

Od autora

Szczególne słowa podziękowania pragnę złożyć Promotorowi, Panu Profesorowi Marcinowi Ślęzakowi za opiekę, twórczą inspirację i za wniesienie wielu cennych uwag do pracy.

**Metoda syntezyowania laboratoryjnego testu emisji
spalin z silników samochodowych na podstawie
badań drogowych**

mgr inż. Piotr Wiśniowski

Promotor
dr hab. inż. Marcin Ślęzak, prof. ITS

Spis treści	
Streszczenie	7
Abstract	8
Wykaz skrótów i symboli.....	9
Wstęp	11
1. Emisja spalin silnikowych jako zagrożenie dla środowiska	13
1.1. Rozwój norm i badań emisji spalin	13
1.2. Źródła emisji spalin i ich wpływ na środowisko	15
1.3. Substancje szkodliwe w spalinach	20
2. Mechanizm powstawania toksycznych składników spalin	
 i zależność emisji od parametrów pracy silnika	28
2.1. Cząstki stałe.....	29
2.2. Tlenki azotu.....	31
2.3. Tlenek węgla	34
2.4. Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych	
a parametry ruchu drogowego	36
3. Stanowiskowe i eksploatacyjne badania emisji toksycznych	
 składników spalin silnikowych	43
3.1. Standardowe testy jezdne	43
3.2. Testy drogowe RDE (<i>Real Drive Emission</i>)	53
4. Prace badawcze nad opracowaniem testów jezdnych	56
4.1. Badania emisji spalin w testach opracowanych według	
zasady wiernej symulacji w dziedzinie czasu	56
4.2. Badania korelacji emisji zanieczyszczeń i stanów	
pracy silnika	58
4.3. Analiza warunków pracy pojazdów w testach	
homologacyjnych	61
4.4. Synteza testów jezdnych według kryteriów	
podobieństwa charakterystyk częstotliwościowych	64
4.5. Eksploatacyjne badania emisji spalin z wykorzystaniem	
sygnału przepływomierza powietrza	68
4.6. Badania zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych	
w zróżnicowanych warunkach ruchu drogowego	70
5. Cel, teza i zakres prac badawczych.....	73
6. Metoda odwzorowania eksploatacyjnego profilu	
 prędkości jazdy	75
6.1. Podstawy teoretyczne analizy przebiegu prędkości	
jazdy jako procesu stochastycznego	75

6.1.1. Dobór metody filtrowania przebiegu prędkości pojazdu.....	75
6.1.2. Splot z prostokątnym oknem czasowym	79
6.1.3. Podsumowanie.....	82
6.2. Autorska metoda syntezy testów jezdnych.....	82
6.2.1. Metoda odwzorowania warunków drogowych.....	82
6.2.2. Koncepcja proponowanej metody	83
6.2.3. Analiza wzorcowego przebiegu prędkości pojazdu	84
6.2.4. Synteza przebiegu prędkości w teście jezdnym	95
7. Badania profilu prędkości jazdy i emisji substancji toksycznych w warunkach eksploatacyjnych	102
7.1. Metodyka badań w warunkach eksploatacyjnych	102
7.2. Wyniki badań eksploatacyjnych.....	108
8. Badanie emisji spalin na hamowni podwoziowej	113
8.1. Metodyka badań stanowiskowych.....	113
8.2. Wyniki testów „bezpośrednich”	115
8.3. Wyniki testów syntetycznych.....	130
8.4. Dyskusja wyników badań stanowiskowych i eksploatacyjnych	145
8.4.1. Wyniki badań.....	145
8.4.2. Koncepcja weryfikacji metody syntezy testów jezdnych.....	147
8.4.3. Test istotności statystycznej	148
8.4.4. Dyskusja wyników badań.....	149
9. Podsumowanie	156
Literatura	158
Wykaz ilustracji.....	164
Wykaz tabel	171
Załącznik	172

Piotr Wiśniowski

Metoda syntezyzowania laboratoryjnego testu emisji spalin z silników samochodowych na podstawie badań drogowych

Streszczenie

Praca dotyczy rozwoju metod kontroli emisji zanieczyszczeń w spalinach samochodowych, w sposób zgodny z warunkami eksploatacyjnymi, poprzez doskonalenie testów jezdnych. Na podstawie studium literatury wykazano, że poprawa reprezentatywności (dokładności) testów jezdnych powinna opierać się na odpowiednim wprowadzeniu czynnika losowego w programowaniu prędkości testowanego pojazdu.

W pracy przedstawiono autorską metodę syntezy testów emisji spalin na hamowni podwoziowej. Opracowana metoda polega na przenoszeniu do programu laboratoryjnego testu jezdne zlinearyzowanych prędkości pojazdu aproksymujących rzeczywiste odcinki jazdy, przy czym spełniony jest warunek ciągłości funkcji prędkości.

Dzięki spełnieniu warunków ciągłości zsyntezowanych odcinków, istotną cechą metody jest możliwość losowego wyboru kolejności ich realizacji w teście. Odpowiada to losowemu charakterowi warunków istniejących w ruchu rzeczywistym przy jednoczesnym zachowaniu podobieństwa emisji zanieczyszczeń.

W pracy zweryfikowano doświadczalnie skuteczność zaproponowanej metody. Wykonano serię przejazdów na wyznaczonej trasie w rzeczywistym ruchu drogowym, rejestrując parametry pracy pojazdu doświadczalnego oraz emisję spalin przy wykorzystaniu mobilnego analizatora. Następnie samochód umieszczono na stanowisku laboratoryjnym i mierzono emisję spalin analizatorami stacjonarnymi. Przeprowadzono testy jezdne programowane według rzeczywistego przebiegu prędkości eksploatacyjnej samochodu (tzw. testy „bezpośrednie”) oraz „testy syntetyczne” programowane według autorskiej metody. Stwierdzono istotną zgodność między badaniami drogowymi i laboratoryjnymi.

Piotr Wiśniowski

**The method of synthesizing of the laboratory test of exhaust emission
from car engines based on road tests**

Abstract

The work concerns the development of methods of controlling of emission of pollutants contained in automotive exhaust gas, in accordance with operating conditions, by improving driving tests. On the basis of the literature study it has been shown that the improvement of the representativity (accuracy) of the mobile test should be based on the appropriate implementation of the random factor in the speed programming of the tested vehicle.

The dissertation presents the author's method of synthesizing of emission tests on the chassis dynamometer. The developed method involves transferring the linear velocity of the vehicle approximating the actual driving sections to the test program, while the condition of the continuity of the speed function is fulfilled.

Thanks to the continuity of the synthesized sections, an important feature of the method is the possibility of random selection of the order of their implementation in the test. This corresponds to the random nature of the conditions existing in real traffic while maintaining the similarity of pollutant emissions.

In this work, the effectiveness of the proposed method has been experimentally verified. A series of measurements on a designated route in real traffic was made, with recording the operating parameters of the experimental vehicle and the exhaust emissions using a mobile analyzer. The car was then placed in a laboratory station and exhaust emissions were measured using stationary analyzers. Road tests, programmed according to the actual running speed of the car have been carried out (so-called "direct" tests) and "synthetic tests" programmed according to the author's method. Significant correlation was found between road and laboratory tests.

Wykaz skrótów i symboli

CADC	– <i>Common Artemis Driving cycles</i> – cykle jezdne Artemis
ECE	– <i>European Driving Cycle</i> – miejski cykl jezdny
ECU	– <i>Electronic Central Unit</i> – elektroniczny moduł sterujący
EEA	– <i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiska
EPA	– <i>Environmental Protection Agency</i> – Agencja Ochrony Środowiska
EUDC	– <i>Extra-Urban Driving Cycle</i> – miejski cykl jezdny o zwiększonej prędkości
$f(V_1, V_2, t)$	– funkcja opisująca liczbę linii podobnych do linii wzorcowej
FID	– <i>flame ionization detector</i> – analizator płomieniowo-jonizacyjny
FTP	– <i>Federal Test Procedure</i> – federalny test jezdny (USA)
G	– widmowa gęstość mocy
G	– zbiór wartości dla których występują punkty graniczne
HWFET	– <i>Highway Fuel Economy Test</i> – autostradowy test zużycia paliwa
IM240	– cykl inspekcji i dopuszczenia do jazdy
j	– związek toksyczny dla którego wyznaczono wskaźnik emisji
JP10	– japońskie cykle jezdne
L	– liczba odcinków podobnych do danego typu odcinka
LA92	– kalifornijski test hamowniany
M	– bezwymiarowy wskaźnik toksyczności
M	– macierz odcinków przebiegu prędkości
m	– liczba typów odcinków
MAV	– metoda uśredniania okien pomiarowych
M_e	– moment obrotowy
m_j^1	– prędkość początkowa odcinka
m_j^2	– prędkość końcowa odcinka
m_j^3	– czas trwania odcinka
m_{um}	– masa własna pojazdu
n	– prędkość obrotowa
N	– numer kolejnego typu odcinka
NDIR	– <i>non-dispersive infrared</i> – niedyspersyjny na podczerwień
NDUV	– <i>non-dispersive ultraviolet</i> – niedyspersyjny na ultrafiolet
NEDC	– <i>New European Driving Cycle</i> – europejski cykl jezdny
NLZO	– niemetanowe lotne związki organiczne
NO_x	– tlenki azotu
NRTC	– <i>Non-Road Transient Cycle</i> – cykl jezdny dla pojazdów nie drogowych
NYCC	– <i>New York City Cycle</i> – test jezdny odwzorowujący parametry ruchu w Nowym Jorku

OBD	– <i>on-board diagnostic</i> – system diagnostyki pokładowej
P_0	– ciśnienie cząstkowe odpowiednich składników
PEMS	– <i>portable emissions measurement systems</i> – mobilne analizatory spalin
PM	– <i>particulate matter</i> – cząstki stałe
P_{RATED}	– moc znamionowa silnika
P_{RM}	– współczynnik określający stosunek mocy znamionowej silnika do masy własnej pojazdu
RDE	– <i>Real Driving Emission</i> – pomiar emisji w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego
Rw	– rodnik węglowodorowy
SFTP SC03	– <i>Supplemental Federal Test Procedure SC03</i> – amerykański test miejski przy włączonej klimatyzacji
SFTP US06	– <i>Supplemental Federal Test Procedure US06</i> – amerykański test miejski o zwiększonej prędkości
SORT	– <i>Standardised On-Road Test Cycles</i> – znormalizowane testy zużycia paliwa w ruchu miejskim autobusu
T	– temperatura absolutna
T	– macierz typów odcinków
TRL WSL	– cykl jezdny wykorzystywany w laboratorium w Warren Spring
UG214	– cykl jezdny wykorzystywany przez Departament Transportu w Wielkiej Brytanii
U_{min}, U_{max}	– granice przedziału zgodności
WIS-PM	– <i>water-insoluble particulate matter</i> – cząstki nierozpuszczalne w wodzie
WLTC	– <i>World Harmonised Light Duty Vehicle Test Cycle</i> – ujednolicony światowy test dynamiczny
WLTP	– <i>World Harmonized Light Duty Vehicle Test Procedure</i> – ujednolicone procedury testów dla pojazdów lekkich
WS-PM	– <i>water-soluble particulate matter</i> – cząstki rozpuszczalne w wodzie
ZI	– zapłon iskrowy
ZS	– zapłon samoczynny
$\beta, \alpha, \varepsilon$	– stosunek molowy węgla, wodoru, tlenu do węgla w zastępczej cząsteczce paliwa
ϵ_q	– błąd kwantowania
λ	– współczynnik nadmiaru powietrza
$\Sigma(L/N)$	– udział wykorzystanych odcinków
ϕ	– kąt obrotu wału korbowego
α	– operator przypisania

Wstęp

Badania ekologicznych właściwości samochodowych silników spalinowych prowadzi się niemal na każdym etapie cyklu istnienia pojazdów. Badania prowadzi się w fazie opracowywania koncepcji silnika (podstawowe badania poznawcze), w fazie projektowania (w ramach badań prototypowych), w fazie produkcji (podczas kontroli jakości), na etapie dopuszczania do ruchu (badania homologacyjne) oraz w fazie eksploatacji (badania diagnostyczne). Celem tych wszystkich badań jest określenie emisji zanieczyszczeń w spalinach silnika w zadanych warunkach. Cel ten jest realizowany w testach hamownianych, w których odwzorowuje się różne warunki pracy silnika. W wielu przypadkach korzystne jest przygotowanie takich warunków, które najlepiej odwzorują rzeczywiste warunki drogowe.

Dotychczasowe prace badawcze poświęcone tematyce reprezentatywności testów stanowiskowych względem warunków drogowych wymagają uszczegółowienia i wyjaśnienia stosowanych uproszczeń. Symulowanie warunków ruchu jeźdnego podczas stacjonarnych badań na hamowni podwoziowej jest zadaniem trudnym z uwagi na liczne czynniki losowe. Obecnie stosowane testy jezdne znakomicie nadają się do badań porównawczych, mających na celu wyznaczenie wartości emisji poszczególnych składników spalin podczas ściśle określonych warunków pracy silnika. Nie są to jednak testy wiernie reprezentujące rzeczywiste warunki ruchu drogowego lecz raczej pewnego rodzaju wzorce do badań emisji. Należałoby zatem stworzyć taki test stanowiskowy, który powstałby na podstawie zmierzonych parametrów pracy reprezentatywnej grupy pojazdów w ruchu rzeczywistym oraz dodatkowo wprowadzić czynnik losowy podczas budowy testu. Czynnik ten nie może doprowadzić jednak do całkowitej losowości otrzymanego testu.

W niniejszej pracy zaproponowano model matematyczny syntezywania takiego testu. Danymi wejściowymi są zarejestrowane parametry ruchu drogowego pojazdu a wyjściowymi zbiory odcinków reprezentujących fragmenty przebiegów pojazdu, z których następnie generowany jest w sposób losowy test syntetyczny. Takie podejście ma zapewnić unikatowość każdego wygenerowanego testu, przy zachowaniu reprezentatywności emisji. Pozwala to na stworzenie warunków symulujących ruch drogowy na stanowisku laboratoryjnym.

W pracy zweryfikowano skuteczność zaproponowanej metody. Wykonano szereg przejazdów na wyznaczonej trasie badawczej w ruchu rzeczywistym, rejestrując parametry pracy pojazdu oraz emisję spalin przy wykorzystaniu mobilnego analizatora. Następnie samochód umieszczono na stanowisku laboratoryjnym i zmierzono emisję z układu wylotowego za pomocą analizatorów stacjonarnych. Hamownia podwoziowa podczas badań była zaprogramowana według danych o rzeczywistym ruchu pojazdu zgromadzonych

w trakcie poprzednich pomiarów. Kolejnym etapem pracy było wygenerowanie testów syntetycznych w oparciu o dane o ruchu rzeczywistym oraz wyniki serii pomiarów emisji z układu wylotowego na stanowisku laboratoryjnym. Wyniki poszczególnych rodzajów testów potwierdziły skuteczność proponowanej metody.

1. Emisja spalin silnikowych jako zagrożenie dla środowiska

1.1. Rozwój norm i badań emisji spalin

Spaliny, to według definicji mieszanina gazów powstających w procesie spalania paliwa, w skład której wchodzi:

- produkty reakcji chemicznej utleniania paliwa przy spalaniu zupełnym,
- produkty reakcji chemicznej utleniania paliwa przy spalaniu niezupełnym,
- produkty reakcji chemicznej syntezy w obszarze reakcji utleniania, zachodzące pomiędzy składnikami aktywnymi paliwa, składnikami nieaktywnymi paliwa, towarzyszącymi gazami obojętnymi oraz częściowymi produktami reakcji chemicznych pojawiającymi się w trakcie reakcji utleniania i reakcji innych syntez,
- niewykorzystana część substancji aktywnych paliwa w postaci gazowej lub pary,
- gazy obojętne np. niepalne składniki powietrza [75].

Wraz z rozwojem motoryzacji, zaczęto przyglądać się zagadnieniu zanieczyszczenia powietrza szkodliwymi substancjami spalin i zauważać narastającą skalę problemu. Podjęto więc decyzję o wprowadzeniu limitów emisji. W Europie kontrola związków szkodliwych w spalinach samochodowych rozpoczęła się w krajach Unii Europejskiej w 1970 roku wraz z wydaniem Dyrektywy o numerze 70/220/EWG z dnia 6.04.1970 roku. W Dyrektywie tej określono pierwsze limity emisji tlenu węgla i węglowodorów oraz sposoby dokonywania ich pomiaru [6].

Dyrektywa ta była następnie kilkadziesiąt razy modyfikowana i doczekała się 25 skonsolidowanych wersji, z których każda następna wprowadzała kolejne obostrzenia odnośnie emisji. Obecnie obowiązujące, powstałe w wyniku kolejnych modyfikacji Dyrektywy 70/220/EWG, rozporządzenie 2007/15/EC określa przepisy, jakie muszą spełniać wprowadzane na rynek pojazdy spełniające obowiązujące normy Euro 5 i Euro 6.

Pierwsza z serii obowiązujących obecnie norm Euro, została wprowadzona w 1993 Dyrektywą 91/441/EC dla samochodów osobowych oraz dla osobowych i lekkich samochodów ciężarowych. Ograniczenia te zostały nazwane Euro 1. W 1996 roku Dyrektywą 94/12/EC wprowadzono Euro 2 dla samochodów osobowych. Następnie od 2000 obowiązywała kolejna norma – Euro 3, zaprezentowana w Dyrektywie 98/69/EC, obowiązująca już dla wszystkich pojazdów. Norma Euro 4 powstała w 2005, wprowadzona Dyrektywą 98/69/EC także dla wszystkich pojazdów. W roku 2009 weszła w życie norma Euro 5, opisana rozporządzeniem 2007/715/EC. Obejmuje ona samochody lekkie osobowe i służbowe. Obecnie obowiązująca, wprowadzona w 2014 roku norma Euro 6 opisana jest rozporządzeniem 2012/459/EC.

Poniżej przedstawiono wartości dopuszczalnych emisji niepożądanych składników spalin we wszystkich normach Euro (tab. 1.1 i tab. 1.2).

Tab. 1.1. Dopuszczalne wartości emisji spalin w poszczególnych normach Euro dla pojazdów z silnikiem o ZI

Emisja [g/km]	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
CO	2,72	2,2	2,3	1	1	1
HC	-	-	0,2	0,1	0,1	0,1
NO_x	-	-	0,15	0,08	0,06	0,06
HC + NO_x	0,97	0,5	-	-	-	-
PM	-	-	-	-	0,005	0,005

W przypadku samochodów z silnikami o zapłonie iskrowym, pierwsza i druga norma emisji Euro określały dopuszczalne wartości emisji tlenku węgla i sumy węglowodorów oraz tlenków azotu. Dla tlenku węgla były to odpowiednio 2,72 g/km w przypadku Euro 1 i 2,2 g/km dla Euro 2. Dopuszczalna wartość węglowodorów i tlenków azotu wynosiła odpowiednio 0,97 i 0,05 g/km. Kontrola nie podlegała zawartość cząstek stałych w spalinach, która została objęta limitami dopiero od pojawienia się przepisów Euro 5 i 6 dla których wynosi 0,005 g/km, dla silników z wtryskiem bezpośrednim.

Od rozpoczęcia obowiązywania Euro 3 rozdzielono emisję sumy węglowodorów i tlenków azotu na wartość emisji węglowodorów i wartość emisji tlenków azotu. Dla Euro 3 wartości te wynosiły odpowiednio 0,2 g/km i 0,15, a od Euro 4 do chwili obecnej 0,1 i 0,06 g/km. Dopuszczalne wartości emisji tlenku węgla i węglowodorów od etapu Euro 4 do Euro 6 znajdują się na tym samym poziomie – odpowiednio 1 i 0,1 g/km. W stosunku Euro 1 do Euro 6 można więc zaobserwować ponad dwukrotne zmniejszenie dopuszczalnej zawartości tlenku węgla oraz 2,5 krotne tlenków azotu.

Tab. 1.2. Dopuszczalne wartości emisji spalin w normach Euro podane dla pojazdów z silnikiem o ZS

Emisja [g/km]	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
CO	3,16	1	0,64	0,5	0,5	0,5
HC	-	0,15	0,06	0,05	0,05	0,05
NO_x	-	0,55	0,5	0,25	0,18	0,08
HC+NO_x	1,13	0,7	0,56	0,3	0,23	0,17
PM	0,14	0,08	0,05	0,009	0,005	0,005

Samochody z silnikami o zapłonie samoczynnym, podobnie jak w przypadku silników o zapłonie iskrowym, dla pierwszej normy Euro miały limitowaną wartość sumy emisji węglowodorów i tlenków azotu, wynoszącą 1,13 g/km. Dopiero od normy Euro 2 nastąpiło rozdzielenie na węglowodory i tlenki azotu, których dopuszczalne wartości emisji wynosiły odpowiednio dla kolejnych norm emisji od 0,15 do 0,5 dla węglowodorów i od 0,55 do 0,08 dla tlenków azotu.

Od wprowadzenia normy Euro 1 dopuszczalna emisja tlenku węgla została zmniejszona ponad sześciokrotnie i wynosi 0,5 g/km, a dopuszczalna zawartość cząstek stałych PM w spalinach jest taka sama jak dla silników o zapłonie iskrowym i wynosi 0,005 g/km, przy czym dla Euro 1 wynosiła 28 razy więcej. Dopuszczalną wartość sumy węglowodorów i tlenków azotu zmniejszono ponad sześciokrotnie [67].

1.2. Źródła emisji spalin i ich wpływ na środowisko

Źródłem emisji spalin są egzotermiczne reakcje chemiczne zachodzące w procesie spalania paliw w określonych warunkach ciśnienia i temperatury, przebiegające między materiałem palnym lub paliwem, a utleniaczem.

Procesy, o których mowa powyżej zachodzą w komorach spalania silników o zapłonie iskrowym, silników ZS oraz komorach spalania silników turbinowych.

Tego typu silniki wykorzystuje się w transporcie, energetyce i szeroko pojętej działalności przemysłowej. Wytwarzane przez nie szkodliwe substancje mają bardzo niekorzystny wpływ na środowisko.

Powstałe w wyniku spalania tlenki azotu biorą udział w tworzeniu smogu, kwaśnych deszczy, niszczeniu roślinności i tworzeniu się dziury ozonowej. Uważane są za dziesięciokrotnie bardziej szkodliwe od tlenku węgla

i kilkukrotnie bardziej szkodliwe od dwutlenku siarki. Najbardziej szkodliwymi spośród tlenków azotu są tlenek azotu NO i dwutlenek azotu NO₂.

Tlenek węgla po dostaniu się do układu krwionośnego organizmów żywych łączy się z hemoglobina i metaloproteinami tworząc karboksyhemoglobinę powodując długotrwałe, bardzo duże ograniczenie w zdolności transportowania tlenu.

Dwutlenek węgla jest zaliczany do tzw. gazów cieplarnianych, powodujących ocieplenie atmosfery. Normy emisji regulują dopuszczalne wartości emitowanego dwutlenku węgla do atmosfery, powstającego w wyniku działalności ludzi.

Węglowodory, poza toksycznością, w połączeniu z tlenkami węgla tworzą fotochemiczny smog. Reagują także z tlenem i związkami azotu tworząc nadtlenki i aldehydy. Węglowodory nienasycone, podobnie jak tlenek węgla łączą się z hemoglobina w skrajnym przypadku powodując śmierć. Węglowodory aromatyczne mają właściwości rakotwórcze z powodu zdolności reagowania z białkami DNA i RNA organizmów żywych.

Strukturę zanieczyszczeń powietrza w Polsce według głównych źródeł ich powstawania przedstawiono w tab. 1.3 [23].

Tab. 1.3. Całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce wg rodzajów działalności w 2013 r. w tysiącach ton [23]

WYSZCZEGÓLNIENIE	Dwutlenek siarki	Tlenki azotu	Tlenek węgla	Niemetanowe lotne związki inne	Pyły
OGÓŁEM	846,85	798,23	2876,4	635,78	407,46
Procesy spalania w sektorze produkcji i transformacji energii	400,42	243,58	60,65	19,76	35,9
Procesy spalania poza przemysłem	284,15	93,17	1843,22	123,17	163,6
Procesy spalania w przemyśle	149,56	69,21	256,23	10,53	32,1
Procesy produkcyjne	11,20	23,61	31,86	75,10	34,1
Wydobycie i dystrybucja paliw kopalnych	-	-	-	38,57	14,5
Zastosowanie rozpuszczalników i innych produktów	-	0,00	0,01	208,85	1,7
Transport drogowy	1,20	255,08	581,16	139,89	75,9
Samochody osobowe	0,56	98,27	456,10	43,63	7,4
Samochody ciężarowe < 3,5t	0,18	31,23	61,94	8,94	2,5
Samochody ciężarowe > 3,5t, autobusy i ciągniki	0,45	-	-	-	-
Motorowery i motocykle	0,00	0,16	17,09	6,23	0,00
Parowanie benzyny z pojazdów	-	-	-	50,19	-
Zużycie opon, hamulców i nawierzchni dróg	-	-	-	-	58,8
Inne pojazdy i urządzenia	0,23	100,08	80,51	16,72	9,5
Zagospodarowanie odpadów	0,09	1,66	20,50	2,94	20,1
Rolnictwo	-	11,85	2,26	0,25	19,9
Inne źródła emisji i pochłaniania zanieczyszczeń	-	-	-	282,99	0,2
w tym pożary lasów	-	-	-	0,02	0,2

Energetyka

Szacuje się, że za największą ilość zanieczyszczeń powietrza, bo ponad 50% odpowiada przemysł paliwowo-energetyczny. Poza szkodliwością związaną z emisją substancji toksycznych powstających w wyniku samego procesu

spalania, szkodliwe są np. produkty spalania węgla, do których należą m.in. żużel, popiół lotny, mieszanki popiołu i żużlu, odpady z odsiarczania spalin kotłowych. Tego rodzaju odpady są niebezpieczne ponieważ podczas ich składowania powstają duże ilości zasolonych wód nadosadowych, skażane są wody gruntowe arsenem i innymi szkodliwymi pierwiastkami, dochodzi do pylenia popiołów. Wody chłodzące elektrowni ciepłych powodują zmiany właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych wód powierzchniowych. Kopalnie węgla kamiennego i brunatnego, według szacunków są źródłami emisji pyłów których masa stanowi 4–6% wydobytej masy węgla.

Przemysł

Przemysł cementowy produkuje duże ilości pyłów o dużym rozdrobnieniu cząstek, których ilość może stanowić nawet 10–30% wszystkich pyłów zanieczyszczających środowisko, a ich skład to m. in. wapń, potas, krzemionka, metale ciężkie oraz SO_2 . Gazy emitowane w tej gałęzi przemysłu to CO_2 i CO .

Kolejną gałęzią przemysłu zanieczyszczającą środowisko jest hutnictwo, będące przyczyną emisji nie tylko znacznej ilości pyłów do atmosfery, powstającej zwłaszcza podczas wykonywania procesu spiekania. Powoduje zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi, o wysokim stopniu toksyczności, takimi jak Pb, Cu, Zn, Al, Cr, które następnie łatwo mogą włączyć się do łańcucha pokarmowego człowieka.

Przemysł spożywczy to głównie zanieczyszczenia organiczne, ale jest on także źródłem emisji: NO_x i SO_2 oraz fenoli, ketonów, aldehydów i alkoholi.

Przemysł chemiczny, poza dużymi ilościami toksycznych pyłów, odpowiada za emisję tlenków siarki (SO_2 , SO_3) będących przyczyną kwaśnych deszczów, ponieważ w połączeniu z tlenem powstaje z nich kwas siarkowy. Inne powstające wskutek działania przemysłu chemicznego zanieczyszczenia to siarkowodór (H_2S), chlorowodór (HCl), dwusiarczek węgla (CS_2) i amoniak (NH_3), oraz mutagenne dioksyny [74].

Transport

W roku 2015 liczba samochodów na świecie wynosiła 1,1 mld. [72]. Liczba ta stale rośnie i szacuje się, że w 2025 roku wyniesie 1,5 mld. Strukturę parku samochodowego w Polsce przedstawiono w tab. 1.4 [73].

Tab. 1.4. Struktura parku samochodowego w Polsce w tys. sztuk [23]

Rok	1990	2000	2005	2015
Samochody osobowe	5261	9991	12339	20723
Samochody ciężarowe i ciągniki drogowe	1045	1879	2305	3429
Autobusy	92	82	80	110
Motocykle	1356	803	754	1272
Inne	1287	1351	1338	1875
Razem	9041	14106	16816	27409

Źródła emisji substancji szkodliwych spalin będących wynikiem działalności związanej z transportem to jednak nie tylko te będące wynikiem transportu lądowego. To także:

- a) Transport wodny. Stanowi około 70% światowych obrotów handlowych, a w Unii Europejskiej 37,3% całkowitego transportu towarowego. W skali UE, żegluga odpowiada za 4,3% całkowitej emisji CO₂ oraz 3,6% gazów cieplarnianych ewidencjonowanych przez Europejską Agencję Środowiska. Gazowe i pyłowe zanieczyszczenia z żeglugi oceanicznej wykazują wzrost w udziale emisji w całym sektorze transportu o ponad 50% w porównaniu z rokiem 1990.
- b) Transport lotniczy. Zgodnie z danymi Europejskiej Agencji Środowiska ma 0,5% udziału w całkowitej emisji NO_x i 0,1% w emisji NLZO (niemetanowych lotnych związków organicznych). Emisja substancji szkodliwych wynikająca z transportu lotniczego wpływa na zanieczyszczenie górnych warstw atmosfery w skali globalnej, mogąc wpływać na zmiany klimatu i zaburzenia warstwy ozonowej. Ma też negatywny wpływ na jakość powietrza w okolicach lotnisk i portów lotniczych [2].

Badaniem zagadnienia emisji szkodliwych substancji spalin z lotniczych silników turbinowych, zajmują się polskie instytucje badawcze [52].

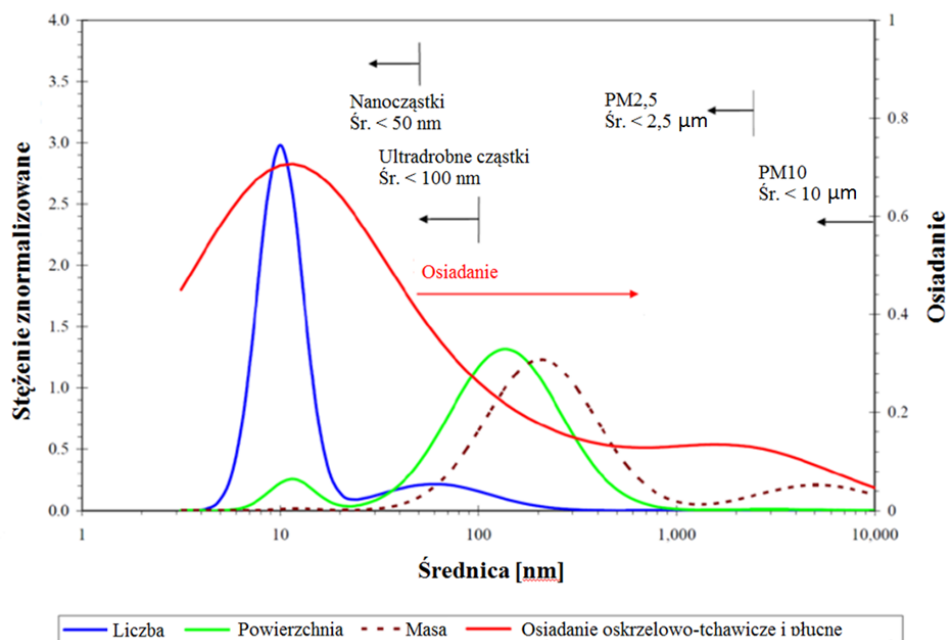
Specyficzną cechą lotniczych silników turbinowych jest konieczność zapewnienia zapłonu mieszanki na wysokości, nawet powyżej 9000 m w sytuacji, gdy temperatura powietrza na wlocie do silnika nie przekracza 220 K, a wartość ciśnienia wynosi poniżej 0,03 MPa. Komora spalania musi pracować w szerokim przedziale zmian prędkości i temperatury przy zmieniających się wartościach współczynnika nadmiaru powietrza. Wobec powyższego, wymagania odnośnie emisji spalin są dodatkowym elementem optymalizacyjnym pracy silnika [52].

W przypadku lotniczych silników turbinowych istotnym problemem jest faktyczny brak możliwości pomiaru toksyczności spalin w locie rzeczywistym. Z tego powodu badania ogranicza się do pomiarów w warunkach próby przedstartowej [33, 34]. Dla identyfikacji wyników próby przedstartowej z warunkami lotu wykorzystuje się parametr tych samych obrotów silnika w locie i w próbie naziemnej. W tym przypadku trudno jest uwzględnić wpływ różnicy ciśnienia statycznego, dynamicznego na wlocie silnika oraz temperatury. Producenci lotniczych silników turbinowych wykonują badania swoich wyrobów w specjalnych tunelach aerodynamicznych, w których można odwzorować ciśnienie dynamiczne, wpływ prędkości powietrza, cząsteczki wody i lodu oraz częściowo temperaturę powietrza przepływającego [60].

1.3. Substancje szkodliwe w spalinach

Badania szkodliwości pyłów znajdujących się w powietrzu prowadzone na przestrzeni ostatnich kilku lat wykazały szczególną szkodliwość cząstek o najmniejszej średnicy, nazwanych "pyłami ultradrobny". Mogą one mieć średnicę aerodynamiczną 0,1 μm lub mniejszą, czyli 1% wielkości cząstki pyłu PM_{10} . Ultradrobne cząstki nie powstają w sposób naturalny w przyrodzie w wyniku spalania biomasy. Powstają w procesie sterowanego i zorganizowanego spalania i są zwykle znacznie mniejsze niż cząstki powstałe w procesie spalania naturalnego.

Ultradrobne cząstki stanowią najliczniejszą kategorię pyłów pochodzących ze spalania w silniku. Na rys. 1.1 pokazano, że największa liczba cząsteczek (linia niebieska) i największa liczba cząstek osadzających się w płucach występuje mniej więcej dla tej samej średnicy cząstek, w obszarze występowania ultradrobnych cząstek (o średnicy $< 100 \text{ nm}$).



Rys. 1.1. Rozkład wybranych właściwości cząstek stałych w funkcji ich średnicy emitowanych przez typowy silnik o zapłonie samoczynnym [64]

Wartości odpowiadające położeniu punktów maksimum na przedstawionych krzywych na rys. 1.1, mogą różnić się w zależności od właściwości badanego silnika. Cząstki stałe powstające w procesie spalania w silniku o zapłonie samoczynnym, mają średnicę mniejszą od $1\text{ }\mu\text{m}$, największą masę mają cząstki o średnicy rzędu 200 nm , a najbardziej liczne są cząstki o średnicy rzędu 10 nm .

Każda z krzywych przedstawionych na rys. 1.1 ma dwa maksima, które są związane z odmiennym mechanizmem tworzenia się tych cząstek. Prawe maksimum (dla cząstek większych) odpowiada cząstkom powstałym w procesie akumulacji, gdzie obecne w spalinach cząsteczki sadzy zbrylały się w wyniku wzajemnych zderzeń. Lewe maksimum dotyczy cząstek powstałych w procesie enukleacji. Są one zdecydowanie mniejsze od poprzednich i choć jest ich więcej, to zarówno ich łączna masa jak i pole powierzchni jest mniejsze od poprzednich.

Analizując rozkład masy cząstek przedstawiony linią przerywaną na rys. 1.1, który można otrzymać całkując krzywą rozkładu liczby cząstek stałych, można zaobserwować, że maksimum tej krzywej występuje dla cząstek o średnicy ok. 200 nm , podczas gdy maksimum liczby cząstek stałych (PN) występuje przy ok. 10 nm . Dla pomiaru masy cząstek stałych (PM) cząstki o średnicy poniżej ok. 30 nm (rys. 1.1) nie mają praktycznego znaczenia i można je pomijać w metodzie pomiarowej masy PM bez większej utraty dokładności pomiaru.

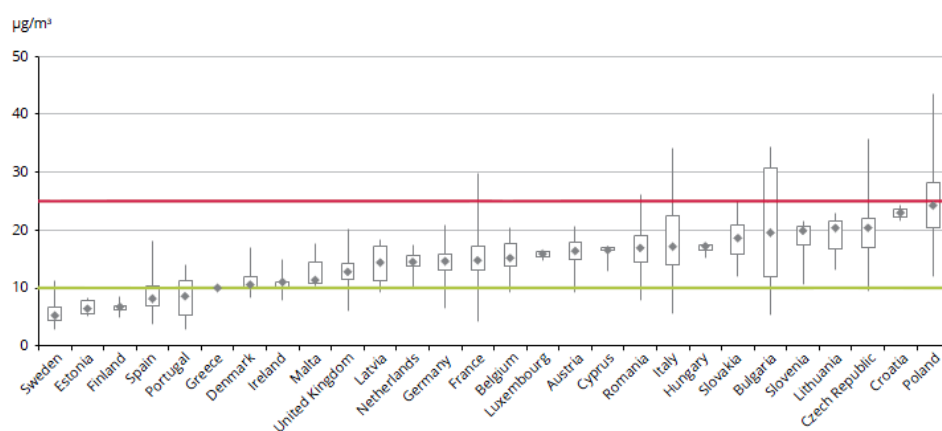
W pomiarach całkowitej liczby cząstek stałych istotne znaczenie ma przedział średnicy cząstek od 4 do 200 nm, ponieważ w tym przedziale zawiera się największa liczba cząstek stałych w spalinach.

Pył $PM_{2,5}$ zagraża zdrowiu przyczyniając się do wzrostu zgonów i zachorowalności na choroby serca i układu krążenia, dróg oddechowych oraz raka płuc. Wzrost stężeń pyłu $PM_{2,5}$ może spowodować wzrost ryzyka nagłych wypadków wymagających hospitalizacji z powodu problemów z krążeniem i oddychaniem. Choroby sercowo-naczyniowe (CVD) obejmują zaburzenia serca (arytmia, naczyń wieńcowych i choroby naczyń, niewydolność serca) oraz choroby naczyń krwionośnych (tętnic obwodowych oraz zakrzepicy żyłnej) zwłaszcza zasilających mózg (udar niedokrwienny i krwotoczny). Wszystkie te zaburzenia stanowią główną przyczynę zgonów na całym świecie, zwłaszcza w krajach o niskich i średnich dochodach. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) każdego roku 17,3 mln ludzi umiera z powodu chorób sercowo-naczyniowych, co stanowi 30% wszystkich zgonów. Oprócz czynników genetycznych i czynników ryzyka behawioralnego (niezdrowa dieta, brak aktywności fizycznej, palenie tytoniu i alkoholu), wdychanie powietrza zawierającego drobne cząstki stałe (wielkość cząstek mniejsza lub równa $2,5\ \mu m$) wiąże się ze zwiększeniem prawdopodobieństwa powstania choroby sercowo naczyniowej CVD. Istnieją badania dowodzące, że $PM_{2,5}$ stanowi ogólnoswiatowy problem a wpływ cząstek $PM_{2,5}$ na zdrowie człowieka jest faktem [55]. Według American Cancer Society (ACS), długotrwałe narażenie na stężenia $PM_{2,5}$ ma znaczący wpływ na długość życia, a każdy wzrost stężenia o $10\ \mu g$ na metr sześcienny powietrza wiąże się ze wzrostem ryzyka śmiertelnego raka płuc o około 8%. Według Światowej Organizacji Zdrowia w krajach o niższych dochodach i krajach o wyższym stężeniu $PM_{2,5}$ w powietrzu, następuje wzrost ilości zachorowań na śmiertelnego raka płuc przy jednoczesnym zmniejszaniu się ilości osób palących papierosy [55].

Ze względu na znaczny negatywny wpływ pyłu $PM_{2,5}$ na zdrowie ludzi w dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 roku w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy wprowadzono dodatkowe normy jakości powietrza dla obszarów tła miejskiego w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców i w aglomeracjach. Dla obszarów tych określono wartość dopuszczalną pyłu $PM_{2,5}$ w powietrzu, którą nazwano pułapem stężenia ekspozycji obliczanym na podstawie wskaźnika średniego narażenia dla miasta o liczbie mieszkańców większej niż 100 tysięcy i dla aglomeracji. Ponadto każdy kraj członkowski w oparciu o krajowy wskaźnik średniego narażenia obliczany na podstawie wskaźnika średniego narażenia dla miasta o liczbie mieszkańców większej niż 100 tysięcy i dla aglomeracji, a także w oparciu o kryteria określone w w/w dyrektywie określił krajowy cel redukcji narażenia na pył $PM_{2,5}$. W Polsce wskaźnik średniego narażenia dla miasta o liczbie mieszkańców większej niż 100 tysięcy i dla aglomeracji oblicza się dla 30 miast i aglomeracji na podstawie danych z 32 stanowisk pomiarowych. Dla

28 miast i aglomeracji wskaźnik oblicza się na podstawie danych z jednego stanowiska, dla dwóch aglomeracji – górnośląskiej i warszawskiej – na podstawie wyników pomiarów z dwóch stanowisk. Pomiary pyłu $PM_{2,5}$ pod kątem określenia krajowego wskaźnika średniego narażenia prowadzone są przez Inspekcję Ochrony Środowiska od początku 2010 r. Krajowy wskaźnik średniego narażenia na pył $PM_{2,5}$ dla roku 2014 liczony jako średnia z lat 2012–2014 wyniósł $24 \mu g/m^3$ [69].

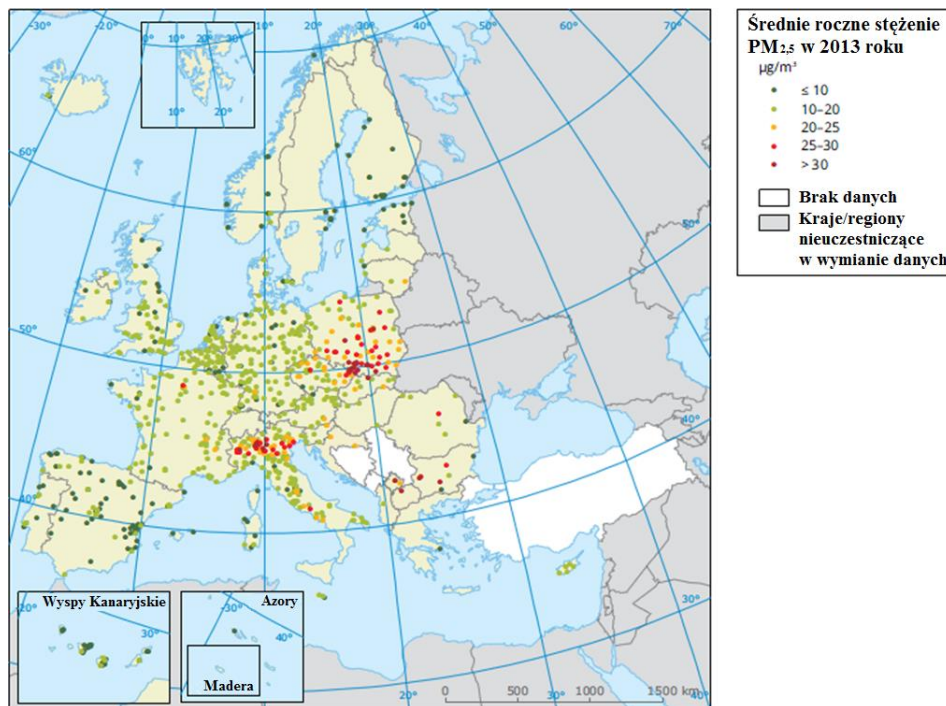
Poniżej przedstawiono wykres obrazujący wskaźniki średniego narażenia na pył $PM_{2,5}$ w innych krajach europejskich.



Rys. 1.2. Wskaźniki średniego narażenia na pył $PM_{2,5}$ w krajach europejskich [64]

Dla każdego kraju podano wartość najniższą, najwyższą i wartości mediany. W 25% stacji pomiarowych, poziom jest poniżej dolnej, a w 25% powyżej górnej wartości stężenia. Wartość graniczna ustalona przez organy UE jest oznaczona czerwoną linią. Wartość wyznaczona przez WHO AQG (*Air Quality Guidelines*) jest oznaczona linią zieloną. Dane opracowane zostały na podstawie bazy jakości powietrza (EEA, 2015).

Na poniższej ilustracji zaprezentowano średnie roczne stężenia cząstek stałych $PM_{2,5}$ na świecie.



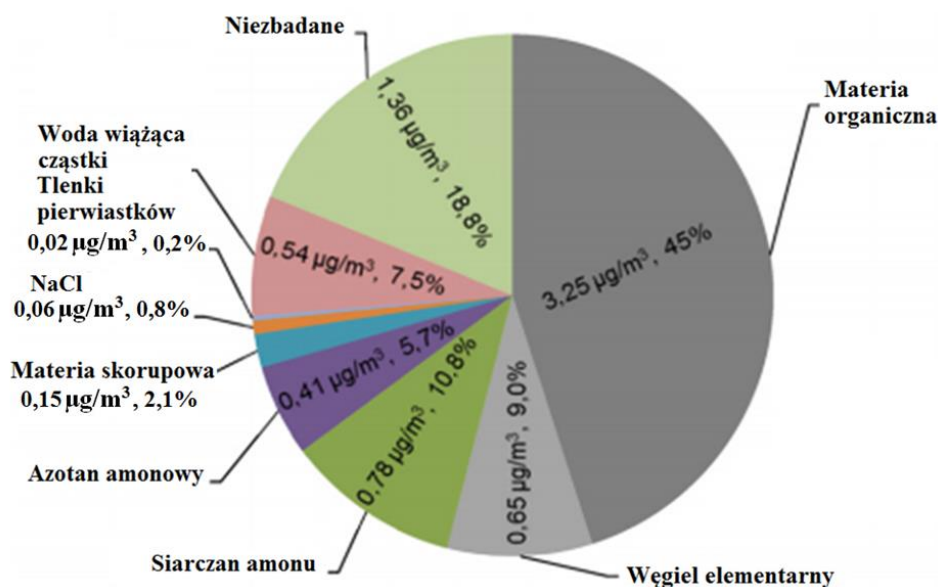
Rys. 1.3. Stężenie cząstek stałych $PM_{2.5}$ w Europie w 2013 roku [68]

Szkodliwość cząstek stałych dla zdrowia osób na nie ekspozowanych, związana jest ściśle z wielkością i składem chemicznym ziaren [68]. Pył drobny o średnicy poniżej $2.5 \mu m$ jest najbardziej niebezpieczny. Dociera on do pęcherzyków płucnych, a nawet penetruje do naczyń krwionośnych, a stamtąd do krwiobiegu, dlatego jest równie szkodliwy dla układu oddechowego jak i układu krążenia. Większe ziarna pyłu mogą powodować stany zapalne spojówek oraz błony śluzowej nosa i gardła. Osoby cierpiące na choroby serca i płuc, osoby starsze i dzieci uważa się za bardziej podatne na szkodliwe działanie pyłu zawieszonego. Zagrożone są także osoby aktywne fizycznie. Wysiłek fizyczny powoduje zwiększoną częstotliwość wdechów i wydechów oraz zwiększoną głębokość oddechu ze względu na zwiększone zapotrzebowanie organizmu na tlen, przez co jednocześnie wdychanych jest więcej szkodliwych cząstek. W przypadku osób starszych badania dowodzą, iż wysoki poziom pyłu zawieszonego jest związany ze zwiększeniem ryzyka hospitalizacji, a nawet zgonu z powodu chorób płuc i chorób sercowo-naczyniowych. Długotrwałe narażenie na wysokie stężenia pyłu zawieszonego sprzyja wystąpieniu przewlekłej zaporowej choroby płuc, a także zmniejszeniu sprawności i wydolności płuc. Krótkoterminowe narażenie na wysokie stężenie może nasilać objawy choroby płuc, różnych chorób o podłożu alergicznym (astma, egzema, katar sienny, zapalenie spojówek) i chorób serca (zwiększona

krzepliwość krwi, zaburzenia rytmu), a także zwiększać podatność na infekcje dróg oddechowych [70].

Dopuszczalne wartości stężeń cząstek stałych $PM_{2.5}$ w powietrzu zalecane przez Światową Organizację Zdrowia WHO dla średniego 24-godzinnego stężenia pyłu wynosi $25 \mu g/m^3$, natomiast dla średniego rocznego stężenia jest to $10 \mu g/m^3$. Dla pyłu PM_{10} dopuszczalne 24 godzinne i roczne stężenia wynoszą odpowiednio $50 \mu g/m^3$ i $20 \mu g/m^3$ [77].

Warto zauważyć, że cząstki $PM_{2.5}$ znajdujące się w powietrzu pochodzą nie tylko od spalin z układów wydechowych pojazdów silnikowych. Poniżej zaprezentowano wykres porównujący ilościowo skład cząstek $PM_{2.5}$ znajdujących się w powietrzu podczas przeprowadzania badań w Edmonton w Kanadzie. Wynik obrazuje średnie stężenie mierzone w latach 2007–2014.



Rys. 1.4. Skład cząstek $PM_{2.5}$ w powietrzu podczas badań w Edmonton [3]

Tab. 1.5. Związki chemiczne wykryte podczas ośmioletniego procesu analizy powietrza w Edmonton [3]

	Jednostka	Średnia geom.	Min	P10	P25	P75	P98	Max
PM_{2,5}	µg/m ³	7,22	0,14	3,63	4,95	10,39	29,42	62,54
Węgiel organ. (OC)	µg/m ³	1,68	0,19	0,46	0,99	6,61	7,57	29,45
Węgiel element. (EC)	µg/m ³	0,65	0,018	0,18	0,38	1,31	4,55	40,20
Siarczan (SO₂⁴⁻)	µg/m ³	0,61	0,024	0,21	0,33	1,10	3,82	14,75
Azotan (NO₃⁻)	µg/m ³	0,32	0,010	0,06	0,10	1,03	11,57	20,15
Amon (NH₄⁺)	µg/m ³	0,32	0,002	0,08	0,14	0,68	4,17	10,21
Sód (Na⁺)	µg/m ³	0,03	0,002	0,01	0,02	0,06	0,31	2,15
Chlor (Cl⁻)	µg/m ³	0,02	0,005	0,01	0,01	0,05	0,32	2,85
Potas (K⁺)	µg/m ³	0,03	0,003	0,01	0,02	0,05	0,12	0,25
Wapń (Ca⁺²)	µg/m ³	0,01	0,001	0,00	0,01	0,01	0,03	0,08
Magnez (Mg⁺²)	µg/m ³	0,04	0,001	0,01	0,02	0,07	0,20	0,92
Fluor (F⁻)	µg/m ³	0,00	0,001	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
Mrówczan	µg/m ³	0,02	0,005	0,01	0,01	0,02	0,06	0,20
Szczawian	µg/m ³	0,04	0,005	0,02	0,03	0,07	0,16	0,61
Lewoglukoza	ng/m ³	40,95	1,75	9,99	18,1	84,7	416,1	1492
Mannoza	ng/m ³	8,75	0,94	2,84	3,71	16,8	84,98	347
Aluminium (Al)	ng/m ³	3,24	0,52	1,04	1,56	6,74	28,00	488
Arsen (As)	ng/m ³	0,16	0,01	0,06	0,10	0,26	0,98	12,5
Bar (Ba)	ng/m ³	1,56	0,05	0,65	1,01	2,51	5,16	14,6
Kadm (Cd)	ng/m ³	0,05	0,007	0,02	0,03	0,09	0,31	1,15
Kobalt (Co)	ng/m ³	0,05	0,005	0,01	0,02	0,09	1,16	4,80
Chrom (Cr)	ng/m ³	0,42	0,026	0,10	0,21	0,81	2,30	8,97
Miedź (Cu)	ng/m ³	1,49	0,21	0,52	0,99	2,40	6,47	56
Żelazo (Fe)	ng/m ³	12,73	0,52	4,59	7,74	22,4	49,73	130
Mangan (Mn)	ng/m ³	2,43	0,06	0,62	1,25	5,01	11,06	21
Molibden (Mo)	ng/m ³	0,18	0,01	0,04	0,10	0,34	1,77	10,44
Nikiel (Ni)	ng/m ³	0,34	0,04	0,07	0,16	0,74	2,84	11,02
Ołów (Pb)	ng/m ³	0,38	0,05	0,10	0,22	0,67	2,82	10,44
Antymon (Sb)	ng/m ³	0,17	0,01	0,08	0,11	0,25	0,69	1,46
Selen (Se)	ng/m ³	0,08	0,021	0,05	0,05	0,14	0,21	0,53
Cyna (Sn)	ng/m ³	0,11	0,026	0,03	0,05	0,18	0,96	3,34
Stront (Sr)	ng/m ³	0,26	0,021	0,12	0,18	0,39	0,85	2,51
Tytan (Ti)	ng/m ³	0,32	0,10	0,16	0,16	0,52	1,15	4,28
Wanad (V)	ng/m ³	0,08	0,01	0,02	0,03	0,16	2,61	8,66
Cynk (Zn)	ng/m ³	5,80	0,52	1,47	3,25	11,37	39,64	226

Najnowsze badania wskazują, że w ocenie szkodliwości i toksyczności cząstek $PM_{2.5}$ należałoby brać pod uwagę także stopień ich rozpuszczalności w wodzie. Badania przeprowadzone na Uniwersytecie w Szanghaju dowodzą, że cząstki $PM_{2.5}$ przedostające się do ciała człowieka dzielą się na rozpuszczalne w wodzie (WS- $PM_{2.5}$) i nierozpuszczalne (WIS- $PM_{2.5}$). Ogólnie wiadomo, że cząstki przenikają do organizmu ludzkiego wchodząc w interakcje z komórkami i powodują niekorzystne skutki. Jednak wiedza na temat indywidualnego poziomu toksyczności tych dwóch składników jest ograniczona. Prowadzono badania nad właściwościami fizykochemicznymi $PM_{2.5}$. Toksyczne działanie $PM_{2.5}$ oraz WS-WIS- $PM_{2.5}$, które obejmują zmiany żywotności komórek, uszkodzenie błony komórkowej, reaktywnych form tlenu (ROS), a także morfologiczne, badano na ludzkich komórkach nabłonka płuc A549 in vitro. Wyniki wskazują, że WS- $PM_{2.5}$ może powodować powstawanie ROS, pomnożone mitochondria i zniekształconą budowę komórek A549, co może spowodować ich uszkodzenie. Tymczasem WIS- $PM_{2.5}$ wpływają niekorzystnie na błonę komórkową, co może doprowadzić do uszkodzenia komórek przez interakcje komórka-cząstka. Ponadto zostały zaobserwowane synergiczne działania cytotoksyczne WS- $PM_{2.5}$ i WIS- $PM_{2.5}$ w dłuższym czasie ekspozycji. Te odkrycia pokazują różne mechanizmy cytotoksyczności WS- $PM_{2.5}$ i WIS- $PM_{2.5}$, które sugerują, że nie tylko wielkość i stężenie $PM_{2.5}$ ale także rozpuszczalność $PM_{2.5}$ powinny być brane pod uwagę przy ocenie toksyczności tych cząstek [62].

2. Mechanizm powstawania toksycznych składników spalin i zależność emisji od parametrów pracy silnika

Spalanie paliw jest procesem szkodliwym dla środowiska naturalnego, jednak przez długi czas pozostanie on nadal głównym sposobem pozyskiwania energii w transporcie samochodowym. Zanieczyszczenia powstające w wyniku procesu spalania, przedostające się do atmosfery znajdują się w różnych stanach skupienia. Przeważającym jest stan gazowy, jednak w miarę obniżania się temperatury emitowanych spalin, rośnie względny udział substancji ciekłych oraz stałych. Z uwagi na niestabilność procesu spalania paliwa oraz złożoność procesów zachodzących podczas dynamicznej pracy silnika, mogą zachodzić następujące zjawiska:

- spalanie zupełne i całkowite,
- spalanie niezupełne,
- spalanie niecałkowite,
- dysocjacja termiczna składników spalin,
- dysocjacja termiczna par paliwa,
- utlenianie azotu zawartego w powietrzu,
- absorpcja i desorpcja par paliwa w cylindrach silnika w czasie suwów dolotu sprężania,
- emitowanie produktów powstających z zanieczyszczeń dodatków do paliwa,
- procesy zachodzące z udziałem składników spalin w atmosferze [66].

Szkodliwe składniki spalin można podzielić na trzy grupy:

- a) będące produktami spalania zupełnego, np. dwutlenek węgla,
- b) będące produktami spalania niecałkowitego, np. węglowodory HC i ich pochodne,
- c) będące produktami spalania niezupełnego, np. węglowodory HC, pochodne węglowodorów (m.in. aldehydy), sadza C, tlenek siarki [66].

Skład spalin zależy od wielu czynników, m.in. od temperatury i prędkości spalania, rodzaju i jakości paliwa, składu mieszanki. W mieszankach bogatych $\lambda < 1$ a także w wyniku dysocjacji CO_2 w płomieniu o wysokiej temperaturze, powstaje tlenek węgla. Niedoskonałości pasowania tłoka z cylindrem powodują przedostawanie się gazowych węglowodorów i niespalonej mieszanki, które podczas suwu wylotu mieszają się z gazami spalinowymi [8, 9]. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na skład spalin jest jednorodność rozkładu wtryskiwanego paliwa. Bliskość ścianek cylindra będzie powodować wygaszanie płomienia, co sprzyja powstawaniu sadzy, natomiast w strefie popłomiennej będą powstawać tlenki azotu [59]. W dalszych podrozdziałach opisano bardziej szczegółowo zagadnienia dotyczące poszczególnych składników emisji.

2.1. Cząstki stałe

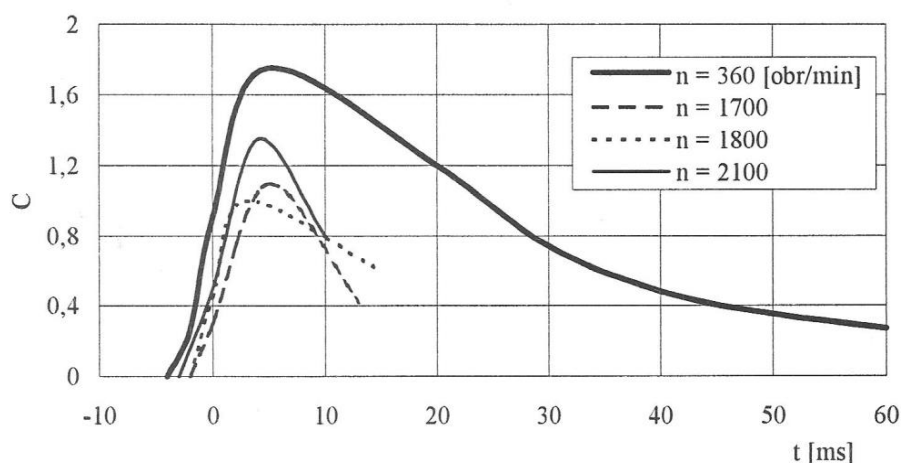
Cząstki stałe PM są efektem procesu spalania, występującymi głównie w silnikach o zapłonie samoczynnym. Charakteryzują się zróżnicowaną wielkością, a w ich skład mogą wchodzić związki siarki i metali, cięższe frakcje oleju silnikowego, cząstki nieorganiczne i węglowodory pochodzące z paliwa.

W wyniku procesu spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym powstaje sadza, która posiada właściwości adsorpcyjne i przylacza produkty niepełnego spalania. Są to głównie wielopierścieniowe związki aromatyczne, jak piren, benzopiren, czy antracen oraz związki tlenowe, głównie aldehydy. Ich proporcja zależy od warunków panujących w komorze spalania, a liczba cząstek stałych wzrasta wraz ze wzbogaceniem mieszanki. Największy ich wzrost następuje przy współczynniku nadmiaru powietrza zbliżającym się do dolnej granicy wartości granicznej, czyli do zakresu 1,5–1,1 [8, 10].

Można wyróżnić trzy fazy powstawania sadzy:

- formowanie się zarodków krystalizacji (prekursorów),
- tworzenie się i wzrost cząstek,
- koagulacja w większe cząstki.

Powstające w pierwszej fazie spalania mieszanki sadze ulegają wypalaniu a ich ilość jest zależna od prędkości obrotowej silnika oraz procesu koagulacji. W silnikach średnio-obrotowych wypaleni ulega 85% sadzy, zaś w szybkoobrotowych 50-60%. Zależność koncentracji sadzy od prędkości obrotowej silnika przedstawia wykres na rys. 2.1 [41].



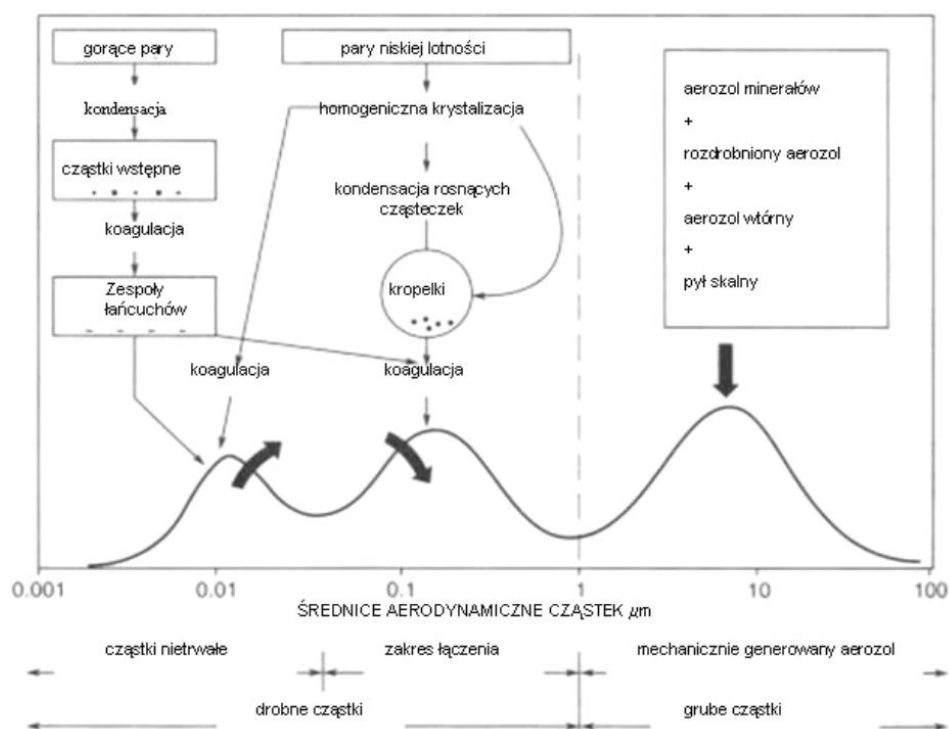
Rys. 2.1. Zmiana koncentracji sadzy w cylindrze C w funkcji czasu t w trakcie pełnego cyklu suwu tłoka dla różnych prędkości obrotowych silnika [41]

Ilość sadzy znajdującej się w cylindrze podczas otwarcia zaworu wylotowego definiuje ilość zaadsorbowanych przez nią związków. Przy niskich stężeniach węglowodorów, ale w wysokiej temperaturze, obecność związków jest

wynikiem adsorpcji. Przy niższych temperaturach, czyli poniżej około 500°C adsorpcji podlegają następujące cząstki o większym ciężarze cząsteczkowym:

- węglowodory pochodzące z niespalonego paliwa i oleju silnikowego,
- wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne,
- utlenione węglowodory (estry, ketony i etery),
- dwutlenki siarki SO_2 oraz kwasy siarkowe,
- tlenki azotu NO_x .

Można rozróżnić dwa podstawowe rodzaje cząstek stałych emitowanych przez silnik o zapłonie samoczynnym. Są to niespalone węglowodory i olej smarujący o średnicy 15-30 nm oraz cząstki sadzy o średnicy 10-80 nm. Skład cząstek stałych jest następujący: olej pochodzący z paliwa i oleju silnikowego 40%, sadza 30%, siarczany i związana woda 14%, niespalone węglowodory 7%, pozostałe związki to 8%. Na rys. 2.2 przedstawiono w sposób schematyczny proces powstawania cząstek w spalinach silnikowych.



Rys. 2.2. Schemat powstawania cząstek spalin silników Diesla [48]

Na rys. 2.2 przedstawiono mechanizmy powstawania aerozolu polidispersyjnego. W początkowej fazie powstają aerozole o wielkości cząstek od 0,001 do 0,8 µm, które w wyniku kondensacji i koagulacji przechodzą

w formę zakumulowaną, zawierającą ponad 90% cząstek o średnicy do 1,0 μm o średniej wielkości 0,2 μm .

2.2. Tlenki azotu

Tlenki azotu dzielą się na: podtlenek azotu (N_2O), tlenek azotu (NO), dwutlenek azotu (NO_2), trójtlenek azotu (N_2O_3), czterotlenek azotu (N_2O_4) oraz pięcioletek azotu (N_2O_5). Z punktu widzenia ochrony środowiska, najczęściej uwagi poświęca się tlenkowi oraz dwutlenkowi azotu.

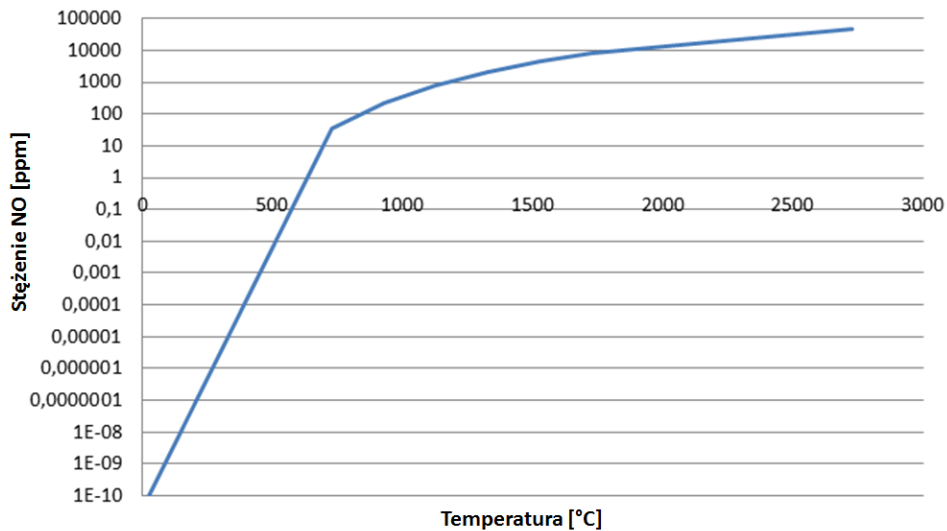
Podczas procesu spalania paliwa w silniku, emisja tlenków azotu (NO_x) rośnie wraz ze wzrostem maksymalnej temperatury spalania, czyli w okresie suwu między początkiem spalania a chwilą po osiągnięciu maksimum ciśnienia w cylindrze. Powstające głównie wskutek utleniania azotu atmosferycznego oraz azotu zawartego w paliwie. Z uwagi na zasadę pomiaru NO_x zwykle przelicza się stężenie tlenków azotu na NO . Ważna jest zależność stężenia NO od temperatury. Na rys. 2.3 przedstawiono wykres zależności stężenia NO od temperatury, uzyskany na podstawie wzoru:

$$P_{(\text{NO})} = \sqrt{P_{(\text{O})} \cdot P_{(\text{N})} \cdot 20,5 \cdot \exp\left(\frac{21740}{T}\right)} \quad (2.1)$$

gdzie:

P_0 – ciśnienie cząstkowe odpowiednich składników,
 T – temperatura absolutna.

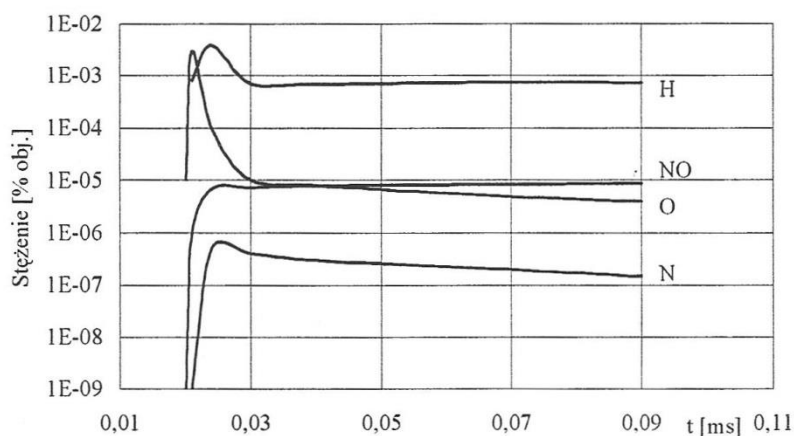
Powyższy wzór stanowi uproszczenie, zakładające, że $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$, które umożliwia zobrazowanie zależności stopnia stężenia NO od temperatury.



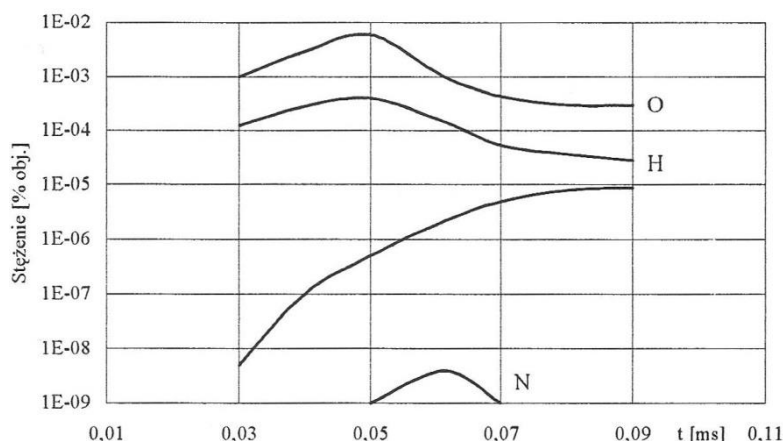
Rys. 2.3. Stężenie NO w funkcji temperatury [41]

Do bardziej szczegółowego opisu zależności stężenia NO od temperatury wykorzystuje się model Zeldowicza [8, 16, 26]. Po rozpoczęciu cyklu spalania mieszanki w cylindrze, spalone produkty ulegają dalszemu sprężaniu wskutek rosnącego ciśnienia. Z tego powodu ilość tworzonego NO w strefie popłomiennej znacznie przewyższa ilość NO powstałego w strefie płomienia a rodniki O, O₂, OH, H i N₂ osiągają w strefie płomienia wartości równowagowe.

Na rys. 2.4 i rys. 2.5 przedstawiono zależność stężeń O, N, H i NO w funkcji czasu odpowiednio dla współczynnika $\lambda = 0,67$ i $\lambda = 2$.



Rys. 2.4. Stężenie O, N, H i NO w funkcji czasu po przejściu czoła płomienia dla $\lambda = 0,67$ [41]



Rys. 2.5. Stężenie O, N, H i NO w funkcji czasu po przejściu czoła płomienia dla $\lambda = 2$ [41]

Dane eksperymentalne wskazują, że w silnikach o zapłonie iskrowym, w typowej temperaturze płomienia i zachowanej równowadze procesu stosunek NO_2 do NO jest pomijalnie mały, natomiast w silnikach o zapłonie samoczynnym zawartość NO_2 w spalinach może stanowić 10–20% wszystkich związków azotu. Wynika to z zasady Heywooda, opisującej reakcję przemiany tlenku azotu w strefie płomienia [8, 17, 23]:



Następnie zachodzi rozkład NO_2 na NO:

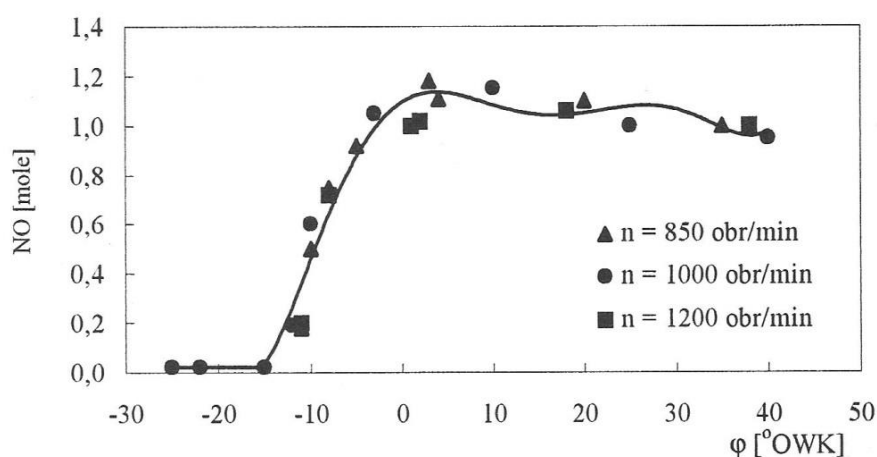


Reakcje te zachodzą dopóty, dopóki NO_2 utworzony w strefie płomienia na skutek zmieszania z chłodnymi gazami nie obniży swej temperatury. Proces spalania mieszanki w cylindrze nie jest procesem równomiernym. Emisja z partii mieszanki, która spaliła się jako pierwsza, jest o około rząd wyższa od tej, która spaliła się w późniejszym etapie cyklu. Dlatego w silniku ZI w przypadku braku turbulencji w komorze spalania największa emisja NO powstaje w pobliżu świecy zapłonowej.

W silnikach o zapłonie samoczynnym główną różnicę stanowi sposób dostarczania paliwa oraz temperatura i sposób mieszania gazów popłomiennych. Po okresie opóźnienia samozapłonu, mieszanina paliwa z powietrzem o składzie bliskim stechiometrycznemu spala się w wyniku samozapłonu i rozprzestrzeniania się płomienia. W wyniku tego następuje proces mieszania się gazów niespalonej mieszanki, par paliwa i powietrza. Oprócz tego następują

zmiany temperatury z powodu zmiennego ciśnienia w cylindrze. Podczas tego skomplikowanego procesu krytyczny dla tworzenia się tlenków azotu jest moment osiągnięcia przez gazy spalinowe maksymalnej temperatury. Następuje to między początkiem procesu spalania a osiągnięciem maksymalnego ciśnienia w cylindrze. Dopóki trwa spalanie, trwa proces tworzenia się tlenku azotu, który zachodzi coraz szybciej. Dopiero w momencie początku rozprężania i spadku temperatury, kiedy zaczyna spadać temperatura mieszanki gazów wskutek mieszania z powietrzem i chłodniejszymi gazami spalinowymi, następuje tzw. „zamrożenie” powstałego NO, charakterystyczne dla silników o zapłonie samoczynnym.

Zmiany koncentracji tlenku azotu w cylindrze zależą również od kąta obrotu wału korbowego silnika z wtryskiem bezpośrednim. Na rys. 2.6 przedstawiono przebieg zmian koncentracji tlenku azotu w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym, w odniesieniu do stężenia w chwili otwarcia zaworu wylotowego.



Rys. 2.6. Zmiana koncentracji względnej tlenku azotu w cylindrze w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym [41]

2.3. Tlenek węgla

Tlenek węgla znajduje się w spalinach silnikowych przede wszystkim w wyniku niedoboru tlenu podczas procesu spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku. Procesowi tworzenia się CO sprzyja utlenianie się węglowodorów w niskich temperaturach niebieskiego płomienia, rozpad aldehydów oraz dysocjacja CO₂ w wysokiej temperaturze. Z powodu różnic w obszarach pracy, w silnikach o zapłonie samoczynnym stężenie tlenku węgla jest różne od emitowanego przez silniki o zapłonie iskrowym.

Silniki o zapłonie iskrowym pracują z reguły w obecności mieszanki stechiometrycznej, czyli takiej, w której stosunek rzeczywistej masy powietrza, w której spalane jest paliwo do ilości potrzebnej do całkowitego spalania paliwa (tzw. współczynnik λ), jest zbliżony do jedności. Taka proporcja jest utrzymywana poprzez zastosowanie sond lambda, mierzących aktualną zawartość tlenu w spalinach. W rzeczywistych warunkach zakres mieszanki utrzymywany jest w proporcji $\lambda = 0,996\text{--}1,004$ co jest ważne dla poprawnego działania reaktorów katalitycznych. Stąd w przypadku obciążeń pełnych na mieszankach bogatych i obciążeniach częściowych, emisja CO jest znaczna i wymaga kontrolowania.

Silniki o zapłonie samoczynnym pracują natomiast zawsze na mieszankach uboższych niż $\lambda \approx 1$ stąd ich emisja tlenku węgla jest zdecydowanie niższa i jej udział w toksyczności spalin jest znikomy. Procesy związane z powstawaniem CO w silniku o zapłonie samoczynnym można uznać za kinetyczne ponieważ zawartość tlenku węgla w spalinach jest większa niż ta mierzona w komorze spalania. Podczas samego procesu spalania poziom CO wzrasta najbardziej w strefie płomienia i jest wyższy niż w przypadku spalania mieszanki w sposób adiabatyczny. Proces tworzenia CO można przedstawić jako następującą reakcję:



gdzie:

Rw – rodnik węglowodorowy.

W dalszej części reakcji CO jest powoli utleniane do CO_2 . W obecności pary wodnej, w procesie dalszego utleniania tlenku węgla CO, może brać także udział tlenek azotu. Taką reakcję można opisać w następujący sposób:



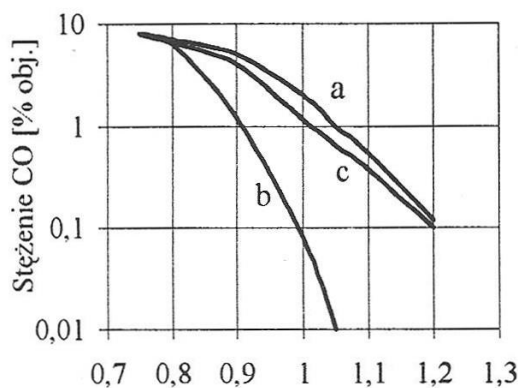
Spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej jest procesem dynamicznym i złożonym, trudnym do zamodelowania. Zawartość tlenku węgla jest zależna od aktualnego współczynnika λ oraz jednorodności mieszanki paliwowej. Niższy stopień jego zawartości można osiągnąć poprzez zwiększenie jednorodności mieszanki paliwowej i jej zubożenie. Zmiany λ , oscylujące wokół wartości średniej, przy niejednorodnym rozkładzie mieszanki w cylindrach spowodują zwiększenie stężenia tlenku węgla. Tworzenie modeli pozwalających opisać procesy spalania zachodzące w silniku, znacznie ułatwia określenie tzw. stanów równowagi.

Stan równowagi między związkami L i M, prowadzącymi do powstania związków N i O można zapisać następująco:



Jest to równanie równowagi, w skład którego w przypadku opisu spalania mieszanki wchodzi także temperatura. Podczas procesu spalania, reakcje tworzenia się CO znajdują się w stanie równowagi, od którego oddalają się podczas suwu rozprężania. Dla mieszanek paliwowych, dla których współczynnik λ zbliżony jest do jedności, teoretyczne przewidywania co do częściowego stanu równowagi reakcji podczas tworzenia CO są zgodne z pomiarami, jednak są o rząd wielkości większe niż przewidywane na podstawie modeli kinetycznych. Różnica ta wynika z obecności węglowodorów osadzających się na ściankach komory cylindra.

Wartość stężenia tlenu węgla w spalinach jest trudna do bezpośredniego, teoretycznego przewidzenia z uwagi na złożoność procesów mających wpływ na jego powstawanie. Na rys. 2.7 przedstawiono zależność stężenia CO od współczynnika λ . Literą „a” oznaczono wartości zmierzone doświadczalnie, literą „b” wartości obliczone dla temperatury maksymalnej a literą „c” obliczone z uwzględnieniem temperatury spalin [41].



Rys. 2.7. Stężenie CO w funkcji współczynnika λ

2.4. Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych a parametry ruchu drogowego

Jednym z największych wyzwań występujących podczas badań emisji jest powtarzalność wyników pomiarów. Otrzymanie powtarzalnych wyników przebiegu tak skomplikowanego procesu jak przebieg parametrów termodynamicznych w silniku podczas prowadzenia badań w ruchu drogowym jest praktycznie niemożliwe. Stosuje się zatem powtarzalne testy jezdne

i wykorzystując hamownię podwoziową mierzy emisję z układów wydechowych silników w warunkach symulowanego, powtarzalnego ruchu drogowego. Taki sposób badań reprezentuje warunki rzeczywistego ruchu pojazdów niekompletnie a przecież na wartości emisji z układu wydechowego poruszającego się pojazdu wpływ ma cały szereg bardzo różnorodnych czynników [43].

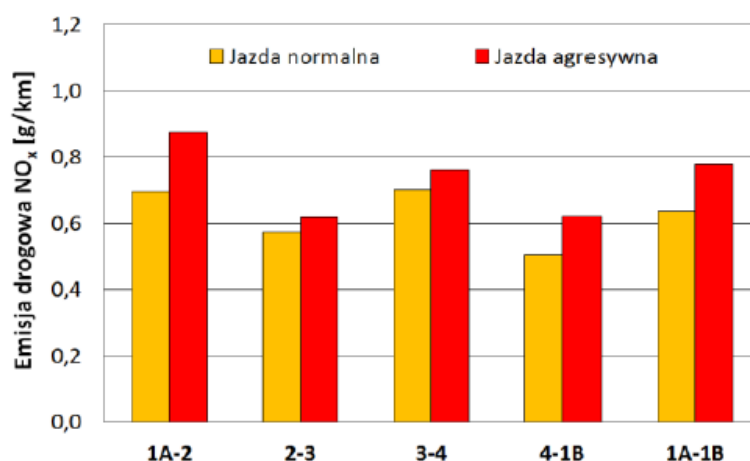
Obecnie produkowane modele samochodów, wyposażone w komputer pokładowy, umożliwiają obliczenie chwilowego zużycia paliwa. Łatwo zaobserwować, że w trakcie przyspieszania zużycie rośnie nawet 10-krotnie w stosunku do ustabilizowanej jazdy pojazdu. Takie zmiany przyspieszeń wraz ze zmianą chwilowego zużycia paliwa skutkują także zwiększeniem emisji. Szacuje się [71], że płynna, dostosowana pod względem prędkości do warunków drogowych jazda, bez gwałtownych przyspieszeń, przy stosowaniu odpowiednich przełożeń skrzyni biegów, czyli tzw. „Eco Driving”, pozwala zmniejszyć zużycie paliwa o 25–33%. Znaczenie dla zużycia paliwa ma także liczba włączonych odbiorników prądu, klimatyzacja, aerodynamika – np. stosowanie bagażników dachowych, czy oświetlenie pojazdu. Widać więc, że na danym odcinku pomiarowym, nawet podczas dokonywania pomiarów konkretnego egzemplarza pojazdu, jego parametry emisyjne i zużycia paliwa będą się od siebie znacznie różnić. Można zatem stwierdzić, że jednym z czynników mających wpływ na zróżnicowanie emisji substancji szkodliwych jest sposób prowadzenia pojazdu przez kierowcę, co jest trudne do innego ujęcia niż statystyczne w testach na hamowni podwoziowej [32].

W pracy [43] zostały opisane badania mające na celu dokonanie weryfikacji, w jaki sposób należy prowadzić pojazd samochodowy aby zminimalizować emisję spalin do atmosfery. Badaniom zostały poddane samochody osobowe oraz dostawcze gdzie emisja mierzona była na dwóch trasach pomiarowych przy wykorzystaniu mobilnego analizatora emisji spalin PEMS (*Portable Emission Measurement System*). Charakterystyka trasy była zróżnicowana pod względem warunków ruchu, składała się z odcinków zakwalifikowanych do następujących kategorii ruchu:

- miejski o dużym natężeniu (24% trasy przejazdu),
- pozamiejski (17% trasy przejazdu),
- miejski o małym natężeniu (17% trasy przejazdu),
- mieszany (49% trasy przejazdu).

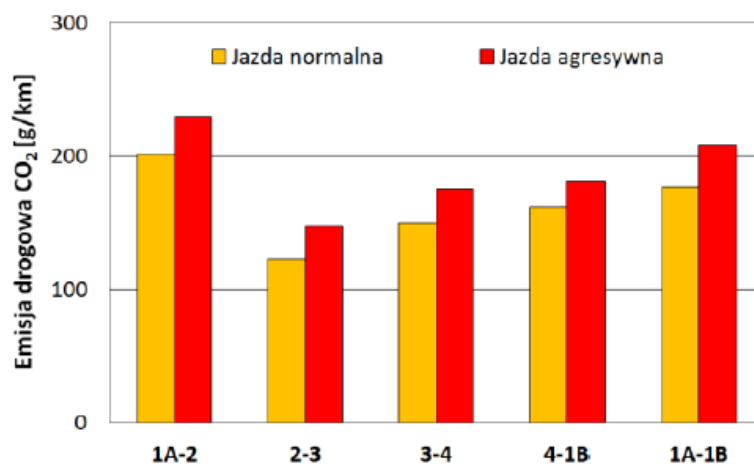
Na podstawie zmierzonej zawartości poszczególnych związków toksycznych spalin została obliczona emisja drogowa dwutlenku węgla CO₂, tlenku węgla CO, węglowodorów HC oraz tlenków azotu NO_x dla powyższych odcinków ze wszystkich kategorii ruchu. Zaobserwowano, że wzrost emisji wszystkich czterech mierzonych składników toksycznych zwiększa się wraz ze zwiększeniem dynamiki jazdy, mimo obecności układu oczyszczania spalin w pojeździe, jakim był trójfunkcyjny reaktor katalityczny. Po zmianie charakteru

przebiegu jazdy na bardziej dynamiczny, nastąpił wzrost emisji tlenków azotu z 0,64 do 0,78 g/km czyli o 20% (rys. 2.8) [43].



Rys. 2.8. Wpływ dynamiki jazdy na emisję tlenków azotu dla różnych odcinków pomiarowych [43]

Także o 20% wzrósł poziom emisji dwutlenku węgla (rys. 2.9). Największy wzrost po zmianie sposobu jazdy na bardziej dynamiczny nastąpił w zakresie emisji węglowodorów bo o 44% oraz tlenku węgla o około 50%.



Rys. 2.9. Wpływ dynamiki jazdy na emisję dwutlenku węgla dla różnych odcinków pomiarowych [43]

Przeprowadzone pomiary obrazują jak duży wpływ na wartości emisji ma sposób prowadzenia pojazdu samochodowego, a co za tym idzie, obrazują skalę

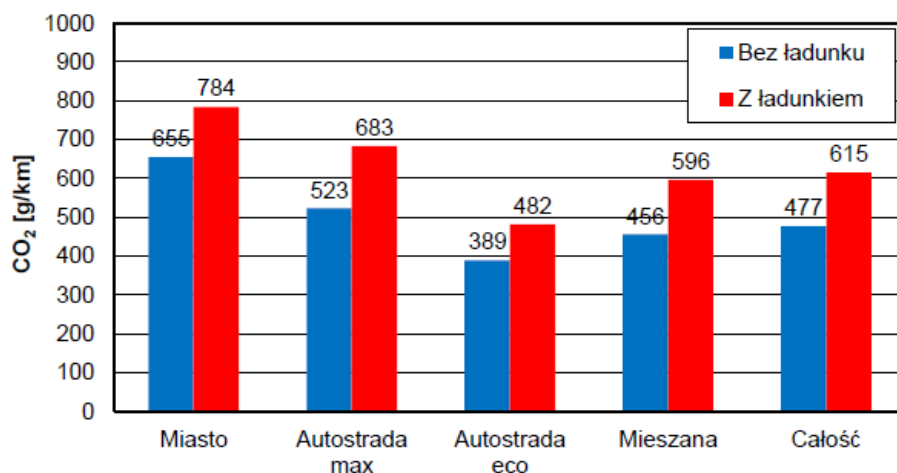
problemu i poziom trudności odtworzenia rzeczywistych warunków drogowych jazdy samochodu w sposób laboratoryjny na hamowni podwoziowej.

Poza charakterem dynamiki kierowania pojazdem, wpływ na emisję w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego ma także obciążenie pojazdu. Podobnie jak w przypadku pomiarów emisji z układu wydechowego samochodu osobowego dla różnej dynamiki kierowania pojazdem, wykonano pomiary emisji z układu wydechowego przy zastosowaniu mobilnego analizatora spalin typu PEMS. Celem badania był pomiar i porównanie wartości emisji substancji szkodliwych z układu wydechowego samochodu ciężarowego poruszającego się z ładunkiem i bez ładunku. Trasę pomiarową podzieloną na 4 cykle o różnych długościach drogi dla przejazdu odpowiednio bez i z ładunkiem przedstawiono na poniższej tabeli (tab. 2.1):

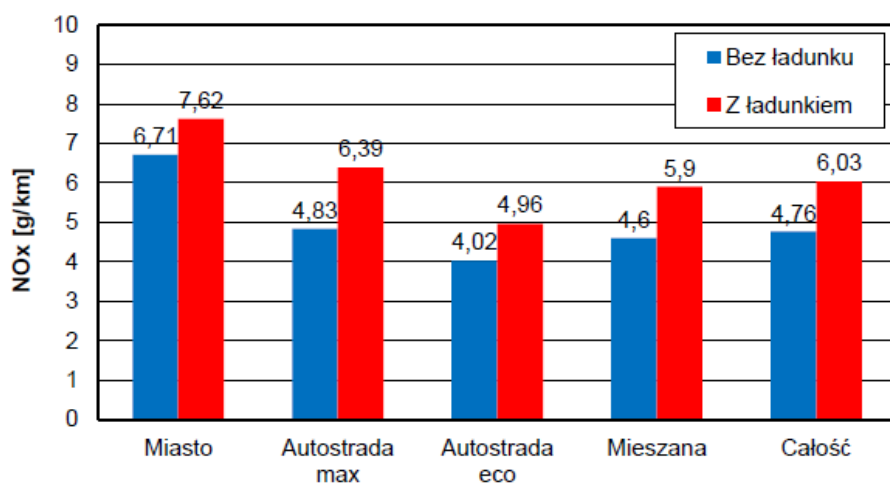
Tab. 2.1. Długości odcinków pomiarowych [43]

Długość cyklu	Miasto	Autostrada max	Autostrada eco	Mieszana	Całość
Bez ładunku	11	18,2	20,3	46	95,5
Z ładunkiem	10,7	20	18,1	42,1	90,9

Zaobserwowano znaczące różnice w emisji toksycznych substancji spalin w zależności od tego, czy pojazd poruszał się pod obciążeniem czy bez obciążenia. Dla emisji CO₂ największa różnica została zarejestrowana w cyklu „Autostrada max” i wyniosła 160 g/km a dla całości trasy emisja dwutlenku węgla podczas przejazdu z obciążeniem wynosiła 615 g/km i 477 g/km bez obciążenia (rys. 2.10). Najmniejszą różnicę w emisji CO₂ zaobserwowano dla cyklu „Autostrada eco” wynoszącą 93 g/km. Można stwierdzić, że podczas przejazdów pojazdem obciążonym pozostałe wzięte pod uwagę w trakcie pomiarów wartości emisji substancji toksycznych z układu wydechowego takie jak tlenek węgla i NO_x (rys. 2.11) są o około 30% wyższe niż dla przejazdów tym samym pojazdem, bez obciążenia [43].



Rys. 2.10. Wartości emisji drogowej CO₂ w poszczególnych cyklach [43]

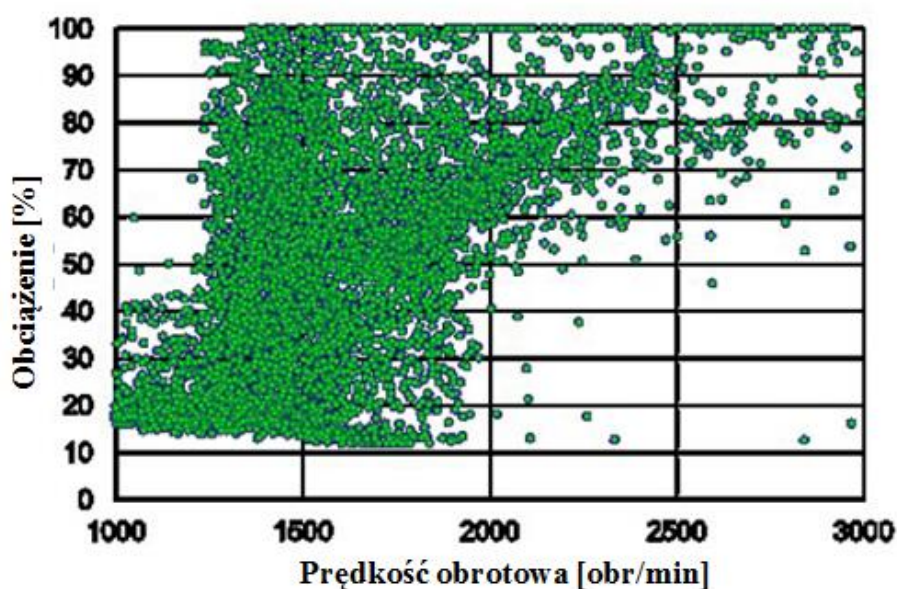


Rys. 2.11. Wartości emisji drogowej NO_x w poszczególnych cyklach [43]

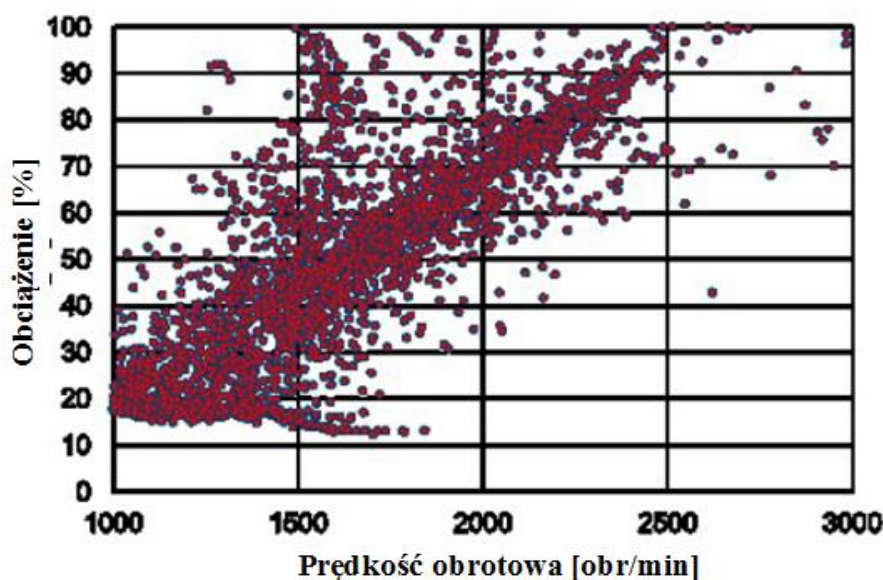
Warto nadmienić, że na wartość emisji substancji szkodliwych z pojazdu ma wpływ także kąt nachylenia drogi. Zasadnym jest zatem dokonanie oceny różnicy w emisji substancji szkodliwych z układu wydechowego silnika między wartościami wynikającymi z pomiarów emisji na drodze płaskiej i drodze o zmiennym nachyleniu. Dokonano zatem weryfikacji emisyjności pojazdu kategorii SUV (*Sport Utility Vehicle*) o zapłonie iskrowym, spełniającym normę emisji Euro 5 w rzeczywistym ruchu drogowym o zróżnicowanej topografii i porównano je z wynikami pomiarów emisji podczas jazdy po terenie płaskim. Trasy badawcze zostały dobrane tak, aby w jak największym stopniu uwzględnić wpływ zmian kąta nachylenia drogi na wartości emisji. Uwzględniana definicja

pochylenia drogi jest zgodna z obowiązującą w transporcie drogowym i oznacza różnicę wysokości między dwoma punktami drogi, odniesioną do odległości je dzielącej.

Wartość nachylenia drogi podczas badań w terenie górzystym wynosiła dla 70% czasu trwania testu ponad 2%. Do badań wykorzystano mobilny analizator spalin współpracujący z modułem GPS i dokonano pomiarów natężeń emisji tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu, dwutlenku węgla oraz cząstek stałych. Zarejestrowany w terenie płaskim obszar pracy silnika był największy w zakresie średniego obciążenia i małych prędkości obrotowych (rys. 2.12), natomiast w terenie górzystym największy obszar pracy odnotowano dla obszarów wyznaczonych przez linie biegnące między punktami opisującymi prędkości obrotowe i obciążenie silnika 1000 obr/min i 20% oraz 2500 obr/min i 100% (rys. 2.13).



Rys. 2.12. Warunki pracy silnika podczas badań drogowych w terenie płaskim [43]



Rys. 2.13. Warunki pracy silnika podczas badań drogowych w terenie górzystym [43]

Pomiar stężenia tlenku węgla w trasie płaskiej oscylował w granicach 0,02% nie przekraczając 200 ppm poza chwilowymi dynamicznymi stanami pracy silnika, w których natężenie emisji dochodziło do 40 mg/s. W terenie górzystym stężenie oscylowało w granicach 0,01%. Stężenie cząstek stałych w terenie górzystym na początku testu oscylowało na poziomie 0,15 mg/m³, następnie uległo zmniejszeniu i w końcowym etapie stężenie było najwyższe.

Dla określenia wpływu nachylenia drogi na wzrost emisji substancji szkodliwych, trasę podzielono na obszary charakterystyczne pod względem nachylenia drogi. Otrzymane wyniki analizy po uwzględnieniu tego podziału pozwoliły stwierdzić, że małe zmiany kąta nachylenia w największym stopniu skutkują zmianami emisji tlenku węgla. W przypadku większych nachyleń, największe zmiany następują w zakresie emisji cząstek stałych. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że zmiana kąta nachylenia drogi o 10% zwiększa emisję szkodliwych substancji spalin dwukrotnie. Analizując wszystkie przedziały nachylenia drogi jakie odnotowano w badaniach, można dojść do wniosku, że każde nachylenie drogi skutkuje wzrostem emisji toksycznych składników spalin.

3. Stanowiskowe i eksploatacyjne badania emisji toksycznych składników spalin silnikowych

3.1. Standardowe testy jezdne

Pomiary liczby cząstek stałych oraz szkodliwych składników spalin przeprowadza się w warunkach laboratoryjnych oraz podczas jazdy w warunkach drogowych. W laboratoriach służą do tego tzw. hamownie podwoziowe, gdzie silnik zainstalowany jest w samochodzie, którego koła są umieszczone na specjalnych rolkach jezdnych lub silnik wymontowany z pojazdu zamocowany jest na oddzielnym stanowisku – tzw. hamowni silnikowej, gdzie pracuje przy zadanej, zmiennej prędkości obrotowej i obciążaniu według specjalnie opracowanego testu. Do pomiarów składników spalin oraz parametrów pracy silnika wykorzystuje się odpowiednie czujniki i rejestratory. Badania w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego wykonywane są za pomocą mobilnych analizatorów emisji spalin, pozwalają na rejestrację rzeczywistej emisji eksploatacyjnej. Zaletą metody laboratoryjnej jest powtarzalność wyników i duża dokładność stosowanych analizatorów, za czym idzie możliwość prowadzenia badań homologacyjnych pojazdów, natomiast podstawową ich wadą jest brak możliwości wykonywania pomiarów w rzeczywistym ruchu drogowym.

Poniżej opisano różne cykle jezdne stosowane na hamowniach podwoziowych [67].

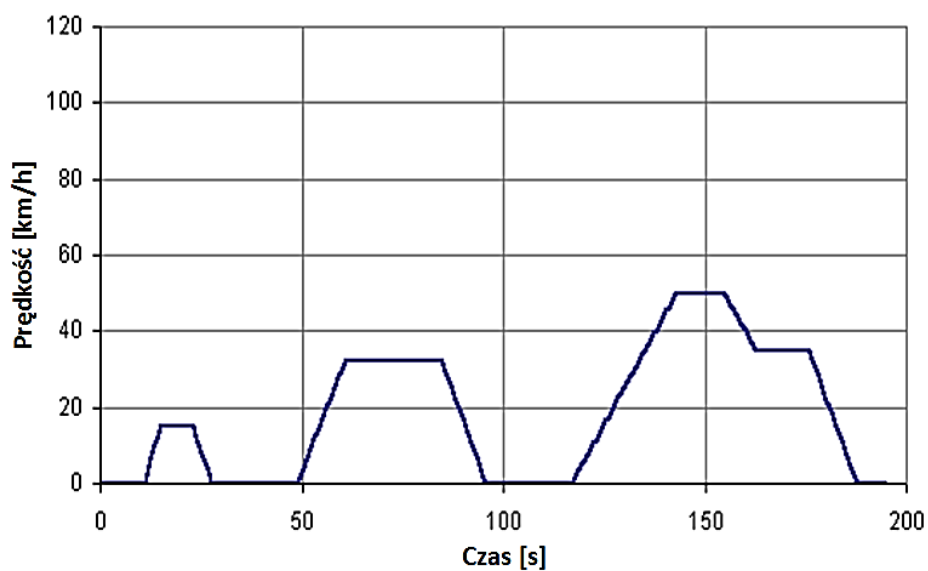
Cykl jezdny ECE + EUDC

Cykl jezdny ECE + EUDC (zwany także cyklem MVEG-A) jest to test jezdny stosowany w Unii Europejskiej podczas pomiarów emisji oraz zużycia paliwa w pojazdach lekkich (według Dyrektywy 90/C81/01). Test wykonywany jest na hamowni podwoziowej i składa się z powtórzonych czterokrotnie segmentów ECE (zwanymi także UDC *Urban Driving Cycle*), stworzonych w celu symulowania jazdy miejskiej przy małych prędkościach pojazdu oraz jednego segmentu EUDC. Przed pomiarami samochód przechodzi co najmniej 6-godzinną aklimatyzację w warunkach środowiskowych przyszłego pomiaru, w temperaturze 20–30°C.

Cykl jezdny NEDC

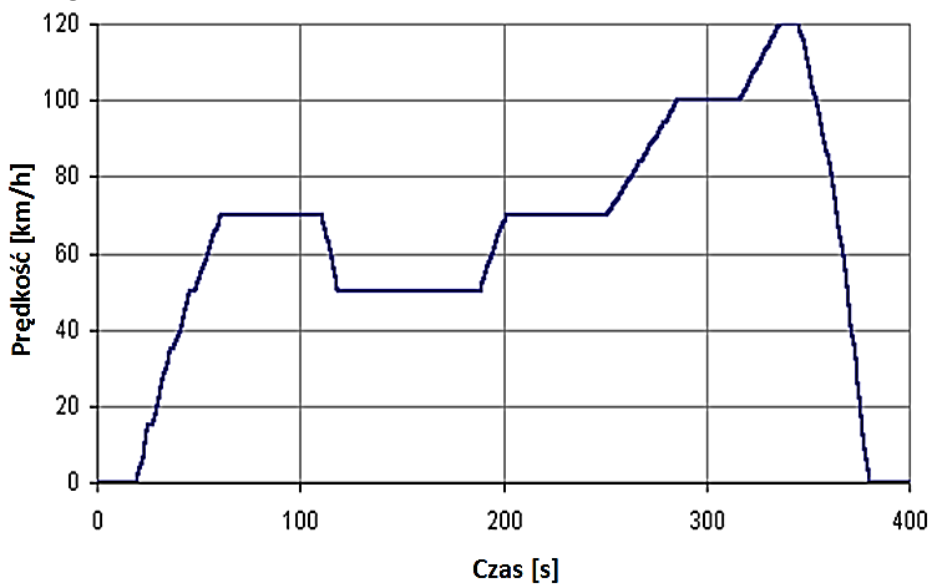
W teście NEDC (*New European Driving Cycle*) zwanym także cyklem MVEG-B) wyeliminowano 40-sekundowy okres pracy silnika przed rozpoczęciem pomiarów. Pomiary emisji rozpoczynają się wraz z zimnym rozruchem silnika w zerowej sekundzie testu. Przebieg testu podobnie jak w omawianym powyżej ECE + EUDC składa się z powtórzonych po sobie czterokrotnie części UDC.

Na rys. 3.1 przedstawiono zależność prędkości i czasu według cyklu jezdny ECE 15.



Rys. 3.1. Cykl jezdny ECE 15

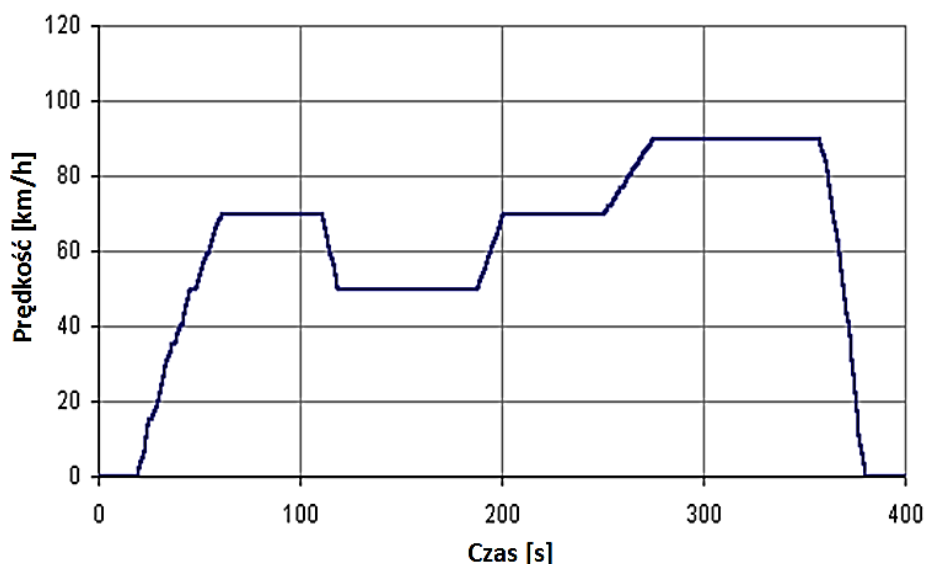
Na rys. 3.2 przedstawiono zależność prędkości i czasu według cyklu jezdny EUDC.



Rys. 3.2. Cykl jezdny EUDC

Segment EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*) został dołożony do testu po segmentach ECE z powodu bardziej dynamicznej charakterystyki i potrzeby badań emisji pojazdów także przy symulowanych większych prędkościach pojazdu i obciążeniach silnika. Maksymalna prędkość w EUDC wynosi 120 km/h natomiast w ECE jest to 50 km/h. Alternatywna wersja cyklu EUDC dla pojazdów o mniejszej mocy charakteryzuje się również zwiększoną maksymalną prędkością pojazdu, ale do 90 km/h.

Na rys. 3.3 przedstawiono zależność prędkości i czasu według cyklu EUDC dla pojazdów o małej mocy, a w tab. 3.1 przedstawiono porównanie parametrów cykli ECE 15, EUDC oraz NEDC.



Rys. 3.3. Cykl jezdny EUDC dla pojazdów o małej mocy

Tab. 3.1. Porównanie parametrów cykli ECE 15, EUDC oraz NEDC [67]

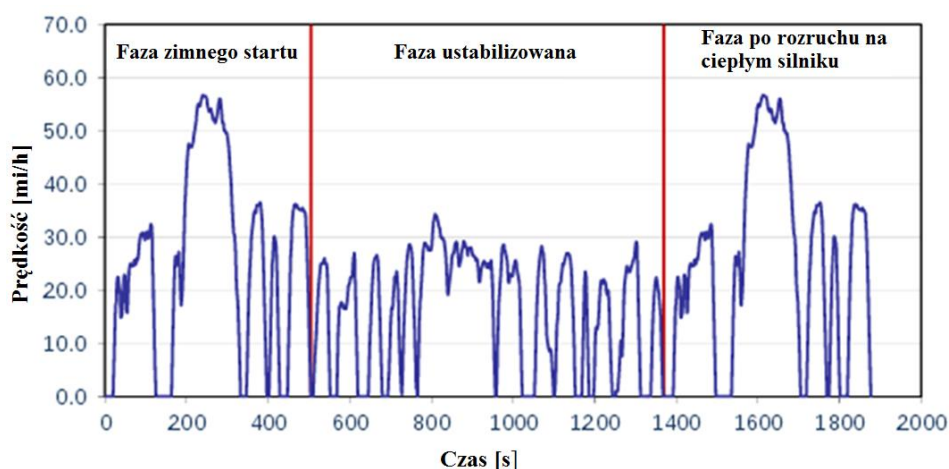
	Jednostka	ECE 15	EUDC	NEDC
Dystans	km	0,99	6,95	10,93
Czas całkowity	s	195	400	1180
Czas pracy na biegu jałowym	s	57	39	267
Prędkość średnia (z postojem)	km/h	18,35	62,59	33,35
Prędkość średnia (bez postoju)	km/h	25,93	69,36	43,10
Prędkość maksymalna	km/h	50	120	120
Średnie przyspieszenie	m/s ²	0,60	0,35	0,51
Maksymalne przyspieszenie	m/s ²	1,04	0,83	1,04

Cykl jezdny FTP-75

Cykl jezdny FTP-75 (*Federal Test Procedure*). Jest wykorzystywany w Stanach Zjednoczonych do pomiaru emisji oraz zużycia paliwa w pojazdach lekkich. Często nazywany w skrócie FTP co może prowadzić do pomyłek ponieważ test FTP jest cyklem dla pojazdów ciężkich. Cykl jezdny FTP-75 jest jednym z dwóch wariantów UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*). W porównaniu do pierwszego wariantu czyli cyklu FTP-72 jest przedłużony o fragment identyczny z pierwszymi 505 sekundami cyklu FTP-72, ale z ciepłym startem silnika. Przed trzecią fazą testu FTP-75 silnik pojazdu wyłączany jest na 10 minut. Można więc wyróżnić następujące cztery etapy testu:

- faza pracy po zimnym rozruchu (temperatura otoczenia 20–30°C), 0–505 s cyklu,
- faza ustabilizowana, 506–1372 s cyklu,
- aklimatyzacja przy ciepłym silniku, czas trwania 540–660 s,
- faza pracy po ciepłym rozruchu, 0–505 s.

Wykres przebiegu prędkości cyklu FTP-75 przedstawiono na rys. 3.4:



Rys. 3.4. Cykl jezdny FTP-75 (US EPA Urban Dynamometer Driving Schedule UDDS) [67]

W tab. 3.2 przedstawiono pozostałe parametry testu FTP-75.

Tab. 3.2. Parametry cyklu jezdny FTP-75 [67]

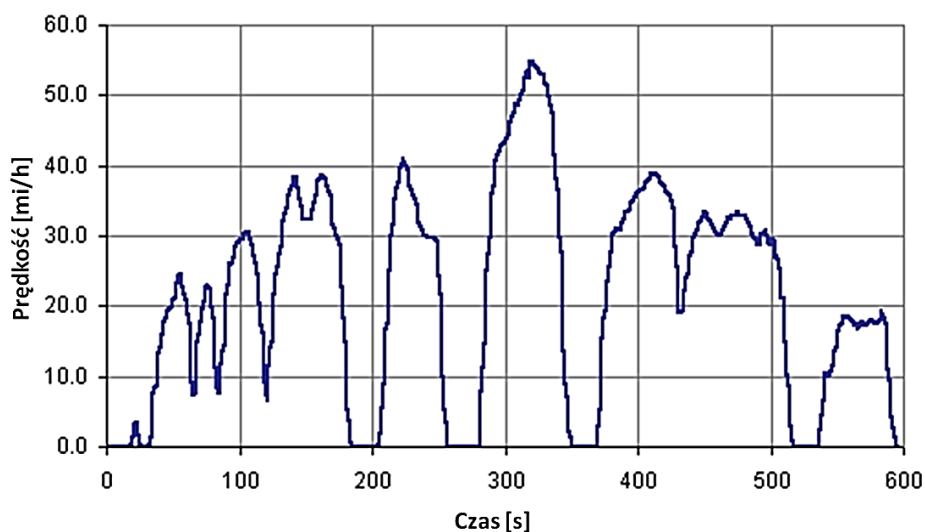
Czas trwania [s]	1877
Dystans [km]	17,77
Prędkość średnia [km/h]	34,12
Prędkość maksymalna [km/h]	91,25

Obecnie, w celu uzyskania homologacji w Stanach Zjednoczonych, pojazdy prócz testu FTP-75 muszą także być dodatkowo poddane procedurze SC03 obejmującej badania pojazdu na hamowni podwoziowej w temperaturze otoczenia 35°C w celu określenia emisji z pojazdu przy włączonym w nim urządzeniu klimatyzacyjnym.

Wykres przebiegu cyklu SFTP SC03 przedstawiono na rys. 3.5, a pozostałe parametry testu SFTP SC03 w tab. 3.3.

Tab. 3.3. Parametry cyklu jezdny SFTP SC03 [67]

Czas trwania [s]	596
Dystans [km]	5,8
Prędkość średnia [km/h]	34,8
Prędkość maksymalna [km/h]	88,2

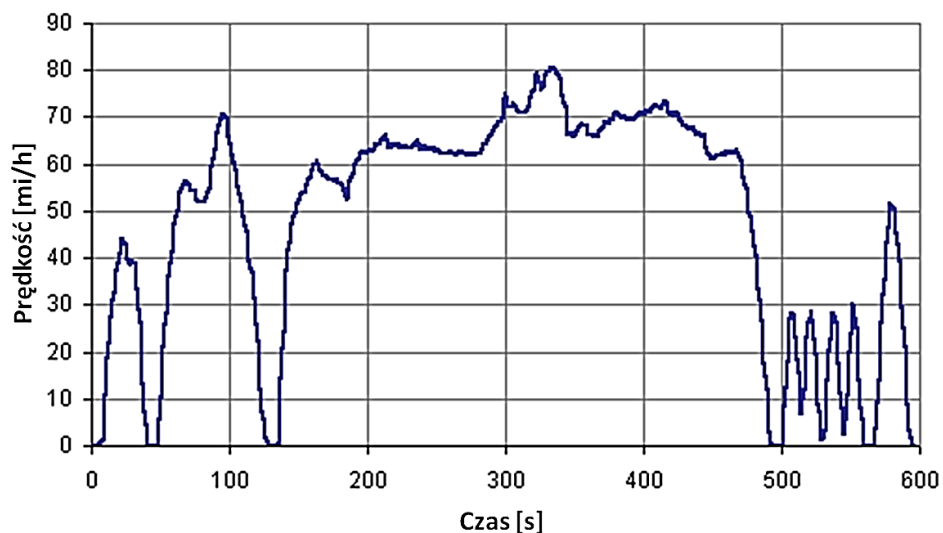


Rys. 3.5. Cykl jezdny SFTP SC03

Procedura US06 SFTP została opracowana w celu uzupełnienia testu FTP-75 o symulację jazdy samochodu w sposób bardziej dynamiczny oraz z większą prędkością. Wykres przebiegu cyklu SFTP US06 przedstawiono na rys. 3.6. W tab. 3.4 podano pozostałe parametry cyklu.

Tab. 3.4. Parametry cyklu jezdny SFTP US06 [67]

Czas trwania [s]	596
Dystans [km]	12,8
Prędkość średnia [km/h]	77,9
Prędkość maksymalna [km/h]	129,2



Rys. 3.6. Cykl jezdny SFTP US06

Cykl jezdny WLTP (*World Harmonized Light Vehicles Test Procedures*)

Pojazdy samochodowe projektuje się tak, aby były zdolne spełnić wymagania emisji spalin stawiane im przez różne rynki motoryzacyjne. Spełnianie przez pojazd różnych norm emisji spalin w różnych krajach stwarza wysokie wymagania zarówno z punktu widzenia inżynierów jak i z punktu widzenia administracyjnego. Celowe zatem jest stworzenie globalnej procedury testowej emisji z pojazdu. Obecnie trwają prace mające na celu opracowanie takich ogólnościowych przepisów technicznych (*GTR – Global Technical Regulation*). W zakresie emisji jest to Światowa Zharmonizowana Procedura Badań Pojazdów Lekkich (*WLTP – World Harmonized Light Vehicles Test Procedures*). W procedurze opracowano nowe cykle jezdne do badań emisji zanieczyszczeń z układu wydechowego oraz dopracowano procedury związane z pomiarem całkowitych oporów ruchu pojazdu na drodze. Znajomość tych oporów pozwala na odpowiednią regulację hamowni podwoziowej.

Przebieg testu WLTC (*World Harmonized Light Vehicles Test Cycle*) jest różny w zależności od badanej klasy pojazdu i jego prędkości maksymalnej. Dla uporządkowania procedur pojazdy zostały podzielone na 3 klasy: 1, 2 i 3. Klasa 3 została podzielona dodatkowo na dwie podklasy w zależności od prędkości maksymalnej $v_{\max}$: klasa 3a dla $v_{\max} < 120$ km/h oraz klasa 3b dla $v_{\max} \geq 120$ km/h. Przypisanie pojazdu do danej klasy odbywa się na podstawie współczynnika P_{RM} określonego według zależności:

$$P_{RM} = \frac{P_{\text{rated}}}{m_{\text{um}}} \quad (3.1)$$

gdzie:

P_{RM} – współczynnik określający stosunek mocy znamionowej silnika do masy własnej pojazdu,

P_{rated} – moc znamionowa silnika zdefiniowana jako maksymalna moc silnika w kW określona według procedury homologacyjnej lub przepisów krajowych. W przypadku braku definicji, moc znamionowa silnika powinna być określona przez producenta, zgodnie z regulaminem nr 85 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) stanowiącym o jednolitych przepisach dotyczących homologacji silników spalinowych lub elektrycznych układów napędowych przeznaczonych do napędzania pojazdów silnikowych kategorii M i N w zakresie pomiaru mocy netto oraz maksymalnej mocy,

m_{um} – masa własna samochodu, kg.

Schemat klasyfikacji pojazdów według WLTP przedstawiono na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Klasyfikacja pojazdów samochodowych wg WLTP [54]

Cykle jezdne WLTP zostały podzielone na 4 fazy o określonym czasie trwania:

- Low, czas trwania 589 s,
- Medium, czas trwania 433 s,
- High, czas trwania 455 s,
- Extra High, czas trwania 323 s.

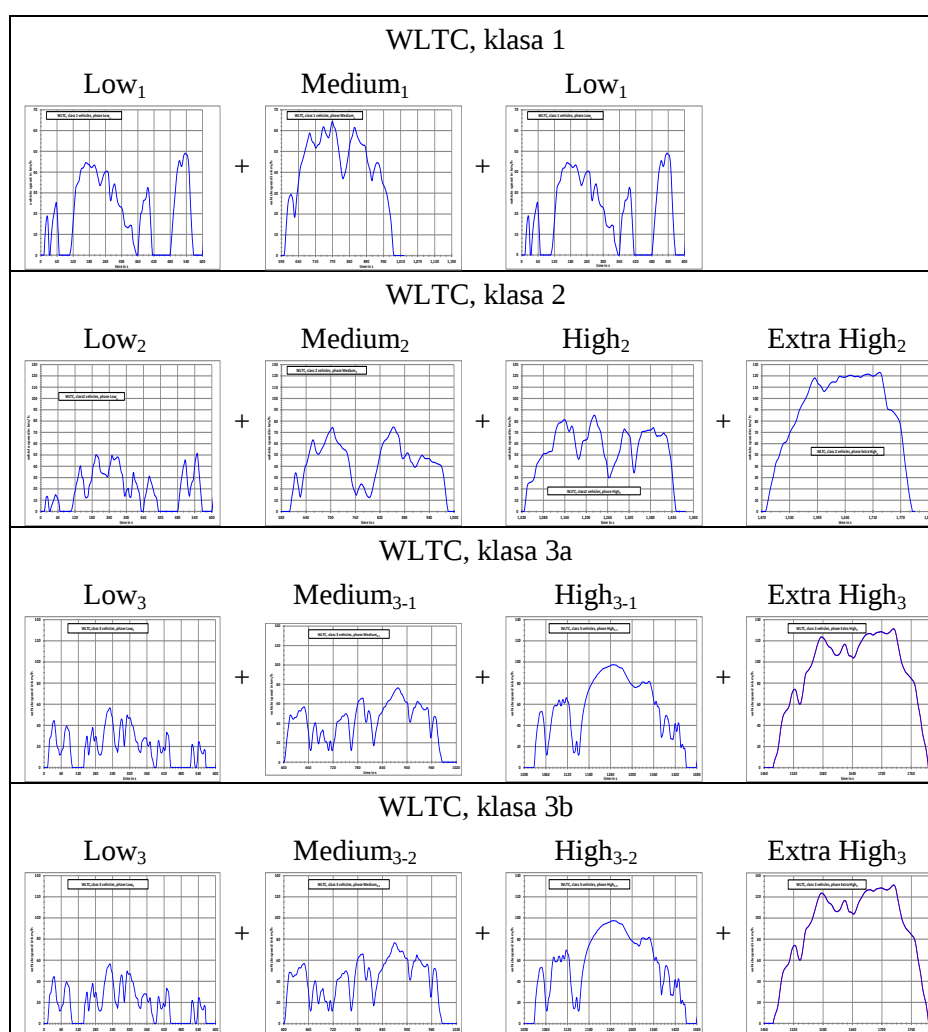
W zależności od klasy pojazdu wyróżnia się:

- trzy fazy Low: Low₁ dla klasy 1, Low₂ dla klasy 2, Low₃ dla klasy 3,
- cztery fazy Medium: Medium₁ dla klasy 1, Medium₂ dla klasy 2, Medium₃₋₁ dla klasy 3a, Medium₃₋₂ dla klasy 3b,
- trzy fazy High: High₂ dla klasy 2, High₃₋₁ dla klasy 3a, High₃₋₂ dla klasy 3b,
- dwie fazy Extra High: Extra High₂ dla klasy 2, Extra High₃ dla klas 3a i 3b [65].

Cykle jezdne dla poszczególnych klas pojazdów składają się z następujących po sobie faz (rys. 3.8):

- klasa 1: $Low_1 + Medium_1 + Low_1$,
- klasa 2: $Low_2 + Medium_2 + High_2 + Extra\ High_2$,
- klasa 3a: $Low_3 + Medium_{3-1} + High_{3-1} + Extra\ High_3$,
- klasa 3b: $Low_3 + Medium_{3-2} + High_{3-2} + Extra\ High_3$.

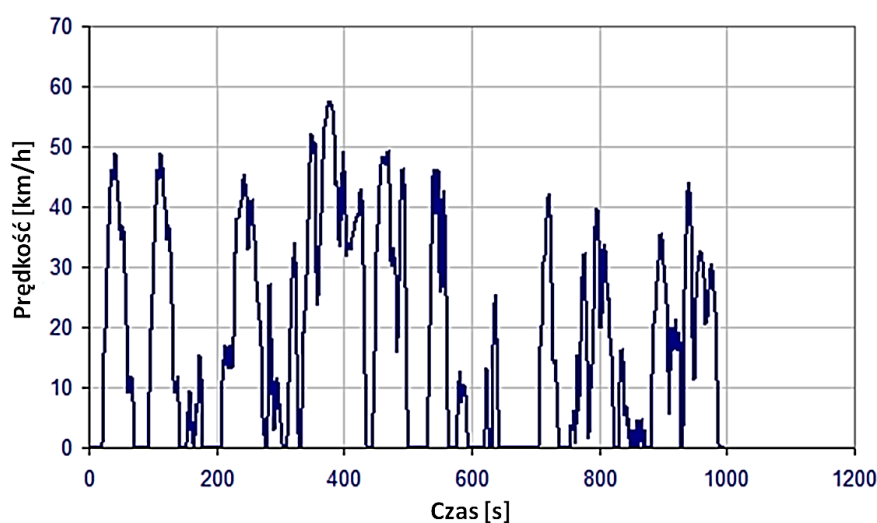
Na rys. 3.8 przedstawiono cykle jezdne według procedury WLTP, gdzie oś pionowa odpowiada prędkości, a pozioma czasowi.



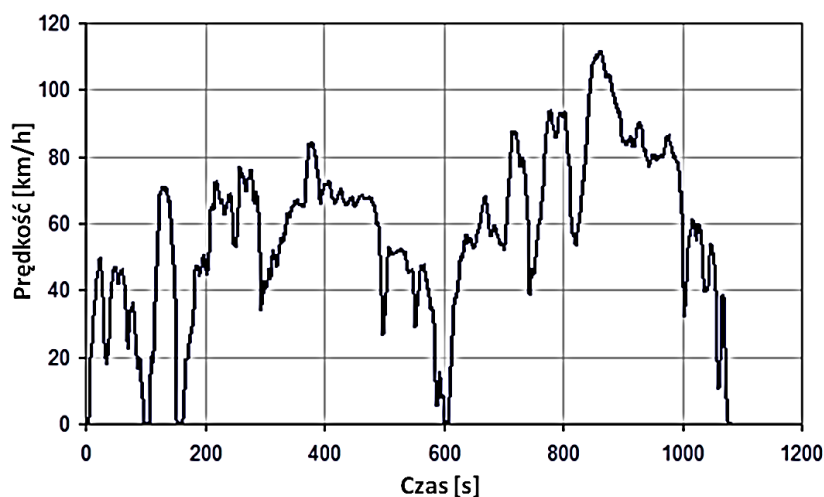
Rys. 3.8. Wykresy cykli jezdnych dla poszczególnych klas pojazdów [54]

Cykle CADC (*Common Artemis Driving Cycles*)

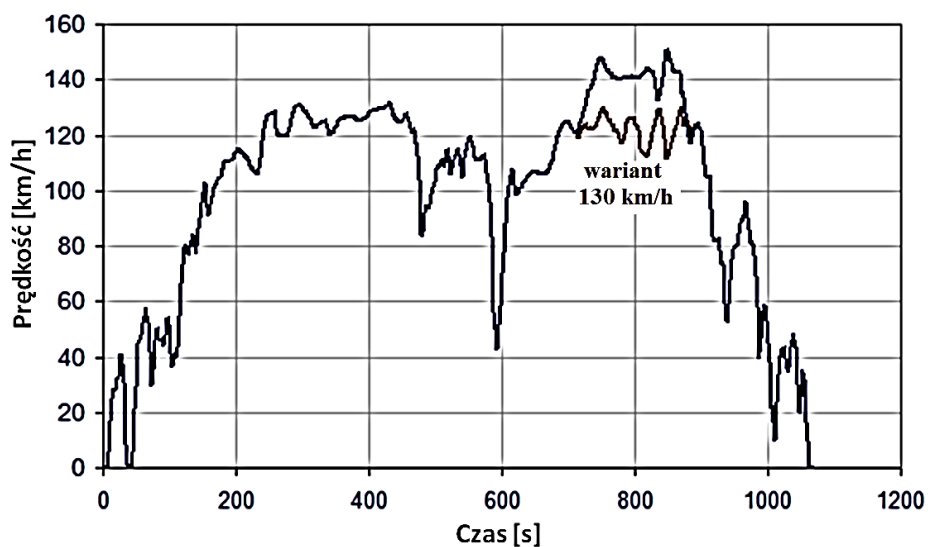
CADC to procedury pomiarowe wykonywane na hamowni podwoziowej opracowane na podstawie rzeczywistych przejazdów drogowych przez Artemis (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems). W skład CADC wchodzi trzy cykle jezdne: miejski, pozamiejski i autostradowy (rys. 3.9, rys. 3.10, rys. 3.11). Test autostradowy dzieli się na dwa warianty: z maksymalną prędkością 130 i 150 km/h. Cykle jezdne Artemis zakładają odpowiednie sekwencje zmiany biegów w pojeździe poddawanych badaniom.



Rys. 3.9. Artemis, cykl miejski



Rys. 3.10. Artemis, cykl pozamiejski



Rys. 3.11. Artemis, cykl autostradowy

W tab. 3.5 przedstawiono charakterystyczne parametry cykli jezdnych Artemis.

Tab. 3.5. Charakterystyczne parametry cykli Artemis [67]

	Miejski	Pozamiejski	Autostradowy 130	Autostradowy 150
Czas trwania [s]	920	1081	1067	1067
Dystans [km]	4,47	17,27	28,74	29,55
Prędkość średnia [km/h]	17,5	57,5	97,0	99,7
Prędkość maksymalna [km/h]	58	112	132	150
rozkład prędkości [%]				
Bieg jałowy	29	3	2	2
Prędkość niska (0 – 50) [km/h]	69	31	15	15
Prędkość średnia (50-90) [km/h]	2	59	13	13
Prędkość wysoka (powyżej 90) [km/h]	0	7	70	70

3.2. Testy drogowe RDE (*Real Drive Emission*)

Dotychczasowe testy homologacyjne samochodów były testami laboratoryjnymi, przeprowadzanymi według określonych w przepisach cykli jezdnych, odtwarzanych na hamowniach podwoziowych. Według rozporządzenia Unii Europejskiej 715/2000/WE oraz 692/2008 od września 2017 roku, poza standardowymi procedurami pomiaru emisji, obowiązkowy będzie także pomiar emisji zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego, tzw. RDE (*Real Drive Emission*). Fakt wprowadzenia tego rodzaju badań wynikał głównie z powodu zwiększonej emisji tlenków azotu z samochodów wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym w ruchu rzeczywistym, pomimo spełniania dopuszczalnych norm emisji mierzonych w warunkach laboratoryjnych. Zgodnie z wprowadzanymi przepisami, wszystkie nowo homologowane pojazdy od września 2017 roku, podczas pomiaru emisji tlenków azotu w warunkach drogowych, nie będą mogły przekroczyć 2,1-krotności maksymalnego limitu określonego w normie Euro. W przypadku Euro 6 obowiązuje ograniczenie 80 mg/km NO_x, czyli w testach drogowych wartość ta nie będzie mogła przekraczać 168 mg/km. W przypadku nowych modeli samochodów, przepis ten zacznie obowiązywać od września 2019 roku. Natomiast od stycznia 2020 roku, a dla nowych modeli od stycznia 2021 roku, współczynnik ten zostanie zmniejszony do 1,5 powodując, że wartość emisji NO_x w warunkach drogowych nie będzie mogła przekroczyć 120 mg/km [47].

Podczas testu RDE, dowolność metodyki przeprowadzania badań jest mocno ograniczona, co w dużej mierze utrudnia jego wykonanie. Pomiaru należy przeprowadzić wedle ustalonych procedur, a wyznaczenie emisji zanieczyszczeń musi być dokonane metodą uśredniania okien pomiarowych MAV (*Moving Average Windows*) bądź metodą kategoryzacji mocy (*Power Binning*). Podczas badania, trasa przejazdu musi być dobrana tak, aby badanie odbywało się bez przerw i obejmowało warunki ruchu w terenie miejskim, a następnie w terenie pozamiejskim i po autostradzie. Przejazd może być przerwany jedynie na krótkie okresy np. podczas przejazdu przez punkty poboru opłat lub na odcinku, gdzie trwają prace drogowe. Kolejność rodzajów ruchu (miejski, wiejski, autostradowy) może zostać w szczególnych wypadkach zamieniona po uzyskaniu zgody organu udzielającego homologacji. Udziały poszczególnych rodzajów przejazdów podczas badania rozkładają się następująco:

- 34% teren miejski,
- 33% teren wiejski,
- 33% ruch autostradowy.

Maksymalna prędkość, zwykle nie przekraczająca 145 km/h może zostać przekroczona o 15 km/h przez nie więcej niż 3% czasu trwania jazdy po autostradzie. Prędkość średnia przejazdu obejmującego jazdę miejską powinna wynosić 15–40 km/h, a okresy zatrzymania, za jakie uznaje się jazdę z prędkością mniejszą od 1 km/h muszą stanowić 6–30% czasu trwania jazdy

w tym rodzaju ruchu. Jazda w terenie miejskim musi zawierać kilka okresów zatrzymania trwających 10 sekund lub dłużej, natomiast okres zatrzymania dłuższy niż 300 sekund skutkuje dyskwalifikacją testu.

W części badania odbywającego się na autostradzie, prędkości jazdy obejmują zakres od 90 do co najmniej 110 km/h, a prędkość pojazdu musi przekraczać 100 km/h przez co najmniej 5 minut. Czas trwania całego testu musi wynieść od 90 do 120 minut. Punkt początkowy i końcowy przejazdu nie może różnić się pod względem wysokości nad poziomem morza o więcej niż 100 m. Proporcjonalne skumulowane zwiększenie dodatknej wysokości bezwzględnej, musi być mniejsze niż 1200 m/100 km i ustala się je zgodnie z dodatkiem do rozporządzenia [47, 49].

Kolejnym obostrzeniem związanym z badaniem RDE jest minimalna odległość podczas przeprowadzania badania na terenach: miejskim, wiejskim i na autostradzie, wynosząca 16 km. Dodatkowo, urządzenie pomiarowe, czyli mobilny analizator spalin typu PEMS należy zasilać z zewnętrznego źródła prądu, a jego instalację w pojeździe należy wykonać tak, aby w jak najmniejszym stopniu ingerowała w rzeczywistą emisję związków toksycznych z pojazdu.

Wszystkie przejazdy muszą być przeprowadzone na utwardzonych drogach i ulicach, w dni robocze określone dla Unii w rozporządzeniu Rady (EWG, Euratom) nr 1182/71.

Parametry, jakie poddawane są rejestracji podczas wykonywania testu RDE przedstawiono w tab. 3.6.

Tab. 3.6. Parametry rejestrowane podczas testu RDE [49]

Parametr	Jednostka	Źródło
Stężenie THC	ppm	analizator
Stężenie CH ₄	ppm	analizator
Stężenie NMHC	ppm	analizator
Stężenie CO	ppm	analizator
Stężenie CO ₂	ppm	analizator
Stężenie NO _x	ppm	analizator
Stężenie PN	1/m ³	analizator
Masowe natężenie przepływu spalin	kg/s	EFM
Wilgotność otoczenia	%	czujnik
Temperatura otoczenia	K	czujnik
Ciśnienie otoczenia	kPa	czujnik
Prędkość pojazdu	km/h	GPS lub ECU
Szerokość geograficzna pojazdu	stopień	GPS
Długość geograficzna pojazdu	stopień	GPS
Położenie pojazdu wg wysokości	M	GPS lub czujnik
Temperatura gazów spalinowych	K	czujnik
Temperatura chłodziwa	K	czujnik lub ECU
Prędkość obrotowa silnika	obr/min	czujnik lub ECU
Moment obrotowy silnika	Nm	czujnik lub ECU
Moment obrotowy na osi napędowej	Nm	urządzenie do pomiaru momentu obrotowego
Pozycja pedału	%	czujnik lub ECU
Przepływ paliwa w silniku	g/s	czujnik lub ECU
Przepływ powietrza dolotowego	g/s	czujnik lub ECU
Status usterki	#	ECU
Temperatura przepływu powietrza dolotowego	K	czujnik lub ECU
Status regeneracji	#	ECU
Temperatura oleju silnikowego	K	czujnik lub ECU
Obecny i pożądaný bieg	#	ECU

4. Prace badawcze nad opracowaniem testów jezdnych

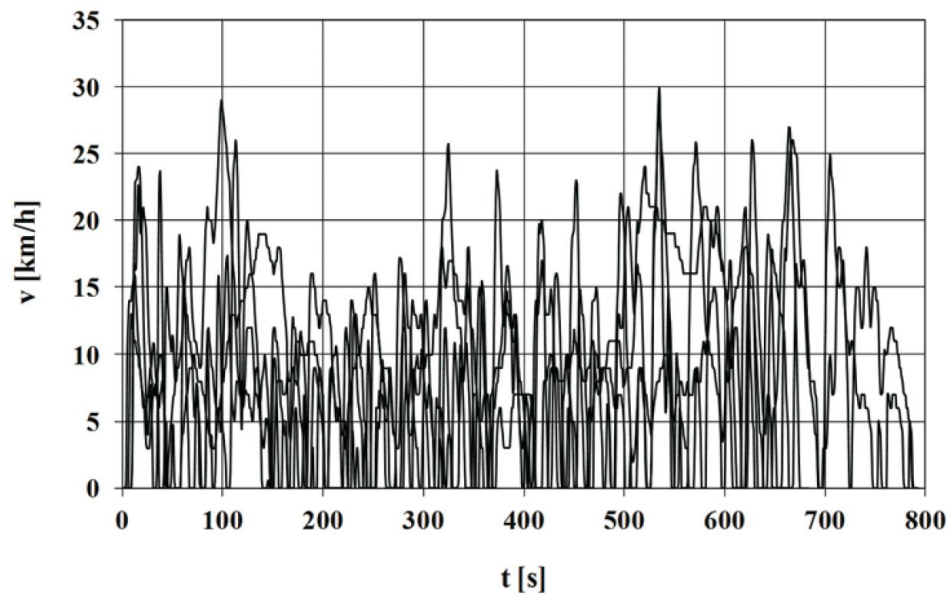
4.1. Badania emisji spalin w testach opracowanych według zasady wiernej symulacji w dziedzinie czasu

W pracy [29] zaprezentowano wyniki badań wpływu na środowisko pojazdów samochodowych z wykorzystaniem metody oceny cyklu istnienia (*Life Cycle Assessment*). Zastosowanie tej metody pozwala na oszacowanie wpływu na środowisko pojazdu w całym jego cyklu istnienia od jego produkcji aż do utylizacji. W pracy zwrócono szczególną uwagę na upraszczany dotąd wpływ okresu eksploatacji pojazdu na środowisko. Opracowano zatem autorską metodę badań oceny cyklu istnienia samochodu z zastosowaniem modeli ruchu opisujących rzeczywiste warunki użytkowania pojazdu. Opracowane modele reprezentowały jazdę w rzeczywistych warunkach ruchu w zatorach ulicznych, w miastach z wyłączeniem zatorów ulicznych, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych [29].

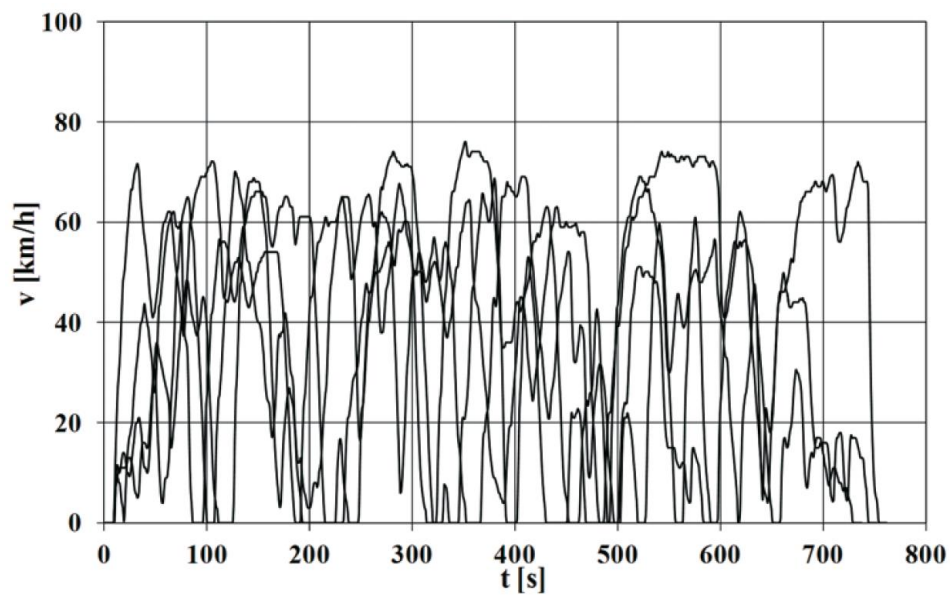
W celu opracowania omawianych modeli wykorzystano materiały zawarte w pracach: Chłopek Z., Biedrzycki J., Lasocki J., Wójcik P.: „Investigation of the motion of motor vehicles in Polish conditinos” [10] oraz Chłopek Z., Biedrzycki J., Lasocki J., Wójcik P.: Sprawozdanie z pracy N N509 556440 “Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zapłonie iskrowym” [11].

Obiektem badań trakcyjnych był samochód Honda Civic z silnikiem o zapłonie iskrowym o pojemności skokowej 1396 cm³, wyprodukowany w 2000 r. Podczas badań w czasie rzeczywistego ruchu drogowego samochodu dokonywano pomiarów: prędkości pojazdu, prędkości obrotowej silnika i sterowania silnika poprzez system OBD pojazdu. Położenie samochodu rejestrowano przy pomocy urządzenia z modułem GPS, a pomiary rejestrowano z częstotliwością 10Hz uniwersalnym czytnikiem informacji diagnostycznej ze sterowników pojazdów zgodnych z normami OBDII/EOBD AMX530 firmy Automex.

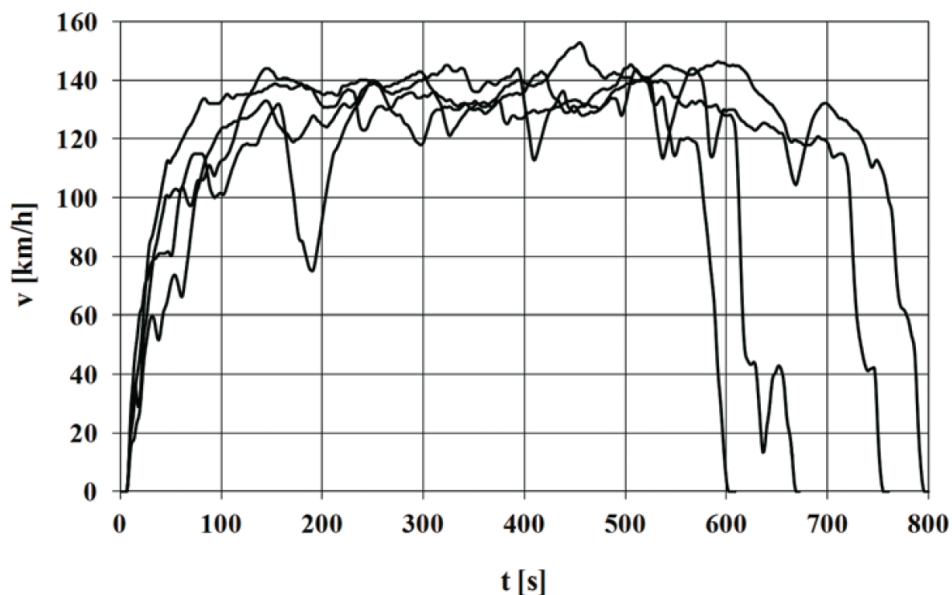
Opracowane na podstawie pomiarów testy jezdne powstały zgodnie z zasadą wiernej symulacji w dziedzinie czasu poprzez odpowiednie dobranie fragmentów zarejestrowanych prędkości, reprezentatywnych dla badanego przebiegu prędkości. Wybrane realizacje przebiegu prędkości jazdy przedstawiono na rys. 4.1–4.3.



Rys. 4.1. Wybrane realizacje przebiegu prędkości jazdy w warunkach ruchu w zatorach ulicznych w miastach [29]



Rys. 4.2. Wybrane realizacje przebiegu prędkości jazdy w warunkach ruchu w miastach [29]

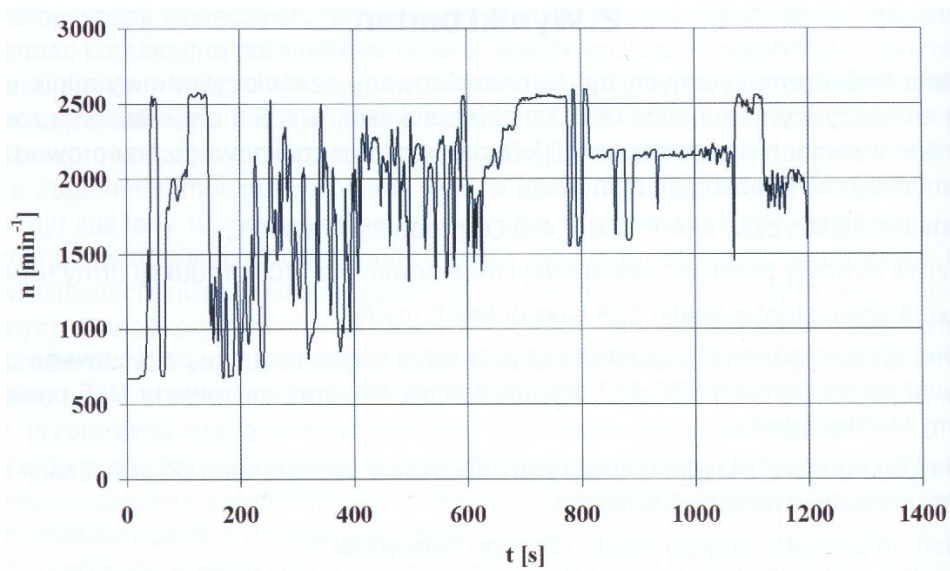


Rys. 4.3. Wybrane realizacje przebiegu prędkości jazdy w warunkach ruchu na autostradach i drogach ekspresowych [29]

Wyznaczone testy jezdne były następnie odtwarzane na hamowni podwozowej. Czas trwania wszystkich opracowanych testów wynosi po 800 sekund. Autor nie brał pod uwagę temperatury pracy silnika, w tym temperatury rozruchu, a przebieg testu reprezentujący warunki rzeczywistego ruchu nie został przyrównany do obecnie stosowanych cykli jezdnych. Porównano emisje poszczególnych składników spalin oraz zużycia paliwa dla testów homologacyjnych EUDC, NEDC, FTP-75, Japan 10-15 Mode oraz HWFET i testów specjalnych [29].

4.2. Badania korelacji emisji zanieczyszczeń i stanów pracy silnika

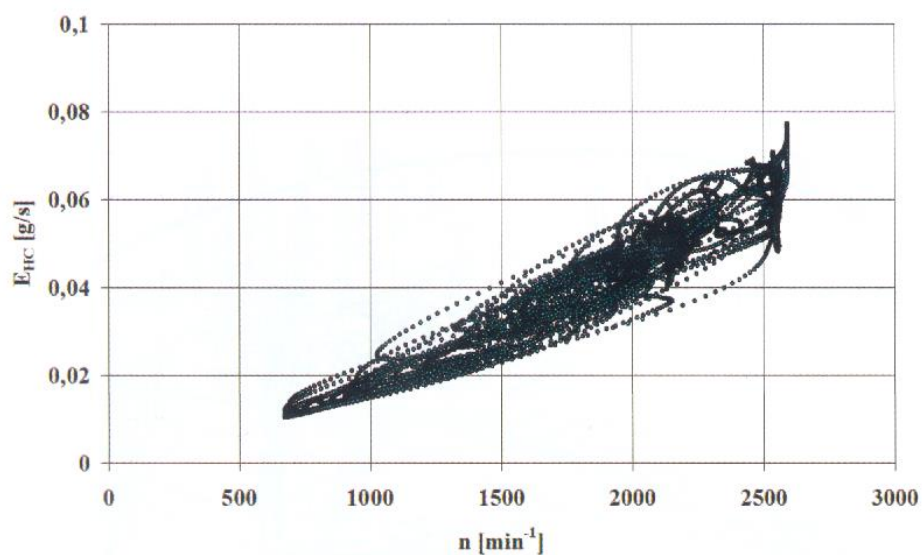
W pracy [14] zaprezentowano wyniki badań korelacji natężenia emisji zanieczyszczeń i stanów pracy silnika. Obiektem badań był silnik o zapłonie samoczynnym Cummins 6C8.3 przy zastosowaniu testu dynamicznego NRTC (*Non-Road Transient Cycle*). W pracy wyznaczono modele matematyczne natężenia emisji zanieczyszczeń jako funkcje wielomianowe stopnia drugiego prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Wykorzystano teorię korelacji liniowej Pearsona, korelacji rang Spearmana, korelacji gamma Kruskala i korelacji Tau Kendalla.



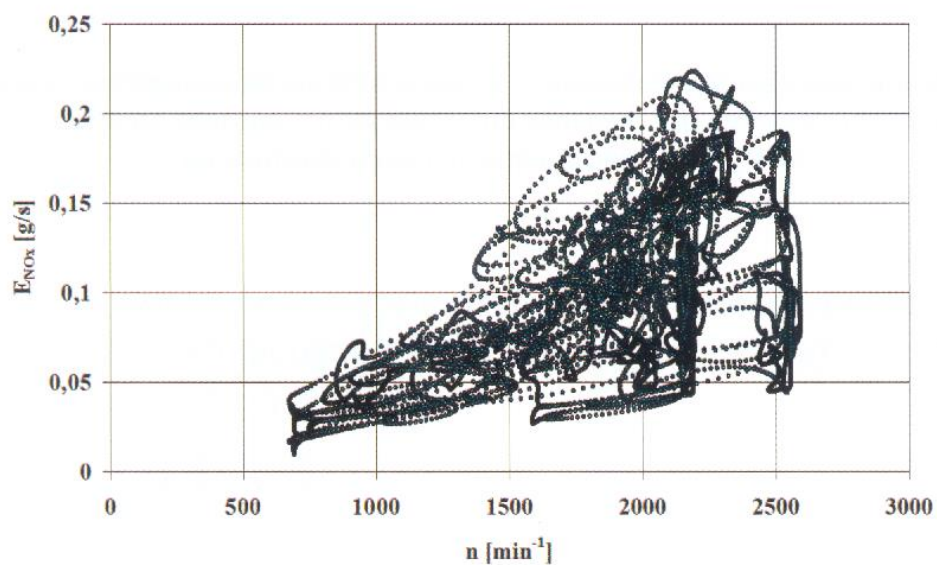
Rys. 4.4. Przebieg prędkości obrotowej – n w funkcji czasu – t w teście NRTC [5]

Badaniom poddawano silnik nagrany do ustabilizowanej temperatury eksploatacyjnej. Wykorzystano model korelacji nieliniowej. Przeprowadzone obliczenia pozwalają stwierdzić, że istnieje wpływ parametrów pracy silnika na natężenie emisji tlenku węgla i natężenie emisji węglowodorów w odróżnieniu od wpływu na natężenie emisji tlenków azotu. Na natężenie emisji tlenku węgla i natężenia emisji węglowodorów główny wpływ ma prędkość obrotowa a na natężenie emisji tlenków azotu głównie wpływa moment obrotowy i moc użyteczna silnika.

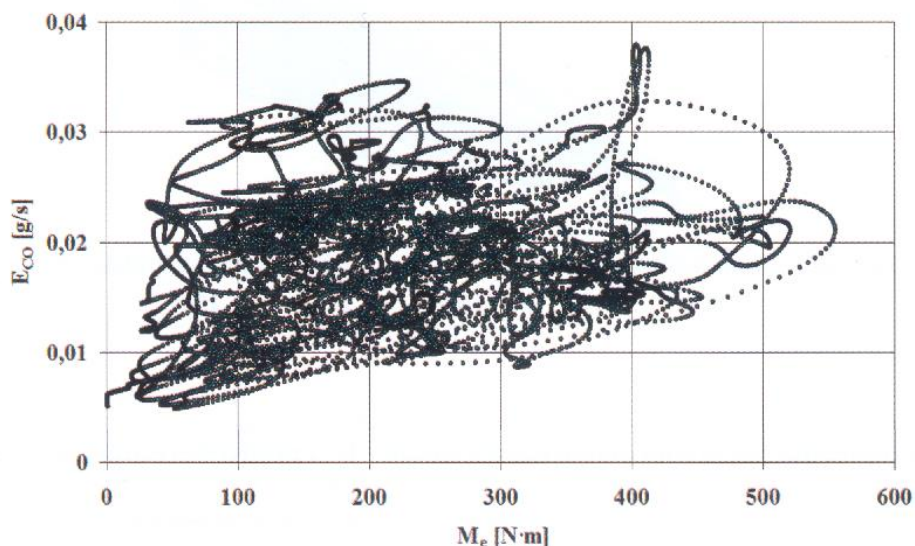
Na rys. 4.5–4.7 przedstawiono wykresy obrazujące poszukiwane zależności korelacyjne natężeń emisji.



Rys. 4.5. Zależność korelacyjna natężenia emisji węglowodorów – E_{HC} i prędkości obrotowej – n w teście NRTC [14]



Rys. 4.6. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenków azotu – E_{NOx} i prędkości obrotowej – n w teście NRTC [14]



Rys. 4.7. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenku węgla – E_{CO} i momentu obrotowego – M_e w teście NRTC [14]

4.3. Analiza warunków pracy pojazdów w testach homologacyjnych

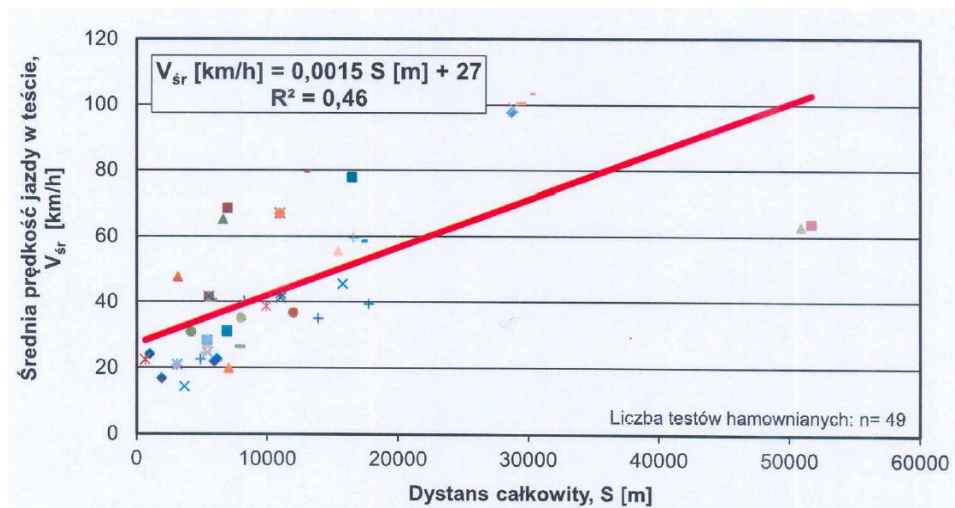
W pracy [35] przeanalizowano parametry testów homologacyjnych pod kątem dokładności reprezentacji warunków drogowych. Celem było opracowanie na podstawie porównania dotychczasowych testów homologacyjnych nowego testu emisji spalin pojazdów zbliżonego do rzeczywistych warunków ruchu drogowego. Wybrano następujące testy jezdne dla pojazdów osobowych, których dopuszczalna masa całkowita nie przekracza 2500 kg:

- ECE 15 – miejski test jezdny,
- EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*) – pozamiejski test jezdny,
- ECE 15 + EUDC (*transient Cycle for Passenger Vehicles and Light Trucks*) – test dla pojazdów osobowych i lekkich pojazdów dostawczych,
- NEDC (*New European Driving Cycle*) – nowy Europejski test jezdny,
- FTP (*Federal Test Procedure*) – federalny test jezdny obowiązujący w Stanach Zjednoczonych,
- US06 FTP (*Supplemental Federal Test Procedure With Very Aggressive and High Speed*) – test uzupełniający FTP przy dynamicznej jeździe i dużej prędkości,
- SC03 FTP (*Supplemental Federal Test Procedure With Air Conditioning*) – test uzupełniający FTP dla pojazdów z klimatyzacją,

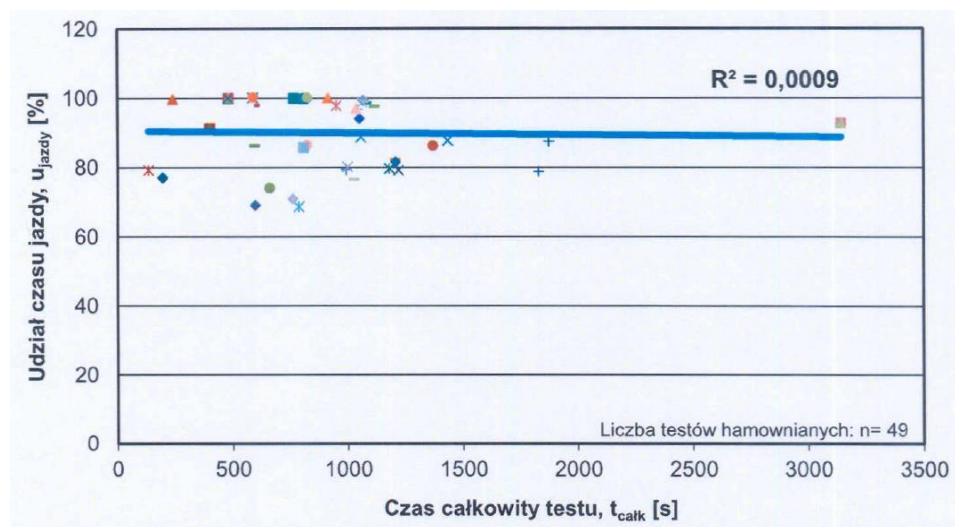
- NYCC – (*New York City Cycle*) – test jezdny odwzorowujący parametry ruchu w Nowym Jorku,
- HWFET – (*Highway Fuel Economy Test*) – autostradowy test zużycia paliwa w Stanach Zjednoczonych,
- IM240 (*Inspecion & Maintenance Driving Cycle*) – cykl inspekcji i dopuszczenia do jazdy,
- California LA92 (*Dynamometer Driving Schedule*) – test hamowniany,
- JP 10 Mode, JP 10-15 Mode, Jp New Transient Mode (*Japanese Legislative Cycles*) – japońskie cykle jezdne,
- TRL WSL (*Technology Readiness Levels Used by Warren Spring Laboratory Cycles*) – cykle wykorzystywane w laboratorium Warren Spring,
- UG214 – testy jezdne wykorzystywane przez Departament Transportu Wielkiej Brytanii podczas realizacji programu „Traffic Management and Quality Research Programme”,
- Artemis (*Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*) – test jezdny na hamowni podwoziowej opracowany w ramach projektu Artemis, w oparciu o analizę statystyczną bazy danych rzeczywistych europejskich wzorców jazdy.

Na podstawie powyższych testów jezdnych wyznaczono i porównano następujące parametry: czas całkowity testu, czas jazdy, czas jazdy ze stałą prędkością, czas przyspieszania, czas zwalniania, czas postoju, udział czasu jazdy, udział czasu jazdy bez zmiany prędkości, udział czasu przyspieszania, udział czasu zwalniania, udział czasu postoju, prędkość średnia jazdy w teście, prędkość średnia jazdy dla $V = \text{const}$, prędkość maksymalna w teście, liczba zatrzymań, średni czas postoju, średni dystans między zatrzymaniami. Z grupy testów TRL wykorzystano testy WSL Urban, WSL Suburban, WSL Rural. Z grupy UG214 wykorzystano testy Suburban Control, Traffic Calming, Cycle-lane, One-way, Mini-roundabout, Urban Traffic Control, Congested Control, Non-congested Control. Z grupy testów Artemis wykorzystano: Urban, Rural, Mw_150, Mw_130, URM150, URM130, HighMot Urban, HighMot Urbdense, HighMot Freeurban, HighMot Rural, HighMot Motorway, LowMot Urban, LowMot Urbdense, LowMot Freeurban, LowMot Rural, LowMot Motorway.

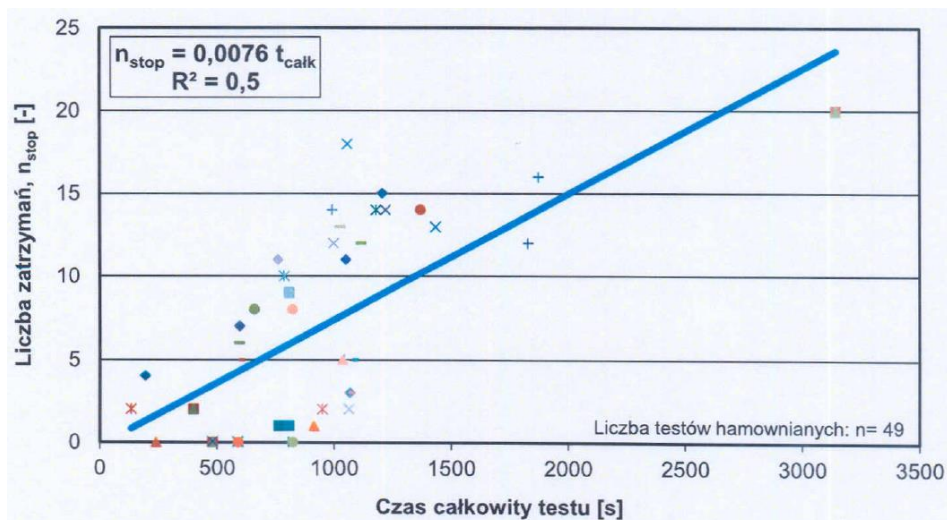
Wyniki analizy wybranych parametrów charakteryzujących wyżej wymienione testy zaprezentowano na rys. 4.8–4.11 [35].



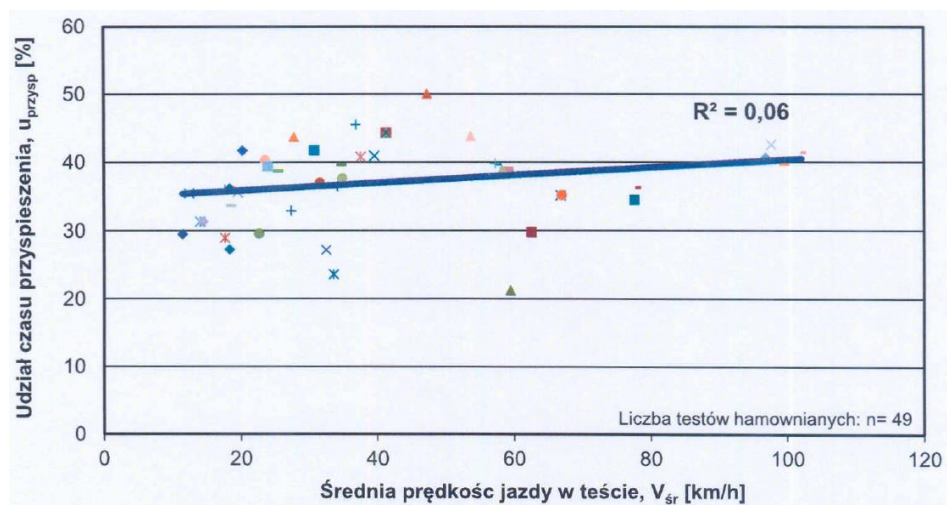
Rys. 4.8. Zależność średniej prędkości jazdy w teście od wartości dystansu całkowitego dla analizowanych testów hamownianych [35]



Rys. 4.9. Zależność udziału czasu jazdy od całkowitego czasu testu dla analizowanych testów hamownianych [35]



Rys. 4.10. Zależność liczby zatrzymań od wartości czasu całkowitego dla analizowanych testów hamownianych [35]



Rys. 4.11. Zależność udziału czasu przyspieszenia od wartości średniej prędkości jazdy w teście dla analizowanych testów hamownianych [35]

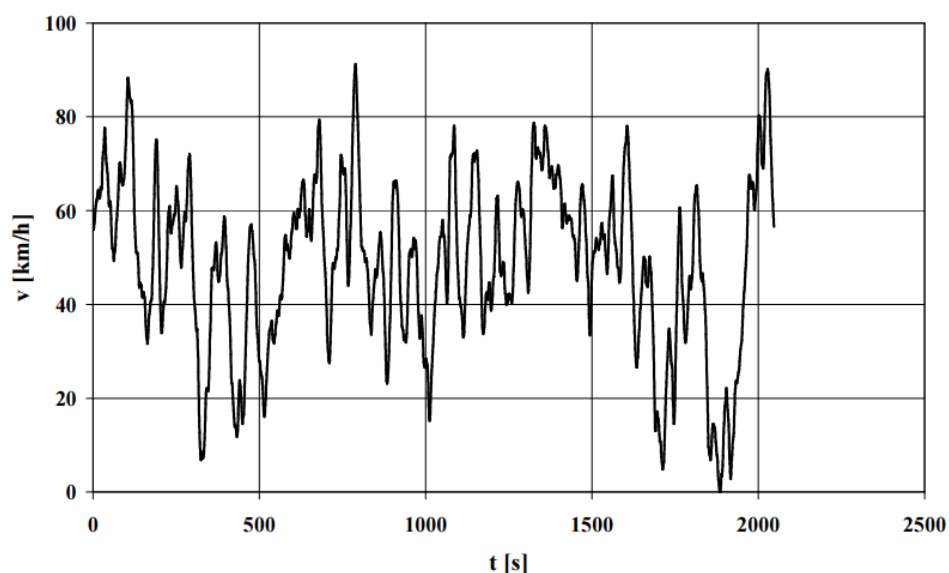
4.4. Synteza testów jezdnych według kryteriów podobieństwa charakterystyk częstotliwościowych

Większość obecnie stosowanych testów do badania pojazdów samochodowych, opracowanych zostało zgodnie z zasadą wiernej symulacji

w dziedzinie czasu. Przykładami takich testów są omówione w rozdziale 3: NEDC, WLTP, CADC czy amerykański FTP-75.

Synteza testów jezdnych zgodnie z kryteriami podobieństwa charakterystyk częstotliwościowych jest odmiennym sposobem przedstawienia możliwości reprezentowania warunków ruchu drogowego w teście stanowiskowym. W pracy [13], testy traktowane są jako realizacje procesu stochastycznego, modelującego warunki rzeczywistego użytkowania pojazdu, a do syntezy przyjęte zostało kryterium podobieństwa charakterystyk w dziedzinie częstotliwości w czasie rzeczywistego użytkowania samochodów i w czasie badań. Omówiono probabilistyczne właściwości badanych wielkości na podstawie stochastycznego procesu prędkości pojazdu na podstawie testu FTP-75.

Na rys. 4.12 przedstawiono przykładową realizację prędkości w teście jezdnym otrzymanym w wyniku syntezy opisywaną metodą.

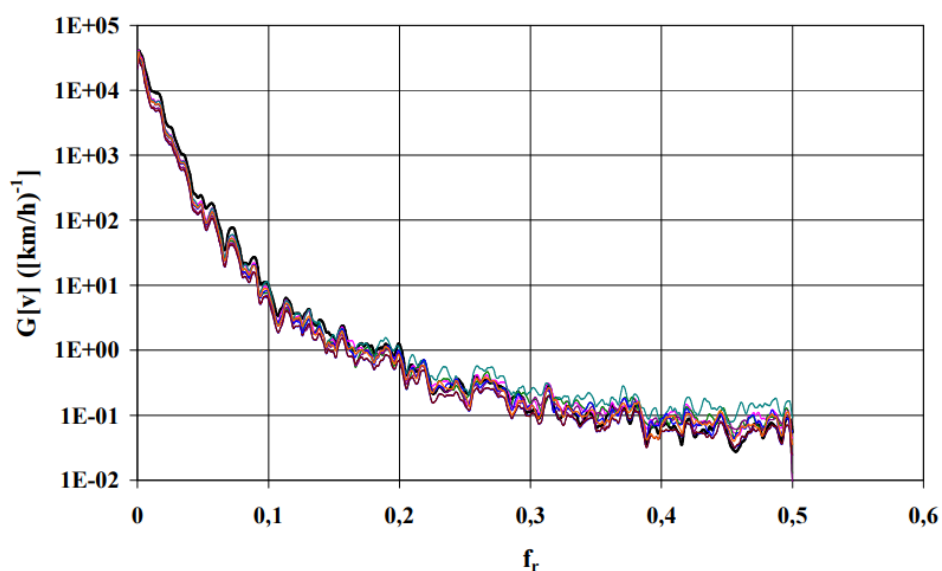


Rys. 4.12. Przykładowa realizacja prędkości samochodu w syntezywanym teście jezdym [13]

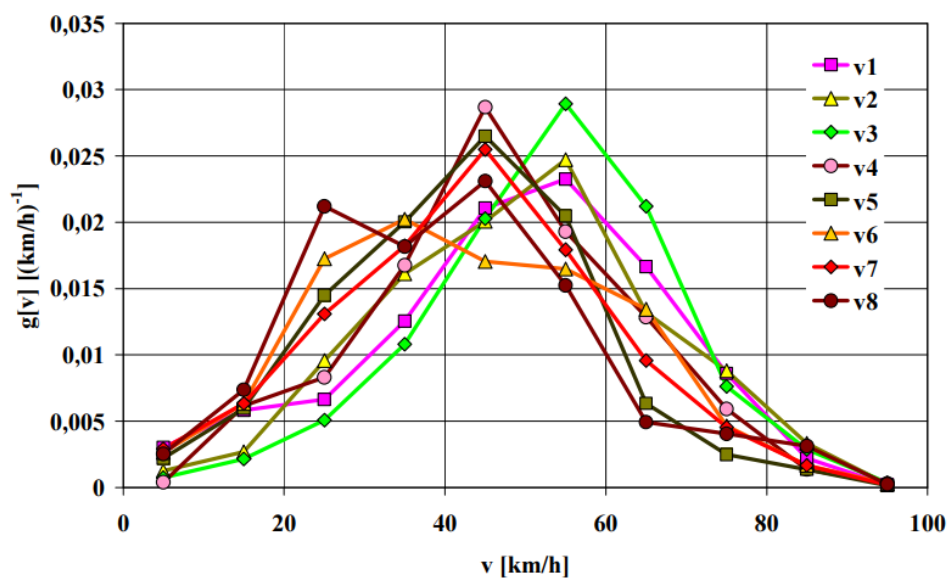
Na rys. 4.13 przedstawiono widmową gęstość mocy G przebiegu prędkości testu wzorcowego oraz przebiegów prędkości w poszczególnych realizacjach testu.

Zaobserwowano dużą zgodność charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych realizacji syntetycznych, z charakterystyką wzorcowego testu. Należy zauważyć, że zgodność ta nie świadczy o zgodności innych charakterystyk określających podobieństwo parametrów testu syntetycznego z wzorcowym. Istnieją także różnice między wyznaczonymi gęstościami prawdopodobieństwa prędkości, zobrazowanymi na rys. 4.14. Wynikają one

z faktu, że podstawą syntezy testu była charakterystyka częstotliwościowa, a nie charakterystyka w dziedzinie wartości procesu.



Rys. 4.13. Widmowa gęstość mocy G przebiegu prędkości testu wzorcowego (linia czarna) oraz przebiegów prędkości w poszczególnych realizacjach testu [13]



Rys. 4.14. Gęstość prawdopodobieństwa g , poszczególnych realizacji przebiegu prędkości [13]

Zaprezentowana metoda syntezy testów, traktowanych jako zbiór realizacji procesu stochastycznego prędkości samochodu z wykorzystaniem kryterium podobieństwa charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej pozwala m.in. na wyznaczenie zero-wymiarowych charakterystyk określających właściwości użytkowe pojazdów oraz ocenę probabilistyczną tych wartości. Testy syntetyzowane omawianą metodą nie mogą posłużyć jednak do reprezentatywnego odzwierciedlenia dynamicznych parametrów pracy pojazdu zarejestrowanych w ruchu drogowym. W związku z tym, także wartości emisji substancji toksycznych z układu wydechowego badanego pojazdu nie będą mogły być uważane za reprezentatywne w stosunku do parametrów ruchu rzeczywistego.

4.5. Eksploatacyjne badania emisji spalin z wykorzystaniem sygnału przepływomierza powietrza

W pracy [27] przedstawiono metodykę drogowych badań emisji spalin z wykorzystaniem informacji o wydatku powietrza zasilającego silnik oraz udziałów objętościowych poszczególnych składników zmierzonych analizatorem spalin.

Obiektem badań był samochód osobowy Toyota Corolla Verso o przebiegu 16500 km, wyposażony w silnik benzynowy 2ZR-FAE o wtrysku wielopunktowym i zmiennych fazach rozrządu Valvematic. Urządzeniami wykorzystanymi do badań były:

- analizator spalin typu MGT5 firmy MAHA, klasy 0 wg OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale),
- diagnostyczny rejestrator parametrów pracy silnika OBD Log firmy Texa,
- telefon komórkowy z systemem GPS i programem umożliwiającym rejestrację przebytej trasy.

Badania przeprowadzono podczas przejazdu w rzeczywistym ruchu ulicznym, a wykorzystany analizator był urządzeniem mobilnym, mierzącym udziały objętościowe wybranych składników spalin bez możliwości określania ich wydatku. W związku z tym prowadzono rejestrację wydatku powietrza przepływającego przez kolektor dolotowy, a pomiar wykonywany był poprzez złącze DLC pojazdu. Informacje na temat udziałów objętościowych kilku składników uzyskano w wyniku pomiaru analizatorem, jednakże potrzebne były także dane na temat udziałów N_2 , H_2O i Ar. W tym celu przeanalizowano reakcję procesu spalania.

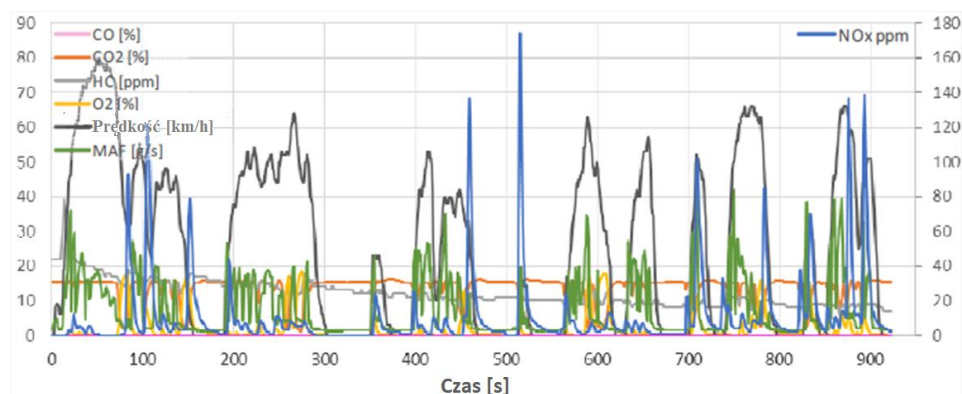
$$C_\beta H_\alpha O_\varepsilon + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2 + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{78}{21} N_2 + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{1}{21} Ar \rightarrow$$

$$\rightarrow \beta \cdot CO_2 + \frac{\alpha}{2} H_2O + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{78}{21} N_2 + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{1}{21} Ar + (\lambda - 1) \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2 \quad (4.1)$$

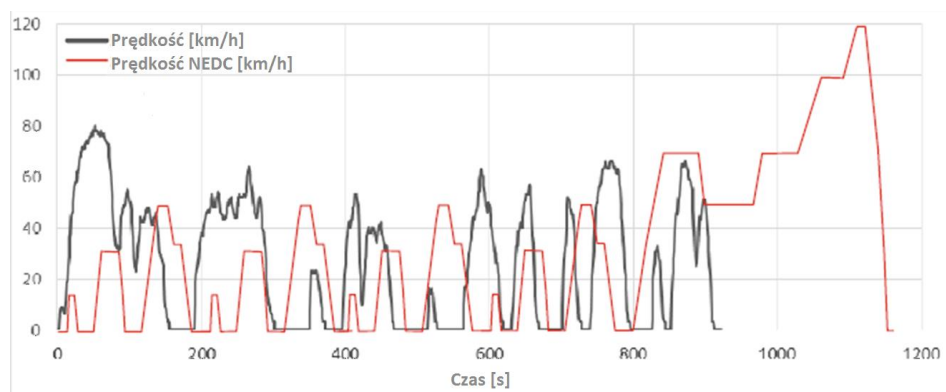
gdzie:

- | | |
|----------------------------------|---|
| $C_\beta H_\alpha O_\varepsilon$ | – paliwo, |
| $\beta, \alpha, \varepsilon$ | – stosunek molowy węgla, wodoru, tlenu do węgla w zastępczej cząsteczce paliwa $C_\beta H_\alpha O_\varepsilon$, |
| λ | – współczynnik nadmiaru powietrza, |
| O_2, N_2, Ar | – wyodrębnione składniki powietrza, |
| CO_2, H_2O, O_2, N_2, Ar | – wyodrębnione składniki spalin. |

W wyniku obliczeń uzyskano wartości udziałów procentowych poszczególnych składników spalin zakładając, że silnik pracuje na mieszance stechiometrycznej.



Rys. 4.15. Udziały objętościowe wybranych składników spalin zarejestrowane podczas próby drogowej na tle prędkości jazdy [27]



Rys. 4.16. Zestawienie przebiegów prędkości w teście realizowanym i w teście NEDC [27]

Metoda badań drogowych z wykorzystaniem przewoźnego analizatora i pomiarami sygnału ilości powietrza poprzez złącze diagnostyczne może służyć jako badanie weryfikacyjne dla poziomu emisji drogowej danego pojazdu. Metoda badawcza jest pracochłonna jednak wskazuje na możliwość konstrukcji podobnych systemów pomiarowych, pozwalających na automatyczne obliczenia i rejestrację wyników. Emisja drogowa spalin mierzona w warunkach drogowych może jednak znacznie różnić się od limitów określonych dla stanowiskowych testów homologacyjnych. Wynika to z innej charakterystyki prędkościowej podczas badania w ruchu drogowym i homologacyjnym. Na dokładność tego typu badania wykonanego podczas pojedynczego przejazdu znaczący wpływ ma radykalnie mniejsza dokładność analizatora w porównaniu

z analizatorami stacjonarnymi. Dodatkowo wykonanie ponowne identycznego testu jest praktycznie niemożliwe. Test nie uwzględnia także temperatury oleju ani cieczy chłodzącej badanego pojazdu, a długość przejazdu jest inna niż testu homologacyjnego stąd porównanie obu testów jest sprawą trudną do rzetelnej realizacji.

4.6. Badania zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w zróżnicowanych warunkach ruchu drogowego

W pracy [39] podjęto problem oceny emisji zanieczyszczeń z pojazdów ciężkich na podstawie badań w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Przedstawiono analizę emisji zanieczyszczeń w odniesieniu do CO₂ zakładając, że wartość jego emisji jest miarą poprawności procesu spalania. Pomiaru zostały wykonane zgodnie z procedurą pomiaru zużycia paliwa SORT 2 w aglomeracji poznańskiej oraz podczas jazdy w ruchu miejskim.

Przyjmując, że ze względu na fizykochemiczny przebieg utleniania w komorze spalania silnika, CO₂ jest miarą poprawności realizacji procesu spalania, może on zostać wykorzystany do oceny emisji zanieczyszczeń z różnego rodzaju jednostek spalinowych. Przy tak przyjętych założeniach, koniecznym jest wprowadzenie wskaźnika toksyczności M zdefiniowanego wzorem:

$$M_j = a \cdot \frac{e_{rzecz,j}}{e_{CO_2}} \quad (4.2)$$

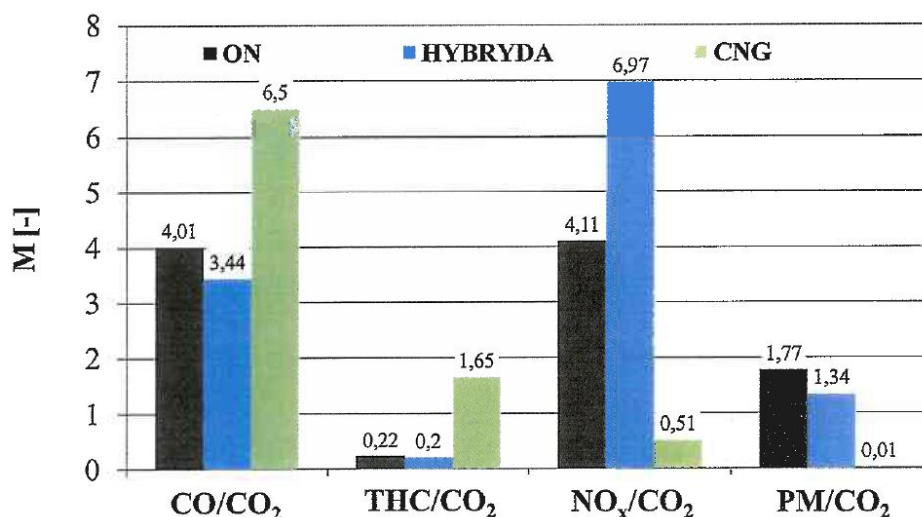
gdzie:

- M – bezwymiarowy wskaźnik toksyczności,
- j – związek toksyczny dla którego wyznaczono wskaźnik emisji,
- a – stała uniwersalna, równa 10^3 dla CO, THC i NO_x, a 10^5 dla PM,
- e_{rzecz} – emisja jednostkowa, drogowa lub masa związku toksycznego j ,
- e_{CO_2} – emisja jednostkowa, drogowa lub masa CO₂ wyznaczona podczas badań.

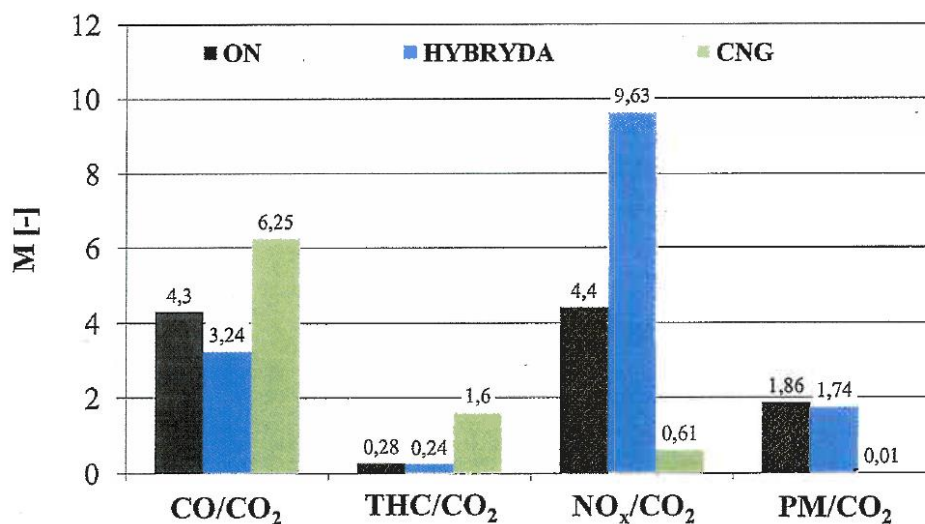
W badaniach zostały wykorzystane autobusy miejskie o zbliżonych właściwościach użytkowych, wyposażonych odpowiednio w silnik o zapłonie samoczynnym, napęd hybrydowy i silnik o zapłonie iskrowym zasilany gazem ziemnym. Do badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji wykorzystano mobilne analizatory typu PEMS.

Otrzymaną w wyniku badań emisję sekundową poszczególnych związków toksycznych odniesiono do emisji sekundowej dwutlenku węgla.

Wskaźniki toksyczności poszczególnych składników spalin dla badań w znormalizowanym teście SORT 2 przedstawiono na rys. 4.17, a dla badań w ruchu miejskim na rys. 4.18.



Rys. 4.17. Wskaźniki toksyczności M dla CO, THC, NO_x oraz PM podczas badań w znormalizowanym teście SORT 2 [39]



Rys. 4.18. Wskaźniki toksyczności M dla CO, THC, NO_x oraz PM podczas badań drogowych w ruchu miejskim [39]

Analiza wyników wskazuje na fakt, że podczas hamowania silnikiem, kiedy emisja sekundowa CO₂ jest bliska zeru, następuje istotne zwiększenie się

bezwymiarowego wskaźnika M. Świadczy to o występowaniu negatywnych zjawisk w cylindrach silnika, takich jak spalanie niezupełne i niecałkowite, gaszenie płomienia, czy nieprawidłowe działanie układu oczyszczania spalin. Dzięki zastosowaniu omawianego wskaźnika możliwe było wyciągnięcie wniosku o małej skuteczności działania układu selektywnej redukcji katalitycznej SCR.

Przedstawione zagadnienie oceny emisji związków toksycznych z pojazdów w odniesieniu do CO₂ jest jednym z pierwszych tego rodzaju, a wyniki i wnioski pokazują, że wymaga ono dalszych prac i badań. Wykorzystanie wskaźnika M może mieć miejsce w badaniach drogowych ponieważ poszerza możliwości poznawcze dzięki swojej bezwymiarowości, a jego konstrukcja uniezależnia wyniki badań od przebytego dystansu czy wykonanej pracy przez zespół napędowy w teście co może być korzystne np. w badaniach pojazdów hybrydowych.

5. Cel, teza i zakres prac badawczych

W literaturze można wskazać wiele prac naukowych związanych z zagadnieniem wiarygodnego pomiaru emisji spalin silnikowych a w szczególności prac dotyczących metodyki odwzorowania rzeczywistych warunków eksploatacji silnika w laboratorium hamownianym [1, 2, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 19, 37, 47, 48, 59, 60, 71, 72]. W większości przypadków opisywane testy hamowniane obejmowały badania silnika w warunkach statycznych. Pomijały one lub radykalnie upraszczały zmienność parametrów pracy silnika w czasie. Wyniki tych prac nadają się głównie do odwzorowania czasu występowania wybranych stanów pracy silnika [67]. Z uwagi na fakt, że właściwości użytkowe silnika w stanach statycznych i dynamicznych różnią się od siebie, coraz częściej stosowane są badania w warunkach dynamicznych. W tego typu badaniach występują dwa podstawowe sposoby odwzorowania warunków drogowych. Pierwszym z nich jest wierne skopiowanie rzeczywistego przebiegu chwilowych parametrów pracy (zwykle prędkości jazdy samochodu lub prędkości obrotowej wału korbowego silnika oraz momentu obciążającego mierzonego na kołach samochodu lub na wale korbowym silnika) [35]. Takie rozwiązanie pozwala na stosunkowo dokładne odtworzenie warunków drogowych. Wadą tej metody jest brak korelacji (lub słaba korelacja) między szczególnym przypadkiem warunków pracy silnika a ogólnym zbiorem warunków występujących podczas rzeczywistej eksploatacji. Wierne kopiowanie przebiegów eksploatacyjnych zmniejsza bowiem reprezentatywność testu ograniczając go do obszaru szczególnych przypadków zarejestrowanych w ramach badań drogowych.

Drugim sposobem jest opracowanie sztucznie wygenerowanego przebiegu powyższych parametrów ruchu [50, 60]. To rozwiązanie wprowadza pewne różnice między eksploatacją drogową a laboratoryjną, ale pozwala na parametryzację testu (na przykład na odniesienie wymuszanych prędkości jazdy do prędkości maksymalnych pojazdu). Problemem do rozwiązania jest tu wprowadzenie czynnika stochastycznego, umożliwiającego zwiększenie reprezentatywności charakterystycznych cech testu jezdny względem całościowego zbioru warunków drogowych w rozpatrywanej koncepcji ruchu drogowego [13].

Powyższe spostrzeżenia wynikające z analizy literatury były podstawą sformułowania następującej tezy:

Zapewnienie zgodności emisji spalin między warunkami testowymi a drogowymi jest możliwe dzięki równoczesnemu wykorzystaniu uśrednionych wartości parametrów eksploatacyjnych pracy silnika (prędkości jazdy) i losowego sposobu wyboru wartości reprezentatywnych.

Jako główny cel pracy przyjęto opracowanie metody syntezy stanowiskowego testu natężenia emisji spalin zgodnego z rzeczywistą emisją w warunkach eksploatacji drogowej.

Poznawczym celem pracy było opracowanie metody parametryzacji profilu prędkości jazdy i włączenie czynnika losowego do programu laboratoryjnego testu emisji spalin.

Utylitarnym celem pracy było opracowanie praktycznego testu jezdni w aspekcie diagnostycznej kontroli natężenia emisji toksycznych składników spalin.

Przyjęto, że badania własne będą polegały na opracowaniu i doświadczalnym zweryfikowaniu metody syntezy testu emisji spalin na podstawie danych zarejestrowanych w ruchu drogowym rzeczywistym. Sprawdzenia słuszności postawionej tezy dokonano poprzez pomiary emisji substancji szkodliwych w spalinach za pomocą mobilnego analizatora typu PEMS podczas równoczesnej rejestracji parametrów ruchu pojazdu. Następnie przeprowadzono badania natężenia emisji substancji szkodliwych z pojazdu w warunkach hamowni podwoziowej podczas wiernej symulacji przebiegu prędkości zgodnie z przebiegiem zarejestrowanym w rzeczywistym ruchu drogowym. Wyniki pomiarów symulacji bezpośredniej porównano z natężeniem emisji zmierzonym w warunkach autorskich testów syntetycznych (przy wykorzystaniu opracowanej metody).

Program badań doświadczalnych obejmował:

1. badania profilu prędkości jazdy i emisji substancji toksycznych w warunkach eksploatacyjnych
 - 1.1. opracowanie metodyki badań eksploatacyjnych
 - 1.2. przeprowadzenie badań eksploatacyjnych
2. badanie natężenia emisji spalin na hamowni podwoziowej
 - 2.1. opracowanie metodyki badań stanowiskowych
 - 2.2. przeprowadzenie testów „bezpośrednich”
 - 2.3. przeprowadzenie testów syntezy.

6. Metoda odwzorowania eksploatacyjnego profilu prędkości jazdy

6.1. Podstawy teoretyczne analizy przebiegu prędkości jazdy jako procesu stochastycznego

6.1.1. Dobór metody filtrowania przebiegu prędkości pojazdu

Przeprowadzenie filtracji zarejestrowanych przebiegów wielkości fizycznych jest często zabiegiem niezbędnym podczas wstępnego przetwarzania wyników pomiaru [58]. Pojęcie filtrowania można określić jako proces usunięcia z zarejestrowanego sygnału tych informacji, które z punktu widzenia prowadzonej analizy wyników badań nie są istotne. Uzasadnienie sposobu doboru metody filtrowania przebiegu prędkości pojazdu przedstawiono na podstawie prac [15, 52, 58].

Filtry

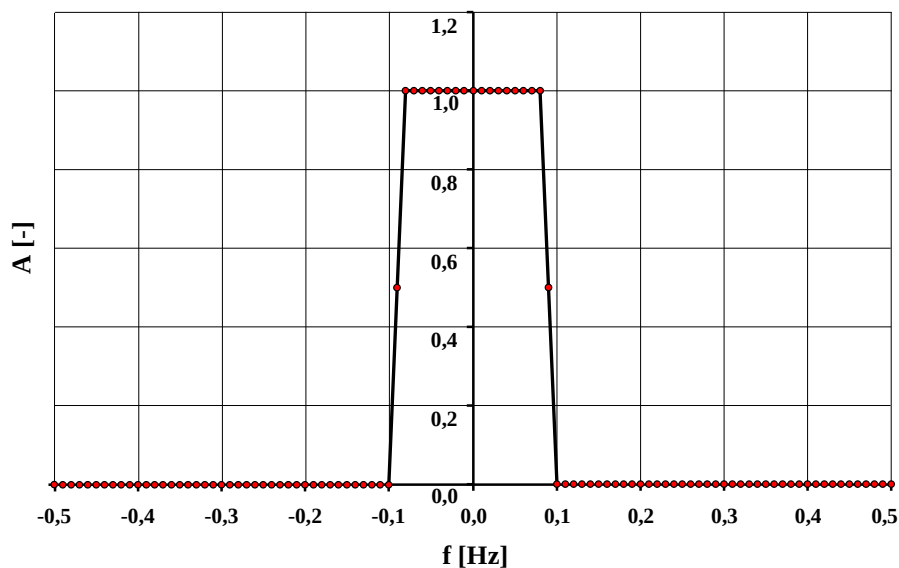
Podczas projektowania filtrów wykorzystywane są różne algorytmy, wybierane w zależności od oczekiwanych cech filtru [30]. Podstawowe rodzaje filtrów to rekursywne i nierekursywne. Pierwsze z nich charakteryzują się nieskończoną odpowiedzią impulsową, ponieważ zawierają pętlę sprzężenia zwrotnego. W tym przypadku nawet przy filtrach niskiego rzędu można uzyskać pożądaną charakterystykę częstotliwościową, co przekłada się na niewielką złożoność obliczeniową. Związane jest to jednak z pewnymi wadami, z których najważniejszą z punktu widzenia analizy wyników pomiarów jest zmiana charakterystyki fazowej. Taki efekt może okazać się nie do przyjęcia, ponieważ wiąże się z utratą synchronizacji w dziedzinie czasu zarejestrowanych w sygnale zjawisk. Drugim rodzajem filtrów są filtry nierekursywne, o skończonej odpowiedzi impulsowej. Pomimo większej wymaganej złożoności numerycznej są stosunkowo często wykorzystywane dzięki dostępnej mocy obliczeniowej współczesnych komputerów. Co ważne, charakterystyka fazowa jest w tym przypadku liniowa. Dlatego uwagę poddano tylko to rozwiązanie.

Podstawową metodą projektowania filtrów nierekursywnych jest założenie pożądaney charakterystyki częstotliwościowej i zastosowanie odwrotnej transformaty Fouriera w celu wygenerowania odpowiedzi czasowej filtru [53, 55, 56]. Procedura filtrowania sprowadza się wówczas do wykonania operacji splotu sygnału z odpowiedzią czasową filtru, ponieważ splot funkcji w dziedzinie czasu odpowiada iloczynowi funkcji w dziedzinie częstotliwości [53, 57]. Filtry nierekursywne otrzymywane drogą odwrotnej transformaty Fouriera założonego widma częstotliwościowego sprawdzają się doskonale m.in. podczas filtracji sygnałów o charakterze harmonicznym. Niestety okazuje się, że rozpatrywane w pracy przebiegi prędkości pojazdu, chociaż nadają się do

analizy częstotliwościowej, nie opisują zjawisk o charakterze typowo harmonicznym. Zawierają za to elementy zbliżone w swojej naturze do funkcji o nieciągłej pochodnej, a niekiedy nawet do funkcji skokowych (w przypadku małej częstotliwości próbkowania sygnału). Tego typu elementy przebiegu sprawiają, że po poddaniu sygnału procesowi filtracji pojawiają się pewne zniekształcenia trudne do dalszej interpretacji w kontekście zjawisk fizycznych, które opisują. Okazuje się wówczas, że precyzja z jaką filtrowane są wybrane częstotliwości nie jest jedynym wymaganiem stawianym wobec filtru [58].

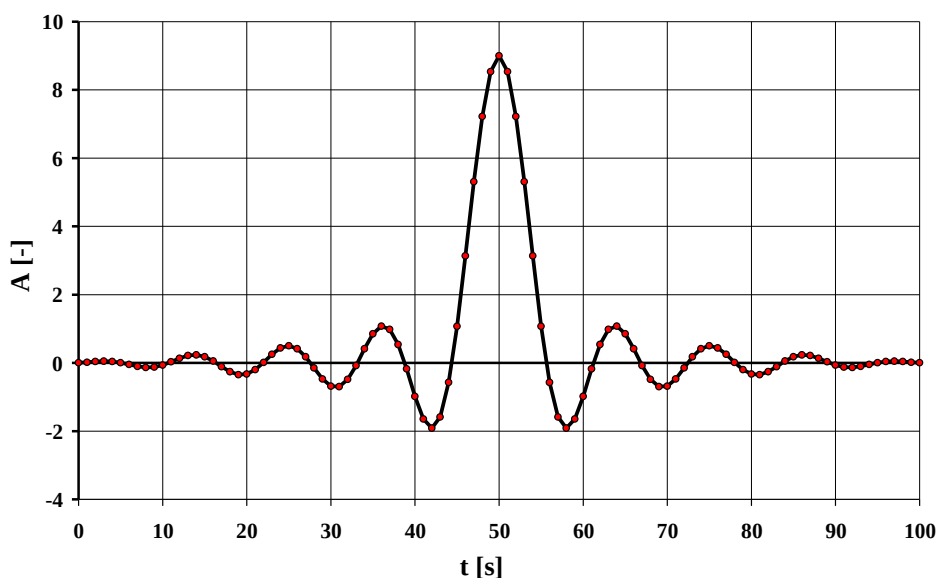
Filtr „klasyczny”

Na rys. 6.1 pokazano filtr dolnoprzepustowy zbliżony do idealnego filtru prostokątnego, przygotowany za pomocą próbkowania w dziedzinie częstotliwości i wytworzenia postaci czasowej filtra dzięki odwrotnej transformacie Fouriera.



Rys. 6.1. Charakterystyka częstotliwościowa filtra dolnoprzepustowego o długości 101 próbek i częstotliwości progowej 0,08 Hz przy częstotliwości próbkowania 1 Hz [58]

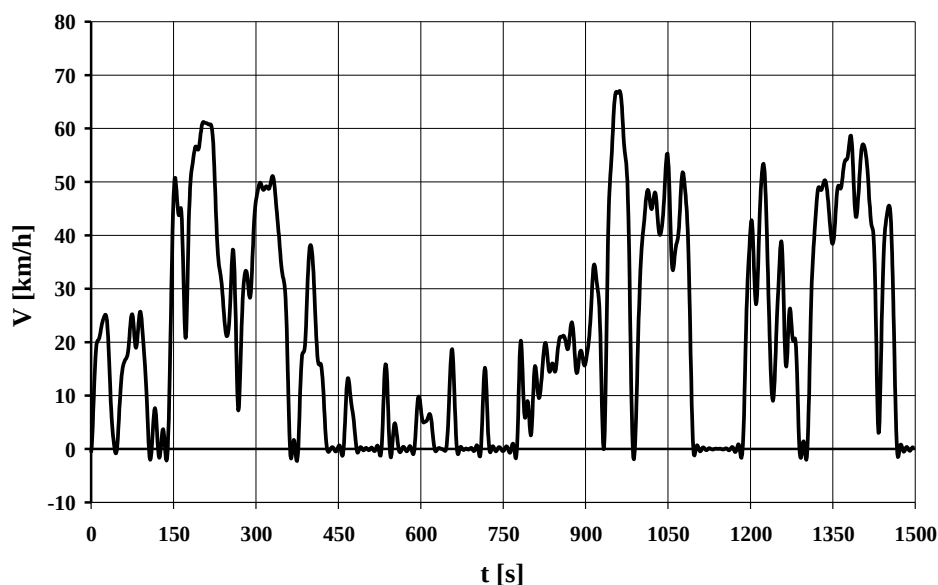
Na rys. 6.2 zaprezentowano odpowiedź czasową takiego filtru. Jak widać, częstotliwość progowa wynosi 0,08 Hz. Pasma przejściowe znajduje się w przedziale od 0,08 do 0,10 Hz. Wynika to z długości filtru ograniczonej do 101 próbek.



Rys. 6.2. Odpowiedź czasowa filtra dolnoprzepustowego o długości 101 próbek i częstotliwości progowej 0,08 Hz przy częstotliwości próbkowania 1 Hz [58]

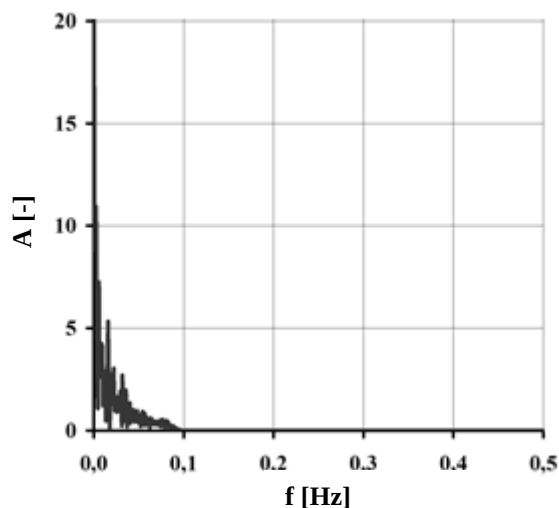
Na rys. 6.3 przedstawiono przykładowy fragment przebiegu prędkości samochodu po przeprowadzeniu filtracji za pomocą tak zdefiniowanego filtra. Widoczne są wspomniane wcześniej deformacje sygnału, które zaburzają kształt funkcji w pobliżu skokowych zmian wartości. Jest to szczególnie niepokojące w przypadku tych fragmentów przebiegu, które odnoszą się do zatrzymywania i ruszania pojazdu. Pojawiają się tam bowiem wartości ujemne prędkości, co oznaczałoby, że samochód cofał się. Ponadto w czasie, kiedy w oryginalnym przebiegu występowały wartości zerowe prędkości, w wyniku deformacji pojawiają się wartości niezerowe (na przemian dodatnie i ujemne). Jest to efekt, który nie ma swojego odniesienia do zjawisk rzeczywiście występujących w czasie badań drogowych. Należy mieć także świadomość, że analogiczny problem występuje w pobliżu prędkości maksymalnych, chociaż tam nie jest tak dobrze widoczny wizualnie.

Trudność w interpretacji tak zdeformowanego przebiegu sprawia, że zasadnym staje się pytanie o stosowalność typowych metod filtrowania w przypadku przebiegów prędkości lub innych przebiegów o podobnym charakterze.



Rys. 6.3. Przebieg prędkości samochodu po filtracji cyfrowym filtrem dolnoprzepustowym [58]

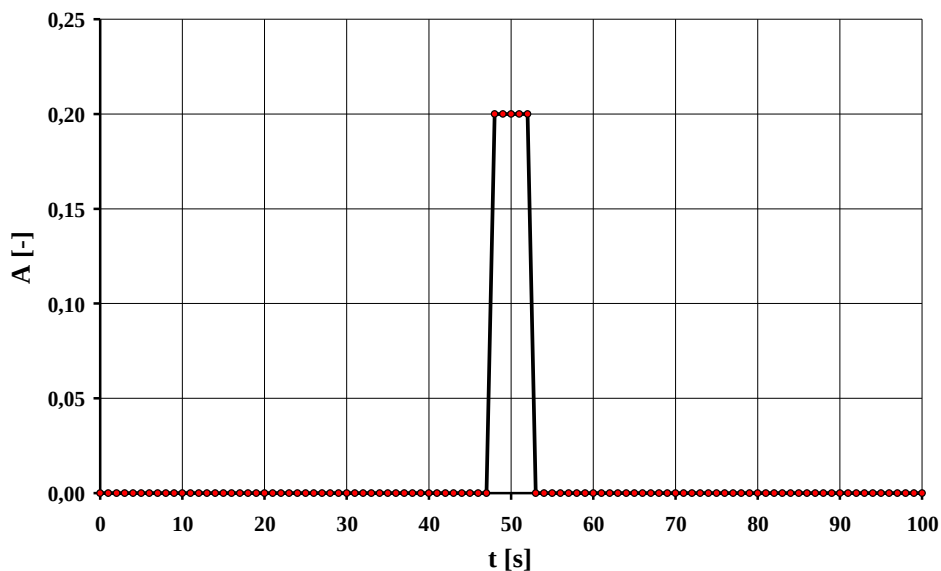
Na rys. 6.4 przedstawiono widmo częstotliwościowe przefiltrowanego przebiegu prędkości. Widoczne jest w tym przypadku całkowite wytłumienie składowych częstotliwościowych powyżej 0,09 Hz. Potwierdza to fakt doskonałych właściwości częstotliwościowych tego typu filtrów.



Rys. 6.4. Gęstość widmowa przebiegu prędkości samochodu po filtracji filtrem dolnoprzepustowym [58]

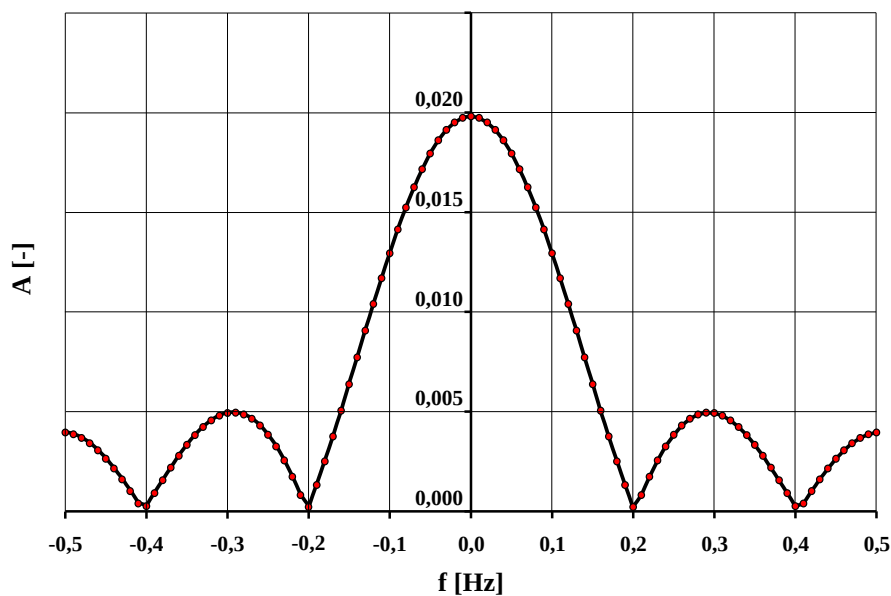
6.1.2. Splot z prostokątnym oknem czasowym

Sposobem na poprawę właściwości filtracyjnych projektowanego filtra może być zaprojektowanie jego odpowiedzi czasowej w postaci okienka o prostoliniowej charakterystyce. W tym celu zostało przygotowane okno czasowe o szerokości 5 próbek, widoczne na rys. 6.5. Jak wiadomo, szerokość okna w dziedzinie czasu wpływa na szerokość pasma przepustowego w dziedzinie częstotliwości. Im okno czasowe jest szersze, tym węższe jest pasmo przepustowe. Rozpatrując skrajne przypadki szczególne, można powiedzieć, że dla najwęższego możliwego okna (stanowiącego deltę Diraca) pasmo przepustowe będzie rozciągało się na cały zakres częstotliwości. Jest to zrozumiałe, ponieważ filtrowanie deltą Diraca sprowadza się do obliczania wartości średniej na podstawie tylko jednej wartości bieżącej, co nie wprowadza żadnych zmian w filtrowanym sygnale, a więc wszystkie częstotliwości znajdują się w paśmie przepustowym (niemodyfikowanym). Z kolei w przypadku okna czasowego skrajnie szerokiego, rozciągającego się na całą długość filtrowanego sygnału, widmo składałoby się jedynie z prążka zerowego. Wynika to z faktu, że filtrowanie tak szerokim oknem sprowadza się do zastąpienia każdej wartości przebiegu wartością średnią całego sygnału. Tymczasem prążek zerowy w widmie w dziedzinie częstotliwości, jak już wcześniej wspomniano, odpowiada właśnie wartości średniej. Jest to więc jedyna niemodyfikowana informacja w filtrowanym sygnale [61].



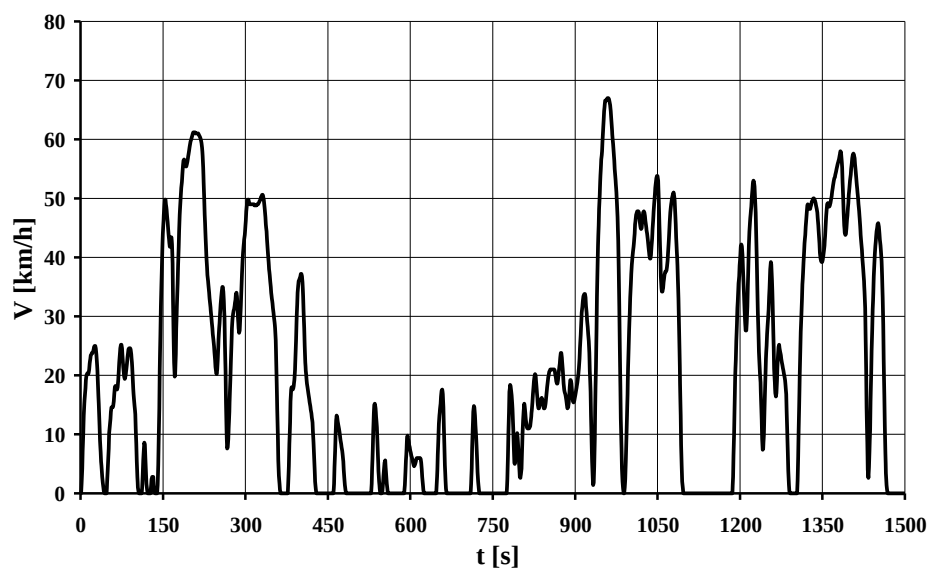
Rys. 6.5. Zmodyfikowany filtr w dziedzinie czasu o szerokości 5 próbek [58]

Powyższe rozważanie prowadzi do wniosku, że przyjęte w obliczeniach stosunkowo wąskie okno czasowe o szerokości 4 s będzie reprezentowane przez szeroki zakres przepustowy w dziedzinie częstotliwości. Jest to widoczne na rys. 6.6, przedstawiającym charakterystykę częstotliwościową prezentowanego filtra.



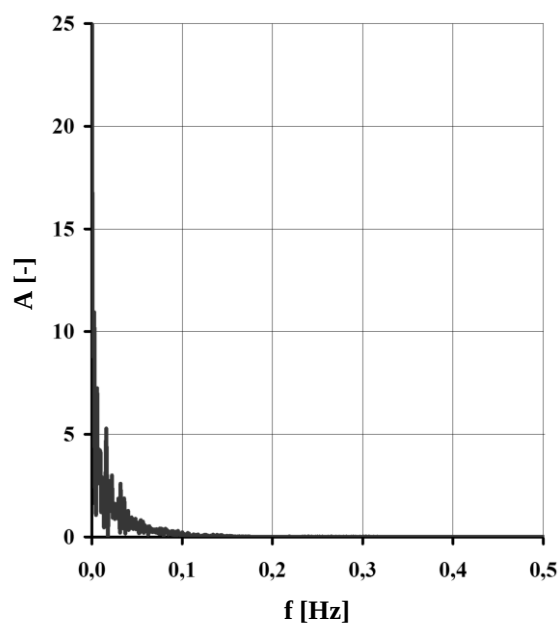
Rys. 6.6. Charakterystyka częstotliwościowa okna czasowego o szerokości 5 próbek [58]

Na rys. 6.7 został pokazany przebieg prędkości pojazdu przefiltrowany za pomocą filtra o proponowanej charakterystyce. Co ważne, nie są w tym przypadku widoczne deformacje podobne do tych z rys. 6.3, a szczególnie ujemne (nierealne fizycznie) prędkości.



Rys. 6.7. Przebieg prędkości samochodu po filtracji zmodyfikowanym filtrem [58]

Z kolei na rys. 6.8 przedstawiono gęstość widmową prędkości samochodu po filtracji za pomocą zmodyfikowanego filtra.



Rys. 6.8. Gęstość widmowa prędkości samochodu po filtracji za pomocą zmodyfikowanego filtra [58]

Warto zwrócić uwagę, że występują w tym przypadku niezerowe wartości przy częstotliwościach powyżej 0,09 Hz, lecz jest to błąd praktycznie niezauważalny na uzyskanym przefiltrowanym przebiegu prędkości.

6.1.3. Podsumowanie

W procedurze filtrowania przebiegu prędkości pojazdu istotne są nie tylko właściwości częstotliwościowe filtru, ale również deformacje filtrowanego sygnału w pobliżu „skoków” wartości. W rozdziale 6.1 zostało przedstawione porównanie dwóch metod filtrowania: klasycznej, polegającej na zdeformowaniu charakterystyki częstotliwościowej maksymalnie (z dokładnością do częstotliwości próbkowania) zbliżonej do prostokąta i metody polegającej na zaprojektowaniu takiej odpowiedzi czasowej by zminimalizować błędy wynikające ze specyfiki analizy cyfrowej.

Uśrednianie w dziedzinie czasu można bowiem sprowadzić do zagadnienia filtrowania (splotu) z prostokątnym oknem czasowym o zadanej szerokości. Właściwości częstotliwościowe tego rodzaju filtru są nieznacznie gorsze. Jednak operacja uśredniania nie powoduje deformacji przebiegu, które w znaczący sposób utrudniałyby dalszą interpretację fizyczną danych.

Ostateczny wybór metody filtrowania powinien zależeć od indywidualnych potrzeb badacza i tych właściwości filtru, które w danym przypadku są najbardziej istotne. Wydaje się jednak, że w praktyce badawczej przebiegi prędkości pojazdu oraz przebiegi o zbliżonym charakterze (jak na przykład przebieg prędkości obrotowej silnika) wygodniej będzie filtrować za pomocą metody uśredniania (tożsamej ze splotem z prostokątnym, a dokładniej trapezowym oknem czasowym).

6.2. Autorska metoda syntezy testów jezdnych

6.2.1. Metoda odwzorowania warunków drogowych

Postępowanie składające się na metodę odwzorowania warunków drogowych w laboratoryjnym teście jezdnym można podzielić na dwa podstawowe etapy.

- Analiza przebiegu wzorcowego.
Analiza przebiegu wzorcowego (lub przebiegów) prędkości zarejestrowanego na drodze, traktowanego jako wzorcowy pod względem informacji o eksploatacji drogowej. Na tym etapie przewiduje się wyodrębnienie z przebiegu prędkości poszczególnych jego odcinków, ich aproksymację za pomocą linii prostych oraz wykorzystanie wyodrębnionych aproksymacji w teście wzorcowym.
- Synteza testu jezdnego.

Synteza testu jezdni na podstawie wyodrębnionych wcześniej aproksymacji odcinków przebiegu prędkości. Na tym etapie przewiduje się procedurę losowania kolejnych aproksymacji, przy zachowaniu więzów wymagających ciągłości syntezy testu oraz więzów probabilistycznych.

W kolejnych podrozdziałach zostaną przedstawione szczegóły dotyczące etapu analizy przebiegu wzorcowego i syntezy przebiegu testowego.

6.2.2. Koncepcja proponowanej metody

W proponowanej metodzie do opracowywanego testu mają być wykorzystane aproksymacje krótkich odcinków przebiegu prędkości jazdy, odcinków zarejestrowanych w czasie rzeczywistej eksploatacji drogowej. Takie rozwiązanie wiąże się z dwiema korzyściami:

- aproksymacje odcinków przebiegu prędkości odzwierciedlają rzeczywiste warunki ruchu lepiej niż sztucznie wygenerowany przebieg prędkości,
- aproksymacje odcinków przebiegu prędkości można układać w różnej kolejności w opracowywanym teście, co pozwala na wprowadzenie czynnika stochastycznego.

Odnosnie pierwszej korzyści, warto zauważyć, że syntetyczne, sztucznie generowane przebiegi prędkości w testach jezdnych odtwarzają tylko niektóre cechy przebiegu rzeczywistego. Niekiedy odwzorowywana jest średnia prędkość jazdy, średnie przyspieszenie dodatnie lub inne wskaźniki opisujące eksploatację drogową w sposób statystyczny. W wielu aspektach zsyntezowany przebieg różni się jednak od przebiegów rejestrowanych na drodze. Tymczasem wprowadzenie do opracowywanego testu jezdni aproksymacji krótkich odcinków przebiegów rzeczywistych sprawia, że syntezy test jezdni zawiera te same warunki ruchu, jakie wystąpiły na drodze, oczywiście z dokładnością do aproksymacji.

Druga z wymienionych korzyści pozwala na to, żeby czynnikiem stochastycznym nie była zmiana wartości zarejestrowanych przebiegów prędkości, ale zmiana kolejności krótkich odcinków przebiegu wyodrębnionych z przebiegów zarejestrowanych na drodze. Oczywiście kolejność odcinków w syntezy testu nie może być dowolna. Wprowadza się dwa ograniczenia, stanowiące więzy aparatu stochastycznego. Pierwszym z nich jest zapewnienie ciągłości funkcji prędkości. Oznacza to taki dobór kolejności odcinków przebiegu prędkości, żeby prędkość początkowa każdego odcinka była równa prędkości końcowej poprzedniego odcinka. Drugim ograniczeniem jest konieczność wprowadzania do syntezy testu poszczególnych odcinków przebiegu w takich samych ilościach, w jakich występują one w warunkach drogowych.

Ważnym elementem w koncepcji prezentowanej metody jest określenie długości odcinków przebiegu prędkości, z których będzie składał się syntezywany test jezdny. Przy wyborze zbyt długich odcinków ulegną ograniczeniu cechy stochastyczne testu, dlatego celowe jest wykorzystanie stosunkowo krótkich odcinków. Jako rozwiązanie proponuje się wyodrębnienie z przebiegu prędkości zarejestrowanego na drodze takich odcinków, które nadają się do aproksymacji za pomocą linii prostych. Czas kolejnych odcinków będzie wówczas różny i będzie mieścił się w granicach od kilku do kilkudziesięciu sekund.

6.2.3. Analiza wzorcowego przebiegu prędkości pojazdu

Z uwagi na próbkowanie urządzenia pomiarowego, przebieg prędkości $V(t)$ jest sygnałem dyskretnym, gdzie wartości prędkości (V) oraz czasu (t) można traktować jako ciągi liczbowe opisane odpowiednio wzorami 6.1 i 6.2.

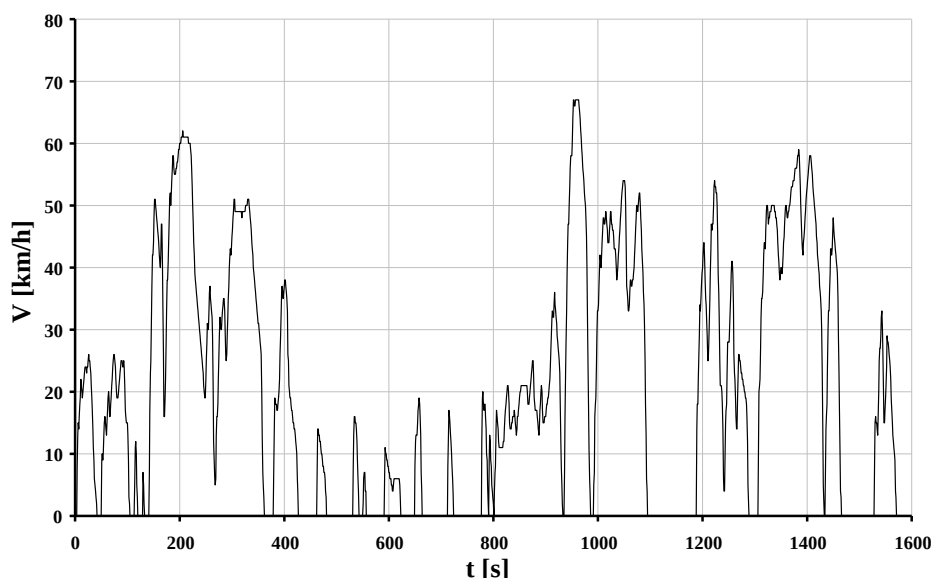
$$\{V_i\}_{i=1}^n \quad (6.1)$$

$$\{t_i : t_i = \frac{i}{f_{pr}}\}_{i=1}^n \quad (6.2)$$

gdzie: n – liczba próbek sygnału (długość ciągu liczbowego),
 f_{pr} – częstotliwość próbkowania sygnału.

Algorytm wyodrębniania krótkich odcinków przebiegu prędkości zakłada znajdowanie w przebiegu takich jego fragmentów, które można aproksymować za pomocą linii prostej. Wymaga to znalezienia punktów granicznych pomiędzy kolejnymi odcinkami. Jeżeli wyodrębnione odcinki mają mieć kształt zbliżony do linii prostej, to punkty graniczne będą występowały wszędzie tam, gdzie w przebiegu prędkości znajdzie się załamanie. Algorytm wyodrębniania odcinków sprowadza się więc do metody poszukiwania załamań funkcji $V(t)$.

Na rys. 6.9 przedstawiono przykładowy fragment zarejestrowanego przebiegu prędkości, na podstawie którego zostanie w kolejnych krokach pokazany proces dalszej analizy.



Rys. 6.9. Przykładowy fragment przebiegu prędkości

1. Filtracja sygnału

Należy zwrócić uwagę na fakt, że sygnał zawiera szum o stosunkowo dużej częstotliwości, który może wprowadzać zakłócenia przebiegu w postaci lokalnych załamień, nieprowadzących do zmiany kierunku linii prędkości. W tych miejscach algorytm wyszukujący załamania przebiegu prędkości mylnie interpretowałby wspomniane zakłócenia, jako załamania funkcji, podczas gdy w rzeczywistości nie prowadziłyby one do zmiany kierunku nachylenia linii prędkości. W celu wyeliminowania tego zjawiska niezbędna staje się operacja filtrowania dolnoprzepustowego. W niniejszych rozważaniach zastosowano filtrowanie polegające na zastąpieniu każdej wartości prędkości średnią arytmetyczną z wartości sąsiednich (co zostało omówione w podsumowaniu rozdziału 6.1). Opisuje to wzór 6.3:

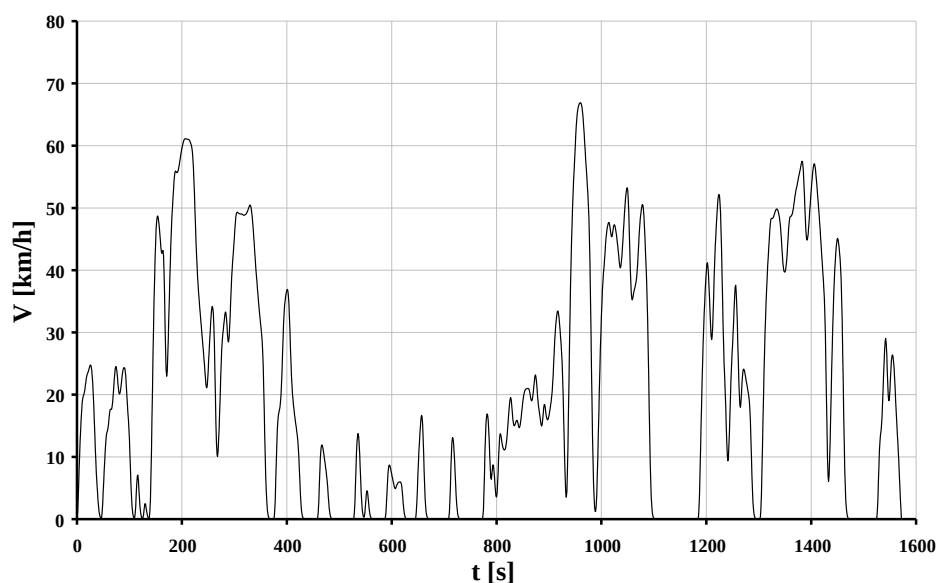
$$\text{dla każdego kolejnego } i \in [2, n-1] V_i \alpha \frac{1}{3}(V_{i-1} + V_i + V_{i+1}) \quad (6.3)$$

gdzie: α – operator przypisania, który w miejsce dotychczasowej wartości parametru przypisuje nową wartość.

Powyższą operację można przeprowadzić kilkakrotnie, aby stopniować wpływ filtracji aż do momentu pozbycia się z sygnału załamów nieprzewodzących do zmiany kierunku linii przebiegu.

W ujęciu teorii sygnałów taki zabieg jest tożsamy z przeprowadzeniem filtracji polegającej na splocie filtrowanego przebiegu z funkcją w postaci okna prostokątnego. Jak wiadomo, widmo częstotliwościowe okna prostokątnego wskazuje na występowanie zniekształceń (tłumienia) w paśmie przepustowym, co zwykle nie jest optymalnym rozwiązaniem w procesie filtracji. Jednak stosowanie klasycznych filtrów nierekursywnych o zadanej charakterystyce częstotliwościowej, chociaż teoretycznie jest bardziej uzasadnione pod względem jakości filtracji, wprowadza pewne zakłócenia przebiegu prędkości wszędzie tam, gdzie prędkość zmienia się w sposób skokowy. Prowadzi to do powstawania takich zaburzeń przebiegu, które nie mają żadnej interpretacji fizycznej. Dlatego zdecydowano się na stosowanie splotu z oknem prostokątnym, ponieważ właściwości takiego filtra, związane z brakiem zaburzeń skoków prędkości wydają się ważniejsze niż optymalne właściwości częstotliwościowe.

Na rys. 6.10 przedstawiono fragment przebiegu prędkości samochodu po wykonaniu filtracji.



Rys. 6.10. Przykładowy fragment przebiegu prędkości po przeprowadzeniu filtracji

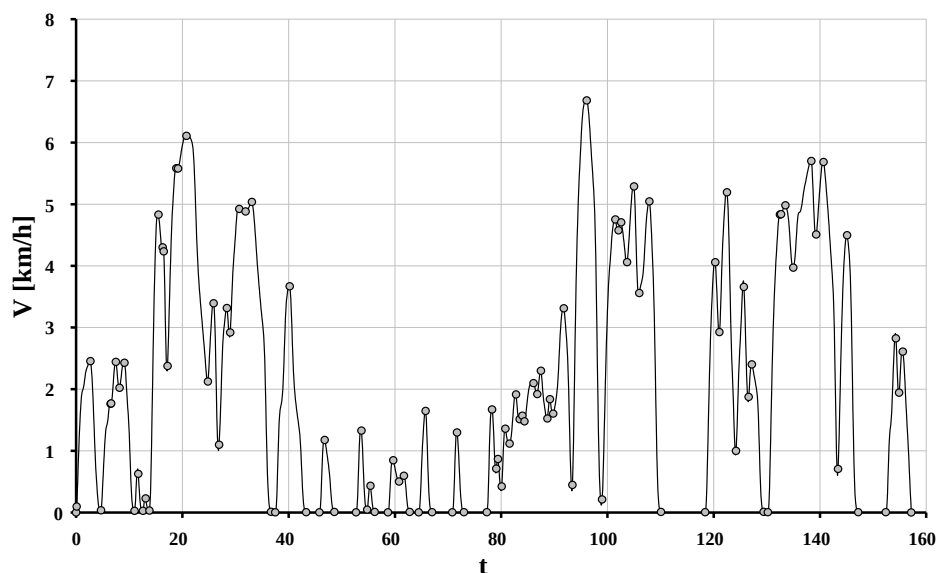
2. Wyznaczenie punktów granicznych

Po przeprowadzeniu filtracji sygnału $V(t)$, można przeprowadzić wyznaczenie punktów granicznych pomiędzy odcinkami przebiegu, co sprowadza się do poszukiwania tych wartości czasu, dla których występuje załamanie kierunku linii przebiegu. Teoretycznie o tego typu załamaniach świadczy wartość pochodnej drugiego rzędu. Wystarczyłoby więc wyznaczyć pewną wartość graniczną dla drugiej pochodnej, powyżej której w przebiegu zaznaczano by punkty graniczne. Występuje jednak problem z określeniem takiej granicy, ponieważ wartości pochodnej drugiego rzędu są zależne od pochodnej pierwszego rzędu. W związku z tym w miejscach, gdzie występuje duża wartość pochodnej pierwszego rzędu (czyli przy dużym nachyleniu przebiegu prędkości), pochodne drugiego rzędu są również większe – przy takich samych załamaniach kierunku linii przebiegu prędkości jak w przypadku fragmentów o małym nachyleniu.

Dlatego w celu uniezależnienia wyników od stopnia nachylenia analizowanego przebiegu, wprowadza się stosunek pochodnej drugiego rzędu do pochodnej pierwszego rzędu jako wskaźnik stopnia załamania przebiegu. Dla tego wskaźnika poszukiwano wartości granicznej, dla której można mówić o załamaniu przebiegu. Ponieważ dla małych wartości granicy algorytm staje się stosunkowo czuły i odnajduje wiele nierównomierności przebiegu, z kolei dla dużych wartości algorytm ignoruje niektóre mniejsze załamania. Dlatego na drodze eksperymentów ustalono, że dobrym rozwiązaniem będzie przyjęcie wartości granicznej stosunku pochodnych na poziomie jedności. Oznacza to, że punkty graniczne zostaną wychwycone wszędzie tam, gdzie wartość pochodnej drugiego rzędu przekroczy wartość pochodnej pierwszego rzędu. Zbiór takich i , dla których występują punkty graniczne, opisuje wzór:

$$G = \{i : \frac{d^2 V_i}{dt^2} \geq \frac{dV}{dt}\} \quad (6.4)$$

Na rys. 6.11 znajduje się wykres omawianego (przedstawionego na rys. 6.9 i rys. 6.10), przykładowego przebiegu prędkości samochodu z zaznaczonymi punktami granicznymi oddzielającymi odcinki przebiegu nadające się do aproksymacji za pomocą linii prostych.



Rys. 6.11. Przebieg prędkości z zaznaczonymi punktami granicznymi

3. Usunięcie zbyt krótkich odcinków

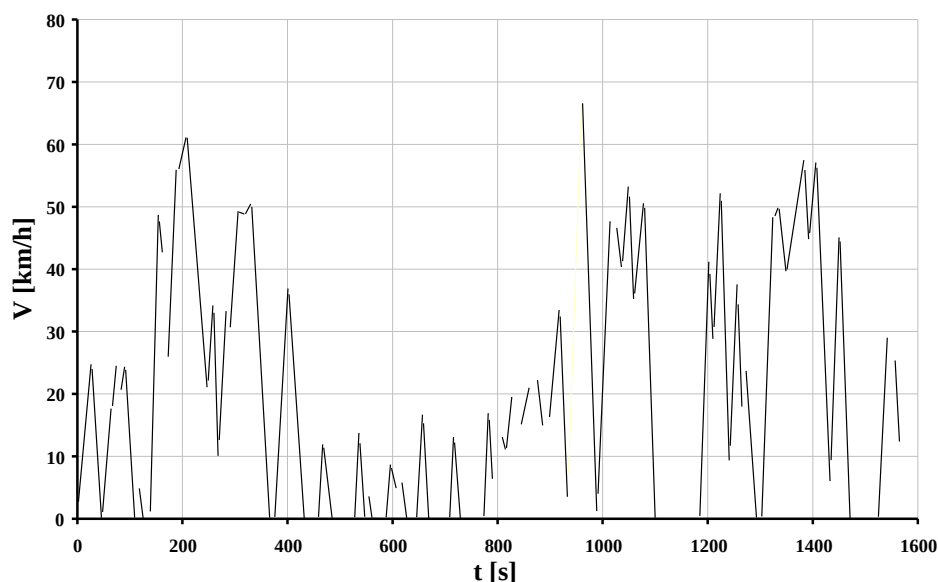
Wyznaczone punkty graniczne definiują początki i końce poszukiwanych odcinków przebiegu. Ze względu na fakt, że analizowany przebieg prędkości jest opisany w dziedzinie dyskretnej, istnieje możliwość wyznaczenia liczby punktów pomiarowych, z których składają się poszczególne odcinki. Niektóre z nich rozciągają się w czasie kilkudziesięciu sekund, a inne trwają tylko jedną sekundę, składając się zaledwie z dwóch skrajnych punktów pomiarowych.

Niekiedy może być zasadne pominięcie odcinków krótszych, niż przyjęta minimalna ich długość. Na przykład odcinki trwające tylko 1 s, wobec częstotliwości próbkowania równej 1 Hz, będą przenosiły głównie informacje o szumach. Dlatego proponuje się odrzucić wszystkie te odcinki, które składają się z mniejszej liczby punktów pomiarowych niż 3. Algorytm prezentowanej metody pozwala również na zwiększenie minimalnej akceptowalnej długości odcinków, ponieważ krótsze odcinki mogą przenosić mniej istotne informacje o całym przebiegu prędkości samochodu. Ustalenie granicznej długości staje się tym samym dodatkową procedurą filtrowania informacji zawartych w analizowanym sygnale.

4. Aproksymacja odcinków przebiegów

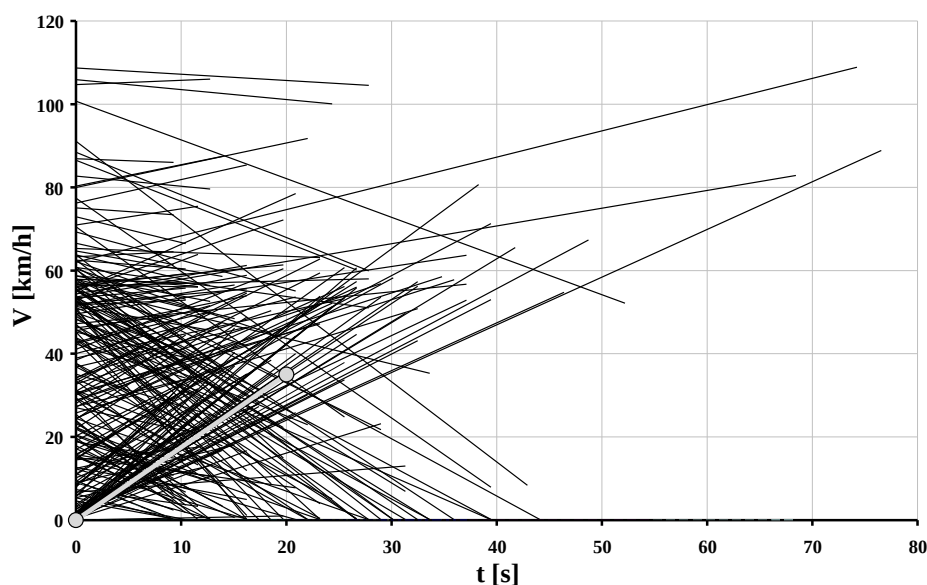
Następnym krokiem prezentowanego algorytmu jest aproksymacja pozostałych odcinków przebiegu prędkości za pomocą linii prostych. Złożenie aproksymacji poszczególnych odcinków zostało przedstawione na rys. 6.12.

Odstępy rozdzielające niektóre z powstałych linii wynikają z faktu odrzucenia niektórych odcinków w poprzednim kroku.



Rys. 6.12. Złożenie aproksymacji odcinków przebiegu prędkości za pomocą linii prostych

Widoczne na rys. 6.12 odcinki są ułożone w czasie zgodnie ze swoim pierwotnym położeniem w zarejestrowanym teście drogowym. Z punktu widzenia syntezy testu jezdni układającej istniejące odcinki w przypadkowej kolejności, ich chronologiczne ustawienie na tym etapie nie ma znaczenia. Dlatego można nałożyć powstałe aproksymacje odcinków na siebie w taki sposób, żeby wszystkie rozpoczynały się w czasie równym 0 s. Efekty takiego nałożenia zostały pokazane na rys. 6.13, na którym zaprezentowano złożone ze sobą odcinki pochodzące z dziesięciu przejazdów zarejestrowanych na drodze. Pozwala to na otrzymanie liczniejszego zbioru odcinków, które w dalszym toku obliczeń będzie można usystematyzować w zbiory odcinków i uśrednić, aby powstały poszczególne typy odcinków przebiegu charakteryzujące różne rodzaje ruchu. Proces ten został opisany w kolejnym punkcie.



Rys. 6.13. Nałożone na siebie aproksymacje odcinków przebiegu prędkości

5. Wyznaczanie typów odcinków przebiegu prędkości

Linie pokazane na wykresie są aproksymacjami wszystkich odcinków przebiegów prędkości wyodrębnionych z przykładowych dziesięciu przejazdów samochodu. Widoczna jest różnorodność zagęszczenia owych linii w różnych obszarach. Oznacza to, że można poszukiwać podobieństw w położeniu niektórych linii, a nawet poszukiwać całych grup linii podobnych.

W tym celu przewiduje się następujący tok postępowania. Wszystkie odcinki można opisać za pomocą macierzy M , w której kolejne wiersze reprezentują kolejne odcinki, a komórki w każdym wierszu reprezentują odpowiednio:

m_j^1 – prędkość początkową odcinka,

m_j^2 – prędkość końcową odcinka,

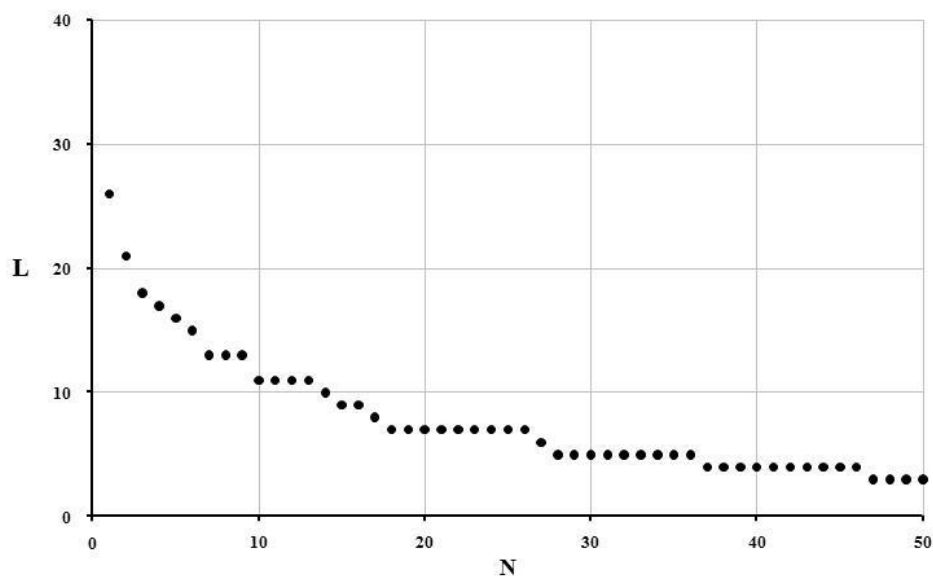
m_j^3 – czas trwania odcinka.

Definiuje się linię wzorcową (zaznaczoną na rys. 6.13 jasnym kolorem) o zmiennym położeniu, określonym za pomocą trzech współrzędnych: prędkości początkowej, prędkości końcowej i rozpiętości w czasie. Definiuje się ponadto funkcję opisującą liczbę linii podobnych do linii wzorcowej, zależną od współrzędnych położenia linii wzorcowej, a więc opisaną w dziedzinie trójwymiarowej. Funkcja ta została opisana wzorem 6.5.

$$f(V_1, V_2, t) = \left| \{M_j : V_1 - z \leq m_j^1 \leq V_1 + z \wedge V_2 - z \leq m_j^2 \leq V_2 + z \wedge t - z \leq m_j^3 \leq t + z\} \right| \quad (6.5)$$

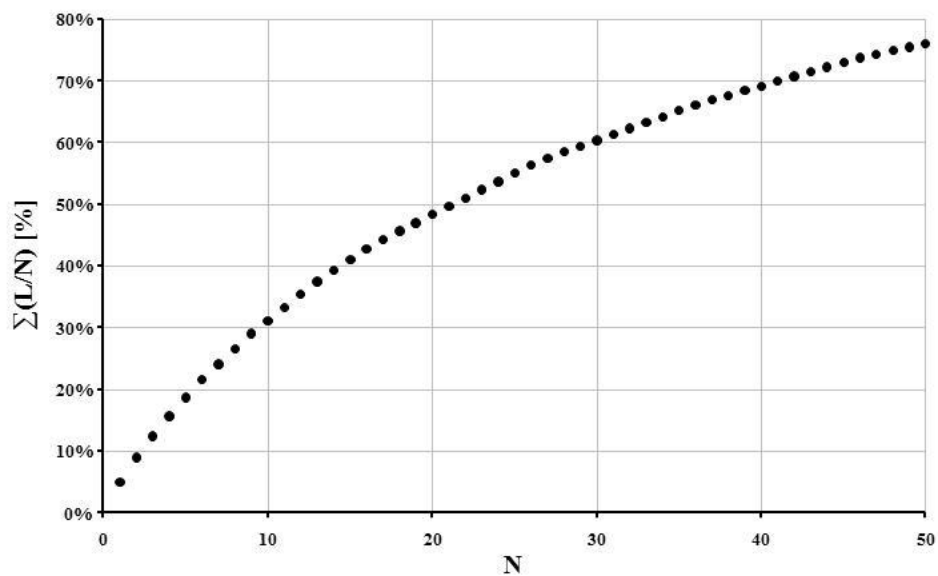
Kryterium podobieństwa do linii wzorcowej jest nieprzekraczanie przez żadną spośród trzech współrzędnych wartości odchyłki o więcej, niż zadana wartość progowa z (zwykle wartość progową przyjmuje się na poziomie 5 km/h oraz 5 s). Następnie przeprowadza się optymalizację położenia linii wzorcowej (w dziedzinie jej trzech współrzędnych), w której poszukuje się maksimum wartości funkcji f opisującej liczbę linii położonych podobnie do linii wzorcowej. Wykorzystuje się w tym celu optymalizację systematyczną z zadaniem krokiem równym 1–5 km/h oraz 1–5 s. Dla linii wzorcowej, dla której zostało znalezionych najwięcej linii podobnych, powstaje zbiór owych linii, dla którego obliczana jest linia średnia – o współrzędnych równych wartości średniej ze współrzędnych linii należących do zbioru. Tak wyznaczona linia średnia staje się pierwszym typowym odcinkiem, charakteryzującym najczęściej występujące odcinki w analizowanym przebiegu. W kolejnym kroku wszystkie linie przyporządkowane do typowego odcinka zostają wyeliminowane ze zbioru analizowanych linii i cała procedura jest powtarzana. Na drodze optymalizacji funkcji opisującej liczbę linii podobnych do linii wzorcowej o zmiennych współrzędnych jest wyznaczany drugi z kolei typowy odcinek, który opisuje drugi z rzędu najczęściej występujący odcinek przebiegu prędkości. Powyższa procedura jest powtarzana tak długo, aż zostanie znaleziona zadana liczba charakterystycznych typów odcinków przebiegu prędkości. W efekcie powstaje macierz typów odcinków T , w układzie analogicznym do macierzy M .

Powstaje pytanie o pożądaną liczbę typów odcinków. Jej ograniczanie spowoduje, że nie wszystkie odcinki przebiegu prędkości wyodrębnione z analizowanego sygnału zostaną wykorzystane. Warto jednak zauważyć, że kolejne typy odcinków odpowiadają coraz mniejszej liczbie odcinków podobnych do danego typu. Odpowiednio duże numery typów reprezentują już tylko pojedynczy odcinek przebiegu prędkości. Na rys. 6.14 przedstawiono funkcję liczby odcinków L podobnych do danego typu odcinków w dziedzinie N numeru kolejnego typu odcinków. Inaczej mówiąc, rys. 6.14 obrazuje grupy odcinków zakwalifikowanych, jako podobne. W pierwszej grupie jest tych odcinków najwięcej, w grupach kolejnych ich liczba maleje.

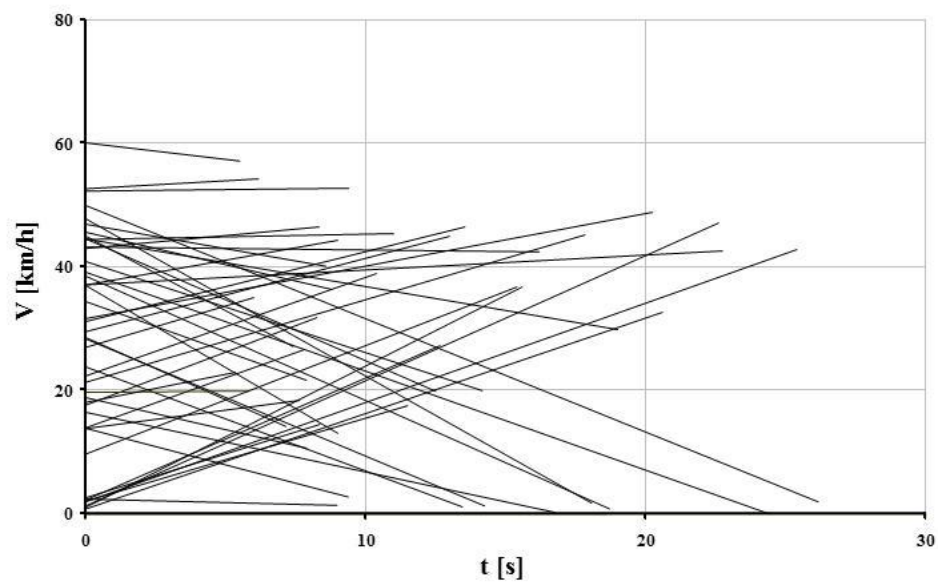


Rys. 6.14. Funkcja liczby odcinków podobnych do danego typu odcinków w dziedzinie numeru typu

Wydaje się więc zasadne uwzględnienie co najmniej tych typów, którym przyporządkowany jest więcej niż jeden odcinek. Na rys. 6.15 przedstawiono zależność udziału wykorzystanych odcinków $\Sigma(L/N)$ wśród wszystkich wyodrębnionych odcinków z przebiegu prędkości samochodu od liczby N uwzględnionych typów odcinków. Wynika z niego, że w miarę zwiększania się liczby N typów odcinków, stopień wykorzystania istniejących odcinków zwiększa się coraz wolniej. Powstały w ten sposób zbiór typów odcinków przebiegu prędkości będzie wykorzystany do syntezy laboratoryjnego testu jeźdnego. Zestawienie wszystkich odcinków należących do tego zbioru zostało przedstawione na rys. 6.16.



Rys. 6.15. Zależność udziału uwzględnionych odcinków przebiegu wśród wszystkich wyodrębnionych odcinków od liczby typów odcinków



Rys. 6.16. Zbiór typów odcinków przebiegu prędkości samochodu

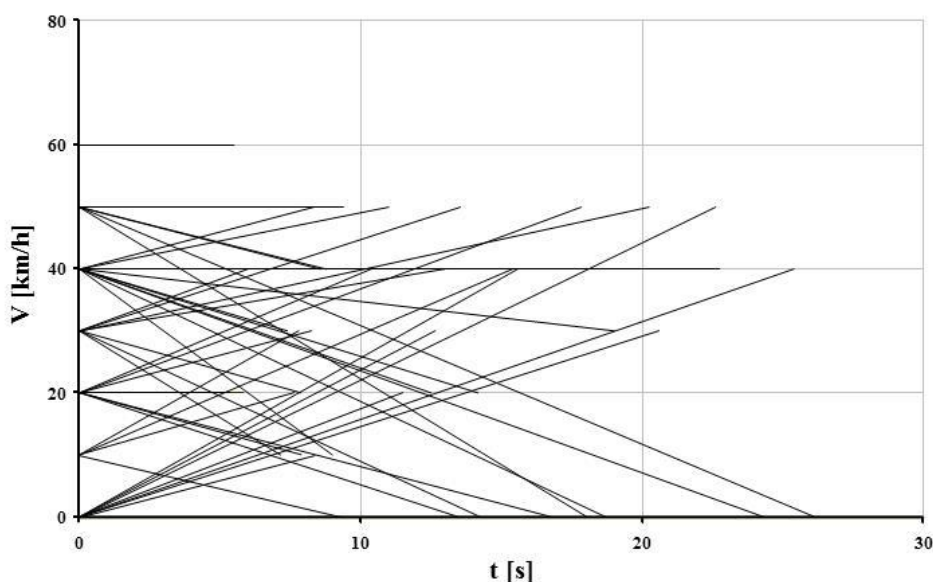
6. Kwantyzacja wartości prędkości

Jak widać na rys. 6.16, istnieje problem braku powtarzalności prędkości na początku i na końcu poszczególnych typów. Oznacza to brak możliwości takiego ułożenia kolejnych odcinków w syntezywanym teście, żeby prędkość początkowa bieżącego odcinka była równa prędkości końcowej odcinka poprzedniego. W celu rozwiązania tego problemu zastosowano kwantyzację wartości prędkości, czyli zaokrąglenie wartości do zadanych wartości wzorcowych. Za wartości wzorcowe można przyjąć na przykład wielokrotności wartości 10 km/h. Algorytm kwantyzacji opisuje wzór:

$$\begin{aligned}
 (\forall i \in N \cap <1; m >)(T_j^1 \propto 10 \cdot r : r \approx \frac{T_j^1}{10} \wedge r \in N) \wedge \\
 \wedge (T_j^2 \propto 10 \cdot r : r \approx \frac{T_j^2}{10} \wedge r \in N)
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

gdzie: m – liczba typów odcinków.

Zbiór typów odcinków przebiegu prędkości samochodu po zastosowaniu kwantyzacji został przedstawiony na rys. 6.17.



Rys. 6.17. Zbiór typów odcinków przebiegu prędkości po kwantyzacji

Nawet po skwantowaniu wartości prędkości mogą istnieć takie typy odcinków przebiegu, że nie istnieje żaden typ rozpoczynający się od prędkości, na której kończy się inny. Wówczas zastosowanie takiego typu odcinków przebiegu prędkości w syntezywanym teście uniemożliwiłoby kontynuowanie testu przy zachowaniu jego ciągłości. Mogą też istnieć takie typy, dla których nie istnieje żaden typ kończący się przy prędkości, od której zaczyna się inny. Taki typ nie może być zastosowany w teście. Obydwa wspomniane rodzaje typów odcinków przebiegu prędkości samochodu muszą więc zostać wyeliminowane ze zbioru typów dostępnych przy syntezywaniu laboratoryjnego testu jeźdnego. Ostatecznie powstały zbiór typów posłuży do syntezy testu.

6.2.4. Synteza przebiegu prędkości w teście jeźdnym

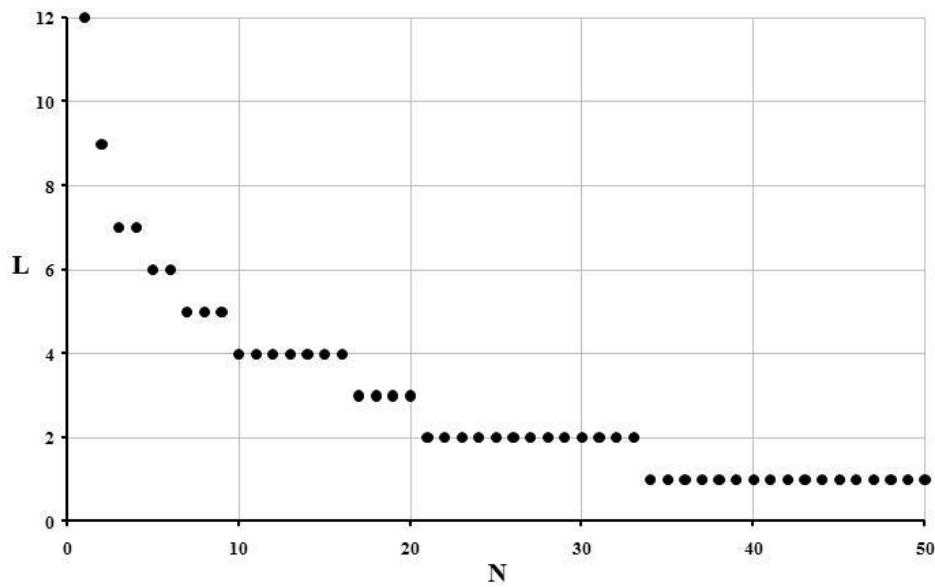
Synteza testu jeźdnego polega na wygenerowaniu przebiegu prędkości składającego się z odcinków przebiegu (opisanych w poprzednim podrozdziale) w przypadkowej kolejności. W efekcie powstanie sygnał stochastyczny, w którym właściwości stochastyczne nie będą wynikały z nadania przypadkowych wartości, ale z przypadkowej kolejności ułożenia poszczególnych odcinków. Jak wspomniano przy omawianiu koncepcji prezentowanej metody (podrozdział „Koncepcja proponowanej metody”) na aparat stochastyczny są narzucane dwa rodzaje więzów. Pierwsze z nich wymagają, żeby zsyntezowany przebieg prędkości był ciągły, a drugie narzucają częstotliwość występowania poszczególnych typów odcinków przebiegu prędkości w generowanym teście zbliżoną do częstotliwości ich występowania w przebiegu wzorcowym, opisującym warunki drogowe. W kolejnych podpunktach zostanie omówiona procedura losowania poszczególnych odcinków.

7. Przygotowanie histogramu licznosci poszczególnych odcinków w teście

Listę typów odcinków wykorzystywanych do syntezy testu można zestawić z informacją o liczności ich występowania w przebiegu prędkości samochodu zarejestrowanym na drodze. Zależność liczby wystąpień poszczególnych typów odcinków w przebiegu wzorcowym od numeru typu przedstawiono uprzednio na rys. 6.14. Zależność ta stanowi histogram typów odcinków przebiegu wzorcowego. W wyniku stosowanej procedury wyodrębniania typów odcinków przebiegu, kolejne typy są ułożone w kolejności od najczęściej występującego, dlatego histogram ma kształt monotonicznie malejący.

Z uwagi na fakt, że generowany test może mieć zadaną inną długość, niż zarejestrowany przebieg wzorcowy i może się składać z innej liczby odcinków, należy przeskalować występujące w histogramie wartości w taki sposób, żeby suma wartości histogramu odpowiadała sumarycznej liczbie odcinków

w syntezowanym teście jezdny. Powstanie wówczas histogram odcinków generowanego przebiegu prędkości. Przykład takiej funkcji został przedstawiony na rys. 6.18.



Rys. 6.18. Histogram odcinków przebiegu syntezowanego testu jezdny

8. Losowanie pierwszego odcinka

Syntezowany test jezdny musi rozpoczynać się od prędkości początkowej równej 0 km/h, dlatego ze zbioru dostępnych odcinków zostają wybrane tylko te, które rozpoczynają się od zerowej prędkości.

Ponadto każdemu takiemu odcinkowi jest przyporządkowana oczekiwana liczba wystąpień w generowanym przebiegu. Liczba ta jest dzielona przez sumę oczekiwanych wystąpień wszystkich wybranych odcinków, aby obliczyć prawdopodobieństwo wylosowania danego odcinka. Losowanie pierwszego odcinka następuje zgodnie z obliczonymi wartościami prawdopodobieństwa.

Po wylosowaniu pierwszego odcinka zostaje zmodyfikowany histogram odcinków, ponieważ oczekiwana liczba dalszych wystąpień wylosowanego odcinka zmniejsza się o 1.

9. Losowanie kolejnych odcinków

Losowanie kolejnych odcinków odbywa się analogicznie do losowania pierwszego z nich. Ze zbioru dostępnych odcinków zostają wyselekcjonowane tylko te, których prędkość początkowa ma taką wartość, jak prędkość końcowa poprzedniego odcinka. W ten sposób spełniony jest warunek ciągłości testu.

Następnie dla zbioru wybranych odcinków obliczane są wartości prawdopodobieństwa, z jakim ma nastąpić losowanie. Wartości te są równe stosunkowi oczekiwanej liczby wystąpień danego odcinka do sumy oczekiwanej liczby wystąpień wszystkich wybranych w bieżącym kroku odcinków. Wówczas następuje samo losowanie.

Na koniec dla wylosowanego odcinka wartość jego oczekiwanej liczby wystąpień w histogramie jest zmniejszana o 1, ale tylko w przypadku, kiedy po zmniejszeniu tej wielkości, nie osiągnie ona wartości 0. Blokowanie możliwości zerowania się wartości histogramu służy temu, żeby nie wyeliminować żadnego odcinka z możliwości jego dalszego losowania. Mogłoby to bowiem doprowadzić do sytuacji, w której wyeliminowany odcinek będzie jedynym rozpoczynającym się od prędkości, na którym skończy się inny odcinek. Uniemożliwiłoby to kontynuowanie procedury syntezy testu. Tak więc jedynym ograniczeniem kolejnego losowania zbyt często wybranych odcinków jest sprowadzenie prawdopodobieństwa ich dalszego losowania do wartości minimalnej, ale nie zerowej. Zapewnia to ciągłość testu. Takie podejście pozwala jednak na wystąpienie pewnych rozbieżności pomiędzy oczekiwanym histogramem występowania poszczególnych odcinków, a histogramem rzeczywiście otrzymanym w wyniku procedury syntezy testu jezdnego. Częściowe rozwiązanie tego problemu zostanie omówione w następnym podpunkcie.

Cała procedura losowania kolejnych odcinków jest powtarzana aż do momentu osiągnięcia przez generowany test założonej długości.

10. Problem niezgodności histogramu oczekiwanego z histogramem otrzymanym

Na podstawie zsyntezowanego testu jezdnego można obliczyć histogram występowania poszczególnych odcinków i porównać go z oczekiwanym kształtem histogramu. Teoretycznie, gdyby generowany test składał się z nieskończonej liczby odcinków, obydwa histogramy powinny być idealnie zgodne, ponieważ wartości oczekiwane wylosowania poszczególnych odcinków byłyby zawsze równe. Jednak w praktyce, dla testów o ograniczonej długości, w wyniku konieczności zapewnienia ciągłości testu, histogramy te zwykle nie będą sobie równe.

Dla każdego numeru odcinka w histogramach obliczany jest błąd względny, jako wartość bezwzględna różnicy między wartością oczekiwaną i otrzymaną, odniesiona do wartości oczekiwanej. Następnie obliczany jest sumaryczny błąd względny – dla wszystkich numerów odcinków w histogramie. Wartość tak powstałego błędu względnego jest miarą dokładności odwzorowania przebiegu wzorcowego w generowanym teście, a więc w praktyce jest miarą pomyślności realizacji procedury losowania.

Z tego względu cała procedura syntezy testu jest powtarzana wielokrotnie i wybierana jest ta realizacja wygenerowanego przebiegu prędkości, dla której sumaryczny błąd względny jest najmniejszy. Przyjęto, że liczba realizacji procedury syntezy testu wynosi 100000 razy. Dyskusja doboru liczby powtórzeń syntezy testu oraz możliwych do osiągnięcia wartości sumarycznego błędu względnego zostaną omówione w kolejnym rozdziale.

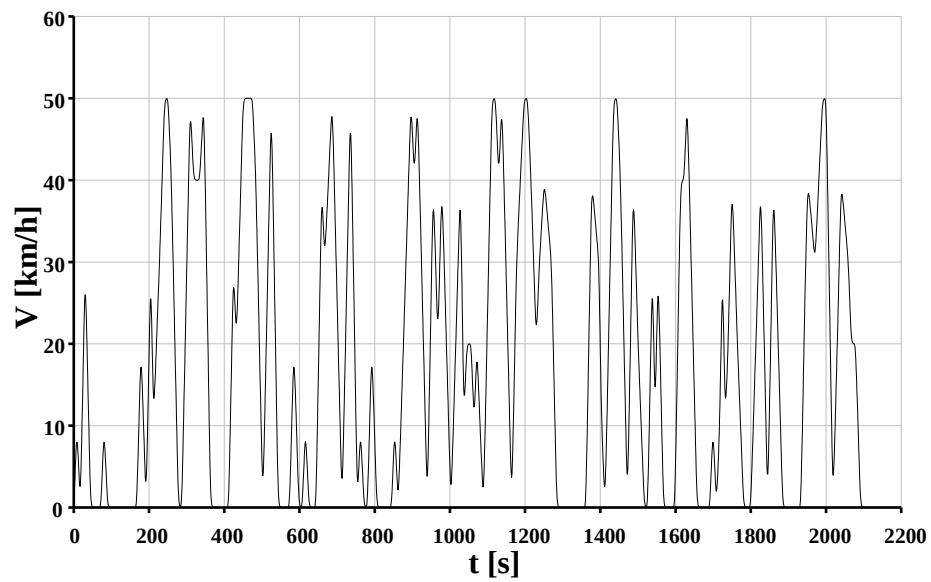
Na rys. 6.19–6.21 przedstawiono przykładowe przebiegi prędkości samochodu uzyskane w wyniku realizacji procedury syntezy testu.

11. Końcowe przygotowanie zsyntezowanego przebiegu prędkości

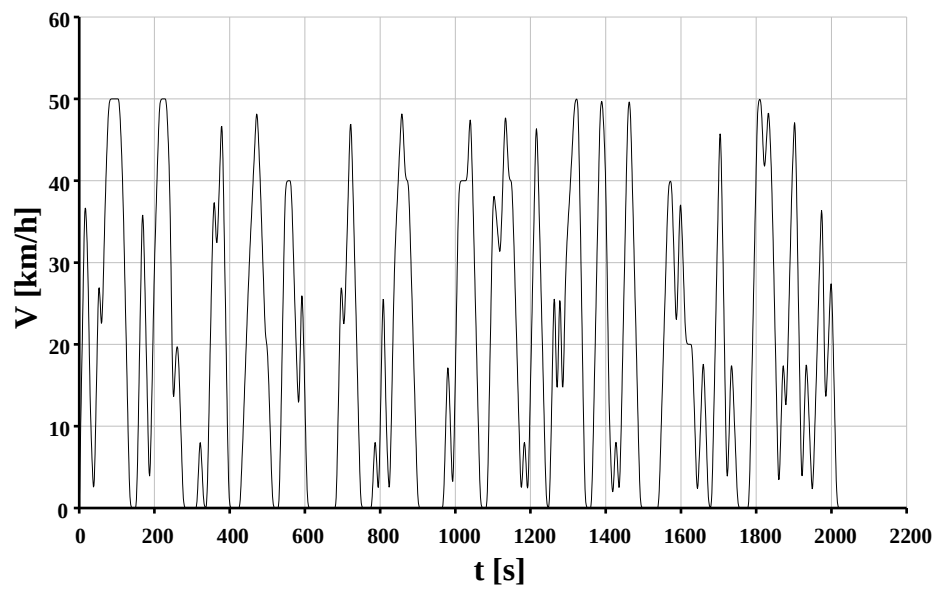
Powstały wykres prędkości w czasie składa się z linii prostych. Niestety w miejscach łączenia linii występują załamania kierunku linii. Teoretycznie w miejscach załamań powstaje nieciągła pochodna pierwszego rzędu, odpowiadająca przyspieszeniu pojazdu, co nie jest naturalnym sposobem poruszania się samochodu. Dlatego warto wyeliminować powstałe załamania na drodze filtracji dolnoprzepustowej. Procedura filtracji jest taka sama, jak ta opisana na początku podrozdziału „Analiza wzorcowego przebiegu prędkości”.

W celu przeniesienia zsyntezowanego testu jeźdnego na stanowisko hamowni podwoziowej, należałoby dodać zakres dopuszczalnych odchyłek prędkości. W efekcie powstałyby dwa przebiegi prędkości nałożone na siebie w czasie, stanowiące dopuszczalne granice prędkości samochodu. Taki zabieg nie będzie jednak wykonywany w ramach niniejszej pracy, ponieważ przedmiotem dalszych rozważań będą cechy wygenerowanego testu średniego.

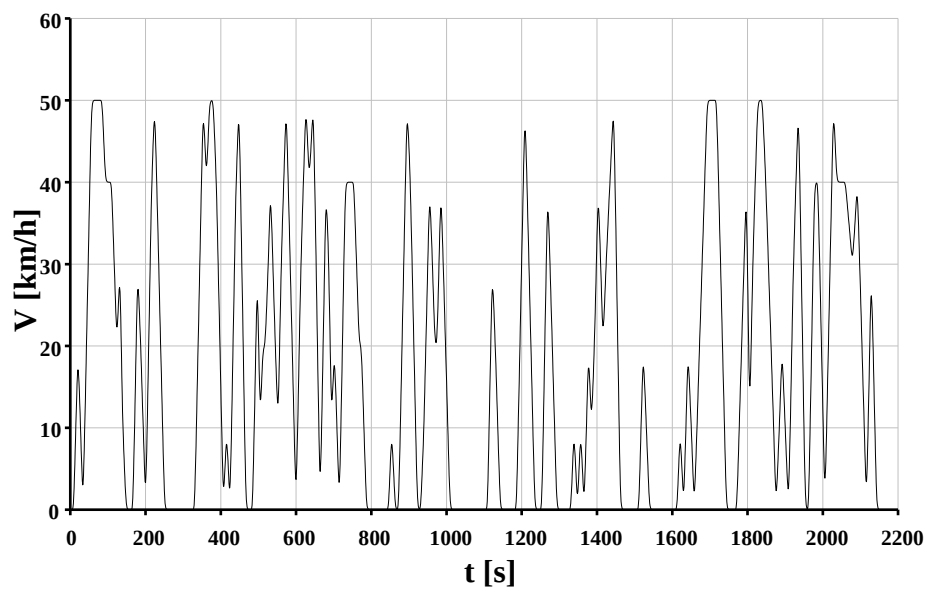
Na rys. 6.19–6.21 przedstawiono trzy przykładowe realizacje zsyntezowanego testu. Każda z nich jest wyborem jednej, najlepszej realizacji spośród 100000 wykonanych cykli syntezy testu, dlatego każda zaprezentowana realizacja charakteryzuje się podobnym sumarycznym błędem względnym. Porównanie poniższych wykresów daje pewien obraz powtarzalności kształtu zsyntezowanych przebiegów prędkości w ujęciu stochastycznym.



Rys. 6.19. Pierwsza przykładowa realizacja zsyntezowanego testu jeźdnego



Rys. 6.20. Druga przykładowa realizacja zsyntezowanego testu jeźdnego



Rys. 6.21. Trzecia przykładowa realizacja zsyntezowanego testu jezdnego

12. Opracowanie przebiegu momentu hamującego

Stanowisko hamowniane w trakcie trwania testu powinno generować zmienny moment hamujący na rolkach, który musi zostać jednoznacznie zdefiniowany w ramach przygotowania testu jezdny. W ogólności moment hamujący można podzielić na dwie składowe:

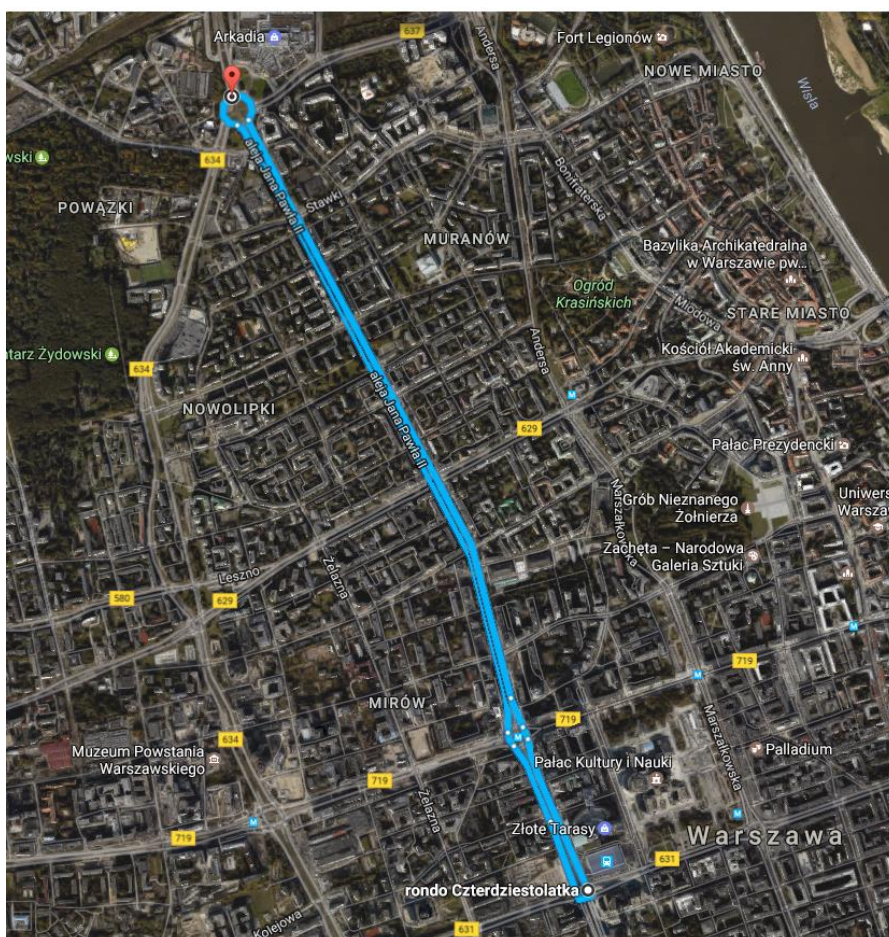
- moment oporów wynikający z ruchu pojazdu,
- moment niezależny od sposobu poruszania się samochodu.

Dla momentu oporów związanych z ruchem pojazdu można wyszczególnić takie składowe, jak: moment oporów toczenia, moment oporów powietrza, moment bezwładności. Dla danego samochodu istnieje możliwość oszacowania chwilowych wartości oporów ruchu przy zastosowaniu obliczeń trakcyjnych. W efekcie powstanie przebieg momentu oporów skorelowany z przebiegiem prędkości jazdy samochodu. W ramach prezentowanej metody odwzorowania warunków drogowych w laboratoryjnym teście jezdny proponuje się taki tok postępowania przy opracowywaniu testu. Istnieje również możliwość narzucenia dodatkowych oporów, niezależnych od sposobu poruszania się pojazdu, i uwzględnienia ich w syntezywanym przebiegu momentu. Dodatkowe opory mogą uwzględniać na przykład: jazdę po wzniesieniu, jazdę podczas wiatru, czy dodatkowe nierówności na drodze. Wprowadzanie tego typu oporów wykracza jednak poza ramy prezentowanych rozważań.

7. Badania profilu prędkości jazdy i emisji substancji toksycznych w warunkach eksploatacyjnych

7.1. Metodyka badań w warunkach eksploatacyjnych

Badania miały na celu wyznaczenie profilu prędkości jazdy pojazdu i emisji substancji toksycznych z układu wylotowego podczas powtarzalnych przejazdów w ruchu drogowym. Pomiary zostały przeprowadzone w warunkach ruchu miejskiego na terenie Warszawy, w godzinach południowych, na odcinkach: rondo Zgrupowania AK „Radosław” – dworzec Centralny oraz dworzec Centralny – rondo Zgrupowania AK „Radosław”. Każdy przejazd na ww. trasie będącej pętlą, stanowił odrębną rejestrację parametrów ruchu i emisji. Trasa przejazdów została pokazana na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Trasa przejazdu

Obiektem badań był przedstawiony na rys. 7.2 samochód Ford Focus Flexifuel o zapłonie iskrowym, wyprodukowany w 2008 roku. Dane techniczne samochodu znajdują się w tab. 7.1.



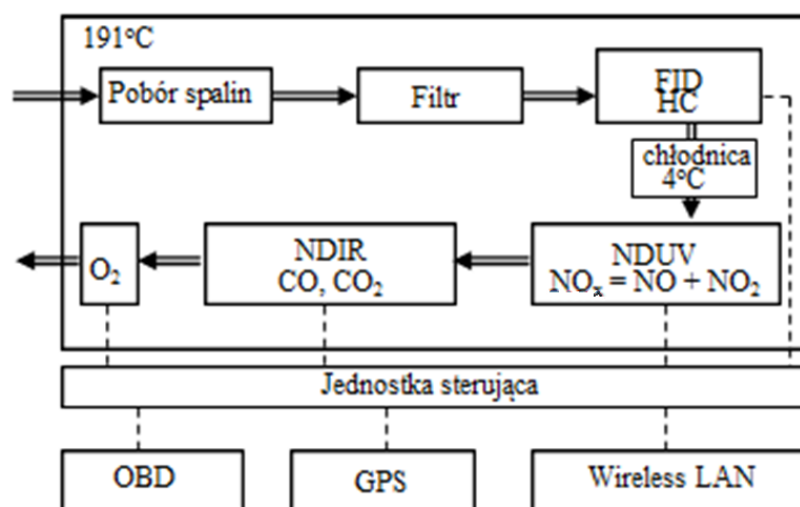
Rys. 7.2. Samochód Ford Focus stanowiący obiekt badań

Tab. 7.1. Dane techniczne samochodu Ford Focus Flexifuel

Nazwa	Dane
Marka	Ford
Typ	Focus
Moc	92 kW
Objętość skokowa silnika	1798 cm ³
Układ i liczba cylindrów	Rzędowy, 4
Poziom emisji zanieczyszczeń	Euro 4
Skrzynia biegów	Manualna (pięć biegów do przodu, jeden bieg do tyłu)

W ramach badań eksploatacyjnych dokonywano pomiarów: prędkości pojazdu z częstotliwością rejestracji 1 Hz przy wykorzystaniu czytnika sygnałów diagnostycznych ze sterowników pojazdów (zgodnych z normami OBDII / EOBD) oraz pomiarów i rejestracji szkodliwych związków gazowych

spalin, do której wykorzystano analizator Semtech DS z modulem GPS firmy Sensors Inc. Był to analizator typu PEMS, umożliwiający pomiar masowego natężenia przepływu spalin oraz stężenie związków szkodliwych takich jak: dwutlenek węgla (CO_2), tlenek węgla (CO), węglowodorów (HC) i tlenków azotu (NO_x). Urządzenie umożliwia wyznaczenie emisji drogowej i jednostkowej oraz przebiegowego zużycia paliwa. Pobrana próbka spalin, przechodzi przez sondę masowego natężenia spalin, a następnie do analizatora tzw. grzaną drogą, która utrzymuje temperaturę 191°C . Spaliny są poddane filtracji z cząstek stałych (w przypadku silników ZS) i dokonywany jest pomiar stężenia węglowodorów w analizatorze FID (*Flame Ionization Detector*). Następnie próbka zostaje schłodzona i trafia do kolejnych modułów analizatora. W podzespole NDUV (*Nondispersive Ultra Violet Detector*) dokonywany jest pomiar stężenia tlenków azotu, a w NDIR (*Nondispersive Infrared Detector*) dokonywany pomiar stężenia tlenku węgla i dwutlenku węgla. Czujnik elektrochemiczny analizuje zawartość tlenu. Semtech DS posiada możliwość rejestrowania parametrów diagnostycznych poprzez złącze OBD pojazdu oraz rejestrowania położenia geograficznego z wykorzystaniem modułu GPS. Schemat przepływu spalin w analizatorze SEMTECH DS, przedstawiono na rys. 7.3 [42].



Rys. 7.3. Schemat przepływu spalin w analizatorze SEMTECH DS

Widok zewnętrzny analizatora Semtech DS przedstawiono na rys. 7.4 natomiast instalację poboru spalin w pojeździe badawczym na rys. 7.5.



Rys. 7.4. Mobilny analizator SEMTECH DS zainstalowany w pojeździe badawczym Ford Focus Flexifuel



Rys. 7.5. Instalacja poboru spalin z układu wydechowego wraz z przepływomierzem urządzenia SEMTECH DS zainstalowana na pojeździe badawczym

Do rejestracji parametrów pracy pojazdu podczas badań drogowych wykorzystano urządzenia CarChip Pro produkcji Davis Instruments Corp – rys. 7.6.



Rys. 7.6. Urządzenie rejestrujące CarChip Pro w gnieździe OBD pojazdu

W tab. 7.2–7.4 przedstawiono charakterystykę eksploatacyjną i techniczną urządzenia CarChip Pro.

Tab. 7.2. Charakterystyka techniczna rejestratora parametrów ruchu pojazdu CarChip Pro

Temperatura pracy	-40–85 °C
Zasilanie, podczas połączenia z pojazdem	9–16 V, 80 mA przy pracującym silniku, 17 mA przy wyłączonym silniku
Zasilanie własne	Wbudowana bateria, 5 lat bez ładowania, 10–15 lat normalnego użytkowania
Pamięć	512 KB wbudowanej pamięci
Rejestracja parametrów pojazdu	Maksymalnie 300 h, w zależności od częstotliwości zapisu danych
Data i czas	Dokładność ± 2 sekundy na dobę
Interfejs komunikacji z pojazdem	16-pinowe gniazdo OBDII
Interfejs komunikacji z komputerem	USB
Długość przewodu USB	1,2 m
Alarm	Opcjonalny sygnał dźwiękowy ustawionego alarmu
Sygnalizacja świetlna	Dioda LED sygnalizująca pracę
Wymiary	46 mm x 26 mm x 34 mm
Waga	20,5 g

Tab. 7.3. Charakterystyka eksploatacyjna rejestratora ruchu pojazdu – parametry zapisu

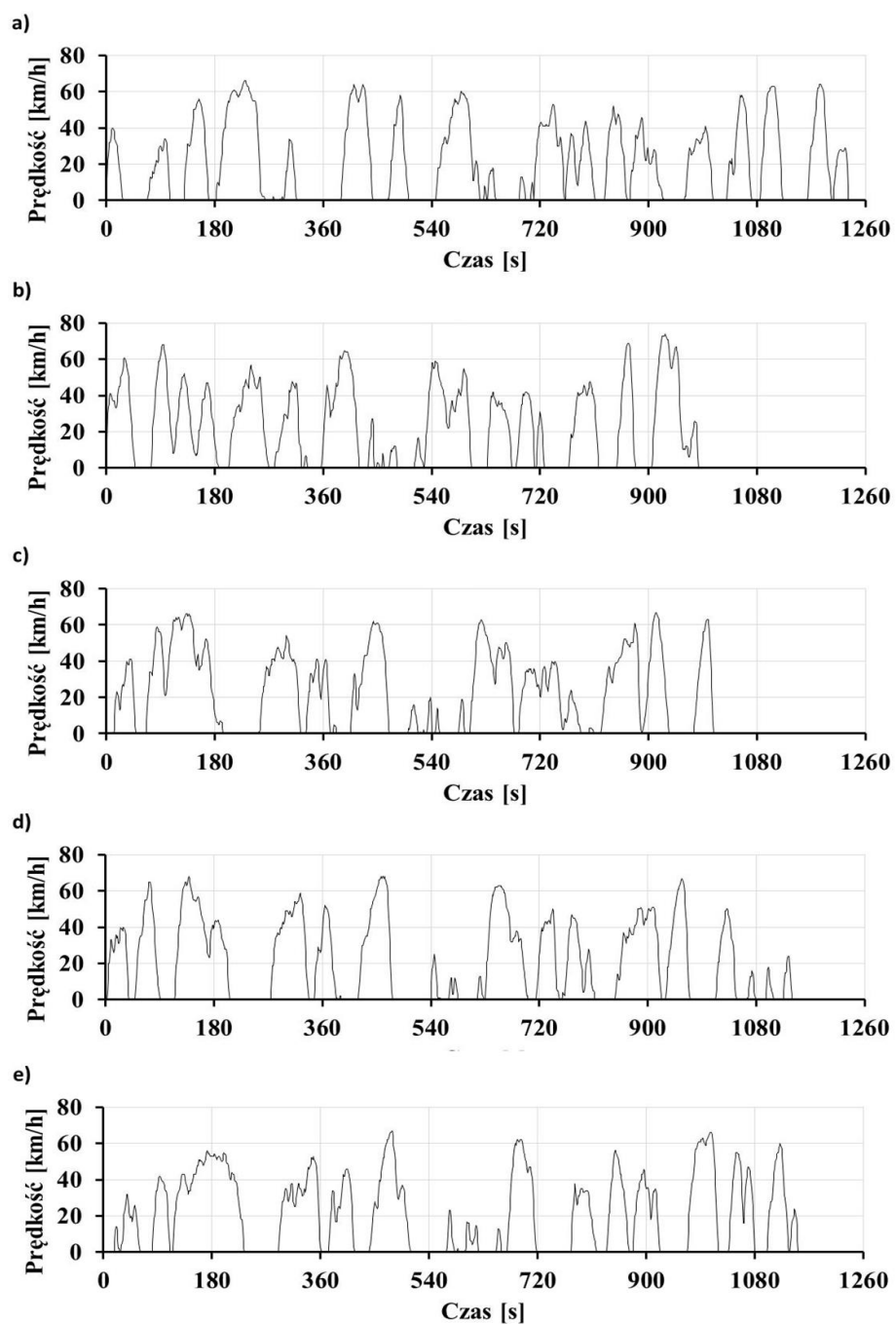
Parametr	Zakres	Rozdzielczość
Prędkość pojazdu	0–255 km/h, 0–70 m/s	1 km/h, 0,3 m/s
Dystans	0–16000 km	0,1 km
Przyspieszanie/hamowanie	0–3 g, 0–30 m/s ²	0,03 g, 0,3 m/s ²
Obroty silnika	0–16384 obr/min	1 obr/min
Położenie przepustnicy	0–100%	0,1%
Temperatura płynu chłodzącego	-40–215°C	1°C
Obciążenie silnika	0–100%	0,1%
Przepływ powietrza	0–655,35 g/s	0,01 g/s
Temperatura powietrza dolotowego	-40–215°C	1°C
Ciśnienie w kolektorze dolotowym	0–255 kPaA	1 kPaA
Ciśnienie paliwa	0–765 kPaG	3 kPaG
Napięcie czujników O₂	1,275 V	0,005 V
Kąt wyprzedzenia zapłonu	-64–63,5°	0,5°
Krótkoterminowa korekta mieszanki	-100–99,22%	0,8%
Długoterminowa korekta mieszanki	-100–99,22%	0,8%
Napięcie akumulatora	6–16 VDC	0,1 VDC

Tab. 7.4. Charakterystyka eksploatacyjna rejestratora ruchu pojazdu – prezentowane informacje

Podsumowanie rejestrowanej trasy	Data i godzina początku, czas trwania, dystans, maksymalna prędkość, czas jazdy przy największej prędkości, liczba silnych hamowań, liczba ekstremalnych zahamowań, liczba dużych przyspieszeń, liczba ekstremalnych przyspieszeń, ID pojazdu
Raport z rejestracji	ID pojazdu, ID urządzenia CarChip, czas początku i zakończenia, czas trwania, czas na biegu jałowym, czas po przekroczeniu limitów prędkości, dystans, prędkość średnia i maksymalna, liczba silnych i ekstremalnych hamowań, liczba silnych i ekstremalnych przyspieszeń, lista zarejestrowanych parametrów, komentarze
Wykresy	Wykres liniowy przebiegu prędkości pojazdu. Możliwość tworzenia do czterech dodatkowych wykresów
Tabela rejestracji danych	Zarejestrowany czas i prędkość z maksymalną częstotliwością rejestracji 1 Hz, pozostałe parametry co 5, 10, 20, 30 lub 60 sekund
Dziennik aktywności	Data i czas, ID rejestratora CarChip, opis
Dziennik usterek	Data i czas, ID pojazdu, kod usterki, opis
Podgląd usterek	Data i czas, ID pojazdu, ID rejestratora CarChip, kod usterki, opis, komentarz, informacja na temat ramek zamrożonych

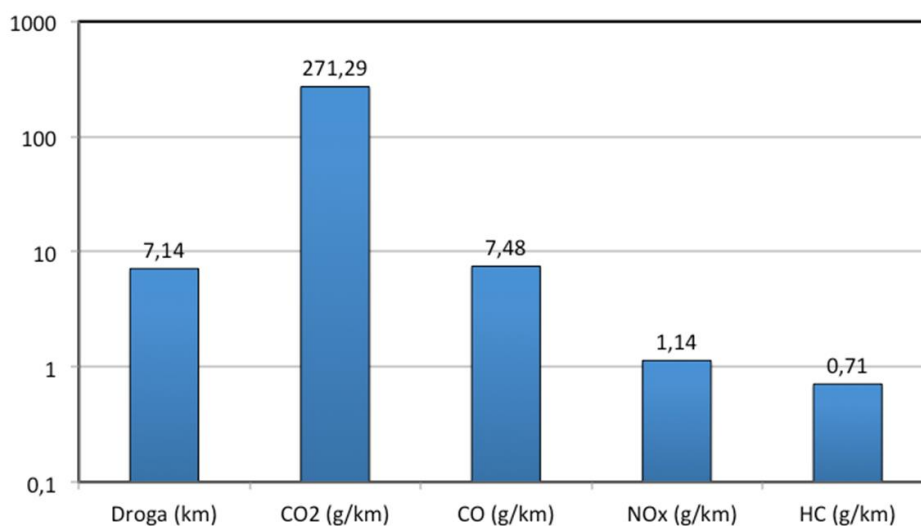
7.2. Wyniki badań eksploatacyjnych

Przebiegi prędkości jazdy rejestrowane podczas każdego z przejazdów przedstawiono na rys. 7.7. Przeprowadzona analiza bazowała na szeregach czasowych prędkości pojazdu i okresie próbkowania równym 1 s.

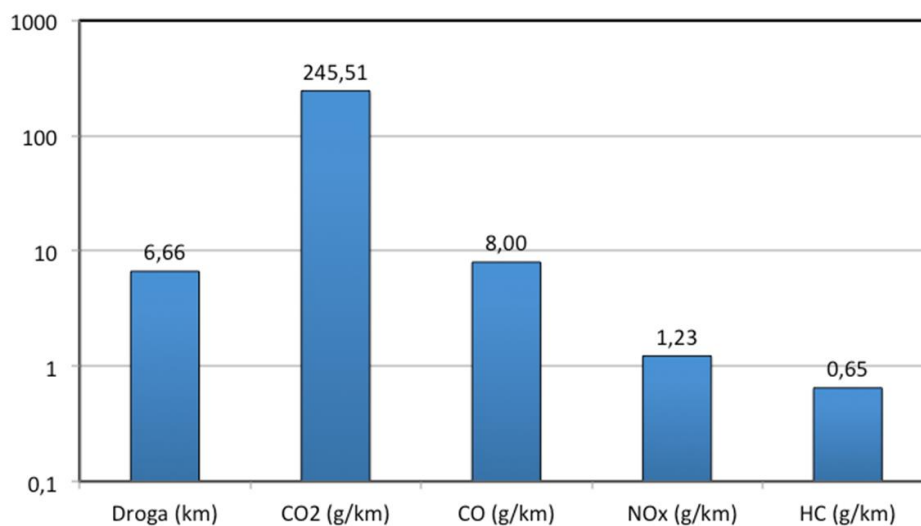


Rys. 7.7. Przebiegi prędkości jazdy: a) przejazd nr 1, b) przejazd nr 2, c) przejazd nr 3, d) przejazd nr 4, e) przejazd nr 5

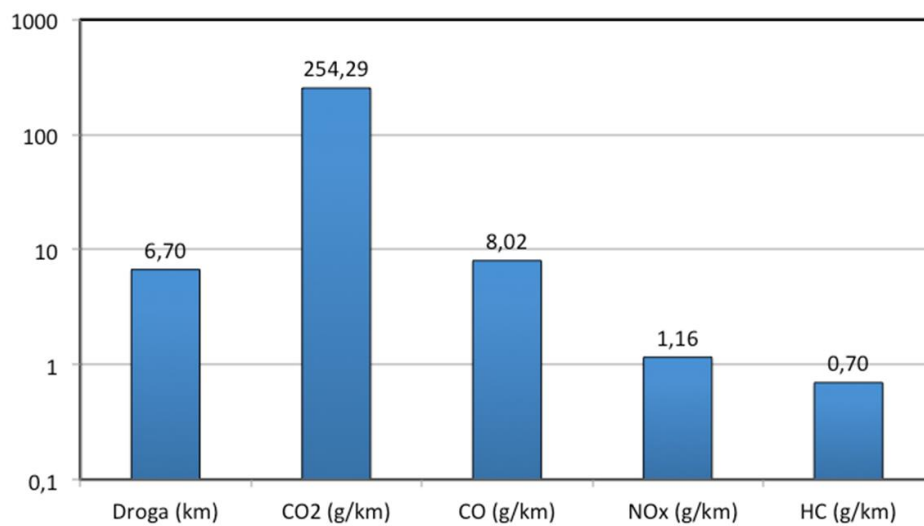
Wyniki pomiarów natężenia emisji substancji szkodliwych przedstawiono na rys. 7.8–7.12.



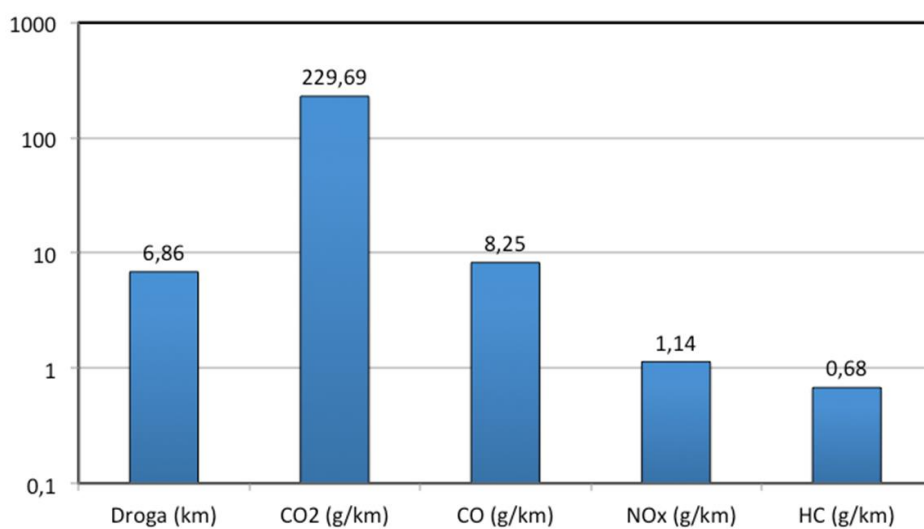
Rys. 7.8. Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 1



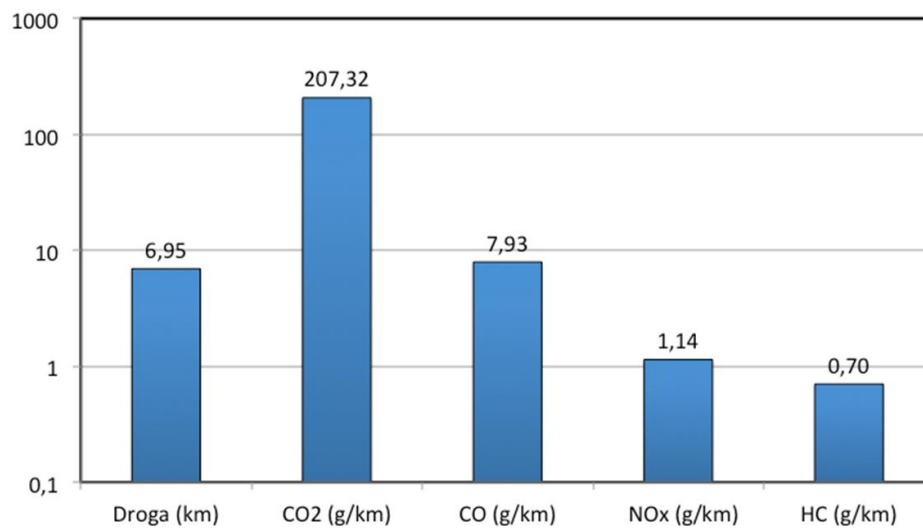
Rys. 7.9. Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 2



Rys. 7.10. Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 3



Rys. 7.11. Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 4



Rys. 7.12. Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 5

Tab. 7.5. Statystyki natężenia emisji w zbiorze 5 zrealizowanych przejazdów

Numer przejazdu	CO ₂	CO	NO _x	HC
1	271,29	7,48	1,14	0,71
2	245,51	8	1,23	0,65
3	254,29	8,02	1,16	0,7
4	229,69	8,25	1,14	0,68
5	207,32	7,93	1,14	0,7
Średnia	241,62	7,936	1,162	0,688
Błąd standardowy	67,65	0,78	0,11	0,07
Względny błąd standardowy	28%	10%	9,5%	10,2%

8. Badanie emisji spalin na hamowni podwoziowej

8.1. Metodyka badań stanowiskowych

Stanowiskowe badania emisji spalin zostały przeprowadzone na dwurolkowej hamowni podwoziowej produkcji firmy Jaroš typu 2PT220EX z dwoma rolkami o średnicy po 372 mm, z elektryczną symulacją oporów ruchu i mechaniczną symulacją bezwładności pojazdu, umieszczonej w komorze niskich temperatur. Hamownia ta umożliwia badanie pojazdów (również w temperaturze otoczenia do -14°C) o następujących parametrach:

- maksymalna moc netto na kołach do 220 kW,
- maksymalna prędkość jazdy 130/200 km/h,
- nacisk na oś napędową do 2400 kg,
- napęd na jedną oś lub na więcej niż jedną oś przy możliwości rozłączenia napędu,
- maksymalny rozstaw kół osi napędowej: 2100 mm,
- wysokość maksymalna pojazdu 2900 mm, maksymalna odległość tylnej osi napędowej od przodu samochodu 5000 mm.



Rys. 8.1. Samochód Ford Focus Flexifuel na stanowisku badawczym

Pomiarów emisji dokonano przy wykorzystaniu zestawu analizatorów produkcji AVL typu AMA i60. Mierzono natężenie następujących zanieczyszczeń:

- tlenku węgla (małe stężenia) (CO_{low}),
- tlenku węgla (duże stężenia) (CO_{high}),
- dwutlenku węgla (CO_2),
- sumy węglowodorów (THC),
- metanu (CH_4),
- tlenków azotu (NO_x), tlenku azotu (NO) i dwutlenku azotu (NO_2),
podtlenku azotu (N_2O).



Rys. 8.2. Stanowisko pomiarowe hamowni podwoziowej

Obiektem badań był wykorzystany uprzednio w badaniach drogowych samochód Ford Focus, przedstawiony na rys. 7.2 i w tab. 7.1.



Rys. 8.3. Zestaw urządzeń pomiarowych AMA i60

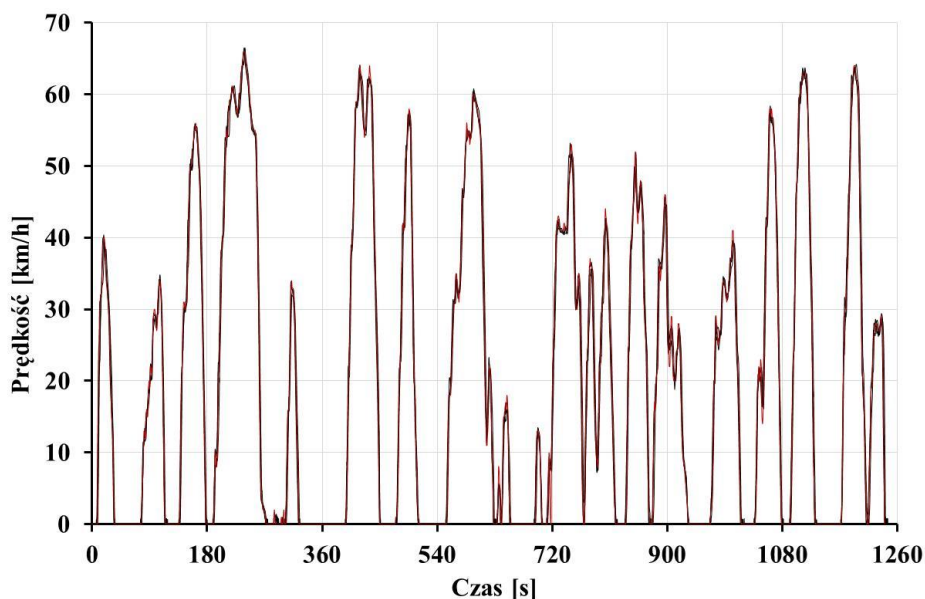
W ramach badań stanowiskowych wykonano 35 testów na hamowni podwoziowej. Było to 5 testów „bezpośrednich”, odwzorowujących przebieg prędkości zarejestrowanej podczas badań drogowych z wykorzystaniem analizatora Semtech oraz 5 testów syntetycznych zaprogramowanych opisywaną w pracy autorską metodą na podstawie tych samych badań drogowych.

Każdy z testów syntetycznych został uprzednio przygotowany za pomocą oprogramowania hamowni podwoziowej iGEM, a następnie odtworzony trzykrotnie lub czterokrotnie. Wyniki pomiarów zostały przedstawione na wykresach (rys. 8.4–8.50).

8.2. Wyniki testów „bezpośrednich”

Na rys. 8.4, rys. 8.9, rys. 8.14, rys. 8.19 oraz rys. 8.24 przedstawiono przebiegi prędkości pojazdu podczas realizacji kolejnych testów „bezpośrednich” odwzorowujących ruch drogowy. Na każdym z wykresów, kolorem czarnym opisano kolejne przebiegi prędkości zarejestrowane podczas badań stanowiskowych na hamowni podwoziowej oraz kolorem czerwonym przebieg prędkości drogowej odpowiadający testowi realizowanemu na hamowni podwoziowej. Pokrywanie się linii na wykresie świadczy o dużej

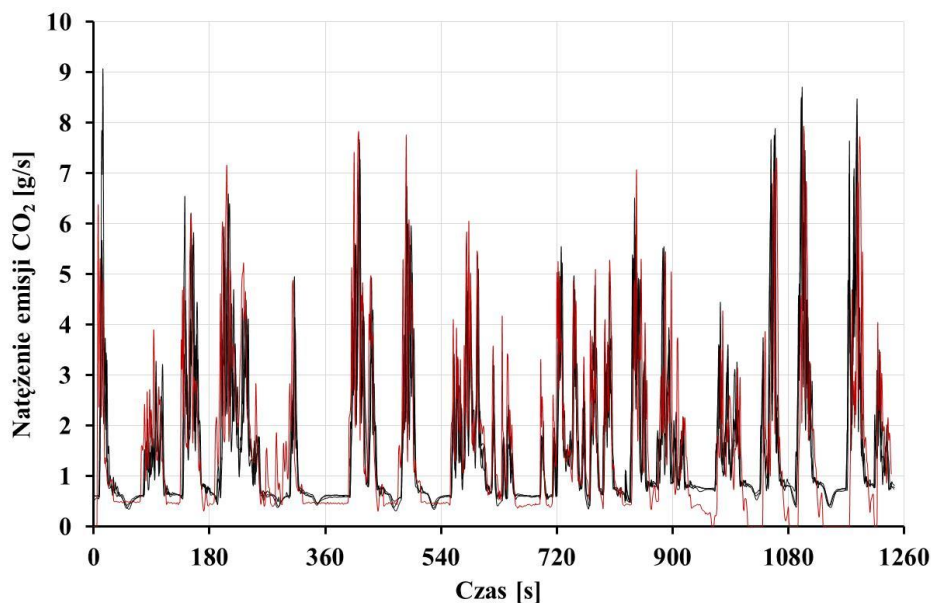
dokładności odwzorowania przebiegu prędkości rejestrowanej podczas badań drogowych i w badaniach przeprowadzonych na hamowni podwoziowej.



Rys. 8.4. Przebieg prędkości pojazdu podczas 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)

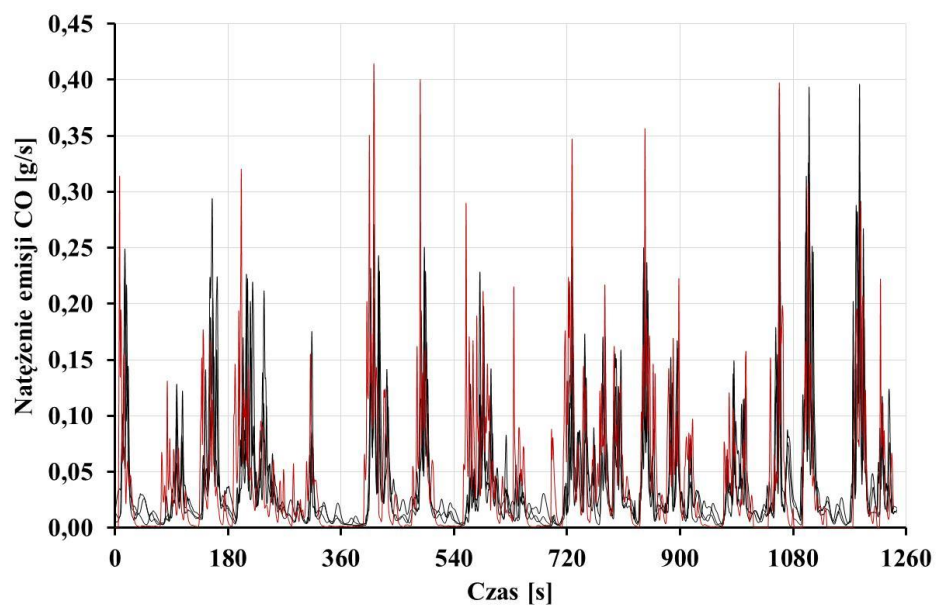
Na rys. 8.5, rys. 8.10, rys. 8.15, rys. 8.20 oraz rys. 8.25, przedstawiono przebiegi natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji poszczególnych testów. Na każdym z wykresów, kolorem czerwonym oznaczono wynik rejestracji podczas badań drogowych w ruchu rzeczywistym, a kolorem czarnym kolejne rejestracje natężenia emisji CO_2 przeprowadzone na hamowni podwoziowej, odpowiadające danemu testowi drogowemu. Na wykresach widać, że natężenia emisji mierzone w ruchu rzeczywistym w znacznym stopniu pokrywają się z wynikami pomiarów laboratoryjnych. Fakt ten jest potwierdzeniem poprawności zastosowanej metody odwzorowania parametrów ruchu rzeczywistego, ponieważ ilość wydzielonego podczas testu dwutlenku węgla jest wprost proporcjonalna do ilości spalonego paliwa, a co za tym idzie do pracy wykonanej przez silnik. Porównanie ilościowe emisji dwutlenku węgla jest najbardziej reprezentatywnym i najprostszym sposobem oceny obciążenia silnika. Analiza emisji CO_2 jest miarą poprawności procesu spalania [39]. Różnica średnich wartości natężenia emisji dwutlenku węgla wynosi 3,9% pomiędzy testami w warunkach drogowych, a odpowiadającymi im testami na hamowni podwoziowej. Jest to wartość pomijalnie mała, mogąca występować nawet podczas standardowych testów homologacyjnych. Różnica średniego

natężenia emisji dwutlenku węgla pomiędzy przeprowadzanymi na hamowni podwoziowej testami „bezpośrednimi”, a testami syntetycznymi wynosi średnio 2,5%. Świadczy to o bardzo dużej zbieżności parametrów pracy silnika w obu rodzajach testów.

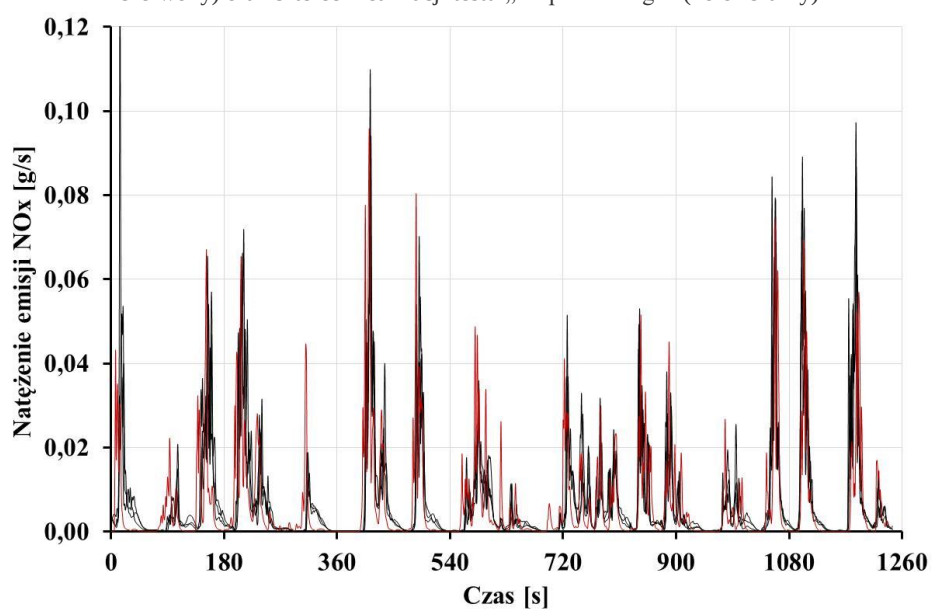


Rys. 8.5. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)

Wykresy przedstawione na rys. 8.6, rys. 8.11, rys. 8.16, rys. 8.21 oraz rys. 8.26, reprezentują natężenie emisji tlenku węgla podczas realizacji poszczególnych testów, natomiast wykresy przedstawione na rys. 8.7, rys. 8.12, rys. 8.17, rys. 8.22 oraz rys. 8.27, przedstawiają natężenie emisji tlenków azotu podczas realizacji poszczególnych testów. Kolorem czerwonym zaznaczono natężenie emisji zarejestrowane podczas przejazdów w ruchu rzeczywistym, natomiast kolorem czarnym kolejne rejestracje natężenia emisji przeprowadzone na hamowni podwoziowej, odpowiadające danemu testowi drogowemu. Zarówno na wykresach natężenia emisji tlenku węgla jak i natężenia emisji tlenków azotu, widać zbieżność co do wielkości i charakteru zmian emisji.

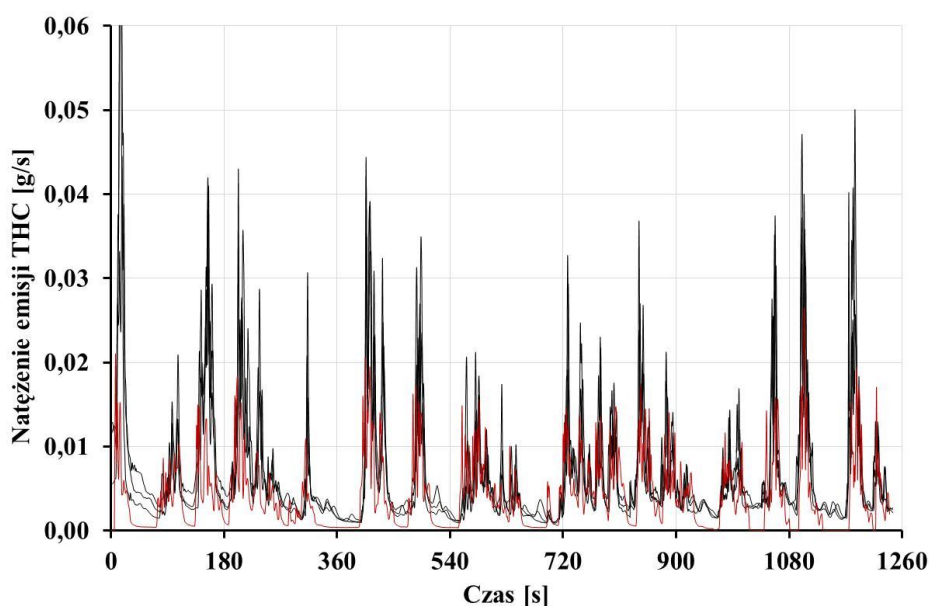


Rys. 8.6. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



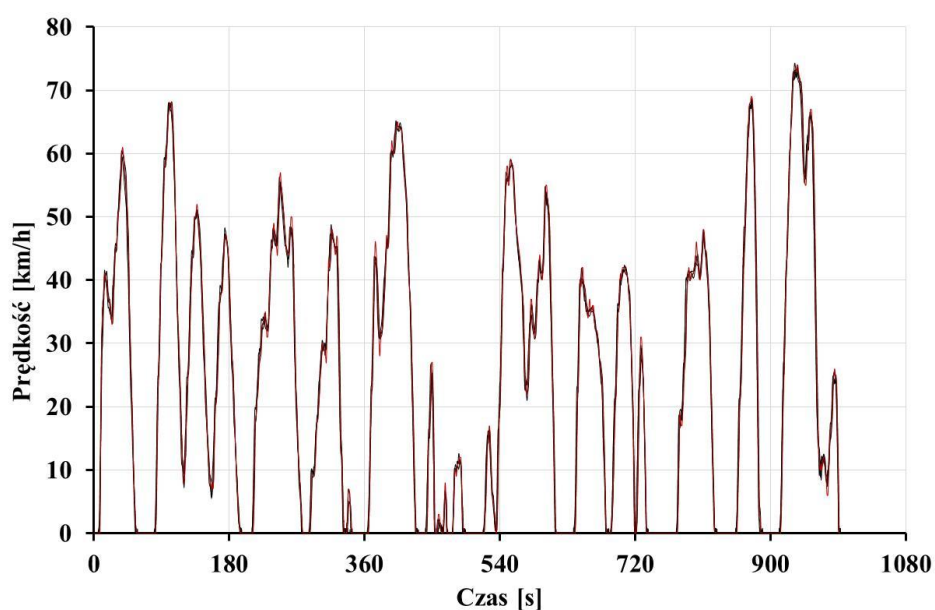
Rys. 8.7. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)

Wykresy przedstawione na rys. 8.8, rys. 8.13, rys. 8.18, rys. 8.23 oraz rys. 8.28, reprezentują natężenie emisji węglowodorów. Kolorem czerwonym zaznaczono natężenie emisji zarejestrowane podczas przejazdów w ruchu rzeczywistym, natomiast kolorem czarnym kolejne rejestracje emisji przeprowadzone na hamowni podwoziowej, odpowiadające danemu testowi drogowemu. Podobnie jak w przypadku natężenia emisji pozostałych składników spalin, zaobserwować można istotną zbieżność charakteru przebiegu emisji w czasie, natomiast wyjaśnienia wymaga różnica w wartościach pomiędzy rejestracją analizatorem mobilnym Semtech, a analizatorami stacjonarnymi. Wartości emisji mierzone analizatorem mobilnym są proporcjonalnie mniejsze. Wynika to z charakterystyki układu pomiarowego analizatora, działającego na zasadzie wykorzystywania promieniowania podczerwonego. Jego wadą jest brak możliwości pomiaru wszystkich emitowanych cząsteczek węgla, na skutek czego wartości natężenia emisji są odpowiednio mniejsze. Natomiast w laboratoryjnych pomiarach na hamowni zastosowano analizator FID, który podaje właściwą wartość dla liczby emitowanych cząsteczek węglowodorów.

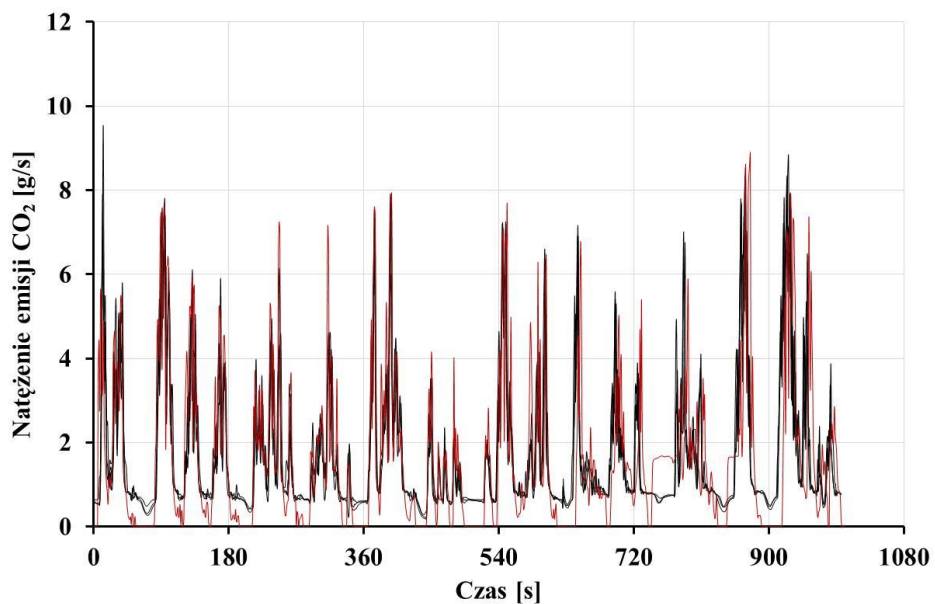


Rys. 8.8. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)

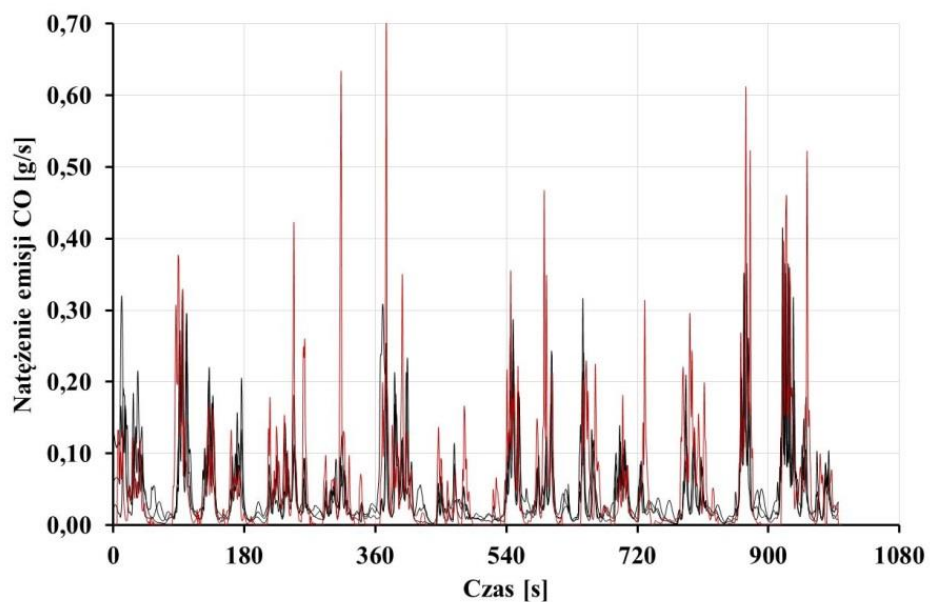
Na wykresach reprezentujących natężenie emisji wyznaczone w ruchu rzeczywistym można zaobserwować nieco odmienne w stosunku do badań stanowiskowych wartości przy stanach pracy biegu jałowego silnika. Wynika to ze sposobu pomiaru przepływu spalin przepływomierzem wykorzystującym rurkę Pitota, co wyjaśnia obserwowane zjawisko oscylowania wartości natężenia emisji (także do wartości zerowych), ponieważ podczas postoju pojazdu wartości natężenia emisji są najmniejsze w porównaniu do reszty cyklu, a rurka Pitota charakteryzuje się najmniejszą dokładnością przy małych przepływach.



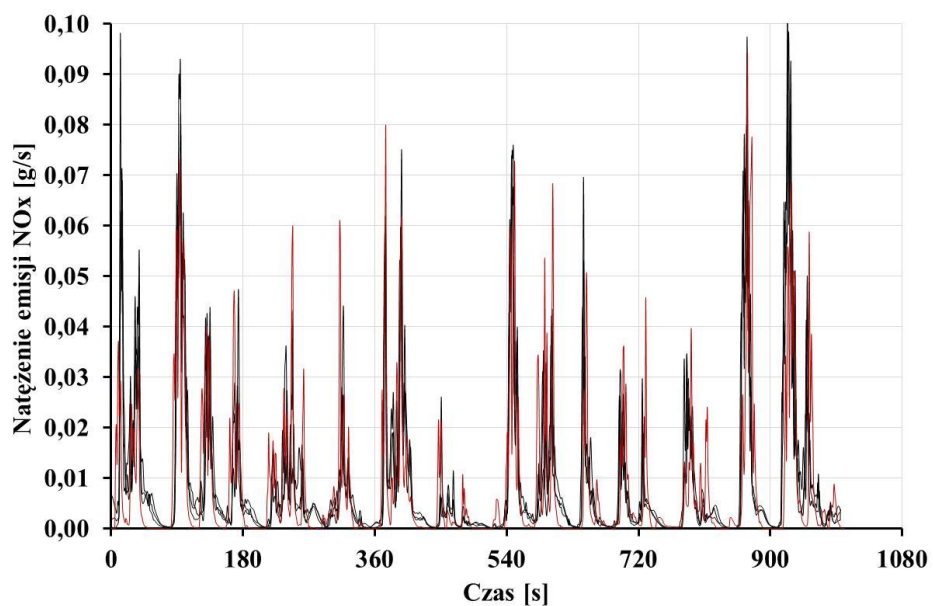
Rys. 8.9. Przebieg prędkości podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



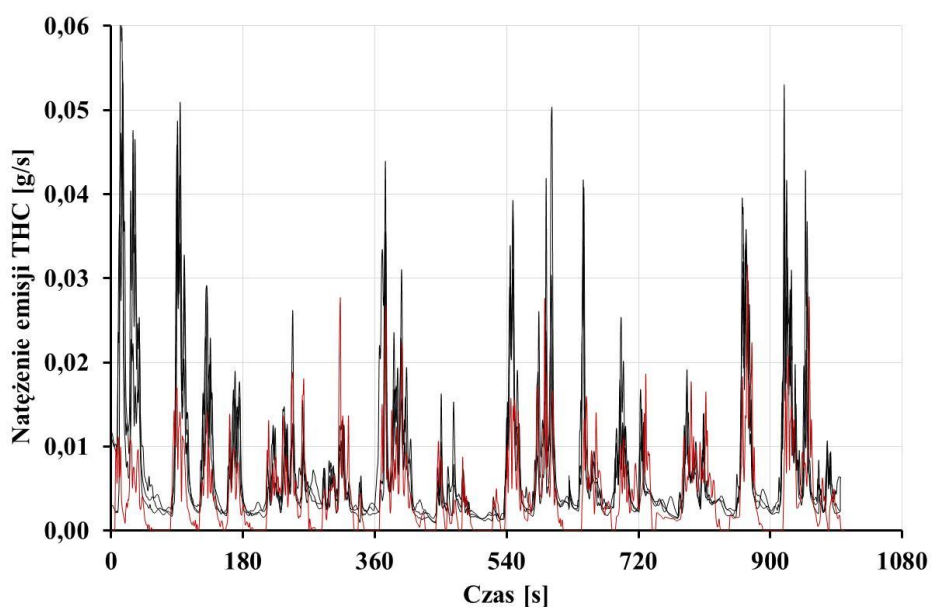
Rys. 8.10. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



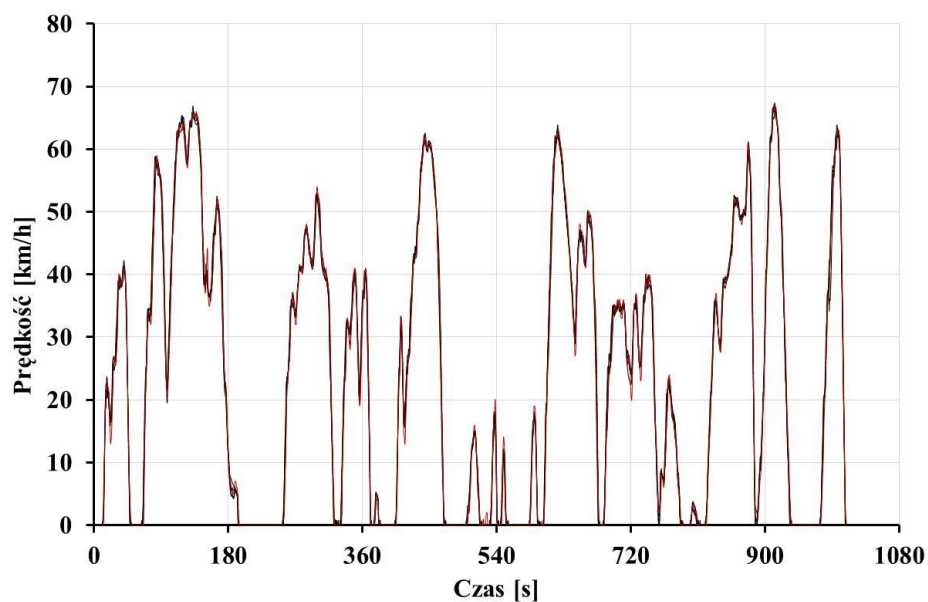
Rys. 8.11. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



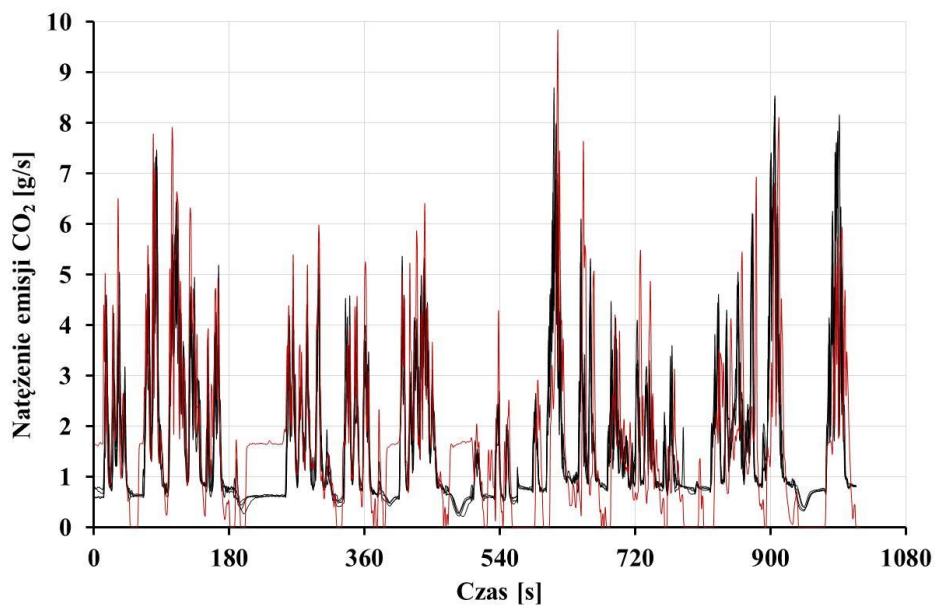
Rys. 8.12. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



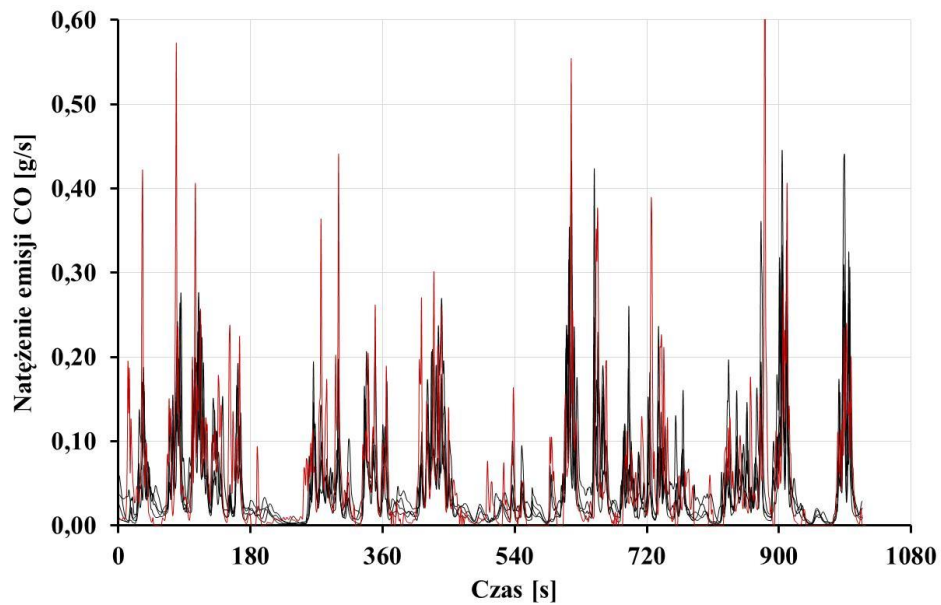
Rys. 8.13 Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



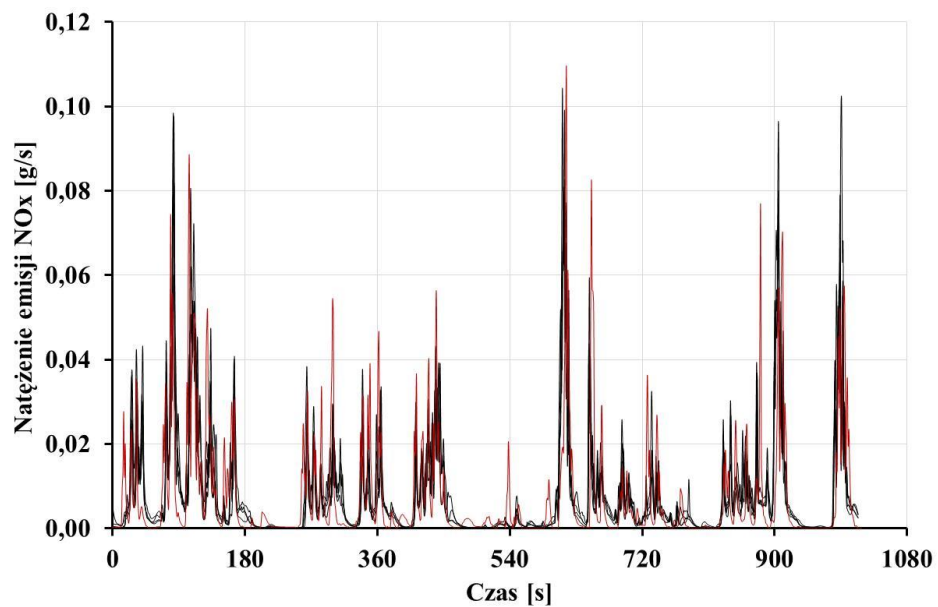
Rys. 8.14. Przebieg prędkości podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



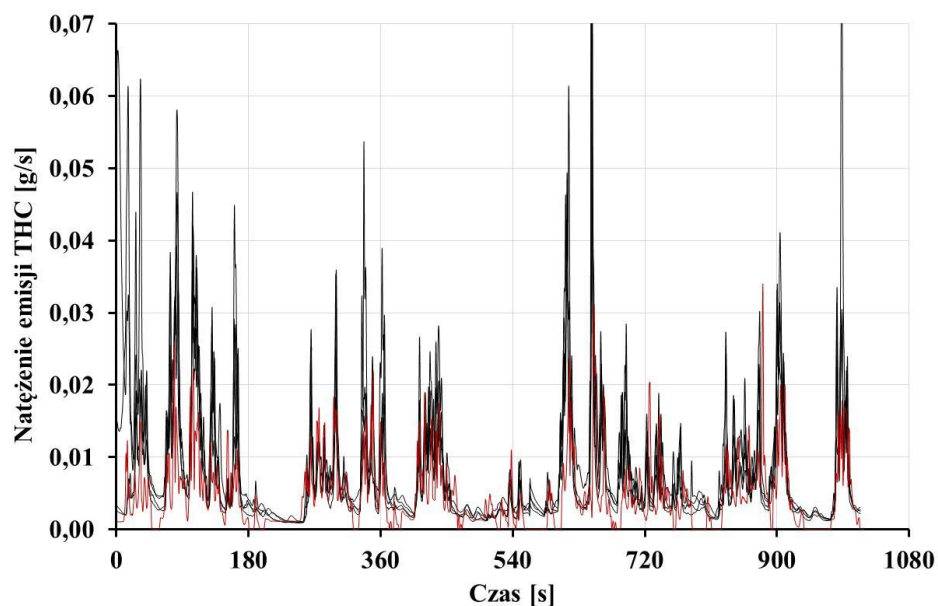
Rys. 8.15. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



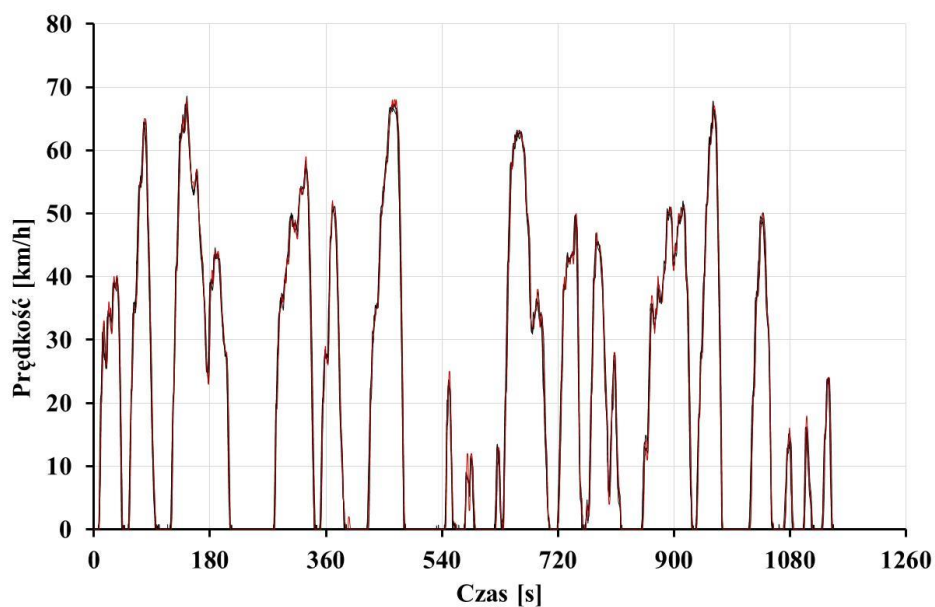
Rys. 8.16. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



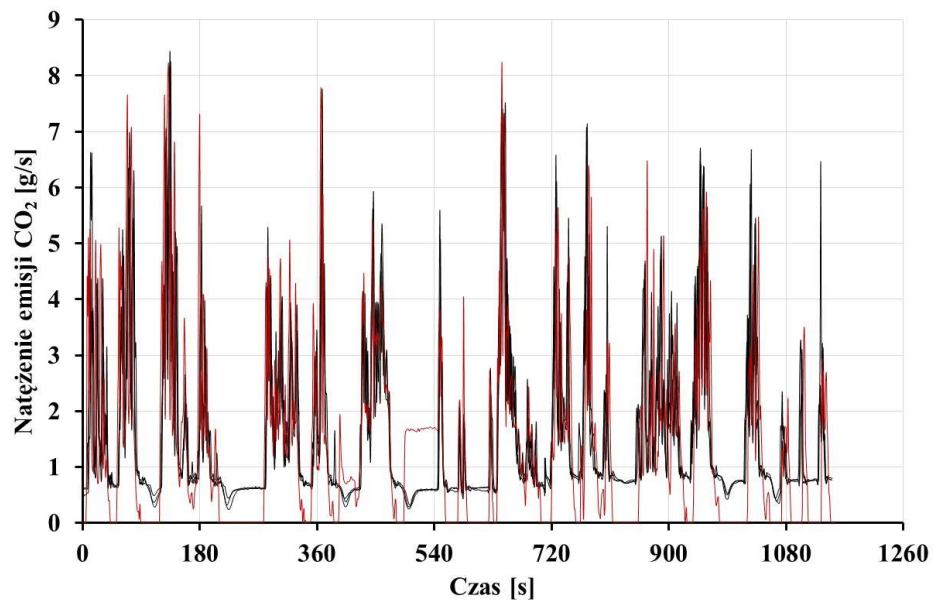
Rys. 8.17. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



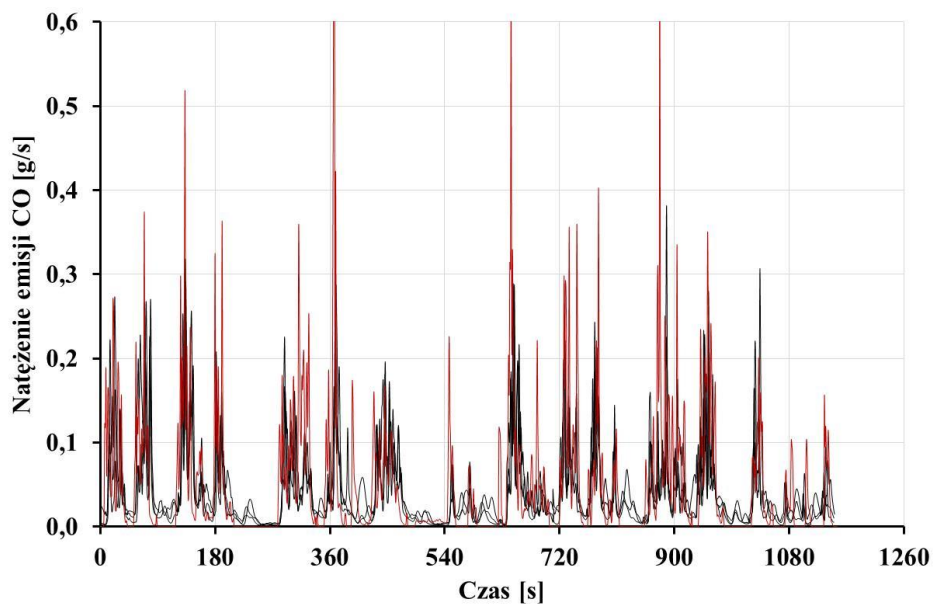
Rys. 8.18. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



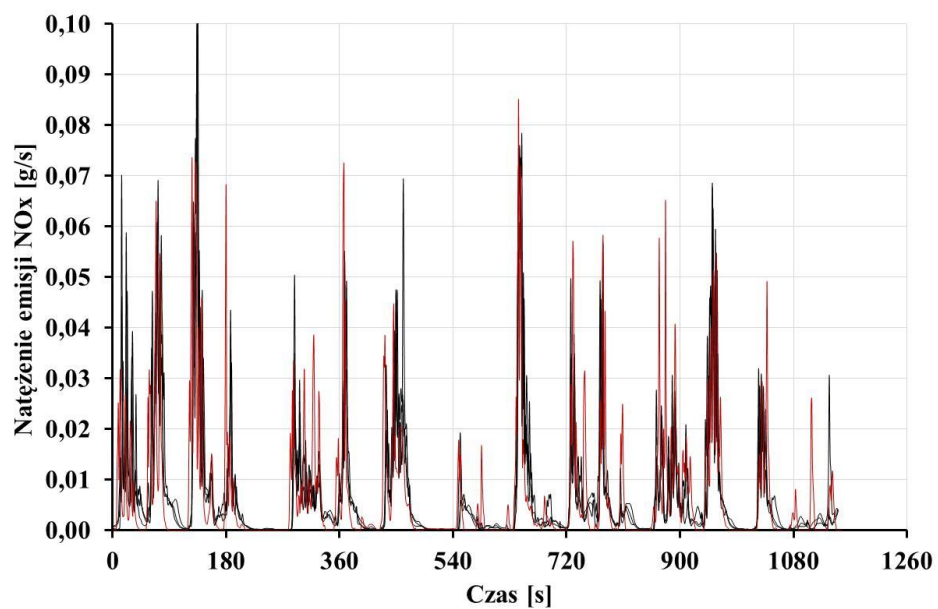
Rys. 8.19. Przebieg prędkości podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



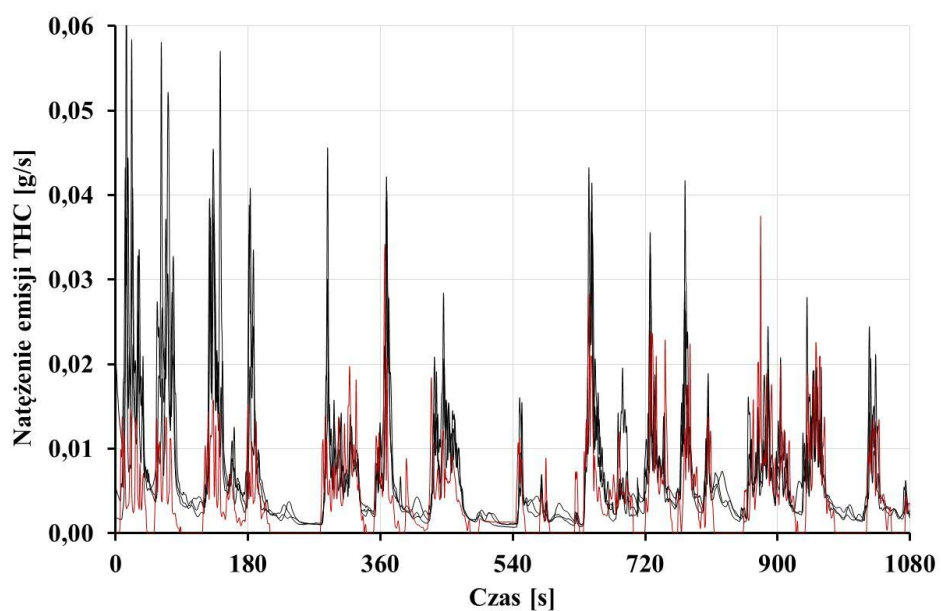
Rys. 8.20. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



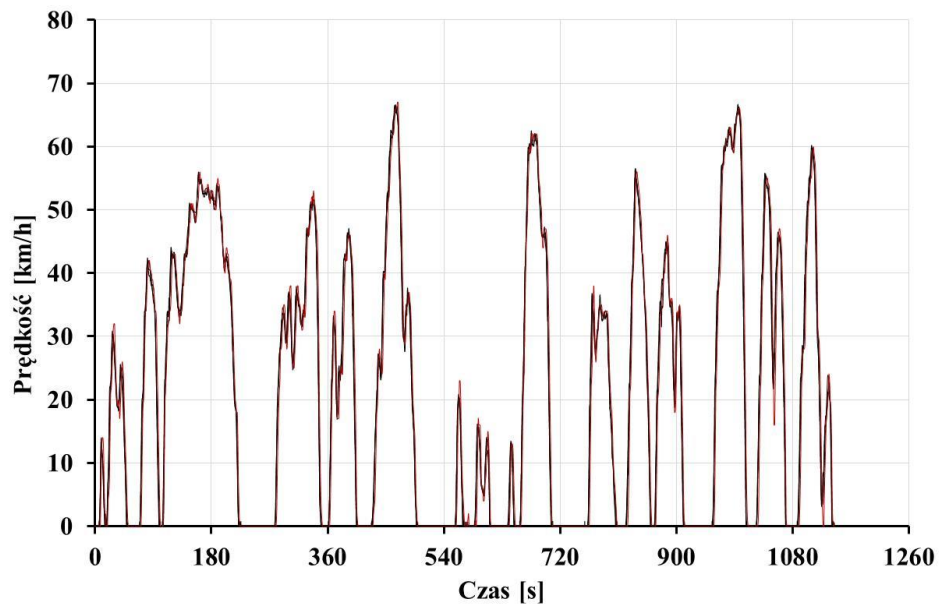
Rys. 8.21. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



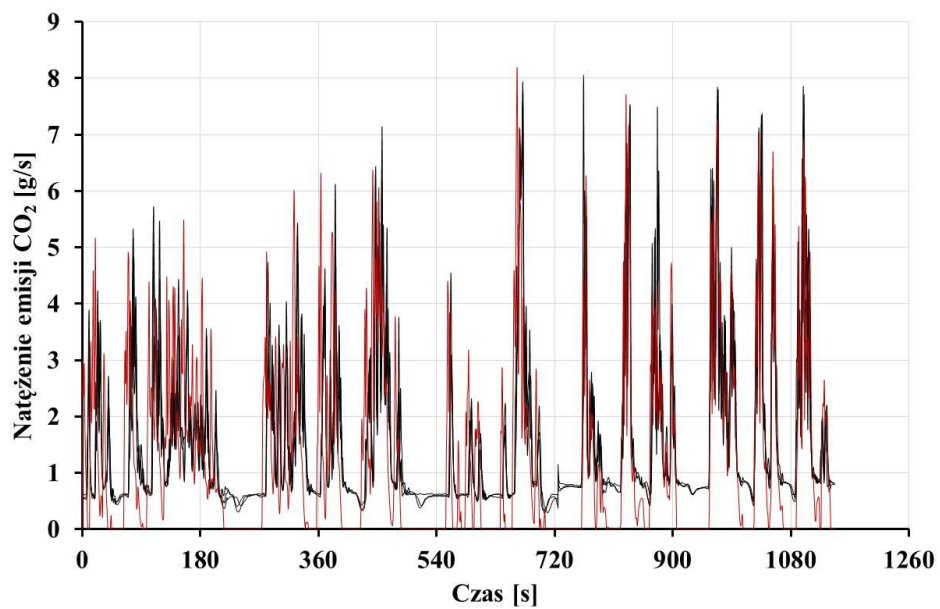
Rys. 8.22. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



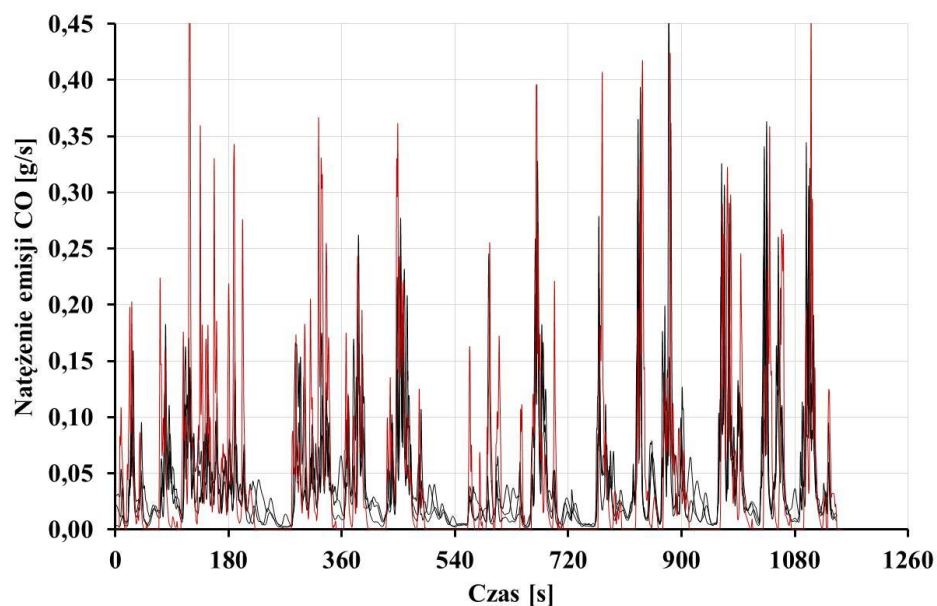
Rys. 8.23. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



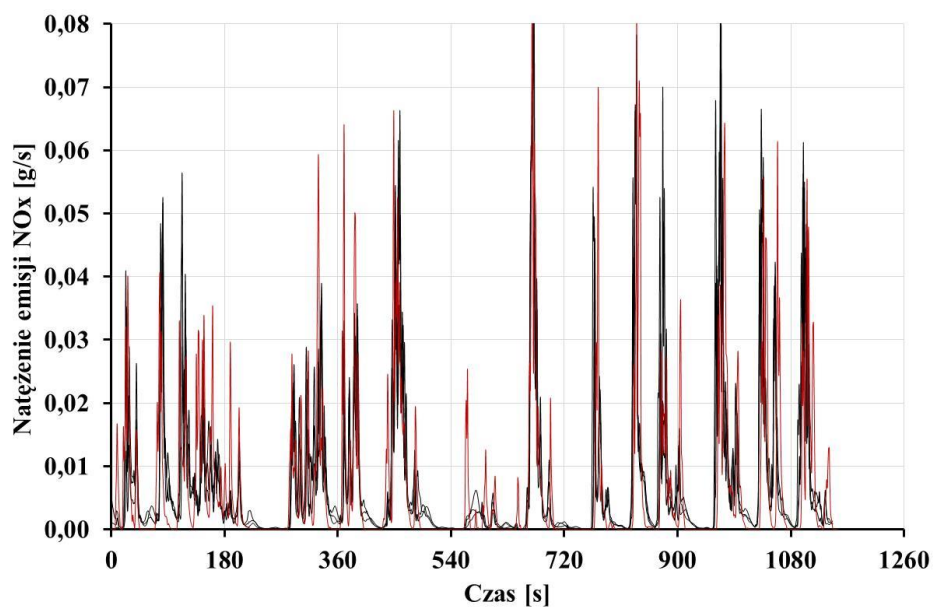
Rys. 8.24. Przebieg prędkości podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



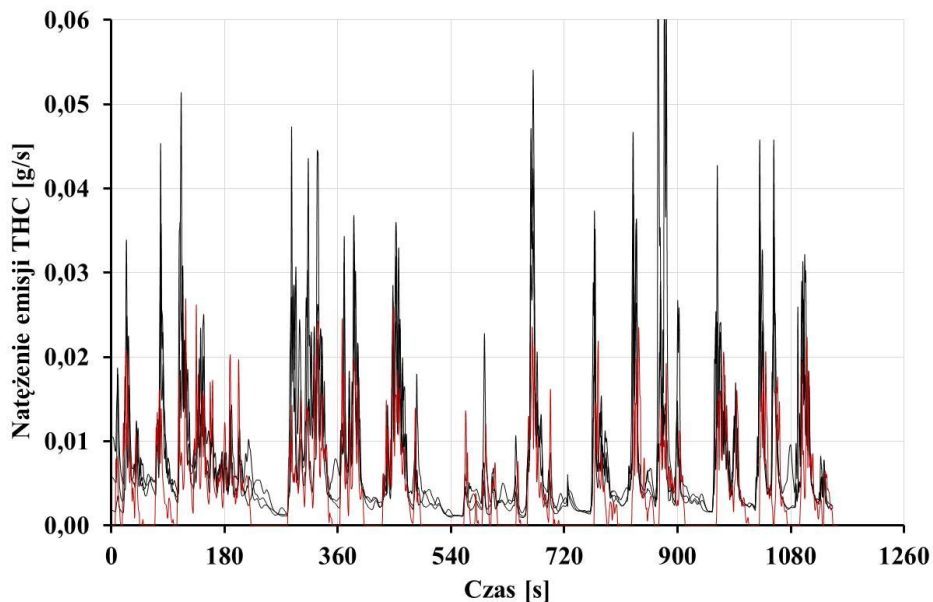
Rys. 8.25. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



Rys. 8.26. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



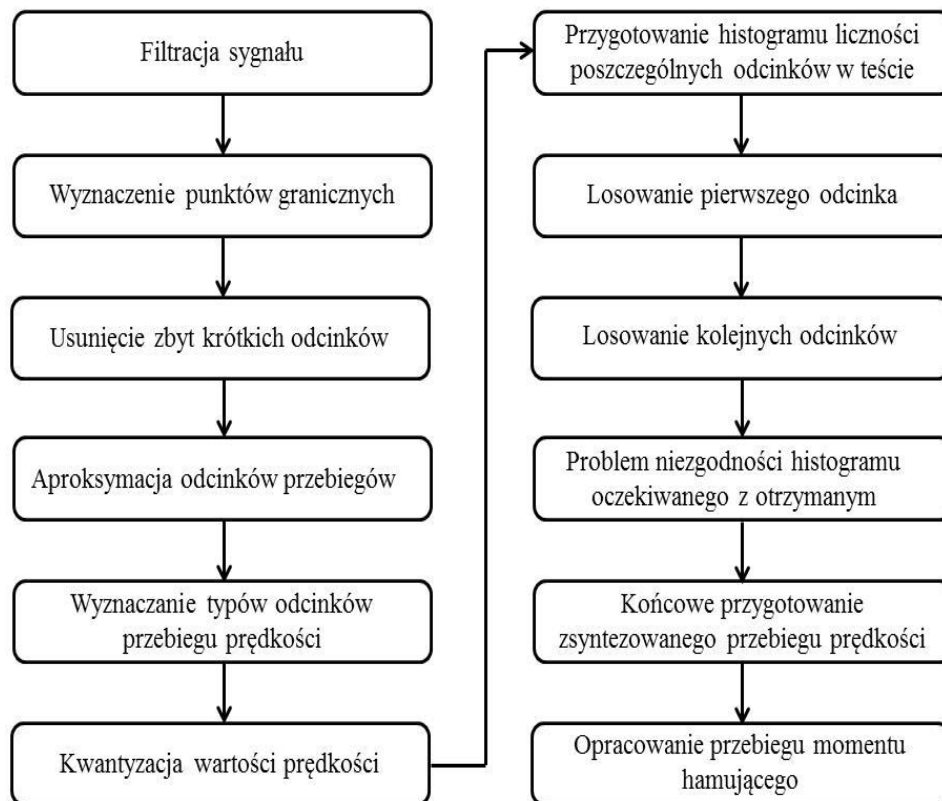
Rys. 8.27. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)



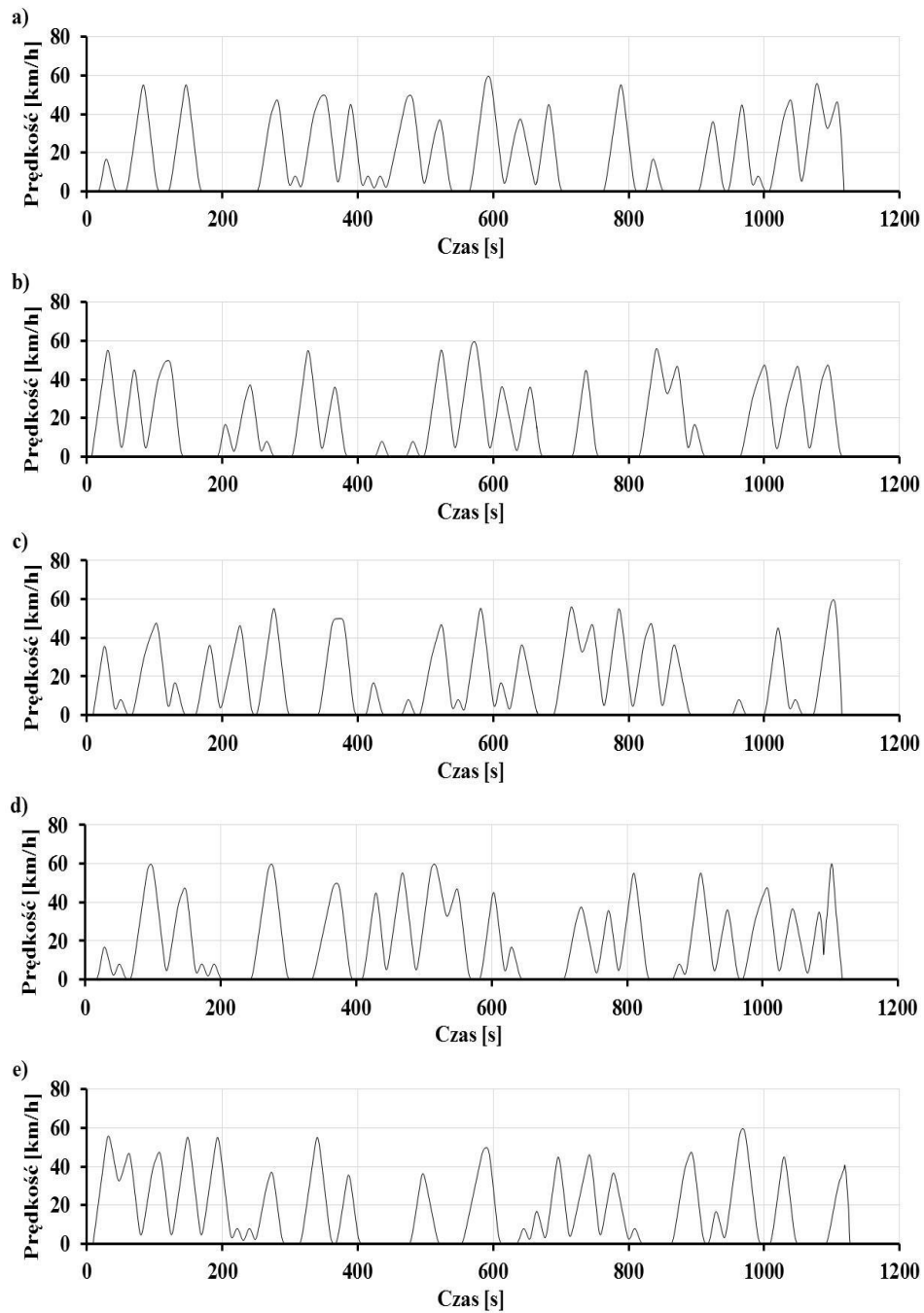
Rys. 8.28. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)

8.3. Wyniki testów syntetycznych

Przebiegi testów syntetycznych zostały wygenerowane za pomocą napisanego w tym celu programu komputerowego, którego kod źródłowy został zamieszczony w załączniku. Program ten został stworzony zgodnie z opisaną w pracy autorską metodą syntezy testów, a jego zastosowanie było warunkiem koniecznym dla wykonania stosownych obliczeń z uwagi na ich specyfikę oraz ilość. Na rys. 8.29 przedstawiono schemat blokowy algorytmu syntezy testów według autorskiej metody opisanej w rozdziale 6.2.3, a na rys. 8.30 pięć wygenerowanych przebiegów syntetycznych testów laboratoryjnych, według których wykonano następnie badania emisji drogowej poszczególnych zanieczyszczeń z układu wylotowego badanego pojazdu.

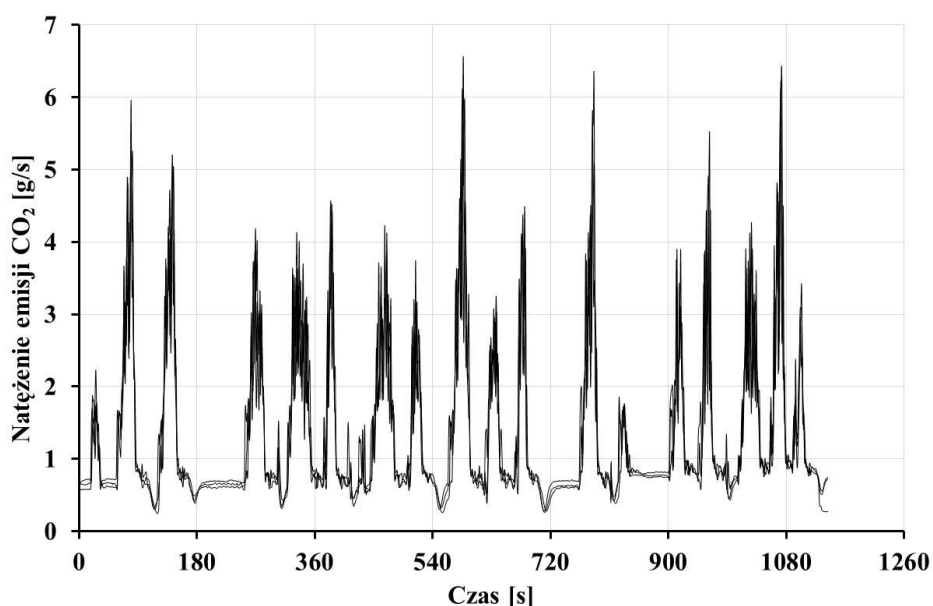


Rys. 8.29. Schemat blokowy algorytmu syntezy testu



Rys. 8.30. Przebiegi prędkości jazdy w testach syntetycznych: a) test nr 1, b) test nr 2, c) test nr 3), d) test nr 4, e) test nr 5

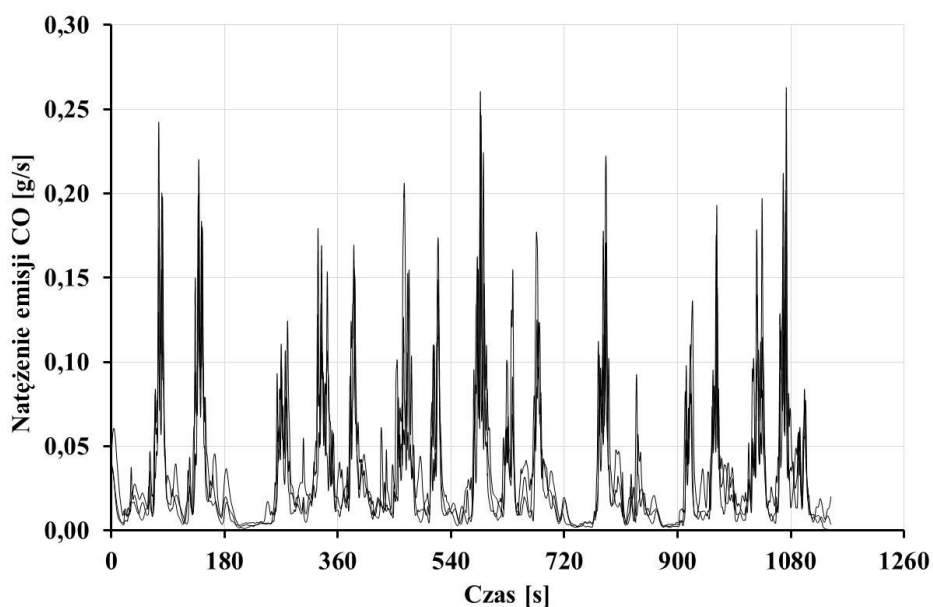
Na rys. 8.31–8.50, przedstawiono przebiegi natężenia emisji poszczególnych zanieczyszczeń w testach syntetycznych, uzyskane podczas badań laboratoryjnych na hamowni podwoziowej. Podobnie jak w przypadku zaprezentowanych już przebiegów natężenia emisji poszczególnych składników w testach „bezpośrednich” odzwierciedlających jazdę drogową, na wykresach zaznaczono kilka realizacji poszczególnych przejazdów w celu zobrazowania ich powtarzalności.



Rys. 8.31. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego

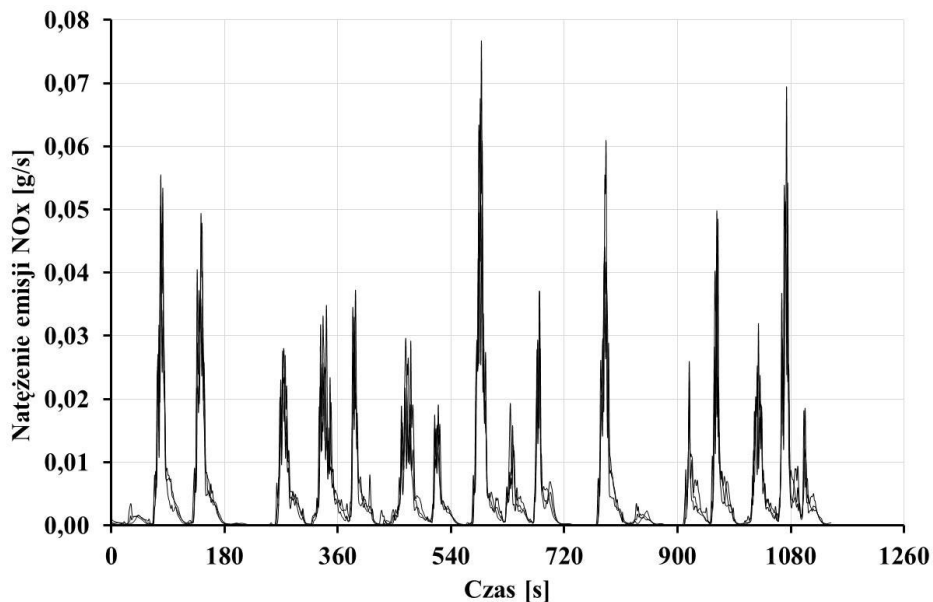
Rys. 8.31, rys. 8.35, rys. 8.39 i rys. 8.43 przedstawiają natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji kolejnych testów syntetycznych na hamowni podwoziowej. Każdy z testów został odtworzony trzykrotnie lub czterokrotnie, przy czym przebiegi natężenia emisji z powtarzanych przejazdów są przedstawiane na wspólnych wykresach dla zobrazowania powtarzalności wyników pomiaru emisji. Można zaobserwować, że szczytowe wartości emisji wahają się w granicach 3–6 g/s, natomiast największa występująca wartość to niemal 10 g/s. Charakterystycznym dla przebiegu natężenia emisji dwutlenku węgla są fragmenty w których silnik pracował na biegu jałowym. Widać, że natężenie emisji waha się wtedy w granicach 0,5–0,8 g/s. Zaobserwować można także fragmenty przebiegu, w których miało miejsce hamowanie silnikiem w trakcie wytracania prędkości pojazdu do zera. Charakteryzują się one najmniejszymi wartościami emisji. Na przedstawionych wykresach

zaobserwować możemy dużą zbieżność nałożonych na siebie przebiegów, świadcząca o dobrej powtarzalności wykonanych badań.



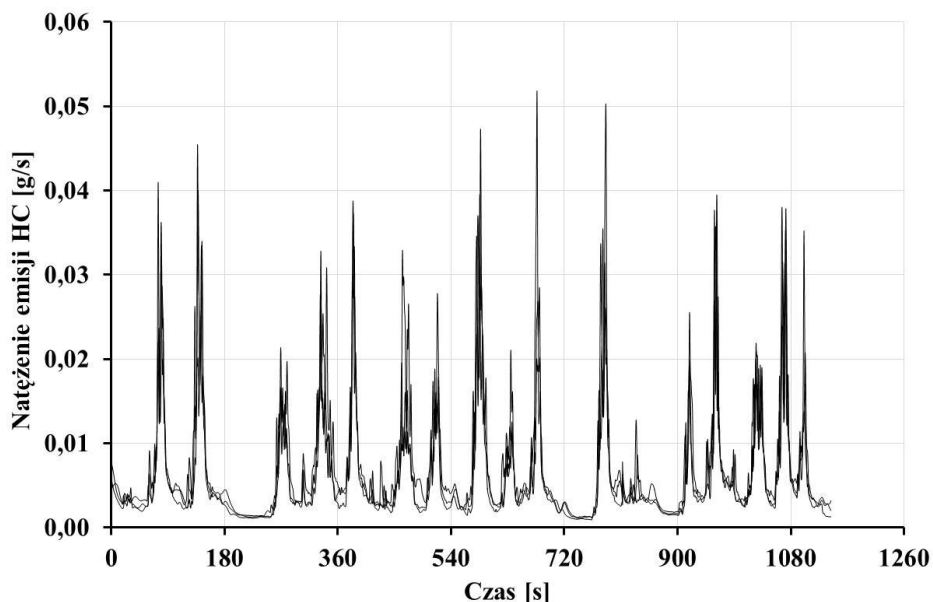
Rys. 8.32. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego

Na rys. 8.32, rys. 8.36, rys. 8.40, rys. 8.44 i rys. 8.48 przedstawiono natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji kolejnych testów syntetycznych na hamowni podwoziowej. Podobnie jak w przypadku przedstawionych już wartości natężeń emisji dwutlenku węgla, każdy z testów został odtworzony trzykrotnie lub czterokrotnie, przy czym przebiegi natężenia emisji z powtarzanych przejazdów zostały przedstawione na wspólnych wykresach dla zobrazowania powtarzalności wyników pomiaru. Wartości szczytowe natężenia emisji oscylują w trakcie realizacji przebiegu między 0,05 a 0,25 g/s, a największa zarejestrowana wartość wynosi około 0,8 g/s. Okresy pracy pojazdu na biegu jałowym są już mniej wyraźne do zaobserwowania niż w przypadku emisji dwutlenku węgla, a ich wartości są znacznie bliższe zeru. W zarejestrowanym przebiegu natężenia emisji tlenku węgla można zaobserwować ogólną zbieżność nałożonych na siebie przebiegów, jednak jest ona wyraźnie mniejsza niż było to w przypadku przebiegu dwutlenku węgla.



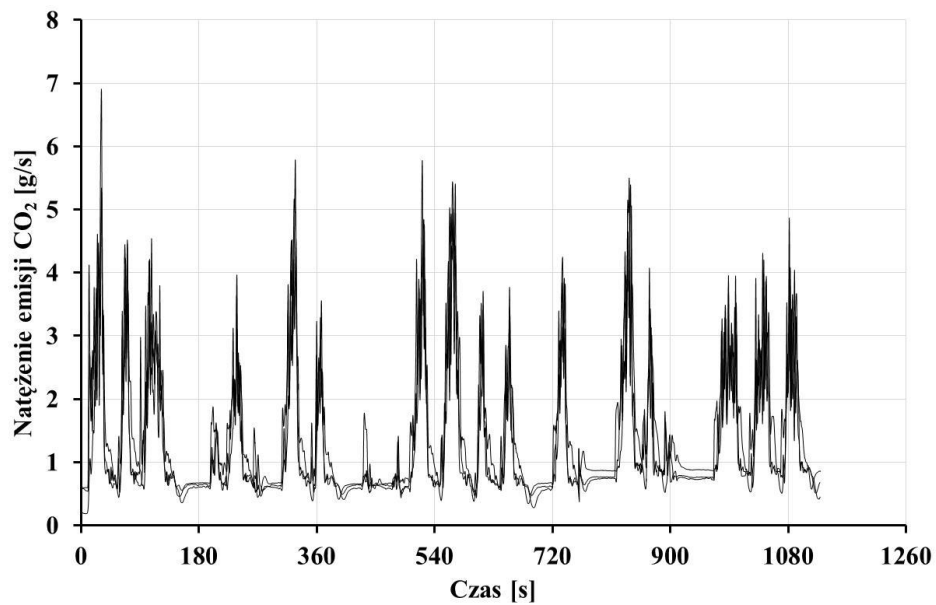
Rys. 8.33. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego

Na rys. 8.33, rys. 8.37, rys. 8.41, rys. 8.45 i rys. 8.49 przedstawiono przebiegi natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji kolejnych testów syntetycznych na hamowni podwoziowej. Podobnie jak w przypadku przedstawionych już wartości natężeń emisji tlenku i dwutlenku węgla, każdy z testów został odtworzony trzykrotnie lub czterokrotnie, przy czym przebiegi natężenia emisji z powtarzanych przejazdów zostały przedstawione na wspólnych wykresach dla zobrazowania powtarzalności wyników pomiaru. Wartości szczytowe natężenia emisji oscylują w trakcie realizacji przebiegu między 0,01 a 0,06 g/s, a największa zarejestrowana wartość wynosi około 0,12 g/s. Momenty pracy silnika na biegu jałowym można zaobserwować bardzo wyraźnie. Natężenie emisji jest wtedy najbliższe zeru. W zarejestrowanym przebiegu natężenia emisji tlenków azotu można zaobserwować znacznie większą niż w przypadku emisji tlenku węgla zbieżność nałożonych na siebie przebiegów, podobnie jak w przypadku przebiegu natężenia emisji dwutlenku węgla.

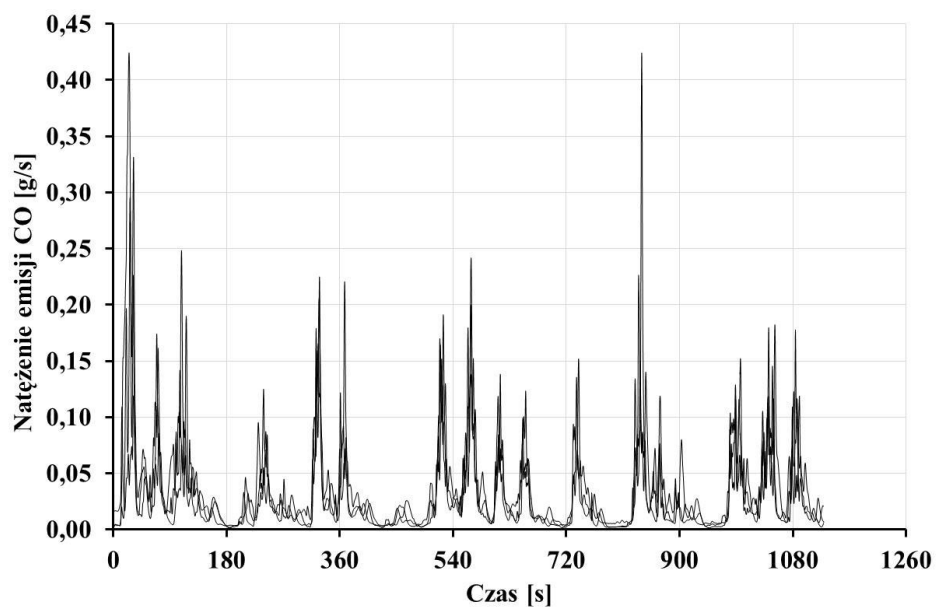


Rys. 8.34. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego

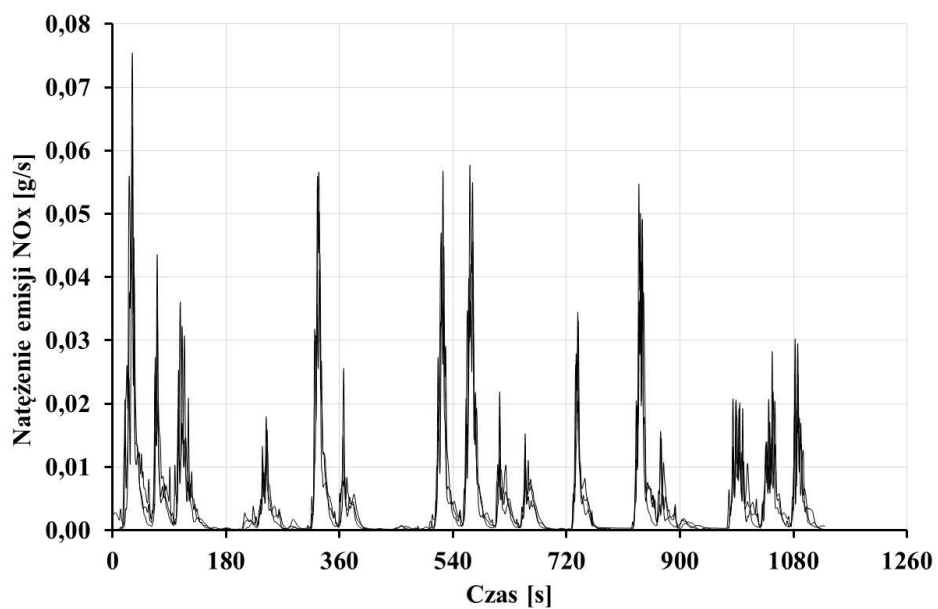
Na rys. 8.34, rys. 8.38, rys. 8.42, rys. 8.46 i rys. 8.50 przedstawiono przebiegi natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji kolejnych testów syntetycznych na hamowni podwoziowej. Podobnie jak w przypadku przedstawionych już wartości natężeń emisji tlenu i dwutlenku węgla oraz tlenków azotu, każdy z testów został odtworzony trzykrotnie lub czterokrotnie, przy czym przebiegi natężenia emisji z powtarzanych przejazdów zostały przedstawione na wspólnych wykresach dla zobrazowania powtarzalności wyników pomiaru. Wartości szczytowe natężenia emisji oscylują w trakcie realizacji przebiegu między 0,01 a 0,06 g/s, a największa zarejestrowana wartość wynosi około 0,11 g/s. Momenty pracy silnika na biegu jałowym są łatwe do odróżnienia, jednak widocznie mniej wyraźnie niż w przypadku wykresów przebiegu natężenia emisji dwutlenku węgla czy tlenków azotu. Natężenie emisji oscyluje wtedy na poziomie około 0,03 g/s. W zarejestrowanych przebiegach natężenia emisji węglowodorów można zaobserwować ogólną zbieżność nałożonych na siebie przebiegów realizacji tego samego testu, jednak są także widoczne różnice we fragmentach jednej z realizacji przebiegu testu syntetycznego nr 4 oraz jednego przebiegu testu syntetycznego nr 5 w trakcie pracy silnika na biegu jałowym.



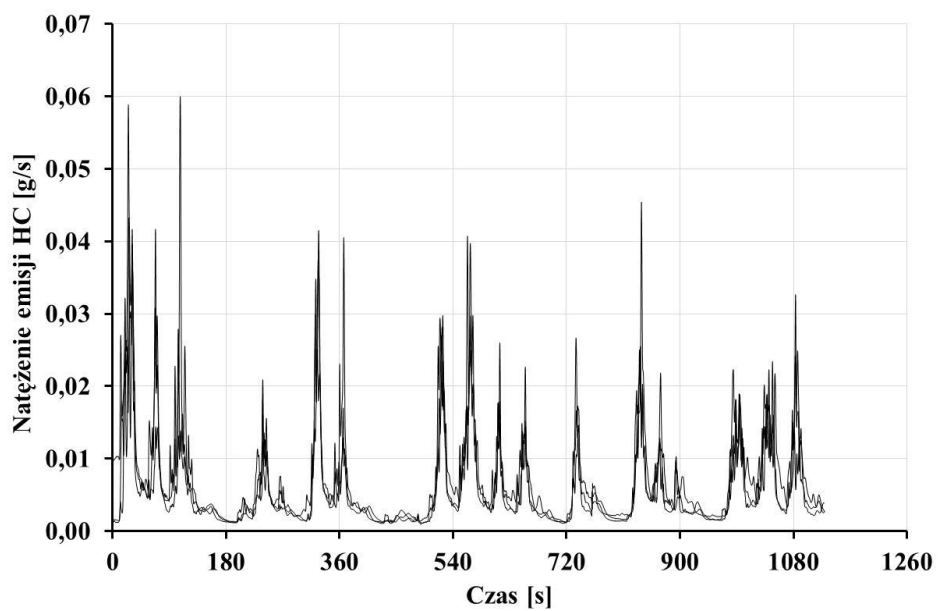
Rys. 8.35. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego



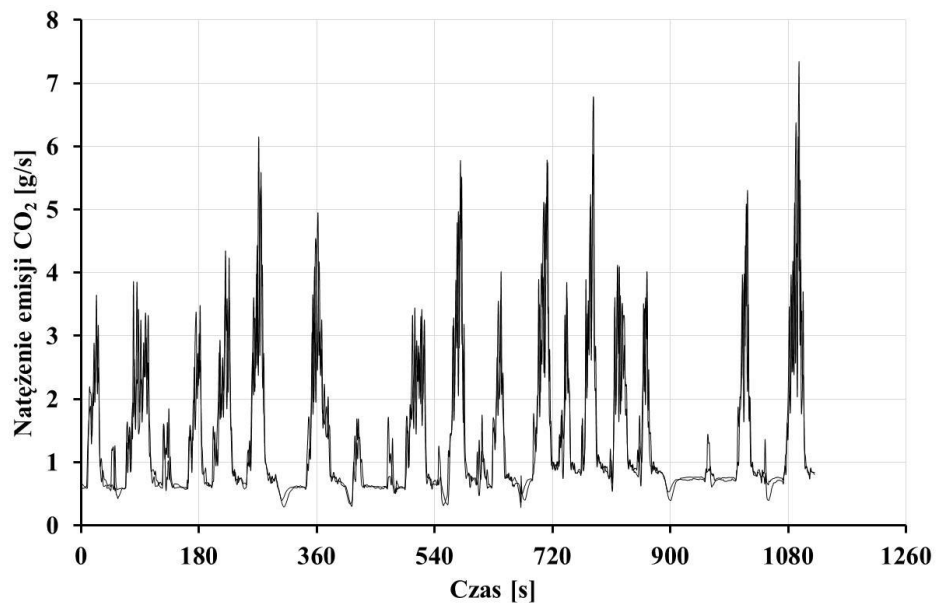
Rys. 8.36. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego



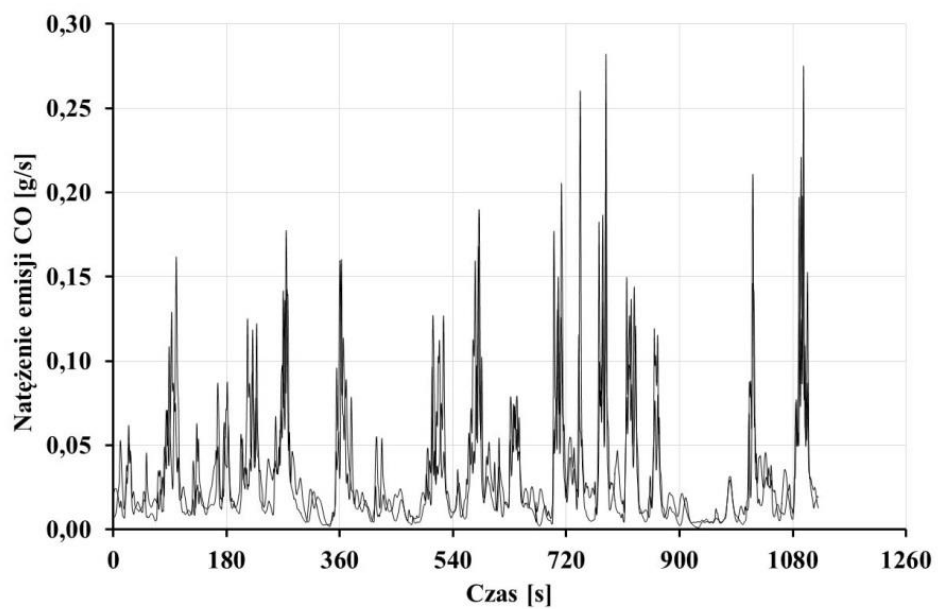
Rys. 8.37. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego



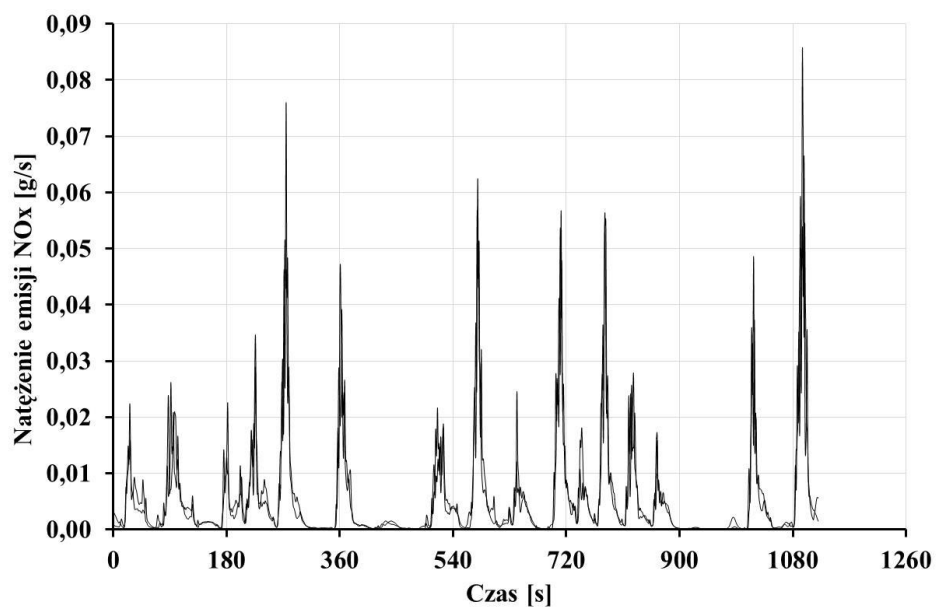
Rys. 8.38. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego



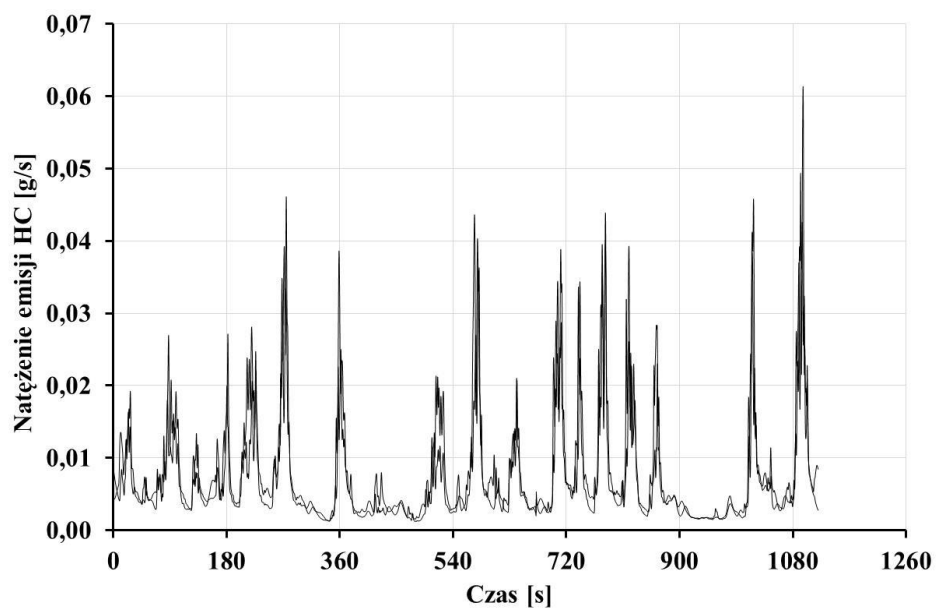
Rys. 8.39. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego



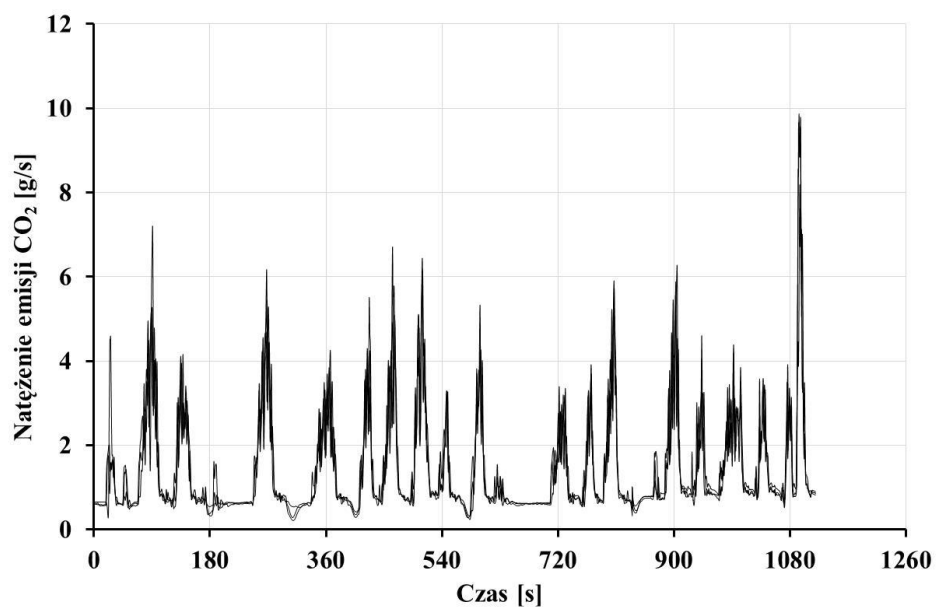
Rys. 8.40. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego



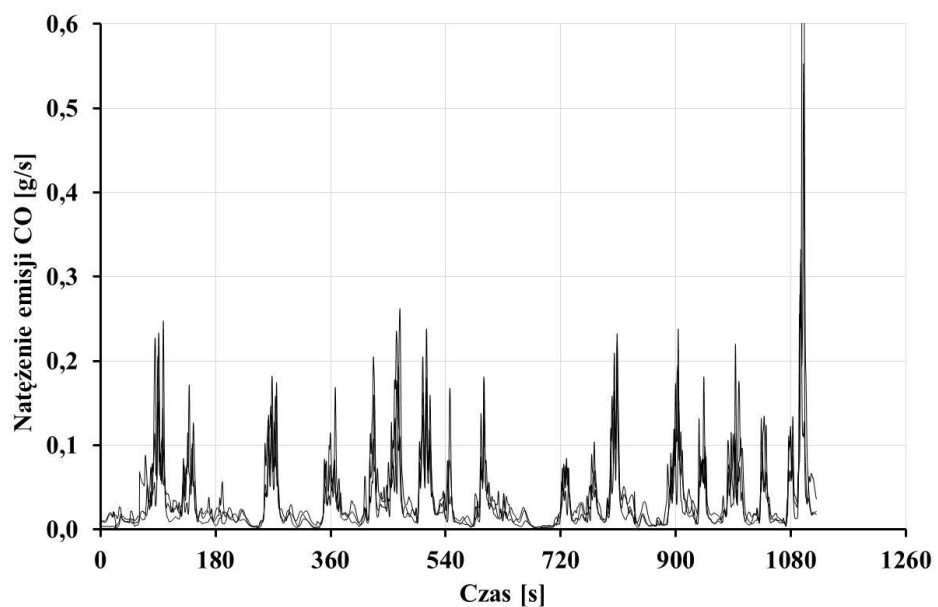
Rys. 8.41. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego



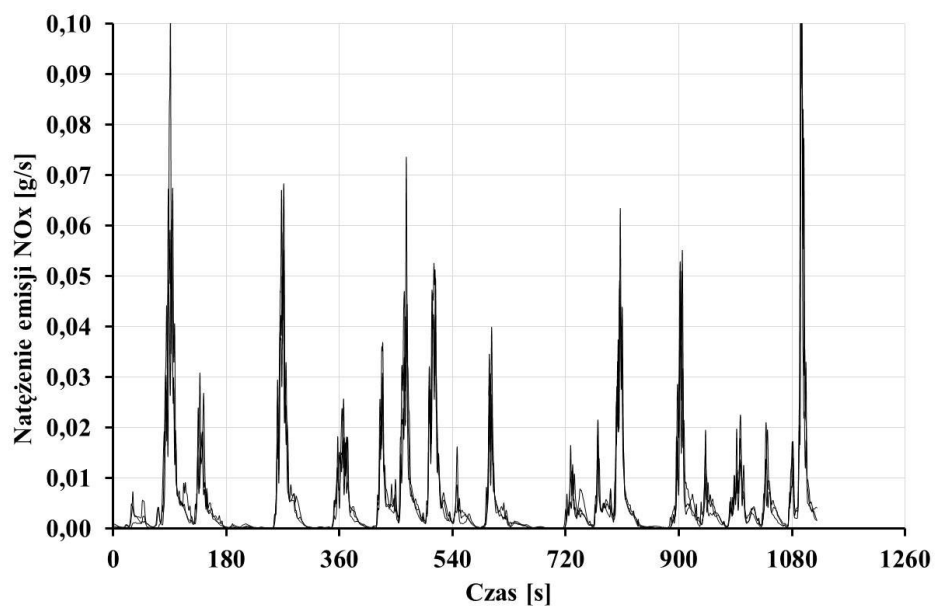
Rys. 8.42. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego



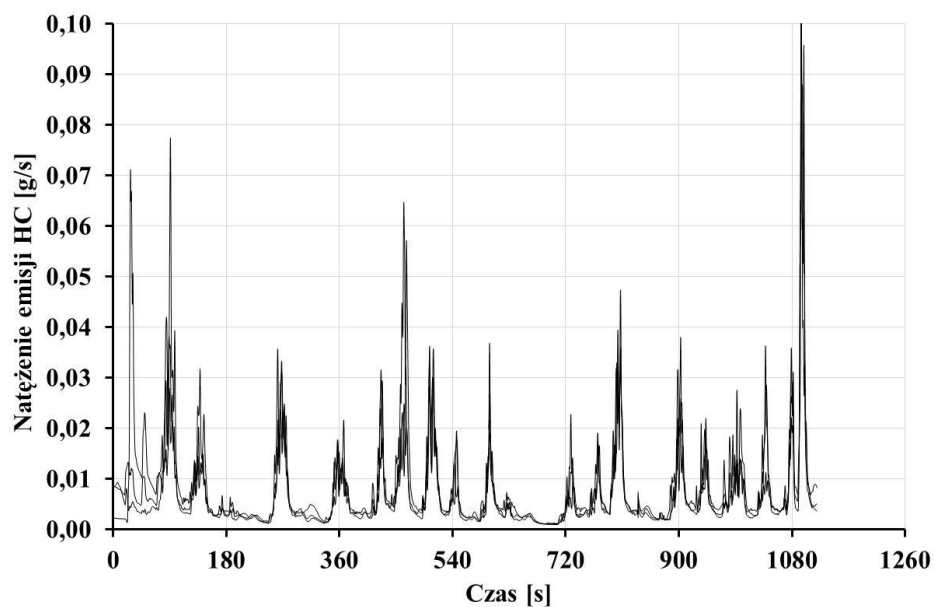
Rys. 8.43. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego



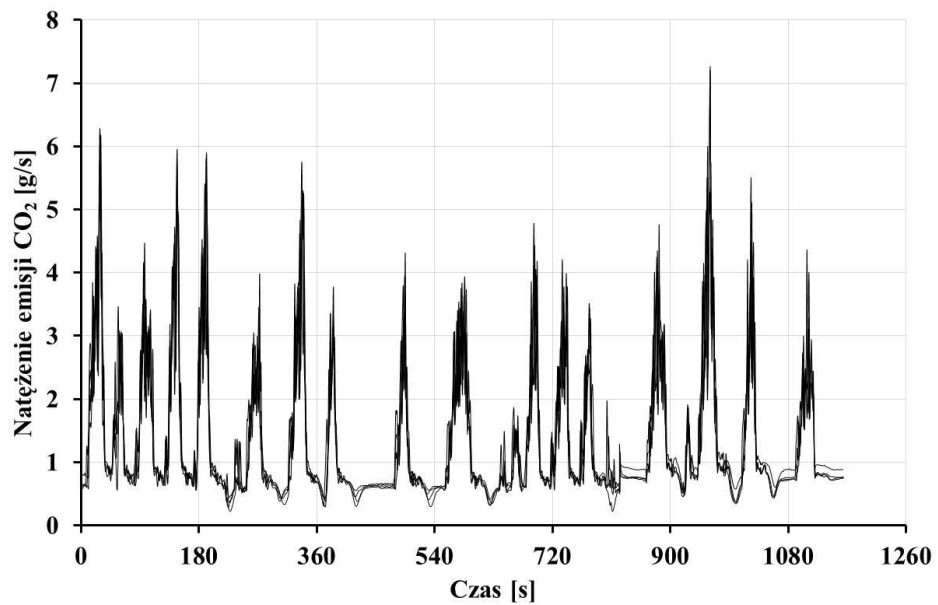
Rys. 8.44. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego



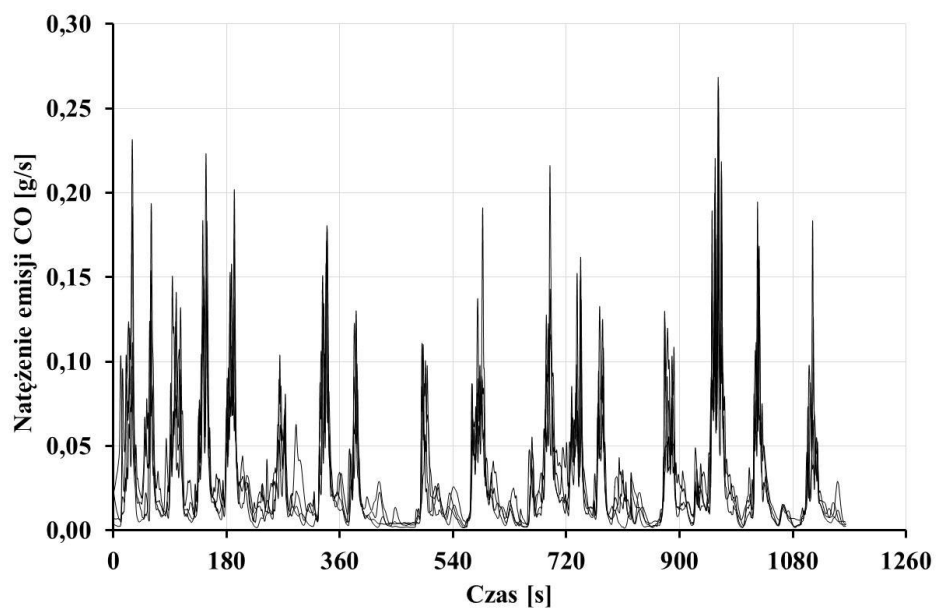
Rys. 8.45. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego



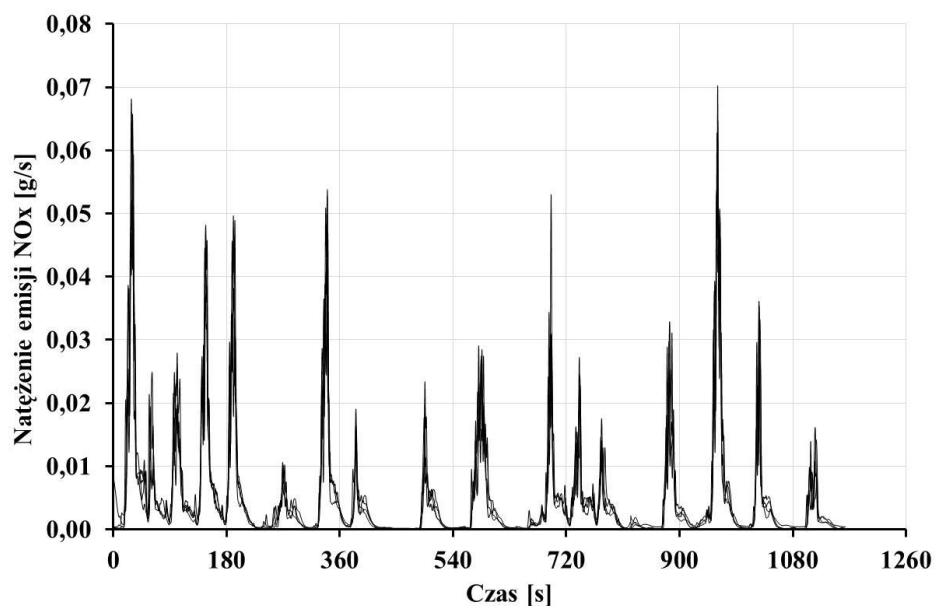
Rys. 8.46. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego



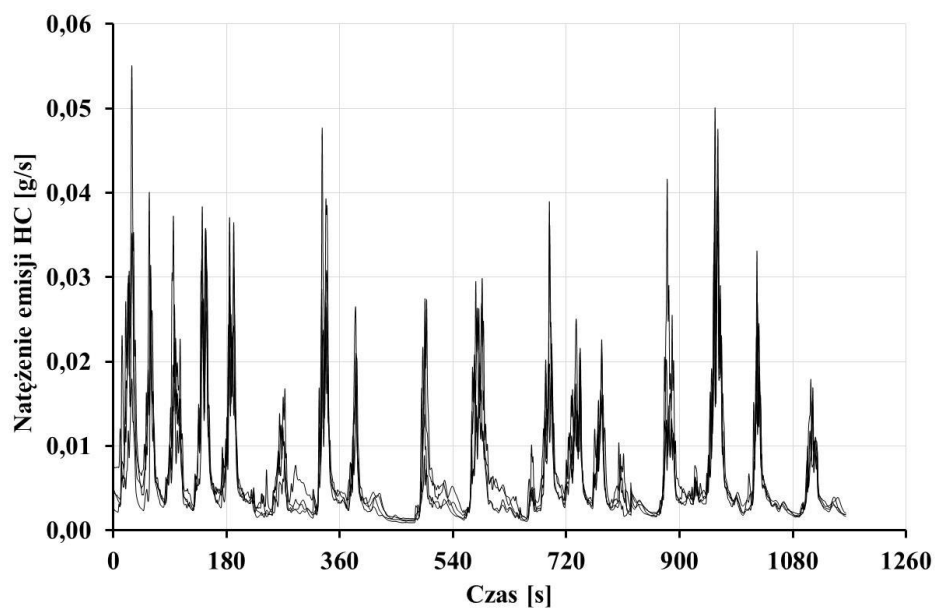
Rys. 8.47. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego



Rys. 8.48. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego



Rys. 8.49. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego



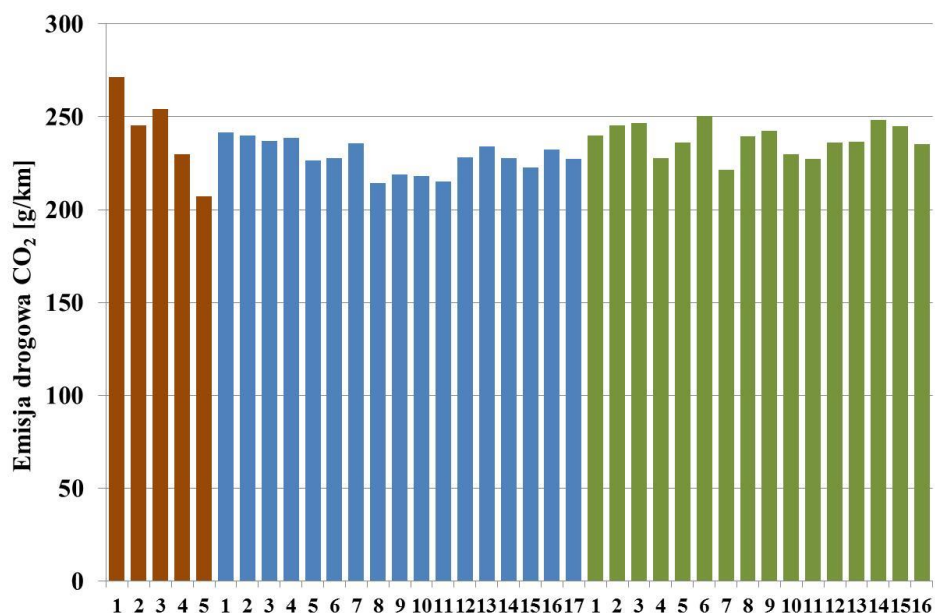
Rys. 8.50. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego

8.4. Dyskusja wyników badań stanowiskowych i eksploatacyjnych

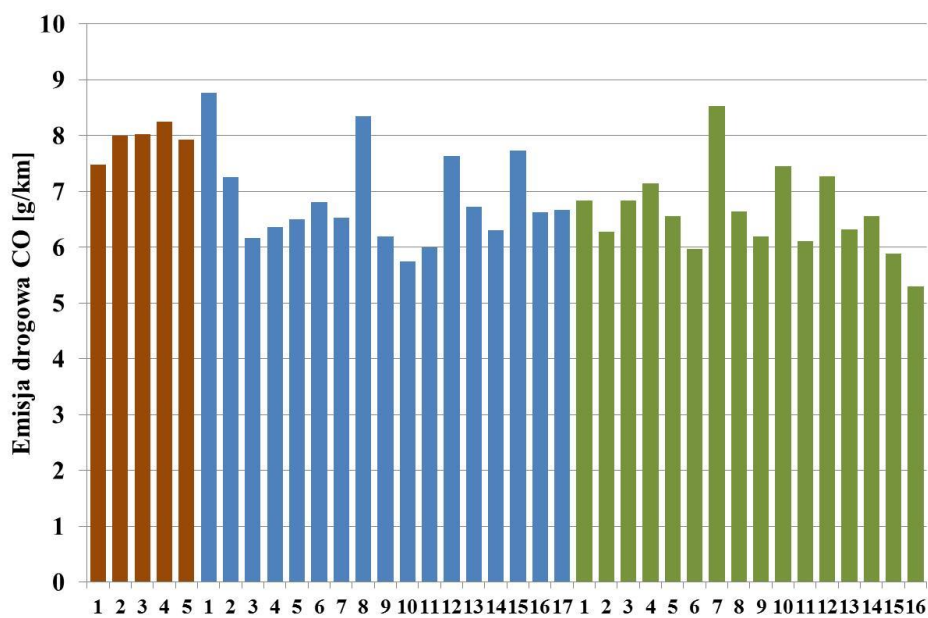
W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione wyniki badań eksperymentalnych mających na celu weryfikację autorskiej metody syntezy testów jezdnych.

8.4.1. Wyniki badań

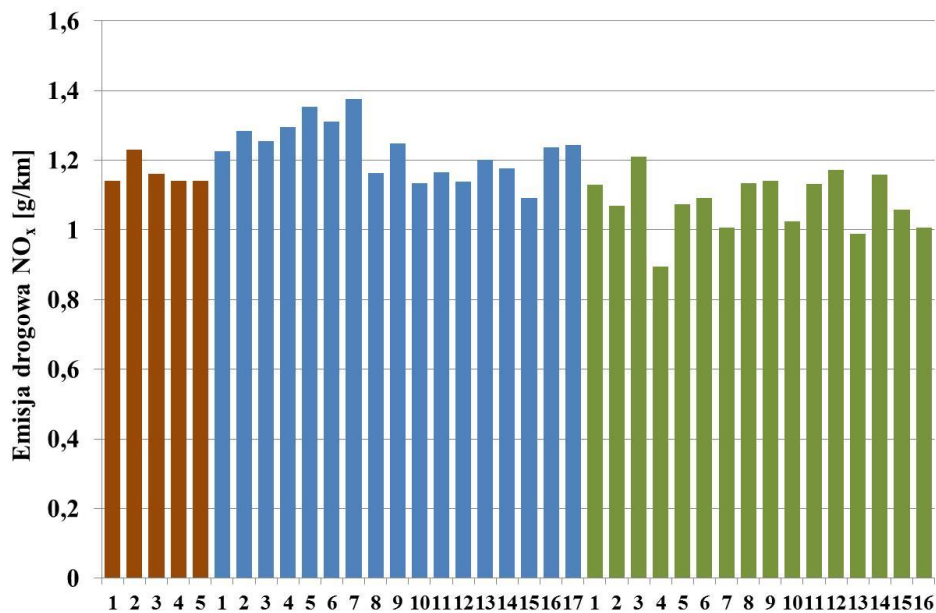
Na rys. 8.51–8.54 przedstawiono zestawienie średnich wartości emisji drogowej CO₂, CO, NO_x i HC we wszystkich zrealizowanych testach. Kolorem czerwonym oznaczono emisje drogowe podczas przejazdów w ruchu drogowym, opisane w rozdziale 7. Są to wartości zarejestrowane przy wykorzystaniu analizatora mobilnego Semtech. Kolorem niebieskim oznaczono średnie wartości emisji drogowej w testach „bezpośrednich” reprezentujących rzeczywiste przejazdy drogowe. Kolor zielony dotyczy średniej emisji drogowej w autorskich testach syntetycznych. Każdy z pięciu testów „bezpośrednich” i syntetycznych, odpowiadających pięciu przejazdom w warunkach drogowych, był wykonany na hamowni podwoziowej trzykrotnie lub czterokrotnie, w celu zapewnienia powtarzalności wyników. Stąd ilość tych testów jest odpowiednio większa od ilości testów drogowych.



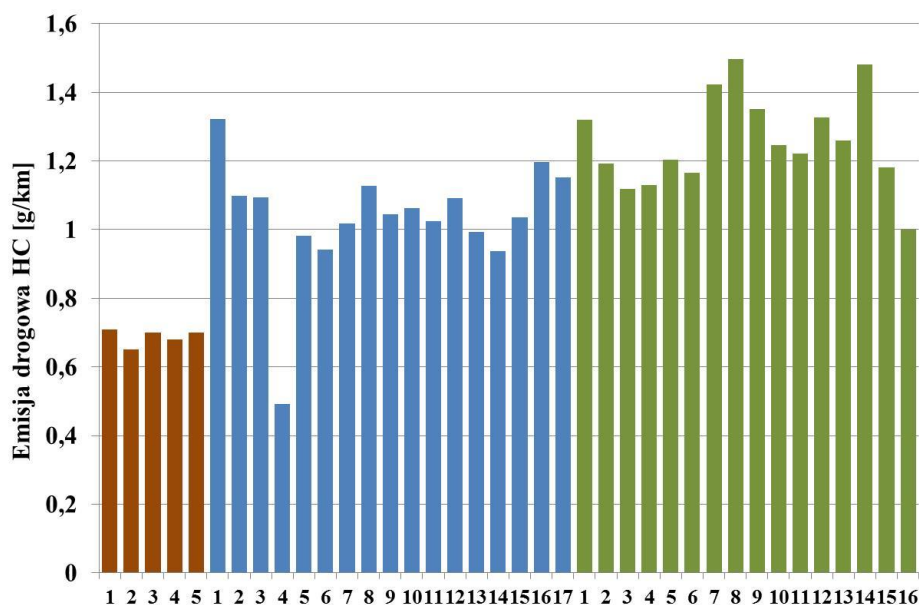
Rys. 8.51. Emisja drogowa dwutlenku węgla podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)



Rys. 8.52. Emisja drogowa tlenku węgla podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)



Rys. 8.53. Emisja drogowa tlenków azotu podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)



Rys. 8.54. Emisja drogowa węglowodorów podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)

8.4.2. Koncepcja weryfikacji metody syntezy testów jezdnych

Przedmiotem analizy jest zgodność wyników średniej emisji poszczególnych składników spalin w testach drogowych oraz w testach syntetycznych realizowanych na hamowni podwoziowej. Trzeba jednak zauważyć, że testy drogowe i testy syntetyczne różniły się szeregiem czynników, charakteryzujących warunki badań. Podstawowymi różnicami były: odmienny charakter ruchu w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych oraz współpraca kół samochodu z nawierzchnią drogową (w przypadku badań drogowych) lub z rolkami hamowni (w przypadku testów syntetycznych). Należy ponadto podkreślić fakt, że do badań emisji spalin została wykorzystana różna aparatura pomiarowa, opisana w podrozdziale 7 oraz 8.1, a badania były wykonywane w różnych warunkach atmosferycznych. Dlatego istotnym jest aby ocenić, czy ewentualne rozbieżności pomiędzy wynikami z badań drogowych i z testów syntetycznych wynikają z niedoskonałości metody, czy też występują inne przyczyny niezależne.

W celu odpowiedzi na to pytanie dodatkowo wykonano serię badań w warunkach laboratoryjnych „bezpośrednich”, które odzwierciedlały przebieg prędkości zarejestrowany na drodze. Pomiedzy warunkami badań w tej grupie pomiarów, a warunkami w badaniach drogowych występowały między innymi

różnice: odmienny charakter ruchu na drodze i na hamowni, inna współpraca kół jezdnych z podłożem, różna aparatura pomiarowa emisji spalin. Jednak przebieg prędkości jazdy nie różnił się. Wprowadzenie dodatkowej grupy badań „bezpośrednich” pozwoliło więc na oszacowanie, czy ewentualne różnice między badaniami drogowymi, a testami syntetycznymi wynikają z niedoskonałości metody syntezy testu laboratoryjnego, czy z innych przyczyn.

Dyskusja wyników badań będzie koncentrowała się na ocenie, czy istnieją istotne, z punktu widzenia statystycznego, różnice pomiędzy wynikami badań drogowych, „bezpośrednich” i syntetycznych.

Powyższa analiza została przeprowadzona oddzielnie dla każdego mierzonego składnika spalin. Rozważano przyczyny istniejących różnic oraz wyciągano wnioski dotyczące oceny prezentowanej metody syntezy testów jezdnych.

8.4.3. Test istotności statystycznej

Podstawowym narzędziem służącym do oceny zgodności pomiędzy poszczególnymi grupami badań były wykresy z zaznaczonymi przedziałami ufności dla przyjętego poziomu istotności równego 0,05. Zdefiniowany w ten sposób przedział ufności oznacza taki zakres wartości emisji drogowej rozpatrywanego składnika spalin, dla którego prawdopodobieństwo występowania wartości rzeczywistej w danym zakresie wynosi 0,95. Porównanie wartości średnich emisji z danej grupy badań wraz z ich przedziałami ufności pozwoliło na wstępną analizę pokrywania się przedziałów ufności [67, 70].

Oprócz graficznego zestawienia i porównania wyników, przeprowadzono także test istotności statystycznej. Przed wyborem testu przeprowadzono analizę zgodności rozkładu z rozkładem normalnym stosując test W Shapiro-Wilka. Na jego podstawie stwierdzono, że rozkład nie jest rozkładem normalnym, w związku z czym do oceny zgodności statystycznej zastosowano test U Manna-Whitneya, będący testem nieparametrycznym. Wyniki testu istotności statystycznej dla poszczególnych składników emisji przedstawiono w tab. 8.1–8.4. Kolorem zielonym zaznaczono wyniki spełniające warunki testu U Manna-Whitneya, czyli takie dla których nie istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy o braku istotnych różnic pomiędzy wynikami [26]. Kolorem czerwonym oznaczono wyniki, dla których takie podstawy istnieją, natomiast kolorem niebieskim wyniki leżące na granicy przedziału. U_{min} oraz U_{maks} to wartości odpowiednio dolnego i górnego przedziału zgodności.

Tab. 8.1. Wyniki testu U Manna-Whitneya dla dwutlenku węgla

	Drogowy - „bezpośredni”	Drogowy - syntetyczny
Wynik testu	24	32
$U_{\min}$	18	16
$U_{\max}$	67	64

Tab. 8.2. Wyniki testu U Manna-Whitneya dla tlenku węgla

	Drogowy - „bezpośredni”	Drogowy - syntetyczny
Wynik testu	12	5
$U_{\min}$	18	16
$U_{\max}$	67	64

Tab. 8.3. Wyniki testu U Manna-Whitneya dla tlenków azotu

	Drogowy - „bezpośredni”	Drogowy - syntetyczny
Wynik testu	65	14
$U_{\min}$	18	16
$U_{\max}$	67	64

Tab. 8.4. Wyniki testu U Manna-Whitneya dla węglowodorów

	Drogowy - „bezpośredni”	Drogowy - syntetyczny
Wynik testu	80	80
$U_{\min}$	18	16
$U_{\max}$	67	64

8.4.4. Dyskusja wyników badań

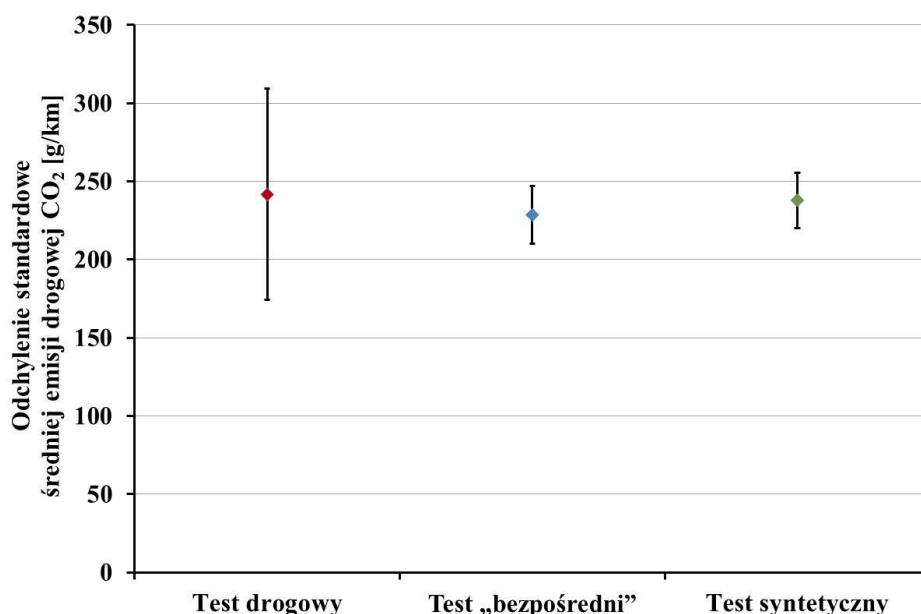
W niniejszym podrozdziale zostaną przedstawione porównania wartości średnich, przedziałów ufności oraz wyniki testu istotności statystycznej i ich porównanie z wartościami krytycznymi wraz z interpretacją otrzymanych rezultatów. Informacje te będą omówione oddzielnie dla każdego mierzonego składnika spalin.

Emisja drogowa dwutlenku węgla

Emisja dwutlenku węgla jest bardzo ważnym elementem analizy wyników badań, ponieważ ten składnik spalin uznaje się za najbardziej reprezentatywny wskaźnik informujący o pracy silnika spalinowego. Wiąże się to ze stosunkowo

dużą powtarzalnością obserwacji tej wielkości fizycznej w czasie badań eksploatacyjnych w różnych warunkach.

Na rys. 8.55 przedstawiono wartości średnie i przedziały ufności (przy poziomie istotności 0,05) dla emisji drogowej dwutlenku węgla, odpowiednio dla: badań drogowych, laboratoryjnych badań na hamowni podwoziowej „bezpośrednich” i syntetycznych.



Rys. 8.55. Parametry statystyczne emisji drogowej dwutlenku węgla podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)

Przedziały ufności wyników pomiarów z badań „bezpośrednich” i z testów syntetycznych mieszczą się w całości w przedziale ufności otrzymanym z badań drogowych. Niestety, informacja ta jest mało użyteczna ze względu na fakt, że przedział ufności dla wyników badań drogowych jest znacząco większy w porównaniu z badaniami laboratoryjnymi. Warto więc zwrócić uwagę na same wartości średnie poszczególnych grup wyników. Różnice względne pomiędzy wartościami średnimi z badań laboratoryjnych i pomiarów drogowych wynoszą odpowiednio: 5,4% dla badań „bezpośrednich” i 1,5% dla testów syntetycznych. Są to stosunkowo niewielkie wartości, szczególnie w przypadku badań syntetycznych. Daje to podstawy do wyciągnięcia wniosku o ogólnej zgodności pomiędzy obserwacjami, zwłaszcza pomiarami drogowymi i testami syntetycznymi.

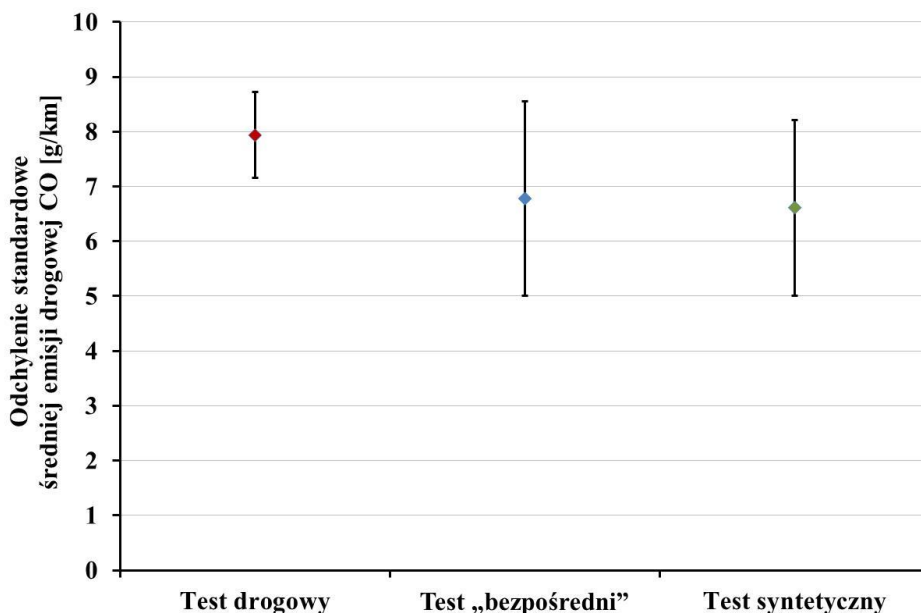
Wyniki testu istotności potwierdzają powyższe przypuszczenie. Test Manna-Witneya wykazał, że na poziomie istotności 0,05 nie istnieją podstawy do

odrzućcenia hipotezy o braku istotnych różnic pomiędzy wynikami testów drogowych i syntetycznych. Jest to kluczowa informacja, upoważniająca do przyjęcia hipotezy o zgodności testów drogowych i syntetycznych dla najważniejszego składnika spalin.

Nie istnieją także podstawy statystyczne do odrzucenia hipotezy o braku istotnych różnic pomiędzy testami drogowymi i badaniami „bezpośrednimi” [26].

Emisja drogowa tlenku węgla

Na rys. 8.56 przedstawiono wartości średnie i przedziały ufności (przy poziomie istotności 0,05) dla emisji drogowej tlenku węgla, odpowiednio dla: badań drogowych, badań „bezpośrednich” i testów syntetycznych.



Rys. 8.56. Parametry statystyczne emisji drogowej tlenku węgla podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)

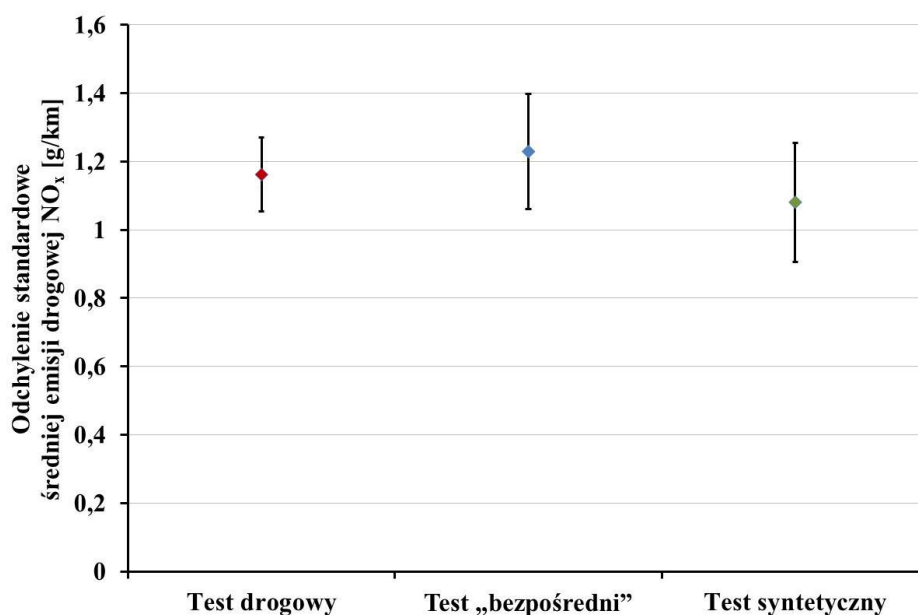
Jak widać, w tym przypadku obserwacje zebrane w czasie badań laboratoryjnych wiążą się z wyraźnie większym przedziałem ufności. Przedziały te w zasadniczej części pokrywają się – to znaczy, że ich część wspólna niemal całkowicie pokrywa się z przedziałem ufności dla badań drogowych. Jednak zwracając uwagę na położenie wartości średnich, widoczna jest wyraźna rozbieżność pomiędzy badaniami drogowymi i laboratoryjnymi oraz zgodność w obrębie samych badań laboratoryjnych („bezpośrednich” i syntetycznych).

Powyższe spostrzeżenie prowadzi do wniosku, że chociaż testy syntetyczne różnią się od testów drogowych, to przyczyną tej różnicy jest w głównej mierze rozbieżność pomiędzy warunkami panującymi na drodze i w laboratorium. Zastąpienie rzeczywistego przebiegu prędkości przebiegiem syntetycznym, według testu statystycznego, nie wprowadza istotnych zmian.

Wnioski te znajdują poparcie również w teście istotności statystycznej, który wskazuje podstawy do odrzucenia hipotezy o braku istotnych różnic pomiędzy wynikami badań drogowych i syntetycznych oraz drogowych i „bezpośrednich”.

Emisja drogowa tlenków azotu

Na rys. 8.57 przedstawiono wartości średnie i przedziały ufności (przy poziomie istotności 0,05) dla emisji drogowej tlenków azotu, odpowiednio dla: badań drogowych, badań „bezpośrednich” i testów syntetycznych.



Rys. 8.57. Parametry statystyczne emisji drogowej tlenków azotu podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)

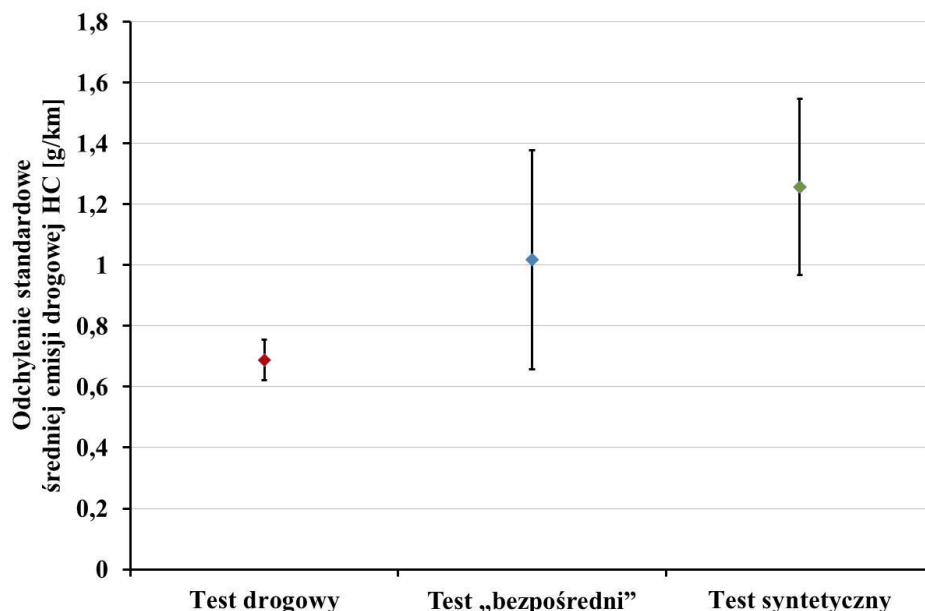
Przedziały ufności są porównywalne w przypadku wszystkich trzech grup badań i w dużej mierze pokrywają się. Jednak położenie wartości średnich jest dość specyficzne. Średnia emisja drogowa tlenków azotu w badaniach „bezpośrednich” była większa niż w badaniach drogowych, natomiast w testach syntetycznych była mniejsza niż w testach „bezpośrednich”. To sprawia, że istnieje pewna różnica pomiędzy średnimi wartościami wyników badań „bezpośrednich” i syntetycznych.

Znajduje to swoje odzwierciedlenie w teście istotności statystycznej. W przypadku porównania zgodności testów drogowych z badaniami „bezpośrednimi” oraz testów drogowych z testami syntetycznymi wartości statystyk znajdowały się w pobliżu wartości krytycznych. Oznacza to, że występują w tym przypadku pewne różnice i jest kwestią sporną, czy są to różnice istotne. Inaczej mówiąc, prawdopodobieństwo popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu błędnej hipotezy o braku istotnych różnic waha się w granicach 0,05. Natomiast istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy o braku istotnych różnic pomiędzy badaniami „bezpośrednimi” i testami syntetycznymi.

W ramach próby wyjaśnienia przyczyn takiego stanu rzeczy można odwołać się do wniosku płynącego z analizy emisji dwutlenku węgla. Zastąpienie rzeczywistego przebiegu prędkości przebiegiem syntetycznym powodowało niewielkie zmiany w pracy silnika spalinowego. Ta zmiana może wpływać również na emisję tlenków azotu. Należy też podkreślić, że w przypadku testów syntetycznych średnia emisja drogowa tlenków azotu była mniejsza. Tlenki azotu powstają w silniku w sytuacji nadwyżki powietrza połączonej z wysoką temperaturą. Taki stan może występować na przykład podczas jazdy ze stałą, dużą prędkością. Przeprowadzona analiza testów syntetycznych pod tym kątem wykazała, że parametry metody syntezy były dobrane w taki sposób, aby ograniczać występowanie w teście syntetycznym tych fragmentów przebiegu prędkości, które w warunkach drogowych występowały stosunkowo rzadko. Wśród nich znalazły się w dużej mierze fragmenty charakteryzujące się dużą, stałą prędkością jazdy. Można więc przypuszczać, że zmiana doboru parametrów sterujących programem syntezy powinna doprowadzić do uwzględniania brakujących fragmentów ruchu i eliminacji przedstawianego problemu.

Emisja drogowa węglowodorów

Na rys. 8.58 przedstawiono wartości średnie i przedziały ufności (przy poziomie istotności 0,05) dla emisji drogowej węglowodorów, odpowiednio dla: badań drogowych, badań „bezpośrednich” i testów syntetycznych.



Rys. 8.58. Parametry statystyczne emisji drogowej węglowodorów podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)

Na powyższym wykresie widoczne są duże różnice pomiędzy wynikami badań drogowych i laboratoryjnych oraz mniejsza różnica pomiędzy badaniami „bezpośrednimi” i testami syntetycznymi. Te obserwacje pokrywają się także z wnioskami płynącymi z testu istotności statystycznej Manna-Whitneya. Dla wszystkich par zbiorów, wartości statystyk testowych pokrywają się z obszarem krytycznym, a więc istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy o braku istotnych różnic pomiędzy rozpatrywanymi grupami obserwacji. Przy czym wartości statystyk testowych odpowiadających porównaniu badań drogowych i laboratoryjnych są oddalone od wartości krytycznych, co oznacza wyraźnie mniejsze prawdopodobieństwo popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu błędnej hipotezy o braku istotnych różnic.

W celu wyjaśnienia powyższej sytuacji, należy zwrócić uwagę na różne właściwości analizatorów spalin wykorzystanych podczas badań drogowych i badań laboratoryjnych. W przypadku testów drogowych użyto wbudowanego w mobilne urządzenie pomiarowe PEMS analizatora wykorzystującego promieniowanie podczerwone, stosunkowo mało dokładnego w przypadku pomiaru emisji cząstek węgla, z powodu rejestrowania przepływu jedynie niektórych związków węglowodorów. Natomiast w przypadku badań laboratoryjnych użyto analizatora typu FID, który wykazuje się dużą dokładnością pomiaru rejestrując rzeczywiste i wiarygodne wartości emisji związków węgla. W efekcie rejestrowane wartości drogowe natężenia emisji

węglowodorów są proporcjonalnie mniejsze niż wartości rejestrowane w badaniach laboratoryjnych.

Przedstawione wyniki emisji drogowej poszczególnych składników spalin oraz wyniki testu statystycznego dotyczą badań weryfikacyjnych metody syntezy testu powstałego na bazie przejazdów drogowych. Należy pamiętać, że emisja drogowa podczas ruchu pojazdu w mieście jest zmienna w zależności od warunków panujących na drodze. Kolejne przejazdy podczas badania emisji drogowej w ruchu rzeczywistym nie mogą zatem wykazywać stuprocentowej powtarzalności, a testy laboratoryjne reprezentujące takie warunki ruchu drogowego, mające zapewnić pewien stopień losowości i odzwierciedlenia warunków drogowych, również nie mogą być identyczne. Podczas porównania wyników w teście istotności nie jest zatem sprawą najważniejszą, czy wszystkie wyniki zostały sklasyfikowane jako statystycznie istotne, a ważne jest, aby wyniki porównania testu drogowego z syntetycznym były tak samo sklasyfikowane jak wyniki testu drogowego z bezpośrednim. Świadczy to bowiem o poprawności działania samego algorytmu metody syntezy. Błędem byłoby, gdyby wynik testu istotności porównania emisji drogowej w teście drogowym i syntetycznym był inny niż drogowym i bezpośrednim, natomiast sam fakt braku zgodności niektórych przypadków w teście Manna-Whitneya, będącego testem rygorystycznym, został wyjaśniony różnego rodzaju przyczynami technicznymi. Zachowanie zgodności nawet w obrębie wyników niespełniających warunki testu statystycznego jest również informacją świadczącą o poprawności zastosowanej metody. Należy pamiętać również o tym, że zastosowanie opracowanej metody pozwalające na symulację warunków ruchu drogowego w warunkach laboratoryjnych, pozwala na zweryfikowanie zasadniczych rozbieżności wartości emisji z pojazdów jakie często istnieją między deklaracjami producenta, a wynikami badań na hamowni podwoziowej. Pozwala również na określenie emisji drogowej w warunkach symulacji ruchu drogowego danego pojazdu w laboratorium. Do dokładnego wyznaczania wartości emisji substancji toksycznych według obowiązujących przepisów, służą testy homologacyjne.

9. Podsumowanie

Przeprowadzono analizę stanu wiedzy biorąc pod uwagę aktualną literaturę naukową. Stwierdzono, że problem wiarygodnego odwzorowania eksploatacyjnych warunków pracy silnika podczas stanowiskowych pomiarów emisji toksycznych składników spalin jest bardzo aktualny, zwłaszcza w ostatnim okresie, w świetle stosowanych w praktyce przez koncerny motoryzacyjne algorytmów sterowania różnicujących poziom emisji zanieczyszczeń na stanowisku diagnostycznym i w eksploatacji. Oceniono, że właściwym kierunkiem poprawy metod kontroli emisji zanieczyszczeń zgodnym z warunkami eksploatacyjnymi jest, obok zastosowania mobilnych analizatorów spalin, doskonalenie testów jezdnych. W szczególności, rozwój testów jezdnych powinien opierać się na wprowadzeniu czynnika losowego w programowaniu prędkości obrotowej i obciążenia testowanego silnika.

W niniejszej pracy opracowano nową metodę syntezy testów jezdnych polegającą na przenoszeniu do programu testu laboratoryjnego zlinearyzowanych prędkości pojazdu aproksymujących rzeczywiste odcinki jazdy, przy czym spełniony musi być warunek ciągłości funkcji prędkości, a przenoszenie odbywa się w sposób losowy. Dzięki spełnieniu warunków ciągłości zsyntezowanych odcinków, istotną cechą metody jest możliwość losowego wyboru kolejności ich realizacji w teście. Odpowiada to losowemu charakterowi warunków istniejących w ruchu rzeczywistym przy jednoczesnym zachowaniu podobieństwa emisji drogowej zanieczyszczeń.

W pracy zweryfikowano doświadczalnie skuteczność zaproponowanej metody. Wykonano szereg przejazdów na wyznaczonej trasie w ruchu rzeczywistym, rejestrując parametry pracy pojazdu doświadczalnego oraz emisję spalin przy wykorzystaniu mobilnego analizatora. Następnie samochód umieszczono na stanowisku laboratoryjnym i zmierzono emisję spalin za pomocą analizatorów stacjonarnych. Przeprowadzono testy jezdne programowane według rzeczywistego przebiegu prędkości eksploatacyjnej samochodu (tzw. testy „bezpośrednie”) oraz „testy syntetyczne” programowane według autorskiej metody. Stwierdzono istotną zgodność pomiędzy badaniami drogowymi i syntetycznymi. W przypadku pomiaru średniego natężenia emisji dwutlenku węgla, stanowiącego najważniejszy wyznacznik parametrów pracy silnika spalinowego w testach syntetycznych otrzymano wyniki różniące się nie więcej niż o 2,5% w stosunku do testów drogowych. Świadczą one o dobrej dokładności odwzorowania. Średnia emisja drogowa mierzonych szkodliwych składników spalin na hamowni podwoziowej w testach syntetycznych były zgodne z wynikami testów bezpośrednich.

Na podstawie wyników analizy statystycznej potwierdzono zgodność pomiędzy testami syntetycznymi a badaniami drogowymi. Tylko w przypadku tlenku węgla stwierdzono niewielkie różnice emisji drogowej i stanowiskowej.

Ich przyczyną było zastosowanie innej aparatury pomiarowej na drodze i w laboratorium.

Podsumowując całokształt pracy można stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty oraz że przyjęta teza o możliwości zapewnienia istotnej zgodności emisji spalin w warunkach testowych i drogowych została potwierdzona.

Kierunek dalszych badań:

- Na podstawie autorskiego testu emisji spalin można postulować przygotowanie podobnych testów dla innych grup pojazdów, takich jak samochody dostawcze, ciężarowe, specjalne itp.
- Możliwe jest również przygotowanie takich testów dla pojazdów eksploatowanych w specjalnych warunkach np. dla taksówek poruszających się w centrum miasta, autobusów komunikacji miejskiej.
- Zebranie informacji dla grup pojazdów w regionalnych obszarach ruchu, pozwoli na wyznaczenie zbiorczych współczynników emisji, w skali całego kraju.
- Opracowane testy są alternatywą dla testów homologacyjnych RDE (*Real Driving Emission*).

Literatura

- [1] Andrzejewski M., *Wpływ stylu jazdy kierowcy na zużycie paliwa i emisję substancji szkodliwych w spalinach*, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, 2013.
- [2] Badyda A., *Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu*, „Nauka”, 2010 vol. 4, s. 115–125.
- [3] Bari M., Kindzierski W., *Eight-year (2007–2014) trends in ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) and its chemical components in the Capital Region of Alberta*, “Environment International”, 2016 vol. 91, s. 122–132.
- [4] Bebkiewicz K., Chłopek Z., Szczepański K., *Estimating pollutant emission from motor vehicles in the years 2000–2015*, “Combustion Engines”, 2017 vol. 171(4), s. 62–67.
- [5] Bielaczyc P., Szczotka A., Woodburn J., *Exhaust emissions of particulate matter from light-duty vehicles – an overview and the current situation*, “Combustion Engines”, 2017 vol. 171(4), s. 227–238.
- [6] Bielaczyc P., *O badaniach emisji związków szkodliwych spalin z silników samochodowych w warunkach trakcyjnych metodą RDE (PEMS)*, „Przegląd Techniczny”, 2016 vol. 24.
- [7] Bocheńska A., Bocheński C., *Badania wpływu zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku i stopnia recyrkulacji spalin na toksyczność spalin i zużycie paliwa silnika o zapłonie samoczynnym*, „MOTROL”, 2005 vol. 7, s. 15–23.
- [8] Brzozowska L., *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Bielsko Biała, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej, 2015.
- [9] Cernej A., Dobovisek Z., Jankowski A., *Fundamental Study on NO_x Emission Abated by Flue Gas Recirculation*, “Journal of Polish CIMAC”, 1994 vol. 1, s. 51–63.
- [10] Chłopek Z., Biedrzycki J., Lasocki J., Wójcik P., *Investigation of the motion of motor vehicles in Polish conditions*, “The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji”, 2013 vol. 60(2), s. 3–20.
- [11] Chłopek Z., Biedrzycki J., Lasocki J., Wójcik P., *Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zapłonie iskrowym*, Sprawozdanie z pracy N N509 556440, Warszawa 2013.
- [12] Chłopek Z., Lasocki J., *Correlation investigations into pollutant emissions and the operational states of compression-ignition engines in dynamic tests*, “Combustion Engines”, 2017 vol. 169(2), s. 87–92.

- [13] Chłopek Z., *Synteza testów jezdnych zgodnie z kryteriami podobieństwa charakterystyk częstotliwościowych*, „Eksplatacja i niezawodność – Maintenance and Reliability”, 2016 vol. 18(4), s. 572–577.
- [14] Chłopek Z., *Analiza korelacji emisji zanieczyszczeń i stanów pracy silnika o zapłonie samoczynnym*, „Archiwum Motoryzacji”, 2015 vol. 68(2), s. 123–139.
- [15] Dąbrowski Z., Dziurdź J., Klekot G., Radkowski S., *Laboratorium podstaw pomiarów wielkości dynamicznych. Część I: Wiadomości podstawowe*, Warszawa, Instytut Podstaw Budowy Maszyn Wydziału SiMR Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [16] Flynn F., *The Inevitability of Engine out NOx Emission from Spark Ignited and Diesel Engines*, “Proceedings of the 28 Symposium on Combustion”, The Combustion Institute, 2000 vol. 28(1), s. 1211–1218.
- [17] Gis W., Merkisz J., Pielecha J., *Investigations of Vehicle Exhaust Emissions with use PEMS*, “World Automotive Congress Fisita” 2010, Paper F2010C087.
- [18] Gladstein, Neandross & Associates, *Ultrafine Particulate Matter and the Benefits of Reducing Particle Numbers in the United States*, MECA 2013.
- [19] Health Effects Institute, *Diesel exhaust: A critical analysis of emissions, exposure and health effects. A Special Report of the Institute's Diesel Working Group*. Cambridge, Great Britain, 1995.
- [20] Hilliard J., Wheeler R., *Nitrogen Dioxide in Engine Exhaust*, SAE Paper 790691, 1979.
- [21] Hyk W., Stojek Z., *Analiza statystyczna w laboratorium*, PWN, 2016.
- [22] Jankowski A., Kowalski M., *Environmental Pollution Caused by a Direct Injection Engine*, “Journal of KONES”, 2015 vol. 22(4), s. 133–138.
- [23] Kalina P., *Wpływ geometrii komory spalania na poziom emisji tlenków azotu silników o zapłonie samoczynnym*, Praca doktorska, Warszawa, Instytut Lotnictwa, 2016.
- [24] Kamys B., *Statystyczne metody opracowania pomiarów I*, Kraków, Instytut Fizyki UJ, Instytut Fizyki UJ, SMOP-I 2014/15, 2015.
- [25] Kędziora Z., Klejnowski L., Turzański L., *Przewodnik technicznej eksploatacji monitoringu jakości powietrza*, Warszawa, Biblioteka Monitoringu Środowiska, 2010.
- [26] Koronacki J., Mielniczuk J., *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.

- [27] Kuranc, A., *Eksploatacyjne badania emisji spalin z wykorzystaniem sygnału z przepływomierza powietrza*, Praca doktorska, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, 2015.
- [28] Kutrzyk A., Filipczyk J., *Określenie poziomu emisji składników spalin dla różnych warunków pracy silnika*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, 2008 vol. 64, s. 167–174.
- [29] Lasocki J., *Ocena cyklu istnienia samochodu ze względu na jego eksploatację*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych 2014.
- [30] Lyons R., *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Warszawa, WKiŁ, 1999.
- [31] Marven C., Ewers G., *Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Warszawa, WKiŁ, 1999.
- [32] Merkisz J., Jacyna M., Andrzejewski M., Pielecha J., Merkisz-Guranowska A., *Prędkość jazdy samochodem a emisja substancji szkodliwych w spalinach*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport: Środki i infrastruktura transportu”, 2013 vol. 98, s. 447–453.
- [33] Merkisz J., Markowski J., Pielecha J., Kozłowski R., Mikutel T., *Badania emisji silnika TWD-10 B/PZL-10s podczas próby silników samolotu PZL M28B Bryza*, „Zeszyty Naukowe WSOWL”, 2011 vol. 4(158), s. 177–184.
- [34] Merkisz J., Pielecha J., Jasiński R., *Ocena emisji spalin pojazdów kategorii Euro 6 w testach drogowych*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej”, 2017 vol. 115, s. 131–144.
- [35] Merkisz J., Pielecha J., Molik P., *Analiza warunków pracy pojazdów w testach homologacyjnych*, „Logistyka”, 2015 vol. 3, s. 3220–3227.
- [36] Merkisz J., Pielecha J., Nowak M., *Emisja zanieczyszczeń z pojazdów w rzeczywistych warunkach ruchu na przykładzie aglomeracji poznańskiej*, „Postępy Nauki i Techniki 15”, 2012 vol 15, s. 103–115.
- [37] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S., *Emisja zanieczyszczeń motoryzacyjnych w świetle nowych przepisów Unii Europejskiej*, Warszawa, WKiŁ, 2012.
- [38] Merkisz J., Rymaniak Ł., *Determining the environmental indicators for vehicles of different categories in relation to CO₂ emission based on road tests*, „Combustion Engines”, 2017 vol. 170(3), s. 66–72.
- [39] Merkisz J., Rymaniak Ł., *Ocena emisji zanieczyszczeń pojazdów w odniesieniu do CO₂ na podstawie badań autobusów miejskich w rzeczywistych warunkach eksploatacji*, Poznań, Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 2017.

- [40] Merkisz J., Rymaniak Ł., *Tests of urban bus specific emissions in terms of currently applicable heavy vehicles operating emission regulations*, "Combustion Engines", 2017 vol. 168(1), s. 21–26.
- [41] Merkisz J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1998.
- [42] Merkisz J., *Emisja dwutlenku węgla z pojazdów z różnymi układami napędowymi w rzeczywistych warunkach eksploatacji*, „Transport Samochodowy”, 2010 vol. 2, s. 115–127.
- [43] Merkisz-Guranowska A., Pielecha J., *Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych a parametry ruchu drogowego*, Warszawa-Poznań, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2014.
- [44] Molik P., Merkisz J., Lijewski P., *Możliwość odwzorowania rzeczywistych warunków pracy silnika na silnikowym stanowisku hamownianym*, „Postępy Nauki i Techniki 14”, 2012 vol. 14, s. 190–196.
- [45] Niewiarowski K., *Tłokowe silniki spalinowe*, Warszawa, WKiŁ, 1983.
- [46] Pielecha J., Merkisz J., Jasiński R., Gis W., *Real Driving Emissions Testing of Vehicles Powered by Compressed Natural Gas*, "Powertrains Fuels and Lubricants", 2015, JSAE 20199011.
- [47] Pielecha J., Merkisz J., Markowski J., Jasiński R., Magdziak A., *Wybrane zagadnienia dotyczące drogowych testów emisyjnych*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 2016 vol. 6, s. 1195–1198.
- [48] Pośniak M., Jankowska E., Szewczyńska M., Zapór L., Brochocka A., Pietrowski P., *Zagrożenia spalinami silników diesla, Inżynieria procesów ograniczania emisji oraz utylizacji gazów szkodliwych i cieplarnianych*, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2010.
- [49] Secretary of State for Transport by Command of Her Majesty, *Vehicle Emission Testing Programme*, Department for Transport, Great Britain, 2016.
- [50] Sher E., *Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines*, Academic Press, 1998.
- [51] Szczepański T., Wiśniowski P., *Typowe zadania realizowane przez silnik spalinowy*, „Transport Samochodowy”, 2017 vol. 1, s. 85–104.
- [52] Ślusarz G., *Ocena emisji gazowych związków szkodliwych w spalinach silnika turbinowego samolotu wielozadaniowego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2016.
- [53] Tutak W., Szwaja S., *The effect of methanol-diesel combustion on performance and emission of a direct injection diesel engine*, "Journal of KONES", 2015 vol. 22(2), s. 259–266.

- [54] United Nations. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, *Proposal for a new global technical regulation on the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)*, Genewa, 2014.
- [55] Wang C., Tu Y., Yu Z., Lu R., *PM2.5 and Cardiovascular Diseases in the Elderly*, "Int. J. Environ. Res. Public Health", 2015 vol. 12(7), s. 8187–8197.
- [56] Wasilewska E., *Statystyka opisowa od podstaw*, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2009.
- [57] Wiśłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D., *Fuel spray parameter analysis for different common-rail injectors*, "World Automotive Congress, Automobiles and Sustainable Mobility", 30.05.2010–4.06.2010, Budapeszt, Węgry, s. 1–8.
- [58] Wiśniowski P., Ślęzak M., Niewczas A., Szczepański T., *Dobór metody filtrowania przebiegu prędkości pojazdu*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, 2017 vol. 9, s. 24–29.
- [59] Wiśniowski W., Kalina P., *Silniki spalinowe w Instytucie Lotnictwa*, „Combustion Engines”, 2015 vol. 3(162).
- [60] Wiśniowski W., *Tunele aerodynamiczne w Polsce na tle tuneli światowych*, „Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa”, 2016 vol. 42.
- [61] Zieliński T., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*, Warszawa, WKŁ, 2005.
- [62] Zoua Y., Jina C., Suc Y., Lid J., Zhua B., *Water soluble and insoluble components of urban PM2.5 and their cytotoxic effects on epithelial cells (A549) in vitro*, Szanghaj, 2016.
- [63] Zydorczyk J., Płonka G., Tyma G., *Teoria sygnałów. Wstęp (teoria, przykłady zadania)*, Gliwice, Helion, 1999.
- [64] Żółtowski A., Taubert S., Wiśniowski P., *Ograniczenie emisji cząstek stałych z silników o zapłonie samoczynnym oraz opracowanie metodyki wyznaczania macierzy emisji masy i liczby cząstek stałych*, Praca Statutowa nr 6503/COS, Instytut Transportu Samochodowego 2015.
- [65] Żółtowski A., Taubert S., *Analiza proponowanych zmian w przepisach EKG ONZ oraz UE dotyczących oceny emisji z pojazdów lekkich*, Praca Statutowa nr 6424/COS, Instytut Transportu Samochodowego 2015.

Źródła internetowe

- [66] *Autokult* [online] <http://autokult.pl/9882,spaliny-silnikow-co-zawieraja-i-jak-to-wplywa-na-czlowieka-2> [dostęp 7 listopada 2017]
- [67] *Dieselnet* [online] <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/index.php> [dostęp 18 października 2017]
- [68] *European Environment Agency* [online] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/annual-mean-pm10-concentration-observed> [dostęp 14 lutego 2017]
- [69] *Główny Inspektorat Ochrony Środowiska* [online] http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/exposure_dust_pm [dostęp 3 marca 2017]
- [70] *Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej* [online] <http://www.smog.imgw.pl/content/health> [dostęp 8 kwietnia 2017]
- [71] *Motofakty* [online] <http://www.motofakty.pl/artykul/eco-driving-czyli-jak-ograniczyc-spalanie-auta-o-25-35-procent.html> [dostęp 15 czerwca 2017]
- [72] *Newsweek* [online] <http://www.newsweek.pl/styl-zycia/liczba-samochodow-w-polsce-europie-i-na-swiecie-statystyki-,artykuly,394554,1.html> [dostęp 6 listopada 2017]
- [73] *Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego* [online] <http://www.pzpm.org.pl/Rynek-motoryzacyjny/Park-pojazdow-zarejestrowanych> [dostęp 9 sierpnia 2017]
- [74] *Uniwersytet Warmińsko Mazurski w Olsztynie* [online] <http://www.uwm.edu.pl/wksir/zmetkli/> [dostęp 22 stycznia 2017]
- [75] *Wikipedia* [online] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Spaliny> [dostęp 25 marca 2017]
- [76] *Wikipedia* [online] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Sygna%C5%82> [dostęp 24 marca 2017]
- [77] *World Health Organisation* [online] <http://www.who.un.org.pl/aktualnosci.php?news=176&wid=12&wai=&year=&back=%2F> [dostęp 15 grudnia 2016]

Wykaz ilustracji

Rys. 1.1.	Rozkład wybranych właściwości cząstek stałych w funkcji ich średnicy emitowanych przez typowy silnik o zapłonie samoczynnym [64].....	21
Rys. 1.2.	Wskaźniki średniego narażenia na pył PM _{2,5} w krajach europejskich [64]	23
Rys. 1.3.	Stężenie cząstek stałych PM _{2,5} w Europie w 2013 roku [68].....	24
Rys. 1.4.	Skład cząstek PM _{2,5} w powietrzu podczas badań w Edmonton [3] ..	25
Rys. 2.1.	Zmiana koncentracji sadzy w cylindrze C w funkcji czasu t w trakcie pełnego cyklu suwu tłoka dla różnych prędkości obrotowych silnika [41]	29
Rys. 2.2.	Schemat powstawania cząstek spalin silników Diesla [48]	30
Rys. 2.3.	Stężenie NO w funkcji temperatury [41]	32
Rys. 2.4.	Stężenie O, N, H i NO w funkcji czasu po przejściu czoła płomienia dla $\lambda = 0,67$ [41].....	32
Rys. 2.5.	Stężenie O, N, H i NO w funkcji czasu po przejściu czoła płomienia dla $\lambda = 2$ [41].....	33
Rys. 2.6.	Zmiana koncentracji względnej tlenu azotu w cylindrze w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym [41].....	34
Rys. 2.7.	Stężenie CO w funkcji współczynnika λ	36
Rys. 2.8.	Wpływ dynamiki jazdy na emisję tlenków azotu dla różnych odcinków pomiarowych [43]	38
Rys. 2.9.	Wpływ dynamiki jazdy na emisję dwutlenku węgla dla różnych odcinków pomiarowych [43]	38
Rys. 2.10.	Wartości emisji drogowej CO ₂ w poszczególnych cyklach [43]	40
Rys. 2.11.	Wartości emisji drogowej NO _x w poszczególnych cyklach [43]	40
Rys. 2.12.	Warunki pracy silnika podczas badań drogowych w terenie płaskim [43]	41
Rys. 2.13.	Warunki pracy silnika podczas badań drogowych w terenie górzystym [43]	42
Rys. 3.1.	Cykl jezdny ECE 15.....	44
Rys. 3.2.	Cykl jezdny EUDC	44
Rys. 3.3.	Cykl jezdny EUDC dla pojazdów o małej mocy	45
Rys. 3.4.	Cykl jezdny FTP-75 (US EPA Urban Dynamometer Driving Schedule UDDS) [67]	46
Rys. 3.5.	Cykl jezdny SFTP SC03	47
Rys. 3.6.	Cykl jezdny SFTP US06.....	48
Rys. 3.7.	Klasyfikacja pojazdów samochodowych wg WLTP [54].....	49
Rys. 3.8.	Wykresy cykli jezdnych dla poszczególnych klas pojazdów [54]....	50
Rys. 3.9.	Artemis, cykl miejski	51

Rys. 3.10.	Artemis, cykl pozamiejski	51
Rys. 3.11.	Artemis, cykl autostradowy	52
Rys. 4.1.	Wybrane realizacje przebiegu prędkości jazdy w warunkach ruchu w zatorach ulicznych w miastach [29].....	57
Rys. 4.2.	Wybrane realizacje przebiegu prędkości jazdy w warunkach ruchu w miastach [29].....	57
Rys. 4.3.	Wybrane realizacje przebiegu prędkości jazdy w warunkach ruchu na autostradach i drogach ekspresowych [29]	58
Rys. 4.4.	Przebieg prędkości obrotowej – n w funkcji czasu – t w teście NRTC [5]	59
Rys. 4.5.	Zależność korelacyjna natężenia emisji węglowodorów – E_{HC} i prędkości obrotowej – n w teście NRTC [14]	60
Rys. 4.6.	Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenków azotu – E_{NOx} i prędkości obrotowej – n w teście NRTC [14]	60
Rys. 4.7.	Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenku węgla – E_{CO} i momentu obrotowego – M_e w teście NRTC [14]	61
Rys. 4.8.	Zależność średniej prędkości jazdy w teście od wartości dystansu całkowitego dla analizowanych testów hamownianych [35].....	63
Rys. 4.9.	Zależność udziału czasu jazdy od całkowitego czasu testu dla analizowanych testów hamownianych [35]	63
Rys. 4.10.	Zależność liczby zatrzymań od wartości czasu całkowitego dla analizowanych testów hamownianych [35]	64
Rys. 4.11.	Zależność udziału czasu przyspieszenia od wartości średniej prędkości jazdy w teście dla analizowanych testów hamownianych [35]	64
Rys. 4.12.	Przykładowa realizacja prędkości samochodu w syntezyowanym teście jezdnym [13]	65
Rys. 4.13.	Widmowa gęstość mocy G przebiegu prędkości testu wzorcowego (linia czarna) oraz przebiegów prędkości w poszczególnych realizacjach testu [13]	66
Rys. 4.14.	Gęstość prawdopodobieństwa g , poszczególnych realizacji przebiegu prędkości [13].....	66
Rys. 4.15.	Udziały objętościowe wybranych składników spalin zarejestrowane podczas próby drogowej na tle prędkości jazdy [27].....	69
Rys. 4.16.	Zestawienie przebiegów prędkości w teście realizowanym i w teście NEDC [27].....	69
Rys. 4.17.	Wskaźniki toksyczności M dla CO , THC , NO_x oraz PM podczas badań w znormalizowanym teście SORT 2 [39]	71
Rys. 4.18.	Wskaźniki toksyczności M dla CO , THC , NO_x oraz PM podczas badań drogowych w ruchu miejskim [39].....	71

Rys. 6.1.	Charakterystyka częstotliwościowa filtra dolnoprzepustowego o długości 101 próbek i częstotliwości progowej 0,08 Hz przy częstotliwości próbkowania 1 Hz [58].....	76
Rys. 6.2.	Odpowiedź czasowa filtra dolnoprzepustowego o długości 101 próbek i częstotliwości progowej 0,08 Hz przy częstotliwości próbkowania 1 Hz [58]	77
Rys. 6.3.	Przebieg prędkości samochodu po filtracji cyfrowym filtrem dolnoprzepustowym [58]	78
Rys. 6.4.	Gęstość widmowa przebiegu prędkości samochodu po filtracji filtrem dolnoprzepustowym [58]	78
Rys. 6.5.	Zmodyfikowany filtr w dziedzinie czasu o szerokości 5 próbek [58].....	79
Rys. 6.6.	Charakterystyka częstotliwościowa okna czasowego o szerokości 5 próbek [58].....	80
Rys. 6.7.	Przebieg prędkości samochodu po filtracji zmodyfikowanym filtrem [58]	81
Rys. 6.8.	Gęstość widmowa prędkości samochodu po filtracji za pomocą zmodyfikowanego filtra [58]	81
Rys. 6.9.	Przykładowy fragment przebiegu prędkości.....	85
Rys. 6.10.	Przykładowy fragment przebiegu prędkości po przeprowadzeniu filtracji.....	86
Rys. 6.11.	Przebieg prędkości z zaznaczonymi punktami granicznymi	88
Rys. 6.12.	Złożenie aproksymacji odcinków przebiegu prędkości za pomocą linii prostych	89
Rys. 6.13.	Nałożone na siebie aproksymacje odcinków przebiegu prędkości ...	90
Rys. 6.14.	Funkcja liczby odcinków podobnych do danego typu odcinków w dziedzinie numeru typu.....	92
Rys. 6.15.	Zależność udziału uwzględnionych odcinków przebiegu wśród wszystkich wyodrębnionych odcinków od liczby typów odcinków.....	93
Rys. 6.16.	Zbiór typów odcinków przebiegu prędkości samochodu.....	93
Rys. 6.17.	Zbiór typów odcinków przebiegu prędkości po kwantyzacji	94
Rys. 6.18.	Histogram odcinków przebiegu syntezy testu jezdni.....	96
Rys. 6.19.	Pierwsza przykładowa realizacja zsyntezowanego testu jezdni ...	99
Rys. 6.20.	Druża przykładowa realizacja zsyntezowanego testu jezdni	99
Rys. 6.21.	Trzecia przykładowa realizacja zsyntezowanego testu jezdni ...	100
Rys. 7.1.	Trasa przejazdu	102
Rys. 7.2.	Samochód Ford Focus stanowiący obiekt badań	103
Rys. 7.3.	Schemat przepływu spalin w analizatorze SEMTECH DS.....	104
Rys. 7.4.	Mobilny analizator SEMTECH DS zainstalowany w pojeździe badawczym Ford Focus Flexifuel.....	105

Rys. 7.5.	Instalacja poboru spalin z układu wydechowego wraz z przepływomierzem urządzenia SEMTECH DS zainstalowana na pojeździe badawczym.....	105
Rys. 7.6.	Urządzenie rejestrujące CarChip Pro w gnieździe OBD pojazdu...	106
Rys. 7.7.	Przebiegi prędkości jazdy: a) przejazd nr 1, b) przejazd nr 2, c) przejazd nr 3, d) przejazd nr 4, e) przejazd nr 5.....	109
Rys. 7.8.	Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 1	110
Rys. 7.9.	Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 2	110
Rys. 7.10.	Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 3	111
Rys. 7.11.	Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 4	111
Rys. 7.12.	Droga i emisje drogowe substancji szkodliwych podczas przejazdu 5	112
Rys. 8.1.	Samochód Ford Focus Flexifuel na stanowisku badawczym	113
Rys. 8.2.	Stanowisko pomiarowe hamowni podwoziowej.....	114
Rys. 8.3.	Zestaw urządzeń pomiarowych AMA i60	115
Rys. 8.4.	Przebieg prędkości pojazdu podczas 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny).....	116
Rys. 8.5.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny).....	117
Rys. 8.6.	Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny).....	118
Rys. 8.7.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny).....	118
Rys. 8.8.	Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 1. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny).....	119
Rys. 8.9.	Przebieg prędkości podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny).....	120
Rys. 8.10.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	121
Rys. 8.11.	Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	121

Rys. 8.12.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	122
Rys. 8.13	Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 2. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	122
Rys. 8.14.	Przebieg prędkości podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	123
Rys. 8.15.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	123
Rys. 8.16.	Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	124
Rys. 8.17.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	124
Rys. 8.18.	Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 3. testu drogowego (kolor czerwony) oraz czterech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	125
Rys. 8.19.	Przebieg prędkości podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	125
Rys. 8.20.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	126
Rys. 8.21.	Przebieg natężenia emisji tlenku węgla podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	126
Rys. 8.22.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	127
Rys. 8.23.	Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 4. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	127
Rys. 8.24.	Przebieg prędkości podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	128
Rys. 8.25.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	128

Rys. 8.26.	Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	129
Rys. 8.27.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	129
Rys. 8.28.	Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas realizacji 5. testu drogowego (kolor czerwony) oraz trzech realizacji testu „bezpośredniego” (kolor czarny)	130
Rys. 8.29.	Schemat blokowy algorytmu syntezy testu.....	131
Rys. 8.30.	Przebiegi prędkości jazdy w testach syntetycznych: a) test nr 1, b) test nr 2, c) test nr 3), d) test nr 4, e) test nr 5.....	132
Rys. 8.31.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego	133
Rys. 8.32.	Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego	134
Rys. 8.33.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego	135
Rys. 8.34.	Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas trzech realizacji 1. syntetycznego testu hamownianego	136
Rys. 8.35.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego	137
Rys. 8.36.	Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego	137
Rys. 8.37.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego	138
Rys. 8.38.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 2. syntetycznego testu hamownianego	138
Rys. 8.39.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego	139
Rys. 8.40.	Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego	139
Rys. 8.41.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego	140
Rys. 8.42.	Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas trzech realizacji 3. syntetycznego testu hamownianego	140
Rys. 8.43.	Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego	141
Rys. 8.44.	Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego	141
Rys. 8.45.	Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego	142

Rys. 8.46. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas trzech realizacji 4. syntetycznego testu hamownianego	142
Rys. 8.47. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego	143
Rys. 8.48. Przebieg natężenia emisji tlenu węgla podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego	143
Rys. 8.49. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego	144
Rys. 8.50. Przebieg natężenia emisji węglowodorów podczas czterech realizacji 5. syntetycznego testu hamownianego	144
Rys. 8.51. Emisja drogowa dwutlenku węgla podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	145
Rys. 8.52. Emisja drogowa tlenu węgla podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	146
Rys. 8.53. Emisja drogowa tlenków azotu podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	146
Rys. 8.54. Emisja drogowa węglowodorów podczas realizacji testów: drogowego (kolor czerwony), hamownianego „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	147
Rys. 8.55. Parametry statystyczne emisji drogowej dwutlenku węgla podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	150
Rys. 8.56. Parametry statystyczne emisji drogowej tlenu węgla podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	151
Rys. 8.57. Parametry statystyczne emisji drogowej tlenków azotu podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	152
Rys. 8.58. Parametry statystyczne emisji drogowej węglowodorów podczas realizacji poszczególnych testów: drogowego (kolor czerwony), „bezpośredniego” (kolor niebieski), syntetycznego (kolor zielony)	154

Wykaz tabel

Tab. 1.1.	Dopuszczalne wartości emisji spalin w poszczególnych normach Euro dla pojazdów z silnikiem o ZI.....	14
Tab. 1.2.	Dopuszczalne wartości emisji spalin w normach Euro podane dla pojazdów z silnikiem o ZS	15
Tab. 1.3.	Całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce wg rodzajów działalności w 2013 r. w tysiącach ton [23]	17
Tab. 1.4.	Struktura parku samochodowego w Polsce w tys. sztuk [23].....	19
Tab. 1.5.	Związki chemiczne wykryte podczas ośmioletniego procesu analizy powietrza w Edmonton [3].....	26
Tab. 2.1.	Długości odcinków pomiarowych [43].....	39
Tab. 3.1.	Porównanie parametrów cykli ECE 15, EUDC oraz NEDC [67].....	45
Tab. 3.2.	Parametry cyklu jezdnego FTP-75 [67].....	46
Tab. 3.3.	Parametry cyklu jezdnego SFTP SC03 [67]	47
Tab. 3.4.	Parametry cyklu jezdnego SFTP US06 [67].....	47
Tab. 3.5.	Charakterystyczne parametry cykli Artemis [67]	52
Tab. 3.6.	Parametry rejestrowane podczas testu RDE [49].....	55
Tab. 7.1.	Dane techniczne samochodu Ford Focus Flexifuel	103
Tab. 7.2.	Charakterystyka techniczna rejestratora parametrów ruchu pojazdu CarChip Pro.....	106
Tab. 7.3.	Charakterystyka eksploatacyjna rejestratora ruchu pojazdu – parametry zapisu.....	107
Tab. 7.4.	Charakterystyka eksploatacyjna rejestratora ruchu pojazdu – prezentowane informacje	108
Tab. 7.5.	Statystyki natężenia emisji w zbiorze 5 zrealizowanych przejazdów	112
Tab. 8.1.	Wyniki testu U Manna-Whitneya dla dwutlenku węgla	149
Tab. 8.2.	Wyniki testu U Manna-Whitneya dla tlenku węgla.....	149
Tab. 8.3.	Wyniki testu U Manna-Whitneya dla tlenków azotu.....	149
Tab. 8.4.	Wyniki testu U Manna-Whitneya dla węglowodorów	149

Załącznik

Kod źródłowy programu w języku Java, wykonującego procedurę syntezy testu według metody opisanej w pracy

```
import java.util.Random;

public class Synteza{
    public static void main(String args[]) {

        // Deklaracja stałych
        final int lzwt = 70;    // liczba zadan w tescie      (50-500)
        final int ndz = 8;     // najmniejsza dlugosc zadania (3-10)
        int ltz = 150;         // liczba typow zadan        (30-100)
        final int lp = 1000;    // liczba prob ulozenia testu (100-1000000)
        final int dst = 5;     // dokladnosc szukania typow  (1-5)
        final int ztz = 5;     // zasieg typow zadan       (4-6)
        final double g = 1;    // graniczna wartosc "/"    (0,8-1)
        final double f = 1;    // czestotliwosc sygnalu     (0.86-1)

        // Odczytanie danych z pliku
        double[] V = Plik.Odczyt("V.txt");
        int dlugosc = V.length;

        // Generowanie wektora czasu
        double[] t = new double[dlugosc];
        for (int i=0; i<dlugosc; i++) {t[i] = i / f;}

        // Filtrowanie predkosci
        for (int j=0; j<5; j++) {
            for (int i=1; i<(dlugosc-1); i++) {V[i] = (V[i-1] + V[i] + V[i+1]) / 3;}
        }

        // Obliczenie przebiegu pierwszej pochodnej
        double[] Vp = new double[dlugosc];
        Vp[0] = 0;
        for (int i=1; i<dlugosc; i++) {Vp[i] = V[i] - V[i-1];}

        // Obliczanie przebiegu drugiej pochodnej
        double[] Vpp = new double[dlugosc];
        Vpp[0] = 0;
        for (int i=1; i<dlugosc; i++) {Vpp[i] = Vp[i] - Vp[i-1];}
```

```

// Obliczenie podzialow miedzy zadaniami
double[] podzialy = new double[dlugosc];
double granica = g;
for (int i=0; i<dlugosc; i++) {
    if (Vpp[i] / Vp[i] >= granica) podzialy[i] = V[i];
    else podzialy[i] = -100;
}
for (int i=1; i<dlugosc; i++) {if (V[i-1]>0.1 && V[i]<0.1) podzialy[i] =
V[i];}
podzialy[0] = V[0];
podzialy[dlugosc-1] = V[dlugosc-1];

// Obliczenie numeracji stanow dla poszczegolnych zadan
double[] numery = new double[dlugosc];
numery[0] = 1;
for (int i=1; i<dlugosc; i++) {
    if (podzialy[i] == -100) numery[i] = numery[i-1] + 1;
    else numery[i] = 1;
}

// Obliczenie podzialow dla zadan co najmniej x punktowych
double[] podzialyx = new double[dlugosc];
if (ndz == 2) {
    for (int i=0; i<(dlugosc-1); i++) {
        if ((numery[i] > 2) || (numery[i+1] > 2)) podzialyx[i] = -100;
        else podzialyx[i] = V[i];
    }
}
if (ndz == 3) {
    for (int i=0; i<(dlugosc-2); i++) {
        if ((numery[i] > 2) || (numery[i+1] > 2) || (numery[i+2] > 2))
podzialyx[i] = -100;
        else podzialyx[i] = V[i];
    }
}
if (ndz == 4) {
    for (int i=0; i<(dlugosc-3); i++) {
        if ((numery[i] > 3) || (numery[i+1] > 3) || (numery[i+2] > 3) ||
(numery[i+3] > 3)) podzialyx[i] = -100;
        else podzialyx[i] = V[i];
    }
}
}

```

```

    if (ndz == 5) {
        for (int i=0; i<(dlugosc-4); i++) {
            if ((numery[i] > 4) || (numery[i+1] > 4) || (numery[i+2] > 4) ||
(numery[i+3] > 4) || (numery[i+4] > 4)) podzialyx[i] = -100;
            else podzialyx[i] = V[i];
        }
    }
    if (ndz == 6) {
        for (int i=0; i<(dlugosc-5); i++) {
            if ((numery[i] > 5) || (numery[i+1] > 5) || (numery[i+2] > 5) ||
(numery[i+3] > 5) || (numery[i+4] > 5) || (numery[i+5] > 5)) podzialyx[i] = -
100;
            else podzialyx[i] = V[i];
        }
    }
    if (ndz == 7) {
        for (int i=0; i<(dlugosc-6); i++) {
            if ((numery[i] > 6) || (numery[i+1] > 6) || (numery[i+2] > 6) ||
(numery[i+3] > 6) || (numery[i+4] > 6) || (numery[i+5] > 6) || (numery[i+6] > 6))
podzialyx[i] = -100;
            else podzialyx[i] = V[i];
        }
    }
    if (ndz == 8) {
        for (int i=0; i<(dlugosc-7); i++) {
            if ((numery[i] > 7) || (numery[i+1] > 7) || (numery[i+2] > 7) ||
(numery[i+3] > 7) || (numery[i+4] > 7) || (numery[i+5] > 7) || (numery[i+6] > 7)
|| (numery[i+7] > 7)) podzialyx[i] = -100;
            else podzialyx[i] = V[i];
        }
    }
    if (ndz == 9) {
        for (int i=0; i<(dlugosc-8); i++) {
            if ((numery[i] > 8) || (numery[i+1] > 8) || (numery[i+2] > 8) ||
(numery[i+3] > 8) || (numery[i+4] > 8) || (numery[i+5] > 8) || (numery[i+6] > 8)
|| (numery[i+7] > 8) || (numery[i+8] > 8)) podzialyx[i] = -100;
            else podzialyx[i] = V[i];
        }
    }
    if (ndz == 10) {
        for (int i=0; i<(dlugosc-9); i++) {
            if ((numery[i] > 9) || (numery[i+1] > 9) || (numery[i+2] > 9) ||
(numery[i+3] > 9) || (numery[i+4] > 9) || (numery[i+5] > 9) || (numery[i+6] > 9)

```

```

|| (numery[i+7] > 9) || (numery[i+8] > 9) || (numery[i+9] > 9)) podzialyx[i] = -
100;
    else podzialyx[i] = V[i];
}
}
for (int i=0; i<(dlugosc); i++) {if (podzialy[i] != -100) podzialyx[i] =
V[i];}

// Obliczenie znakow koncowych dla zadan
double[] koncowki = new double[dlugosc];
if (podzialyx[0] == -100) koncowki[0] = 1;
else koncowki[0] = 0;
for(int i=1; i<(dlugosc-1); i++) {
    if ((podzialyx[i-1] != -100) && (podzialyx[i] == -100) &&
(podzialyx[i+1] == -100)) koncowki[i] = 1;
    else if ((podzialyx[i-1] == -100) && (podzialyx[i] == -100) &&
(podzialyx[i+1] == -100)) koncowki[i] = 2;
    else if ((podzialyx[i-1] == -100) && (podzialyx[i] == -100) &&
(podzialyx[i+1] != -100)) koncowki[i] = 3;
    else koncowki[i] = 0;
}

// Obliczanie liczby zadan
int ile = 0;
for (int i=0; i<dlugosc; i++) {if (koncowki[i] == 1) ile++;}
System.out.println("Liczba wykrytych zadan: " + ile);

// Zdefiniowanie tablicy opisujacej zadania:
// 0. typ zadania, 1. t poczatkowe, 2. t koncowe, 3. V poczatkowe, 4. V
koncowe, 5. czas trwania
double[][] zadania = new double[ile][6];

// Obliczenie wartosci rubryk 1-4 tablicy: zadania
int nr = 0;
for (int i=0; i<(dlugosc); i++) {
    if (koncowki[i] == 1) {
        zadania[nr][1] = t[i];
        zadania[nr][3] = V[i];
    }
    else if (koncowki[i] == 3) {
        zadania[nr][2] = t[i];
        zadania[nr][4] = V[i];
        nr++;
    }
}

```

```

    }
}
double[] zad_t = new double[2];
double[] zad_V = new double[2];

// Obliczenie czasu trwania zadan (rubryka 5.)
for (int i=0; i<ile; i++) {zadania[i][5] = zadania[i][2] - zadania[i][1];}

// Zdefiniowanie zmiennych do znajdowania zadan x. typu i typow
int ilezadan;
int ilezadanmaks;
double tmaks;
double v1maks;
double v2maks;
double[][] zadaniax = new double[200][3]; // 0. czas trwania, 1.
predkosc poczatkowa, 2. predkosc koncowa
double[][] typy = new double[ltz][5]; // 0. 0, 1. czas trwania, 2.
predkosc poczatkowa, 3. predkosc koncowa, 4. liczba wystapien

// Znajdowanie zadan x. typu
for (int obrot=0; obrot<ltz; obrot++) {
    ilezadanmaks = 0;
    tmaks = 0;
    v1maks = 0;
    v2maks = 0;

    // Poszukiwanie najliczniejszego typu
    for (int it=0; it<80; it=it+dst) {
        for (int iv1=0; iv1<120; iv1=iv1+dst) {
            for (int iv2=0; iv2<120; iv2=iv2+dst) {
                ilezadan = 0;
                for (int i=0; i<ile; i++) {
                    if ((Math.abs(zadania[i][5] - it) <= ztz) &&
(Math.abs(zadania[i][3] - iv1) <= ztz) && (Math.abs(zadania[i][4] - iv2) <=
ztz)) ilezadan = ilezadan + 1;
                }
                if (ilezadan > ilezadanmaks) {
                    ilezadanmaks = ilezadan;
                    tmaks = it;
                    v1maks = iv1;
                    v2maks = iv2;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
}

// Kopiowanie zadan wybranego typu do tablicy i kasowanie ich z
tablicy wszystkich typow
nr = 0;
for (int i=0; i<ile; i++) {
    if ((Math.abs(zadania[i][5] - tmaks) <= ztz) &&
(Math.abs(zadania[i][3] - v1maks) <= ztz) && (Math.abs(zadania[i][4] -
v2maks) <= ztz)) {
        zadaniax[nr][0] = zadania[i][5];
        zadaniax[nr][1] = zadania[i][3];
        zadaniax[nr][2] = zadania[i][4];
        nr++;
        zadania[i][5] = -100;
        zadania[i][3] = -100;
        zadania[i][4] = -100;
    }
}

// Obliczanie wartosci srednich typu
typy[obrot][0] = 0;
for (int i=0; i<ilezadanmaks; i++) {
    typy[obrot][1] = typy[obrot][1] + (zadaniax[i][0]/ilezadanmaks);
    typy[obrot][2] = typy[obrot][2] + (zadaniax[i][1]/ilezadanmaks);
    typy[obrot][3] = typy[obrot][3] + (zadaniax[i][2]/ilezadanmaks);
}
typy[obrot][4] = ilezadanmaks;
}

// Wyświetlenie rozkladu typow
// for (int i=0; i<typy.length; i++) {System.out.println(i + ". " +
typy[i][4]);}

// Odrzucenie typow wystepujacych rzadziej niz 3 razy
for (int i=0; i<typy.length; i++) {if (typy[i][4] > 2 && typy[i+1][4] <= 2)
{ltz = i;}}
System.out.println(ltz);

// Zaokrąglanie wartości typow
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    typy[i][2] = 10 * Math.round(typy[i][2] / 10);
}

```

```

    typy[i][3] = 10 * Math.round(typy[i][3] / 10);
}

```

// Obliczenie liczby typow zaczynajacych sie od zadanej predkosci

```

double[] poczatki = new double[13];
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    if (typy[i][2] == 0) poczatki[0] = poczatki[0] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 10) poczatki[1] = poczatki[1] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 20) poczatki[2] = poczatki[2] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 30) poczatki[3] = poczatki[3] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 40) poczatki[4] = poczatki[4] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 50) poczatki[5] = poczatki[5] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 60) poczatki[6] = poczatki[6] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 70) poczatki[7] = poczatki[7] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 80) poczatki[8] = poczatki[8] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 90) poczatki[9] = poczatki[9] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 100) poczatki[10] = poczatki[10] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 110) poczatki[11] = poczatki[11] + typy[i][4];
    if (typy[i][2] == 120) poczatki[12] = poczatki[12] + typy[i][4];
}

```

// Obliczenie liczby typow konczacych sie na zadanej predkosci

```

double[] konce = new double[13];
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    if (typy[i][3] == 0) konce[0] = konce[0] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 10) konce[1] = konce[1] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 20) konce[2] = konce[2] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 30) konce[3] = konce[3] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 40) konce[4] = konce[4] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 50) konce[5] = konce[5] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 60) konce[6] = konce[6] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 70) konce[7] = konce[7] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 80) konce[8] = konce[8] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 90) konce[9] = konce[9] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 100) konce[10] = konce[10] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 110) konce[11] = konce[11] + typy[i][4];
    if (typy[i][3] == 120) konce[12] = konce[12] + typy[i][4];
}

```

// Odrzucenie typow bez pokrycia

```

int p = 0;
int k = 0;

```

```

for (int i=0; i<ltz; i++) {
    p = (int)(typy[i][2]/10);
    k = (int)(typy[i][3]/10);
    if ((poczatki[k] == 0) || (konce[p] == 0)) typy[i][4] = 0;
}

// Obliczenie liczby wystapien typow w tescie
int suma = 0;
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    suma = suma + (int)typy[i][4];
}
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    typy[i][4] = (int)Math.round(lzwt * (double)typy[i][4] / suma);
}

// Zapisanie zakladanej krzywej licznosci typow
int[][] statystyka = new int[ltz][4];
for (int i=0; i<ltz; i++) {statystyka[i][0] = (int)typy[i][4];}

// Porownanie srednich predkosci: wzorcowej i z wybranych typow
double srw = 0;
double srt = 0;
for (int i=0; i<dlugosc; i++) {srw = srw + V[i] / dlugosc;}
//for (int i=0; i<ltz; i++) {srt = srt + (typy[i][2] + typy[i][3]) / 2 }

// Obliczenie liczby zadan do worka
int n = 0;
for (int i=0; i<ltz; i++) {n = n + (int)typy[i][4];}

// Losowanie pierwszego zadania
double[][] worek = new double[n][4];
double[][] test = new double[lzwt][4];
int kursor = 0;
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    if (typy[i][2] == 0) {
        for (int j=0; j<typy[i][4]; j++) {
            worek[kursor][0] = typy[i][1];
            worek[kursor][1] = typy[i][2];
            worek[kursor][2] = typy[i][3];
            worek[kursor][3] = i + 1;
            kursor++;
        }
    }
}

```

```

    }
}
Random r = new Random();
int przypadkowa = (int)Math.round((kursor-1)*r.nextDouble());
test[0][0] = worek[przypadkowa][0];
test[0][1] = worek[przypadkowa][1];
test[0][2] = worek[przypadkowa][2];
test[0][3] = worek[przypadkowa][3];
int wylosowanytyp = (int)(worek[przypadkowa][3] - 1);
if (typy[wylosowanytyp][4] - 1 > 0) typy[wylosowanytyp][4]--;

// Wielokrotne losowanie kolejnych testow
double najtest[][] = new double[lzwt][4];
double podsumowanie;
double najpodsumowanie = 1000000;
for (int proba=0; proba<lp; proba++) {

    // Losowanie kolejnych zadan
    for(int z=1; z<lzwt; z++) {
        kursor = 0;

        // Zerowanie worka
        for (int i=0; i<n; i++) {
            worek[i][0] = 0;
            worek[i][1] = 0;
            worek[i][2] = 0;
            worek[i][3] = 0;
        }

        // Układanie nowego worka
        for (int i=0; i<ltz; i++) {
            if (typy[i][2] == test[z-1][2]) {
                for (int j=0; j<typy[i][4]; j++) {
                    worek[kursor][0] = typy[i][1];
                    worek[kursor][1] = typy[i][2];
                    worek[kursor][2] = typy[i][3];
                    worek[kursor][3] = i + 1;
                    kursor++;
                }
            }
        }
    }

    // Losowanie zadan

```

```

przypadkowa = (int)Math.round((kursor - 1) * r.nextDouble());
test[z][0] = worek[przypadkowa][0];
test[z][1] = worek[przypadkowa][1];
test[z][2] = worek[przypadkowa][2];
test[z][3] = worek[przypadkowa][3];

// Modyfikacja krzywej licznosci typow
wylosowanytyp = (int)(worek[przypadkowa][3] - 1);
if (typy[wylosowanytyp][4] > 1) typy[wylosowanytyp][4]--;
}

// Przywrocenie krzywej licznosci typow
for (int i=0; i<ltz; i++) {typy[i][4] = statystyka[i][0];}

// Zliczenie zadan wystepujacych w tescie
for (int i=0; i<lzwt; i++) {statystyka[(int)test[i][3] - 1][1]++;}

// Obliczenie sumy bledow
podsumowanie = 0;
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    statystyka[i][2] = Math.abs(statystyka[i][0] - statystyka[i][1]);
    podsumowanie = podsumowanie + statystyka[i][2];
}
// System.out.println(testy[proba]);

// Zerowanie statystyki
for (int i=0; i<ltz; i++) {
    statystyka[i][1] = 0;
    statystyka[i][2] = 0;
}

// Zapisanie testu jesli jest najlepszy
if (podsumowanie < najpodsumowanie) {
    for (int i=0; i<lzwt; i++) {
        najtest[i][0] = test[i][0];
        najtest[i][1] = test[i][1];
        najtest[i][2] = test[i][2];
        najtest[i][3] = test[i][3];
        najpodsumowanie = podsumowanie;
    }
}
}
}

```

```

// Obliczenie błędu względnego
double blad = 100 * najpodsumowanie / lzwt;
System.out.println();
System.out.println("Liczba błędów: " + najpodsumowanie + ",
sumaryczny bład względny: " + blad + "%");

// Renderowanie testu
double[] predkosc = new double[lzwt+2];
double[] czas = new double[lzwt+2];
predkosc[0] = 0;
czas[0] = 0;
for (int i=1; i<(lzwt+1); i++) {
    predkosc[i] = najtest[i-1][2];
    czas[i] = czas[i-1] + najtest[i-1][0];
}
predkosc[lzwt+1] = 0;
czas[lzwt+1] = czas[lzwt] + 10;

// Interpolacja testu
int dt = (int)czas[lzwt+1];
double[] przebieg = new double[dt];
double[] dziedzina = new double[dt];
for (int i=0; i<dt; i++) {dziedzina[i] = i / f;}
for (int i=1; i<dt; i++) {
    for (int j=0; j<(lzwt+1); j++) {if ((czas[j]<=dziedzina[i]) &&
(czas[j+1]>dziedzina[i])) kursor = j;}
    przebieg[i] = predkosc[kursor] + (dziedzina[i] - czas[kursor]) *
(predkosc[kursor+1] - predkosc[kursor]) / (czas[kursor+1] - czas[kursor]);
}
przebieg[0] = 0;
przebieg[dt-1] = 0;

// Filtrowanie predkosci
for (int j=0; j<5; j++) {
    for (int i=1; i<(dt-1); i++) {przebieg[i] = (przebieg[i-1] + przebieg[i] +
przebieg[i+1]) / 3;}
}

// Zapis do pliku
Plik.Zapis("wynik.txt", przebieg);
}
}

```