stężenie mierzonych zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym. W przypadku, gdy stężenie zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym dąży do zera, błąd wyznaczenia stopnia rozcieńczenia zaczyna być pomijalny, bez względu na jego wielkość. Tę grupę układów opisano w punkcie 2.4.2 niniejszej pracy.

Obecnie stosowane w większości laboratoriów układy poboru spalin zapewniają zachowanie składowej błędności, wynikającej z przyjętego sposobu określania współczynnika rozcieńczenia, za pomocą zależności (2.8) na akceptowalnym poziomie. Należy jednak zauważyć, że w badaniach homologacyjnych pomiary emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego prowadzi się po rozruchu zimnego silnika. Powoduje to, że stężenie zanieczyszczeń mierzone w rozcieńczonych spalinach jest większe, szczególnie w pierwszej fazie cyklu jezdny, w którym układ oczyszczania spalin nie osiąga jeszcze pełnej sprawności. W odróżnieniu od badań homologacyjnych, pomiary emisji zanieczyszczeń prowadzone na potrzeby określenia wskaźników ich emisji wykonuje się przede wszystkim po rozruchu całkowicie nagrzanego silnika. W tym przypadku układ oczyszczania działa już z pełną sprawnością, a mierzone wartości stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach często bywają bardzo bliskie

odpowiadającym im wartościom w powietrzu rozcieńczającym. Prowadzi to do zwiększenia błędu wynikającego z przyjętego sposobu określania współczynnika rozcieńczenia za pomocą zależności (2.8).

W przypadku badań homologacyjnych pojazdów, wynikające z tego błędy systematyczne metody nie mają znaczenia, ponieważ istotą tych badań jest porównywanie zmierzonych wartości z wartościami dopuszczalnymi określonymi w przepisach, a ponieważ wszystkie laboratoria stosują tę samą metodykę obliczeń, więc popełniają taki sam błąd. Inaczej jest w przypadku badań prowadzonych w celu określenia wskaźników emisji zanieczyszczeń, które wykorzystywane są do szacowania ich emisji z pojazdów. W tym przypadku istotne jest określenie rzeczywistej wartości emisji zanieczyszczeń i w związku z tym powinno dążyć się do uzyskania możliwie dokładnego wyniku nie obciążonego błędami systematycznymi.

W dostępnej literaturze nie znaleziono prac omawiających wpływ stosowania zależności (2.8) do obliczania współczynnika rozcieńczenia na błąd określenia wskaźników emisji zanieczyszczeń stosowanych w inwentaryzacji ich emisji z transportu drogowego i pośrednio emisji rocznej z tej kategorii.

Na podstawie powyższej analizy oraz dokonanego przeglądu dostępnej literatury sformułowano następujące tezy pracy:

- 1. Stosowana obecnie metoda pomiaru emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego wykorzystująca układ poboru spalin o stałym natężeniu przepływu, wprowadza błąd systematyczny, wynikający z przyjęcia założenia upraszczającego o stechiometrycznym składzie mieszanki podczas wyznaczania współczynnika rozcieńczenia spalin.*
- 2. Błąd ten może mieć istotny wpływ na wyniki pomiarów emisji zanieczyszczeń wykorzystywanych do wyznaczania ich wskaźników i w rezultacie na dokładność inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.*

Zgodnie z punktem 1.2 niniejszej pracy jej celem jest określenie wpływu stosowania w obliczeniach emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego zależności na współczynnik rozcieńczenia na wskaźniki emisji stosowane do szacowania całkowitej rocznej emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych i lekkich samochodów dostawczych wyposażonych w silniki spalinowe.

Tak sformułowany cel pracy wymaga przeprowadzenia następującego zakresu prac badawczych:

- badania współczynnika nadmiaru powietrza (λ) w cyklach jezdnych ARTEMIS, WLTC i NEDC,
- analizę wpływu współczynnika nadmiaru powietrza (λ) na błąd określania rzeczywistego stopnia rozcieńczenia spalin,
- badania emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego w cyklach jezdnych ARTEMIS,
- modyfikację metody określania rzeczywistego stopnia rozcieńczenia spalin za pomocą jednoczesnego pomiaru stężenia dwutlenku węgla w spalinach surowych i rozcieńczonych,
- obliczenia całkowitej rocznej emisji zanieczyszczeń dla badanych samochodów,
- analizę błędu systematycznego obliczania całkowitej rocznej emisji zanieczyszczeń.

4. Metodyka badań

4.1. System do pomiaru emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego umożliwiający wyznaczenie stopnia rozcieńczenia spalin

Stopień rozcieńczenia DR określony jest zależnością:

$$DR = \frac{V_{cvS}}{V_{sp}} \quad (4.1)$$

Objętość rozcieńczonych spalin w układzie poboru spalin V_{cvS} jest obliczana na podstawie natężenia przepływu wywołwanego przez wybraną w układzie poboru zwężkę Venturiego. Objętość spalin V_{sp} nie jest natomiast mierzona. Można ją wyznaczyć jedną z czterech metod:

- 1) zmierzyć w sposób bezpośredni za pomocą przepływomierza podłączonego między układem wylotowym badanego pojazdu a układem poboru spalin,
- 2) obliczyć na podstawie masy powietrza zasysanego przez silnik i masy zużytego paliwa (metoda stosowana podczas badań na hamowni silnikowej),
- 3) obliczyć na podstawie pomiaru stężenia wybranego zanieczyszczenia w surowych spalinach, spalinach rozcieńczonych i powietrzu rozcieńczającym,
- 4) obliczyć na podstawie pomiaru natężenia przepływu powietrza rozcieńczającego.

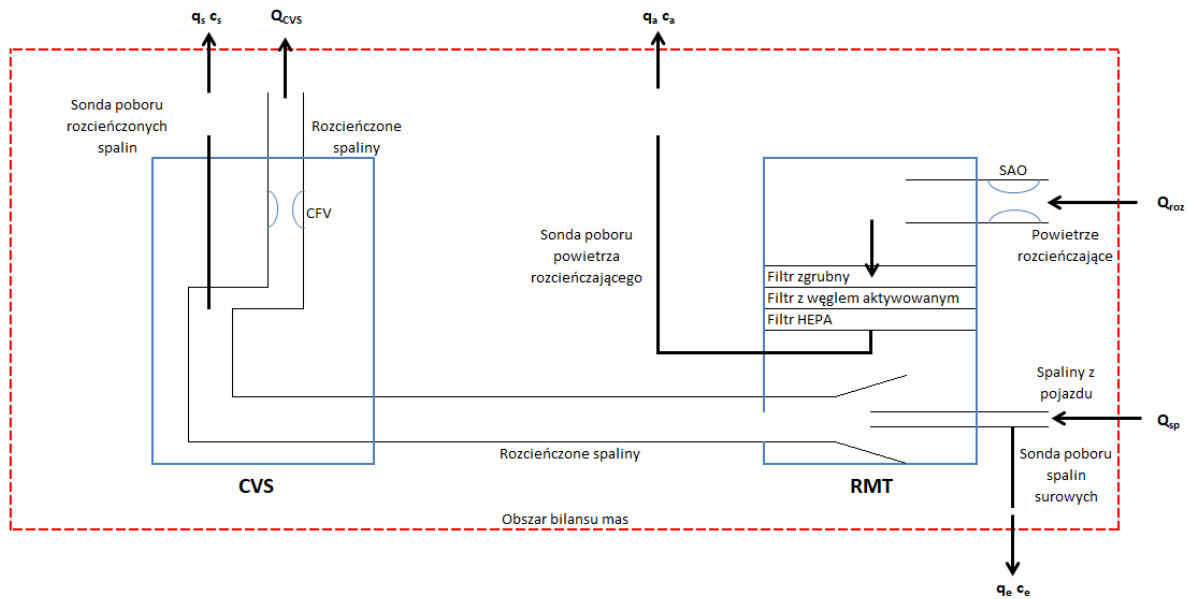
Podłączanie przepływomierza powietrza do układu dolotowego samochodu oraz wagi paliwowej może stwarzać problemy natury technicznej. Wymaga poza tym posiadania dodatkowych urządzeń pomiarowych, które nie są standardowym wyposażeniem stosowanym do badań prowadzonych na hamowni podwoziowej. Z tego względu w niniejszej pracy nie rozpatrywano metody 2 wyznaczania objętości spalin.

Ze względu na brak odpowiedniego przepływomierza w układzie poboru spalin, który pozwalałby na pomiar natężenia przepływu powietrza rozcieńczającego, nie analizowano również metody 4.

Na rysunku 4.1 przedstawiono obszar, w którym rozważany jest bilans masy. Zasada zachowania masy w tym obszarze oznacza, że masa dowolnego składnika, który dostanie się do układu, musi być równa masie opuszczającej układ. Do rozważanego obszaru wpływają dwa strumienie: surowe spaliny z pojazdu Q_{sp} oraz powietrze otoczenia Q_{pow} , wypływają natomiast cztery strumienie: rozcieńczone spaliny Q_{cvS} , próbki rozcieńczonych spalin q_s i powietrza otoczenia q_a , które pobierane są do worków oraz próbka spalin surowych q_e pobierana do analizatora dwutlenku węgla. Równanie bilansu masy ma postać:

$$\rho \times C_{sp}(t) \times [Q_{sp}(t) - q_e(t)] + \rho \times C_a(t) \times [Q_{pow}(t) - q_a(t)] = \rho \times C_{cvS}(t) \times [Q_{cvS}(t) - q_s(t)] \quad (4.2)$$

gdzie: ρ – gęstość par zanieczyszczenia przy standardowym ciśnieniu i temperaturze, $C_{sp}(t)$ – chwilowe stężenie zanieczyszczenia w surowych spalinach, $C_a(t)$ – chwilowe stężenie zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym, $C_{cvS}(t)$ – chwilowe stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, $Q_{sp}(t)$ – chwilowe natężenie przepływu surowych spalin, $q_e(t)$ – chwilowe natężenie przepływu surowych spalin w linii poboru spalin do analizy, $Q_{pow}(t)$ – chwilowe natężenie przepływu powietrza rozcieńczającego, $q_a(t)$ – chwilowe natężenie przepływu powietrza rozcieńczającego w linii poboru powietrza do worka, $Q_{cvS}(t)$ – chwilowe natężenie przepływu rozcieńczonych spalin, $q_s(t)$ – chwilowe natężenie przepływu rozcieńczonych spalin w linii poboru spalin do worka pomiarowego.



Rys. 3.1. Obszar bilansu masy dla metody wyznaczenia stopnia rozcieńczenia DR za pomocą pomiaru stężenia CO_2 w surowych spalinach

Lewa strona równania przedstawia masę zanieczyszczenia wchodzącą do obszaru bilansu masy wraz ze spalinami oraz masę wchodzącą z powietrza rozcieńczającego bez masy zanieczyszczenia usuniętej podczas napełniania worka gromadzącego próbkę powietrza rozcieńczającego oraz masę surowych spalin usuniętych podczas pobierania próbki do analizy modalnej stężenia w surowych spalinach. Prawa strona przedstawia masę zanieczyszczenia wychodzącą wraz z rozcieńczonymi spalinami i masę usuniętą podczas napełniania worka gromadzącego próbkę rozcieńczonych spalin.

Masę zanieczyszczenia emitowaną przez układ wylotowy pojazdu można obliczyć całkując w czasie wartości chwilowe stężenia:

$$m = \int_0^T \rho \times C_{sp}(t) \times Q_{sp}(t) dt \quad (4.3)$$

Aby ująć to w kategoriach wielkości stężenia zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach i powietrzu rozcieńczającym, można rozwiązać równanie (4.2) dla pierwszego członu i podstawić je do równania (4.3):

$$m = \int_0^T \rho \cdot C_{CVS}(t) \cdot [Q_{CVS}(t) + q_s(t)] dt - \int_0^T \rho \cdot C_a(t) \cdot [Q_{pow}(t) - q_a(t)] dt + \int_0^T \rho \cdot C_{sp}(t) \cdot q_e(t) dt \quad (4.4)$$

Stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach oraz w powietrzu rozcieńczającym, uśrednione w wyniku fizycznego procesu zbierania do worków, oraz średnie stężenie zanieczyszczenia w surowych spalinach, można przedstawić za pomocą równań:

$$\overline{C_{CVS}} = \frac{\int_0^T C_{CVS}(t) \cdot q_s(t) dt}{\int_0^T q_s(t) dt} \quad (4.5)$$

$$\overline{C_a} = \frac{\int_0^T C_a(t) \cdot q_a(t) \times dt}{\int_0^T q_a(t) \times dt} \quad (4.6)$$

$$\overline{C_{sp}} = \frac{\int_0^T C_{sp}(t) \cdot q_e(t) \times dt}{\int_0^T q_e(t) \times dt} \quad (4.7)$$

W celu uzyskania w workach reprezentatywnych próbek rozcieńczonych spalin oraz powietrza rozcieńczającego, pobór próbek rozcieńczonych spalin i powietrza rozcieńczającego powinien być proporcjonalny do natężenia przepływu odpowiednich strumieni. W związku z tym można zapisać, że:

$$q_s(t) = \alpha \times Q_{CVS}(t) \quad (4.8)$$

$$q_a(t) = \beta \times Q_{pow}(t) \quad (4.9)$$

Ponieważ próbka surowych spalin nie jest pobierana do worków, tylko są mierzone chwilowe wartości stężenia zanieczyszczeń, które są rejestrowane w systemie, dlatego nie istnieje konieczność, aby pobór próbki był proporcjonalny do natężenia przepływu surowych spalin.

Równanie (4.9) jest prawdziwe dla układów poboru spalin z proporcjonalnym poborem powietrza rozcieńczającego (PAS CFV-CVS – *Proportional Air Sampling Critical Flow Venturi-Constant Volume Sampling*). W układzie poboru spalin stosowanym w laboratorium badań emisji Instytutu Transportu Samochodowego (ITS) natężenie poboru powietrza rozcieńczającego jest stałe, w związku z tym równanie (4.9) ma postać:

$$q_a(t) = q_a \quad (4.10)$$

Uwzględniając równanie (4.8) w równaniu (4.5) zależność na średnie stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach można zapisać w następującej postaci:

$$\overline{C_{CVS}} = \frac{\int_0^T C_{CVS}(t) \cdot Q_{CVS}(t) dt}{\int_0^T Q_{CVS}(t) dt} \quad (4.11)$$

Podstawiając powyższe do równania (3.4) otrzymuje się:

$$m = \rho \cdot \overline{C_{CVS}} \cdot \int_0^T Q_{CVS}(t) dt + \rho \cdot \overline{C_{CVS}} \times \int_0^T q_s(t) dt - \rho \cdot \overline{C_a} \cdot \int_0^T Q_{pow}(t) dt + \rho \cdot \overline{C_a} \cdot \int_0^t q_a(t) + \rho \cdot \overline{C_{sp}} \cdot \int_0^T q_e(t) dt \quad (4.12)$$

Powyższe równanie można uprościć definiując następujące objętości:

- całkowita objętość rozcieńczonych spalin V_{CVS} , jaka przepłynęła przez układ poboru spalin w czasie trwania cyklu (4.13),
- objętość próbki rozcieńczonych spalin zgromadzona w worku $V_{s\ wor}$ (4.14),
- całkowita objętość powietrza rozcieńczającego V_{pow} , które wpłynęło do układu poboru spalin (4.15),
- objętość próbki powietrza rozcieńczającego zgromadzona w worku $V_{a\ wor}$ (4.16),
- objętość próbki pobranej z surowych spalin $V_{s\ sp}$, która przepłynęła przez analizator (4.17)

$$V_{CVS} = \int_0^T Q_{CVS}(t) \times dt \quad (4.13)$$

$$V_{s\ wor} = \int_0^T q_s(t) \times dt \quad (4.14)$$

$$V_{pow} = \int_0^T Q_{air}(t) \times dt \quad (4.15)$$

$$V_{a\ wor} = \int_0^T q_a(t) \times dt \quad (4.16)$$

$$V_{s\ sp} = \int_0^T q_e(t) \times dt \quad (4.17)$$

Uwzględniając równania (4.13)–(4.17) w równaniu (4.12) otrzymuje się:

$$m = \rho \times \overline{C_{CVS}} \times [V_{CVS} + V_{s\ wor}] - \rho \times \overline{C_a} \times [V_{pow} - V_a] + \rho \times \overline{C_{sp}} \times V_{s\ sp} \quad (4.18)$$

W większości systemach do pomiaru emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego, objętości $V_{s\ wor}$ i $V_{a\ wor}$ są pomijane ze względu na ich niewielkie wartości w stosunku do całkowitej objętości rozcieńczonych spalin V_{CVS} oraz objętości powietrza rozcieńczającego V_{pow} . W najnowszych systemach uwzględnia się objętości $V_{s\ wor}$ w obliczeniach masy wyemitowanego zanieczyszczenia. Objętość $V_{a\ wor}$ jest jednak pomijana. Takie rozwiązanie zastosowane zostało w systemie do pomiaru emisji zanieczyszczeń, będącym na wyposażeniu Instytutu Transportu Samochodowego. W związku z tym zależność (4.18) dla tego systemu przyjmie postać:

$$m = \rho \times \overline{C_{CVS}} \times V_{CVS}^c - \rho \times \overline{C_a} \times V_{pow} + \rho \times \overline{C_{sp}} \times V_{s\ sp} \quad (4.19)$$

W zależności tej parametr V_{CVS}^c oznacza całkowitą objętość rozcieńczonych spalin, jaka przepłynęła przez układ poboru spalin w trakcie trwania cyklu skorygowaną o objętość próbki rozcieńczonych spalin zgromadzonej w worku:

$$V_{CVS}^c = V_{CVS} + V_{s\ wor} \quad (4.20)$$

Pominięcie objętości $V_{s\ wor}$ stanowi niewielki błąd w określaniu całkowitej objętości rozcieńczonych spalin, jaka przepłynęła przez układ poboru spalin w trakcie trwania cyklu jezdowego. W systemie stosowanym w laboratorium badań emisji ITS proporcjonalność poboru próbki rozcieńczonych spalin zapewniona jest przez pobieranie jej przez zwężki Venturiego. W systemie tym jest kilka zwęzek o różnym nominalnym natężeniu przepływu. Układ automatyki wybiera konkretną zwężkę na podstawie długości trwania poszczególnych faz cyklu tak, aby nie nastąpiło przepełnienie worka pomiarowego, w którym gromadzona jest próbka. Ponieważ maksymalna objętość worków jest stała, w związku z tym błąd będzie odwrotnie proporcjonalny do czasu trwania cyklu oraz wprost proporcjonalny do natężenia przepływu w układzie poboru spalin. W przeprowadzonych badaniach korekcja objętości nie przekroczyła 0,15% objętości V_{CVS} .

W celu wyprowadzenia wzoru na stopień rozcieńczenia spalin DR jako funkcji stężenia zanieczyszczenia należy zastosować bilans masy. Najwygodniej będzie posłużyć się masą

dwutlenku węgla ze względu na duże wartości stężenia tego związku. Na podstawie rysunku 4.1 można napisać, że:

$$m_{sp,CO_2} + m_{pow,CO_2} = m_{CVS,CO_2} + m_{s\ wor,CO_2} + m_{a\ wor,CO_2} + m_{s\ sp,CO_2} \quad (4.21)$$

Lewa strona równania przedstawia masę CO₂ wchodzącą do obszaru bilansu masy pokazanego na rys. 4.1, natomiast prawa strona równania masę CO₂ wychodzącą z tego obszaru. Podstawiając zależność (2.1) na masę zanieczyszczenia do wzoru (4.21) otrzymuje się:

$$\rho_{CO_2} \cdot C_{CO_2,sp} \cdot V_{sp} + \rho_{CO_2} \cdot C_{CO_2,pow} \cdot V_{pow} = \rho_{CO_2} \cdot C_{CO_2,CVS} \cdot V_{CVS} + \rho_{CO_2} \cdot C_{CO_2,CVS} \cdot V_{s\ wor} + \rho_{CO_2} \cdot C_{CO_2,pow} \cdot V_{a\ wor} + \rho_{CO_2} \cdot C_{CO_2,sp} \cdot V_{s\ sp} \quad (4.22)$$

Dzieląc obie strony równania przez gęstość dwutlenku węgla oraz grupując według stężenia CO₂ otrzymuje się:

$$C_{CO_2,sp} \cdot (V_{sp} - V_{s\ sp}) + C_{CO_2,pow} \cdot (V_{pow} - V_{a\ wor}) = C_{CO_2,CVS} \cdot (V_{CVS} + V_{s\ wor}) \quad (4.23)$$

Uwzględniając zależność (4.20) oraz fakt, że w układzie poboru spalin zastosowanym w badaniach nie uwzględnia się objętości $V_{a\ wor}$, zależność tę można zapisać:

$$C_{CO_2,sp} \times (V_{sp} - V_{s\ sp}) + C_{CO_2,pow} \times V_{pow} = C_{CO_2,CVS} \times V_{CVS}^c \quad (4.24)$$

Jeżeli zdefiniuje się objętość spalin skorygowaną o objętość pobraną przez sondę poboru spalin surowych V_{sp}^c , jako:

$$V_{sp}^c = V_{sp} - V_{s\ sp} \quad (4.25)$$

to otrzymuje się:

$$C_{CO_2,sp} \times V_{sp}^c + C_{CO_2,pow} \times V_{pow} = C_{CO_2,CVS} \times V_{CVS}^c \quad (4.26)$$

Uwzględniając korekcję objętości rozcieńczonych spalin oraz spalin surowych o objętości pobrane z odpowiednich strumieni do analizy, zależność (4.1) na stopień rozcieńczenia DR przyjmie postać:

$$DR = \frac{V_{CVS}^c}{V_{sp}^c} \quad (4.27)$$

Dzieląc obie strony równania (4.26) przez V_{sp}^c otrzymuje się:

$$C_{CO_2,sp} + C_{CO_2,pow} \times \frac{V_{pow}}{V_{sp}^c} = C_{CO_2,CVS} \times \frac{V_{CVS}^c}{V_{sp}^c} \quad (4.28)$$

Uwzględniając, że:

$$V_{CVS}^c = V_{sp}^c + V_{pow} \quad (4.29)$$

otrzymuje się:

$$C_{CO_2,sp} + C_{CO_2,pow} \times \frac{V_{CVS}^c - V_{sp}^c}{V_{sp}^c} = C_{CO_2,CVS} \times \frac{V_{CVS}^c}{V_{sp}^c} \quad (4.30)$$

Podstawiając do zależności (4.30) zależność (4.27) i przekształcając otrzymuje się:

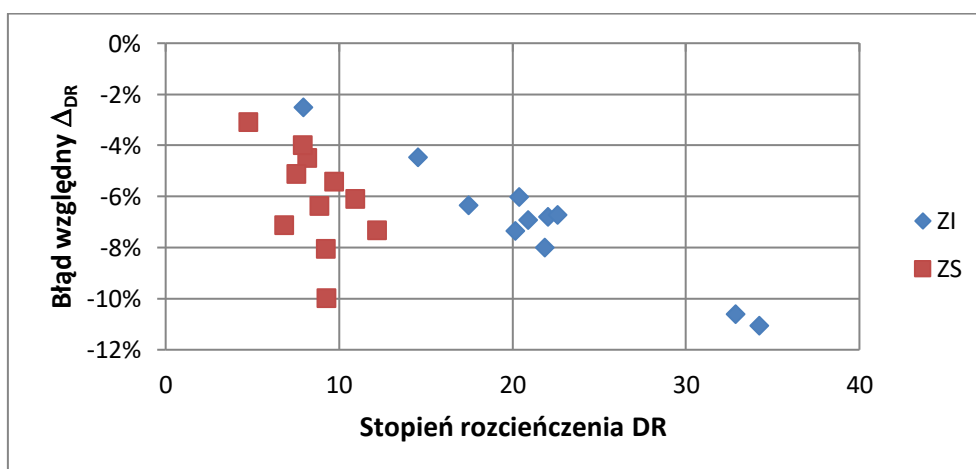
$$C_{CO_2,sp} + C_{CO_2,pow} \times (DR - 1) = C_{CO_2,CVS} \times DR \quad (4.31)$$

Stąd wzór na określenie stopnia rozcieńczenia DR wyrażony za pomocą stężenia CO_2 mierzonego w rozcieńczonych spalinach, surowych spalinach i powietrzu rozcieńczającym przedstawia się następująco:

$$DR = \frac{C_{CO_2,sp} - C_{CO_2,pow}}{C_{CO_2,CVS} - C_{CO_2,pow}} \quad (4.32)$$

W celu dokładnego wyznaczenia stopnia rozcieńczenia DR konieczny jest pomiar stężenia CO_2 w powietrzu rozcieńczającym. W niektórych opracowaniach [38] spotkano się z pominięciem tej wartości. W celu oceny wielkości błędu spowodowanego przyjęciem takiego uproszczenia dokonano następującej analizy. Dla pomiarów wykonanych w ramach niniejszej pracy obliczono wartość stopnia rozcieńczenia DR na podstawie zależności (4.32). Stężenie CO_2 w spalinach nierozcieńczonych, w spalinach rozcieńczonych oraz w powietrzu rozcieńczającym obliczono jako wartość średnią z wartości chwilowych zarejestrowanych w trakcie odtworzenia cykli jezdnych. Następnie obliczono wartość stopnia rozcieńczenia DR przyjmując stężenie CO_2 w powietrzu rozcieńczającym równe 0. W tabeli 4.1 podano wartości stopnia rozcieńczenia DR obliczone tymi dwiema metodami. Na rysunku 4.2 podano błąd względny wyznaczenia wartości stopnia rozcieńczenia Δ_{DR} .

Z dokonanej analizy wynika, że dla badanego samochodu wyposażonego w silnik ZI błąd względny wyznaczenia stopnia rozcieńczenia DR wynikający z nieuwzględnienia w zależności (4.32) wartości stężenia CO_2 w powietrzu rozcieńczającym zawierał się, w zależności od cyklu jezdnego, w przedziale od $-2,5\%$ do $-11,1\%$, natomiast dla samochodu wyposażonego w silnik ZS w przedziale od $-3,1\%$ do $-10,0\%$. W tabelach 4.2 do 4.5 podano wartości stężenia odpowiednio CO_2 , THC, CO i NO_x w rozcieńczonych spalinach skorygowane zgodnie ze wzorem (4.32) podstawiając zamiast współczynnika DF wartość stopnia rozcieńczenia DR obliczoną tymi dwiema metodami.



Rys. 4.2. Błąd względny wyznaczenia stopnia rozcieńczenia DR wynikający z nieuwzględnienia w zależności (4.32) wartości stężenia CO_2 w powietrzu rozcieńczającym

Tabela 4.1. Stopień rozcieńczenia DR obliczony z uwzględnieniem i bez uwzględnienia wartości stężenia CO₂ w powietrzu rozcieńczającym

Samochód	Cykl	Stopień rozcieńczenia DR		Δ_{DR}
		obliczony wg (4.32)	obliczony bez uwzględnienia CO _{2, pow}	
Z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP	NEDC	20,13	18,65	-7,4%
	NEDC, Urban	21,86	20,11	-8,0%
	NEDC, Extra Urban	17,45	16,34	-6,4%
	WLTC	22,04	20,54	-6,8%
	WLTC, faza 1	34,20	30,41	-11,1%
	WLTC, faza 2	22,59	21,07	-6,7%
	WLTC, faza 3	20,37	19,14	-6,0%
	WLTC, faza 4	14,54	13,89	-4,5%
	Artemis Urban	32,84	29,35	-10,6%
	Artemis Road	20,89	19,44	-6,9%
	Artemis Motorway	7,92	7,72	-2,5%
Z silnikiem ZS	NEDC	9,73	9,20	-5,4%
	NEDC, Urban	10,94	10,27	-6,1%
	NEDC, Extra Urban	8,17	7,80	-4,5%
	WLTC	8,90	8,33	-6,4%
	WLTC, faza 1	12,21	11,31	-7,4%
	WLTC, faza 2	7,94	7,62	-4,0%
	WLTC, faza 3	9,26	8,51	-8,1%
	WLTC, faza 4	6,85	6,36	-7,2%
	Artemis Urban	9,29	8,36	-10,0%
	Artemis Road	7,55	7,16	-5,2%
	Artemis Motorway	4,79	4,64	-3,1%

Tabela 4.2. Skorygowane stężenie CO₂ [%] w spalinach rozcieńczonych w zależności od metody obliczania stopnia rozcieńczenia DR

Samochód	Cykl	C _{CVS}	C _{pow}	Obliczone wg (4.32)		Bez uwzgl. CO _{2, pow}		Δ_{CO_2}
				DR	C _{CVS} ^C	DR	C _{CVS} ^C	
Z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP	NEDC, Urban	0,5672	0,0477	21,86	0,5217	20,11	0,5219	0,04%
	NEDC, Extra Urban	0,6997	0,0472	17,45	0,6552	16,34	0,6554	0,03%
	WLTC, faza 1	0,4103	0,0468	34,20	0,3649	30,41	0,3650	0,05%
	WLTC, faza 2	0,6592	0,0462	22,59	0,6150	21,07	0,6152	0,02%
	WLTC, faza 3	0,7239	0,0458	20,37	0,6803	19,14	0,6805	0,02%
	WLTC, faza 4	0,9770	0,0465	14,54	0,9337	13,89	0,9338	0,02%
	Artemis Urban	0,4600	0,0504	32,84	0,4111	29,35	0,4113	0,04%
	Artemis Road	0,7285	0,0530	20,89	0,6780	19,44	0,6782	0,03%
	Artemis Motorway	1,9057	0,0542	7,92	1,8583	7,72	1,8585	0,01%
Z silnikiem ZS	NEDC, Urban	0,6981	0,0470	10,94	0,6554	10,27	0,6557	0,04%
	NEDC, Extra Urban	1,0363	0,0529	8,17	0,9899	7,80	0,9902	0,03%
	WLTC, faza 1	0,6317	0,0506	12,21	0,5852	11,31	0,5856	0,06%
	WLTC, faza 2	1,3249	0,0612	7,94	1,2714	7,62	1,2717	0,03%
	WLTC, faza 3	0,9661	0,0870	9,26	0,8885	8,51	0,8893	0,09%
	WLTC, faza 4	1,2472	0,1045	6,85	1,1580	6,36	1,1591	0,10%
	Artemis Urban	0,5423	0,0609	9,29	0,4880	8,36	0,4887	0,15%
	Artemis Road	0,9607	0,0574	7,55	0,9109	7,16	0,9113	0,05%
Artemis Motorway	1,9326	0,0735	4,79	1,8744	4,64	1,8749	0,03%	

Tabela 4.3. Skorygowane stężenie THC [ppm] w spalinach rozcieńczonych w zależności od metody obliczania stopnia rozcieńczenia DR

Samochód	Cykl	C_{CVS}	C_{roz}	Obliczone wg (4.32)		Bez uwzgl. $CO_{2, pow}$		Δ_{THC}
				DR	C_{CVS}^c	DR	C_{CVS}^c	
Z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP	NEDC, Urban	15,070	5,726	21,86	9,606	20,11	9,629	0,24%
	NEDC, Extra Urban	7,863	-0,697	17,45	8,520	16,34	8,517	-0,03%
	WLTC, faza 1	55,822	-0,868	34,20	56,665	30,41	56,661	-0,01%
	WLTC, faza 2	39,387	-0,725	22,59	40,080	21,07	40,078	-0,01%
	WLTC, faza 3	37,683	-0,912	20,37	38,550	19,14	38,547	-0,01%
	WLTC, faza 4	40,256	-0,879	14,54	41,075	13,89	41,072	-0,01%
	Artemis Urban	6,803	5,746	32,84	1,232	29,35	1,253	1,69%
	Artemis Road	12,838	-0,757	20,89	13,559	19,44	13,556	-0,02%
Artemis Motorway	9,893	-0,782	7,92	10,576	7,72	10,574	-0,02%	
Z silnikiem ZS	NEDC, Urban	3,689	3,078	10,94	0,892	10,27	0,911	2,06%
	NEDC, Extra Urban	3,082	3,063	8,17	0,394	7,80	0,412	4,51%
	WLTC, faza 1	10,603	2,951	12,21	7,894	11,31	7,913	0,24%
	WLTC, faza 2	12,784	3,079	7,94	10,093	7,62	10,109	0,16%
	WLTC, faza 3	8,638	3,243	9,26	5,745	8,51	5,776	0,54%
	WLTC, faza 4	16,357	5,005	6,85	12,083	6,36	12,139	0,47%
	Artemis Urban	3,649	3,064	9,29	0,915	8,36	0,952	4,01%
	Artemis Road	3,351	3,433	7,55	0,373	7,16	0,397	6,65%
Artemis Motorway	3,564	3,477	4,79	0,813	4,64	0,836	2,89%	

Tabela 4.4. Skorygowane stężenie CO [ppm] w spalinach rozcieńczonych w zależności od metody obliczania stopnia rozcieńczenia DR

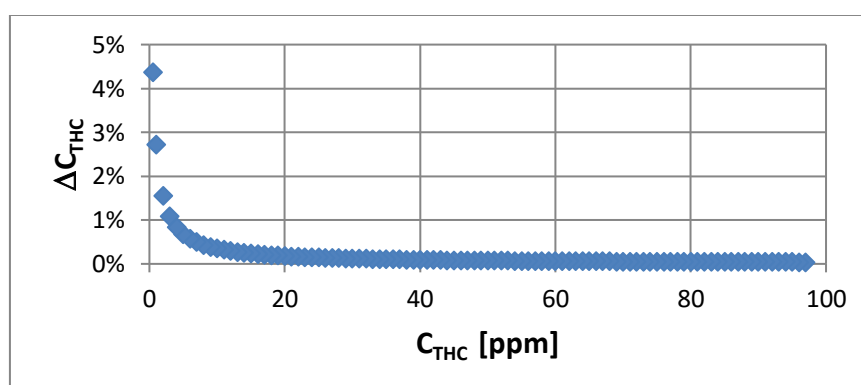
Samochód	Cykl	C_{CVS}	C_{roz}	Obliczone wg (4.32)		Bez uwzgl. $CO_{2, pow}$		Δ_{CO}
				DR	C_{CVS}^c	DR	C_{CVS}^c	
Z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP	NEDC, Urban	15,788	0,405	21,86	15,402	20,11	15,403	0,01%
	NEDC, Extra Urban	32,920	1,461	17,45	31,543	16,34	31,548	0,02%
	WLTC, faza 1	29,053	1,829	34,20	27,277	30,41	27,284	0,02%
	WLTC, faza 2	0,158	1,101	22,59	-0,894	21,07	-0,891	-0,39%
	WLTC, faza 3	3,564	0,999	20,37	2,614	19,14	2,617	0,12%
	WLTC, faza 4	122,537	1,950	14,54	120,721	13,89	120,727	0,01%
	Artemis Urban	-0,007	0,130	32,84	-0,133	29,35	-0,133	-0,35%
	Artemis Road	25,671	1,610	20,89	24,138	19,44	24,144	0,02%
Artemis Motorway	123,259	2,444	7,92	121,124	7,72	121,132	0,01%	
Z silnikiem ZS	NEDC, Urban	0,104	0,243	10,94	-0,117	10,27	-0,115	-1,24%
	NEDC, Extra Urban	0,053	0,271	8,17	-0,185	7,80	-0,183	-0,85%
	WLTC, faza 1	17,638	3,511	12,21	14,415	11,31	14,437	0,16%
	WLTC, faza 2	0,625	0,672	7,94	0,038	7,62	0,041	9,44%
	WLTC, faza 3	0,423	0,640	9,26	-0,148	8,51	-0,142	-4,12%
	WLTC, faza 4	0,309	0,529	6,85	-0,143	6,36	-0,137	-4,17%
	Artemis Urban	0,234	0,172	9,29	0,081	8,36	0,083	2,56%
	Artemis Road	1,150	-0,402	7,55	1,499	7,16	1,496	-0,19%
Artemis Motorway	0,000	0,000	4,79	0,000	4,64	0,000	0,00%	

Tabela 4.5. Skorygowane stężenie NO_x [ppm] w spalinach rozcieńczonych w zależności od metody obliczania stopnia rozcieńczenia DR

Samochód	Cykl	C_{CVS}	C_{roz}	Obliczone wg (4.32)		Bez uwzgl. $CO_{2,pow}$		ΔNO_x
				DR	C_{CVS}^C	DR	C_{CVS}^C	
Z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP	NEDC, Urban	4,908	0,061	21,86	4,850	20,11	4,850	0,01%
	NEDC, Extra Urban	0,178	0,250	17,45	-0,058	16,34	-0,057	-1,69%
	WLTC, faza 1	8,190	0,414	34,20	7,788	30,41	7,790	0,02%
	WLTC, faza 2	15,543	0,937	22,59	14,647	21,07	14,650	0,02%
	WLTC, faza 3	8,382	0,315	20,37	8,082	19,14	8,083	0,01%
	WLTC, faza 4	13,197	0,684	14,54	12,560	13,89	12,562	0,02%
	Artemis Urban	18,949	0,126	32,84	18,827	29,35	18,827	0,00%
	Artemis Road	16,950	1,710	20,89	15,322	19,44	15,328	0,04%
	Artemis Motorway	14,014	2,043	7,92	12,229	7,72	12,236	0,05%
Z silnikiem ZS	NEDC, Urban	6,265	0,082	10,94	6,190	10,27	6,191	0,01%
	NEDC, Extra Urban	16,476	0,182	8,17	16,316	7,80	16,317	0,01%
	WLTC, faza 1	6,678	0,097	12,21	6,589	11,31	6,590	0,01%
	WLTC, faza 2	20,761	0,237	7,94	20,554	7,62	20,555	0,01%
	WLTC, faza 3	17,042	0,615	9,26	16,493	8,51	16,499	0,04%
	WLTC, faza 4	37,803	1,000	6,85	36,949	6,36	36,960	0,03%
	Artemis Urban	22,470	0,554	9,29	21,976	8,36	21,982	0,03%
	Artemis Road	34,035	0,511	7,55	33,592	7,16	33,595	0,01%
	Artemis Motorway	87,032	1,021	4,79	86,224	4,64	86,231	0,01%

Z przeprowadzonej analizy wynika, że błąd wyznaczenia stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach skorygowanego ze względu na zawartość zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym jest tym większy, im mniejsza jest różnica między stężeniem w rozcieńczonych spalinach a stężeniem w powietrzu rozcieńczającym. Jest to widoczne szczególnie dla stężenia sumy węglowodorów zmierzonych dla samochodu z silnikiem ZS, dla których błąd ten zawiera się w przedziale od 0,2% do 6,7%.

Na rysunku 4.3 pokazano zmianę błędu wyznaczenia stężenia sumy węglowodorów w rozcieńczonych spalinach skorygowanego ze względu na zawartość THC w powietrzu rozcieńczającym jako funkcji różnicy stężenia THC w rozcieńczonych spalinach a stężeniem w powietrzu rozcieńczającym. Do obliczeń przyjęto stałą wartość stężenia THC w powietrzu rozcieńczającym równym 3 ppm C_1 (typowa wartość) oraz stopień rozcieńczenia DR obliczony dla samochodu z silnikiem ZS uzyskany w cyklu Artemis Urban (tab. 4.1).



Rys. 4.3. Błąd wyznaczenia stężenia sumy węglowodorów (THC) w rozcieńczonych spalinach skorygowanego ze względu na zawartość THC w powietrzu rozcieńczającym w funkcji różnicy stężenia THC w rozcieńczonych spalinach a stężeniem w powietrzu rozcieńczającym

W tabeli 4.6 zamieszczono wartości stężenia CO₂ w powietrzu rozcieńczającym otrzymanym z analizy próbki tego powietrza zgromadzonym w worku układu poboru spalin oraz obliczonym na podstawie wartości chwilowych zarejestrowanych w trakcie odtwarzania cyklu jezdnego.

Tabela 4.6. Stężenie CO₂ w powietrzu rozcieńczającym zmierzone dla samochodu z silnikiem ZS na podstawie analizy próbki zgromadzonej w worku ($C_{CO_2,bag}$) oraz obliczone jako wartość średnia z wartości chwilowych zarejestrowanych w trakcie odtwarzania cyklu jezdnego ($C_{CO_2,air}$)

Cykl	$C_{CO_2,bag}$	$C_{CO_2,air}$	ΔC_{CO_2}
NEDC, Urban	0,047	0,047	0,0%
NEDC, Extra Urban	0,053	0,053	0,0%
WLTC, faza 1	0,051	0,051	0,0%
WLTC, faza 2	0,062	0,061	-1,6%
WLTC, faza 3	0,087	0,087	0,0%
WLTC, faza 4	0,105	0,105	0,0%
Artemis Urban	0,061	0,061	0,0%
Artemis Road	0,058	0,057	-1,7%
Artemis Motorway	0,075	0,074	-1,3%

Względna różnica stężenia CO₂ w powietrzu rozcieńczającym zmierzonego na podstawie analizy próbki zgromadzonej w worku oraz obliczonego jako wartość średnia z wartości chwilowych zarejestrowanych w trakcie odtwarzania cyklu jezdnego jest dla większości faz cykli, w których wykonywano pomiary, równa zero. Tylko dla cykli Artemis Road, Artemis Motorway i fazy Medium cyklu WLTC jest różna od zera, ale nie przekracza 2%. Otrzymane różnice są na tyle małe, że do wyznaczenia stopnia rozcieńczenia *DR* można przyjąć wartości stężenia CO₂ w powietrzu rozcieńczającym zmierzone w worku.

4.2. Obiekty badań

Badania prowadzono na trzech samochodach należących do segmentu C (rys. 4.4–4.6). Dwa z nich wyposażone były w silnik ZI, trzeci w silnik ZS. Pojazd z silnikiem ZS posiadał homologację potwierdzającą spełnienie wymagań w zakresie emisji zanieczyszczeń o klasie emisyjnej Euro 5, samochody z silnikiem ZI o klasie emisyjnej Euro 6. Pierwszy z pojazdów benzynowych homologowany był według procedury, według której pomiary emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego prowadzi się w cyklu NEDC, drugi według procedury WLTP. W dalszej części pracy używano odpowiednio określenia Euro 6 NEDC i Euro 6 WLTP. Wybrane dane pojazdów podano w tabeli 4.7.



Rys. 4.4. Samochód osobowy z silnikiem ZI, wtrysk bezpośredni benzyny, Euro 6 WLTP



Rys. 4.5. Samochód osobowy z silnikiem ZI, wtrysk pośredni benzyny, Euro 6 NEDC



Rys. 4.6. Samochód osobowy z silnikiem ZS, Euro 5

Tabela 4.7. Wybrane dane obiektów badań

Parametr	S1	S2	S3
Zapłon	ZI	ZS	ZI
Rodzaj zasilania	wtrysk bezpośredni	common rail	wielopunktowy wtrysk pośredni
Norma emisji	Euro 6 (WLTP)	Euro 5	Euro 6 (NEDC)
Pojemność skokowa silnika	1197 cm ³	1995 cm ³	1596 cm ³
Moc silnika	85 kW	160 kW	77 kW

4.3. Aparatura pomiarowa

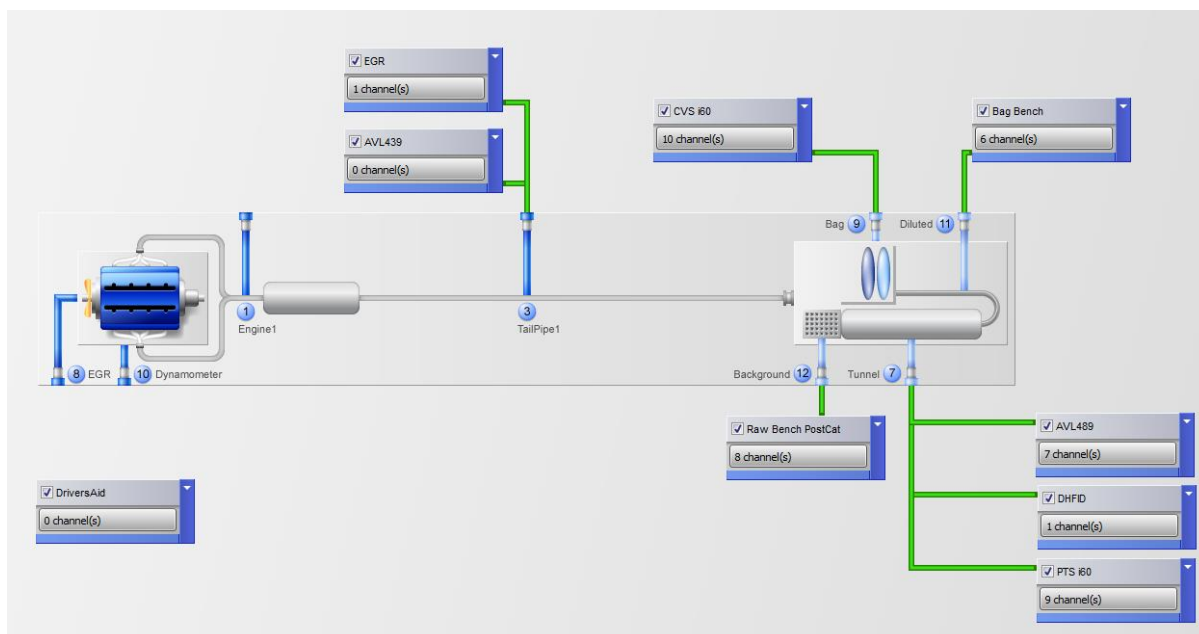
Badania pojazdów wykonano w Instytucie Transportu Samochodowego na stanowisku pomiarowym wyposażonym w:

- jednorolkową hamownię podwoziową z regulowaną krzywą oporów firmy AVL–Zoellner (*Dynamometer* na rys. 4.7),
- system do pomiaru emisji zanieczyszczeń produkcji firmy AVL; podczas badań użyto konfiguracji zawierającej następujące urządzenia pomiarowe (rys. 4.7):
 - pełnoprzepływowy układ poboru spalin CVS i60 LD S2 firmy AVL ze zwężkami krytycznego przepływu pozwalającymi uzyskać przepływ o natężeniu od 2 m³/min do 30 m³/min (*CVS i60* na rys. 4.7),

- układ do pomiaru emisji cząstek stałych PSS i60 SD firmy AVL (*PTS i60* na rys. 4.7) wyposażony w grzany analizator typu FID i60 LH produkcji firmy AVL (*DHFID* na rys. 4.7) działający na zasadzie detekcji płomienia wodorowego (FID) mierzący stężenie sumy węglowodorów w rozcieńczonych spalinach, których próbka pobierana jest z tunelu rozcieńczającego za pomocą grzanej drogi,
- licznik cząstek stałych AVL489 APC ADVANCED firmy AVL (*AVL489* na rys. 4.7),
- zespół analizatorów spalin AMA i60 D1-CD LE (*Bag Bench* na rys. 4.7) dostosowany do analizy spalin rozcieńczonych, składający się z zestawu analizatorów umożliwiających pomiar stężenia zanieczyszczeń w tunelu rozcieńczającym, w skład którego wchodziły:
 - dwukanałowy analizator typu IRD i60 CO₂ L/CO SL firmy ABB działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego (NDIR), mierzący stężenie CO₂ i stężenie CO w spalinach suchych,
 - dwukanałowy, grzany analizator typu CLD i60 LHD produkcji firmy AVL przystosowany do pomiaru stężenia NO_x, działający na zasadzie chemoluminescencji, z dwoma detektorami, umożliwiającymi jednoczesny pomiar stężenia NO_x oraz NO,
 - dwukanałowy, zimny analizator typu CUTTER FID i60 LCD produkcji firmy AVL przystosowany do pomiaru stężenia HC, działający na zasadzie detekcji płomienia wodorowego (FID), z dwoma detektorami, umożliwiającymi jednoczesny pomiar węglowodorów całkowitych (THC) oraz metanu (CH₄),
- zespół analizatorów spalin AMA i60 R2-EGR (*Raw Bench PostCat* i *EGR* na rys. 4.7) dostosowany do analizy spalin nierozcieńczonych, składający się z potrójnego zestawu analizatorów umożliwiających pomiar stężenia przed i za układem oczyszczania spalin oraz w układzie dolotowym, w skład którego wchodziły:
 - dwukanałowy analizator typu IRD i60 CO₂/CO_L firmy ABB działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego (NDIR), mierzący stężenie CO₂ i stężenie CO w spalinach suchych,
 - dwukanałowy analizator typu IRD i60 CO₂/CO_H firmy ABB, dostosowany do pomiaru CO₂ i dużych stężeń CO, działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego (NDIR), mierzący stężenie gazu w spalinach suchych,
 - dwukanałowy analizator typu IRD i60 N₂O/CO_H firmy AVL, przeznaczony do pomiaru stężenia N₂O oraz stężenia CO, działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego (NDIR), mierzący stężenie gazu w spalinach suchych,
 - trójkanałowy analizator typu COMBI i60 CO₂/CO_L/O₂ firmy AVL, dostosowany do pomiaru stężenia CO₂ i stężenia CO, działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego (NDIR) oraz stężenia O₂ działający na zasadzie wykorzystania zjawiska paramagnetyzmu, mierzący stężenie gazu w spalinach suchych,
 - dwa dwukanałowe grzane analizatory typu CUTTER FID i60 HHD produkcji firmy AVL, dostosowane do pomiaru stężenia sumy węglowodorów (THC) oraz stężenia metanu (CH₄), działające na zasadzie jonizacji płomienia wodorowego (FID); każdy z analizatorów był wyposażony w separator węglowodorów niemetanowych (ang. *cutter*), przez co analizatory umożliwiały jednoczesny odczyt stężenia THC i CH₄,
 - dwa dwukanałowe, grzane analizatory typu CLD i60 HDD produkcji firmy AVL, dostosowane do pomiaru stężenia tlenków azotu (NO_x), działające na zasadzie chemoluminescencji; każdy z analizatorów był wyposażony w dwa detektory, do jednego z nich próbka spalin przepływała najpierw przez konwerter NO₂, do drugiego przepływała bezpośrednio; dzięki temu możliwy był jednoczesny odczyt w pierwszym przypadku stężenia tlenków azotu (NO_x) wyrażonych jako suma stę-

żenia tlenku azotu (NO) i dwutlenku azotu (NO₂), a w drugim przypadku tylko stężenia tlenku azotu (NO),

- stacja pogodowa VAISALA PTU303 do pomiaru temperatury powietrza, ciśnienia i wilgotności w pomieszczeniu hamowni podwoziowej,
- system automatyki pomiarowej iGEM Vehicle produkcji firmy AVL, który był odpowiedzialny za sterowanie pracą urządzeń pomiarowych, analizę próbek spalin i rejestrację wybranych parametrów w bazie danych,
- zestaw gazów wzorcowych służących do wzorcowania analizatorów przed rozpoczęciem pomiarów.



Rys. 4.7. Schemat podłączeń wyposażenia pomiarowego do wyznaczenia rzeczywistego współczynnika rozcieńczenia DR podczas pomiarów emisji z układu wylotowego

Na rysunku 4.8 przedstawiono pomieszczenie hamowni podwoziowej z widocznymi układem poboru spalin, licznikiem cząstek stałych oraz układem do pomiaru emisji cząstek stałych stosowanych w badaniach.



Rys. 4.8. Zdjęcie hamowni podwoziowej z układem do pomiaru emisji zanieczyszczeń

Dane techniczne użytych analizatorów zamieszczono w tabelach 4.8–4.12.

Tabela 4.8. Dane techniczne analizatorów typu CLD używanych w badaniach

Parametr	CLD i60 LHD	CLD i60 HDD
Mierzone zanieczyszczenie	NO i NO _x	NO i NO _x
Najmniejszy zakres pomiarowy	0–3 ppm	0–10 ppm
Największy zakres pomiarowy	0–1000 ppm	0–10 000 ppm
Czas odpowiedzi T ₁₀₋₉₀	≤ 1 s	≤ 0,5 s / ≤ 0,6 s
Czas odpowiedzi T ₉₀	≤ 2 s	≤ 0,8 s / ≤ 1,6 s
Szum	≤ 1% pełnego zakresu	≤ 0,5% pełnego zakresu
Liniowość wskazań	≤ 2% wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) ≤ 1% pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)	≤ 2% wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) ≤ 1% pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)
Dryft	≤ 1% pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie ±5°C)	≤ 1% pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie ±5°C)
Odtwarzalność	≤ 0,5% pełnego zakresu	≤ 0,5% pełnego zakresu
Wpływ zmian ciśnienia próbki na wskazania	≤ odtwarzalności	≤ odtwarzalności
Granica wykrywalności	0,009 ppm (≤ 0,3% najmniejszego zakresu pomiarowego)	0,03 ppm (≤ 0,3% najmniejszego zakresu pomiarowego)
Sprawność konwertera	≥ 95%	≥ 95%

Tabela 4.9. Dane techniczne analizatorów typu FID używanych w badaniach

Parametr	FID i60 LH	CUTTER FID i60 LCD	CUTTER FID i60 HDD
Mierzone zanieczyszczenie	THC	THC i CH ₄	THC i CH ₄
Najmniejszy zakres pomiarowy	0–3 ppm C ₃	THC: 0–3 ppm C ₃ CH ₄ : 0–9 ppm C ₁	THC: 0–10 ppm C ₃ CH ₄ : 0–30 ppm C ₁
Największy zakres pomiarowy	0–1000 ppm C ₃	THC: 0–1000 ppm C ₃ CH ₄ : 0–3000 ppm C ₁	THC: 0–20 000 ppm C ₃ CH ₄ : 0–20 000 ppm C ₁
Czas odpowiedzi T ₁₀₋₉₀	≤ 0,5 s	≤ 0,5 s / ≤ 1,5 s	≤ 0,5 s / ≤ 1,6 s
Czas odpowiedzi T ₉₀	≤ 1,2 s	≤ 1,2 s / ≤ 5 s	≤ 1,2 s / ≤ 5 s
Szum	≤ 0,5% pełnego zakresu	≤ 0,5% pełnego zakresu	≤ 0,5% pełnego zakresu
Liniowość wskazań	≤ 2% wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) ≤ 1% pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)	≤ 2% wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) ≤ 1% pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)	≤ 2% wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) ≤ 1% pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)
Dryft	≤ 1% pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany tem-	≤ 1% pełnego zakresu / 24 h (CH ₄ : dodatkowo 1% mierzonej wartości)	≤ 1% pełnego zakresu / 24 h (CH ₄ : dodatkowo 1% mierzonej wartości)

	peratury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)	THC/h) (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)	THC/h) (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)
Odtwarzalność	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu (CH ₄ : dodatkowo 1% mierzonej wartości THC)	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu (CH ₄ : dodatkowo 1% mierzonej wartości THC)
Wpływ zmian ciśnienia próbki na wskazania	$\leq 1,5\%$ wartości mierzonej dla zmian ciśnienia w zakresie ± 300 hPa	$\leq 1,5\%$ wartości mierzonej dla zmian ciśnienia w zakresie ± 300 hPa	$\leq 1,5\%$ wartości mierzonej dla zmian ciśnienia w zakresie ± 300 hPa
Granica wykrywalności	0,009 ppm C ₃ ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)	0,009 ppm C ₃ ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)	0,03 ppm C ₃ ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)
Błąd wskazań ze względu na obecność O ₂	$\leq 1\%$ mierzonej wartości C ₃ H ₈ (dla stężenia O ₂ w zakresie 0–21%)	$\leq 1\%$ mierzonej wartości C ₃ H ₈ (dla stężenia O ₂ w zakresie 0–21%)	$\leq 1\%$ mierzonej wartości C ₃ H ₈ (dla stężenia O ₂ w zakresie 0–21%)
Sprawność konwertera NMHC	–	98%	98%

Tabela 4.10. Dane techniczne analizatorów typu NDIR (CO₂) używanych w badaniach

Parametr	IRD i60 CO ₂ L	IRD i60 CO ₂ H
Mierzone zanieczyszczenie	CO ₂	CO ₂
Najmniejszy zakres pomiarowy	0–0,1%	0–0,5%
Największy zakres pomiarowy	0–6%	0–20%
Czas odpowiedzi T _{10–90}	$\leq 1,2$ s	≤ 1 s
Czas odpowiedzi T ₉₀	$\leq 1,8$ s	$\leq 1,5$ s
Szum	$\leq 1\%$ pełnego zakresu	$\leq 1\%$ pełnego zakresu
Liniowość wskazań	$\leq 2\%$ wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) $\leq 1\%$ pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)	$\leq 2\%$ wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) $\leq 1\%$ pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)
Dryft	$\leq 1\%$ pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)	$\leq 1\%$ pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)
Odtwarzalność	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu
Granica wykrywalności	3 ppm ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)	15 ppm ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)

Tabela 4.11. Dane techniczne analizatorów typu NDIR (CO) używanych w badaniach

Parametr	IRD i60 CO SL	IRD i60 CO L	IRD i60 CO H
Mierzony składnik	CO	CO	CO
Najmniejszy zakres pomiarowy	0–10 ppm	0–50 ppm	0–0,5%
Największy zakres pomiarowy	0–1000 ppm	0–5000 ppm	0–10%
Czas odpowiedzi T_{10-90}	$\leq 1,2$ s	$\leq 1,5$ s	$\leq 1,2$ s
Czas odpowiedzi T_{90}	≤ 2 s	$\leq 2,5$ s	≤ 2 s
Szum	$\leq 1\%$ pełnego zakresu	$\leq 1\%$ pełnego zakresu	$\leq 1\%$ pełnego zakresu
Liniowość wskazań	$\leq 2\%$ wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) $\leq 1\%$ pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)	$\leq 2\%$ wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) $\leq 1\%$ pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)	$\leq 2\%$ wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) $\leq 1\%$ pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)
Dryft	$\leq 1\%$ pełnego zakresu / 1 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)	$\leq 1\%$ pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)	$\leq 1\%$ pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)
Odtwarzalność	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu
Interferencja	$\leq \pm 0,15$ ppm dla mokrego N_2 $\leq 0,5$ ppm dla mokrego CO_2 (przy 3%)	$\leq \pm 0,15$ ppm dla mokrego N_2 $\leq 0,5$ ppm dla mokrego CO_2 (przy 3%)	–
Granica wykrywalności	0,03 ppm ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)	0,15 ppm ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)	15 ppm ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)

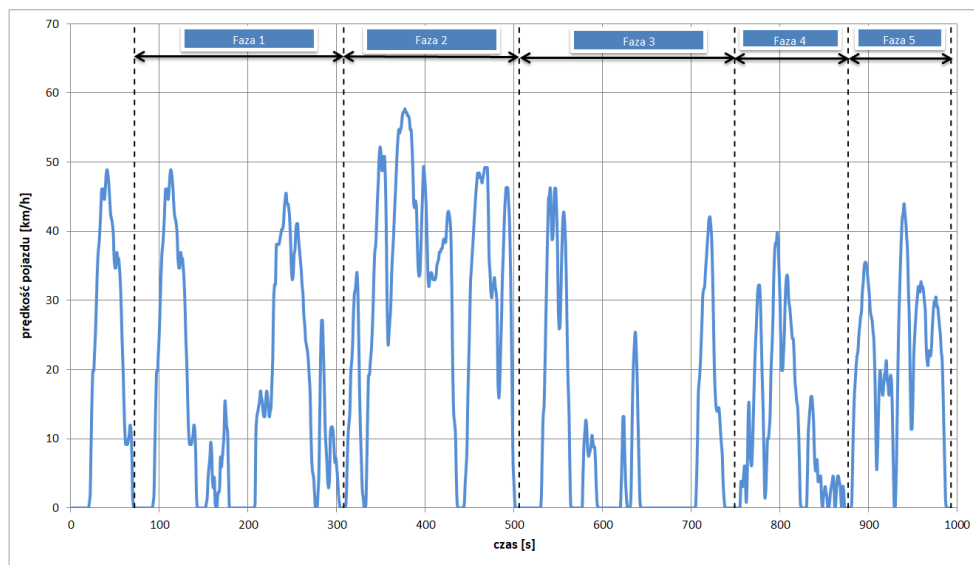
Tabela 4.12. Dane techniczne analizatorów typu NDIR (N_2O) i PMD (O_2) używanych w badaniach

Parametr	IRD i60 N_2O	PMD i60 O_2
Mierzone zanieczyszczenie	N_2O	O_2
Najmniejszy zakres pomiarowy	0–100 ppm	0–1%
Największy zakres pomiarowy	0–1000 ppm	0–25%
Czas odpowiedzi T_{10-90}	$\leq 1,5$ s	$\leq 3,5$ s
Czas odpowiedzi T_{90}	$\leq 2,5$ s	$\leq 4,5$ s
Liniowość wskazań	$\leq 2\%$ wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) $\leq 1\%$ pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)	$\leq 2\%$ wartości mierzonej (w zakresie 10–100% zakresu) $\leq 1\%$ pełnego zakresu (w zależności, która wartość jest mniejsza)
Dryft	$\leq 1\%$ pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)	$\leq 1\%$ pełnego zakresu / 24 h (w typowych warunkach laboratoryjnych, tzn. zmiany temperatury otoczenia w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$)
Odtwarzalność	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu	$\leq 0,5\%$ pełnego zakresu
Cross sensitivity	wymaga używania korekcji wskazań CO i CO_2	na wszystkie gazy o właściwościach paramagnetycznych
Granica wykrywalności	0,3 ppm ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)	30 ppm ($\leq 0,3\%$ najmniejszego zakresu pomiarowego)

4.4. Cykle jezdne

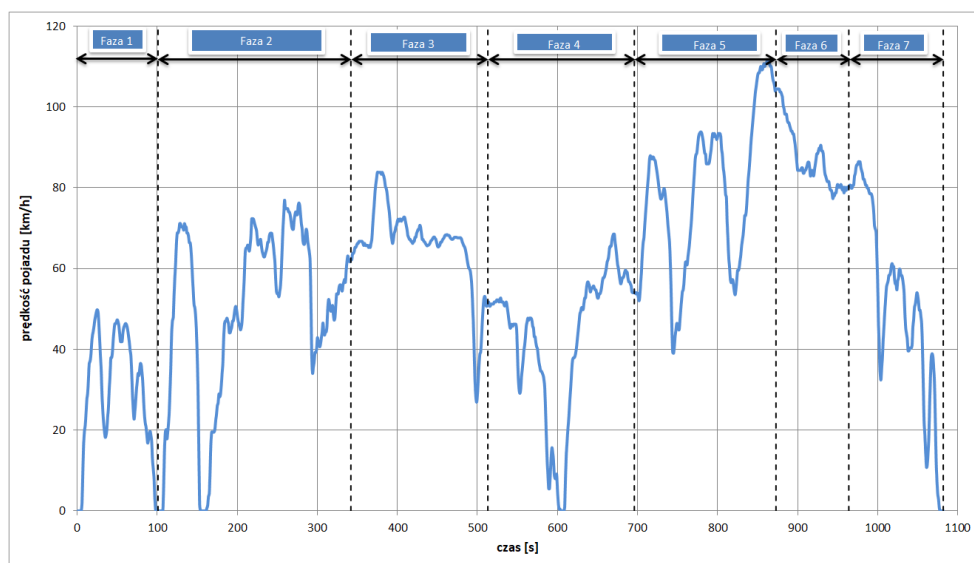
Badania emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego przeprowadzono w trzech cyklach jezdnych: cyklu ARTEMIS uważanym za reprezentatywny dla warunków ruchu drogowego [40, 41], wprowadzonym w 2017 r. cyklu WLTC [24], który również dobrze odzwierciedla warunki ruchu rzeczywistego, oraz dla porównania w cyklu NEDC [23] stosowanym do 2017 r. w badaniach homologacyjnych.

W projekcie ARTEMIS opracowane zostały trzy cykle jezdne reprezentatywne dla rzeczywistych warunków w ruchu: miejskim (ARTEMIS Urban, rys. 4.9), pozamiejskim (ARTEMIS Road, rys. 4.10) oraz na autostradzie (ARTEMIS Motorway, rys. 4.11). Cykl ARTEMIS Motorway jest w dwóch wersjach: z prędkością maksymalną 150 km/h oraz 130 km/h. W niniejszej pracy stosowano wersję ze zmniejszoną prędkością maksymalną do 130 km/h.

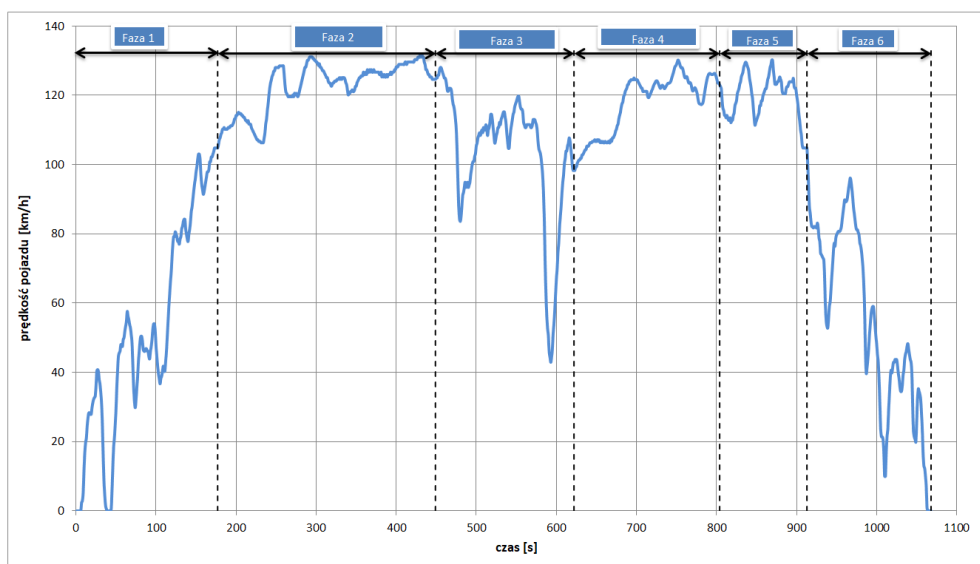


Rys. 4.9. Cykl jezdny ARTEMIS Urban z zaznaczonymi fazami i fazą początkową

W każdym cyklu wydzielona jest faza wstępna, podczas której nie pobiera się próbki spalin do analizy. Dodatkowo w cyklu ARTEMIS Motorway ostatnia faza również nie podlega analizie.



Rys. 4.10. Cykl jezdny ARTEMIS Road z zaznaczonymi fazami oraz fazą początkową i końcową



Rys. 4.11. Cykl jezdny ARTEMIS Motorway

Podstawowe parametry cykli ARTEMIS podano w tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Podstawowe parametry cykli ARTEMIS

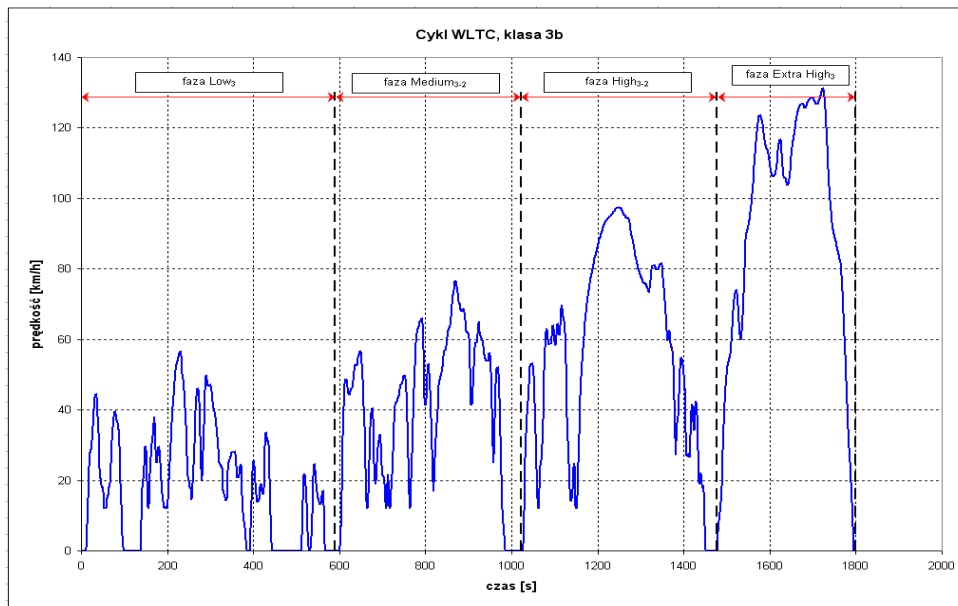
Parametr	Urban	Road	Motorway
Czas trwania [s]	921	981	736
Dystans [m]	4 472	16 441	23 764
Prędkość średnia [km/h]	17,5	60,3	116,4
Prędkość maksymalna [km/h]	57,7	111,5	131,8

Cykl WLTC (*World harmonized Light-Duty Transient Cycle*) został wprowadzony do badań homologacyjnych Rozporządzeniem Komisji (UE) 2017/1151 z 1 czerwca 2017 r. W zależności od klasy pojazdu, a dokładniej stosunku masy własnej pojazdu do maksymalnej mocy silnika, rozróżniane są cztery wersje tego cyklu. Jednak większość pojazdów należy do klasy 3b. W tej klasie w cyklu WLTC rozróżnia się cztery fazy: Low, Medium, High i Extra High. Wybrane parametry poszczególnych faz cyklu WLTC podano w tabeli 4.14. Przebieg prędkości jako funkcję czasu dla cyklu WLTC przedstawiono na rys. 4.12–4.16.

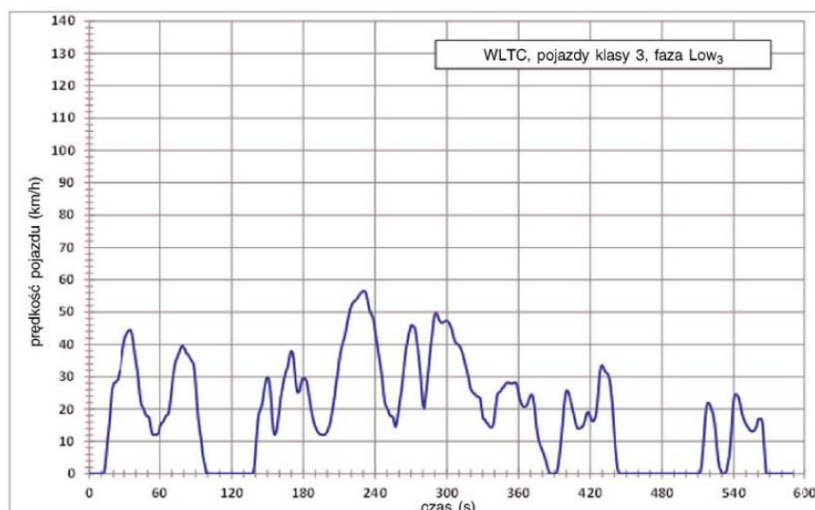
Tabela 4.14. Wybrane parametry fazy cyklu WLTC dla pojazdów klasy 3b

Parametr	Low ₃	Medium ₃₋₂	High ₃₋₂	Extra High ₃
Czas trwania [s]	589	433	455	323
Dystans [m]	3 095	4 756	7 162	8 254
Prędkość średnia [km/h]	18,9	39,5	56,7	92,0
Prędkość maksymalna [km/h]	56,5	76,6	97,4	131,3

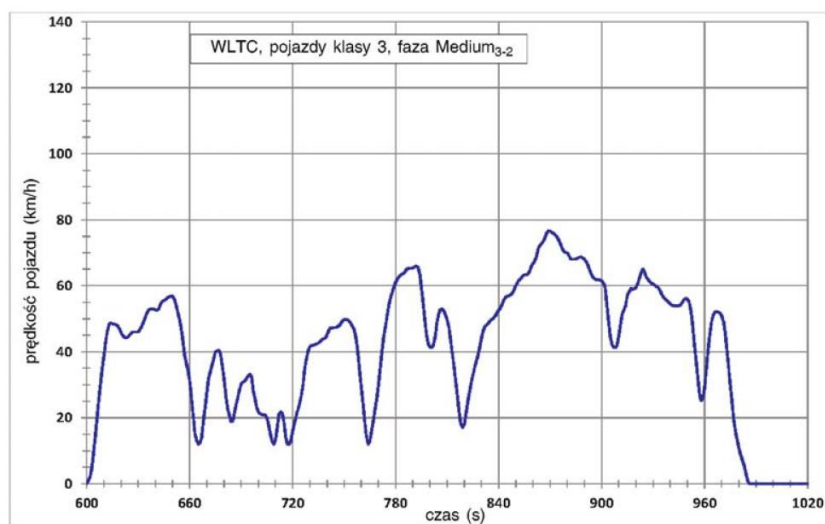
Cykl NEDC (*New European Driving Cycle*) stosowany był w badaniach homologacyjnych do 2017 r. Składa się z dwóch faz: UDC (*Urban Driving Cycle*) reprezentujący ruch miejski oraz EUDC (*Extra-Urban Driving Cycle*) reprezentujący ruch pozamiejski oraz po autostradzie. Przebieg prędkości w funkcji czasu przedstawiono na rys. 4.17, a podstawowe parametry cyklu w tabeli 4.15.



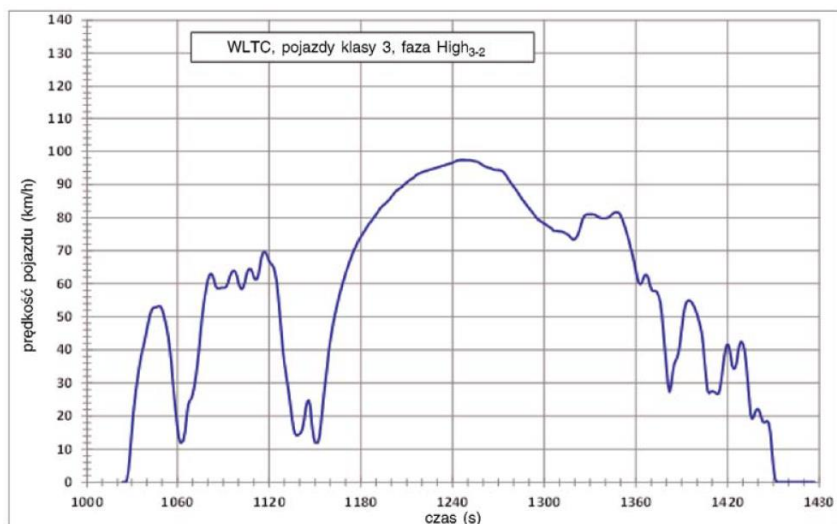
Rys. 4.12. Cykl WLTC dla pojazdów klasy 3b z podziałem na fazy



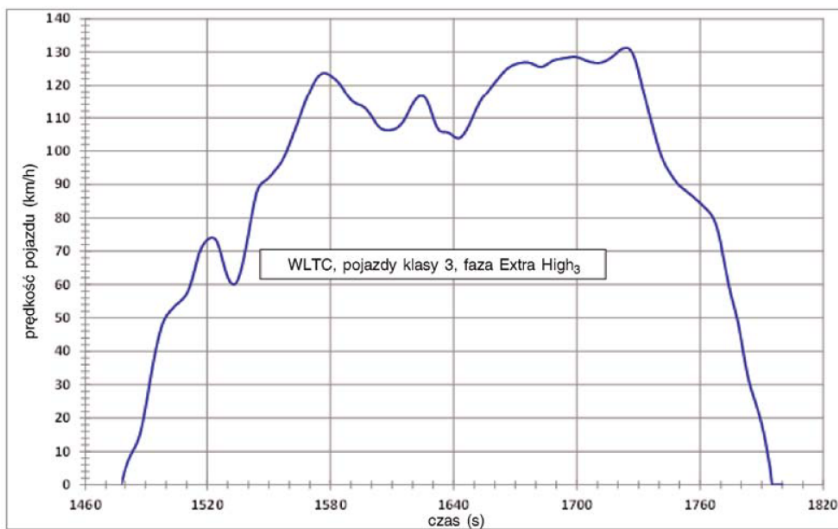
Rys. 4.13. Faza Low cyklu WLTC dla pojazdów klasy 3b [24]



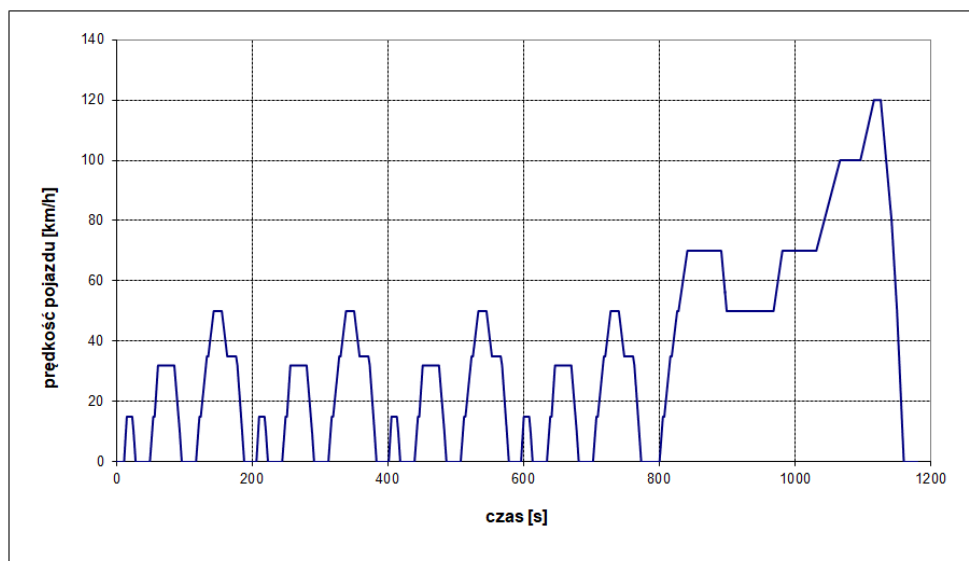
Rys. 4.14. Faza Medium cyklu WLTC dla pojazdów klasy 3b [24]



Rys. 4.15. Faza High cyklu WLTC dla pojazdów klasy 3b [24]



Rys. 4.16. Faza Extra High cyklu WLTC dla pojazdów klasy 3b [24]



Rys. 4.17. Cykl New European Driving Cycle (NEDC)

Tabela 4.15. Wybrane parametry faz cyklu NEDC

Parametr	UDC	EDC
Czas trwania [s]	780	400
Dystans [m]	4052	6955
Prędkość średnia [km/h]	19	62,6
Prędkość maksymalna [km/h]	50	120

4.5. Regulacja hamowni podwoziowej

Regulację ustawienia hamowni podwoziowej wykonano metodą alternatywną zgodnie z załącznikiem 4a do regulaminu ONZ nr 83, seria poprawek 07. Współczynniki wielomianu drugiego stopnia krzywej obciążenia drogowego, symulowanej przez hamownię podwoziową (4.33), oraz bezwładność zastępczą TM zastosowane w badaniach przedstawiono w tab. 4.16.

$$F_{abs} = f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2 \quad (4.33)$$

gdzie: F_{abs} – siła oporów ruchu symulowanych przez hamownię podwoziową, f_0, f_1, f_2 – współczynniki wielomianu drugiego stopnia krzywej oporów ruchu symulowanych przez hamownię podwoziową, TM – bezwładność zastępcza badanego pojazdu.

Tabela 4.16. Współczynniki wielomianu drugiego stopnia krzywej oporów ruchu symulowanych przez hamownię (siła absorbowana) oraz bezwładność zastępcza użyte podczas badań samochodów

Parametr	S1	S2	S3
TM [kg]	1470	1700	1360
f_0 [N]	7,4	7,9	7,1
f_1 [Ns/m]	0	0	0
f_2 [Ns ² /m ²]	0,6506	0,6947	0,6234

4.6. Metoda określania wskaźników emisji zanieczyszczeń

4.6.1. Uwarunkowania wstępne

Całkowita masa zanieczyszczenia z pojazdu obliczana jest jako suma masy po rozruchu rozgrzanego silnika (tj. gdy silnik pracuje przy temperaturze nominalnej) i masy w okresie przejściowym pracy silnika spalinowego (tzw. rozruch zimnego lub częściowo rozgrzanego silnika). Rozróżnienie masy zanieczyszczenia w trakcie „gorącej”, stabilnej fazy pracy silnika i fazy przejściowej, kiedy silnik jeszcze nie osiągnął nominalnej temperatury cieczy chłodzącej, jest niezbędne ze względu na znaczne różnice wartości ich masy w tych dwóch fazach. Całkowita masa zanieczyszczeń może być obliczona za pomocą następującego równania (4.34):

$$m_{całk} = m_g + m_z \quad (4.34)$$

gdzie: $m_{całk}$ – całkowita masa dowolnej substancji, m_g – masa zanieczyszczenia podczas stanu ustalonego termicznie silnika, m_z – masa zanieczyszczenia podczas stanu nieustalonego termicznie silnika (po rozruchu zimnego lub częściowo nagrzanego silnika).

Masa zanieczyszczeń z pojazdów jest zależna od warunków pracy silnika. Różne tryby jazdy narzucają różne warunki pracy silnika. W szacowaniu emisji zanieczyszczeń przejazd został podzielony na fazę miejską, pozamiejską i autostradową. Całkowita masa zanieczyszczeń może być obliczona według równania:

$$m_{całk} = m_M + m_P + m_A \quad (4.35)$$

gdzie: m_M , m_P i m_A są całkowitymi masami zanieczyszczeń każdej substancji w poszczególnych fazach jazdy odpowiednio: miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej.

4.6.2. Masa spalin po rozruchu rozgrzanego silnika

Masę substancji szkodliwych po rozruchu rozgrzanego silnika oblicza się na podstawie równania (4.36):

$$m_g = N_k \cdot M_{k,r} \cdot b_{g;i,k,r} \quad (4.36)$$

gdzie: $m_{g;i,k,r}$ – masa zanieczyszczenia i [g] z silnika pracującego w nominalnej temperaturze pracy, wyznaczona dla pojazdu wyprodukowanego w technologii k i eksploatowanego na drodze typu r , N_k – liczba pojazdów w technologii k , $M_{k,r}$ – przebieg przypadający na pojazd [km/pojazd] w technologii k , eksploatowany na drodze typu r , $b_{g;i,k,r}$ – emisja drogowa w [g/km] dla substancji i , określona dla silnika pracującego w nominalnej temperaturze pracy napędzającego pojazd wyprodukowany w technologii k , eksploatowany na drodze typu r .

Emisja drogowa $b_{g;i,k,r}$ może być określona na podstawie:

- pomiarów emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego prowadzonych w cyklach jezdnych, które są odpowiednie dla rzeczywistych warunków ruchu drogowego na analizowanym obszarze,
- wybranie średniej prędkości reprezentatywnej dla danego poszczególnego typu drogi (drogi miejskie – 20 km/h, poza miastem – 60 km/h, autostrada – 100 km/h) i wykorzystanie odpowiedniej wartości wskaźnika emisji zanieczyszczeń zawartej w [18],
- zdefiniowanie krzywej rozkładu prędkości $f_{j,k}(V)$ i scałkowanie jej, np.:

$$b_{g;i,k,r} = \int [b(v) \times f_{k,r}(v)] dv \quad (4.37)$$

gdzie: v – prędkość pojazdu w fazie miejskiej, pozamiejskiej, autostradowej, $b(v)$ – wyrażenie zależności $b_{g;i,k,r}$ od prędkości, $f_{k,r}(v)$ – równanie (np. formuła krzywej najlepszego dopasowania) opisująca rozkład częstości występowania prędkości, która odpowiada modelowi jazdy w fazie miejskiej, pozamiejskiej, autostradowej, $f_{k,r}(v)$ – funkcja technologii pojazdu k i typu drogi r .

W niniejszej pracy wskaźniki wyznaczono na podstawie pomiarów emisji zanieczyszczeń przeprowadzonych w cyklach jezdnych ARTEMIS. Masa CO, NO_x, THC, CH₄ i CO₂ została obliczona na podstawie zależności (4.36), natomiast masa NMHC jako różnica między masą THC oraz CH₄.

4.6.3. Masa spalin po rozruchu zimnego lub częściowo nagrzanego silnika

Rozruch zimnego lub częściowo nagrzanego silnika skutkuje zwiększoną masą zanieczyszczeń. Ma to miejsce podczas wszystkich trzech faz jazdy. Jednak ze względu na fakt, iż rzadko występuje w przypadku korzystania z autostrad (głównie uruchamianie silnika na parkingu przy autostradzie), są one odnotowywane przeważnie w przypadku dróg miejskich i pozamiejskich. Zjawisko to jest zauważalne dla każdego typu pojazdów, lecz wskaźniki emisji są dostępne, albo mogą być sensownie oszacowane, jedynie dla pojazdów napędzanych silnikami zasilanymi benzyną, olejem napędowym, LPG i – przy założeniu, że pojazdy te użytkowane są jak samochody osobowe – lekkich pojazdów użytkowych. W związku z tym metodyka ta uwzględnia tylko te kategorie. Nie uwzględnia ona wieku pojazdów.

Masa po rozruchu zimnego silnika jest obliczana jako dodatkowa masa, ponad tą, której spodziewano by się, gdyby wszystkie pojazdy poruszały się z rozgrzanym silnikiem i reaktorem katalitycznym. Istotnym wskaźnikiem, odpowiadającym stosunkowi masy zanieczyszczenia po rozruchu zimnego silnika do jego masy po rozruchu rozgrzanego silnika, jest część przebiegu wykonana z zimnym silnikiem. Ten wskaźnik ma dla różnych państw inne wartości. Rodzaj jazdy (różne długości pokonywanych odcinków) i warunki klimatyczne wpływają na czas potrzebny do rozgrzania silnika i/lub reaktora katalitycznego, a więc na udział przebiegu z zimnym silnikiem w całościowym przebiegu.

Rozruch zimnego silnika przedstawiony jest w obliczeniach jako dodatkowa masa za pomocą poniższego wzoru:

$$m_{z,i,j} = \beta_{i,k} \times N_k \times M_k \times b_{g,i,k} \times (e^z/e^g|_{i,k} - 1) \quad (4.38)$$

gdzie: $m_{z,i,j}$ – masa substancji szkodliwych i w przypadku zimnego silnika, wykonanego w technologii k , $\beta_{i,k}$ – udział w przebiegu całkowitym odległości pokonanej z zimnym silnikiem i reaktorem katalitycznym pracującym poniżej temperatury operacyjnej dla substancji i i pojazdu wykonanego w technologii k , N_k – liczba pojazdów danej technologii k , M_k – całkowity przebieg pojazdu [km/pojazd] wykonanego w technologii k , $e^z/e^g|_{i,k}$ – stosunek „zimnej” i „gorącej” emisji dla substancji i i pojazdu wykonanego w technologii k .

Parametr β zależy od temperatury otoczenia t_a (można wykorzystać średnią miesięczną temperaturę) i sposobu wykorzystywania pojazdu – największe znaczenie ma długość pokonywanych tras l_{trip} . Ponieważ w wielu państwach wartości wielkości l_{trip} są nieznane dla wielu klas pojazdów, wprowadzono uproszczenia dla pewnych kategorii pojazdów. W nawiązaniu do dostępnych danych statystycznych [40], dla Europy przyjmuje się ogólnie wartość l_{trip} równą 12,4 km. Co więcej, powinna ona się zawierać w przedziale 8–15 km. Sugerowane jest skorzystać z wartości $l_{trip} = 12,4$ km, chyba że dostępne są dane krajowe. W tabeli 4.20 przedstawiono wartości l_{trip} wykorzystywane w inwentaryzacji w 1990 r.

Tabela 4.20. Przykłady średnich szacunkowych wartości długości pojedynczej jazdy l_{trip} [km] na podstawie zaktualizowanego przebiegu COPERT 1990 [40]

Kraj	Długość pojedynczej jazdy	Kraj	Długość pojedynczej jazdy
Austria	12	Węgry	12
Belgia	12	Irlandia	14
Dania	9	Włochy	12
Niemcy	14	Luksemburg	15
Hiszpania	12	Holandia	13,1
Francja	12	Portugalia	10
Finlandia	17	Wielka Brytania	10
Grecja	12		

Parametr β obliczany jest na podstawie zależności (4.39) [19]:

$$\beta_{i,k} = 0,6474 - 0,02545 \times l_{trip} - (0,00974 - 0,000385 \times l_{trip}) \times t_a \quad (4.39)$$

Wprowadzenie bardziej rygorystycznych norm emisji substancji szkodliwych dla pojazdów z silnikami o zapłonie iskrowym narzuca krótszy czas rozgrzewania reaktora katalitycznego do temperatury efektywnej pracy. Znajduje to odzwierciedlenie w skróceniu czasu pracy silnika nierozgrzanego. A zatem, parametr β zmniejsza się wraz z rozwojem norm określających dopuszczalne poziomy emisji substancji szkodliwych emitowanych w trakcie eksploatacji pojazdów z silnikami benzynowymi wyposażonych w reaktory katalityczne.

W tabeli 4.21 przedstawiono wskaźniki używane do obliczania zmniejszenia parametru β dla wybranych pojazdów z reaktorem katalitycznym dla poszczególnych substancji szkodliwych.

Tabela 4.21. Współczynnik redukcji współczynnika β ($bc_{i,k}$) dla pojazdów benzynowych homologowanych według poziomów emisji Euro 2 i wyższych w stosunku do wartości dla pojazdów Euro 1 [19]

Norma emisji	CO	NO _x	VOC
Euro 2 – 94/12/EC	0,72	0,72	0,56
Euro 3 – 98/69EC poziom 2000	0,62	0,32	0,32
Euro 4 i kolejne	0,18	0,18	0,18

Emisja zanieczyszczeń z pojazdu z silnikiem ZI wyposażonego w reaktor katalityczny podczas fazy rozgrzewania silnika jest znacznie większa, niż podczas stanu ustalonego termicznie, z powodu zmniejszonej wydajności reaktora katalitycznego pracującego poniżej temperatury operacyjnej. W tabeli 4.22 przedstawiono wartości stosunków e^z/e^g dla trzech głównych zanieczyszczeń (CO, NO_x i THC). Wartości są rezultatem dopasowania istniejącej metodyki COPERT do rezultatów opublikowanych przez MEET [22] i są funkcją temperatury otoczenia i średniej prędkości podróży. Określa się go na podstawie zależności (4.40).

$$e^z/e^g = A \times v + B \times t_a + C \quad (4.40)$$

gdzie: A , B , C – współczynniki z tabeli 3.22, v – średnia prędkość, t_a – średnia temperatura otoczenia.

Tabela 4.22. Wartości wskaźników stosunku e^z/e^g dla pojazdów z silnikami o zapłonie iskrowym spełniającymi wymagania na poziomie Euro 1 i kolejnych [19]

Zanieczyszczenie	Kategoria	v [km/h]	t_a [°C]	A	B	C
CO	$V_{ss} < 1,4 \text{ dm}^3$	5–25	od –20 do 15	0,156	–0,155	3,519
		26–45	od –20 do 15	0,538	–0,373	–6,24
		5–45	> 15	8,032E–02	–0,444	9,826
	$1,4 \text{ dm}^3 < V_{ss} < 2,0 \text{ dm}^3$	5–25	od –20 do 15	0,121	–0,146	3,766
		26–45	od –20 do 15	0,299	–0,286	–0,58
		5–45	> 15	5,03E–02	–0,363	8,604
	$V_{ss} > 2,0 \text{ dm}^3$	5–25	od –20 do 15	7,82E–02	–0,105	3,116
		26–45	od –20 do 15	0,193	–0,194	0,305
		5–45	> 15	3,21E–02	–0,252	6,332
NO _x	$V_{ss} < 1,4 \text{ dm}^3$	5–25	> –20	4,61E–02	7,38E–03	0,755
		26–45	> –20	5,13E–02	2,34E–02	0,616
	$1,4 \text{ dm}^3 < V_{ss} < 2,0 \text{ dm}^3$	5–25	> –20	4,58E–02	7,47E–03	0,764
		26–45	> –20	4,84E–02	2,28E–02	0,685
	$V_{ss} > 2,0 \text{ dm}^3$	5–25	> –20	3,43E–02	5,66E–03	0,827
		26–45	> –20	3,75E–02	1,72E–02	0,728
THC	$V_{ss} < 1,4 \text{ dm}^3$	5–25	od –20 do 15	0,154	–0,134	4,937
		26–45	od –20 do 15	0,323	–0,240	0,301
		5–45	> 15	9,92E–02	–0,355	8,967
	$1,4 \text{ dm}^3 < V_{ss} < 2,0 \text{ dm}^3$	5–25	od –20 do 15	0,157	–0,207	7,009
		26–45	od –20 do 15	0,282	–0,338	4,098
		5–45	> 15	4,76E–02	–0,477	13,44
	$V_{ss} > 2,0 \text{ dm}^3$	5–25	od –20 do 15	8,14E–02	–0,165	6,464
		26–45	od –20 do 15	0,116	–0,229	5,739
		5–45	> 15	1,75E–02	–0,346	10,462
Zużycie paliwa	Wszystkie	–	od –10 do 30	0	–0,009	1,47

W opisywanej metodyce szacowania emisji wprowadzone zostały dwa zakresy prędkości (5–25 km/h i 25–45 km/h). Uznaje się, że proponowany zakres prędkości jest wystarczający dla większości zastosowań, ponieważ zwiększona emisja zanieczyszczeń po rozruchu nierozgrzanego silnika jest przypisana tylko do miejskiego trybu jazdy.

Dla CO i THC ma miejsce zwiększona emisja nie tylko ze względu na małą wydajność reaktora katalitycznego, ale także ze względu na wzbogacenie mieszanki podczas rozruchu nierozgrzanego silnika, pozwalająca na lepsze właściwości jezdne przy takim stanie. Wzbogacenie zależy od temperatury silnika podczas jego rozruchu. W związku z tym, zwiększona emisja substancji szkodliwych podczas rozruchu nierozgrzanego silnika nie dotyczy emisji NO_x, która jest w niewielkim stopniu wrażliwa na wzbogacenie mieszanki paliwowo-powietrznej, ale przejawia silną zależność od temperatury otoczenia. Dlatego zdefiniowano dwa różne zakresy temperatur dla CO i THC.

Z drugiej strony nie ma konieczności wykorzystywania różnych wartości e^z/e^g dla różnych klas pojazdów. To oznacza, że wartości e^z/e^g obliczone dla pojazdów spełniających wymagania na poziomie Euro 1 mogą być również wykorzystane do późniejszych klas pojazdów bez dodatkowych zmian. Podobnie, wskaźnik emisji zanieczyszczeń po rozruchu rozgrzanego silnika wykorzystany w oszacowaniach emisji rozruchu nierozgrzanego silnika powinien być wartością odpowiednią dla Euro 1. Jednakże takie działanie prawdopodobnie zawodzi w przypadku przewidywania dodatkowej redukcji emisji zanieczyszczeń, która może mieć miejsce w przypadku testowania pojazdów spełniających wymagania na poziomie Euro 3 i wyższym z nierozgrzanym silnikiem (–7°C). Niezbędna jest zmiana strategii wzbogacenia mieszanki by spełnić ten test. To będzie prowadziło do zmniejszenia stosunku e^z/e^g . Jednakże, skuteczność takich modyfikacji w wyższych temperaturach jest dyskusyjna. Z tego powodu, a także z powodu braku szczegółowych analiz w chwili obecnej, w zalecanej metodyce szacowania emisji zanieczyszczeń proponuje się odrzucić wszelkie korekcyjne stosunku e^z/e^g .

Wartości stosunku e^z/e^g dla metanu nie są podane w przewodniku dotyczącym szacowania emisji zanieczyszczeń [19]. Można go określić np. na podstawie wskaźników emisji metanu po rozruchu nierozgrzanego silnika oraz po rozruchu rozgrzanego silnika. Wartości tych wskaźników podane są w [19]. Dla samochodów osobowych zasilanych benzyną i spełniających wymagania na poziomie Euro 4 i późniejszych wskaźniki emisji metanu wynoszą:

- po rozruchu nierozgrzanego silnika: 57 mg/km,
- po rozruchu rozgrzanego silnika: 2,87 mg/km,

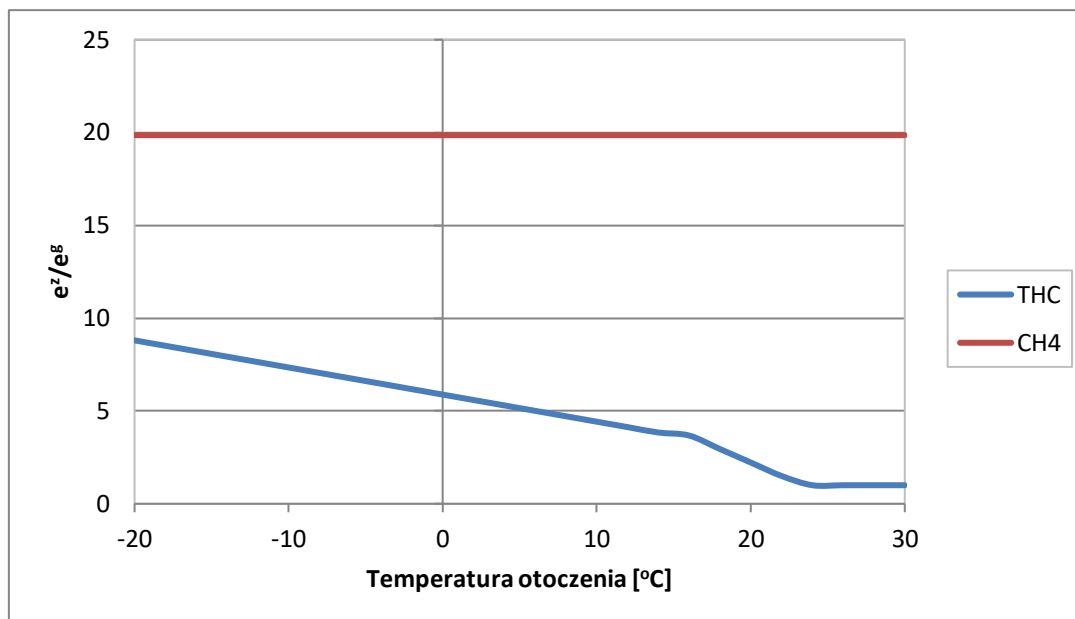
natomiast dla samochodów osobowych zasilanych olejem napędowym i spełniających wymagania na poziomie Euro 5 i późniejszych wynoszą:

- po rozruchu nierozgrzanego silnika: 0,075 mg/km,
- po rozruchu rozgrzanego silnika: 0,075 mg/km.

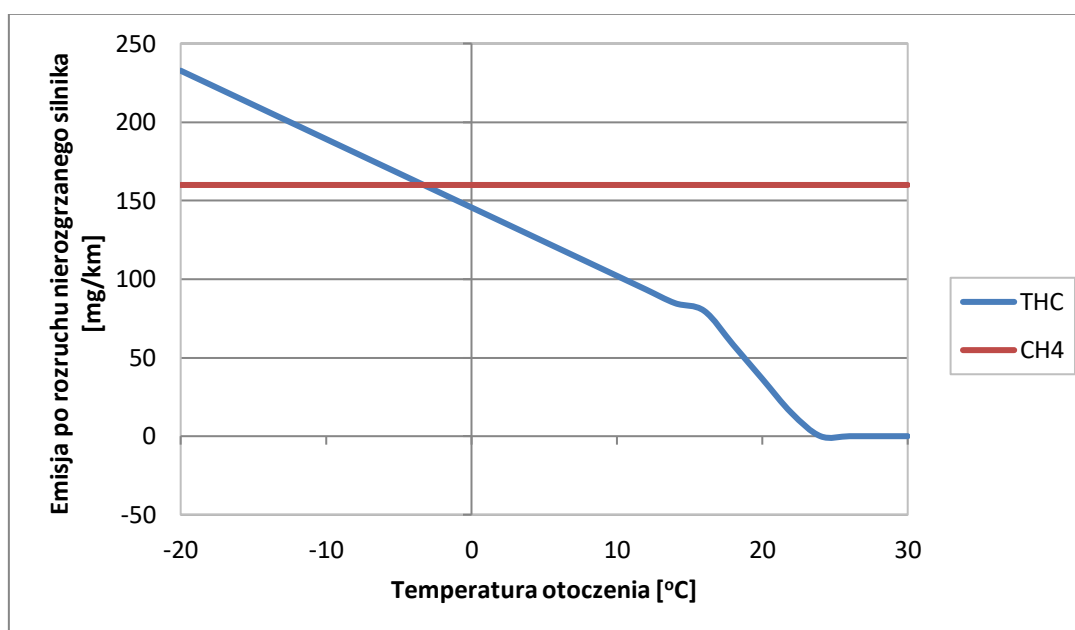
Wartości te są określone dla warunków ruchu miejskiego. Na tej podstawie można przyjąć, że wartość e^z/e^g dla metanu, określona powyższą metodą, wyniosłaby:

- dla pojazdów zasilanych benzyną: 19,86,
- dla pojazdów zasilanych olejem napędowym: 1.

Metoda ta nie uwzględnia jednak wpływu temperatury początkowej silnika w chwili rozruchu. Może to prowadzić do tego, że dla wyższych temperatur otoczenia, emisja metanu wynikająca z rozruchu nierozgrzanego silnika będzie większa niż emisja sumy węglowodorów, co nie jest możliwe. Na rysunkach 4.18 i 4.19 przedstawiono zmianę wskaźnika e^z/e^g dla sumy węglowodorów i metanu oraz emisji zanieczyszczeń wynikającej z rozruchu zimnego silnika w funkcji temperatury otoczenia.



Rys. 4.18. Wskaźnik e^z/e^g dla sumy węglowodorów i metanu w odniesieniu do temperatury otoczenia



Rys. 4.19. Emisja drogowa sumy węglowodorów i metanu wynikająca z rozruchu nierozgrzanego silnika w odniesieniu do temperatury otoczenia

Na podstawie analizy rys. 4.19 można stwierdzić, że emisja metanu wynikająca z rozruchu nierozgrzanego silnika, określona przy założeniu, że wartość e^z/e^g dla metanu jest niezależna od temperatury otoczenia i wynosi 19,86, jest większa od emisji sumy węglowodorów już od temperatury otoczenia większej od -4°C . Wobec powyższego oraz uwzględniając, że w przewodniku [19] nie ma podanej zależności na wartość e^z/e^g dla metanu przyjęto w niniejszej pracy, że wartość ta jest określana na podstawie zależności podanych dla sumy węglowodorów.

Masa NMHC wynikająca z rozruchu nierozgrzanego silnika jest obliczana jako różnica między masą sumy węglowodorów a emisją metanu:

$$m_{z,NMHC} = m_{z,THC} - m_{z,CH_4} \quad (4.41)$$

Przewodnik [19] nie określa również wartości stosunku e^z/e^g dla dwutlenku węgla. Obliczanie masy dwutlenku węgla zaleca wykonywać na podstawie zużycia paliwa zgodnie z poniższą zależnością:

$$m_{CO_2}^{CALC} = 44,011 \times \frac{FC^{CALC}}{12,011 + 1,008 \times r_{H:C} + 16,000 \times r_{O:C}} \quad (4.42)$$

Ze względu na to, że:

- obliczanie masy dwutlenku węgla zaleca wykonywać się na podstawie zużycia paliwa (zależność 4.42),
- w przewodniku [19] są podane zależności na wyznaczenie stosunku e^z/e^g dla zużycia paliwa,

to stosunek e^z/e^g dla dwutlenku węgla można przyjąć taki sam, jak dla zużycia paliwa.

Emisja zanieczyszczeń w przypadku nierozgrzanego silnika o zapłonie samoczynnym nie zwiększa się znacząco, w porównaniu do tej w przypadku silnika o zapłonie iskrowym. W związku z tym, nie wprowadza się rozróżnień pomiędzy konwencjonalnymi pojazdami, a pojazdami spełniającymi wymagania na poziomie Euro 1.

W celu obliczenia masy zanieczyszczenia po rozruchu zimnego silnika o zapłonie samoczynnym samochodu osobowego, parametr β obliczany jest dla wszystkich klas pojazdów, z wykorzystaniem formuły (4.39). Wartości e^z/e^g podane są w tabeli 4.23 i są takie same jak dla konwencjonalnych pojazdów. Jednakże należy wprowadzić współczynnik redukcji dla pojazdów spełniających wymagania powyżej normy Euro 4 ($RF_{i,k}$). Są one podane w tabeli 4.24. Na podstawie tego, równanie (4.38) może być zastosowane dla samochodów osobowych wyposażonych w silnik ZS spełniających normy poniżej Euro 4, natomiast powyżej Euro 4 użyte równanie powinno wyglądać następująco:

$$m_{z,i,k} = \beta_{i,k} \times N_k \times M_k \times (100 - RF_{i,k})/100 \times b_{g;i,Euro 4} \times (e^z/e^g|_{i,Euro 1} - 1) \quad (4.43)$$

Tabela 4.23. Wartości e^z/e^g dla pojazdów osobowych z silnikiem o zapłonie samoczynnym (zakres temperatur – 10°C do 30°C) [19]

Zanieczyszczenie	e^z/e^g
CO	1,9–0,03 t_a
NO _x	1,3–0,013 t_a
THC	3,1–0,09 $t_a^{(1)}$
PM	3,1–0,1 $t_a^{(2)}$
Zużycie paliwa	1,34–0,008 t_a
⁽¹⁾ THC: jeśli $t_a > 29^\circ\text{C}$, wtedy $e^z/e^g > 0,5$	
⁽²⁾ PM: jeśli $t_a > 26^\circ\text{C}$, wtedy $e^z/e^g > 0,5$	

Tabela 4.24. Procentowa redukcja emisji drogowej dla pojazdów osobowych z silnikiem ZS spełniających wymagania na poziomie Euro 5 i 6 w odniesieniu do standardów Euro 4 [19]

Norma emisji	CO [%]	NO _x [%]	THC [%]	PM [%]
Euro 5	0	-23	0	95
Euro 6	0	57	0	95
Uwaga: wskaźnik redukcji NO _x dla samochodów Euro 5 jest negatywny, co implikuje zwiększenie emisji drogowej, zamiast jej redukcję.				

W niniejszej pracy wskaźniki emisji zanieczyszczeń po rozruchu rozgrzanego silnika zostały określone w wyniku pomiarów w cyklach jezdnych ARTEMIS dla każdego badanego pojazdu. Wskaźniki te będą użyte do obliczenia emisji zanieczyszczeń po rozruchu zimnego silnika m_z w zależności (4.43) zamiast występującego tam wskaźnika $b_{g;i,Euro 4}$. W związku z tym zostanie pominięty współczynnik $RF_{i,k}$. Stąd, w przypadku badanego pojazdu wyposażonego w silnik ZS, zależność (4.43) przyjmie postać:

$$m_{z;i,k} = \beta_{i,k} \times N_k \times M_k \times b_{g;i,Euro 5} \times (e^z/e^g|_{i,Euro 1} - 1) \quad (4.44)$$

5. Wyniki badań współczynnika rozcieńczenia spalin

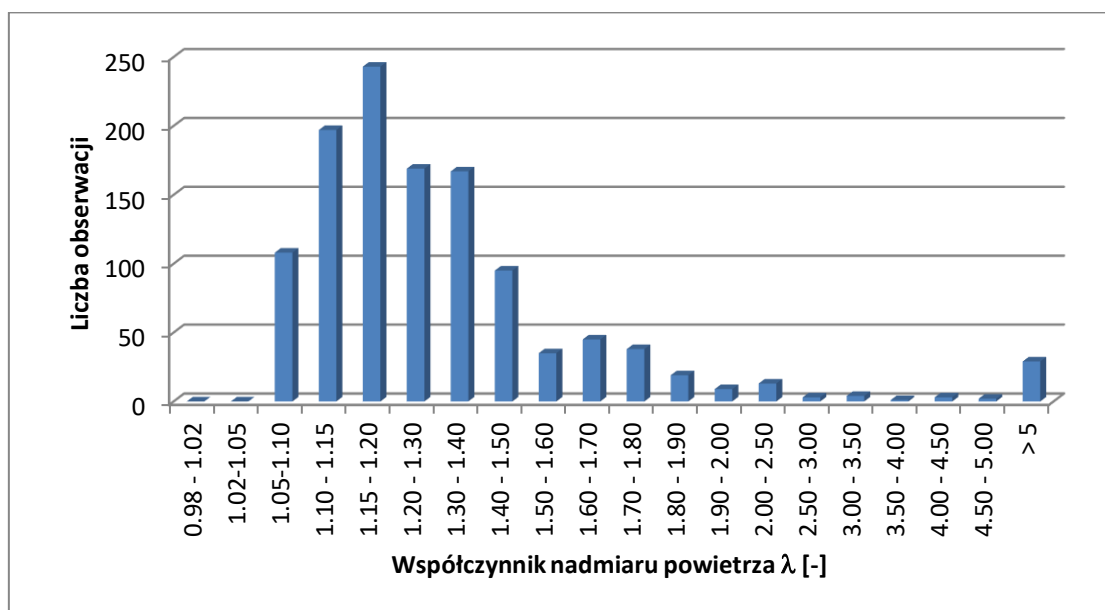
5.1. Współczynnik nadmiaru powietrza w cyklach jezdnych stosowanych w pomiarach emisji zanieczyszczeń

W celu określenia wpływu współczynnika nadmiaru powietrza na wartość współczynnika rozcieńczenia wykonano pomiary emisji zanieczyszczeń w cyklach NEDC, WLTC oraz AR-TEMIS. W trakcie pomiarów rejestrowano chwilowe wartości stężenia w surowych spalinach. Na podstawie zarejestrowanych wartości obliczano chwilową wartość współczynnika nadmiaru powietrza za pomocą uproszczonej zależności Brettschneidera (5.1) [23]:

$$\lambda = \frac{C_{CO_2} + \frac{C_{CO}}{2} + C_{O_2} - \frac{C_{NO}}{2} + \left(\frac{HC_v}{4} \times \frac{3,5}{3,5 + \frac{C_{CO}}{C_{CO_2}}} - \frac{OC_v}{2} \right) \times (C_{CO_2} + C_{CO})}{\left(1 + \frac{HC_v}{4} - \frac{OC_v}{2} \right) \times (C_{CO} + C_{CO_2} + C_{CO})} \quad (5.1)$$

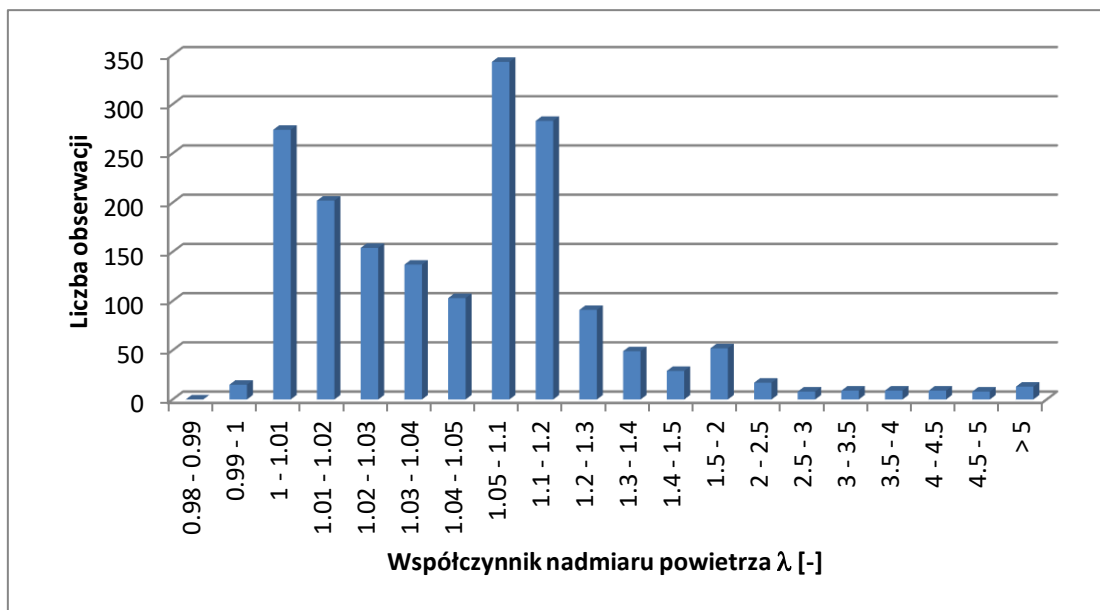
gdzie: C_{CO_2} – stężenie dwutlenku węgla w spalinach [%], C_{CO} – stężenie tlenku węgla w spalinach [%], C_{NO} – stężenie tlenków azotu w spalinach [%], C_{O_2} – stężenie tlenu w spalinach [%], C_{THC} – stężenie sumy węglowodorów w spalinach [%], HC_v – stosunek liczby atomów wodoru do liczby atomów węgla w cząsteczce paliwa $C_xH_yO_z$, OC_v – stosunek liczby atomów tlenu do liczby atomów węgla w cząsteczce paliwa $C_xH_yO_z$.

Na rysunkach 5.1 do 5.18 przedstawiono histogramy współczynnika λ w poszczególnych cyklach.



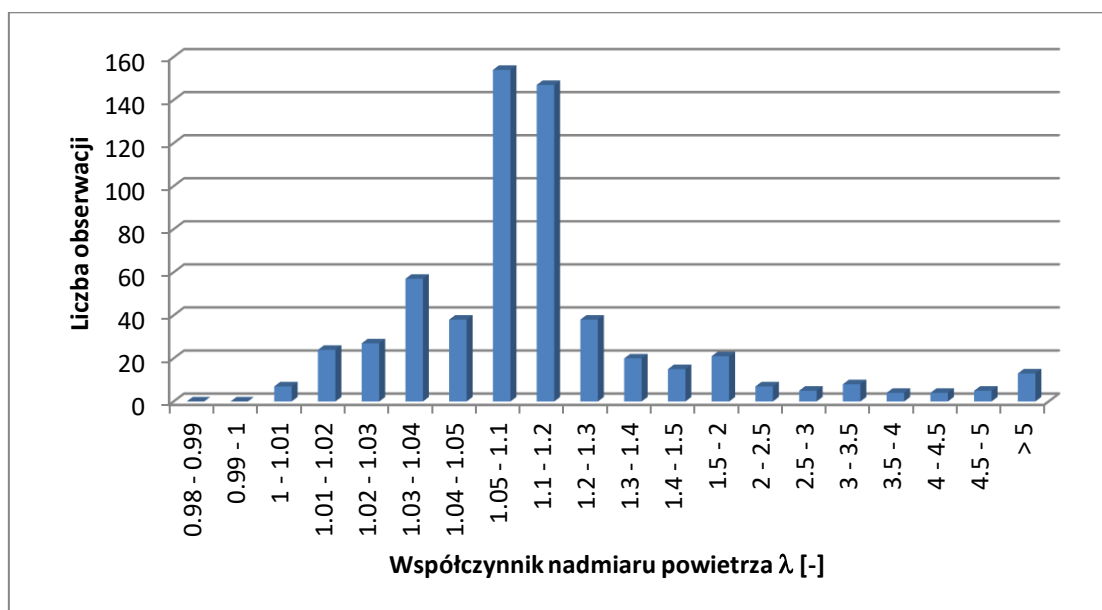
Rys. 5.1. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu NEDC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w teście NEDC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,05–1,50. Był to przedział, w którym odnotowano 979 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 83% wszystkich obserwacji.



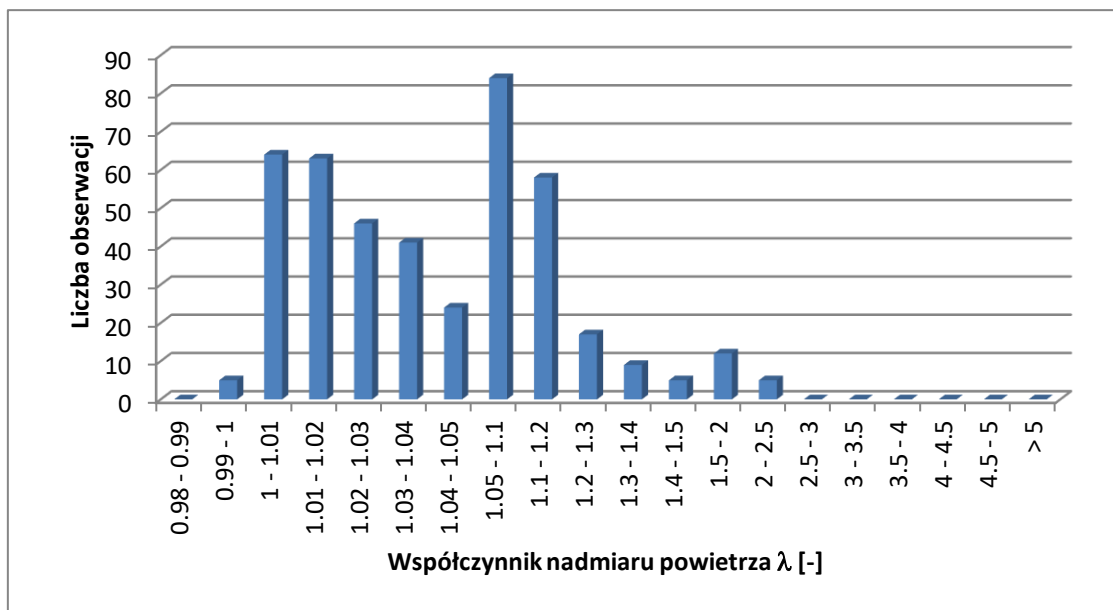
Rys. 5.2. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w teście WLTP najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,00–1,20. Był to przedział, w którym odnotowano 1496 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 83% wszystkich obserwacji.



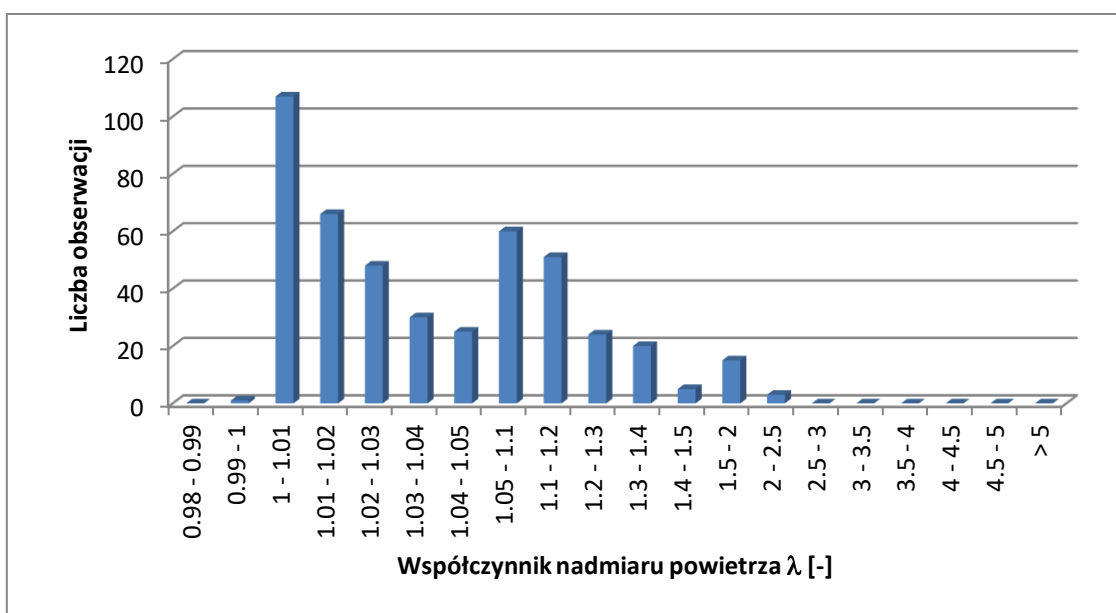
Rys. 5.3. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Low₃ cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w fazie Low₃ cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,05–1,20. Był to przedział, w którym odnotowano 301 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 51% wszystkich obserwacji.



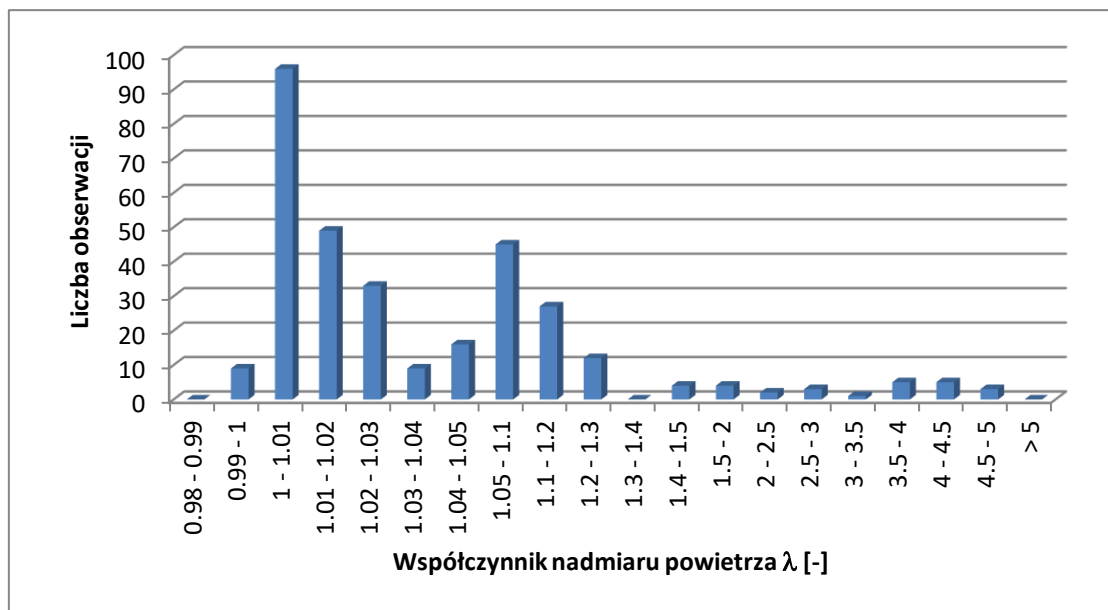
Rys. 5.4. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Medium₃ cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w fazie Medium₃ cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,00–1,20. Był to przedział, w którym odnotowano 308 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 71% wszystkich obserwacji.



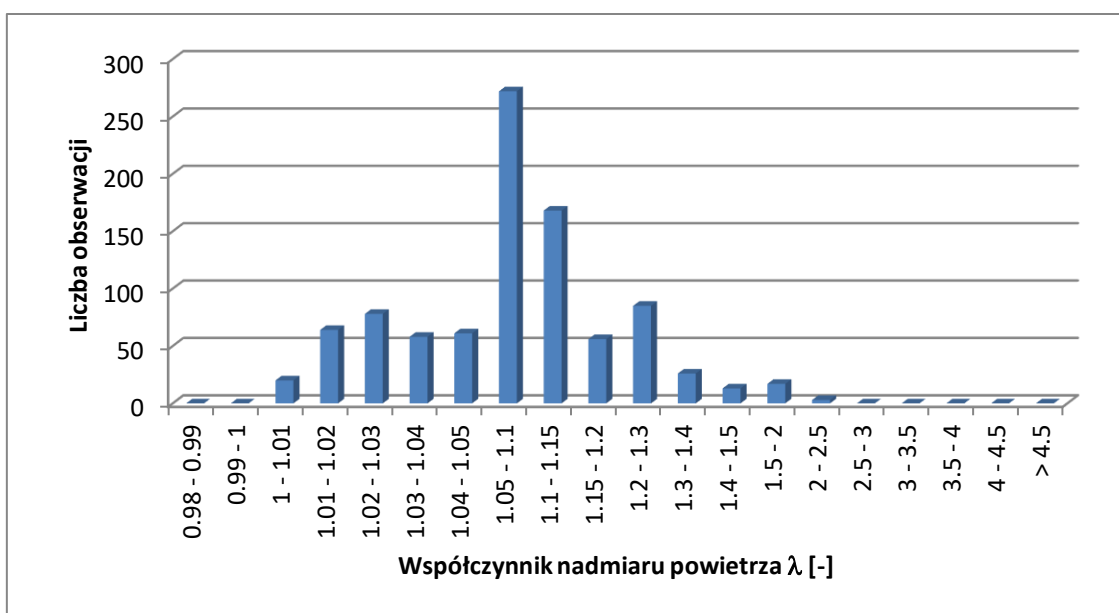
Rys. 5.5. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie High₃ cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w fazie High₃ cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,00–1,20. Był to przedział, w którym odnotowano 387 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 85% wszystkich obserwacji.



Rys. 5.6. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Extra High cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

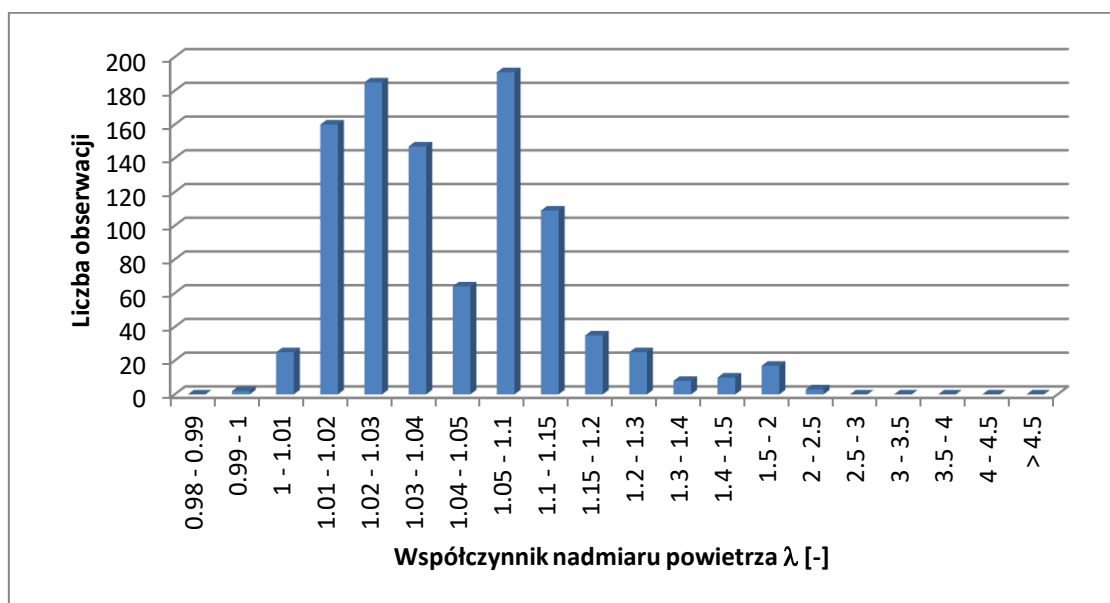
Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w fazie Extra High cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,0–1,3. Był to przedział, w którym odnotowano 287 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 89% wszystkich obserwacji.



Rys. 5.7. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS URBAN – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

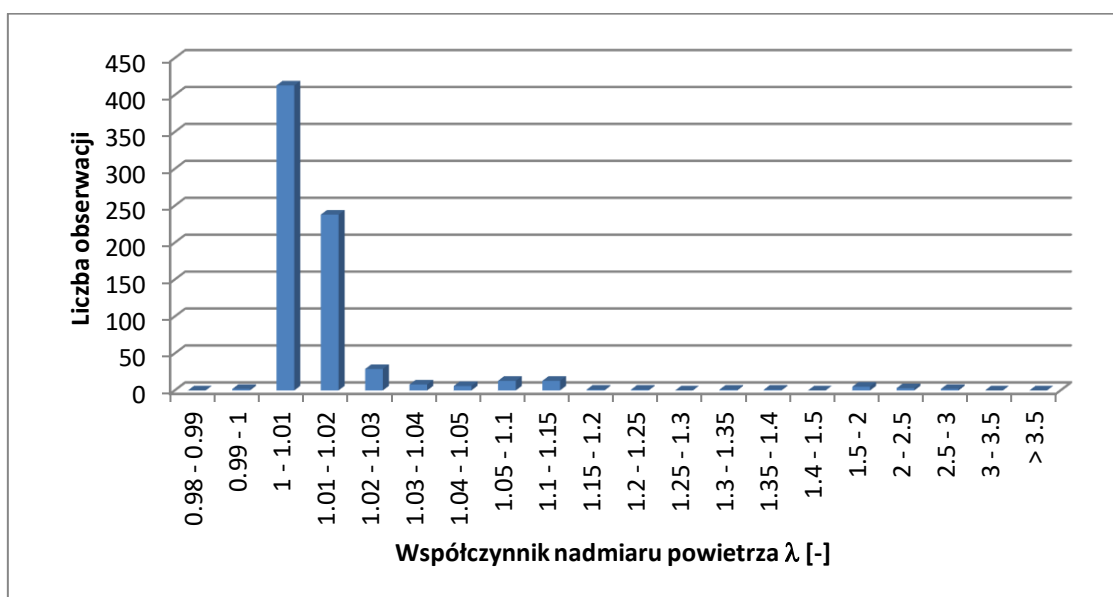
Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w cyklu ARTEMIS URBAN najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,0–1,3. W tym przedziale średnio odnotowywano ok. 50 obserwacji z widoczną zwiększoną ich liczbą w zakresie 1,05–1,15, w którym to zakresie średnia wynosiła ok. 200 obserwacji. W przedziale 1,0–1,3 odnotowano łącznie 842 obserwacje, a w zakresie 1,05–1,15 łącznie 440 obserwacji. Łączny udział

wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tych przedziałach odpowiednio 91% oraz 48% wszystkich obserwacji.



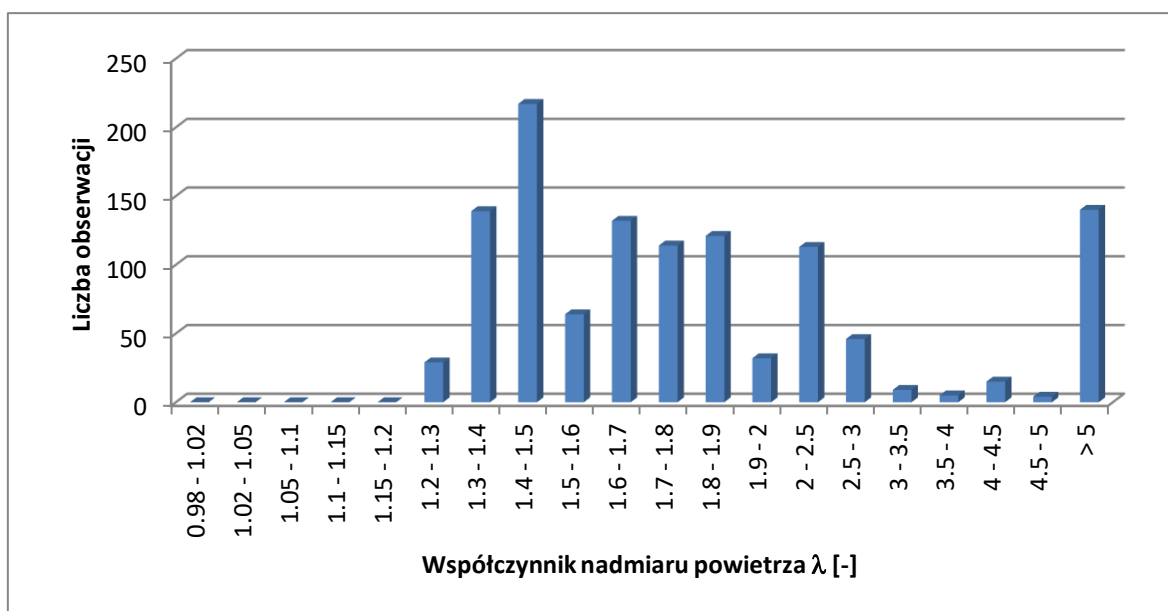
Rys. 5.8. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS ROAD – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w cyklu ARTEMIS ROAD najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,01–1,15. Był to przedział, w którym odnotowano 856 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 87% wszystkich obserwacji.



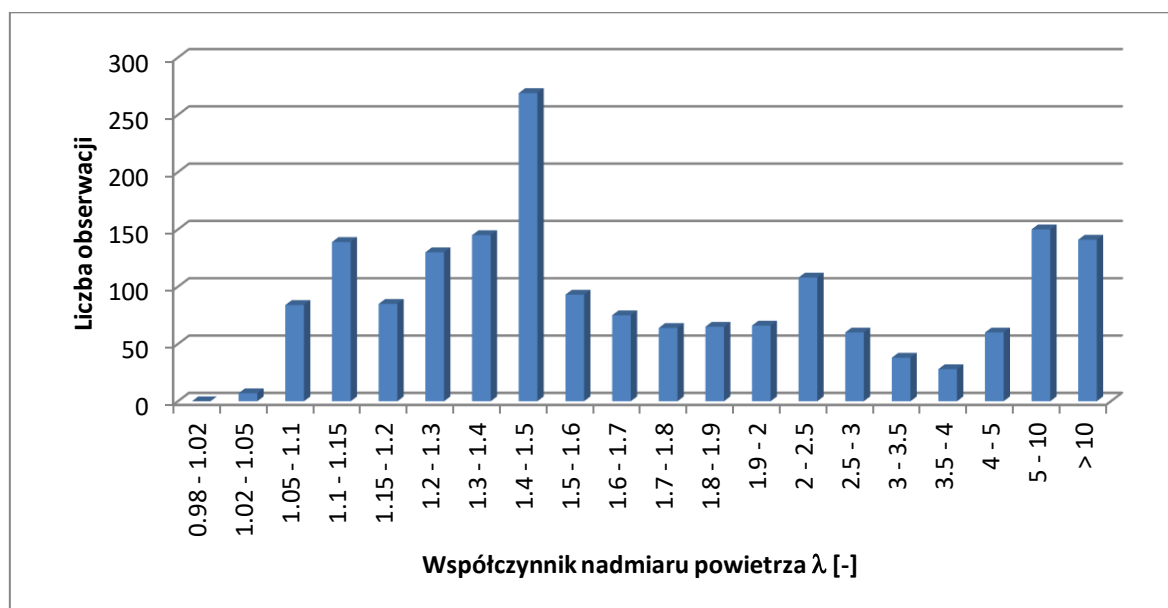
Rys. 5.9. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS MOTORWAY – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP w cyklu ARTEMIS MOTORWAY najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,00–1,02. Był to przedział, w którym odnotowano 651 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 88% wszystkich obserwacji.



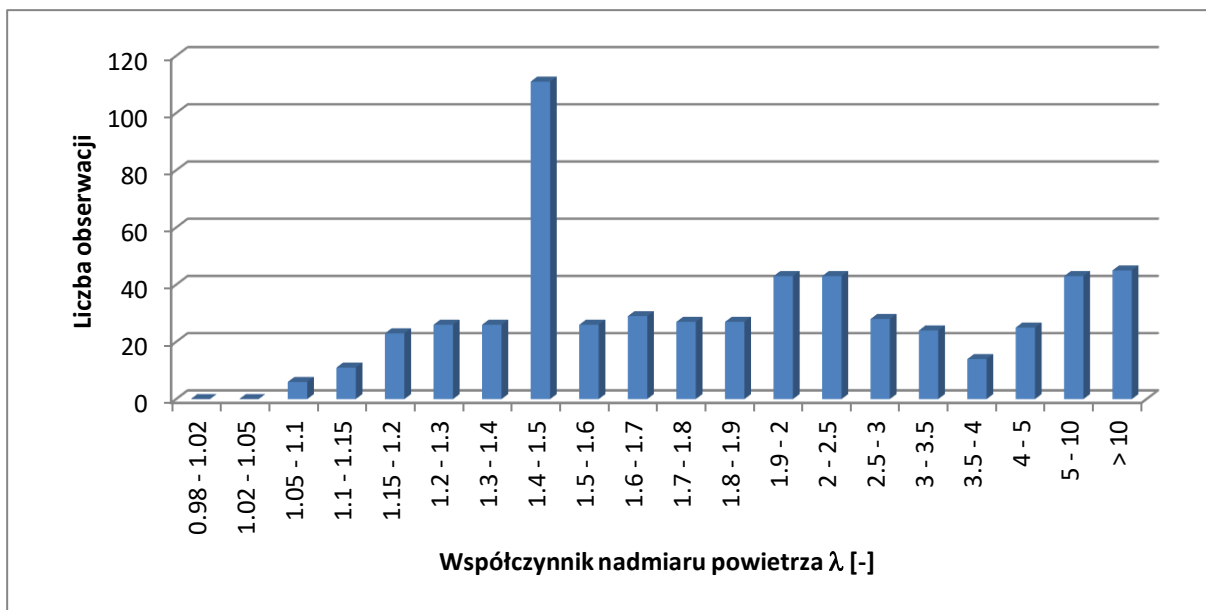
Rys. 5.10. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu NEDC – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w teście NEDC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,3–2,5. Był to przedział, w którym odnotowano 932 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 79% wszystkich obserwacji.



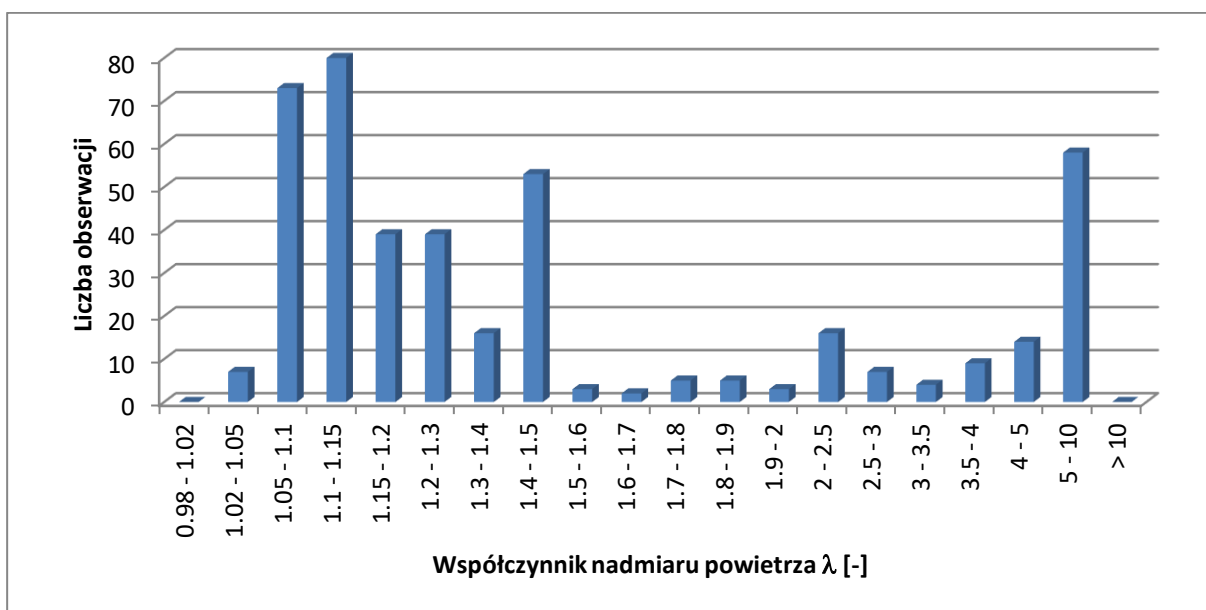
Rys. 5.11. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w teście WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,05–2,0. Był to przedział, w którym odnotowano 1215 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 68% wszystkich obserwacji.



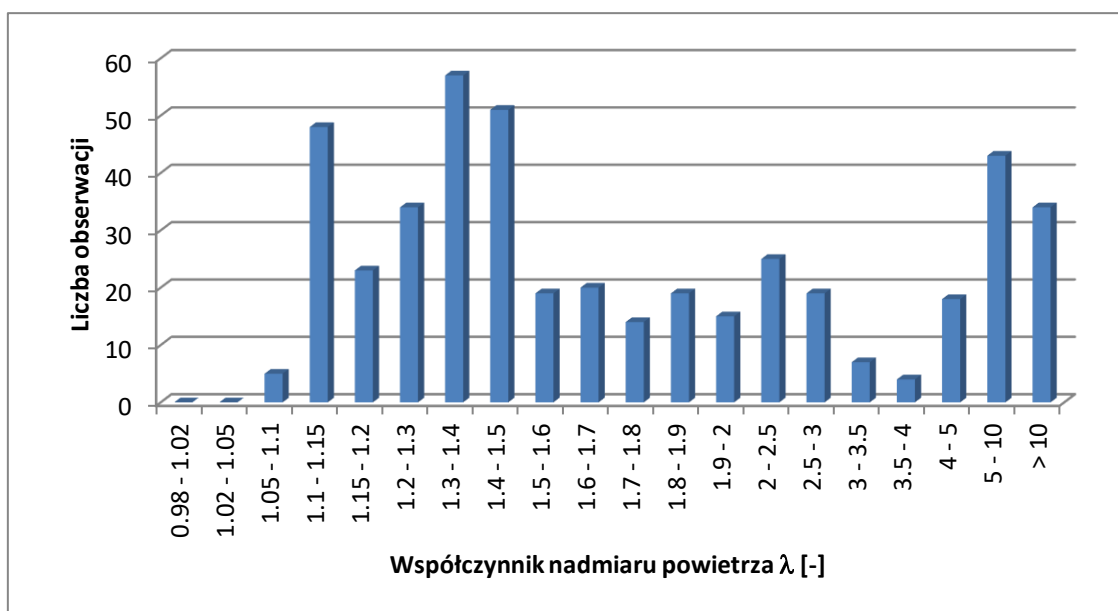
Rys. 5.12. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Low₃ cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w fazie Low₃ cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,15–2,0 z przedziałem 1,4–1,5 o wyraźnie większej liczbie obserwacji niż w pozostałych. Były to przedziały, w których odnotowano odpowiednio 338 oraz 111 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tych przedziałach 59% oraz 19% wszystkich obserwacji.



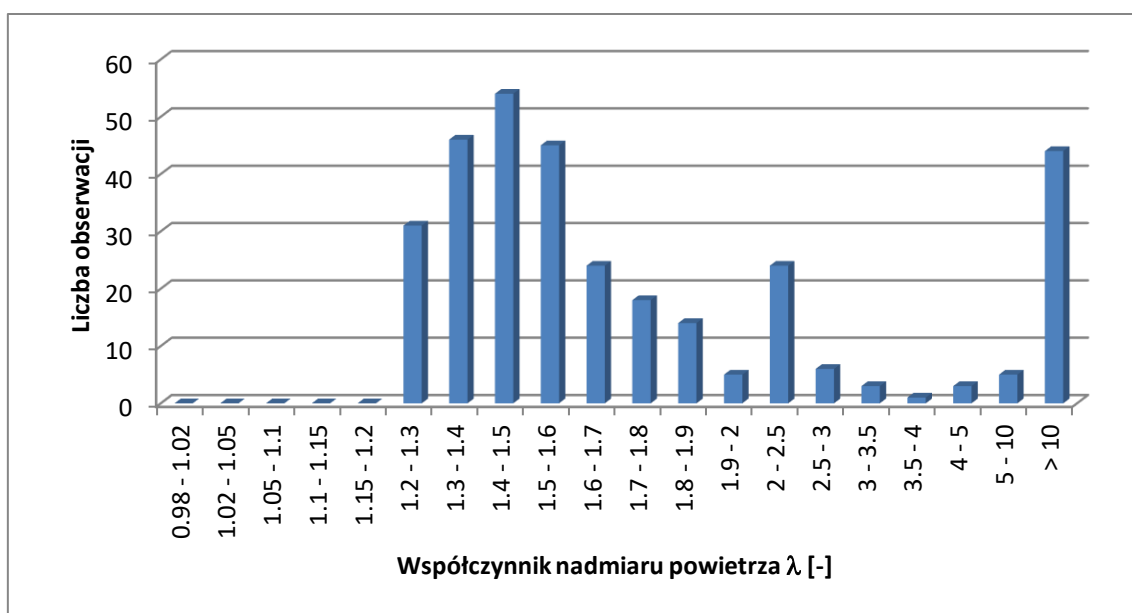
Rys. 5.13. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Medium cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w fazie Medium cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,05–1,50. Był to przedział, w którym odnotowano 300 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 69% wszystkich obserwacji.



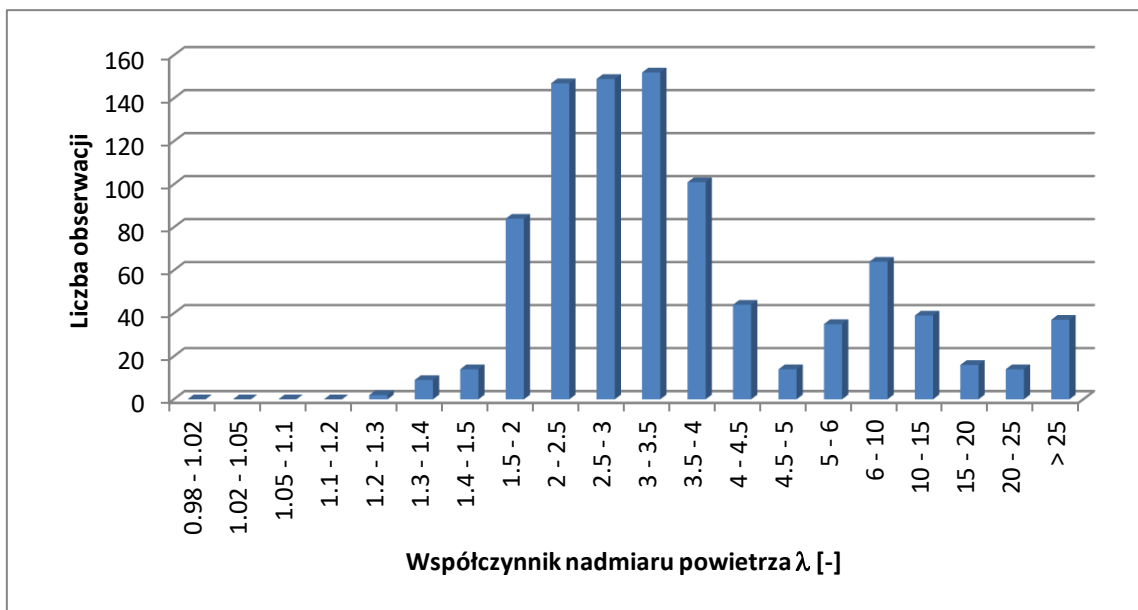
Rys. 5.14. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie High cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w fazie High cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,1–2,0. Był to przedział, w którym odnotowano 300 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 66% wszystkich obserwacji.



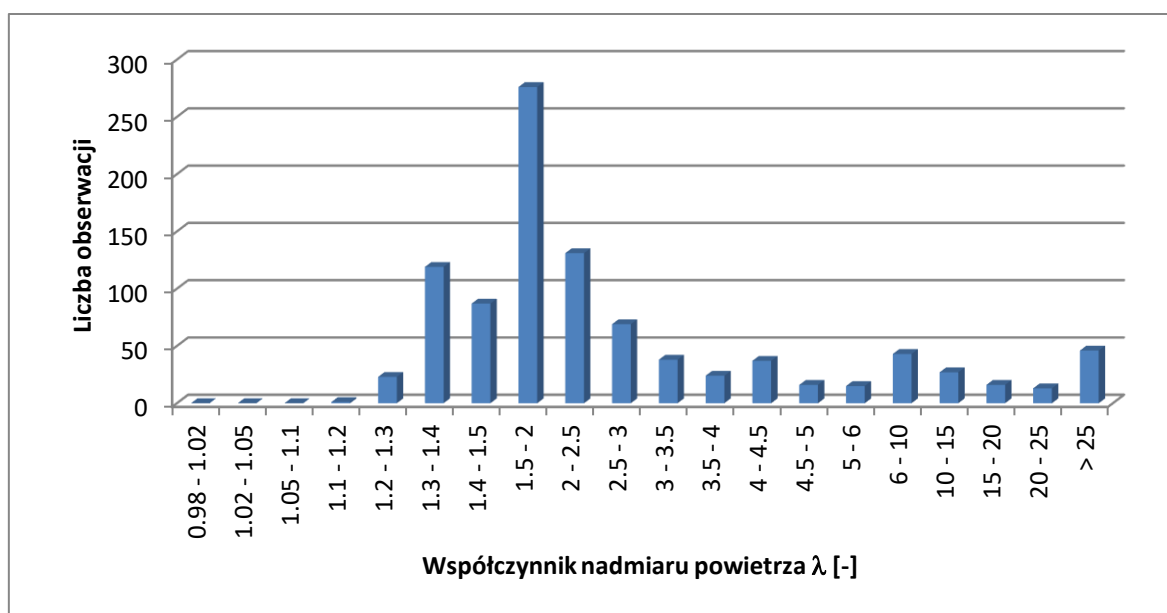
Rys. 5.15. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Extra High cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w fazie Extra High cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,2–1,9. Był to przedział, w którym odnotowano 232 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 72% wszystkich obserwacji.



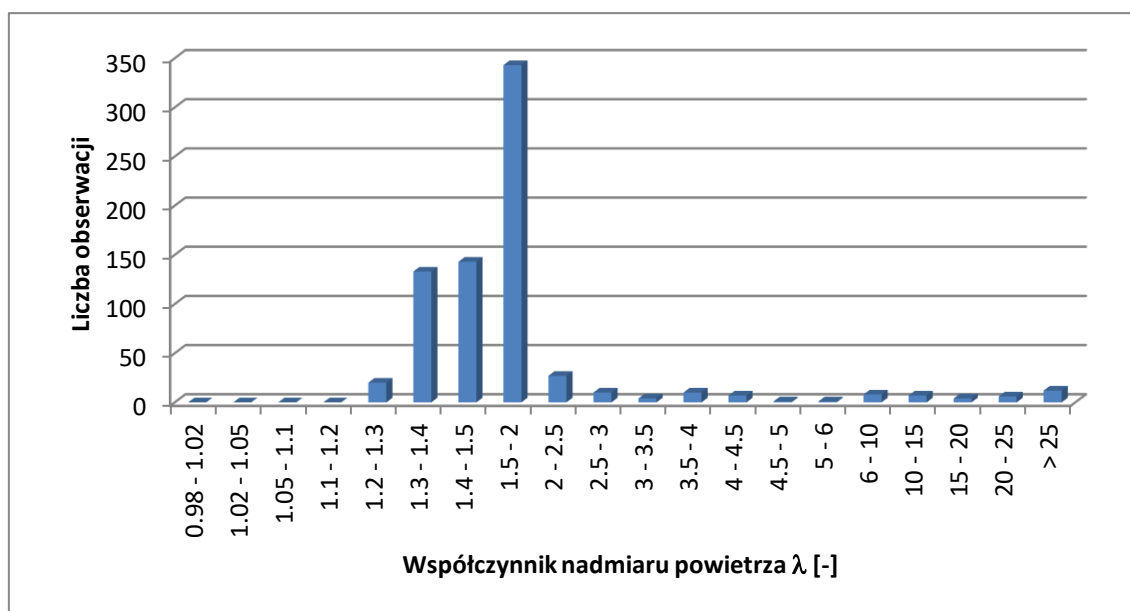
Rys. 5.16. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS URBAN – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w cyklu ARTEMIS URBAN najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,5–4,0. Był to przedział, w którym odnotowano 633 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 69% wszystkich obserwacji.



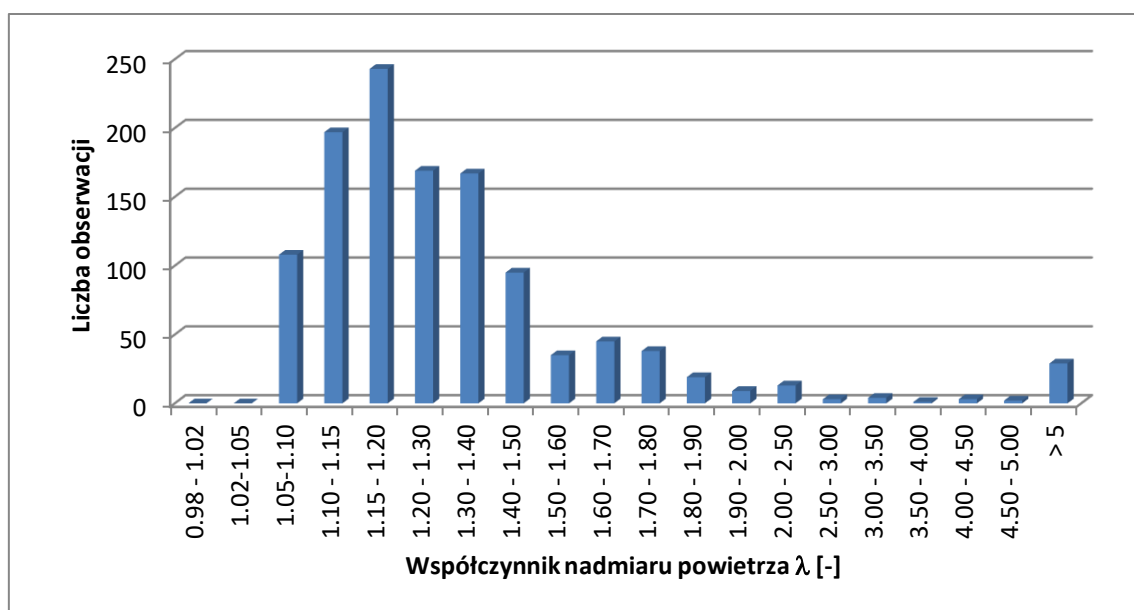
Rys. 5.17. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS ROAD – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w cyklu ARTEMIS ROAD najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,3–2,0. Był to przedział, w którym odnotowano 482 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 49% wszystkich obserwacji.



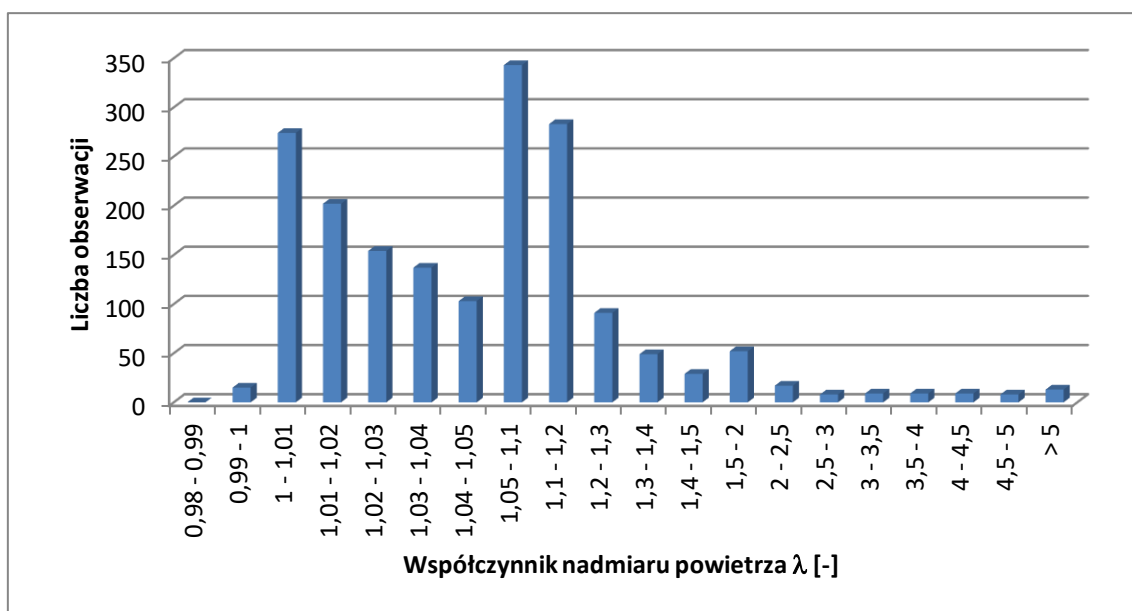
Rys. 5.18. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS MOTORWAY – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 w cyklu ARTEMIS MOTORWAY najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,3–2,0. Był to przedział, w którym odnotowano 619 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 84% wszystkich obserwacji.



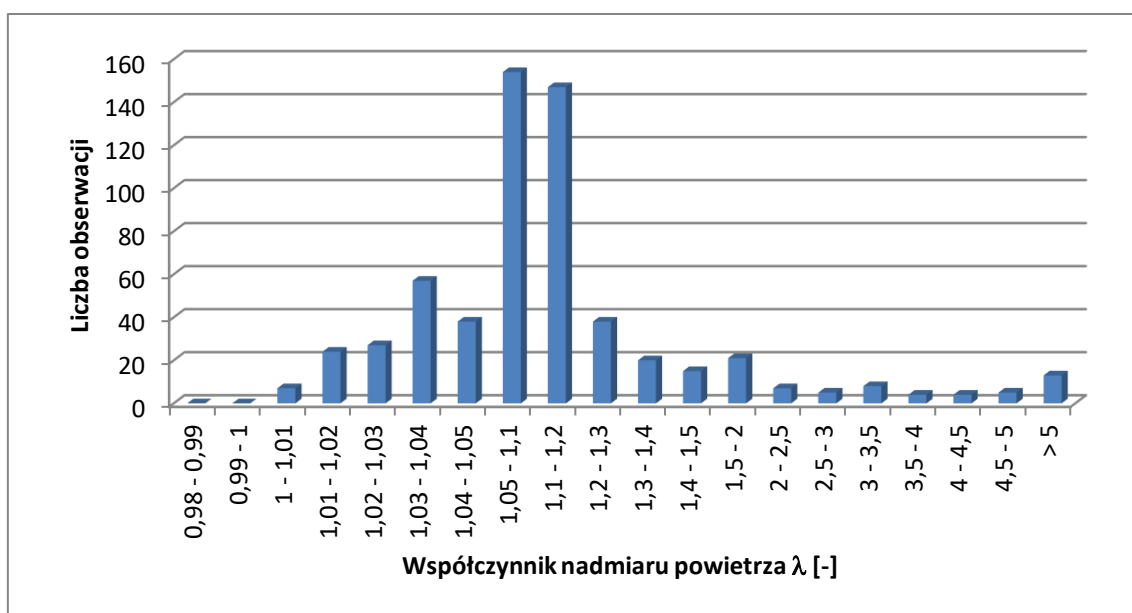
Rys. 5.19. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu NEDC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w teście NEDC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,05–1,50. Był to przedział, w którym odnotowano 979 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 83% wszystkich obserwacji.



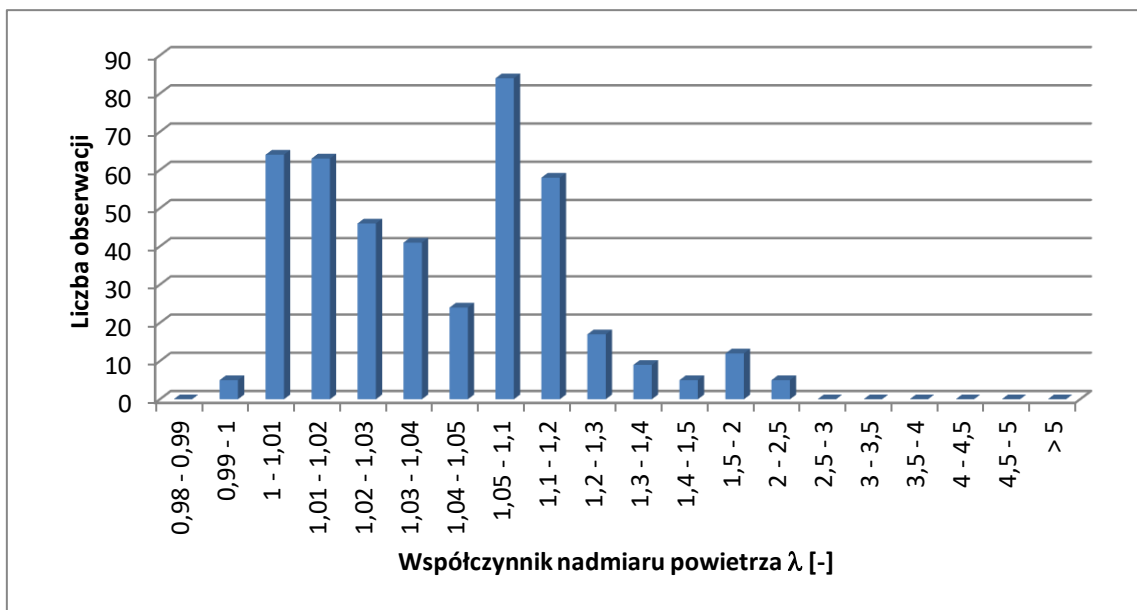
Rys. 5.20. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w teście WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,0–1,3. Był to przedział, w którym odnotowano 1587 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 88% wszystkich obserwacji.



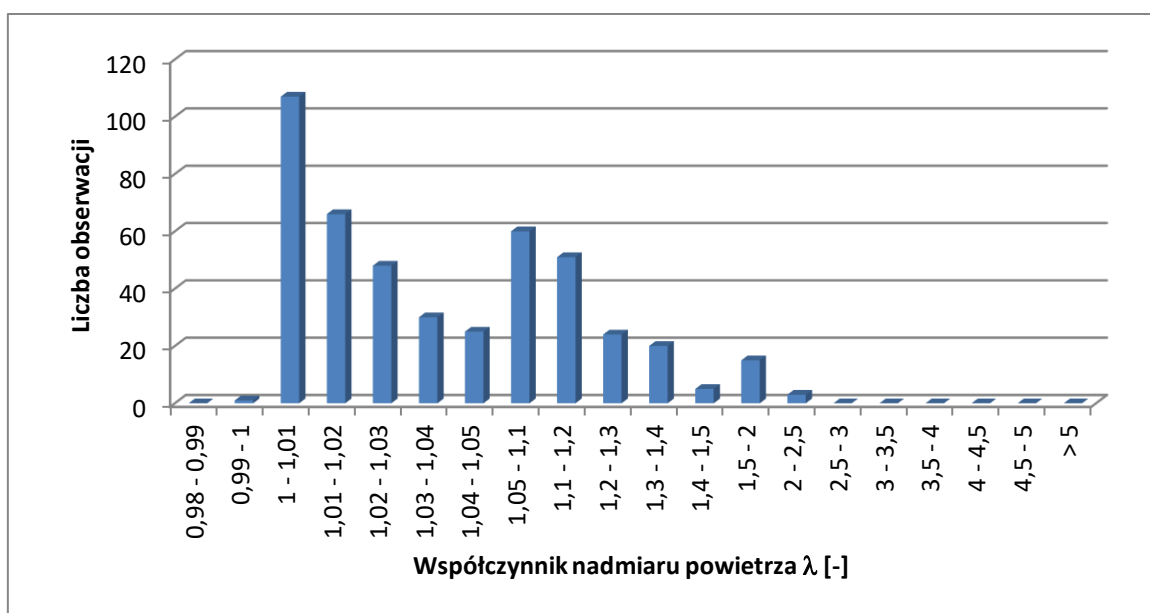
Rys. 5.21. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Low cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w fazie Low cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,01–1,30. Był to przedział, w którym odnotowano 485 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 82% wszystkich obserwacji.



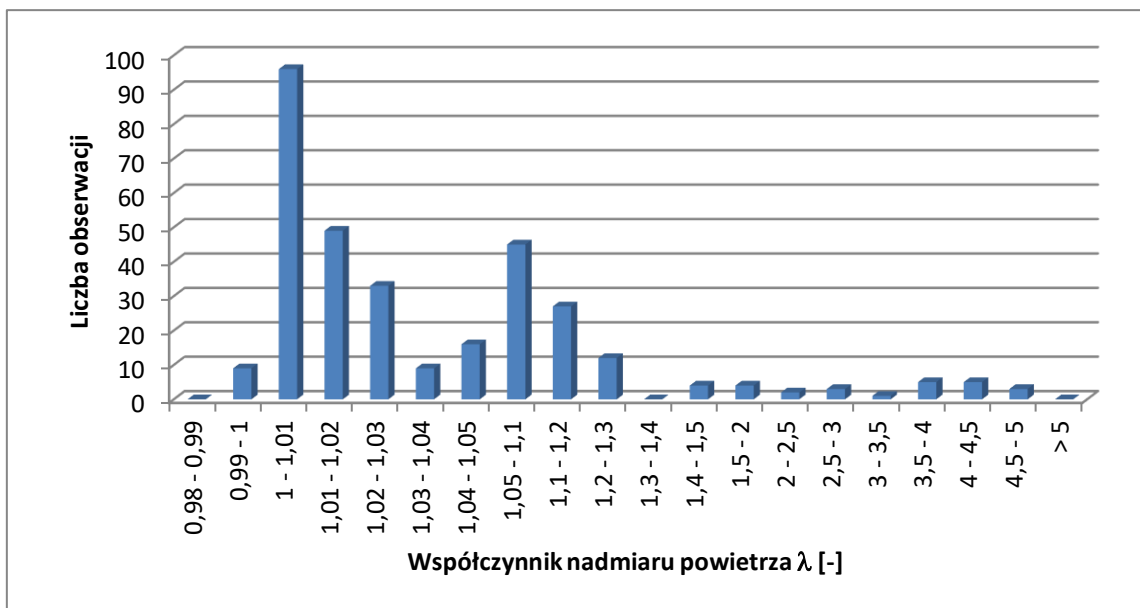
Rys. 5.22. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Medium cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w fazie Medium cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,0–1,2. Był to przedział, w którym odnotowano 380 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 88% wszystkich obserwacji.



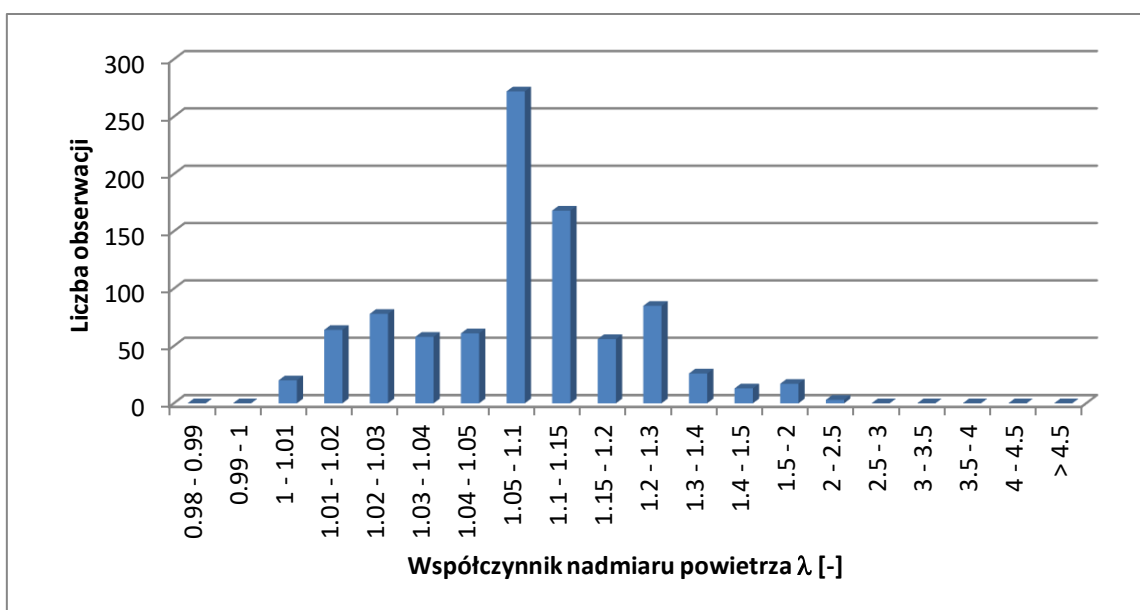
Rys. 5.23. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie High cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w fazie High cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,0–1,2. Był to przedział, w którym odnotowano 387 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 85% wszystkich obserwacji.



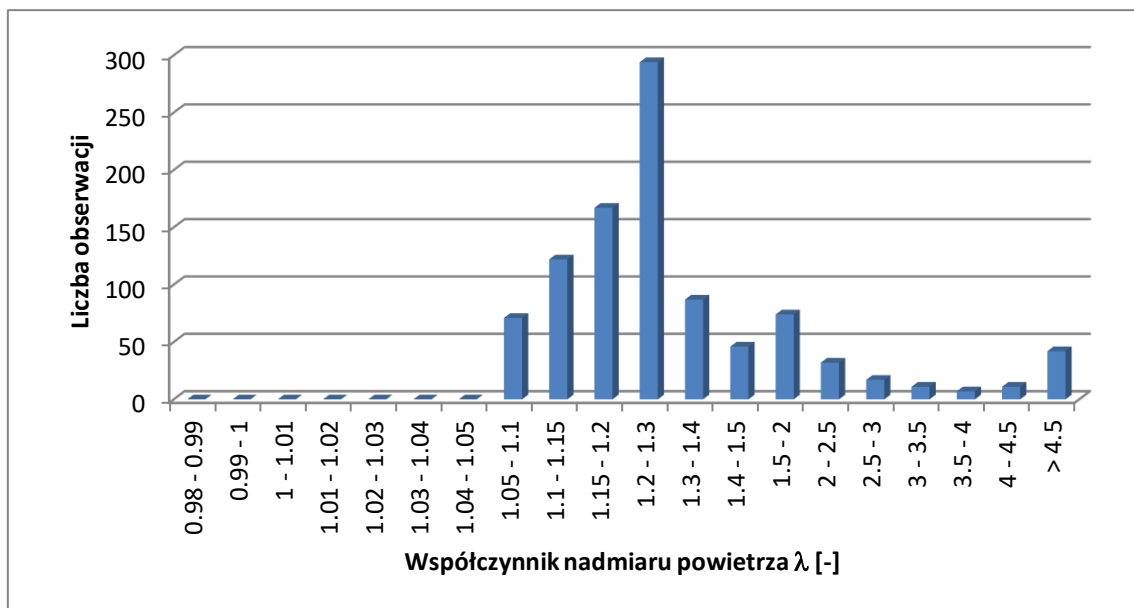
Rys. 5.24. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w fazie Extra High cyklu WLTC – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w fazie Extra High cyklu WLTC najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,0–1,2. Był to przedział, w którym odnotowano 275 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 85% wszystkich obserwacji.



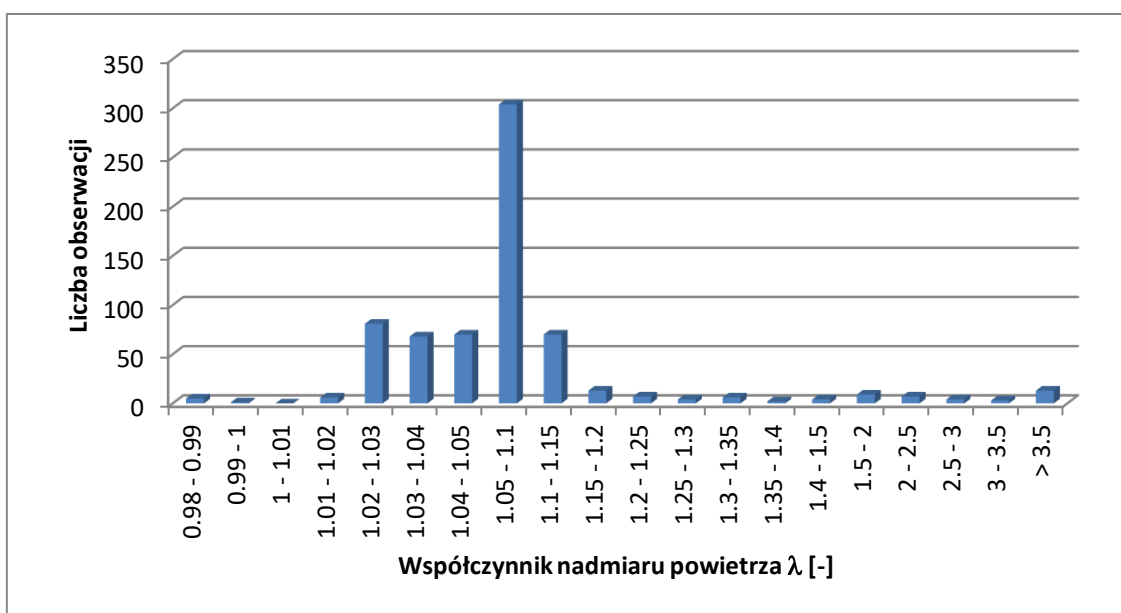
Rys. 5.25. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS URBAN – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w cyklu ARTEMIS URBAN najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,01–1,3. Był to przedział, w którym odnotowano 842 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 91% wszystkich obserwacji.



Rys. 5.26. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS ROAD – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w cyklu ARTEMIS ROAD najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,05–1,4. Był to przedział, w którym odnotowano 741 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 76% wszystkich obserwacji.



Rys. 5.27. Histogram współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu ARTEMIS MOTORWAY – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

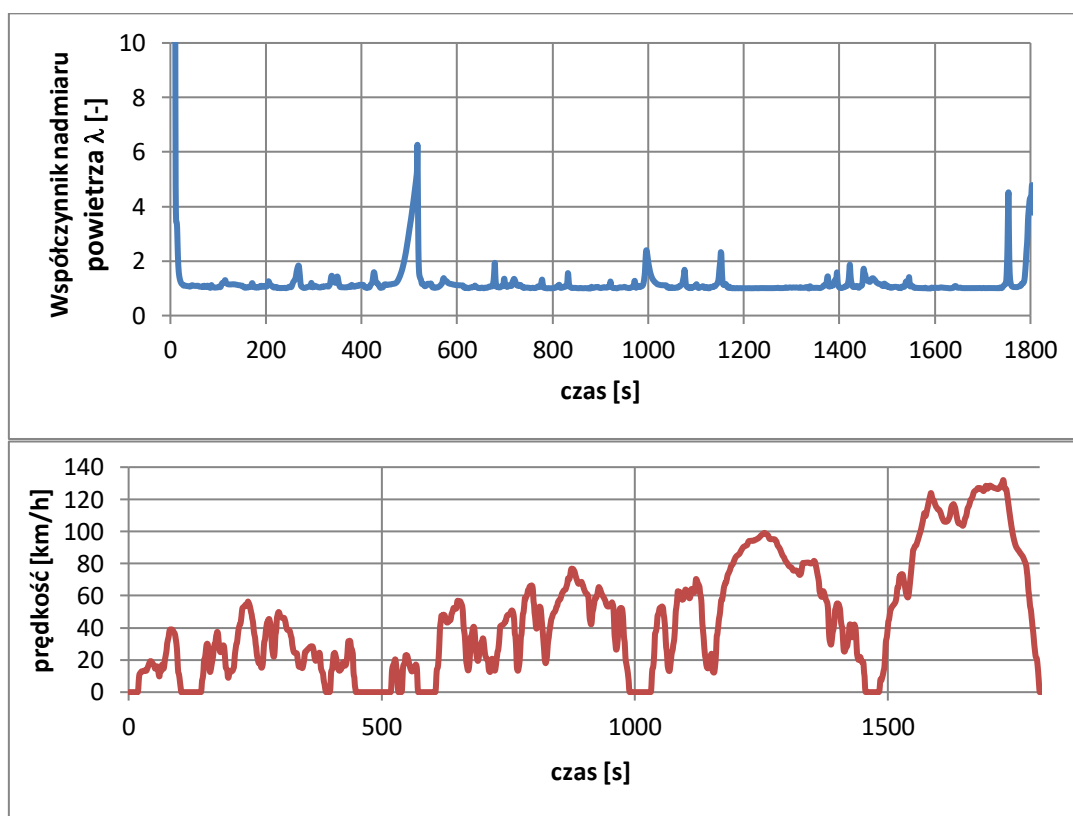
Współczynnik nadmiaru powietrza dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC w cyklu ARTEMIS MOTORWAY najczęściej przyjmuje wartości z zakresu 1,02–1,15. Był to przedział, w którym odnotowano 593 obserwacji, a łączny udział wartości współczynnika nadmiaru powietrza wyniósł w tym przedziale 88% wszystkich obserwacji.

W tabeli 5.1 zamieszczono medianę współczynnika λ.

Tabela 5.1. Mediana współczynnika λ w cyklach NEDC, WLTC i ARTEMIS

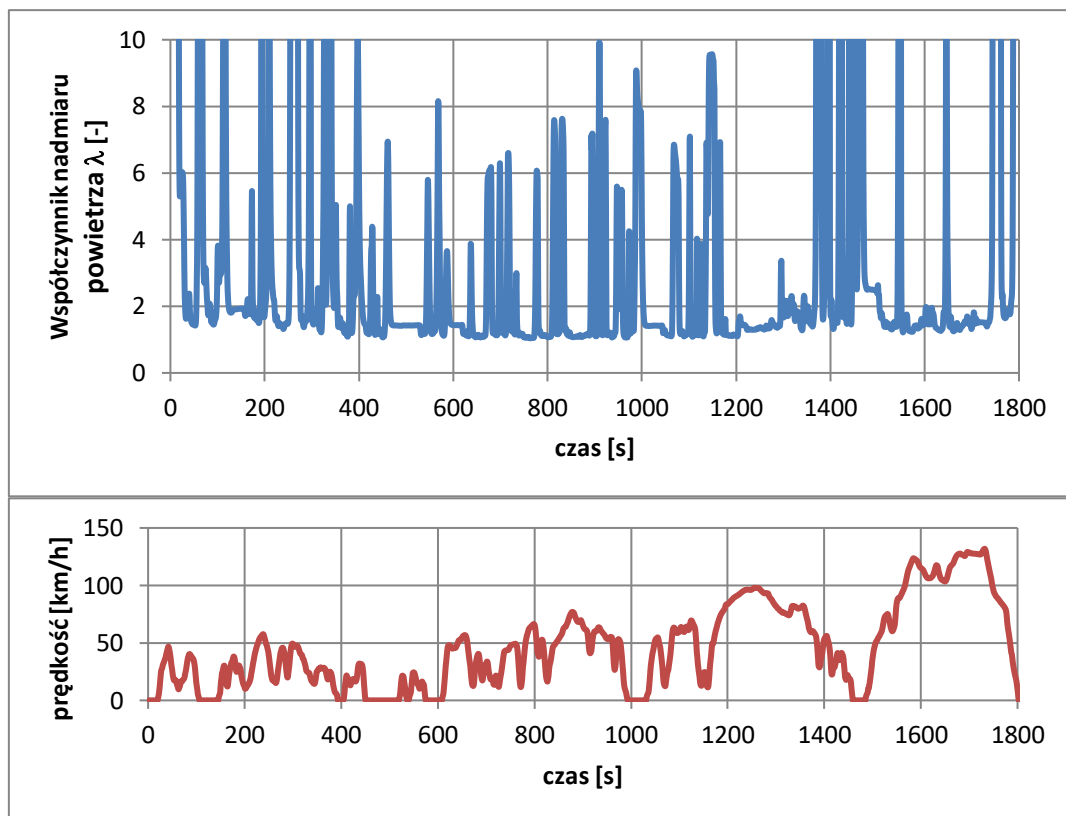
Cykl	ZI, wtrysk pośredni, Euro 6 NEDC	ZI, wtrysk bezpośredni, Euro 6 WLTP	ZS, common rail, Euro 5
Miejski NEDC	1,424	1,225	1,746
Pozamiejski NEDC	1,356	1,198	1,617
WLTC Low	1,378	1,094	1,809
WLTC Medium	1,211	1,039	1,230
WLTC High	1,191	1,031	1,551
WLTC Extra High	1,127	1,022	1,532
ARTEMIS URBAN	1,422	1,081	3,307
ARTEMIS ROAD	1,237	1,038	1,959
ARTEMIS MOTORWAY	1,060	1,010	1,535

Na rysunkach 5.28 i 5.29 przedstawiono przykładowe przebiegi chwilowych wartości współczynnika λ dla cyklu WLTC dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP oraz samochodu z silnikiem ZS, Euro 5.



Rys. 5.28. Przebieg współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu WLTC po rozruchu zimnego silnika – samochód z silnikiem ZI, Euro 6

Z analizy danych wynika, że występują fazy zwiększania się wartości współczynnika λ powyżej wartości odpowiadających granicy zapalności mieszanki. Występuje to podczas faz hamowania silnikiem, w których następuje odcinanie dawki paliwa, co prowadzi do stopniowego zmniejszania się stężeń dwutlenku węgla, węglowodorów i tlenku azotu oraz zwiększania się stężenia tlenu w układzie wylotowym.



Rys. 5.29. Przebieg współczynnika nadmiaru powietrza w cyklu WLTC po rozruchu zimnego silnika – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

5.2. Stopień rozcieńczenia spalin

Dla każdej fazy cykli jezdnych został obliczony stopień rozcieńczenia DR zgodnie z równaniem (4.32). Stężenie $C_{CO_2,CVS}$, $C_{CO_2,sp}$ i $C_{CO_2,roz}$ zostały obliczone jako średnia wartość chwilowego stężenia CO_2 w rozcieńczonych spalinach, spalinach surowych oraz w powietrzu rozcieńczającym. Wartości stopnia rozcieńczenia DR porównano z wartością współczynnika rozcieńczenia DF obliczonego zgodnie z zależnością (2.8). Wyniki obliczeń zamieszczono w tabelach 5.2–5.4. W tabelach tych podano również względną różnicę procentową między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR obliczoną zgodnie z równaniem (5.2):

$$\Delta_{DF} = \frac{DF-DR}{DR} \times 100\% \quad (5.2)$$

Tabela 5.2. Stopień rozcieńczenia DR i współczynnik rozcieńczenia DF w poszczególnych fazach cykli jezdnych NEDC, WLTC i ARTEMIS – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Cykl	DR	DF	Δ_{DF}
Miejski NEDC	15,37	18,89	22,9%
Pozamiejski NEDC	17,45	12,69	-27,3%
WLTC Low	18,70	22,54	20,5%
WLTC Medium	13,22	13,93	5,4%
WLTC High	12,71	13,74	8,1%
WLTC Extra High	7,89	8,44	7,0%
ARTEMIS URBAN	22,23	23,85	7,3%
ARTEMIS ROAD	11,34	12,90	13,8%
ARTEMIS MOTORWAY	4,71	4,50	-4,5%

Tabela 5.3. Stopień rozcieńczenia DR i współczynnik rozcieńczenia DF w poszczególnych fazach cykli jezdnych NEDC, WLTC i ARTEMIS – samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Cykl	DR	DF	Δ_{DF}
Miejski NEDC	21,86	23,68	8,3%
Pozamiejski NEDC	17,45	19,14	9,7%
WLTC Low	34,20	32,07	-6,2%
WLTC Medium	22,59	20,32	-10,0%
WLTC High	20,37	18,51	-9,1%
WLTC Extra High	14,17	13,55	-4,4%
ARTEMIS URBAN	31,17	29,10	-6,6%
ARTEMIS ROAD	24,01	18,50	-22,9%
ARTEMIS MOTORWAY	8,32	7,04	-15,4%

Tabela 5.4. Stopień rozcieńczenia DR i współczynnik rozcieńczenia DF w poszczególnych fazach cykli jezdnych NEDC, WLTC i ARTEMIS – samochód z silnikiem ZS, Euro 5

Cykl	DR	DF	Δ_{DF}
Miejski NEDC	10,94	19,42	77,5%
Pozamiejski NEDC	8,17	13,05	59,7%
WLTC Low	12,18	21,27	74,6%
WLTC Medium	7,94	10,19	28,3%
WLTC High	9,26	13,99	51,1%
WLTC Extra High	6,82	10,84	58,9%
ARTEMIS URBAN	9,28	24,79	167,1%
ARTEMIS ROAD	8,70	14,22	63,4%
ARTEMIS MOTORWAY	5,12	7,06	37,9%

Dla samochodu z silnikiem ZI o klasie emisji Euro 6 NEDC stopień rozcieńczenia DR wyznaczony w fazie miejskiej cyklu NEDC oraz cyklach WLTC, ARTEMIS URBAN i ARTEMIS ROAD jest mniejszy od współczynnika rozcieńczenia DF . Względna różnica procentowa między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR zawiera się w przedziale od 5,4% do 22,9%. Tylko w fazie pozamiejskiej cyklu NEDC oraz w cyklu ARTEMIS MOTORWAY stopień rozcieńczenia DR jest większy od współczynnika rozcieńczenia DF , a różnica względna wynosi odpowiednio -27,3% oraz -4,5%.

Dla samochodu z silnikiem ZI o klasie emisji Euro 6 WLTP stopień rozcieńczenia DR wyznaczony w cyklach WLTC, ARTEMIS URBAN, ARTEMIS ROAD i ARTEMIS MOTORWAY jest większy od współczynnika rozcieńczenia DF . Względna różnica procentowa między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR zawiera się w przedziale od -22,9% do -4,4%. Natomiast w obu fazach cyklu NEDC stopień rozcieńczenia DR jest mniejszy od współczynnika rozcieńczenia DF , a różnica względna wynosi ok. 9%.

Największe różnice pomiędzy stopniem rozcieńczenia DR a współczynnikiem rozcieńczenia DF występują dla samochodu z silnikiem ZS o klasie emisji Euro 5. W przypadku tego pojazdu stopień rozcieńczenia DR jest mniejszy od współczynnika rozcieńczenia DF we wszystkich cyklach jezdnych, a względna różnica procentowa między tymi dwoma wielkościami zawiera się w przedziale od 28,3% do 167,1%.

5.3. Stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym

Wartość współczynnika rozcieńczenia DF wykorzystywana jest do obliczenia stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym. W związku z tym błąd w wyznaczeniu współczynnika DF może wpływać na błąd w obliczaniu wartości tego stężenia. W celu oszacowania tego błędu dla każdego badanego pojazdu obliczono stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym. W tabelach 5.5–5.19 przedstawiono wyniki obliczeń wartości tych stężeń poszczególnych zanieczyszczeń obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7). W tabelach tych podano również względną procentową różnicę tego stężenia wynikającą z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR .

Tabela 5.5. Stężenie CO₂ [%] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla Samochodu Euro 5 wyposażonego w silnik ZS

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{CVS,DR}^C$	DF	$C_{CVS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	0,695	0,047	10,94	0,652	19,42	0,650	0,29%
Pozamiejski NEDC	1,034	0,053	8,17	0,987	13,05	0,985	0,25%
WLTC, Low	0,632	0,051	12,18	0,585	21,27	0,583	0,31%
WLTC, Medium	1,323	0,062	7,94	1,269	10,19	1,267	0,14%
WLTC, High	0,964	0,087	9,26	0,886	13,99	0,883	0,36%
WLTC Extra High	1,244	0,105	6,82	1,154	10,84	1,149	0,50%
ARTEMIS URBAN	0,544	0,061	9,28	0,490	24,79	0,485	0,85%
ARTEMIS ROAD	0,949	0,058	8,70	0,898	14,22	0,895	0,29%
ARTEMIS MOTORWAY	1,911	0,075	5,12	1,851	7,06	1,847	0,22%

Dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 procentowa różnica względna stężenia CO₂ w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest, pomimo dużej wartości względnej różnicy procentowej między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR , bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od 0,14% do 0,85%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem CO₂ w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (patrz rys. 4.3).

Tabela 5.6. Stężenie CO [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 5 wyposażonego w silnik ZS

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{CVS,DR}^C$	DF	$C_{CVS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	0,104	0,243	10,94	-0,117	19,42	-0,126	-7,67%
Pozamiejski NEDC	0,053	0,271	8,17	-0,185	13,05	-0,197	-6,29%
WLTC, Low	17,638	0,625	12,18	17,064	21,27	17,042	0,13%
WLTC, Medium	3,511	0,672	7,94	2,924	10,19	2,905	0,64%
WLTC, High	0,423	0,640	9,26	-0,148	13,99	-0,171	-13,65%
WLTC Extra High	0,309	0,529	6,82	-0,142	10,84	-0,171	-16,80%
ARTEMIS URBAN	0,234	0,172	9,28	0,081	24,79	0,069	16,82%
ARTEMIS ROAD	1,150	-0,402	8,70	1,506	14,22	1,524	-1,18%
ARTEMIS MOTORWAY	-0,528	-0,172	5,12	-0,390	7,06	-0,380	2,43%

Dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 procentowa różnica względna stężenia CO w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR zawiera się w przedziale od $-16,80\%$ do $16,82\%$ pomimo, że względna różnica procentowa między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR ma wartości dodatnie. Wynika to przede wszystkim z bardzo niskiej emisji tego zanieczyszczenia. W cyklach NEDC, ARTEMIS URBAN i ARTEMIS MOTORWAY oraz fazach High i Extra High cyklu WLTC zmierzone stężenie CO w rozcieńczonych spalinach jest mniejsze od stężenia tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym. Jest to spowodowane nieuwzględnianiem w obliczeniach faktu, że powietrze dolotowe, tak jak powietrze rozcieńczające, również zawiera mierzone zanieczyszczenie. W przypadku cyklu ARTEMIS ROAD oraz faz Low i Medium cyklu WLTC, stężenie zmierzone w rozcieńczonych spalinach jest większe od stężenia w powietrzu rozcieńczającym, ale z powodu zarówno dużej różnicy wartości tych stężeń jak i małej wartości stężenia w powietrzu rozcieńczającym, różnica względna wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest mała i dla tych cykli zawiera się w przedziale od $-1,18\%$ do $0,64\%$.

Tabela 5.7. Stężenie NO_x [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 5 wyposażonego w silnik ZS

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{cvS,DR}^C$	DF	$C_{cvS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	6,265	0,082	10,94	6,190	19,42	6,187	0,05%
Pozamiejski NEDC	16,476	0,182	8,17	16,316	13,05	16,308	0,05%
WLTC, Low	6,678	0,097	12,18	6,589	21,27	6,586	0,05%
WLTC, Medium	20,761	0,237	7,94	20,554	10,19	20,547	0,03%
WLTC, High	17,042	0,615	9,26	16,493	13,99	16,471	0,14%
WLTC Extra High	37,803	1,000	6,82	36,950	10,84	36,895	0,15%
ARTEMIS URBAN	22,470	0,554	9,28	21,976	24,79	21,938	0,17%
ARTEMIS ROAD	34,035	0,511	8,70	33,583	14,22	33,560	0,07%
ARTEMIS MOTORWAY	87,032	1,021	5,12	86,210	7,06	86,156	0,06%

Dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 procentowa różnica względna stężenia NO_x w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest, pomimo dużej wartości względnej różnicy procentowej między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR , bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od $0,03\%$ do $0,17\%$. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem NO_x w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (rys. 4.3).

Dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 procentowa różnica względna stężenia THC w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest:

- mała w przypadku faz Low, Medium i High cyklu WLTC i zawiera się w przedziale od $0,9\%$ do $2,1\%$,
- duża w przypadku pozostałych cykli jezdnych (zawiera się w przedziale od $8,8\%$ do $96,1\%$).

Tabela 5.8. Stężenie THC [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 5 wyposażonego w silnik ZS

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{cvS,DR}^C$	DF	$C_{cvS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	3,689	3,078	10,94	0,892	19,42	0,769	16,0%
Pozamiejski NEDC	3,082	3,063	8,17	0,394	13,05	0,254	55,3%
WLTC, Low	10,603	2,951	12,18	7,894	21,27	7,791	1,3%
WLTC, Medium	12,784	3,079	7,94	10,093	10,19	10,007	0,9%
WLTC, High	8,638	3,243	9,26	5,745	13,99	5,627	2,1%
WLTC Extra High	5,005	3,282	6,82	2,204	10,84	2,026	8,8%
ARTEMIS URBAN	3,649	3,064	9,28	0,915	24,79	0,709	29,2%
ARTEMIS ROAD	3,351	3,433	8,70	0,313	14,22	0,159	96,1%
ARTEMIS MOTORWAY	3,564	3,477	5,12	0,766	7,06	0,579	32,2%

W pierwszym przypadku spowodowane jest to większą różnicą między wartością stężenia THC w rozcieńczonych spalinach i powietrzu rozcieńczającym, natomiast w drugim przypadku z powodu tego, że wartości te są do siebie zbliżone oraz wartość stężenia THC w powietrzu rozcieńczającym jest znacznie większa od zera.

Tabela 5.9. Stężenie CH_4 [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 5 wyposażonego w silnik ZS

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{cvS,DR}^C$	DF	$C_{cvS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	2,459	2,064	10,94	0,584	19,42	0,501	16,4%
Pozamiejski NEDC	2,178	2,062	8,17	0,368	13,05	0,274	34,4%
WLTC, Low	4,825	1,901	12,18	3,080	21,27	3,013	2,2%
WLTC, Medium	8,463	1,980	7,94	6,732	10,19	6,677	0,8%
WLTC, High	4,544	2,089	9,26	2,681	13,99	2,604	2,9%
WLTC Extra High	1,920	2,087	6,82	0,139	10,84	0,026	444,6%
ARTEMIS URBAN	2,019	1,968	9,28	0,263	24,79	0,130	101,8%
ARTEMIS ROAD	2,258	2,267	8,70	0,252	14,22	0,150	67,2%
ARTEMIS MOTORWAY	1,797	2,239	5,12	-0,005	7,06	-0,125	-96,2%

Dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 procentowa różnica względna stężenia CH_4 w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest:

- mała w przypadku faz Low, Medium i High cyklu WLTC i zawiera się w przedziale od 0,8% do 2,9%,
- duża w przypadku cyklu NEDC (zawiera się w przedziale od 16,4% do 34,4%),
- bardzo duża w przypadku pozostałych cykli jezdnych (zawiera się w przedziale od -96,2% do 444,6%).

W pierwszym przypadku spowodowane jest to większą różnicą między wartością stężenia CH_4 w rozcieńczonych spalinach i powietrzu rozcieńczającym, w drugim przypadku z powodu tego, że wartości te są do siebie zbliżone oraz wartość stężenia CH_4 w powietrzu rozcieńczającym jest znacznie większa od zera, natomiast w trzecim z powodu praktycznie zerowej emisji metanu, co prowadzi do otrzymania wartości stężenia CH_4 w rozcieńczonych spalinach mniejszych od wartości stężenia w powietrzu rozcieńczającym.

Tabela 5.10. Stężenie CO₂ [%] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 NEDC wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{cvS,DR}^C$	DF	$C_{cvS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	0,621	0,048	15,37	0,576	18,89	0,576	0,10%
Pozamiejski NEDC	0,931	0,060	17,45	0,874	12,69	0,876	-0,15%
WLTC, Low	0,586	0,052	18,70	0,537	22,54	0,536	0,09%
WLTC, Medium	0,936	0,059	13,22	0,881	13,93	0,881	0,03%
WLTC, High	0,955	0,072	12,71	0,889	13,74	0,888	0,05%
WLTC Extra High	1,494	0,084	7,89	1,421	8,44	1,420	0,05%
ARTEMIS URBAN	0,556	0,075	22,23	0,484	23,85	0,484	0,05%
ARTEMIS ROAD	1,009	0,066	11,34	0,949	12,90	0,948	0,07%
ARTEMIS MOTORWAY	2,812	0,093	4,71	2,739	4,50	2,740	-0,03%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC procentowa różnica względna stężenia CO₂ w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -0,15% do 0,10%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem CO₂ w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (patrz rys. 4.3).

Tabela 5.11. Stężenie CO [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 NEDC wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{cvS,DR}^C$	DF	$C_{cvS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	63,335	0,828	15,37	62,561	18,89	62,551	0,02%
Pozamiejski NEDC	63,689	1,526	17,45	62,250	12,69	62,283	-0,05%
WLTC, Low	63,109	3,232	18,70	60,050	22,54	60,020	0,05%
WLTC, Medium	250,981	4,015	13,22	247,270	13,93	247,254	0,01%
WLTC, High	193,729	7,381	12,71	186,929	13,74	186,885	0,02%
WLTC Extra High	913,930	14,400	7,89	901,355	8,44	901,236	0,01%
ARTEMIS URBAN	56,401	2,885	22,23	53,646	23,85	53,637	0,02%
ARTEMIS ROAD	280,355	3,496	11,34	277,167	12,90	277,130	0,01%
ARTEMIS MOTORWAY	1598,574	20,821	4,71	1582,174	4,50	1582,380	-0,01%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC procentowa różnica względna stężenia CO w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -0,05% do 0,50%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem CO w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (patrz rys. 4.3).

Tabela 5.12. Stężenie NO_x [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 NEDC wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvs}	C_{roz}	DR	$C_{cvs,DR}^c$	DF	$C_{cvs,DF}^c$	ΔC_{cvs}
Miejski NEDC	3,044	0,033	15,37	3,013	18,89	3,013	0,01%
Pozamiejski NEDC	10,098	0,091	17,45	10,012	12,69	10,014	-0,02%
WLTC, Low	10,849	0,165	18,70	10,693	22,54	10,691	0,01%
WLTC, Medium	8,631	0,292	13,22	8,361	13,93	8,360	0,01%
WLTC, High	8,423	0,419	12,71	8,037	13,74	8,034	0,03%
WLTC Extra High	20,470	0,537	7,89	20,001	8,44	19,997	0,02%
ARTEMIS URBAN	5,819	0,335	22,23	5,499	23,85	5,498	0,02%
ARTEMIS ROAD	11,652	0,347	11,34	11,336	12,90	11,332	0,03%
ARTEMIS MOTORWAY	42,473	0,864	4,71	41,792	4,50	41,801	-0,02%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC procentowa różnica względna stężenia NO_x w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -0,02% do 0,03%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem NO_x w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (patrz rys. 4.3).

Tabela 5.13. Stężenie THC [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 NEDC wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvs}	C_{roz}	DR	$C_{cvs,DR}^c$	DF	$C_{cvs,DF}^c$	ΔC_{cvs}
Miejski NEDC	24,202	3,404	15,37	21,019	18,89	20,978	0,20%
Pozamiejski NEDC	7,074	3,558	17,45	3,720	12,69	3,796	-2,01%
WLTC, Low	21,286	3,534	18,70	17,941	22,54	17,909	0,18%
WLTC, Medium	9,213	3,593	13,22	5,892	13,93	5,878	0,24%
WLTC, High	7,345	3,632	12,71	3,999	13,74	3,977	0,54%
WLTC Extra High	22,567	3,796	7,89	19,252	8,44	19,221	0,16%
ARTEMIS URBAN	5,187	3,502	22,23	1,843	23,85	1,832	0,58%
ARTEMIS ROAD	11,680	3,574	11,34	8,421	12,90	8,383	0,45%
ARTEMIS MOTORWAY	36,964	4,276	4,71	33,596	4,50	33,638	-0,13%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC procentowa różnica względna stężenia THC w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -2,0% do 0,58%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem THC w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (patrz rys. 4.3). Większe wartości procentowej różnicy względnej stężenia THC w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym w porównaniu do tych różnic stwierdzonych dla CO_2 , CO i NO_x spowodowane jest większymi wartościami stężenia THC w powietrzu rozcieńczającym niż dla pozostałych zanieczyszczeń.

Tabela 5.14. Stężenie CH_4 [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 NEDC wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{CVS,DR}^C$	DF	$C_{CVS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	3,356	2,015	15,37	1,472	18,89	1,448	1,7%
Pozamiejski NEDC	2,695	2,046	17,45	0,766	12,69	0,810	-5,4%
WLTC, Low	2,934	1,965	18,70	1,074	22,54	1,056	1,7%
WLTC, Medium	2,876	1,986	13,22	1,040	13,93	1,033	0,7%
WLTC, High	2,666	1,998	12,71	0,825	13,74	0,813	1,5%
WLTC Extra High	4,719	2,016	7,89	2,959	8,44	2,942	0,6%
ARTEMIS URBAN	2,393	2,017	22,23	0,467	23,85	0,461	1,3%
ARTEMIS ROAD	2,977	1,985	11,34	1,167	12,90	1,146	1,9%
ARTEMIS MOTORWAY	6,579	2,027	4,71	4,982	4,50	5,002	-0,4%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC procentowa różnica względna stężenia CH_4 w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -5,4% do 1,9%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem CH_4 w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (patrz rys. 4.3). Większe wartości procentowej różnicy względnej stężenia CH_4 w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym w porównaniu do tych różnic stwierdzonych dla CO_2 , CO i NO_x spowodowane jest większymi wartościami stężenia CH_4 w powietrzu rozcieńczającym niż dla pozostałych zanieczyszczeń.

Tabela 5.15. Stężenie CO_2 [%] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 WLTP wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{CVS,DR}^C$	DF	$C_{CVS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	0,563	0,046	34,43	0,518	23,68	0,519	-0,12%
Pozamiejski NEDC	0,696	0,078	30,00	0,621	19,14	0,622	-0,24%
WLTC, Low	0,409	0,064	34,20	0,347	32,07	0,347	-0,04%
WLTC, Medium	0,656	0,063	22,59	0,596	20,32	0,596	-0,05%
WLTC, High	0,720	0,057	20,37	0,666	18,51	0,666	-0,04%
WLTC Extra High	0,973	0,064	14,17	0,914	13,55	0,914	-0,02%
ARTEMIS URBAN	0,458	0,046	31,17	0,413	29,10	0,414	-0,03%
ARTEMIS ROAD	0,721	0,063	24,01	0,661	18,50	0,661	-0,12%
ARTEMIS MOTORWAY	1,889	0,098	8,32	1,803	7,04	1,805	-0,12%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP procentowa różnica względna stężenia CO_2 w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -0,24% do -0,02%. Wynika to z dużej różnicy między stężeniem CO_2 w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (patrz rys. 4.3).

Tabela 5.16. Stężenie CO [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 WLTP wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{CVS,DR}^C$	DF	$C_{CVS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	15,788	0,405	34,43	15,395	23,68	15,400	-0,03%
Pozamiejski NEDC	32,920	1,461	30,00	31,508	19,14	31,535	-0,09%
WLTC, Low	29,053	1,829	34,20	27,277	32,07	27,281	-0,01%
WLTC, Medium	0,158	1,101	22,59	-0,894	20,32	-0,889	0,61%
WLTC, High	3,564	0,999	20,37	2,614	18,51	2,619	-0,19%
WLTC Extra High	122,537	1,950	14,17	120,725	13,55	120,731	-0,01%
ARTEMIS URBAN	-0,007	0,130	31,17	-0,133	29,10	-0,133	0,22%
ARTEMIS ROAD	25,671	1,610	24,01	24,128	18,50	24,148	-0,08%
ARTEMIS MOTORWAY	123,259	2,444	8,32	121,109	7,04	121,162	-0,04%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP procentowa różnica względna stężenia CO w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -0,19% do -0,01% dla wszystkich cykli oprócz cyklu ARTEMIS URBAN oraz fazy Medium cyklu WLTC. Dla tych dwóch cykli różnica ta jest większa od zera i zawiera się w przedziale od 0,22% do 0,61%. W pierwszej grupie cykli wartość różnicy względnej wynika z dużej różnicy pomiędzy stężeniem CO w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (rys. 4.3). W drugiej grupie większa wartość różnicy względnej wynika z praktycznie zerowej emisji tego zanieczyszczenia w tych cyklach, co powoduje, że stężenie CO w rozcieńczonych spalinach jest mniejsze od stężenia w powietrzu rozcieńczającym.

Tabela 5.17. Stężenie NO_x [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 WLTP wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{CVS,DR}^C$	DF	$C_{CVS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	4,908	0,061	34,43	4,849	23,68	4,850	-0,02%
Pozamiejski NEDC	0,178	0,250	30,00	-0,064	19,14	-0,059	8,02%
WLTC, Low	8,190	0,414	34,20	7,788	32,07	7,789	-0,01%
WLTC, Medium	15,543	0,937	22,59	14,647	20,32	14,652	-0,03%
WLTC, High	8,382	0,315	20,37	8,082	18,51	8,084	-0,02%
WLTC Extra High	13,197	0,684	14,17	12,561	13,55	12,563	-0,02%
ARTEMIS URBAN	18,949	0,126	31,17	18,827	29,10	18,827	0,00%
ARTEMIS ROAD	16,950	1,710	24,01	15,311	18,50	15,332	-0,14%
ARTEMIS MOTORWAY	14,014	2,043	8,32	12,217	7,04	12,261	-0,36%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP procentowa różnica względna stężenia NO_x w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -0,36% do 0%. Tylko w fazie pozamiejskiej cyklu NEDC jest większa od zera i wynosi 8%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem NO_x w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym w pierwszym przypadku (patrz rys. 4.3) oraz z praktycznie zerowej emisji tego zanieczyszczenia w drugim przypadku, co powo-

duje, że stężenie NO_x w rozcieńczonych spalinach jest mniejsze od stężenia w powietrzu rozcieńczającym.

Tabela 5.18. Stężenie THC [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 WLTP wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{cvS,DR}^C$	DF	$C_{cvS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	15,070	5,726	34,43	9,510	23,68	9,586	-0,79%
Pozamiejski NEDC	7,863	5,214	30,00	2,823	19,14	2,921	-3,38%
WLTC, Low	55,822	5,868	34,20	50,126	32,07	50,137	-0,02%
WLTC, Medium	39,387	5,725	22,59	33,915	20,32	33,944	-0,08%
WLTC, High	37,683	5,912	20,37	32,061	18,51	32,090	-0,09%
WLTC Extra High	40,256	5,879	14,17	34,792	13,55	34,811	-0,05%
ARTEMIS URBAN	6,803	5,746	31,17	1,241	29,10	1,254	-1,05%
ARTEMIS ROAD	12,838	5,757	24,01	7,321	18,50	7,392	-0,97%
ARTEMIS MOTORWAY	9,893	5,782	8,32	4,806	7,04	4,932	-2,56%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP procentowa różnica względna stężenia THC w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -3,38% do -0,02%. Wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem THC w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym (rys. 4.3). Większe wartości procentowej różnicy względnej stężenia THC w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym w porównaniu do tych różnic stwierdzonych dla CO_2 , CO i NO_x spowodowane jest większymi wartościami stężenia THC w powietrzu rozcieńczającym niż dla pozostałych zanieczyszczeń.

Tabela 5.19. Stężenie CH_4 [ppm] w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym obliczone na podstawie zależności (2.6) i (2.7) dla samochodu Euro 6 WLTP wyposażonego w silnik ZI

Cykl	C_{cvS}	C_{roz}	DR	$C_{cvS,DR}^C$	DF	$C_{cvS,DF}^C$	ΔC_{cvS}
Miejski NEDC	3,250	2,052	34,43	1,258	23,68	1,285	-2,1%
Pozamiejski NEDC	2,278	1,997	30,00	0,348	19,14	0,385	-9,8%
WLTC, Low	2,997	1,070	34,20	1,958	32,07	1,960	-0,1%
WLTC, Medium	2,739	1,030	22,59	1,755	20,32	1,760	-0,3%
WLTC, High	2,349	1,077	20,37	1,325	18,51	1,330	-0,4%
WLTC Extra High	3,494	1,067	14,17	2,502	13,55	2,506	-0,14%
ARTEMIS URBAN	2,417	1,995	31,17	0,486	29,10	0,491	-0,9%
ARTEMIS ROAD	2,812	1,056	24,01	1,800	18,50	1,813	-0,7%
ARTEMIS MOTORWAY	2,722	1,068	8,32	1,782	7,04	1,806	-1,3%

Dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP procentowa różnica względna stężenia CH_4 w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynikająca z zastosowania w obliczeniach wartości współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR jest bliska zera. Zawiera się ona w przedziale od -2,1% do -0,1%. Tylko w fazie pozamiejskiej cyklu NEDC wartość ta różni się od zera w sposób znaczący i wynosi -9,8%. W pierwszym przypadku wynika to z dużej różnicy pomiędzy stężeniem CH_4 w rozcieńczonych spalinach a zawartością tego zanieczyszczenia

w powietrzu rozcieńczającym (rys. 4.3). Natomiast w drugim wyniku z praktycznie zerowej emisji tego zanieczyszczenia w drugim przypadku, co powoduje, że stężenie CH₄ w rozcieńczonych spalinach jest mniejsze od stężenia w powietrzu rozcieńczającym. Większe wartości procentowej różnicy względnej stężenia CH₄ w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym w porównaniu do tych różnic stwierdzonych dla CO₂, CO i NO_x spowodowane jest większymi wartościami stężenia CH₄ w powietrzu rozcieńczającym niż dla pozostałych zanieczyszczeń.

Założenie o składzie stechiometrycznym mieszanki paliwowo–powietrznej nie zawsze jest spełnione. Powoduje to błąd w obliczaniu współczynnika rozcieńczenia spalin *DF*. W przypadku pojazdu z silnikiem ZS procentowy względny błąd współczynnika rozcieńczenia *DF* w stosunku do stopnia rozcieńczenia *DR* zmieniał się od 28% do 167% (tabela 5.4). Z tego powodu występuje błąd w określaniu stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, obliczonego na podstawie równania (2.7).

5.4. Wyznaczenie wskaźników emisji zanieczyszczeń według zmodyfikowanej procedury pomiarowej

W celu oszacowania wpływu stosowania współczynnika rozcieńczenia spalin *DF* na wskaźniki emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego obliczono je według standardowej metody obliczeń oraz według zmodyfikowanej procedury pomiarowej pozwalającej określić stopień rozcieńczenia *DR*.

W tabelach 5.20–5.22 zamieszczono wyniki pomiarów emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego w cyklach jezdnych ARTEMIS URBAN, ROAD i MOTORWAY. W tabelach tych przedstawiono wyniki emisji obliczone na podstawie zależności wykorzystujących współczynnik rozcieńczenia *DF* oraz stopień rozcieńczenia *DR*.

Zgodnie z przyjętą w przewodniku EMEP/EEA [19] klasyfikacją, badane samochody wyposażone w silniki ZI należą do oddzielnych podkategorii:

- samochód z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC: samochód osobowy (kategoria M1), z silnikiem ZI zasilanym benzyną, **Euro 6 a/b/c**,
- samochód z silnikiem ZI, Euro 6 WLTC: samochód osobowy (kategoria M1), z silnikiem ZI zasilanym benzyną, **Euro 6d**.

Uwzględniając powyższe oraz mając na uwadze fakt, że pomiary emisji w cyklach jezdnych ARTEMIS wykonuje się przy całkowicie rozgrzanym silniku, można uznać, że wyniki tych pomiarów są również wskaźnikami emisji zanieczyszczeń po uruchomieniu rozgrzanego silnika e_g dla badanych samochodów.

Tabela 5.20. Emisja zanieczyszczeń [mg/km] z układu wylotowego w cyklach jezdnych ARTEMIS dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Cykl jezdny	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
	Obliczone z wykorzystaniem <i>DF</i>					
ARTEMIS URBAN	1729,8	259,84	29,82	8,48	20,33	245,1
ARTEMIS ROAD	2587,5	155,40	39,51	6,11	32,67	139,1
ARTEMIS MOTORWAY	7265,5	281,95	77,97	13,12	63,27	197,7
	Obliczone z wykorzystaniem <i>DR</i>					
ARTEMIS URBAN	1730,1	259,89	30,00	8,59	20,37	245,2
ARTEMIS ROAD	2587,9	155,45	39,69	6,22	32,72	139,2
ARTEMIS MOTORWAY	7264,5	281,89	77,87	13,07	63,23	197,6

Tabela 5.21. Emisja zanieczyszczeń [mg/km] z układu wylotowego w cyklach jezdnych ARTEMIS dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Cykl jezdny	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem <i>DF</i>						
ARTEMIS URBAN	0,07	843,36	29,20	8,35	19,84	194,5
ARTEMIS ROAD	317,07	310,57	89,89	28,58	57,88	136,8
ARTEMIS MOTORWAY	778,05	116,82	34,25	13,34	19,31	182,4
Obliczone z wykorzystaniem <i>DR</i>						
ARTEMIS URBAN	0,07	843,35	28,89	8,27	19,62	194,5
ARTEMIS ROAD	316,81	310,14	89,02	28,38	57,24	136,6
ARTEMIS MOTORWAY	777,70	116,39	33,38	13,17	18,62	182,2

Tabela 5.22. Emisja zanieczyszczeń [mg/km] z układu wylotowego w cyklach jezdnych ARTEMIS dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5

Cykl jezdny	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem <i>DF</i>						
ARTEMIS URBAN	2,09	975,51	10,48	2,19	8,03	226,5
ARTEMIS ROAD	13,42	443,40	0,71	0,76	0,00	123,7
ARTEMIS MOTORWAY	0,01	843,08	1,89	0,00	1,89	190,0
Obliczone z wykorzystaniem <i>DR</i>						
ARTEMIS URBAN	2,45	977,17	13,54	4,42	8,59	228,4
ARTEMIS ROAD	7,90	443,71	1,39	1,27	0,00	124,1
ARTEMIS MOTORWAY	0,00	843,61	2,49	0,00	2,49	190,4

Względna różnica procentowa wskaźników emisji zanieczyszczeń po uruchomieniu rozgrzanego silnika e_g obliczonych z wykorzystaniem współczynnika rozcieńczenia *DF* w stosunku do wskaźników wyznaczonych na podstawie stopnia rozcieńczenia *DR* dla obu samochodów z silnikiem ZI zawiera się w przedziale od -1,8% do 3,7%. Różnica ta jest mniejsza od typowej wartości niepewności wyników pomiaru emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego. W przypadku samochodu z silnikiem ZS, Euro 5 różnica ta zawiera się w przedziale od -50,5% do 69,9% i jest ona większa od niepewności wyników pomiaru emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego.

5.5. Oszacowanie całkowitej rocznej masy zanieczyszczeń według zmodyfikowanej procedury pomiarowej

Wskaźniki emisji zanieczyszczeń po uruchomieniu rozgrzanego silnika e_g są wykorzystywane do obliczenia masy zanieczyszczenia zarówno po uruchomieniu rozgrzanego silnika m_g (4.36), jak i zimnego lub częściowo nagrzanego silnika m_z (4.38). Dodatkowo wskaźnik e_g występuje w równaniu (4.38) dwukrotnie: jako sam wskaźnik oraz jako składnik stosunku e^z/e^g , który pokazuje ile razy wzrasta emisja zanieczyszczenia po rozruchu zimnego lub częściowo nagrzanego silnika w stosunku do emisji zmierzonej po rozruchu całkowicie nagrzanego silnika. Z tego powodu błąd systematyczny w wyznaczeniu wskaźnika e_g , wynikający ze stosowania w obliczeniach współczynnika rozcieńczenia *DF*, wpływa na wartość zarówno masy m_g jak i m_z . W związku z tym wartość błędu systematycznego wyznaczenia rocznej emisji z transportu drogowego będzie większa niż wartość błędu systematycznego wyznaczenia wskaźników emisji zanieczyszczeń po uruchomieniu rozgrzanego silnika e_g . W celu oszacowania wartości tego błędu przeprowadzono obliczenia całkowitej emisji rocznej dla badanych pojazdów.

Do obliczenia całkowitej rocznej emisji zanieczyszczeń niezbędna jest znajomość średnich przebiegów rocznych oraz udziałów ruchu na poszczególnych rodzajach dróg w całkowitym przebiegu.

Przebiegi roczne dla badanych pojazdów przyjęto na podstawie danych KOBIZE [42]. Wartości tych przebiegów zamieszczono w tabeli 5.23.

Tabela 5.23. Przebiegi roczne [km] dla kategorii pojazdów, do których należą badane samochody; dane za 2019 rok [42]

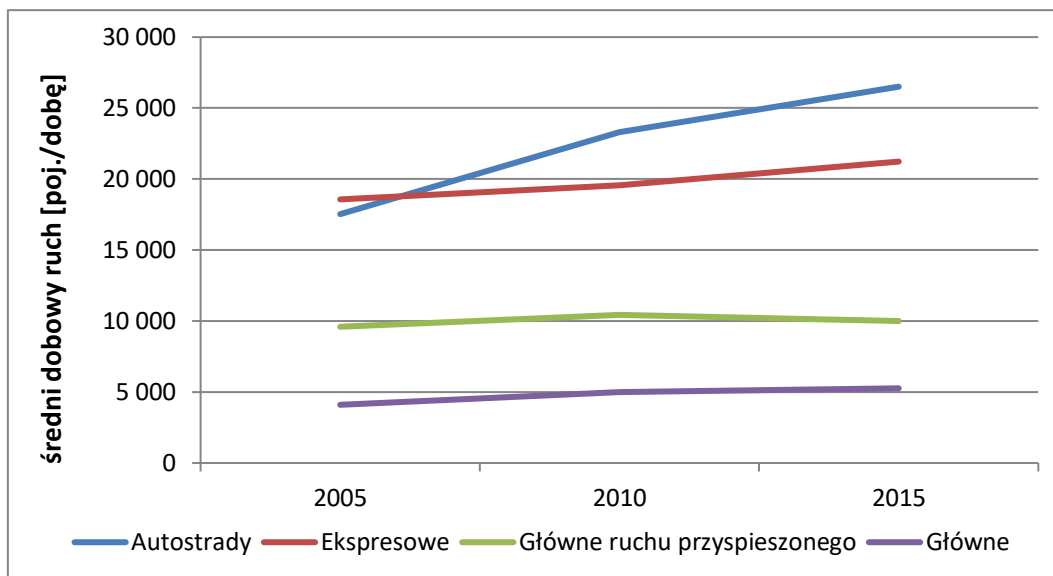
Samochód	Kategoria	Rodzaj zasilania	Przebieg
Euro 6 NEDC	M1	ZI	63 475
Euro 6 WLTC	M1	ZI	63 475
Euro 5	M1	ZS	60 006

Ostatnie dostępne dane dotyczące udziałów rodzajów ruchu w całkowitym przebiegu rocznym w Polsce pochodzą z lat 90-tych XX wieku [43–46]. Udziały te szacowane były na 41% ruchu na drogach miejskich, 54% na drogach pozamiejskich oraz 5% na drogach ekspresowych i autostradach. Dla porównania w tabeli 5.24 podane są takie dane dla 15 państw europejskich [22].

Tabela 5.24. Procentowy udział ruchu miejskiego, zamiejskiego oraz po autostradach i drogach ekspresowych w całkowitym przebiegu rocznym samochodów osobowych w 15 krajach europejskich (dane za 1995 rok) [22]

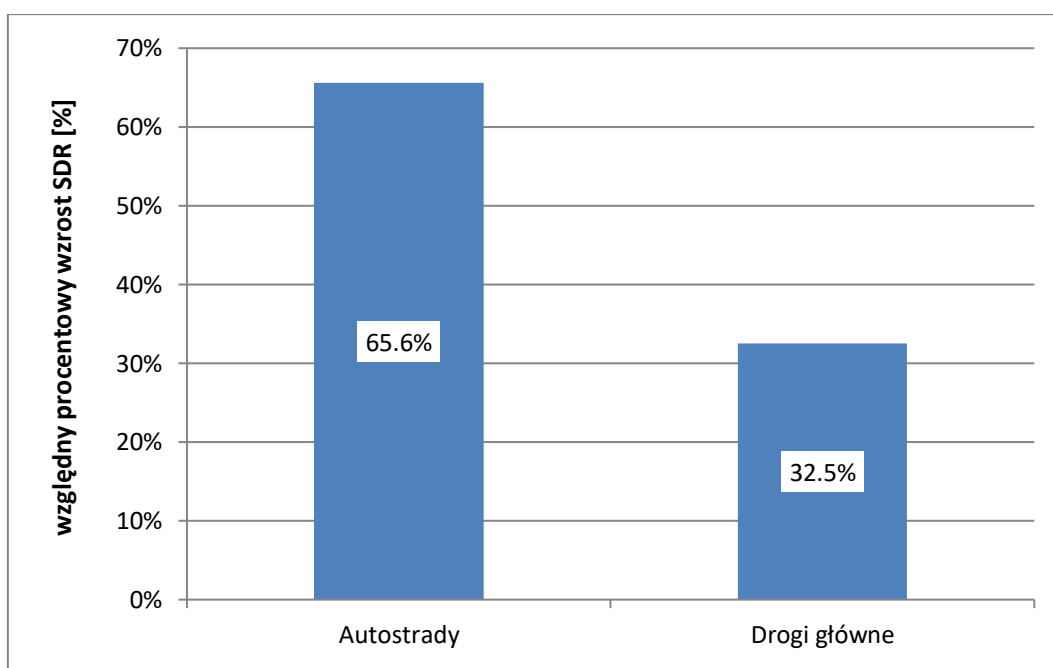
Kraj	Ruch		
	miejski	pozamiejski	autostradowy i po drogach ekspresowych
Austria	31,0	43,5	25,5
Belgia	27,1	48,8	27,1
Dania	40,0	47,0	13,0
Finlandia	30,0	60,0	10,0
Francja	40,0	50,0	10,0
Niemcy	37,2	38,4	24,4
Grecja	44,0	42,0	14,0
Irlandia	35,0	45,0	20,0
Włochy	35,0	55,0	10,0
Luxemburg	45,0	35,0	20,0
Holandia	32,7	38,0	29,3
Portugalia	24,0	68,8	7,2
Hiszpania	30,5	30,6	38,9
Szwecja	27,1	48,8	24,1
Wielka Brytania	46,0	40,0	14,0

Ze względu na rozwój w Polsce sieci dróg ekspresowych i autostrad należy sądzić, że część ruchu wykonywanego na drogach zamiejskich przeniosła się na drogi ekspresowe i autostrady. Potwierdzają to dane raportów dotyczącego Generalnego Pomiaru Ruchu prowadzonego co 5 lat przez firmę Transprojekt–Warszawa na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Na rysunku 5.30 przedstawiono zmianę średniego dobowego ruchu na 4 rodzajach dróg. Wykres został opracowany na podstawie danych zawartych w [47–49].



Rys. 5.30. Średni dobowy ruch pojazdów na autostradach, drogach krajowych, głównych drogach ruchu przyspieszonego i drogach głównych w latach 2005–2015. Opracowanie własne na podstawie [47–49]

Średni dobowy ruch pojazdów na drogach ekspresowych i autostradach zwiększył się w latach 2005–2015 o 65,6%, natomiast na drogach głównych ruchu przyspieszonego i drogach głównych, które należy uznać za ruch na drogach pozamiejskich, o 32,5% (rys. 5.31).



Rys. 5.31. Względny procentowy wzrost średniego dobowego ruchu pojazdów na autostradach i drogach krajowych (EA) oraz głównych drogach ruchu przyspieszonego i drogach głównych (Z) w latach 2005–2015. Opracowanie na podstawie [47–49]

Gęstość sieci dróg ekspresowych i autostrad w Polsce zwiększyła się w latach 2004–2018 z 0,26 do 1,16 km/100 km² [50]. Nadal jest ona jednak prawie 4-krotnie mniejsza niż gęstość autostrad w Niemczech, gdzie gęstość tych dróg w 2018 r. wynosiła 4,38 km/100 km² [51]. Na podstawie powyższych danych szacuje się, że udział ruchu po autostradach i drogach ekspresowych w stosunku do całkowitego przebiegu rocznego wynosi obecnie 10%. Założono, że zwiększenie tego udziału o 5% w stosunku do lat 90-tych XX wieku odbyło się w związku

z przeniesieniem ruchu pozamiejskiego na autostrady i drogi ekspresowe przy nie zmienionym udziale ruchu miejskiego. Oszacowane udziały poszczególnych rodzajów ruchu, przyjęte do dalszej analizy, zamieszczono w tabeli 5.24.

W tabelach 5.25 do 5.27 zamieszczono wyniki obliczeń emisji rocznej po rozruchu rozgrzanego silnika obliczonej dla badanych pojazdów na podstawie zależności (4.36).

Tabela 5.24. Udział ruchu miejskiego (S_M), pozamiejskiego (S_P) oraz po drogach ekspresowych i autostradach (S_A) w całkowitym przebiegu rocznym dla kategorii pojazdów, do których należą badane samochody

S_M	S_P	S_A
41%	49%	10%

Tabela 5.25. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Masa	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
$m_{g,M}$	110 266	16 564	1 901	541	1 296	15 624
$m_{g,P}$	164 940	9 906	2 519	389	2 083	8 867
$m_{g,A}$	463 139	17 973	4 970	836	4 033	12 602
Obliczone z wykorzystaniem DR						
$m_{g,M}$	110 285	16 567	1 912	548	1 298	15 630
$m_{g,P}$	164 966	9 909	2 530	396	2 086	8 873
$m_{g,A}$	463 076	17 969	4 964	833	4 031	12 596

Tabela 5.26. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Masa	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
$m_{g,M}$	4	53 532	1 853	530	1 259	12 346
$m_{g,P}$	20 126	19 713	5 706	1 814	3 674	8 683
$m_{g,A}$	49 387	7 415	2 174	847	1 226	11 578
Obliczone z wykorzystaniem DR						
$m_{g,M}$	4	53 532	1 834	525	1 245	12 346
$m_{g,P}$	20 110	19 686	5 651	1 801	3 633	8 671
$m_{g,A}$	49 365	7 388	2 119	836	1 182	11 565

Tabela 5.27. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5

Masa	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
$m_{g,M}$	125	58 536	629	131	482	13 591
$m_{g,P}$	805	26 607	43	46	0	7 423
$m_{g,A}$	1	50 590	113	0	113	11 401
Obliczone z wykorzystaniem DR						
$m_{g,M}$	147	58 636	812	265	515	13 705
$m_{g,P}$	474	26 625	83	76	0	7 447
$m_{g,A}$	0	50 622	149	0	149	11 425

Różnica między roczną masą zanieczyszczeń z układu wylotowego po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika obliczona z wykorzystaniem współczynnika rozcieńczenia DF a obliczoną z wykorzystaniem stopnia rozcieńczenia DR dla obu badanych samochodów z silnikiem ZI jest bliska zero i jest mniejsza od niepewności jej pomiaru. Również w przypadku rocznej

masy NO_x i CO₂ wyznaczonej dla samochodu z silnikiem ZS różnica ta jest mniejsza od niepewności pomiaru. Natomiast różnica w masie CO, THC, CH₄ i NMHC dla tego pojazdu jest większa od niepewności pomiaru.

W tabeli 5.28 podano średnie miesięczne temperatury występujące o godzinie 7³⁰ i 16⁰⁰. Na ich podstawie obliczono wartość współczynnika $\beta_{i,k}$ (zależność (4.39)) w poszczególnych miesiącach roku w celu sprawdzenia, czy jazda z niecałkowicie rozgrzanym silnikiem jest krótsza niż przyjęta średnia długość pojedynczej jazdy $l_{trip} = 12,4$ km.

Ponieważ wartość współczynnika $\beta_{i,k}$ (tabela 5.28) jest we wszystkich przypadkach mniejsza od jedności, dlatego należy stwierdzić, że emisja zanieczyszczeń po uruchomieniu zimnego silnika występuje tylko w ruchu miejskim. W związku z tym całkowita roczna masa z pojazdu obliczona zostanie na podstawie zależności:

$$m_{całk} = S_M \times m_M + S_P \times m_P + S_A \times m_A \quad (5.3)$$

gdzie: $m_{całk}$ – całkowita masa zanieczyszczenia z pojazdu, m_M – całkowita roczna masa zanieczyszczenia z pojazdu w warunkach ruchu miejskiego, m_P – całkowita roczna masa zanieczyszczenia z pojazdu w warunkach ruchu zamiejskiego, m_A – całkowita roczna masa zanieczyszczenia z pojazdu w warunkach ruchu po autostradach i drogach ekspresowych.

Całkowita roczna masa w poszczególnych warunkach ruchu obliczona zostanie na podstawie zależności:

$$m_M = m_{g,M} + m_{z,M} \quad (5.4)$$

$$m_P = m_{g,P} \quad (5.5)$$

$$m_A = m_{g,A} \quad (5.6)$$

Tabela 5.28. Średnia miesięczna temperatura o godzinie 7:30 i 16:00 [52] oraz wartość współczynnika $\beta_{i,k}$

Miesiąc	7:30		16:00	
	$t_{a,7:30}$ [°C]	$\beta_{i,k}$ [-]	$t_{a,16}$ [°C]	$\beta_{i,k}$ [-]
Styczeń	-2,6	0,345	-0,7	0,335
Luty	1,3	0,325	5,8	0,303
Marzec	4,2	0,311	9,7	0,284
Kwiecień	14	0,262	18,5	0,240
Maj	11,3	0,276	17,4	0,245
Czerwiec	20,7	0,229	27,5	0,195
Lipiec	17,8	0,243	23,6	0,215
Sierpień	17,6	0,244	26,2	0,202
Wrzesień	11,6	0,274	18,3	0,241
Październik	7,8	0,293	14,8	0,258
Listopad	4,5	0,309	7,3	0,296
Grudzień	-2,6	0,345	-0,5	0,334

Całkowita roczna masa po rozruchu zimnego lub częściowo rozgrzanego silnika została obliczona przy następujących założeniach:

- całkowity przebieg roczny rozkłada się równomiernie w każdym miesiącu,
- średnia temperatura miesięczna t_a jest określona jako wartość średnia temperatur $t_{a,7:30}$ i $t_{a,16}$,
- średnia prędkość jazdy w ruchu miejskim jest równa średniej prędkości cyklu jezdnego ARTEMIS URBAN i wynosi 17,5 km/h.

W tabeli 5.29 podano wartości współczynników e^z/e^s dla badanych samochodów obliczone na podstawie zależności (4.40) i tabeli 4.22 (samochody wyposażone w silniki ZI) oraz tabeli 4.23 (samochód wyposażony w silnik ZS).

W tabelach 5.30–5.32 podano całkowitą roczną masę po rozruchu zimnego silnika obliczoną na podstawie zależności (4.38) przy zastosowaniu współczynnika rozcieńczenia DF oraz stopnia rozcieńczenia DR . Wartości parametrów występujących w tej zależności zamieszczone zostały w tabelach 5.21, 5.23 oraz 5.25 do 5.29.

Tabela 5.29. Współczynnik e^z/e^s dla badanych samochodów

Miesiąc	t_a	Euro 6 NEDC			Euro 6 WLTC			Euro 5		
		CO	NO _x	THC	CO	NO _x	THC	CO	NO _x	THC
Styczeń	-1,7	6,1244	1,5532	10,0981	6,5048	1,5496	7,8531	1,9495	1,3215	3,2485
Luty	3,6	5,3652	1,5920	9,0217	5,6988	1,5879	7,1563	1,7935	1,2539	2,7805
Marzec	7,0	4,8688	1,6174	8,3179	5,1718	1,6130	6,7007	1,6915	1,2097	2,4745
Kwiecień	16,3	3,5855	1,6869	6,5218	4,0166	1,6817	4,9343	1,4125	1,0888	1,6375
Maj	14,4	3,7884	1,6727	6,7861	4,0248	1,6677	5,7091	1,4695	1,1135	1,8085
Czerwiec	24,1	0,7359	1,7455	2,7773	0,5312	1,7396	2,1475	1,1770	0,9867	0,9310
Lipiec	20,7	1,9702	1,7201	4,3991	2,0408	1,7145	3,3545	1,2790	1,0309	1,2370
Sierpień	21,9	1,5346	1,7291	3,8267	1,5080	1,7234	2,9285	1,2430	1,0153	1,1290
Wrzesień	15,0	3,7008	1,6772	6,6619	3,9318	1,6721	5,6287	1,4515	1,1057	1,7545
Październik	11,3	4,2337	1,6499	7,4174	4,4975	1,6451	6,1178	1,5610	1,1531	2,0830
Listopad	5,9	5,0221	1,6096	8,5352	5,3345	1,6053	6,8414	1,7230	1,2233	2,5690
Grudzień	-1,6	6,1098	1,5539	10,0774	6,4893	1,5503	7,8397	1,9465	1,3202	3,2395

Tabela 5.30. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu zimnego silnika w warunkach ruchu miejskiego dla samochodu z silnikiem o ZI, Euro 6 NEDC

Miesiąc	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
Styczeń	2,87	0,05	0,09	0,02	0,06	38
Luty	2,26	0,05	0,07	0,02	0,05	32
Marzec	1,89	0,05	0,06	0,02	0,04	28
Kwiecień	1,07	0,04	0,04	0,01	0,03	19
Maj	1,20	0,04	0,04	0,01	0,03	21
Czerwiec	0,00	0,04	0,01	0,00	0,01	13
Lipiec	0,37	0,04	0,02	0,01	0,02	15
Sierpień	0,20	0,04	0,02	0,01	0,01	14
Wrzesień	1,15	0,04	0,04	0,01	0,03	20
Październik	1,47	0,04	0,05	0,01	0,04	24
Listopad	2,00	0,05	0,06	0,02	0,05	29
Grudzień	2,86	0,05	0,09	0,02	0,06	38
Całkowita	17,33	0,52	0,60	0,17	0,43	292
Obliczone z wykorzystaniem DR						
Styczeń	2,87	0,05	0,09	0,03	0,06	38
Luty	2,26	0,05	0,07	0,02	0,05	32
Marzec	1,89	0,05	0,06	0,02	0,04	28
Kwiecień	1,07	0,04	0,04	0,01	0,03	19
Maj	1,20	0,04	0,04	0,01	0,03	21
Czerwiec	0,00	0,04	0,01	0,00	0,01	13
Lipiec	0,37	0,04	0,02	0,01	0,02	15
Sierpień	0,20	0,04	0,02	0,01	0,01	14
Wrzesień	1,15	0,04	0,04	0,01	0,03	20
Październik	1,47	0,04	0,05	0,01	0,04	24
Listopad	2,00	0,05	0,07	0,02	0,05	29
Grudzień	2,86	0,05	0,09	0,03	0,06	38
Całkowita	17,33	0,52	0,60	0,17	0,43	292

Tabela 5.31. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu zimnego silnika w warunkach ruchu miejskiego dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Miesiąc	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
Styczeń	0,00	0,15	0,06	0,02	0,05	31
Luty	0,00	0,15	0,05	0,02	0,04	25
Marzec	0,00	0,15	0,05	0,01	0,03	22
Kwiecień	0,00	0,14	0,03	0,01	0,02	15
Maj	0,00	0,14	0,03	0,01	0,02	16
Czerwiec	0,00	0,13	0,01	0,00	0,00	10
Lipiec	0,00	0,13	0,01	0,00	0,01	12
Sierpień	0,00	0,13	0,01	0,00	0,01	11
Wrzesień	0,00	0,14	0,03	0,01	0,02	16
Październik	0,00	0,14	0,04	0,01	0,03	19
Listopad	0,00	0,15	0,05	0,01	0,04	23
Grudzień	0,00	0,15	0,06	0,02	0,05	30
Całkowita	0,0008	1,69	0,45	0,13	0,32	232
Obliczone z wykorzystaniem DR						
Styczeń	0,00	0,15	0,06	0,02	0,05	31
Luty	0,00	0,15	0,05	0,02	0,04	25
Marzec	0,00	0,15	0,05	0,01	0,03	22
Kwiecień	0,00	0,14	0,03	0,01	0,02	15
Maj	0,00	0,14	0,03	0,01	0,02	16
Czerwiec	0,00	0,13	0,01	0,00	0,00	10
Lipiec	0,00	0,13	0,01	0,00	0,01	12
Sierpień	0,00	0,13	0,01	0,00	0,01	11
Wrzesień	0,00	0,14	0,03	0,01	0,02	16
Październik	0,00	0,14	0,04	0,01	0,03	19
Listopad	0,00	0,15	0,05	0,01	0,03	23
Grudzień	0,00	0,15	0,06	0,02	0,05	30
Całkowita	0,0008	1,69	0,44	0,13	0,32	232

Tabela 5.32. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu zimnego silnika w warunkach ruchu miejskiego dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5

Miesiąc	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
Styczeń	0,003	0,533	0,040	0,008	0,032	136
Luty	0,003	0,389	0,029	0,006	0,023	111
Marzec	0,002	0,304	0,023	0,005	0,018	96
Kwiecień	0,001	0,109	0,008	0,002	0,007	60
Maj	0,001	0,144	0,011	0,002	0,009	66
Czerwiec	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35
Lipiec	0,001	0,035	0,003	0,001	0,002	45
Sierpień	0,001	0,017	0,002	0,000	0,001	42
Wrzesień	0,001	0,133	0,010	0,002	0,008	64
Październik	0,002	0,206	0,016	0,003	0,012	78
Listopad	0,002	0,330	0,025	0,005	0,020	100
Grudzień	0,003	0,530	0,040	0,008	0,032	136
Całkowita	0,021	2,729	0,207	0,043	0,164	969
Obliczone z wykorzystaniem DR						
Styczeń	0,004	0,534	0,052	0,017	0,035	137
Luty	0,003	0,390	0,038	0,012	0,026	112
Marzec	0,003	0,305	0,030	0,010	0,020	97
Kwiecień	0,001	0,109	0,011	0,004	0,007	60
Maj	0,001	0,144	0,014	0,005	0,010	67
Czerwiec	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	36
Lipiec	0,001	0,035	0,004	0,001	0,002	46
Sierpień	0,001	0,017	0,002	0,001	0,001	42
Wrzesień	0,001	0,133	0,013	0,004	0,009	65
Październik	0,002	0,206	0,020	0,007	0,014	79
Listopad	0,003	0,330	0,032	0,010	0,022	101
Grudzień	0,004	0,531	0,051	0,017	0,035	137
Całkowita	0,024	2,733	0,267	0,087	0,180	977

Różnica między roczną masą zanieczyszczeń z układu wylotowego po rozruchu zimnego silnika w warunkach ruchu miejskiego obliczona z wykorzystaniem współczynnika rozcieńczenia DF a obliczoną z wykorzystaniem stopnia rozcieńczenia DR dla obu badanych samochodów z silnikiem ZI jest równa zero. Również w przypadku rocznej masy NO_x i CO_2 wyznaczonej dla samochodu z silnikiem ZS różnica ta jest bliska zero i jest mniejsza od niepewności pomiaru. Natomiast różnica w masie CO , THC , CH_4 i $NMHC$ dla tego pojazdu jest większa od niepewności pomiaru.

W tabelach 5.33 do 5.35 zamieszczono wyniki obliczeń całkowitej rocznej masy obliczonej dla badanych pojazdów na podstawie zależności (5.3).

Tabela 5.33. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 NEDC

Masa	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
$m_{g,M}$	110,3	16,6	1,9	0,5	1,3	15 624
$m_{z,M}$	17,3	0,5	0,6	0,2	0,4	292
$m_{g,P}$	164,9	9,9	2,5	0,4	2,1	8 867
$m_{g,A}$	463,1	18,0	5,0	0,8	4,0	12 602
m_C	179,4	13,7	2,8	0,6	2,1	12 131
Obliczone z wykorzystaniem DR						
$m_{g,M}$	110,3	16,6	1,9	0,5	1,3	15 630
$m_{z,M}$	17,3	0,5	0,6	0,2	0,4	292
$m_{g,P}$	165,0	9,9	2,5	0,4	2,1	8 873
$m_{g,A}$	463,1	18,0	5,0	0,8	4,0	12 596
m_C	179,5	13,7	2,8	0,6	2,1	12 136

Tabela 5.34. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika dla samochodu z silnikiem ZI, Euro 6 WLTP

Masa	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
$m_{g,M}$	0,004	53,53	1,85	0,53	1,26	12 346
$m_{z,M}$	0,001	1,69	0,45	0,13	0,32	232
$m_{g,P}$	20,13	19,71	5,71	1,81	3,67	8 683
$m_{g,A}$	49,39	7,42	2,17	0,85	1,23	11 578
m_C	14,80	33,04	3,96	1,24	2,57	10 570
Obliczone z wykorzystaniem DR						
$m_{g,M}$	0,004	53,53	1,83	0,52	1,25	12 346
$m_{z,M}$	0,001	1,69	0,44	0,13	0,32	232
$m_{g,P}$	20,11	19,69	5,65	1,80	3,63	8 671
$m_{g,A}$	49,36	7,39	2,12	0,84	1,18	11 565
m_C	14,79	33,03	3,91	1,23	2,54	10 562

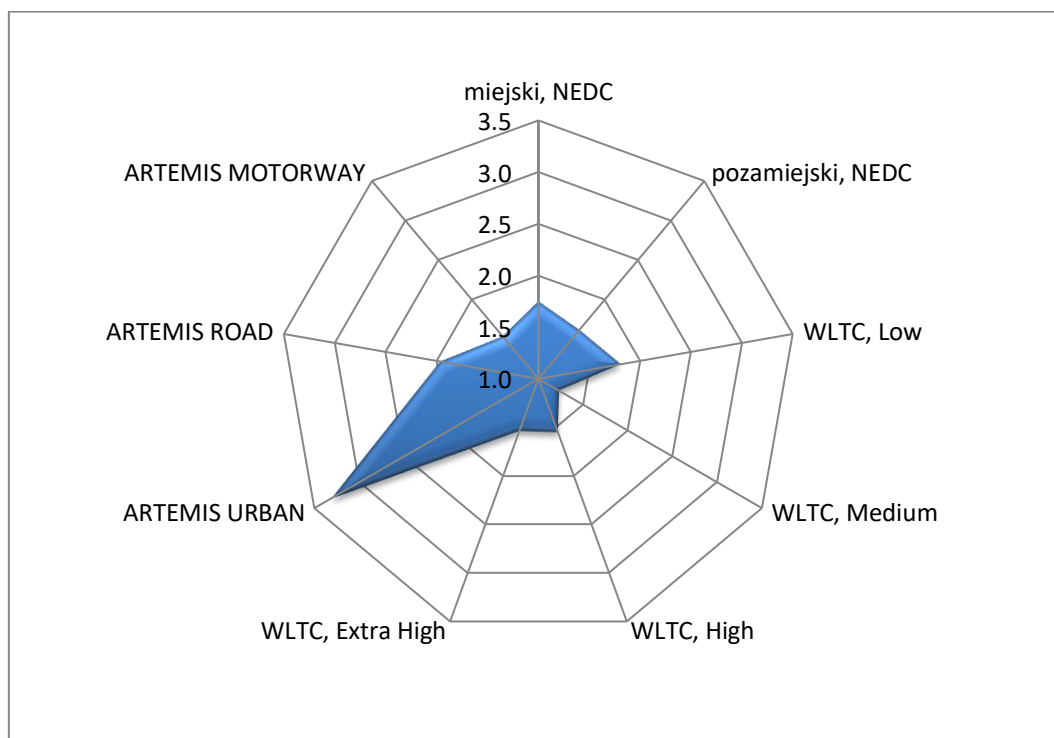
Tabela 5.35. Roczna masa zanieczyszczeń [kg] z układu wylotowego po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika dla samochodu z silnikiem ZS, Euro 5

Masa	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
Obliczone z wykorzystaniem DF						
$m_{g,M}$	0,125	58,54	0,63	0,13	0,48	13 591
$m_{z,M}$	0,021	2,73	0,21	0,04	0,16	969
$m_{g,P}$	0,805	26,61	0,04	0,05	0,01	7 423
$m_{g,A}$	0,001	50,59	0,11	0,00	0,11	11 401
m_C	0,45	43,22	0,37	0,09	0,27	10 747
Obliczone z wykorzystaniem DR						
$m_{g,M}$	0,147	58,64	0,81	0,27	0,52	13 705
$m_{z,M}$	0,024	2,73	0,27	0,09	0,18	977
$m_{g,P}$	0,474	26,63	0,08	0,08	0,00	7 447
$m_{g,A}$	0,000	50,62	0,15	0,00	0,15	11 425
m_C	0,302	43,27	0,50	0,18	0,30	10 811

6. Analiza wyników badań

6.1. Współczynnik nadmiaru powietrza

Na rysunku 6.1 przedstawiono graficznie medianę współczynnika nadmiaru powietrza w poszczególnych fazach cykli jezdnych NEDC, WLTC i ARTEMIS dla samochodu z silnikiem ZS, który uzyskał homologację potwierdzającą spełnienie wymagań Euro 5. Mediana współczynnika λ w każdej z faz cyklu WLTC i NEDC oraz w cyklach ARTEMIS jest większa od 1,5 i zawiera się w granicach 1,532–3,307. Tylko w fazie Medium cyklu WLTC mediana jest mniejsza od 1,5 i wynosi 1,230.

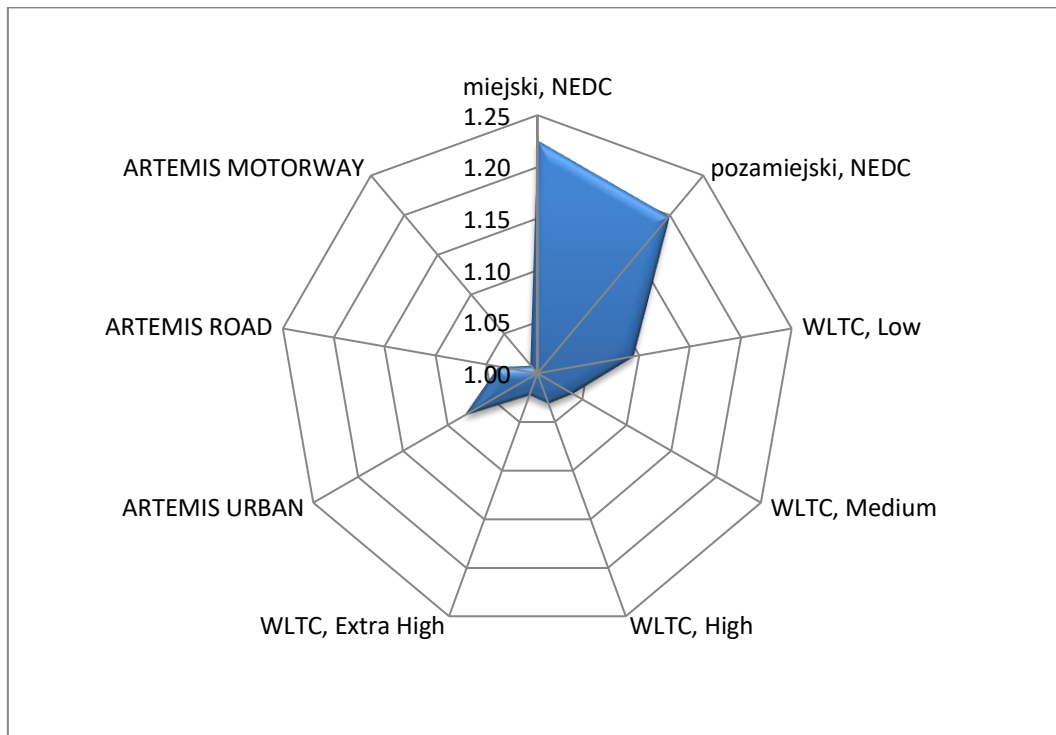


Rys. 6.1. Mediana współczynnika nadmiaru powietrza w cyklach jezdnych dla samochodu wyposażonego w silnik ZS, Euro 5

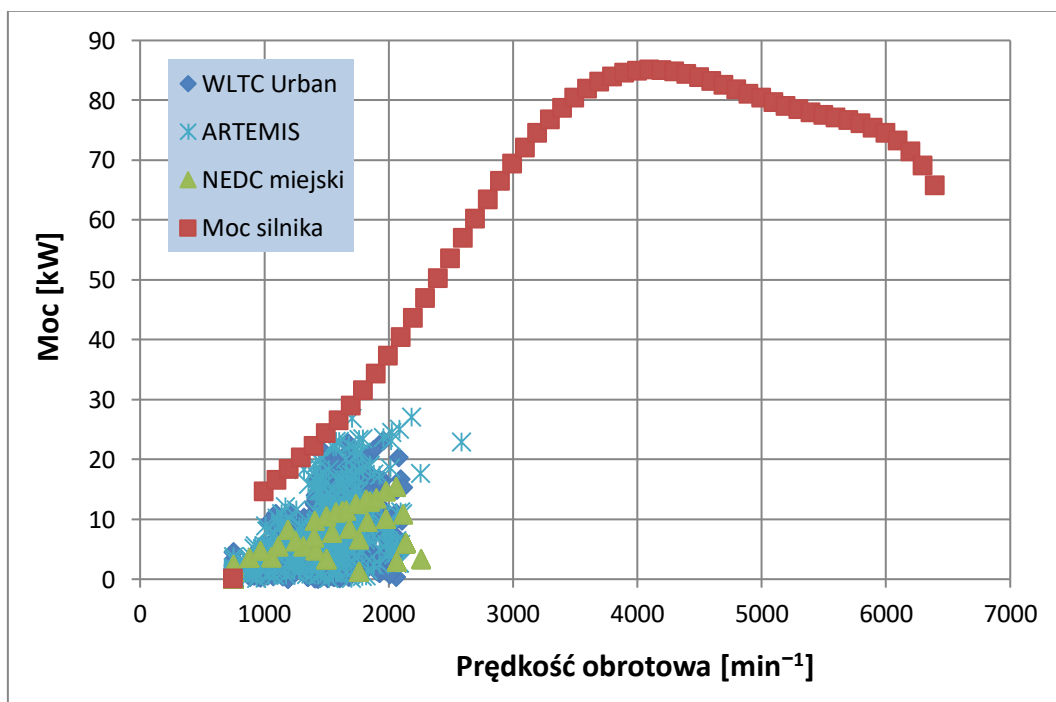
Na rysunku 6.2 przedstawiono medianę współczynnika nadmiaru powietrza w poszczególnych fazach cykli jezdnych NEDC, WLTC i ARTEMIS dla samochodu z silnikiem ZI, który uzyskał homologację potwierdzającą spełnienie wymagań Euro 6 WLTP. Mediana współczynnika λ w każdej z faz cyklu WLTC jest zbliżona do wartości odpowiadającej składowi stechiometrycznemu i zawiera się w granicach 1,022–1,094. Podobnie jest w przypadku cyklu ARTEMIS, dla którego zawiera się ona w przedziale 1,010–1,081. Jest to efekt konieczności spełnienia przez pojazdy wymagań w zakresie emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego w cyklu jezdny, który obejmuje większy obszar pracy silnika niż w przypadku cyklu NEDC (rys. 6.3–6.5), jak również wprowadzenia do procedury homologacyjnej badań w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego RDE (*Real Driving Emissions*). Zmusiło to producentów pojazdów do zwiększenia obszarów pracy silnika, w którym pracuje on przy składzie mieszanki paliwowo-powietrznej bliskiej składowi stechiometrycznemu, co wpływa korzystnie na sprawność układów oczyszczania spalin samochodów z silnikami ZI. W tych pojazdach najczęściej stosuje się reaktory katalityczne potrójnego działania, które uzyskują sprawność redukcji nie mniejszą niż 98% w zakresie współczynnika λ z przedziału 0,997–1,003 [53–55].

W cyklu NEDC mediana współczynnika λ zawiera się w granicach 1,198–1,225 i jest większa od wartości zmierzonych dla tego samochodu w cyklach WLTC i ARTEMIS. Wyni-

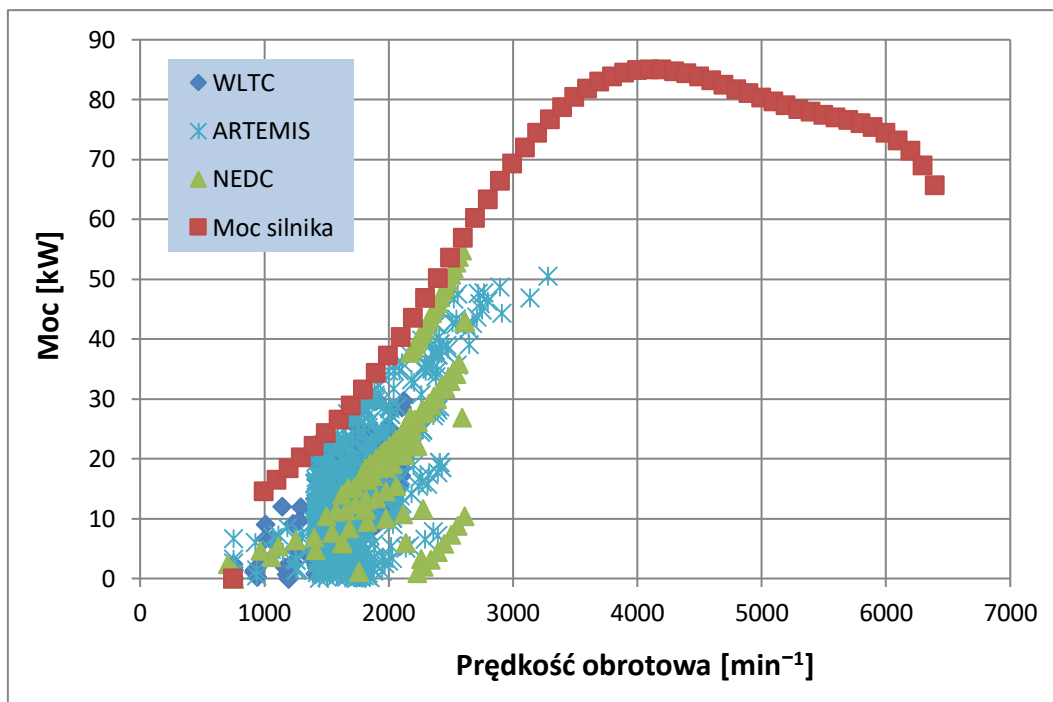
ka to prawdopodobnie z tego, że w obszarach pracy silnika występujących w cyklu NEDC głównym kryterium optymalizacji sterownika było obniżenie zużycia paliwa, co uzyskuje się poprzez zubożenie mieszanki paliwowo-powietrznej.



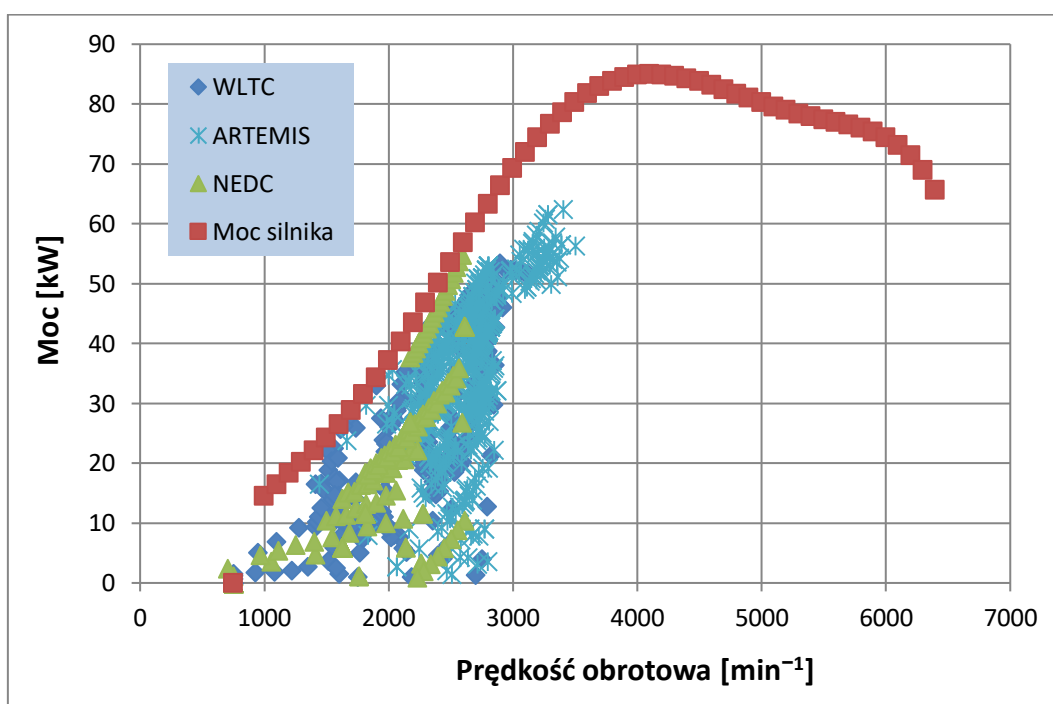
Rys. 6.2. Mediana współczynnika nadmiaru powietrza w cyklach jezdnych dla samochodu wyposażonego w silnik ZI, Euro 6 WLTP



Rys. 6.3. Moc oporów ruchu w fazach cykli jezdnych WLTC, ARTEMIS i NEDC odpowiadających warunkom jazdy miejskiej



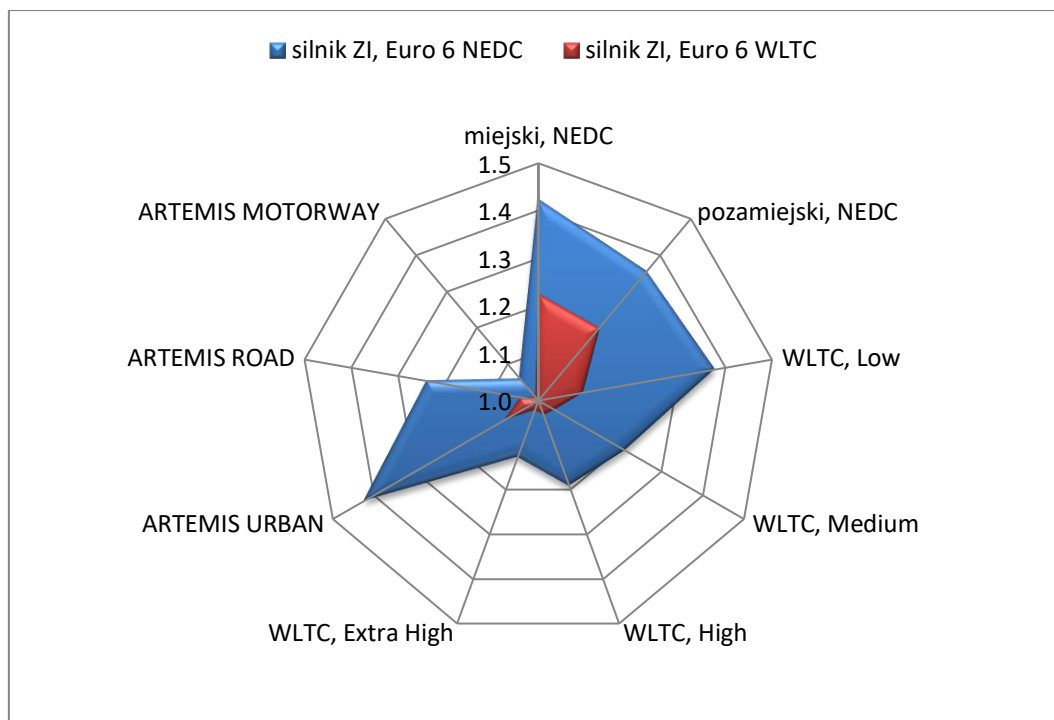
Rys. 6.4. Moc oporów ruchu w fazach cykli jezdnych WLTC, ARTEMIS i NEDC odpowiadających warunkom jazdy pozamiejskiej



Rys. 6.5. Moc oporów ruchu w fazach cykli jezdnych WLTC, ARTEMIS i NEDC odpowiadających warunkom jazdy po autostradach i drogach ekspresowych

Na rysunku 6.6 przedstawiono porównanie mediany współczynnika nadmiaru powietrza w poszczególnych fazach cykli jezdnych NEDC, WLTC i ARTEMIS dla dwóch samochodów z silnikiem ZI, które uzyskały homologację potwierdzającą spełnienie wymagań Euro 6 NEDC oraz Euro 6 WLTP. Dla każdej z faz cykli WLTC oraz dla faz URBAN i ROAD cyklu ARTEMIS wartości mediany samochodu Euro 6 NEDC są większe od odpowiadających im wartości samochodu Euro 6 WLTP. Mediana współczynnika nadmiaru powietrza zawiera się

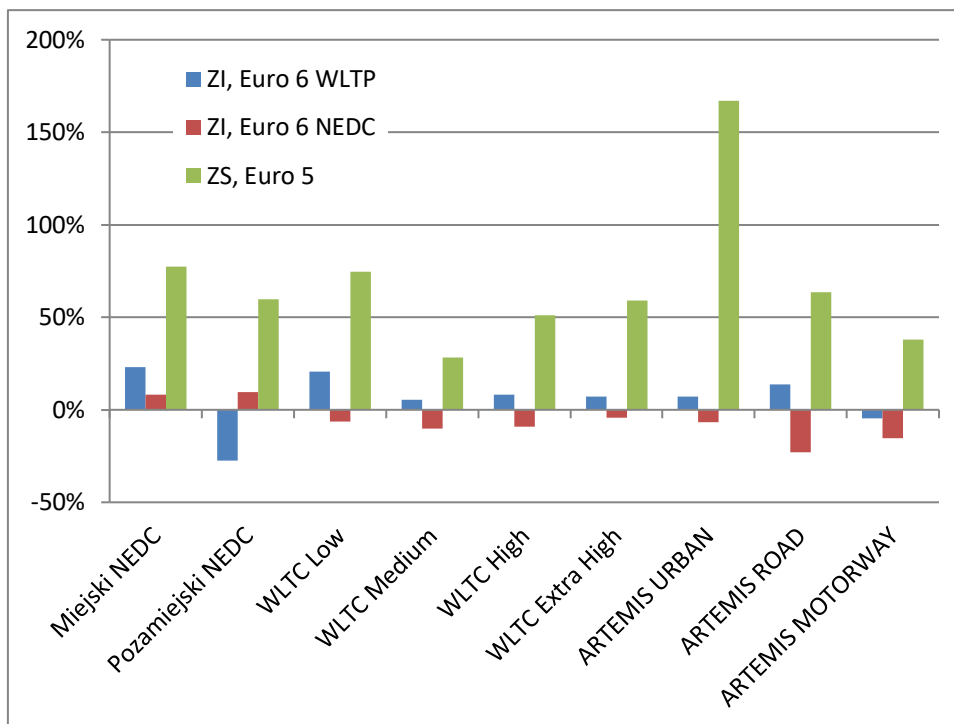
w przedziałach odpowiednio 1,191–1,422 oraz 1,022–1,094. Powodem tego jest prawdopodobnie to, że w obszarach pracy silnika, które nie występują w cyklu NEDC, głównym kryterium optymalizacji sterownika silnika było obniżenie zużycia paliwa, co uzyskuje się poprzez zubożenie mieszanki paliwowo–powietrznej. Natomiast dla fazy MOTORWAY cyklu ARTEMIS współczynnik nadmiaru powietrza był zbliżony do składu stechiometrycznego i wynosił 1,060 dla samochodu Euro 6 NEDC i 1,010 dla samochodu Euro 6 WLTP.



Rys. 6.6. Porównanie mediany współczynnika nadmiaru powietrza w cyklach jezdnych dla samochodów wyposażonych w silnik ZI, spełniający wymagania w zakresie emisji zanieczyszczeń na poziomie Euro 6, homologowanych według cyklu NEDC oraz nowej procedury WLTP

6.2. Stopień rozcieńczenia spalin

Założenie o składzie stechiometrycznym mieszanki paliwowo-powietrznej nie zawsze jest spełnione. Powoduje to powstawanie błędów systematycznych przy obliczaniu współczynnika rozcieńczenia DF . Dla samochodu wyposażonego w silnik ZI, spełniającego normę Euro 6 NEDC względna różnica procentowa współczynnika rozcieńczenia DF w stosunku do stopnia rozcieńczenia DR była w większości faz cykli jezdnych dodatnia i zmieniała się od 5,4% do 22,9%. Tylko w fazie pozamiejskiej cyklu NEDC oraz w cyklu jezdnym ARTEMIS MOTORWAY wskaźnik ten był ujemny i wynosił odpowiednio $-27,3\%$ oraz $-4,5\%$. Z kolei w przypadku pojazdu z silnikiem ZI, spełniającego normę Euro 6 WLTP względna różnica procentowa była ujemna i zawierała się w przedziale $-4,4\%$ do $-22,9\%$, tylko w obu fazach cyklu NEDC była dodatnia i wynosiła $8,3\%$ dla fazy miejskiej oraz $9,7\%$ dla fazy pozamiejskiej. W przypadku pojazdu z silnikiem ZS względna różnica procentowa współczynnika rozcieńczenia DF w stosunku do stopnia rozcieńczenia DR była dodatnia dla wszystkich cykli jezdnych i zmieniała się od 28% do 167%. Względną różnicę procentową Δ_{DF} dla wszystkich cykli jezdnych określono dla badanych pojazdów przedstawiono na rys. 6.7.

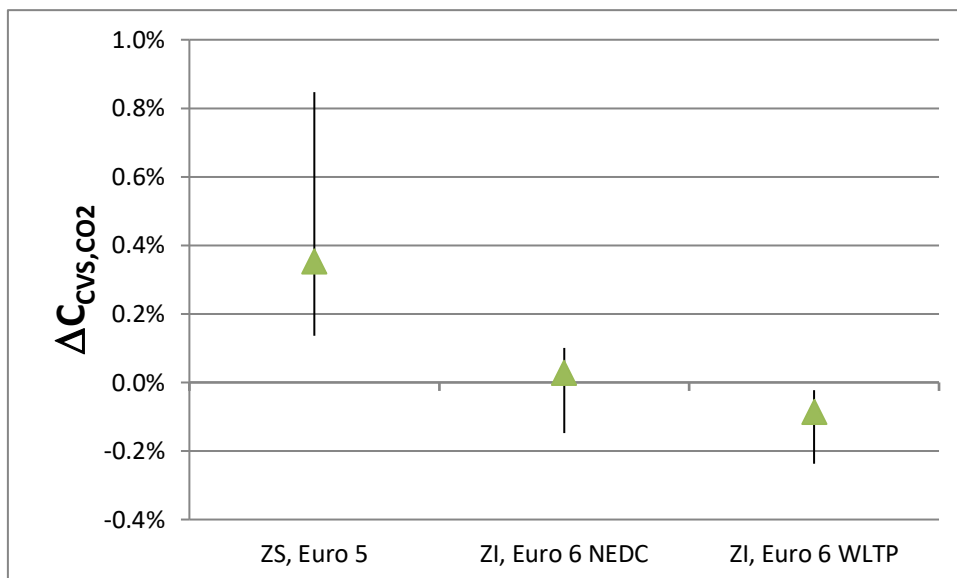


Rys. 6.7. Względna różnica procentowa między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR

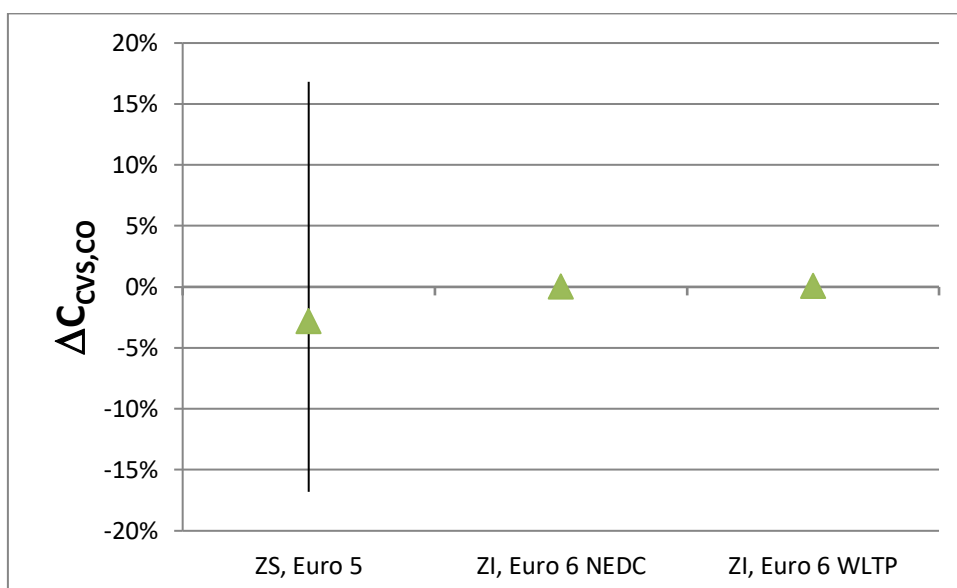
W przypadku dodatniej wartości względnej różnicy procentowej obliczony na podstawie równania (2.8) współczynnik rozcieńczenia jest większy niż rzeczywisty stopień rozcieńczenia, co prowadzi do zbyt dużej korekcji stężenia mierzonego w rozcieńczonych spalinach o zawartość danego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym. W przypadku wartości ujemnej tej różnicy korekcja jest zbyt mała. Z tego powodu występuje błąd w określaniu stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, obliczonego na podstawie równania (2.7).

6.3. Stężenie zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowane ze względu na jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym

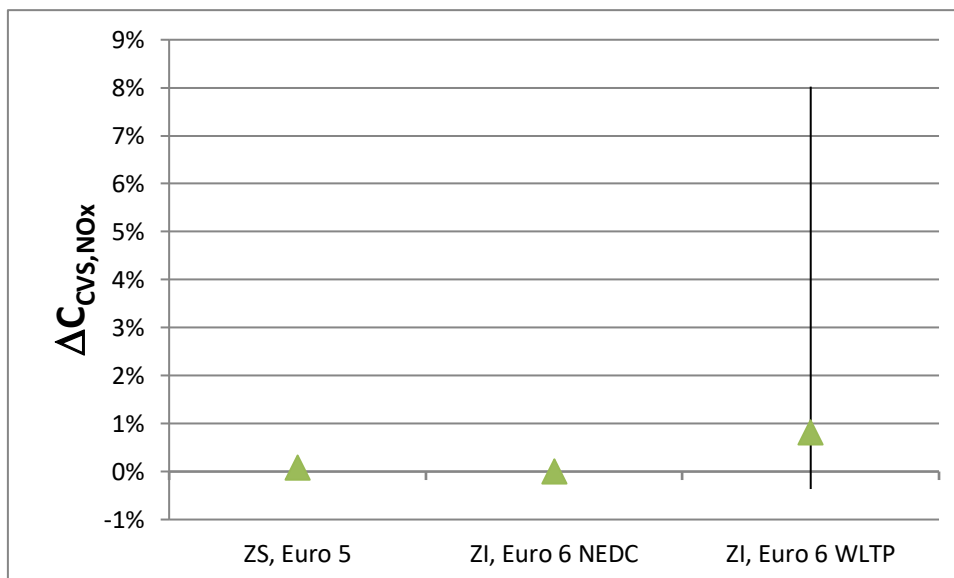
Na rysunkach 6.8–6.11 przedstawiono minimalną, maksymalną i średnią wartość względnej różnicy procentowej przy określaniu C_{CVS} , stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach skorygowanego o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, obliczonego z uwzględnieniem stopnia rozcieńczenia DR (2.6) i współczynnika rozcieńczenia DF (2.7) dla każdego zanieczyszczenia.



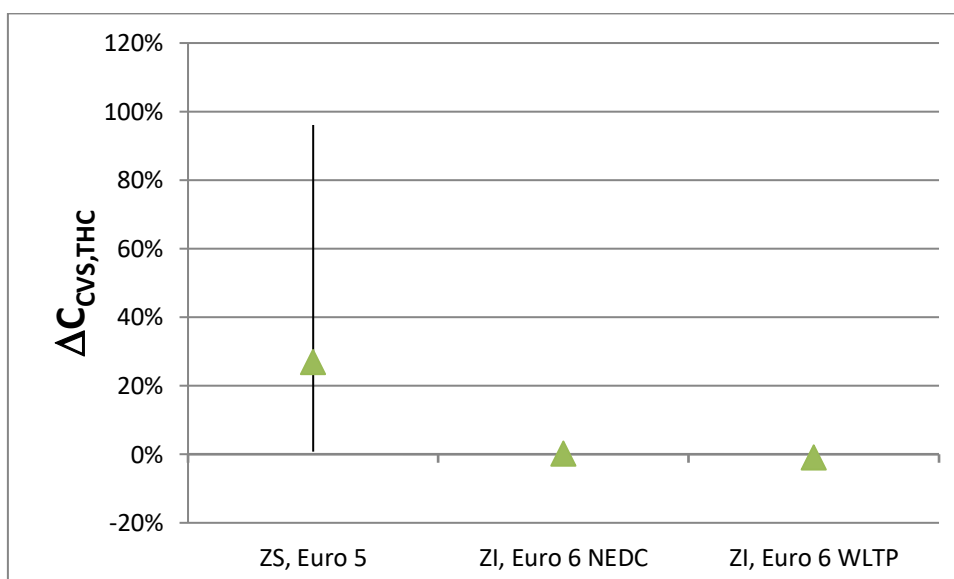
Rys. 6.8. Względna różnica procentowa ΔC_{cvS} stężenia CO_2 w rozcieńczonych spalinach, skorygowana o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym wynikająca z zastosowania w obliczeniach współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR



Rys. 6.9. Względna różnica procentowa ΔC_{cvS} stężenia CO w rozcieńczonych spalinach, skorygowana o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym wynikająca z zastosowania w obliczeniach współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR



Rys. 6.10. Względna różnica procentowa ΔC_{CVS} stężenia NO_x w rozcieńczonych spalinach, skorygowana o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym wynikająca z zastosowania w obliczeniach współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR



Rys. 6.11. Względna różnica procentowa ΔC_{CVS} stężenia THC w rozcieńczonych spalinach, skorygowana o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym wynikająca z zastosowania w obliczeniach współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR

W przypadku CO_2 , CO i NO_x , średnia względna różnica procentowa w określeniu stężenia tych zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach, skorygowana o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym była mniejsza niż 1% dla wszystkich badanych samochodów. Wartość tego błędu wynikała głównie z bliskich zeru wartości stężeń tych zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym. W takim przypadku nawet duży błąd w wyznaczeniu współczynnika rozcieńczenia DF ma znikomy wpływ na błąd w obliczaniu emisji zanieczyszczeń. W przypadku tych zanieczyszczeń błąd w określaniu emisji wynikający z obliczenia współczynnika rozcieńczenia DF zamiast współczynnika rozcieńczenia DR jest pomijalny. Drugim powodem jest duża różnica między stężeniem zmierzonym w rozcieńczonych spalinach i powietrzu rozcieńczającym (rys. 4.3). Występuje w większości faz cykli używanych w testach.

W przypadku THC względna różnica procentowa w określeniu stężenia tego zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowana o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, dla obu samochodów wyposażonych w silnik ZI jest również pomijalna. Mała wartość tej różnicy wynika z dużej różnicy między stężeniem zmierzonym w rozcieńczonych spalinach i powietrzu rozcieńczającym.

W przypadku THC dla samochodu z silnikiem ZS względna różnica procentowa w określeniu stężenia tego zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach, skorygowana o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, wynosi od 0,86% do 96,08%, a jego średnia wartość to 27%. W przypadku tego zanieczyszczenia głównym powodem wysokiej wartości tego błędu jest bardzo mała różnica między jego stężeniem w rozcieńczonych spalinach i w powietrzu rozcieńczającym. Tylko dla fazy miejskiej cyklu NEDC i fazy Low cyklu WLTC wartość tego błędu wynosi około 1%. Dla tych faz różnica między stężeniem zmierzonym w rozcieńczonych spalinach i powietrzu rozcieńczającym jest większa niż w pozostałych fazach, ponieważ w tych cyklach pomiar emisji THC następuje po rozruchu zimnego silnika.

6.4. Wskaźniki emisji zanieczyszczeń i roczna masa związku

W tabelach 6.1–6.3 przedstawiono względną różnicę procentową między wskaźnikami emisji zanieczyszczeń po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika określonych za pomocą zmodyfikowanej metody uwzględniającej stopień rozcieńczenia DR w stosunku do ich wskaźników określonych za pomocą dotychczas stosowanej metody pomiarowej uwzględniającej współczynnik rozcieńczenia DF .

Tabela 6.1. Względna różnica procentowa między wskaźnikami emisji (emisji drogowej zanieczyszczeń) po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika określonych za pomocą zmodyfikowanej metody uwzględniającej stopień rozcieńczenia DR w stosunku do ich wskaźników określonych za pomocą dotychczas stosowanej metody pomiarowej uwzględniającej współczynnik rozcieńczenia DF – samochód ZI, Euro 6 WLTP

Rodzaj ruchu	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
$b_{g,M}$	0,0%	0,0%	-1,1%	-1,0%	-1,1%	0,0%
$b_{g,P}$	-0,1%	-0,1%	-1,0%	-0,7%	-1,1%	-0,1%
$b_{g,A}$	0,0%	-0,4%	-2,5%	-1,3%	-3,6%	-0,1%

Tabela 6.2. Względna różnica procentowa między wskaźnikami emisji (emisji drogowej zanieczyszczeń) po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika określonych za pomocą zmodyfikowanej metody uwzględniającej stopień rozcieńczenia DR w stosunku do ich wskaźników określonych za pomocą dotychczas stosowanej metody pomiarowej uwzględniającej współczynnik rozcieńczenia DF – samochód ZI, Euro 6 NEDC

Rodzaj ruchu	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
$b_{g,M}$	0,0%	0,0%	0,6%	1,3%	0,2%	0,0%
$b_{g,P}$	0,0%	0,0%	0,5%	1,8%	0,2%	0,1%
$b_{g,A}$	0,0%	0,0%	-0,1%	-0,4%	-0,1%	-0,1%

Tabela 6.3. Względna różnica procentowa między wskaźnikami emisji (emisji drogowej zanieczyszczeń) po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika określonych za pomocą zmodyfikowanej metody uwzględniającej stopień rozcieńczenia DR w stosunku do ich wskaźników określonych za pomocą dotychczas stosowanej metody pomiarowej uwzględniającej współczynnik rozcieńczenia DF – samochód ZS, Euro 5

Rodzaj ruchu	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
$b_{g,M}$	17,2%	0,2%	29,2%	101,8%	7,0%	0,8%
$b_{g,P}$	-41,1%	0,1%	95,8%	67,1%	0,0%	0,3%
$b_{g,A}$	-100,0%	0,1%	31,7%	0,0%	31,7%	0,2%

Względna różnica procentowa między wskaźnikami emisji (emisji drogowej zanieczyszczeń) po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika określonych za pomocą zmodyfikowanej

metody uwzględniającej stopień rozcieńczenia DR w stosunku do ich wskaźników określonych za pomocą dotychczas stosowanej metody pomiarowej uwzględniającej współczynnik rozcieńczenia DF jest pomijalna dla obu samochodów wyposażonych w silniki ZI. Przyczyny tego zostały wyjaśnione w punkcie 5.3 niniejszej pracy. Natomiast w przypadku samochodu wyposażonego w silnik ZS różnicy tej nie można pominąć w przypadku emisji drogowej tlenku węgla, sumy węglowodorów, metanu i węglowodorów niemetanowych. Dla tych zanieczyszczeń różnica ta zawiera się między $-41,1\%$ a $101,8\%$. W przypadku wskaźnika $b_{g,A}$ dla tlenku węgla wartość względnej różnicy procentowej -100% wynika z bardzo małej wartości tego wskaźnika (bliskiej zero). W przypadku emisji drogowej dla NO_x i CO_2 różnice są również pomijalne. Małe wartości różnicy dla tych zanieczyszczeń wynikają z dużej różnicy między wartościami stężenia w rozcieńczonych spalinach i w powietrzu rozcieńczającym.

W tabelach 6.4 do 6.6 zamieszczono względną różnicę procentową między całkowitą roczną masą obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą uwzględniającą stopień rozcieńczenia DR w stosunku do całkowitej rocznej masy obliczonej na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą uwzględniającą współczynnik rozcieńczenia DF .

Tabela 6.4. Względna różnica procentowa między całkowitą roczną masą obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą uwzględniającą stopień rozcieńczenia DR w stosunku do całkowitej rocznej masy obliczonej na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą uwzględniającą współczynnik rozcieńczenia DF – samochód ZI, Euro 6 WLTP

Rodzaj ruchu	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
$m_{g,M}$	0,0%	0,0%	-1,1%	-1,0%	-1,1%	0,0%
$m_{z,M}$	0,0%	0,0%	-2,2%	0,0%	0,0%	0,0%
$m_{g,P}$	-0,1%	-0,1%	-1,0%	-0,7%	-1,1%	-0,1%
$m_{g,A}$	0,0%	-0,4%	-2,5%	-1,3%	-3,6%	-0,1%
m_C	-0,1%	0,0%	-1,1%	-0,8%	-1,2%	-0,1%

Tabela 6.5. Względna różnica procentowa między całkowitą roczną masą obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą uwzględniającą stopień rozcieńczenia DR w stosunku do całkowitej rocznej masy obliczonej na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą uwzględniającą współczynnik rozcieńczenia DF – samochód ZI, Euro 6 NEDC

Rodzaj ruchu	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
$m_{g,M}$	0,0%	0,0%	0,6%	1,3%	0,2%	0,0%
$m_{z,M}$	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
$m_{g,P}$	0,0%	0,0%	0,5%	1,8%	0,2%	0,1%
$m_{g,A}$	0,0%	0,0%	-0,1%	-0,4%	-0,1%	-0,1%
m_C	0,0%	0,0%	0,4%	1,1%	0,1%	0,0%

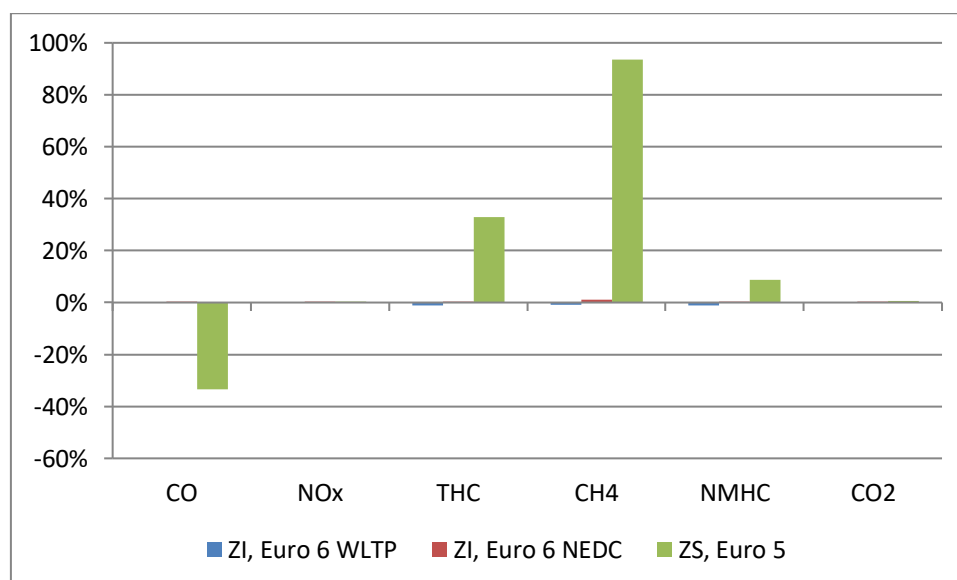
Tabela 6.6. Względna różnica procentowa między całkowitą roczną masą obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą uwzględniającą stopień rozcieńczenia DR w stosunku do całkowitej rocznej masy obliczonej na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą uwzględniającą współczynnik rozcieńczenia DF – samochód ZS, Euro 5

Rodzaj ruchu	CO	NO _x	THC	CH ₄	NMHC	CO ₂
$m_{g,M}$	17,2%	0,2%	29,2%	101,8%	7,0%	0,8%
$m_{z,M}$	14,3%	0,1%	29,0%	102,3%	9,8%	0,8%
$m_{g,P}$	-41,1%	0,1%	95,8%	67,1%	0,0%	0,3%
$m_{g,A}$	-100,0%	0,1%	31,7%	0,0%	31,7%	0,2%
m_C	-33,5%	0,1%	32,9%	93,7%	8,7%	0,6%

Dla obu badanych samochodów z silnikiem ZI oraz dla emisji tlenków azotu i dwutlenku węgla w przypadku samochodu z silnikiem ZS względna różnica procentowa między całkowitą roczną masą obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą uwzględniającą stopień rozcieńczenia DR a całkowitą roczną masą obliczoną na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą uwzględniającą współczynnik rozcieńczenia DF jest bliska zero. W związku z tym dla tych pojazdów i zanieczyszczeń wpływ stosowania w obliczeniach współczynnika rozcieńczenia DF jest pomijalny.

Natomiast w przypadku samochodu z silnikiem ZS względna różnica w masie węglowodorów, metanu i węglowodorów niemetanowych jest większa od zera i zawiera się w przedziale od 8,7% do 93,7%. Oznacza to, że całkowita roczna masa tych zanieczyszczeń obliczona na podstawie dotychczas stosowanej metody jest mniejsza od masy wyznaczonej na podstawie zmodyfikowanej procedury pomiarowej. Całkowita roczna masa tlenku węgla obliczona z wykorzystaniem stopnia rozcieńczenia DR jest o 33,5% mniejsza od wartości masy obliczonej z wykorzystaniem współczynnika rozcieńczenia DF . W przypadku tego zanieczyszczenia największy wpływ na różnice ma jego bardzo mała masa zmierzona w cyklach ARTEMIS ROAD i ARTEMIS MOTORWAY, na podstawie których zostały wyznaczone wskaźniki emisji związku w ruchu pozamiejskim i autostradowym.

Tak samo, jak w przypadku wskaźników emisji zanieczyszczeń, stosowanie w metodycie obliczeniowej współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR ma wpływ na wartość całkowitej rocznej masy tylko w przypadku tlenku węgla, sumy węglowodorów, metanu oraz węglowodorów niemetanowych dla samochodu wyposażonego w silnik ZS. W pozostałych przypadkach wpływ ten jest pomijalny (rys. 6.12).



Rys. 6.12. Względna różnica procentowa między całkowitą roczną masą obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą uwzględniającą stopień rozcieńczenia DR w stosunku do całkowitej rocznej masy obliczonej na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą uwzględniającą współczynnik rozcieńczenia DF

7. Zakończenie

7.1. Wnioski ogólne

Realizując pełny zakres pracy osiągnięto cel główny, którym było wykazanie wpływu na wskaźniki emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego stosowania w obliczeniach emisji zanieczyszczeń z układu wylotowego współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR .

Przeprowadzone badania wykazały, że stosowanie współczynnika rozcieńczenia DF zamiast stopnia rozcieńczenia DR prowadzi w niektórych przypadkach do powstawania błędu systematycznego określenia wskaźników emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego. Błąd ten stwierdzono w przypadku masy tlenu węgla, węglowodorów, metanu i węglowodorów niemetanowych samochodu wyposażonego w silnik ZS. Dla pozostałych zanieczyszczeń emitowanych przez samochód z silnikiem ZS, tzn. tlenków azotu i dwutlenku węgla, oraz dla obu badanych samochodów z silnikiem ZI błąd ten jest pomijalny.

Istnieją układy poboru spalin, dzięki którym możliwe jest zminimalizowanie tego błędu. Można je podzielić na trzy grupy umożliwiające:

- 1) zmniejszenie stopnia rozcieńczenia spalin, co pozwala zwiększyć różnicę między stężeniem danego zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach a jego stężeniem w powietrzu rozcieńczającym,
- 2) oczyścić powietrze rozcieńczające z mierzonych zanieczyszczeń,
- 3) zmierzyć rzeczywisty stopień rozcieńczenia spalin np. dzięki bezpośredniemu pomiarowi natężenia przepływu powietrza rozcieńczającego.

Układy te powinno się stosować szczególnie w przypadku badania samochodów o bardzo małej emisji zanieczyszczeń, które pozwalają w największym stopniu zminimalizować błąd wynikający ze stosowania w obliczeniach współczynnika rozcieńczenia DF .

7.2. Wnioski szczegółowe

Na podstawie rezultatów przeprowadzonych badań stwierdzono powstawanie błędu systematycznego obliczania masy, wynikającego z niespełnienia założenia o stechiometrycznym składzie mieszanki paliwowo-powietrznej, które zostało przyjęte do wyprowadzenia zależności na współczynnik rozcieńczenia DF . Dotyczy to szczególnie samochodów wyposażonych w silniki ZS. Dla badanego pojazdu mediana współczynnika λ w każdej z faz cyklu WLTC i NEDC oraz w cyklach ARTEMIS była większa od 1,5 i zawierała się w granicach 1,532–3,307. Tylko w fazie Medium cyklu WLTC mediana była mniejsza od 1,5 i wynosiła 1,230. Z tego powodu obliczone wartości współczynnika rozcieńczenia DF były obarczone błędem. Względna różnica procentowa między współczynnikiem rozcieńczenia DF a stopniem rozcieńczenia DR wynosiła w tym przypadku od 28% do 167%. Powodowało to nieprawidłowe wyznaczenie wartości stężenia zanieczyszczeń w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego o ich zawartość w powietrzu rozcieńczającym, co prowadziło do otrzymania błędnych wartości emisji zanieczyszczeń i w następstwie błędnych wartości ich wskaźników emisji.

Dla samochodu wyposażonego w silnik ZS względna różnica procentowa między wskaźnikami emisji zanieczyszczeń po rozruchu całkowicie rozgrzanego silnika określonych za pomocą zmodyfikowanej metody uwzględniającej stopień rozcieńczenia DR w stosunku do wskaźników emisji zanieczyszczeń określonych za pomocą dotychczas stosowanej metody pomiarowej uwzględniającej współczynnik rozcieńczenia DF zawierała się między –41,1% a 101,8%. Prowadzi to do nieprawidłowego oszacowania całkowitej rocznej masy dla tego pojazdu. Względna różnica procentowa między całkowitą emisją roczną obliczoną na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń wyznaczonych zmodyfikowaną metodą uwzględniającą stopień rozcieńczenia DR w stosunku do całkowitej emisji rocznej obliczonej na podstawie ich wskaźników wyznaczonych dotychczas stosowaną metodą uwzględniającą współ-

czynnik rozcieńczenia DF wynosiła od $-33,5\%$ dla CO do $93,7\%$ dla CH_4 . Nie stwierdzono natomiast wpływu stosowania współczynnika rozcieńczenia DF na całkowitą roczną masę dla badanych samochodów wyposażonych w silniki ZI.

Wpływ błędu systematycznego w obliczeniu współczynnika rozcieńczenia DF na wartość stężenia zanieczyszczenia w rozcieńczonych spalinach, skorygowanego o jego zawartość w powietrzu rozcieńczającym, jest tym większy, im jest mniejsza różnica między wartością stężenia w rozcieńczonych spalinach a stężeniem tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym oraz im większe jest stężenie tego zanieczyszczenia w powietrzu rozcieńczającym. W związku z tym bardzo istotny jest dobór optymalnego rozcieńczenia spalin w układzie poboru spalin, tak aby rozcieńczenie to było jak najmniejsze, ale na tyle duże, żeby uniknąć wykroplenia się pary wodnej w tym układzie. Równie istotne jest utrzymywanie jak najmniejszego stężenia mierzonych zanieczyszczeń w powietrzu rozcieńczającym. W większości mierzonych zanieczyszczeń stężenia te są bliskie zero i w tym przypadku nawet znaczny błąd w wyznaczeniu współczynnika rozcieńczenia DF nie będzie miał znaczącego wpływu na wynik pomiaru. Nie dotyczy to jednak sumy węglowodorów oraz metanu, a więc pośrednio i węglowodorów niemetanowych. Typowe wartości dla tych zanieczyszczeń w laboratorium wynoszą $2,5$ ppm dla THC i ok. $1,5$ ppm dla CH_4 .

W celu wyeliminowania błędu powstającego w wyniku określania rozcieńczenia spalin za pomocą współczynnika rozcieńczenia DF można zastosować układ poboru spalin, który pozwala na określenie rzeczywistej wartości rozcieńczenia. Jednym z takich układów jest system wyposażony w przepływomierz mierzący natężenie przepływu powietrza rozcieńczającego. Kolejną metodą, wykorzystaną w niniejszej pracy, jest pomiar stężenia dwutlenku węgla w spalinach oraz w rozcieńczonych spalinach. Ostatnią z metod może być pomiar natężenia przepływu spalin.

7.3. Wnioski perspektywiczne

Zastosowanie do określania wskaźników emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego zmodyfikowanej procedury pomiarowej, w której wykorzystuje się stopień rozcieńczenia DR zamiast współczynnika rozcieńczenia DF , pozwoli skorygować wartości masy węglowodorów, metanu i węglowodorów niemetanowych wyznaczonych dla pojazdów z silnikami ZS. Tym samym możliwe będzie bardziej dokładne szacowanie całkowitej rocznej masy tych zanieczyszczeń z samochodów osobowych i dostawczych wyposażonych w takie silniki.

7.4. Kierunki dalszych badań

Ze względu na ograniczenia finansowe i wynikające z posiadanej aparatury pomiarowej nie można było przeprowadzić szerszego zakresu prac. Badania zostały przeprowadzone na ograniczonej liczbie pojazdów. Posiadane wyposażenie pomiarowe nie pozwoliło sprawdzić innych metod określania rzeczywistego stopnia rozcieńczenia spalin. Również posiadane w laboratorium Instytutu Transportu Samochodowego analizatory przystosowane są głównie do pomiarów stężenia zanieczyszczeń w próbce zgromadzonej w workach, a więc do pomiarów statycznych. W związku z tym perspektywicznie istnieje konieczność przeprowadzenia dalszych badań, które powinny skupić się na następujących zagadnieniach:

- 1) przeprowadzenie badań na większej liczbie pojazdów wyposażonych w silniki ZS w celu wyznaczenia skorygowanych wartości wskaźników emisji węglowodorów, metanu, węglowodorów niemetanowych oraz tlenu węgla dla tych pojazdów,
- 2) przeprowadzenie badań emisji zanieczyszczeń po rozruchu zimnego i częściowo nagrzanego silnika samochodu kondycjonowanego w różnych temperaturach otoczenia w celu określenia korekcji współczynników e^z/e^g ,

- 3) sprawdzenie wpływu czasu odpowiedzi analizatorów dwutlenku węgla na dokładność określania stopnia rozcieńczenia DR , i analizę konieczności stosowania w zmodyfikowanej procedurze pomiarowej analizatorów o krótszym czasie odpowiedzi,
- 4) porównanie różnych metod określania stopnia rozcieńczenia DR w celu optymalnego wyboru rodzaju układu poboru spalin.

Literatura

- [1] *Ramowa konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzona w Nowym Jorku dnia 9 maja 1992 r.* DzU 1996 nr 53 poz. 238.
- [2] *Konwencja w sprawie transgranicznego zanieczyszczenia powietrza na dalekie odległości.* Genewa, 1979. DzU z dnia 28 grudnia 1985.
- [3] *Protokół do Konwencji z 1979 r. w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości, dotyczący długofalowego finansowania wspólnego programu monitoringu i oceny przenoszenia zanieczyszczeń powietrza na dalekie odległości w Europie.* Genewa, 1984. DzU z dnia 27 grudnia 1988 r.
- [4] Eggleston, H. S.; Gorissen, N.; Joumard, R.; Rijkeboer, R. C.; Samaras, Z.; Zierock, K. H. *Corinair Working Group on Emissions Factors for Calculating 1985 Emissions from Road Traffic. Volume 1: Methodology and Emission Factors.* 1989. Final report contract No 88/6611/0067, EUR 12260 EN.
- [5] Eggleston, H. S.; Gaudioso, D.; Gorissen, N.; Joumard, R.; Rijkeboer, R. C.; Samaras, Z.; Zierock, K. H. *Corinair Working Group on Emissions Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic. Volume 1: Methodology and Emission Factors. Final report.* European Commission, 1993. ISBN 92–826–5571–X.
- [6] Andrias, A.; Zafiris, D.; Samaras, Z.; Zierock, K. H. *CORINAIR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic. Volume 2: COPERT – Computer programme to calculate emissions from road traffic – User's manual. Final report.* Bruksela: European Commission, 1993. ISBN 92–826–5572–X.
- [7] Joumard, R.; Jost, P.; Hickman, J.; Hassel, D. *Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration.* The Science of the Total Environment, Tom 169, Wydania 1–3, 1995, 167–174. ISSN 0048–9697, [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04645-H](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04645-H)
- [8] INFRAS. *Workbook / Handbook on emission factors for road transport, version 1.* Bern; Berlin; Bern: INFRAS; Umwelbundesamt; Bundesamt fuer Umwelt, Wald und Landschaft, 1995.
- [9] Hassel, D.; Jost, P.; Weber, F. *Abgas-Emissionsfaktoren von Pkw in der Bundesrepublik Deutschland – Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990.* Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1994. ISBN 3–503–03683–0.
- [10] Hassel, D. *Emission factors for heavy duty vehicles.* Bruksela : European Commission, DG VII, 1995. EUCO–COST/319/2/95.
- [11] Joumard, R. *COST 319 Estimation of pollutant emissions from transport. Final report of the action.* Luxembourg: Directorate General Transport. Publications Office of the European Union, 1999.
- [12] EMEP Task Force on Emission Inventories. *Atmospheric emission inventory guidebook. First Edition.* Europejska Agencja Środowiska: Kopenhaga 1996.
- [13] UNECE/EMEP Task Force on Emission Inventories and Projections. *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 3rd edition. October 2002 UPDATE.* Europejska Agencja Środowiska: Kopenhaga 2002
- [14] EMEP Task Force on Emission Inventories and Projections. *Atmospheric emission inventory guidebook. December 2006 UPDATE.* Europejska Agencja Środowiska: Kopenhaga 2006.

- [15] EMEP Task Force on Emission Inventories and Projections. *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook. December 2007 UPDATE*. Europejska Agencja Środowiska: Kopenhaga 2007.
- [16] EMEP Task Force on Emission Inventories and Projections. *The EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*. Technical Report No. 9/2009; Europejska Agencja Środowiska: Kopenhaga 2007.
- [17] CLRTAP Task Force on Emission Inventories and Projections. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Technical report 12/2013*. Europejska Agencja Środowiska: Kopenhaga 2013. ISSN 1725–2237.
- [18] Europejska Agencja Środowiska. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories*. EEA Report No. 21/2016; Publications Office of the European Union, Luxembourg 2016. ISSN 1977–8449.
- [19] Europejska Agencja Środowiska. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories*. EEA Report No. 13/2019; Publications Office of the European Union, Luxembourg 2019. ISSN 1977–8449.
- [20] Europejska Wspólnota Gospodarcza. *Dyrektywa Rady z dnia 26 czerwca 1991 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 emisje z pojazdów ...* Dyrektywa 91/441/EWG.
- [21] Boulter, P. G.; McCrae, I. S. *ARTEMIS: Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems – final report*. TRL Limited: Wokingham, 2007. ISSN 0968–4093
- [22] Hickman, J.; Hassel, D.; Joumard, R.; Samaras, Z.; Sorenson, S. *Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. Deliverable 22 for the project MEET*. Report No. SE/491/98; Transport Research Laboratory: Crowthorne 1999.
- [23] UN Regulation No. 83. Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Emission of Pollutants According to Engine Fuel Requirements. Revision 5, 07 Series of Amendments to the Regulation. Available online: <https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-81-100> (accessed on 22 January 2015).
- [24] Unia Europejska. *Commission Regulation (EU) 2017/1151 of 1 June 2017 supplementing Regulation (EC) No. 715/2007 of the European Parliament and of the Council on Type-Approval of Motor Vehicles with Respect to Emissions from Light Passenger and Commercial Vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on Access to Vehicle Repair and Maintenance Information, Amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No. 1230/2012 and Repealing Commission Regulation (EC) No. 692/2008 (Text with EEA Relevance)*; Unia Europejska: Bruksela 2017; Vol. 175, p. 1.
- [25] Code of Federal Regulations. Protection of Environment; Part 86; Code of Federal Regulations: Washington 1996, p. 144.
- [26] Hood, J.F.; Silvis W. M. *Predicting and Preventing Water Condensation in Sampled Vehicle Exhaust for Optimal CVS Dilution*. SAE Technical Paper 980404; SAE International: Warrendale 1998. <https://doi.org/10.4271/980404>.

- [27] Nagy, D. B.; Loo, J.; Tulpa, J.; Schroeder, P.; Middleton, R.; Morgan, C. *Evaluation of the Bag Mini-Diluter and Direct Vehicle Exhaust Volume System for Low Level Emissions Measurement*. SAE Technical Paper 2000-01-0793; SAE International: Warrendale 2000. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0793>.
- [28] Thiel, W.; Decker, H-J.; Van Damme, S. *Progress in CVS Techniques – A Variable Flow CVS*. SAE Technical Paper 940966; SAE International: Warrendale 1994. <https://doi.org/10.4271/940966>
- [29] Kaori Inoue; Masaaki Ishihara; Kotaro Akashi; Masayuki Adachi; Kozo Ishida. *Numerical Analysis of Mass Emission Measurement Systems for Low Emission Vehicles*. SAE Technical Paper 1999-01-0150; SAE International: Warrendale 1999. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0150>
- [30] Commiskey, F. *Advanced Emission Test Facility in Ann Arbor*. Horiba Technical Report. 19 września 1999
- [31] Guenther, M.; Henney, T.; Silvis, W. M.; Shigeru Nakatani; Dien-Yeh Wu. *Improved Bag Mini-Diluter Sampling System for Ultra-Low Level Vehicle Exhaust Emissions*. SAE Technical Paper 2000-01-0792; SAE International: Warrendale 2000. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0792>.
- [32] Silvis, W. M.; Harvey, R. N.; Dageforde A. F. *A CFV Type Mini-dilution Sampling System for Vehicle Exhaust Emissions Measurement*. SAE Technical Paper 1999-01-0151; SAE International: Warrendale 1999. <https://doi.org/10.4271/999-01-0151>.
- [33] Sherman, M. T.; Lennon K.; Chase, R. E. *Error Analysis of Various Sampling Systems*. SAE Technical Paper 2001-01-0209; SAE International: Warrendale 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0209>.
- [34] Whitby, R. *NY I/M Program Calculation of Tailpipe Exhaust Concentrations from CVS Dilution Tunnel Dilute Exhaust Concentrations and Development of the NY Dilution Factor for Mass Emission Measurements*. Albany: New York State Department of Environmental Conservation, Bureau of Mobile Sources, Automotive Emissions Laboratory, 1997.
- [35] Austin, T. C.; Caretto, L. S. *Improving the Calculation of Exhaust Gas Dilution During Constant Volume Sampling*. SAE Technical Paper 980678; SAE International: Warrendale 1998. <https://doi.org/10.4271/980678>.
- [36] Radian Corporation Report. *Vehicle Exhaust Dilution Correction Procedure, Radian Corporation Report submitted to California Bureau of Automotive Repair*. Warrendale: SAE International, 1994.
- [37] Behrendt, H.; Moersch, O.; Seiferth, C.T.; Seifert, G.E.; Wiebrecht, J.W. *Studies on Enhanced CVS Technology to Achieve SULEV Certification*; SAE Technical Paper 2002-01-0048; SAE International: Warrendale 2002. <https://doi.org/10.4271/2002-01-0048>.
- [38] Szczotka, A. *Analiza dokładności metody pomiarów składników spalin w testach na hamowni podwoziowej*. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Poznań 2004.
- [39] Silvis, W. M.; Chase, R. E. *Proportional Ambient Sampling: A CVS Improvement for ULEV and Lean Engine Operation*. SAE Technical Paper 1999-01-0154; SAE International: Warrendale 1999. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0154>.
- [40] Andre, M.; Rapone, M.; Joumard, R. *Analysis of the cars pollutant emissions as regards driving cycles and kinematic parameters*. 2006. INRETS-LTE 0607.
- [41] Andre, M. *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles*. 2004. INRETS-LTE 0411.

- [42] KOBIZE. *Dane o liczbie pojazdów oraz ich przebiegach rocznych w latach 1990–2020*. Dane Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa 2021.
- [43] Radzimirski, S.; Majerczyk, A.; Taubert, S. *Analiza emisji zanieczyszczeń z samochodów w warunkach ruchu miejskiego i na szosach oraz po autostradzie*. Praca ITS nr 7004/POŚ, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 1998.
- [44] Radzimirski, S.; Majerczyk, A.; Taubert, S. *Określenie emisji zanieczyszczeń z niskoemisyjnych silników spalinowych pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Zadanie 2. Badania warunków ruchu pojazdów na drogach*. Praca ITS nr 9.0816.2, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 1999.
- [45] Transprojekt. *Ruch drogowy 1990*. Transprojekt, Warszawa 1992.
- [46] Biuro Projektowo–Badawcze Dróg i Mostów. *Generalny pomiar ruchu w 1995 r. Synteza wyników*. Transprojekt–Warszawa Sp. z o.o., Warszawa 1996.
- [47] Opoczyński, K. *Generalny pomiar ruchu 2005. Synteza wyników*. Transprojekt–Warszawa, Warszawa 2006.
- [48] Opoczyński, K. *Synteza wyników GPR 2010*. Transprojekt–Warszawa, Warszawa 2011.
- [49] Opoczyński, K. *Synteza wyników GPR 2015 na zamiejskiej sieci dróg krajowych*. Transprojekt–Warszawa, Warszawa 2016.
- [50] Wybór Kierowców. Budowa dróg w Polsce: przez 15 lat powstało 4,5 tys. kilometrów nowych tras! *Wybór Kierowców*. [Online] 30.11.2018. [Zacytowano: 24.05.2021.] <https://www.wyborkierowcow.pl/budowa-drog-w-polsce-przez-15-lat-powstalo-45-tys-kilometrow-nowych-tras/>.
- [51] Rynek Infrastruktury. Polska 12 w Europie pod względem długości autostrad. www.rynekinfrastruktury.pl. [Online] 20.08.2018. [Zacytowano: 24.05.2021] <https://www.rynekinfrastruktury.pl/mobile/polska-12-w-europie-pod-wzglem-dlugosci-autostrad-63987.html>.
- [52] Taubert, S.; Grzelak, P. *Consumption of gasoline in vehicles equipped with an LPG retrofit system in real driving conditions*. Open Engineering 2021.
- [53] Zeman, F. *Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment*. Woodhead Pub: Cambridge 2012.
- [54] Koltsakis, G. C.; Kandylas, I. P.; Stamatelos, A. M. *Three-way Catalytic Converter Modeling and Applications*. Chem. Eng. Commun, 1998, 153–189.
- [55] *The Three-Way Catalytic Converter*. Monachium: The Open University, 2019.
- [56] Gis, W.; Taubert, S. *The Issues of the Air–Fuel Ratio in Exhaust Emissions Tests Carried out on a Chassis Dynamometer*. Energies 2021, 14, 2360. <https://doi.org/10.3390/en14092360>