



**AKADEMIA IM. JAKUBA Z PARADYŻA
Z SIEDZIBĄ W GORZOWIE WIELKOPOLSKIM**

mgr inż. Piotr Puzio

**PRACA DOKTORSKA
PREDYKCYJNE MONITOROWANIE EMISJI SPALIN
Z WYKORZYSTANIEM CZUJNIKÓW TLENU W CZASIE
RZECZYWISTYM**

Promotor:

prof. dr hab. inż. Ryszard WÓJCIK

Promotor pomocniczy:

dr inż. Aleksandra Radomska-Zalas

Gorzów Wielkopolski, 2025

SPIS TREŚCI

WYKAZ WYBRANYCH AKRONIMÓW I OZNACZEŃ	4
WPROWADZENIE	5
1. ANALIZA STANU WIEDZY	12
1.1. Emisja zanieczyszczeń oraz smogu	12
1.2. Systemy telemetryczne i pomiar emisji spalin	19
2. AKTY PRAWNE REGULUJĄCE NORMY EMISJI SPALIN I CYKLE BADAWCZE.....	38
2.1. Normy EURO	39
2.2. Cykl badań, NEDC (New European Driving Cycle)	41
2.3. Cykl badań, WLTP- RDE (World Harmonized Light Vehicle Test Procedure)	42
2.4. Green NCAP	44
2.5. Niektóre niedozwolone praktyki producentów samochodów	45
2.6. Złożoność problemu procedur testowania silników pod kątem emisji spalin	47
3. URZĄDZENIA KONTROLNO-POMIAROWE WYKORZYSTYWANE W POMIARACH EMISJI SPALIN.....	50
3.1. Analizatory GUM	50
3.2. Analizatory MID	50
3.3. Urządzenia mobilne (PEMS)	51
4. SONDY LAMBDA	55
4.1. Sondy dwustanowe – napięciowe, rezystancyjne (cyrkonowa)	58
4.2. Sondy rezystancyjne (tytanowe)	61
4.3. Sondy szerokopasmowe	62
5. CEL TEZA I ZAKRES PRACY	64
6. WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW NIEZBĘDNYCH DO BUDOWY ALGORYTMU PREDYKCYJNEGO	66
6.1. Obliczenia emisji w warunkach zachowania stechiometrii procesu spalania	66
6.2. Wpływ rodzaju paliwa na osiągnięte wyniki.....	67
6.3. Teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze	68
6.4. Skład chemiczny spalin	69
6.5. Toksyczne składniki spalin.....	71
5.5.1 Powstawanie tlenków azotu	73
5.5.2 Formowanie się tlenku węgla	75
5.5.3 Powstawanie węglowodorów	75
6.6. Reakcje w trójfunkcyjnym konwerterze katalitycznym (TWC)	76
7. MOBILNY SYSTEM TELMETRYCZNY.....	79
7.1. Mobilny system monitorowania CO	81
7.1.1. Konstrukcja mobilnej sondy zawartości tlenku węgla (CO)	82
7.1.2. Analiza wyników pomiarów emisji CO; weryfikacja działania dynamicznego pomiaru zawartości tlenku węgla w spalinach	87

7.2.	System telemetryczny monitorowania sond lambda	90
8.	PROCEDURA BADAWCZA	97
8.1.	Pojazdy wytypowane do badań	100
8.2.	Opis stanowiska badawczego	102
8.3.	Pomiary drogowe	107
8.4.	Przykładowe wyniki badań	108
8.4.1.	Badania drogowe. Przejazdy testowe - Renault Modus	115
8.4.2.	Badania drogowe. Przejazdy testowe - Fiat Punto	122
8.4.3.	Zestawienie wartości zmierzonych emisji toksycznych składników spalin	127
8.5.	Weryfikacja otrzymanych wyników pomiarów	129
8.5.1.	Obliczenie całkowitej masy wyemitowanych związków węgla	129
8.5.2.	Obliczenie masy i objętości zużytego paliwa	130
8.5.3.	Obliczenie całkowitej masy i objętości spalin (<i>V_{total}</i>)	131
8.5.4.	Wyznaczanie emisji jednostkowej dla pojazdów bez czujnika MAF	131
8.5.5.	Zastosowanie wartości <i>V_{total}</i> do obliczenia emisji jednostkowej	133
	PODSUMOWANIE	136
	BIBLIOGRAFIA	141
	SPIS TABEL	152
	SPIS RYSUNKÓW	152
	ZAŁĄCZNIK	155

Wykaz wybranych akronimów i oznaczeń

CAN	<i>Controller Area Network</i> – szeregową magistrala komunikacyjna
CF	<i>Conformity Factor</i> – wskaźnik emisji zanieczyszczeń pojazdu
CO	tlenek węgla
CO ²	dwutlenek węgla
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i> – filtr cząstek stałych
e	emisja jednostkowa zanieczyszczeń
E	natężenie emisji zanieczyszczeń
EEA	<i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiska
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i> – Europejska Komisja Gospodarcza
ECM	<i>Engine Control Module</i> – moduł pomiarowo-sterujący silnika
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> – elektroniczny sterownik silnika
EEV	<i>Enhanced Environmentally-friendly Vehicle</i> – pojazd przyjazny środowisku
EGR	Exhaust Gas Recirculation – system recyrkulacji gazów spalinowych
EOBD	<i>European On-Board Diagnostic</i> – europejski system diagnostyki pokładowej
EUDC	<i>Extra Urban Driving Cycle</i> – pozamiejski europejski test jezdny
Euro	normy emisji spalin w Europie
GHG	<i>Greenhouse Gases</i> – gazy cieplarniane
HC	Węglowodory
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i> – silnik spalinowy
S	długość odcinka pomiarowego
Mo	moment obrotowy silnika
MPI	<i>Multi Point Injection</i> – wtrysk wielopunktowy
n	prędkość obrotowa
Ne	moc efektywna silnika
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i> – nowy europejski cykl jezdny z natychmiastowym poborem spalin
NO	tlenek azotu
NO _x	tlenki azotu
OBD	<i>On-Board Diagnostics</i> – interfejs diagnostyczny
OBM	<i>On Board Monitoring</i> – monitorowanie pokładowe
PEMS	<i>Portable Emission Measurement System</i> – mobilny system analizatorów spalin
PM	<i>Particle Mass</i> – masa cząstek stałych
PN	<i>Particle Number</i> – liczba cząstek stałych
ppm	<i>parts per million</i> – liczba części na milion
RDE	<i>Real Driving Emissions</i> – pomiar emisji spalin w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego
UDC	<i>Urban Driving Cycle</i> – europejski miejski cykl jezdny
UE	Unia Europejska
V	prędkość pojazdu
ZI	zapłon iskrowy
ZS	zapłon samoczynny

WPROWADZENIE

W obliczu obserwowanych zmian klimatycznych istotna stała się zamiana stosunku i podejścia do ochrony środowiska, która pozwoli bardziej dbać o środowisko naturalne. Kryje się ona między innymi w automatyzacji pomiaru i aktywnej analizie spalin. W dzisiejszych czasach problem zanieczyszczenia powietrza w Europie stanowi wyzwanie dla zdrowia publicznego i środowiska naturalnego. Unia Europejska wprowadziła szereg regulacji, takich jak normy emisji znane pod pojęcie Norm Euro. Działania te mają służyć -zmniejszeniu emisji szkodliwych substancji z pojazdów spalinowych. Jednakże, mimo postępów w tej dziedzinie, istnieją nadal wyzwania związane z efektywną implementacją i egzekwowaniem tych regulacji, jak również możliwymi manipulacjami wynikami testów kontroli emisji. Zaostrzenie norm emisji wymusiło na producentach samochodów implementację zaawansowanych technologii oczyszczania i konwersji spalin, co prowadzi do ewolucji w branży motoryzacyjnej. Projektowanie testów emisji, które wiernie odzwierciedlają rzeczywiste warunki użytkowania pojazdów, jest nadal wyzwaniem, które wymaga ciągłego doskonalenia metodologii pomiarowych. Obecne procedury testowe takie jak WLTP i RDE są kluczowe dla oceny wpływu pojazdów na środowisko, jednakże wymagają one regularnych aktualizacji i rozwoju nowych urządzeń pomiarowych. W dziedzinie nauk technicznych, kreatywne holistyczne podejście i świeże spojrzenie na znane problemy odgrywają kluczową rolę w innowacji i postępie technologicznym. To nie tylko "myślenie poza schematami", ale także umiejętność spojrzenia na problemy z różnych perspektyw, łączenie różnych dziedzin w celu znalezienia kompleksowych rozwiązań. Jedną z korzyści takiego podejścia jest możliwość odkrycia nowych sposobów wykorzystania już istniejących i wbudowanych w pojazdy układów. Wyżej wymienione przesłanki stanowiły podstawę idei - którą kierował się autor niniejszej rozprawy.

W rozdziale pierwszym pracy dokonano przeglądu literaturowego odnoszącego się do zagadnień związanych z analizą aktualnego stanu wiedzy na temat systemów telemetrycznych i pomiaru emisji spalin. W świetle przeglądu literatury dotyczącej szeroko pojętej analizy spalin, stan techniczny pojazdu wyłania się jako kluczowy czynnik wpływający na skuteczność działania tych systemów. Znaczenie tego aspektu wynika z faktu, że wszelkie inne czynniki, takie jak styl jazdy, infrastruktura drogowa, przebyta trasa, czy nawet warunki atmosferyczne, również oddziałują na pojazd, a co za tym idzie na jego stan techniczny. Jak wynika z przeprowadzonego przeglądu literatury, każdy z wymienionych czynników ma bezpośredni wpływ na pojazd i jego systemy, a tym samym na efektywność działania układu konwersji i oczyszczania spalin, silnika oraz innych kluczowych komponentów odpowiedzialnych za

kontrolę emisji. Skupienie badań wyłącznie na jednym aspekcie, takim jak styl jazdy czy infrastruktura drogowa, bez jednoczesnego uwzględnienia stanu technicznego pojazdu, może prowadzić do błędnych wniosków i zniekształceń w rozumowaniu rzeczywistego wpływu tych czynników na emisję spalin. Rzeczywista efektywność pojazdu w warunkach drogowych może być znacząco różna od teoretycznych założeń, jeśli nie weźmie się pod uwagę aktualnego stanu technicznego pojazdu. W związku z tym, aby uzyskać pełniejszy i zbliżony do rzeczywistego obraz wpływu różnych czynników na emisję spalin, niezbędne jest integracyjne podejście, które łączyłoby badania nad poszczególnymi aspektami z dokładną analizą stanu technicznego pojazdów. Tylko w ten sposób można opracować skuteczne strategie zarządzania emisją spalin, które uwzględniają wszystkie kluczowe zmienne. Taka holistyczna perspektywa umożliwia nie tylko lepsze zrozumienie mechanizmów wpływających na emisję, ale także przyczynia się do tworzenia bardziej efektywnych technologii i praktyk eksploatacyjnych, które realnie przyczyniają się do poprawy jakości powietrza i ochrony środowiska.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu aktów prawnych regulujących normy emisji spalin, które zostały wprowadzone przez Unię Europejską. Normy te ewoluując od Euro 1 do planowanej Euro 7, zaostrzały limity dla tlenków azotu, węglowodorów, tlenku węgla i cząstek stałych. Mimo wprowadzenia tych regulacji, wciąż istnieją jednak wyzwania związane z ich skuteczną implementacją i egzekwowaniem, co obrazują różne przypadki manipulacji wynikami testów emisji przez producentów samochodów. Jednocześnie, normy te wywierają znaczący wpływ na rozwój technologiczny w branży motoryzacyjnej, wymuszając na producentach implementację zaawansowanych technologii oczyszczania spalin. Postępy w tej dziedzinie obejmują rozwój skuteczniejszych systemów konwersji i oczyszczania spalin oraz innowacje zmniejszające ogólny wpływ pojazdów na środowisko. Wyzwanie stanowi jednak projektowanie testów, które wiernie odzwierciedlają rzeczywiste warunki użytkowania pojazdów, co podkreśla potrzebę ciągłego doskonalenia metodologii pomiarowych, takich jak przejście od testów NEDC do bardziej reprezentatywnych procedur WLTP i RDE. Kontrola emisji pozostaje więc złożonym problemem, wymagającym nie tylko ścisłych regulacji, ale również bieżącego nadzoru nad ich przestrzeganiem oraz ciągłych badań nad nowymi technologiami redukcji emisji. Skuteczność tych działań jest kluczowa dla ochrony zdrowia ludzi i ekosystemów przed degradacją, co zobowiązuje zarówno przemysł, jak i organy regulacyjne do ciągłej walidacji i adaptacji w odpowiedzi na dynamicznie zmieniające się technologie i warunki środowiskowe.

W rozdziale trzecim dokonano przeglądu metod testowania emisji spalin za pomocą procedur testowych takich jak WLTP (ang. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test

Procedure) i RDE (ang. Real Driving Emissions). Opisane metody zostały opracowane w odpowiedzi na potrzebę bardziej realistycznego odzwierciedlenia warunków użytkowania pojazdów oraz adekwatnej oceny ich wpływu na jakość powietrza. Procedury WLTP i RDE są złożone ze względu na konieczność uwzględnienia zmienności rzeczywistych warunków jazdy, takich jak różnorodność dróg, zmienne warunki atmosferyczne oraz dynamiczne zachowania kierowców, co sprawia, że testy te są znacznie bardziej skomplikowane w porównaniu do tradycyjnych metod laboratoryjnych. Analiza emisji spalin obejmuje szereg czynników, od charakterystyki pojazdu, przez przebytą trasę, infrastrukturę drogową, aż po styl jazdy i warunki atmosferyczne. Jak wynika z przeprowadzonego przeglądu każdy z tych elementów ma wpływ na zużycie paliwa i poziom emitowanych zanieczyszczeń. Systemy pomiarowe muszą być dostosowane do zmieniających się technologii oraz norm emisyjnych, co wiąże się z regularnymi aktualizacjami i rozwojem nowych urządzeń.

W rozdziale czwartym zamieszczono szczegółowe informacje na temat sond lambda, ich budowy oraz zasad działania. Omówiono kluczową rolę tych czujników w systemach kontroli emisji spalin, ich umiejscowienie w układzie wydechowym oraz podstawy fizykochemiczne funkcjonowania, w tym równanie Nernsta. Rozdział przedstawia charakterystykę różnych typów sond: dwustanowych (cyrkonowych), rezystancyjnych (tytanowych) oraz szerokopasmowych, wskazując na ich specyfikę, zalety i ograniczenia w precyzyjnym sterowaniu składem mieszanki paliwowo-powietrznej.

W rozdziale piątym zdefiniowano cel, tezę i zakres pracy. Jako cel główny wskazano opracowanie, wdrożenie oraz weryfikację modelu predykcyjnego, który umożliwi szacowanie poziomu emisji spalin w silnikach o zapłonie iskrowym na podstawie napięcia generowanego przez sondy lambda. Sformułowano hipotezę badawczą, która zakłada, że analiza sygnałów z pokładowych sond lambda w czasie rzeczywistym, połączona z monitorowaniem parametrów pracy silnika i wspomagana algorytmami predykcyjnymi, pozwala na skuteczną identyfikację pojazdów o nadmiernej emisji. Teza pracy stwierdza, że wdrożenie takiego mobilnego systemu telemetrycznego może znacząco wesprzeć wczesne wykrywanie pojazdów przekraczających normy. Określono również szczegółowe cele pracy, obejmujące m.in. analizę stanu wiedzy, opracowanie koncepcji systemu, budowę oprogramowania oraz przeprowadzenie badań porównawczych i wyznaczenie zależności między napięciem sondy a emisją szkodliwych substancji.

W rozdziale szóstym przedstawiono teoretyczne podstawy oraz obliczenia niezbędne do budowy algorytmu predykcyjnego. Wyjaśniono w nim konieczność przeliczenia danych z analizatorów (podawanych w % lub ppm) na jednostki zgodne z normami Euro [g/km]. Rozdział ten zawiera analizę stechiometrii procesu spalania z wykorzystanym uproszczonym modelem paliwa, wzory na teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze oraz skład chemiczny spalin. Omówiono również mechanizmy powstawania toksycznych składników spalin, takich jak tlenki azotu NO_x , tlenek węgla CO i węglowodory HC, prezentując odpowiednie równania kinetyczne. Całość uzupełniono o opis reakcji chemicznych zachodzących w trójfunkcyjnym konwerterze katalitycznym TWC.

W rozdziale siódmym zamieszczono projekt układu mobilnej sondy zawartości tlenku węgla CO, który stanowi innowacyjne podejście do monitorowania emisji spalin w czasie rzeczywistej eksploatacji pojazdów. Zaprojektowana aplikacja towarzysząca systemowi umożliwia użytkownikom łatwe śledzenie i analizowanie stężenia CO w różnych warunkach jazdy. Prezentuje dane w formie graficznej i numerycznej, co ułatwia zrozumienie i analizę przez użytkownika wyników pomiarów. Aplikacja również pozwala na rejestrowanie danych o pojeździe, takich jak model, rodzaj paliwa czy norma emisji Euro, co może służyć do dalszej analizy i porównywania wyników. Analiza wyników testów z wykorzystaniem mobilnej sondy ujawnia, że stężenie CO znacznie różni się w zależności od warunków jazdy. Wyniki pokazują, że stężenie CO wzrasta przy wyższych obciążeniach silnika oraz w trudniejszych warunkach drogowych, jak np. jazda pod górę. Badania te podkreślają, że nawet pojazdy spełniające normy Euro mogą emitować znaczne ilości CO podczas pewnych rodzajów eksploatacji, co sugeruje, że samochody mogą nie być tak ekologiczne, jak początkowo zakładano. To rzuca światło na znaczenie rzeczywistych warunków eksploatacji pojazdów w kontekście ich wpływu na środowisko, a nie tylko na podstawie wyników uzyskanych w kontrolowanych testach laboratoryjnych. Ponadto, uzyskane wyniki badań wstępnych wskazują, iż mogą mieć istotne znaczenie dla polityk ochrony środowiska i strategii zarządzania jakością powietrza, gdyż wynika z nich potrzeba bardziej zróżnicowanego podejścia do zarządzania (emisjami) sterowaniem silnikiem i układem napędowym, które uwzględniać będzie rzeczywiste warunki jazdy. Wyniki wskazują również na potrzebę dalszych badań w celu dokładniejszego oszacowanie, jak różne czynniki eksploatacyjne wpływają na poziom emisji zanieczyszczeń. W rozdziale tym również opisano projekt systemu telemetrycznego tj. system mobilnej analizy spalin wraz z zaawansowanym urządzeniem diagnostycznym korzystającym z interfejsu OBD-II za pośrednictwem popularnego modułu ELM 327. System został oparty o platformę sprzętowo-programową Raspberry, korzystającą z mikrokontrolerów z rodziny ARM Cortex,

co pozwoli zapewnić obsługę zadań obliczeniowych i komunikacyjnych. Raspberry Pi posiada kilka dedykowanych środowisk programistycznych i systemów operacyjnych, które są specjalnie przystosowane do jego architektury i możliwości. Jednak ze względu na dużą dostępność opcji zdecydowano się na środowisko Raspberry Pi OS bazujące na systemie Debian. Za komunikację z pojazdem poprzez złącze OBD odpowiedzialny będzie interfejs diagnostyczny ELM 327. Został on wybrany ze względu na jego kompatybilność i szeroki zakres obsługi protokołów: OBD-II (ISO15765-4 (CAN), ISO14230-4 (KWP2000), ISO9141-2, J1850 VPW, J1850 PWM), co pozwala na jego użycie w większości samochodów produkowanych po 1996 roku. Aplikacja napisana została w języku Python z wykorzystaniem bibliotek do analizy i wizualizacji danych, oferuje ona możliwość interaktywnego wczytywania, selekcjonowania oraz wizualizacji danych z plików w formacie xlsx, xlsxm, xls, xlsx, xlsxm, csv, xml, txt. Co istotne oprócz standardowej wizualizacji, użytkownik może interaktywnie zarządzać wyświetlanymi danymi przez włączanie i wyłączanie poszczególnych serii na wykresie. Autorska aplikacja do wizualizacji danych oferuje kilka znaczących przewag nad korzystaniem wyłącznie ze zwykłej bazy danych lub oprogramowania komercyjnego, zwłaszcza w kontekście analizy i prezentacji danych. Wizualizacje pozwalają szybko zauważyć wzorce, trendy, odstępstwa i anomalie, które mogą umknąć podczas przeglądania surowych danych w postaci tabel.

W rozdziale ósmym zamieszczono opis procedury badawczej wykorzystanej w pracy. Celem metodyki jest zaprezentowanie kroków badawczych, które umożliwiły weryfikację efektywności oraz poprawności działania obydwu zaproponowanych systemów. W ramach przygotowań do badań głównych, przeprowadzono testy wstępne obu systemów na urządzeniach renomowanych producentów takich jak Autel, Unimetal oraz Bosch. Wyniki badań weryfikacyjnych zamieszczono załączniku. Testy te miały za cel weryfikację poprawności zbieranych danych przez autorski system OBM oraz ich zgodności z pomiarami uzyskanymi za pomocą standardowych, uznanych na rynku urządzeń diagnostycznych. Proces ten jest kluczowy dla zapewnienia, że nowo opracowane systemy monitorowania emisji spalin są wiarygodne i mogą służyć jako alternatywa lub uzupełnienie dla istniejących metod. Metodyka badań została podzielona na kilka etapów, z których każdy skupiał się na innym aspekcie funkcjonowania systemów. W pierwszej kolejności, opisane zostały wykorzystane urządzenia i technologie, następnie procedury kalibracji i weryfikacji danych telemetrycznych. Kluczowym elementem była także analiza porównawcza uzyskanych wyników uzyskanych, co pozwoliło na ocenę ich precyzji i wiarygodności. Co istotne końcowym etapem przeprowadzonych badań była weryfikacja uzyskanych danych za pomocą analizatora spalin.

Ten krytyczny etap procesu badawczego miał na celu zapewnienie obiektywności, dokładności i wiarygodności rezultatów, poprzez ich porównanie z wynikami uzyskanymi za pomocą standardowej metody pomiarowej. Analiza danych uzyskanych w trakcie weryfikacji obejmowała statystyczną ocenę zgodności między odczytami z autorskich systemów a danymi z analizatora spalin. Techniki statystyczne umożliwiły zapewnienie dokładności, precyzji i wiarygodności proponowanych systemów monitorowania w kontekście rzeczywistych warunków eksploatacji pojazdów. Dodatkowo, szczegółowa analiza przypadków odstających lub niezgodności w wynikach pozwoliła na identyfikację potencjalnych obszarów do dalszej optymalizacji i ulepszenia proponowanych systemów.

Zakończeniem pracy są wnioski oraz kierunki dalszych badań. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie nowoczesnych czujników tlenu i systemów telemetrycznych może znacząco poprawić dokładność pomiarów emisji spalin oraz skuteczność systemów redukcji emisji w pojazdach spalinowych. Mobilne systemy pomiarowe, takie jak opisywane w pracy PEMS, pozwalają na monitoring emisji w rzeczywistych warunkach drogowych, dostarczając wartościowych danych, które mogą być wykorzystane do dalszego doskonalenia silników i systemów oczyszczania spalin. Wdrożenie takich systemów pozwala na bardziej dynamiczną i elastyczną reakcję na zmienne warunki pracy silnika oraz zmieniające się normy emisyjne, co jest kluczowe w kontekście rosnących wymagań ekologicznych i norm środowiskowych. Przyszłe badania będą koncentrować się na dalszym rozwoju i optymalizacji mobilnych systemów monitorowania spalin. Istotne będzie zintegrowanie technologii czujników tlenu z systemami sztucznej inteligencji, które pozwolą na automatyczną analizę danych i szybką adaptację do zmieniających się warunków trakcyjnych pojazdów. Ponadto, należy rozważyć rozwój nowych metod kalibracji i walidacji danych uzyskanych z mobilnych systemów pomiarowych, aby zapewnić ich maksymalną precyzję i wiarygodność. Rozważenie wpływu różnych warunków atmosferycznych i eksploatacyjnych na dokładność pomiarów emisji spalin będzie kolejnym krokiem w kierunku poprawy efektywności i niezawodności przyszłych systemów monitorowania.

Implementation of a real-time monitoring and analysis system of exhaust emission parameters using oxygen sensors to improve the energy efficiency of internal combustion engines

Abstract: With the increasing challenges of climate change, environmental protection has become a priority for society and policy makers. This dissertation undertakes an analysis of the impact of vehicle emissions on the environment and public health, focusing on the challenges of enforcing emission standards. Despite existing regulations, such as Euro standards, there are still problems with the manipulation of test results and effective enforcement. In response to these challenges, an innovative emissions monitoring system based on on-board oxygen sensors has been proposed. The system focuses on identifying vehicles that exceed emission standards in real time, enabling rapid intervention when problems are detected. The use of such technology has the potential to improve air quality and reduce environmental impacts. Preliminary research carried out as part of this thesis has facilitated the formulation and implementation of a solution, with a plan presented for integrating the system into existing vehicles. The dissertation presents a novel approach to emissions monitoring that can further environmental and public health advances.

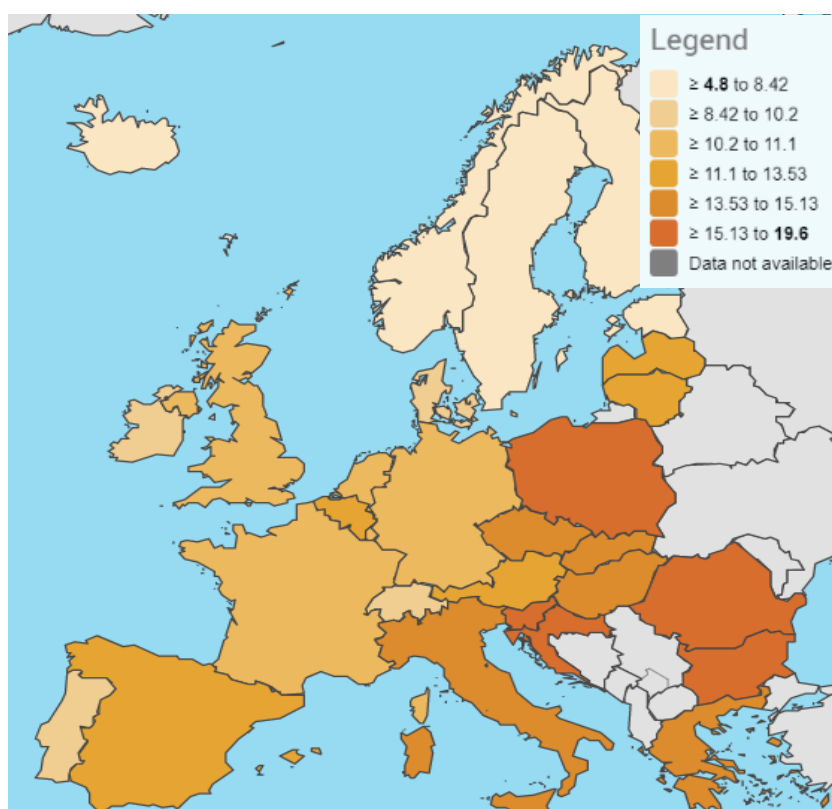
Predykcyjne monitorowanie emisji spalin z wykorzystaniem czujników tlenu w czasie rzeczywistym

Streszczenie: Wraz ze wzrostem wyzwań związanych ze zmianami klimatu ochrona środowiska stała się priorytetem dla społeczeństwa i decydentów. Pomimo istniejących przepisów, takich jak normy Euro, nadal istnieją problemy z manipulowaniem wynikami testów i skutecznym egzekwowaniem. Niniejsza rozprawa podejmuje analizę wpływu emisji pojazdów na środowisko i zdrowie publiczne, skupiając się na wyzwaniach związanych z egzekwowaniem spełniania przez te pojazdy norm emisji. W odpowiedzi na te wyzwania zaproponowano innowacyjny system monitorowania emisji oparty na czujnikach tlenu w tym na pokładowych czujnikach tlenu. System pozwala na identyfikację pojazdów przekraczających normy emisji w czasie rzeczywistym, umożliwiając szybką interwencję w przypadku wykrycia problemów. Zastosowanie proponowanego rozwiązania ma potencjał poprawy jakości powietrza oraz zmniejszenia wpływu pojazdów na środowisko. Wstępne badania przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy pozwoliły na stworzenie i wdrożenie rozwiązania systemu oceny w czasie rzeczywistym i jego integracji z istniejącymi pojazdami. Rozprawa przedstawia nowatorskie podejście do monitorowania emisji, które może przyczynić się do postępu w zakresie środowiska i zdrowia publicznego.

1. ANALIZA STANU WIEDZY

1.1. Emisja zanieczyszczeń oraz smogu

Poziom emisji zanieczyszczeń oraz smogu w Europie (rys.1), zmusza organy decyzyjne Unii Europejskiej do podjęcia działań mających na celu redukcję oraz ograniczenie, a w przyszłości prawie całkowite wyeliminowanie czynników przyczyniających się do emisji zanieczyszczeń [1,2,3,25,30].



Rys. 1. Stężenie PM 2.5 w roku 2019 [EEA]

Zanieczyszczenia powietrza, bez względu na to, gdzie występują, poważnie wpływają na ludzkie zdrowie i jakość środowiska. Podczas oddychania szkodliwe substancje dostają się do naszych dróg oddechowych wraz z tysiącami drobnych cząstek. Osadzają się w oskrzelach i pęcherzykach płucnych, gdzie mogą powodować zarówno krótko, jak i długoterminowe szkodliwe skutki zdrowotne. Im mniejsze cząstki, tym głębiej wnikają do płuc [166]. Zanieczyszczenia często powodują zaburzenia i choroby dróg oddechowych u dzieci i dorosłych (np. ostre trudności w oddychaniu, przewlekły kaszel i odkrztuszanie, zapalenie oskrzeli i przewlekłe zapalenie oskrzeli oraz infekcje dróg oddechowych) (rys.2). Zła jakość

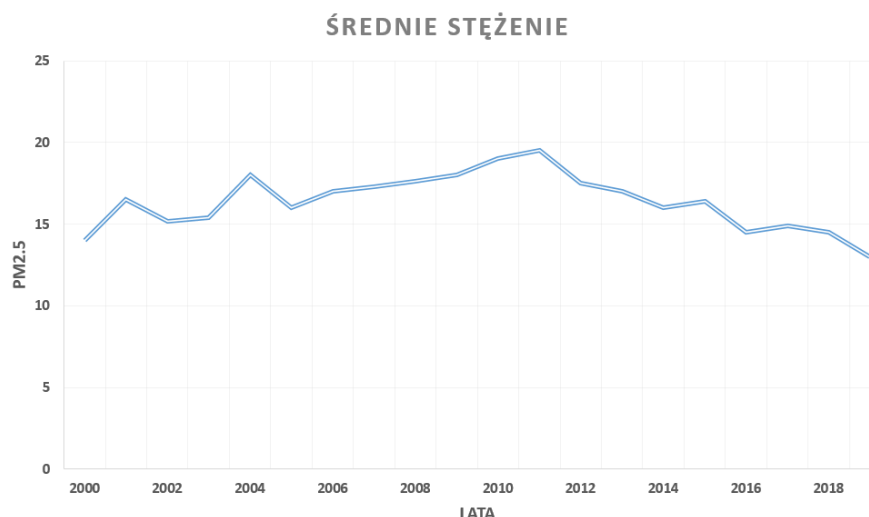
powietrza to nie tylko negatywny wpływ na ludzkie zdrowie, ale przede wszystkim na całe ekosystemy [39,40,47,60].

Podwyższone stężenie zanieczyszczeń powietrza wywiera negatywny wpływ na florę i faunę. Zanieczyszczenia powietrza są również transportowane na duże odległości i ostatecznie osadzają się - w postaci mokrej lub suchej - we wrażliwych ekosystemach wodnych i lądowych. Jednym z przykładów tego, co może się stać, są np. lasy przeciążone azotem, azot, który ostatecznie jest wypłukiwany w postaci azotanów z dna lasu do wód gruntowych, a w konsekwencji szkodliwe substancje przenikają, do roślin, które w późniejszym okresie są spożywane przez ludzi. Większość negatywnych oddziaływań na ekosystem ziemski pochodzi z procesów spalania [72,73].



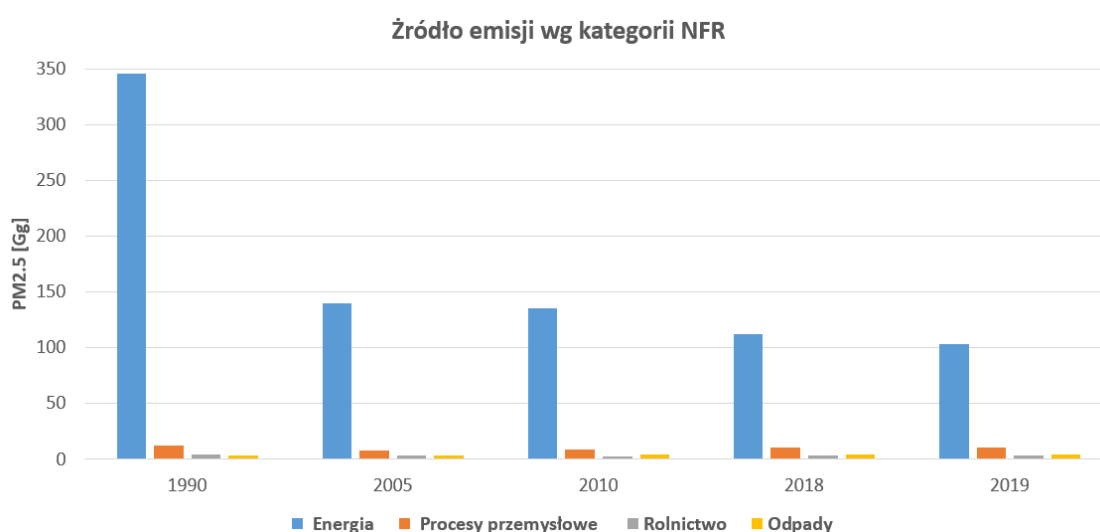
Rys. 2. Zgony związane z zanieczyszczeniem powietrza [WHO]

Chociaż jakość powietrza w Europie w ostatnich dziesięcioleciach znacząco się poprawiła (rys.3), to jednak poziomy zanieczyszczeń powietrza w wielu miejscach nadal przekraczają wyznaczone przez UE limity i najbardziej rygorystyczne wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia [86,92,101].



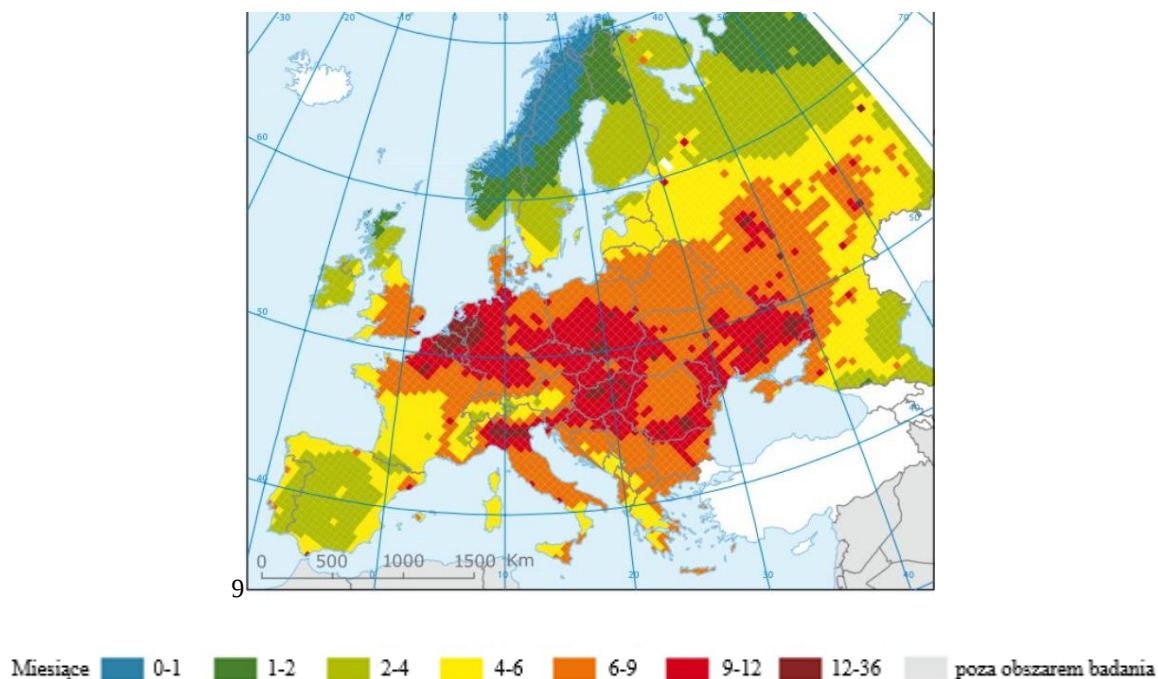
Rys. 3. Średnie stężenie PM 2.5 w latach 2000-2019 na terenie 27 krajów UE [KOBIZE]

Jednym z najgroźniejszych zanieczyszczeń jest pył zawieszony. Pod względem budowy i składu jest on substancją niejednorodną i różni się on składem fizycznym i chemicznym, źródłem i wielkością cząsteczek. Główna systematyka podziału pyłu zawieszonego jest oparta na rozróżnieniu w zależności od średniej wielkości ziaren, rozróżniamy Pyły PM10 (<10 mikrometrów) i PM2.5 (<2,5 mikrometrów) i PM1 (<1 mikrometra). Pyły PM10 i PM2.5 są najczęściej wymieniane jako te najbardziej szkodliwe, ponieważ są one wystarczająco małe, aby przeniknąć głęboko do płuc, tak więc potencjalnie stanowią znaczące ryzyko dla zdrowia [159,160]. Główne źródła emisji pyłów PM2.5 w Polsce związane są z wytwarzania energii [81], procesami przemysłowymi, rolnictwem oraz stanowią produkty odpadowe (rys.4).



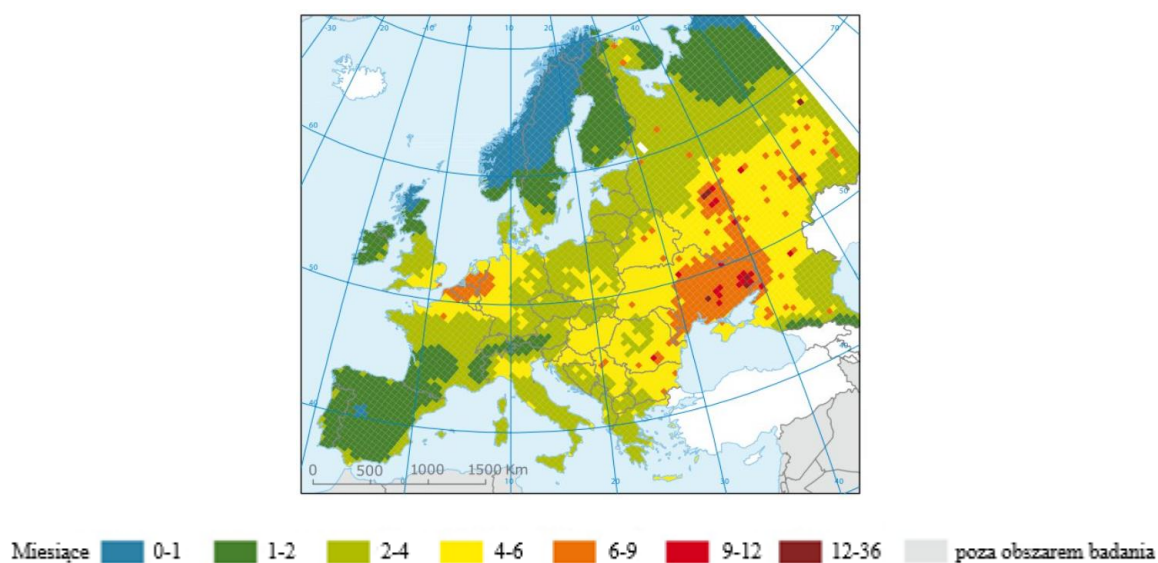
Rys. 4. Emisja pyłu PM2.5 w Polsce w wybranych latach [KOBIZE]

Na rysunku 5 zaprezentowano mapę Europy z szacunkową liczbą miesięcy, o jaką została skrócona średnia długość życia mieszkańców spowodowana przez wytworzone przez człowieka cząstki stałe (dane pochodzą z roku 2000).



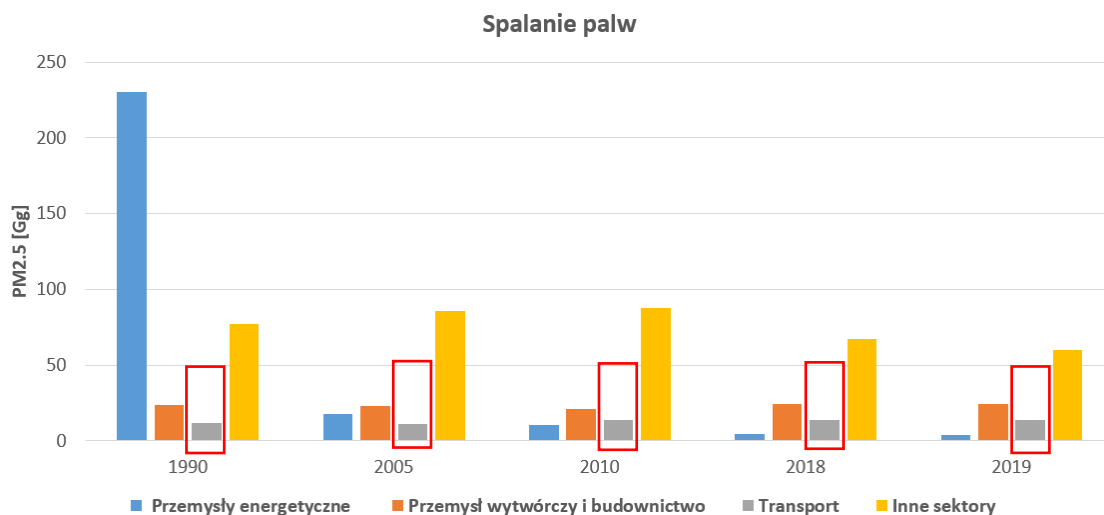
Rys. 5. Szacowane skrócenie długości życia w 2000 roku [EEA]

Mapa poniżej (patrz rys.6) prezentuje natomiast te same wielkości co na rysunku 5 wyrażone w miesiącach, jednakże po wdrożeniu środków zapobiegających zanieczyszczeniu powietrza (dane odniesione do roku 2020). Porównanie danych z rysunku 5 i rysunku wskazuje na poprawę, którą można osiągnąć za pomocą różnych środków ochrony jakości powietrza, na przykład wyższych norm emisji spalin Euro i norm tzw. strefy niskiej emisji [47,166].



Rys. 6. Szacowane skrócenie długości życia po wdrożeniu środków zapobiegawczych [EEA]

Największa część emisji pochodzi z sektora energii (rys.7), ze spalania paliw kopalnych, głównie węgla kamiennego oraz drewna w gospodarstwach domowych. Należy zauważyć, że emisja pyłu PM_{2.5} w 2019 r. zmniejszyła się w porównaniu z rokiem 1990 o 67%, wpływ na tę zmianę miał spadek zużycia węgla kamiennego i drewna w sektorze komunalno-bytowym [92].



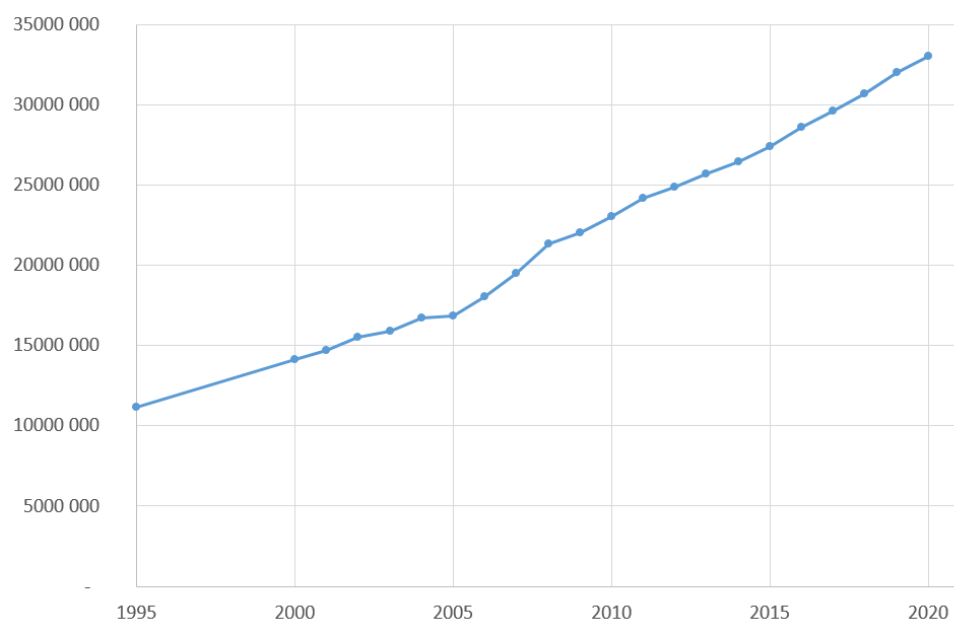
Rys. 7. Emisja pyłów pochodzących ze spalania paliw [KOBiZE]

Niepokojące są dane pochodzące z sektora transportu, gdzie na przestrzeni ostatnich 30 lat pomimo wprowadzenia w roku 1993 normy Euro 1, zawartej w dyrektywie 91/441/EWG poziom emisji pyłów wzrósł o kilkanaście procent (rys.8).



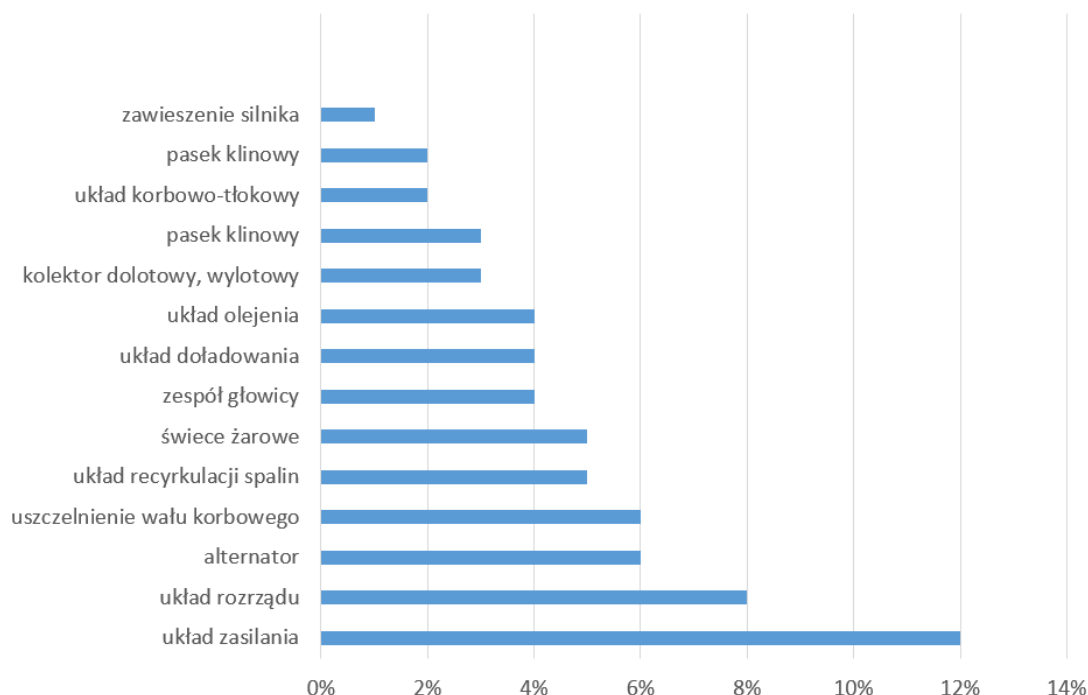
Rys. 8. Emisja pyłów pochodzących z transportu [KOBiZE]

Jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać w ponad 200 procentowym wzroście liczby pojazdów (rys.9) na przestrzeni ostatnich 30 lat. Należy jednak zauważyć, iż w ciągu trwania tego okresu (30 lat) przepisy norm emisji spalin zostały znacznie zaostrzone, czego wynikiem jest dzisiejsza norma Euro 6d. Pod uwagę należy również wziąć fakt, iż pojazdy z przed normy Euro 1 (1993) były cały czas użytkowane i nie zostały wyeliminowane z ruchu drogowego co również miało bezpośredni wpływ na poziom i emisję zanieczyszczeń [92].



Rys. 9. Pojazdy samochodowe zarejestrowane w Polsce – stan na grudzień 2020r [KOBiZE]

Równie ważnym aspektem mającym istotny wpływ na emisję zanieczyszczeń jest ogólny stan techniczny pojazdu ze szczególnym uwzględnieniem układu napędowego (rys.10) [10, 11, 12, 21, 22, 43, 50, 51, 68, 79].



Rys. 10. Procentowy udział uszkodzeń [Eurotax]

Sama procedura dopuszczania pojazdów do ruchu, jak również istniejące praktyki przeprowadzania kontroli oraz wymagania dotyczące urządzeń diagnostycznych wykorzystywanych na Stacji Kontroli Pojazdów, nie są w stanie skutecznie wyeliminować z ruchu drogowego pojazdów przekraczających wyznaczone normy emisji spalin [16, 26, 49, 61]. Mało efektywne w tym zakresie są również działania Policji oraz służb ITD, których kontrole są sporadycznie i wyrwykowe, przez co niemożliwe staje się zweryfikowanie, oraz wycofanie z ruchu pojazdów stwarzających zagrożenie dla środowiska naturalnego. Akcje te związane są zazwyczaj z konkretnymi wydarzeniami lub przy okazji rutynowych kontroli drogowych [89,120,130]. Pomimo postępów w technologii urządzeń kontrolno-pomiarowych i regulacjach dotyczących emisji, weryfikacja i kontrola emisji pozostają wyzwaniem ze względu na różnorodność zastosowań silników oraz paliw służących do ich zasilania [4, 14, 15, 32, 54, 113]. Należy również podkreślić, iż silniki spalinowe znajdują zastosowanie w wielu różnych obszarach, od transportu osób i towarów po przemysł, rolnictwo i energetykę [66, 67, 70, 71, 129]. Każde z tych zastosowań ma swoje specyficzne wymagania dotyczące mocy, efektywności i emisji oraz sposobu pracy silników. W związku z tym, trudno jest opracować uniwersalne metody kontroli emisji, które spełniałyby wszystkie te wymagania. Badania nad

kontrolą emisji ze silników spalinowych są ciągle prowadzone w celu rozwijania bardziej efektywnych i ekologicznych technologii [5, 6, 13, 23, 29]. Wyzwania te obejmują poprawę wydajności istniejących systemów kontroli emisji, opracowanie nowych technologii redukcji emisji, zwiększenie zrozumienia procesów emisji oraz opracowanie metod monitorowania i weryfikacji emisji w rzeczywistych warunkach użytkowania [4, 5, 31, 32, 33, 34, 76].

Emisja szkodliwych substancji generowanych przez silniki spalinowe stanowi istotne wyzwanie dla ochrony zdrowia publicznego i środowiska. Jak już wspomniano pomimo postępów w technologii i regulacjach, kontrola i redukcja emisji pozostają złożonym problemem, który wymaga ciągłych badań, udoskonaleń i innowacji [82, 87, 92, 99, 100]. Wdrażanie skutecznych rozwiązań technologicznych oraz promowanie świadomości ekologicznej i zrównoważonego rozwoju jest kluczowe dla ograniczenia negatywnego wpływu emisji ze silników spalinowych.

1.2. Systemy telemetryczne i pomiar emisji spalin

W porównaniu z innymi obszarami wiedzy, dostępność literatury naukowej związanej z funkcjonowaniem i wykorzystaniem telemetrycznych systemów pomiaru emisji spalin jest znacząco ograniczona. Ten stan rzeczy częściowo wynika z wysokich wymagań technicznych związanych z przeprowadzaniem badań w tym zakresie [96,98,99,100,101] oraz z obszaru zainteresowań producentów samochodów, którzy chronią swoje rozwiązania techniczne. Niemniej jednak, główną przyczyną tej ograniczonej dostępności publikacji jest skomplikowana natura problemów występujących w trakcie funkcjonowania tych systemów telemetrycznych, w szczególności w zakresie pomiaru emisji spalin w warunkach dynamicznych tzw. stanach nieustalonych oraz wpływu stanu technicznego pojazdu na tą emisję. Istnieje wiele czynników wpływających na procesy dynamiczne, które kształtują zarówno środowisko pracy systemu telemetrycznego, jak i jakość uzyskanych wyników pomiaru emisji spalin [7, 8, 33, 34, 41, 114]. To zróżnicowanie czynników znacząco utrudnia próby ujednolicenia zjawisk związanych z tym zagadnieniem.

Dodatkowo, wyniki pomiarów często wykazują dużą zmienność, co wprowadza dodatkową trudność w interpretacji uzyskanych danych i wyciąganiu jednoznacznych wniosków z przeprowadzonych eksperymentów [119, 126, 104, 131]. Dostępne źródła badań naukowych na ogół dotyczą bardzo wąskiego obszaru zagadnień związanych z tą problematyką, tylko niektóre z nich stanowią próbę opisu dynamiki funkcjonowania systemów telemetrycznych i pomiaru emisji spalin w sposób bardziej lub mniej całościowy.

Jak już wspomniano wiele prac badawczych oraz analiz specjalistycznych koncentruje się na określonych obszarach wpływających na emisję spalin z pojazdów. Prace te charakteryzują się głębokim zanurzeniem w specyficznych zagadnieniach, takich jak inżynieria silników, skład chemiczny paliw, aerodynamika pojazdów, infrastruktura drogowa, styl jazdy, przebyta trasa, technologie redukcji szkodliwych składników emisji oraz wpływ warunków atmosferycznych [9, 24, 27, 35, 64, 65, 78, 83].

Poniżej przedstawiono przegląd zagadnień, które ze względu na proponowane przez autora rozprawy rozwiązanie są ściśle związane z problematyką pracy, są to publikacje na temat (w pracy bliżej zaprezentowano jedynie wybrane publikacje):

– **Infrastruktury drogowej**

Badania przeprowadzone przez mgra inż. Arkadiusza Stojckiego w rozprawie doktorskiej „*Badania wpływu topografii terenu na emisję związków szkodliwych spalin samochodów osobowych*” wykazują, że topografia terenu odgrywa kluczową rolę w emisji zanieczyszczeń przez samochody osobowe [135]. W terenach płaskich, emisja zanieczyszczeń jest znacznie niższa w porównaniu do terenów o zróżnicowanej topografii. Badanie to wskazuje, że standardowe testy emisji, które często symulują jazdę w terenie płaskim, mogą nie oddawać w pełni rzeczywistego obciążenia środowiska generowanego przez pojazdy eksploatowane w różnych warunkach terenowych. Choć badania mgra inż. Arkadiusza Stojckiego dostarczają ważnych informacji na temat wpływu topografii terenu na emisję zanieczyszczeń, istnieje jednak wiele niewiadomych i aspektów, które wymagają dalszej eksploracji. Przede wszystkim, nie jest określone jakie są dokładne mechanizmy odpowiedzialne za zwiększoną emisję w terenach o zróżnicowanej topografii? Czy jest to wynik większego zużycia paliwa, zmienionych warunków spalania, pracy w warunkach nieustalonych czy może innych czynników? Ponadto nie wiadomo, jakie technologie lub strategie mogą być stosowane, aby zmniejszyć emisję zanieczyszczeń w trudnych warunkach topograficznych? Kolejnym pytaniem jest, czy istnieją konkretne modele pojazdów lub technologie silnikowe, które są bardziej odporne na wpływ ukształtowania terenu? Wskazane jest również przeprowadzenie badań w różnych warunkach klimatycznych i sezonowych, aby zrozumieć, jak te czynniki współdziałają z topografią w kwestii emisji zanieczyszczeń.

Kanok Boriboonsomsin z University of California i Matthew J. Barth z University of California, Riverside w artykule "Real-World CO₂ Impacts of Traffic Congestion" opublikowanym w czasopiśmie "Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board" w 2008 roku, dokonali kompleksowego przeglądu badań nad wpływem infrastruktury drogowej na emisję spalin pojazdów [25]. Podstawowy wniosek

płynący z ich pracy to stwierdzenie, że rodzaj i stan nawierzchni drogowej mają istotny wpływ na emisję zanieczyszczeń z pojazdów poruszających się po tych drogach. Autorzy wskazują, że gładkie i równe nawierzchnie pozwalają kierowcom utrzymywać stałą prędkość jazdy. Stabilna prędkość jazdy przekłada się na zmniejszenie emisji spalin w porównaniu do sytuacji, kiedy kierowcy muszą często zmieniać prędkość. Nierówności, ubytki i wyboje w nawierzchni drogowej wymuszają na kierowcach częstsze zmiany prędkości. Gwałtowne przyspieszenia i hamowania, konieczne do pokonywania takich przeszkód, prowadzą do zwiększenia emisji zanieczyszczeń z układów wydechowych pojazdów. Kluczowym wnioskiem jest więc stwierdzenie, że odpowiednie planowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury drogowej mogą znacząco ograniczyć negatywny wpływ transportu na środowisko poprzez redukcję emisji spalin. Artykuł ten stanowi ważny wkład w zrozumienie złożonych zależności pomiędzy parametrami infrastruktury drogowej a emisją zanieczyszczeń z pojazdów. Wnioski te mają istotne implikacje praktyczne dla planowania, projektowania i zarządzania siecią drogową w celu minimalizacji negatywnego wpływu transportu na środowisko naturalne.

– Stylu jazdy

Podobne badania zostały przeprowadzone przez mgra inż. Macieja Andrzejewskiego, lecz w kontekście stylu jazdy, wskazują one, iż styl jazdy kierowcy ma bezpośredni wpływ na emisję zanieczyszczeń oraz zużycie paliwa [7]. Stosowanie zasad eco-drivingu, czyli jazdy ekologicznej i ekonomicznej, przynosi wymierne korzyści dla środowiska. W szczególności, w warunkach miejskich, gdzie występują częste przyspieszania, hamowania i postoje, zastosowanie tych zasad prowadzi do znaczącego zmniejszenia emisji szkodliwych substancji. Dzięki temu, można nie tylko zmniejszyć negatywny wpływ na środowisko, ale również oszczędzić na kosztach eksploatacji pojazdu. Badania te podkreślają potrzebę edukacji kierowców w zakresie jazdy ekologicznej oraz promowania takiego stylu jazdy wśród społeczeństwa. Pomimo iż praca dostarcza ważnych informacji na temat wpływu stylu jazdy na emisję zanieczyszczeń i zużycie paliwa, istnieje wiele aspektów, które wymagają dalszego pogłębiania. Przede wszystkim, jakie są dokładne mechanizmy odpowiedzialne za zmniejszenie emisji przy stosowaniu zasad eco-drivingu? Czy istnieją inne, nieuwzględnione w badaniach, czynniki wpływające na efektywność jazdy ekologicznej? Ponadto, jakie technologie lub narzędzia mogą być stosowane, aby pomóc kierowcom w stosowaniu zasad eco-drivingu w praktyce? Czy istnieją konkretne modele pojazdów lub technologie silnikowe, które są bardziej odporne na różne style jazdy? Wskazane jest również przeprowadzenie badań w różnych warunkach klimatycznych, aby zrozumieć, jak te czynniki wpływają na efektywność jazdy ekologicznej. W artykule pt.: „Wpływ stylu jazdy według zasad eco-drivingu na emisję

substancji toksycznych z lekkiego samochodu użytkowego" autorstwa Macieja Andrzejewskiego i Mateusza Nowaka zaprezentowane zostały wyniki badań emisji spalin samochodu dostawczego w rzeczywistych warunkach ruchu [8]. Celem badań było określenie wpływu stylu jazdy kierowcy na emisję szkodliwych substancji z silnika pojazdu. Przeprowadzono pomiary stężeń głównych gazowych związków toksycznych emitowanych do atmosfery przez badany pojazd. Do pomiarów wykorzystano mobilną aparaturę badawczą typu PEMS. Badania wykazały znaczący wpływ sposobu prowadzenia pojazdu na emisję zanieczyszczeń. Zastosowanie przez kierowcę agresywnego stylu jazdy skutkowało istotnym wzrostem emisji tlenu węgla (o 17,7%), dwutlenku węgla (o 24,6%) oraz tlenków azotu (o ponad 40%) w porównaniu do jazdy normalnej. Z kolei eco-driving, charakteryzujący się płynną jazdą i ograniczaniem niepotrzebnych przyspieszeń, pozwolił na obniżenie emisji tych związków odpowiednio o 9,9%, 6,9% i 8,5%. Ponadto eco-driving umożliwił ograniczenie zużycia paliwa o 6,6% w porównaniu do jazdy normalnej. Wyniki badań wskazują, że sposób eksploatacji pojazdów ma istotny wpływ na ich właściwości ekologiczne. Dlatego też istotne jest upowszechnianie wśród kierowców zasad eco-drivingu, co może przyczynić się do ograniczenia negatywnego oddziaływania transportu na środowisko naturalne.

– Przebytej trasy

W pracy „Modelowanie i symulacja zużycia paliwa i emisji spalin w ruchu miejskim” autor skupia się na różnorodnych metodach modelowania emisji spalin oraz zużycia paliwa w kontekście ruchu drogowego [152]. W dobie postępu technologicznego oraz rosnącej mocy obliczeniowej współczesnych systemów komputerowych, obserwujemy wzrost zainteresowania w dziedzinie modelowania bazującego na zaawansowanej symulacji komputerowej. W związku z tym, kluczową część tej pracy poświęcono właśnie tej metodologii. Przedstawiono fundamentalne zagadnienia dotyczące symulacji ruchu drogowego, po czym przeprowadzono analizę dostępnych na rynku narzędzi symulacyjnych. Warto podkreślić, że nie wszystkie dostępne na rynku symulatory posiadają funkcjonalność modelowania emisji spalin oraz zużycia paliwa. Szczególną uwagę zwrócono na symulator SUMO, który został wykorzystany w projekcie ProSym i stanowi kluczowe narzędzie w świetle omawianych badań. W kontekście globalnych wyzwań związanych z ochroną środowiska oraz dążeniem do zrównoważonego rozwoju, metody modelowania emisji spalin i zużycia paliwa w ruchu drogowym nabierają szczególnego znaczenia. Z pracy wynika, iż zaawansowane modele symulacyjne mogą pomóc w projektowaniu bardziej efektywnych i ekologicznych systemów transportowych, minimalizując emisję szkodliwych substancji oraz

zużycie paliwa. Ponadto dokładne modele emisji spalin mogą przyczynić się do rozwoju nowych technologii silników, które będą bardziej wydajne i przyjazne dla środowiska a symulacje ruchu drogowego umożliwiają analizę wpływu różnych strategii zarządzania ruchem na emisję spalin, co może prowadzić do wdrażania bardziej efektywnych rozwiązań. Autor w pracy podkreśla, iż w miarę postępu technologicznego i rosnącego zrozumienia wpływu człowieka na środowisko, metody modelowania emisji spalin i zużycia paliwa będą odgrywać kluczową rolę w kształtowaniu przyszłości transportu i jego wpływu na planetę.

– Charakterystyki eksploatacji pojazdu

W publikacji pt. „Analiza emisji węglowodorów z pojazdu z bezpośrednim wtryskiem benzyny w rzeczywistych warunkach ruchu” przeprowadzono szczegółową analizę emisji węglowodorów (HC) w kontekście pojazdów drogowych [54]. Z dokładnej analizy wyników badań można wywnioskować, że kluczowym czynnikiem wpływającym na emisję węglowodorów jest zimny start silnika. Zaobserwowano, że wartości emisji w tym przypadku były sześciokrotnie wyższe w porównaniu z najniższymi zarejestrowanymi wartościami silnika znajdującego się we właściwym stanie cieplnym. Szczególnie interesujące różnice w odniesieniu do normy EURO 6 zaobserwowano podczas jazdy pozamiejskiej. Emisja węglowodorów w tym trybie wynosiła jedynie 2% dopuszczalnej wartości granicznej. Tak niskie wartości emisji można przypisać zastosowaniu w badanym pojeździe technologii bezpośredniego wtrysku paliwa, która jest znana z redukcji emisji HC. Dodatkowym czynnikiem przyczyniającym się do ograniczenia emisji węglowodorów jest prawidłowe działanie reaktora katalitycznego TWC w układzie wydechowym silnika, który utlenia powstałe węglowodory. Uzyskane wyniki badań podkreślają ciągły postęp w technologii silników spalinowych oraz metodach ich eksploatacji. Ewolucja ta świadczy o dążeniu branży motoryzacyjnej do optymalizacji wydajności silników oraz minimalizacji ich wpływu na środowisko naturalne. Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Siedleckiego pt.: „Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofitingu w rzeczywistych warunkach eksploatacji” dotyczy oceny emisji cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych (NRMM - Non-Road Mobile Machinery) w rzeczywistych warunkach eksploatacji po zastosowaniu retrofitingu [129]. Praca podzielona jest na trzy główne etapy: stworzenie wytycznych, budowę filtra oraz jego weryfikację. Wprowadzenie opisuje czym jest grupa NRMM, jakie są prognozy dotyczące przyrostu liczby tego typu maszyn oraz problemy związane z emisją zanieczyszczeń, w szczególności cząstek stałych (PM) i liczby cząstek (PN). Następnie przedstawiono aktualne i przyszłe przepisy dotyczące emisyjności NRMM w

Europie, a także przykłady retrofitingu jako sposobu na ograniczenie emisji przez doposażanie starszych silników w nowoczesne układy oczyszczania spalin. Celem pracy jest ocena emisji cząstek stałych po zastosowaniu retrofitingu w układzie wylotowym maszyn NRMM, do czego wykorzystano mobilne analizatory emisji. Opracowano geometrię nośnika filtra łączącą zalety dwóch najpopularniejszych rodzajów nośników, a następnie zweryfikowano jego skuteczność w badaniach symulacyjnych oraz rzeczywistych. Wyniki badań wykazały znaczne przekroczenie limitów emisji PM i PN w warunkach rzeczywistej eksploatacji w porównaniu do norm homologacyjnych. Zastosowanie autorskiego filtra cząstek stałych pozwoliło na ograniczenie emisji tych zanieczyszczeń, potwierdzając skuteczność proponowanego rozwiązania. Z przeprowadzonych przez cytowanych autorów badań wynika, iż sposób wykorzystania silnika spalinowego generuje konieczność zastosowania specyficznych rozwiązań technicznych zmierzających do obniżenia negatywnych skutków ich działania.

– Stanu technicznego pojazdu

Raport TNO zatytułowany "Approaches for detecting high NO_x emissions of aged petrol cars during the periodic technical inspection" (Metody wykrywania wysokich emisji NO_x w starszych samochodach benzynowych podczas okresowych przeglądów technicznych) został opublikowany 22 kwietnia 2022 roku. Autorami są Norbert E. Ligterink, Mitch Elstgeest, Thomas Frateur, Jessica M. de Ruiter i Pierre Paschinger. Raport został zlecony przez Ministerstwo Infrastruktury i Zarządzania Wodami Holandii. Raport wykazuje, iż mała grupa (6%) samochodów osobowych zasilanych benzyną z wadliwym katalizatorem trójfunkcyjnym odpowiada za dużą część (36%) całkowitych emisji NO_x pochodzących z samochodów osobowych [87]. Emisje NO_x w pojazdach z uszkodzonym konwerterem katalitycznym mogą wzrosnąć nawet dziesięciokrotnie w porównaniu z pojazdami sprawnymi. Obecne testy w holenderskim okresowym badaniu technicznym (PTI) nie są skuteczne w wykrywaniu takich wad co prowadzi do dalszego użytkowania pojazdów z niesprawnym „katalizatorem”. Zaproponowano kilka nowych metod testowych w celu wykrywania wadliwych trójfunkcyjnych konwerterów, w tym zaostrożenie limitu wartości lambda w teście emisji PTI i dodatkowe testowanie zamontowanej sondy lambda. Rozważano również dodatkowy test rozruchu na zimno jako możliwość wykrywania wadliwych konwerterów. W celu wykrycia poważnych wad w starszych pojazdach proponuje się jednorazowe, kompleksowe badanie pojazdu z przebiegiem ponad 160 000 km. Autorzy proponują, aby dane PTI i wyniki testów były zbierane w scentralizowanej bazie danych w celu wykorzystania danych statystycznych w przyszłych badaniach. Wspominają również, że nadzór rynku nad funkcjonowaniem systemu

OBD (On-Board Diagnostics) i jakością części zamiennych może również pomóc, a niezdiagnozowane wady prowadzą do znacznego wzrostu emisji NO_x, co ma negatywny wpływ na jakość powietrza i zdrowie publiczne. Artykuł autorstwa Stanisława Pałubickiego i Wiesława Czapiewskiego opublikowany w czasopiśmie AUTOBUSY 7-8/2017 pt.: „Wpływ okresowych badań technicznych na bezpieczeństwo ruchu drogowego” podejmuje tematykę związku pomiędzy systemem obowiązkowych, okresowych badań technicznych pojazdów a ich faktycznym stanem technicznym [110]. Autorzy analizują, w jaki sposób przeprowadzanie badań technicznych i weryfikacja stwierdzonych usterek wpływa na niezawodność eksploatacyjną pojazdów i bezpieczeństwo ruchu drogowego. W ramach przeglądu literatury autorzy omawiają następujące kwestie:

- Sposób przeprowadzania okresowych badań technicznych pojazdów, w tym zakres badań, podział usterek na drobne, istotne i stwarzające zagrożenie oraz procedury identyfikacji pojazdu, kontroli stanu technicznego kluczowych podzespołów i układów.
- Analizę stanu technicznego pojazdów poruszających się po polskich drogach, w tym średni wiek samochodów oraz ustalenia kontroli NIK dotyczące nieprawidłowości w funkcjonowaniu stacji kontroli pojazdów.
- Przyczyny wypadków drogowych związane z niesprawnym stanem technicznym pojazdów, w oparciu o dane statystyczne Policji. Autorzy zwracają uwagę na trudności w prawidłowej identyfikacji usterek technicznych jako przyczyny zdarzeń.

W podsumowaniu autorzy stwierdzają, że obowiązkowe, okresowe badania techniczne pojazdów nie realizują zakładanego celu zmniejszenia liczby wypadków, a kluczowe znaczenie ma stan świadomości użytkowników pojazdów.

Do zgoda odmiennych wniosków dochodzą Zbigniew Łukasik i Sylwia Olszańska w artykule pt.: „Wpływ przeglądów technicznych na bezpieczeństwo w transporcie drogowym” opublikowanym w czasopiśmie "AUTOBUSY" 10/2016. Podejmują tematykę wpływu systemu okresowych badań technicznych pojazdów na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Autorzy analizują czynniki zewnętrzne i wewnętrzne, które mają istotny wpływ na jakość przeprowadzanych badań technicznych [89]. Czynniki zewnętrzne wpływające na jakość systemu badań technicznych, takie jak: średni wiek i przebieg eksploatowanych pojazdów, niska jakość obsługi i napraw, duży odsetek pojazdów poruszających się bez ważnych badań technicznych, import używanych pojazdów, brak nadzoru nad recyklingiem oraz jakością części zamiennych. Czynniki wewnętrzne, w tym: nieodpowiedni system szkolenia i

egzaminowania diagnostów, brak szkoleń okresowych, duża konkurencja na rynku badań, przeświadczenie o wystarczalności corocznego badania, biurokracja, brak dostępu do informacji technicznych, brak nadzoru nad rzeczoznawcami i modyfikacjami pojazdów. Regulacje Unii Europejskiej dotyczące okresowych badań przydatności do ruchu drogowego, w tym: częstotliwość badań, kwalifikacje diagnostów, klasyfikacja usterek, zapewnienie jakości badań oraz rejestracja przebiegu pojazdów. Autorzy podsumowują, że wpływ systemu okresowych badań technicznych na bezpieczeństwo ruchu drogowego jest istotny, a kluczową rolę odgrywa system wspomagania decyzji w obszarze utrzymania środków transportu.

W artykule pt.: „Badania wpływu stanu technicznego eksploatowanych pojazdów samochodowych na emisję szkodliwych składników spalin” autorstwa Marka Idziora i Edwarda Czaplińskiego opublikowanego w czasopiśmie "Combustion Engines" w 2015 roku. Autorzy przedstawiają analizę wpływu stanu technicznego pojazdów eksploatowanych w Polsce na emisję zanieczyszczeń z układów wydechowych. Autorzy prezentują wyniki badań uzyskane podczas obowiązkowych okresowych kontroli technicznych pojazdów [68]. Pokazują wpływ zarówno czasu użytkowania, jak i przebiegu pojazdów na trwałość elementów ograniczających emisję w wybranych grupach pojazdów. W podsumowaniu wskazują, że znaczna część eksploatowanych pojazdów nie spełnia wymaganych limitów emisji spalin podczas okresowych badań technicznych, co jest związane z długim okresem eksploatacji i nieprawidłowym stanem technicznym systemów ograniczających emisję.

Z przytoczonych publikacji naukowych wynikają dwa zasadnicze wnioski pierwszy z nich to rysujący się brak skutecznej i prostej w aplikacji metody kontroli obciążenia środowiska przez eksploatowany pojazd a drugi to potwierdzenie, iż stan techniczny pojazdu ma decydujące znaczenia na poziom emisji.

– Korelacje, predykcja

Do ciekawych wniosków doszli autorzy artykułu zatytułowanego „Wspomagane uczeniem maszynowym zdalne monitorowanie emisji NO_x z pojazdów ciężarowych z silnikami wysokoprężnymi o dużej ładowności w oparciu o strumienie danych pochodzących z systemu OBD”. Autorami są Yang Ge, Pan Hou, Tao Lyu, Yitu Lai, Sheng Su, Wanyou Luo, Miao He i Lin Xiao. Artykuł został opublikowany w czasopiśmie "Atmosfera". W abstrakcie wspomniano, że większość obecnych metod monitorowania emisji NO_x w rzeczywistych warunkach jazdy opiera się na pomiarach bezpośrednich, które mogą być obciążone dużą niepewnością w zakresie poprawności wyników z powodu ograniczeń jakimi charakteryzują się czujniki. W artykule zaproponowano model lasu losowego (RF), który wykorzystuje dane

diagnostyki pokładowej (OBD), monitorowania emisji NO_x realizowanego w czasie rzeczywistym w trybie pracy online [57]. Model ten został porównany z regresją logistyczną przy użyciu danych zebranych z pojazdów ciężarowych. Wyniki pokazały, że model RF jest bardziej dokładny w identyfikacji nieprawidłowego stanu emisji. W dalszej części artykułu omówiono wpływ emisji z silników wysokoprężnych na jakość powietrza, zwłaszcza w Chinach, gdzie ciężarówki z silnikami wysokoprężnymi stanowią znaczący procent rocznych emisji NO_x i PM. Podkreślono, że chociaż elektryfikacja i „hybrydyzacja” mogą zmniejszyć emisje, są one ograniczone do zastosowań miejskich z powodu obaw dotyczących zasięgu i ładowności. W krótkiej perspektywie pojazdy z silnikiem ZS są nadal niezastąpione w transporcie drogowym, co czyni ograniczenie ich emisji priorytetem. Dokument porusza również temat diagnostyki pokładowej (OBD) jako metody monitorowania osiągow pojazdu i kontrolowania emisji spalin. OBD może identyfikować usterki emisyjne i ostrzegać kierowcę, ale jego skuteczność zależy od szybkości naprawy pojazdu. Wspomniano o terminalu pojazdu do zdalnego zarządzania emisją, który umożliwia organom ochrony środowiska szybkie uzyskiwanie informacji o emisjach. Podsumowując, artykuł prezentuje badania nad wykorzystaniem modeli uczenia maszynowego do zdalnego monitorowania i identyfikacji wysokich emisji NO_x w pojazdach ciężarowych, co może przyczynić się do lepszego nadzoru nad przestrzeganiem przepisów środowiskowych.

Artykuł pt.: "Modelowanie emisji z wykorzystaniem symulacji mikroskopowych" autorstwa Konrada Biszko, Jacka Oskarbskiego w czasopiśmie TRANSPORT MIEJSKI I REGIONALNY 2022 porusza kluczowe zagadnienia związane z modelowaniem emisji spalin z wykorzystaniem mikroskopowych symulacji ruchu drogowego [23]. Autorzy podjęli się opracowania modelu ruchu, który umożliwia obliczenie emisji z pojazdów z uwzględnieniem typu skrzyżowania oraz wartości natężeń ruchu, koncentrując się na wartościach zużycia paliwa i emisji dwutlenku węgla. W ramach pracy dokonano przeglądu literatury w zakresie czynników wpływających na emisję, zależnych od człowieka, pojazdu i infrastruktury. Przedstawiono również przegląd matematycznych modeli pozwalających na obliczenie wartości chwilowych, często związanych ze zużyciem paliwa, które stanowią podstawę do oszacowania emisji. Wybrany model został zaimplementowany do modułu oprogramowania mikrosymulacyjnego w celu analizy wielkości emisji, w zależności od natężenia ruchu na skrzyżowaniu o ruchu okrężnym i skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu. Autorzy przedstawili wyniki badań z uwzględnieniem wariantów modeli sieci obejmujących jedynie dojazd i przejazd przez skrzyżowanie oraz niezależnie uwzględniających rozpędzanie pojazdów za skrzyżowaniem. W końcowej części artykułu omówiono wybrane założenia,

możliwe do uwzględnienia w analizach i mające wpływ na osiągnięte wyniki, kwestie dokładności modelu oraz zaproponowano rozwiązania pozwalające na zwiększenie poziomu szczegółowości osiąganych wyników. Przeprowadzone analizy pozwoliły na wykazanie wątpliwości w odniesieniu do dotychczasowych wyników badań, które wskazywały jednoznacznie skrzyżowania typu rondo, jako rozwiązania przyczyniające się do redukcji emisji substancji szkodliwych. Autorzy wskazują, że dla natężeń do około 600 P/h dla każdego z wlotów ronda są bardziej ekologiczne, jeśli nie uwzględnia się ponownego rozpędzania pojazdów po zjechaniu ze skrzyżowania. Większe wartości natężenia oraz większy zakres obszarowy analizy, uwzględniający ponowne rozpędzanie pojazdów za skrzyżowaniem, wskazują, że skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu są bardziej ekologiczne pod kątem wartości emisji dwutlenku węgla.

Z tych publikacji wynika, iż zastosowanie zaawansowanych rozwiązań informatycznych może w znaczący sposób zwiększyć skuteczność analizy danych oraz może przyczynić się do weryfikacji niektórych powszechnie uznanych za ekologiczne rozwiązań technicznych.

– Diagnostyka

Artykuł opublikowany w czasopiśmie *Autobusy* 2018/06 autorstwa Agnieszki Aleksandry Szokało i Marcina Rychtera pt.: „Rozwój systemu diagnostyki pokładowej samochodów osobowych w świetle zasady działania systemu OBD”. przedstawia rozwój systemów diagnostyki pokładowej samochodów osobowych na przestrzeni lat. Omówiono w nim różnice między normami i nazewnictwem obowiązującym na całym świecie. Zaprezentowano algorytm odczytywania kodów błędów oraz przykładowe kody błędów i ich interpretację. Autorzy opisują ewolucję systemów diagnostyki pokładowej, począwszy od pierwszego systemu OBD I, aż po najnowsze rozwiązania OBD II/EOBD [136]. Przedstawiono kluczowe cechy tych systemów, takie jak efektywność diagnostyczna, uniwersalność oraz dostępność. Omówiono zasadę działania systemów OBD II/EOBD, w tym sposób kodowania usterek i interpretację przykładowych kodów. Artykuł wskazuje również na dalszy rozwój systemów diagnostyki pokładowej w kierunku rozwiązań OBD III, które mają zapewniać jeszcze większą dokładność i automatyzację w wykrywaniu oraz zgłaszaniu usterek. W artykule pt.: „Procedury diagnozowania pojazdów samochodowych zgodnych z normą OBD II”. opublikowanym w czasopiśmie *Diagnostyka* '28 Sławomir Wierzbicki omawia kluczowe zagadnienia związane z rozwojem i zastosowaniem systemów diagnostyki pokładowej w nowoczesnych pojazdach samochodowych [145]. Autor szczegółowo przedstawia ewolucję tych systemów, począwszy od pierwszych rozwiązań OBD I, aż po najnowsze standardy OBD II i EOBD. Podkreśla, że

wprowadzenie tych norm miało na celu przede wszystkim ograniczenie emisji związków toksycznych do atmosfery przez pojazdy, a także ujednolicenie sposobu sterowania i diagnostyki elektronicznych układów samochodowych. Istotną częścią artykułu jest omówienie wymagań stawianych pojazdom zgodnym z normą OBD II/EOBD, w tym szczegółowy opis złącza diagnostycznego, protokołów komunikacji oraz sposobów podłączenia sterowników elektronicznych. Autor wskazuje, że dzięki ujednoliceniu interfejsu diagnostycznego możliwe jest diagnozowanie praktycznie wszystkich układów pojazdu za pomocą jednego gniazda, co znacznie ułatwia i przyspiesza proces diagnostyczny. Podkreśla również, że norma OBD II/EOBD umożliwia dostęp do danych przechowywanych w mikrosterownikach, otwierając nowe możliwości w zakresie oceny stanu technicznego pojazdów. W dalszej części artykułu przedstawiono przykład praktycznego zastosowania oprogramowania diagnostycznego zgodnego ze standardem VAG do diagnozowania układu zasilania silnika wysokoprężnego. Opisano poszczególne etapy diagnostyki, takie jak odczyt i kasowanie kodów usterek, monitorowanie parametrów pracy układu oraz analiza zarejestrowanych danych. Autor wskazuje, że tego typu proste interfejsy diagnostyczne wraz z odpowiednim oprogramowaniem pozwalają na skuteczną i precyzyjną diagnozę pojazdów, co czyni je przydatnymi narzędziami nie tylko w dużych stacjach serwisowych, ale również w małych warsztatach naprawczych. W podsumowaniu artykułu autor zwraca uwagę na potencjalne zagrożenia związane z możliwością manipulowania informacjami zapisanymi w sterownikach pojazdów, co może być wykorzystywane np. do fałszowania przebiegu aut. Podkreśla jednak, że pomimo tych obaw, wprowadzenie norm OBD II/EOBD stanowi istotny krok w kierunku ujednolicenia i upowszechnienia diagnostyki elektronicznych układów samochodowych.

W Artykule autorstwa Marka Jankowskiego pt.: "Wprowadzenie do pokładowego diagnozowania pojazdów samochodowych" opublikowanym w czasopiśmie *Diagnostyka* '33 podczas XII konferencji „Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów” przedstawia kluczowe zagadnienia związane z rozwojem i funkcjonowaniem systemów diagnostyki pokładowej w nowoczesnych pojazdach samochodowych [69]. Autor, wykorzystując przykład silnika spalinowego, charakteryzuje sposób sterowania pracą podzespołów samochodu z uwzględnieniem kryteriów ekologicznych i bezpieczeństwa. Podkreśla, że w konstrukcji pojazdów zaimplementowano elektroniczne, inteligentne układy sterujące, a wymagania dotyczące monitorowania stanu technicznego wynikają przede wszystkim z regulacji środowiskowych i kwestii bezpieczeństwa. Omawia również szczegółowo budowę gniazda diagnostycznego OBD II/EOBD oraz przeznaczenie poszczególnych jego styków. Przedstawia również pięć podstawowych protokołów transmisji danych, które mogą być zaimplementowane

w pojazdach. Następnie opisuje różne tryby pracy zewnętrznych urządzeń diagnostycznych, pozwalające na odczyt bieżących parametrów, kodów usterek, testowanie podzespołów wykonawczych, a także uzyskanie informacji o pojeździe zapisanych w sterowniku. W dalszej części artykułu autor podkreśla, że choć standardowa diagnostyka EOBD jest niewystarczająca do pełnej oceny stanu technicznego pojazdu, to rozwój uniwersalnych testerów oraz współpraca producentów aut i sprzętu diagnostycznego znacznie poprawiły możliwości diagnozowania, również starszych pojazdów. Wskazuje również na kluczową rolę zintegrowanych systemów informacyjnych, pozwalających na szybką wymianę danych i dostęp do szczegółowych informacji o diagnozowanym układzie. Na zakończenie artykułu autor przedstawia prawdopodobne kierunki rozwoju systemów diagnostyki pokładowej, wskazując m.in. na trend całkowitego ujednolicenia protokołów komunikacyjnych w oparciu o standard CAN oraz koncepcje wykorzystania komunikacji bezprzewodowej do zdalnej kontroli stanu technicznego pojazdów.

Przytoczone publikacje wskazują na prawdopodobne kierunki rozwoju systemów OBD oraz co niezmiernie ważne podkreślają znaczenie możliwości wykorzystania danych pochodzących z szyny CAN do innych zastosowań np. monitorowania również w czasie rzeczywistym parametrów pracy silnika.

– Sondy Lambda

Artykuł zatytułowany „Iteracyjna adaptacyjna kontrola stosunku powietrza do paliwa” autorstwa D. Ruppa, Ch. Ondera i L. Guzzelli, opublikowany przez Measurement and Control Laboratory ETH Zurich, przedstawia nowoczesne podejście do kontroli stosunku powietrza do paliwa A/F w silnikach z zapłonem iskrowym SI przy użyciu szerokopasmowych czujników lambda [123]. Badanie to ma na celu zwiększenie efektywności systemu kontroli emisji spalin poprzez adaptacyjne dostosowanie algorytmu sterowania do zmieniających się parametrów dynamicznych czujnika. W artykule podkreślono, że kontrola stosunku A/F odgrywa kluczową rolę w ograniczaniu emisji zanieczyszczeń z silników ZI. Trójfunkcyjny konwerter katalityczny, zdolny do jednoczesnej redukcji NO_x oraz utleniania CO i węglowodorów HC, działa optymalnie jedynie w bardzo wąskich granicach stosunku A/F. W celu utrzymania tych parametrów stosuje się zarówno sterowanie wyprzedzające (feedforward), jak i sprzężenie zwrotne (feedback) oparte na danych z szerokopasmowego sondy lambda. Podstawowym problemem omawianym w artykule jest zmienność dynamicznego zachowania sondy lambda w wyniku starzenia, wysokiej temperatury lub trudnych warunków pracy. Typowy czas odpowiedzi nowoczesnych czujników lambda wynosi około 50 ms, ale może się on zwiększyć

nawet 10 - 20 razy, co prowadzi do spadku dokładności i efektywności sterowania. Tradycyjne podejścia projektowe wymagają kompromisu między wydajnością a odpornością na zmienność parametrów, co może być niewystarczające w świetle rosnących wymagań dotyczących redukcji emisji. Autorzy proponują adaptacyjny system sterowania oparty na iteracyjnej metodzie strojenia sprzężenia zwrotnego. Ta metoda umożliwia dostosowanie parametrów sterownika w odpowiedzi na zmieniające się właściwości dynamiczne sondy lambda. Koncepcja opiera się na precyzyjnych eksperymentach, podczas których obliczany jest gradient funkcji wydajności, co pozwala na optymalizację parametrów sterownika. System sterowania wykorzystuje model wewnętrzny, który filtruje sygnał czujnika przy użyciu modelu odwracalnego. Proponowana metoda nie wymaga bezpośredniej znajomości rzeczywistej wartości stałej czasowej czujnika, ponieważ estymacja tego parametru jest wykonywana w sposób iteracyjny na podstawie wyników eksperymentów. Artykuł dowodzi, że adaptacyjna kontrola stosunku A/F, oparta na iteracyjnej metodzie strojenia sprzężenia zwrotnego, jest skutecznym rozwiązaniem pozwalającym na utrzymanie wysokiej jakości sterowania w obecności zmiennych parametrów dynamicznych sondy lambda. Proponowane podejście może znaleźć zastosowanie w nowoczesnych systemach kontroli emisji spalin, przyczyniając się do bardziej efektywnego zarządzania procesem spalania i redukcji emisji zanieczyszczeń. Artykuł „Sonda lambda jako sprzężenie zwrotne układu zasilania”, autorstwa dr. inż. Norberta Pedrycy z Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, opublikowany w czasopiśmie *Autobusy*, analizuje wpływ sondy lambda na skład spalin oraz dawkowanie paliwa w pojazdach samochodowych [111]. Autor przedstawia zarówno teorię działania tego czujnika, jak i praktyczne problemy związane z jego diagnostyką i eksploatacją. Sonda lambda, zainstalowana pomiędzy silnikiem a reaktorem katalitycznym, odgrywa kluczową rolę w regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Działa na zasadzie ogniwa galwanicznego, a generowany przez nią sygnał napięciowy (w zakresie 0,2–0,9 V) jest wykorzystywany w pętli sprzężenia zwrotnego do precyzyjnego dawkowania paliwa. Utrzymanie stechiometrycznego stosunku powietrza do paliwa ($\lambda = 1 \pm 1\%$) pozwala na optymalną pracę konwertera katalitycznego i minimalizację emisji zanieczyszczeń. W artykule omówiono typowe usterki sond lambda, które mogą wynikać z mechanicznego uszkodzenia, zakoksovania, niewłaściwego paliwa czy innych awarii pojazdu. Podkreślono, że usterki czujnika tlenu często są wtórne wobec innych problemów, takich jak uszkodzenie doładowania czy zużycie wtryskiwaczy. Niestety, współczesne systemy diagnostyczne (OBD/EOBD) nie zawsze są w stanie wykryć subtelne problemy związane z niepoprawnym działaniem sondy, co prowadzi do paradoksalnych sytuacji, w których pojazd nie spełnia norm emisji spalin, mimo że nie wykazuje zapisanych

błędów w pamięci sterownika. W artykule wskazano, że tradycyjna diagnostyka szeregową (OBD) nie jest wystarczająca do pełnego rozpoznania uszkodzeń sondy lambda. Konieczne jest stosowanie diagnostyki równoległej, polegającej na „podsluchiowaniu” sygnałów z czujników za pomocą oscyloskopu i innych urządzeń pomiarowych. Tego typu podejście pozwala na identyfikację rzeczywistych parametrów pracy układu oraz lokalizację usterki. Autor przytacza przykład analizy sygnałów w silniku BMW M52, gdzie tylko dzięki diagnostyce równoległej udało się zlokalizować uszkodzoną sondę lambda i poprawić efektywność pracy układu zasilania. Artykuł podkreśla, że skuteczna diagnostyka układu zasilania wymaga nie tylko znajomości działania układów elektronicznych, ale również zaawansowanych narzędzi diagnostycznych i doświadczenia. Systemy OBD i EOBD, choć przydatne, mają ograniczoną zdolność rozpoznawania rzeczywistych usterek. Autor wskazuje, że właściwa analiza problemów związanych z sondą lambda musi uwzględniać zarówno diagnostykę pierwotnych przyczyn awarii, jak i wtórnych skutków nieprawidłowego działania tego czujnika. Artykuł „Badanie sondy lambda w systemie Motronic”, autorstwa prof. dr hab. inż. Stanisława Duera i Szymona Warczyka, opublikowany w czasopiśmie *Autobusy* w 2017 roku, porusza zagadnienie diagnostyki i oceny sprawności sondy lambda w systemie sterowania silnikiem firmy Bosch znanym jako Motronic [45]. Praca koncentruje się na znaczeniu sondy lambda dla optymalizacji procesu spalania i minimalizacji emisji spalin oraz na metodach oceny jej działania. Autorzy zwracają uwagę, że podstawowe metody diagnostyczne, takie jak użycie diagnoskopów, są niewystarczające do pełnej oceny stanu sondy lambda. Proponują bardziej zaawansowaną metodę opartą na pomiarze sygnałów sterujących układem wtrysku paliwa i tworzeniu tzw. „map roboczych”. Mapy te przedstawiają zależności między parametrami pracy silnika, takimi jak czas wtrysku, prędkość obrotowa, temperatura silnika oraz stopień otwarcia przepustnicy. W badaniach zastosowano stanowisko oparte na diagnoskopie KTS 530 firmy Bosch, umożliwiające symulację pracy sondy lambda. Pomiar obejmował analizę zależności między czasem wtrysku, temperaturą silnika, prędkością obrotową i innymi parametrami. Uzyskane dane porównywano z wartościami referencyjnymi zawartymi w serwisowych bazach danych, takich jak np.: Autodata. Badania wykazały, że pomiary sygnałów sterujących wtryskiwaczami i ich analiza za pomocą map roboczych pozwalają na precyzyjne określenie wpływu sondy lambda na parametry pracy silnika. Wyniki potwierdziły, że stan sondy ma istotny wpływ na czas wtrysku paliwa oraz na zdolność sterownika do utrzymania optymalnego składu mieszanki w różnych warunkach pracy silnika. Artykuł podkreśla, że diagnostyka sondy lambda wymaga zaawansowanych narzędzi pomiarowych i metod analitycznych, takich jak wykorzystanie map roboczych. Proponowane podejście umożliwia bardziej precyzyjną ocenę

sprawności układu i identyfikację problemów, które mogą wpływać na zużycie paliwa oraz emisję spalin. Artykuł „Badanie sondy lambda z użyciem diagnoskopu”, autorstwa Stanisława Duera, Pawła Hintzki, Kamila Banaszka i Bartłomieja Struskiego, opublikowany w czasopiśmie *Autobusy* w 2016 roku, porusza tematykę diagnostyki sondy lambda, która odgrywa kluczową rolę w systemie sterowania silnikiem benzynowym [46]. Praca koncentruje się na metodach badania czujnika tlenu, analizie jego sygnałów oraz ocenie wpływu na proces sterowania dawką paliwa. Autorzy podkreślają, że diagnostyka sondy lambda wymaga użycia zaawansowanych narzędzi, takich jak diagnoskopy wyposażone w funkcję rejestracji i analizy sygnałów. Badanie polega na pomiarze napięcia generowanego przez sondę w różnych warunkach pracy silnika, a następnie porównaniu wyników z sygnałami wzorcowymi zapisanymi w bazach danych, takich jak Autodata. W artykule opisano badania przeprowadzone na stanowisku diagnostycznym również z użyciem diagnoskopu KTS 530 firmy Bosch. Pomiary obejmowały analizę napięcia sondy w funkcji zmiennych parametrów pracy, takich jak temperatura silnika, prędkość obrotowa i stopień otwarcia przepustnicy (kąt otwarcia przepustnicy). Badania wykazały, że poprawna praca czujnika tlenu jest kluczowa dla efektywnego sterowania dawką paliwa oraz redukcji emisji spalin. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie referencyjnych parametrów pracy sondy oraz wpływu jej sygnału na działanie układu sterowania. Autorzy zwracają uwagę na konieczność stosowania zaawansowanych metod diagnostycznych, takich jak analiza przebiegów sygnałów, w celu precyzyjnej oceny stanu sondy lambda i całego układu sterowania. Jak już wspomniano artykuł podkreśla znaczenie sondy lambda w zapewnieniu efektywności układu sterowania silnikiem i redukcji emisji spalin. Proponowane metody badawcze, w tym wykorzystanie diagnoskopu i tworzenie map roboczych, pozwalają na bardziej precyzyjną diagnostykę i ocenę sprawności sondy lambda. Artykuł „Wpływ modyfikacji map sterowania silnikiem na wybrane wskaźniki jego pracy”, autorstwa Krystiana Henneka, Krzysztofa Prażnowskiego i Andrzeja Bieńka, wnosi istotne spostrzeżenia dotyczące zastosowania szerokopasmowej sondy lambda w zaawansowanych systemach sterowania silnikiem spalinowym [63]. Sonda lambda została w tej pracy ukazana jako kluczowy element umożliwiający precyzyjną regulację stosunku powietrza do paliwa, co przekłada się zarówno na poprawę parametrów pracy silnika, jak i redukcję emisji szkodliwych substancji. Autorzy w ramach modyfikacji układu wtryskowego zastosowali szerokopasmową sondę lambda Bosch LSU 4.2, która zastąpiła standardową sondę dwustanową. Dzięki swojej zaawansowanej konstrukcji sonda ta pozwala na ciągły pomiar współczynnika lambda w szerokim zakresie, co umożliwia dokładniejsze monitorowanie i korektę składu mieszanki paliwowo-powietrznej w czasie rzeczywistym. Ta precyzja w

sterowaniu dawką paliwa okazała się szczególnie istotna w trybach pracy silnika wymagających dużej dokładności, takich jak zmienne obciążenia czy wysokie prędkości obrotowe. Dane z szerokopasmowej sondy lambda odegrały kluczową rolę w opracowaniu i modyfikacji map sterujących, takich jak mapa sprawności wolumetrycznej (VE), która umożliwia dokładne wyliczenie dawki paliwa, mapa stosunku powietrza do paliwa (AFR), wskazująca docelowe wartości dla optymalnego procesu spalania, oraz mapa kąta wyprzedzenia zapłonu, korygowana na podstawie sygnałów z sondy i czujnika spalania stukowego. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że wprowadzenie szerokopasmowej sondy lambda znacząco wpłynęło na poprawę kontroli emisji spalin i parametrów pracy silnika. Redukcji uległa emisja tlenków azotu, tlenku węgla i węglowodorów, szczególnie w trybie ekonomicznym pracy silnika. Jednocześnie sonda lambda umożliwiła dynamiczną adaptację składu mieszanki paliwowo-powietrznej do zmiennych warunków pracy silnika, co przełożyło się na poprawę osiągnięć, takich jak moc i moment obrotowy. Dzięki zastosowaniu szerokopasmowej sondy lambda możliwe było wyeliminowanie ograniczeń tradycyjnych dwustanowych sond lambda, które mogą pracować jedynie w wąskim zakresie współczynnika lambda wynoszącym około 1. Autorzy w swoim opracowaniu podkreślili znaczenie szerokopasmowych sond lambda jako nowoczesnych narzędzi wspierających adaptacyjne sterowanie silnikiem. Przedstawili je jako kluczowy element umożliwiający spełnianie coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin, przy jednoczesnym zwiększaniu efektywności energetycznej silników. Przeprowadzone badania dostarczyły praktycznych przykładów, jak szerokopasmowa sonda lambda może wspierać optymalizację procesu spalania, łącząc poprawę osiągnięć silnika z wymogami ochrony środowiska. Artykuł „Oxygen Sensor with Advanced Oxide Electrode Materials”, autorstwa P. Shuka, R. Jantza i H.-U. Gutha, opublikowany w czasopiśmie *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* w 2012 roku, wnosi istotny wkład w rozwój technologii czujników tlenowych, w tym sond lambda stosowanych w systemach kontroli spalania [127]. Praca koncentruje się na zastosowaniu zaawansowanych materiałów elektrodowych opartych na tlenkach metali ziem rzadkich w celu poprawy wydajności i trwałości czujników tlenowych. Badania przedstawione w artykule dotyczą opracowania i testowania nowych materiałów elektrodowych na bazie manganianów lantanu i itru domieszkowanych wapniem. Materiały te charakteryzują się niską rezystancją polaryzacji i wysoką stabilnością chemiczną, co czyni je szczególnie atrakcyjnymi w zastosowaniach wymagających pracy w wysokich temperaturach. Zastosowanie tych materiałów w czujnikach tlenu umożliwia znaczne zwiększenie aktywności elektrod w procesach redukcji i utleniania, nawet w niższych temperaturach, co jest kluczowe w

nowoczesnych silnikach spalinowych. Artykuł ukazuje, że użycie mieszanych przewodników elektronowo-jonowych, takich jak manganiany lantanu domieszkowane wapniem, pozwala na rozszerzenie obszaru aktywnego elektrochemicznie poza granice trójfazowej granicy (TPB) elektroda-elektrolit-gaz. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie szybkości reakcji elektrochemicznych, co skutkuje szybszą odpowiedzią czujnika na zmiany stężenia tlenu. Badania wykazały, że opracowane czujniki osiągają czas odpowiedzi na poziomie 5 sekund przy temperaturze 600°C, co stanowi istotne usprawnienie w porównaniu z tradycyjnymi elektrodami platynowymi. Dodatkowo, praca podkreśla trwałość opracowanych elektrod tlenkowych, które wykazują minimalny dryf sygnału w długotrwałych testach stabilności. Po ponad 1000 godzin pracy przy różnych stężeniach tlenu czujniki zachowały swoją dokładność na poziomie $\pm 0,04\%$ O₂. Ta wysoka stabilność czyni je atrakcyjnymi do zastosowań w układach zamkniętych kontroli spalania, gdzie wymagana jest precyzyjna regulacja stosunku powietrza do paliwa w celu minimalizacji emisji spalin. Przedstawione badania wskazują na potencjał dalszego rozwoju technologii czujników tlenu, które mogą przyczynić się do poprawy wydajności energetycznej silników spalinowych oraz spełniania coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin. Dzięki zastosowaniu nowych materiałów elektrodowych, sondy lambda mogą stać się bardziej efektywne, trwałe i dostępne, co ma kluczowe znaczenie dla zrównoważonego rozwoju motoryzacji i technologii przemysłowych. Artykuł „A Numerical Investigation of Automotive Lambda Sensor to Improve the Life Span of the Sensor using CFD”, autorstwa S. Aravinda, P. Ragupathiego, D. Sathish Kumara i G. Vignesha, opublikowany w IOP Conference Series: Materials Science and Engineering w 2020 roku, koncentruje się na analizie numerycznej działania sond lambda z wykorzystaniem technik obliczeniowej dynamiki płynów [9]. Praca przedstawia innowacyjne podejście do modyfikacji konstrukcji warstwy ochronnej sondy lambda w celu wydłużenia jej żywotności, jednocześnie zachowując wysoką efektywność jej funkcjonowania. Autorzy badania zauważyli, że żywotność czujników tlenu jest ograniczona ze względu na ciężkie warunki pracy, takie jak wysokie temperatury, ciśnienia i prędkości gazów wylotowych w układach wydechowych. Aby temu zaradzić, opracowano zmodyfikowaną konstrukcję podwójnej warstwy ochronnej, która została porównana z tradycyjnymi projektami dwu- i trójwarstwowymi. Analiza CFD pozwoliła szczegółowo prześledzić wpływ tych zmian na parametry, takie jak rozkład temperatury, ciśnienia i prędkości gazów w obszarze pomiarowym sondy. Wyniki badań wykazały, że zmodyfikowana warstwa ochronna skutecznie redukuje temperaturę w strefie centralnej sondy o 15% w porównaniu z obecnymi rozwiązaniami, co jest istotne dla ochrony elementu pomiarowego. Ponadto ciśnienie w tej strefie zmniejszono o

10,1%, zaś prędkość przepływu gazów o 16,5%. Tego rodzaju zmniejszenie obciążeń termicznych i mechanicznych ma bezpośredni wpływ na wydłużenie żywotności sondy lambda, która według symulacji mogłaby wzrosnąć z 15 do 17 lat lub więcej. W artykule podkreślono również znaczenie wykorzystania narzędzi CFD jako skutecznego sposobu na ograniczenie kosztów eksperymentalnych i przyspieszenie procesu projektowania. Symulacje komputerowe umożliwiły szczegółową analizę przepływu gazów w różnych wariantach konstrukcji sond, co pomogło w optymalizacji ich projektu bez konieczności przeprowadzania kosztownych i czasochłonnych badań fizycznych. Badanie dostarcza istotnych wniosków w kontekście wydłużenia żywotności sond lambda poprzez optymalizację konstrukcji ich warstw ochronnych. Praca ta wnosi znaczący wkład w rozwój technologii czujników stosowanych w motoryzacji, umożliwiając jednocześnie bardziej efektywne i trwałe rozwiązania spełniające wymagania współczesnych silników spalinowych. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest nie tylko poprawienie wydajności sond lambda, ale także zmniejszenie ich wpływu na koszty eksploatacji pojazdów. Praca pod tytułem „Physics-based characterization of lambda sensor output to control emissions from natural gas fueled engines”, autorstwa Mohameda Ahmeda Toemy, skupia się na zastosowaniu sond lambda w systemach kontroli emisji spalin, zwłaszcza w silnikach stacjonarnych zasilanych gazem ziemnym [139]. Głównym celem pracy było opracowanie modelu matematycznego sondy lambda, który pozwala lepiej zrozumieć procesy zachodzące w czujniku, co przyczynia się do zwiększenia skuteczności systemów NSCR (Non-Selective Catalytic Reduction). Sonda lambda jest kluczowym elementem w układzie sterowania stosunkiem powietrza do paliwa (A/F), który wpływa na procesy redukcji emisji tlenków azotu (NO_x) i utleniania tlenku węgla (CO). Praca przedstawia nowatorskie podejście, wykorzystując modelowanie fizycznych procesów zachodzących w sondzie, takich jak transport masy, reakcje katalityczne na powierzchni elektrod oraz procesy elektrochemiczne w materiale elektrolitu. Model opiera się na trzech modułach: symulacji warstwy ochronnej sondy, reakcji katalitycznych na elektrodach platynowych oraz procesów elektrochemicznych w elektrolitach. Każdy z tych modułów został szczegółowo opisany, uwzględniając równania Maxwella-Stefana dla dyfuzji oraz mechanizmy kinetyczne Langmuira-Hinshelwooda. Badania uwzględniły także analizę parametrów wpływających na działanie sondy lambda, takich jak wpływ różnych składników spalin (np. metanu, CO, H_2) na generowane napięcie wyjściowe. Wyniki modelowania wykazały, że obecność metanu i pary wodnej w spalinach może znacząco wpływać na czułość i dokładność sygnału sondy. Dodatkowo, analiza wykazała, że złożone interakcje między reakcjami chemicznymi na powierzchni elektrody mogą prowadzić do zmienności sygnału w zależności od warunków pracy silnika. Jednym z istotnych

wniosków było stwierdzenie, że precyzyjne modelowanie i zrozumienie procesów zachodzących w sondzie lambda pozwala na bardziej efektywne sterowanie stosunkiem powietrza do paliwa, co jest kluczowe dla zwiększenia skuteczności systemów NSCR. Autorzy zauważyli, że tradycyjne metody eksperymentalne są czasochłonne i kosztowne, dlatego zaproponowane modele mogą służyć jako narzędzie do optymalizacji układów kontroli emisji. Z przytoczonych prac naukowych wynika przede wszystkim fakt, iż funkcjonowanie czujników tlenu ma decydujące znaczenie dla generowanych przez silniki spalinowe eksploatowanych pojazdów zanieczyszczeń oraz pośrednio wynika konieczność stworzenia tanich, prostych i efektywnych rozwiązań, które skuteczniej niż dotychczas będą w stanie monitorować stan techniczny czujników tlenu oraz skuteczniej będą nadzorowały utrzymanie stałego stosunku A/F mieszance (stosunek powietrza do paliwa).

2. AKTY PRAWNE REGULUJĄCE NORMY EMISJI SPALIN I CYKLE BADAWCZE

W dziedzinie związanej z ograniczeniami emisji toksycznych składników spalin oraz obciążenia środowiska związanego z eksploatacją pojazdów samochodowych oraz silników spalinowych wprowadzono szereg rozwiązań legislacyjnych. Jednym z aktów prawnych regulujących między innymi normy emisji spalin jest rozporządzenie Parlamentu Europejskiego (WE) nr 715/2007 z dnia 20 czerwca 2007 r [170]. Rozporządzenie to dotyczy homologacji lekkich pojazdów osobowych i użytkowych i jest ono ściśle powiązane z kolejnym rozporządzeniem (UE) nr 858/2018 [171]. Kluczowe punkty tych aktów w odniesieniu do producentów to:

- projektować, konstruować i montować komponenty tak, aby pojazd był zgodny z przepisami;
- udowodnić, że wszystkie nowe pojazdy oraz urządzenia kontrolujące emisję zanieczyszczeń są zgodne z przepisami oraz będą spełniać limity emisji zanieczyszczeń podczas użytkowania pojazdu w warunkach drogowych;
- zapewnić, że urządzenia kontrolujące zanieczyszczenia będą wytrzymywać 160 000 km, a emisje pojazdów będzie można sprawdzić po 5 latach lub 100 000 km, w zależności od tego, co nastąpi wcześniej;
- dostarczać kupującym danych dotyczących emisji dwutlenku węgla i zużycia paliwa;
- nie używać urządzeń ograniczających skuteczność systemów kontroli emisji, z wyjątkiem ściśle określonych warunków — takich jak ochrona silnika przed uszkodzeniem lub wypadkiem.

Kluczowe punkty aktów w odniesieniu do organów krajowych to:

- udzielać homologacji typu UE nowym pojazdom, które są zgodne z przepisami;
- odmówić udzielenia homologacji pojazdom, które nie spełniają norm emisji w wyznaczonych obszarach odnoszących się do każdej kategorii pojazdu;
- zezwolenie na rejestrację pojazdów zgodnych z niniejszym rozporządzeniem;
- zakazanie sprzedaży lub instalacji urządzeń kontrolujących emisję zanieczyszczeń, które nie spełniają norm UE;
- zapewnić kary dla producentów, którzy fałszują deklaracje lub wyniki, ukrywają dane lub wykorzystują urządzenia oszukujące.

Wartym uwagi jest fakt, iż na całym świecie cyklicznie dokonuje się regularnych przeglądów procedur, badań, wymogów i limitów określonych w prawodawstwie i regularnie aktualizuje je w przepisach wykonawczych. W ostatnich latach wprowadzono kolejne regulacje, które uzupełniają dotychczasowe przepisy:

- Rozporządzenie (UE) 2019/631 – określa nowe limity emisji CO₂ dla samochodów osobowych i dostawczych, wprowadzając bardziej rygorystyczne cele redukcji emisji na lata 2025 i 2030.
- Rozporządzenie Komisji (UE) 2024/1257 – aktualizuje przepisy dotyczące homologacji i emisji, uwzględniając najnowsze technologie pomiaru emisji oraz standardy ochrony środowiska.
- Nowe normy Euro 7 – planowane do wprowadzenia w 2025 roku, zastąpią dotychczasowe normy Euro 6, wprowadzając jeszcze bardziej rygorystyczne limity emisji zanieczyszczeń, w tym dla tlenków azotu (NO_x) i cząstek stałych (PM).

Przepisy prawne podkreślają znaczenie ciągłego dostosowywania technologii motoryzacyjnych do zaostrzających się wymagań ochrony środowiska oraz zapewnienia, że pojazdy eksploatowane na terenie Unii Europejskiej będą przyjazne dla środowiska. [124, 134, 154, 155, 162, 164, 165, 169].

2.1. Normy EURO

Na obszarach Unii Europejskiej nowe modele samochodów, aby mogły zostać zarejestrowane muszą spełniać odpowiednie normy emisji spalin [Tab. 1, 2]. Norma oznaczona jako Euro 6 to obecnie obowiązujący standard emisji spalin dla nowych pojazdów sprzedawanych w Unii Europejskiej. Normy te obejmują emisje tlenków azotu (NO_x), węglowodorów (THC i NMHC), tlenku węgla (CO) i cząstek stałych (PM). Ograniczenia są różne dla silników benzynowych i diesla:

[1] Euro 6 dla silników o zapłonie samoczynnym (gramy na kilometr): 0,50 CO, 0,080 NO_x, 0,005 PM.

[2] Euro 6 dla silników benzynowych (gramy na kilometr): 1,0 CO, 0,060 NO_x, 0,005 PM.

Planowana przyszła norma Euro 7 ma na celu dalsze ograniczenie zanieczyszczeń powietrza pochodzących z ruchu drogowego. Nowe przepisy miały wejść w życie 1 lipca 2025 roku [140]. Ostatecznie norma Euro 7 ma zostać wprowadzona 1 lipca 2030 roku oraz 1 lipca roku następnego w odniesieniu do autobusów i pojazdów klasy pow. 3,5T. Euro 7 wprowadzi jeszcze niższe limity i zastosuje je do wszystkich nowych samochodów, niezależnie od rodzaju

paliwa, które zużywają. Wszystkie nowe samochody sprzedawane od roku wprowadzenia normy będą musiały emitować nie więcej niż 60 miligramów NO_x na kilometr, aby być zgodne z normą. Dodatkowo, Euro 7 znacznie zwiększy wymagania dotyczące trwałości emisji. Obecnie samochody Euro 6 muszą spełniać wymagania dotyczące emisji do 100 000 km lub 5 lat. Zgodnie z nowymi przepisami, limity emisji Euro 7 muszą być spełnione do 200 000 km lub 10 lat.

Należy zauważyć, iż treść nowej normy emisji jest przedmiotem ciągłej debaty wśród zainteresowanych stowarzyszeń i firm związanych z branżą motoryzacyjną oraz tzw. grup proekologicznych. Cel nowej normy jest klarowny: ma zobowiązywać producentów do dalszego ograniczania emisji zanieczyszczeń w nowych pojazdach. Lecz ciągle pozostaje kilka pytań. Jakie związki i gazy należy ograniczyć? Jak wysokie muszą być nowe wartości graniczne? Czy zwykłe procedury testowe są wystarczające do kontroli?

Obecna norma emisyjna Euro 6 ogranicza emisję tlenku węgla (CO), węglowodorów (HC), węglowodorów niemetanowych (NMHC), tlenków azotu (NO_x), cząstek stałych (PM) i cząstek stałych (PN). Z punktu widzenia autora w przyszłości należy regulować także inne gazy wydechowe, które powstają podczas jazdy samochodem. Obejmuje to w szczególności emisję amoniaku (NH_3), którą można ograniczyć przy rozsądnym wysiłku technicznym. Oprócz dwutlenku węgla (CO_2) w przypadku gazów istotnych dla klimatu należy również wziąć pod uwagę gazy cieplarniane, takie jak metan (CH_4), który jest emitowany głównie przez pojazdy CNG (gaz ziemny) oraz podtlenek azotu (N_2O)

Tabela 1. Normy Euro dla silników benzynowych
[opracowanie na podstawie Dyrektywy Komisji 2002/80/WE]

<i>Norma</i>	<i>Obowiązuje od</i>	<i>CO</i> [g/km]	<i>HC</i> [g/km]	<i>NO_x</i> [g/km]	<i>HC+NO_x</i> [g/km]	<i>PM</i> [g/km]
<i>Euro 1</i>	<i>12/92</i>	<i>2,72</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,97</i>	<i>-</i>
<i>Euro 2</i>	<i>01/97</i>	<i>2,20</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,5</i>	<i>-</i>
<i>Euro 3</i>	<i>01/00</i>	<i>2,30</i>	<i>0,20</i>	<i>0,15</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Euro 4</i>	<i>01/05</i>	<i>1,00</i>	<i>0,10</i>	<i>0,08</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Euro 5</i>	<i>09/09</i>	<i>1,00</i>	<i>0,10</i>	<i>0,06</i>	<i>-</i>	<i>0,005</i>
<i>Euro 6</i>	<i>08/14</i>	<i>1,00</i>	<i>0,10</i>	<i>0,06</i>	<i>-</i>	<i>0,005</i>

*Tabela 2. Normy Euro dla silników o zapłonie samoczynnym
[opracowanie na podstawie Dyrektywy Komisji 2002/80/WE]*

<i>Norma</i>	<i>Obowiązuje od</i>	<i>CO [g/km]</i>	<i>HC [g/km]</i>	<i>NOx [g/km]</i>	<i>HC+NOx [g/km]</i>	<i>PM [g/km]</i>
<i>Euro 1</i>	<i>12/92</i>	<i>3,16</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>1,13</i>	<i>0,14</i>
<i>Euro 2</i>	<i>01/97</i>	<i>1,00</i>	<i>0,15</i>	<i>0,55</i>	<i>0,70</i>	<i>0,08</i>
<i>Euro 3</i>	<i>01/00</i>	<i>0,64</i>	<i>0,06</i>	<i>0,50</i>	<i>0,56</i>	<i>0,05</i>
<i>Euro 4</i>	<i>01/05</i>	<i>0,50</i>	<i>0,05</i>	<i>0,25</i>	<i>0,30</i>	<i>-</i>
<i>Euro 5</i>	<i>09/09</i>	<i>0,50</i>	<i>0,05</i>	<i>0,18</i>	<i>0,23</i>	<i>0,005</i>
<i>Euro 6</i>	<i>08/14</i>	<i>0,50</i>	<i>0,09</i>	<i>0,08</i>	<i>0,17</i>	<i>0,005</i>

Chociaż podtlenek azotu jest emitowany tylko w niewielkich ilościach, jest on jednak 298 razy bardziej szkodliwy dla klimatu niż CO₂ [173]. Należy wspomnieć, iż norma Euro 6 doczekała się wielu modyfikacji (Euro 6, 6b, 6c, 6d – TEMP, 6d – TEMP EVAP-ISC) nie są to jednak modyfikacje zaostrzające same normy emisji, a sposoby przeprowadzania jazd testowych, które to mają odzwierciedlać jak najbardziej realne warunki eksploatacji danego pojazdu. Jedną z kluczowych jest norma Euro 6 – TEMP, wprowadzono ją z założeniem, że będzie obowiązywała przejściowo. Ma ona na celu wyeliminowanie przypadków, w których to producenci nowych pojazdów mogli manipulować testami tak aby ich pojazdy wykazywały podczas procedury testowej były mniej emisyjne aniżeli w warunkach realnej eksploatacji pojazdu. Obecnie nie ma specyfikacji dla cząstek pyłu o wielkości poniżej 23 nanometrów. Według autora musi się to zmienić wraz z Euro 7: w przyszłości należy rejestrować cały zakres emisji cząstek. Ponieważ wartości graniczne cząstek stałych (PM) i liczby cząstek stałych (PN) określone jako część normy emisji dotyczą obecnie tylko silników wysokoprężnych i benzynowych z bezpośrednim wtryskiem, ważne jest rozszerzenie zakresu o inne technologie silnikowe [177].

Jak już wspomniano norma Euro 6 i jej kolejne wersje nie wprowadzała nowych limitów emisji toksycznych składników spalin a jedynie zmieniły się warunki i zasady prowadzenia testów pomiarowych, dlatego też w poniższych rozdziałach przedstawiono test NEDC oraz WLTP.

2.2. Cykl badań, NEDC (New European Driving Cycle)

Korzenie metody pomiaru zużycia paliwa i emisji szkodliwych substancji sięgają lat 80-tych minionego wieku. Obejmuje ona dwa rodzaje testów - na stanowisku pomiarowym przez 13 minut auto jest testowane w warunkach określanych jako „miejskie”. Tą część

podzielono na cztery identyczne, powtarzające się cykle, które polegają na powolnym rozpędzaniu auta do prędkości najpierw 15 km/h, później 32 km/h, a ostatecznie 50 km/h i po każdym zwiększeniu prędkości następuje trwający określony czas postój samochodu. Samochód w cyklu miejskim pokonuje dystans około 4 km, natomiast średnia prędkość jazdy to 18,35 km/h. W czasie całego cyklu miejskiego samochód zatrzymuje się łącznie na więcej niż 3 minuty, z czego większość czasu skrzynia manualna pozostaje w pozycji „luzu” z włączonym sprzęgłem. Po tym, przez następnie przez 7 minut, symuluje się jazdę poza miastem. Pomiar polega na rozpędzeniu samochodu do 70, 100 i 120 km/h. Podczas całego pomiaru, testowane auto nie zatrzymuje się, a jedynie zmniejsza prędkość do 50 km/h na 69 sekund. Cykl pozamiejski trwa 6 minut i 40 sekund, a pojazd przemierza dystans około 7 km ze średnią prędkością 62,6 km/h. Pomiar NEDC zakłada rozpiętość temperatur pomiaru w zakresie 20-30 °C. Co ważne, przy pomiarach nie jest brana pod uwagę konfiguracja samochodu, czyli zamontowane w nim wyposażenie, które dość istotnie może wpływać na wyniki. Podczas cyklu badań NEDC wyniki osiągnięte w laboratorium miały niewiele wspólnego z rzeczywistością [176].

2.3. Cykl badań, WLTP- RDE (World Harmonized Light Vehicle Test Procedure)

Obecnie w celu uzyskania homologacji pojazdy muszą przejść przez procedurę pomiarową zwaną (WLTP). Odbywa się to głównie w warunkach laboratoryjnych na stanowisku badawczym, ale emisje spalin są również mierzone w tak zwanych testach rzeczywistych emisji spalin (RDE). Oznacza to, że nowe pojazdy będą rejestrowane tylko wtedy, gdy emisja i zużycie paliwa zostaną potwierdzone za pomocą metody pomiaru (WLTP) i (WLTC). Nowa procedury testowe weszły w życie we wrześniu 2017 r. i zastąpiły dotychczasowy cykl (NEDC) i od tego czasu stanowią oficjalną podstawę homologacji nowych pojazdów osobowych w UE. Dane dotyczące emisji oraz zużycia paliwa według (WLTP) są dokładniejsze i bliższe realnym warunkom. Ponieważ nowa metoda pomiaru i nowy cykl testowy opierają się na rzeczywistych danych z jazdy z 14 krajów. Umożliwiło to stworzenie przeciętnych profili jazdy. Cykl (WLTP) składa się z pojedynczych cykli, które są stosowane w zależności od nowo wprowadzonych klas pojazdów. Ponadto należy zbadać wszystkie dostępne kombinacje silnik-skrzynia biegów, a także specjalne wyposażenie, które indywidualnie wpływa na masę i aerodynamikę pojazdu.

Podczas gdy w przypadku starego (NEDC) test trwał 20 minut, to w przypadku (WLTP) jest to 30 minut. W efekcie przebyta odległość wzrosła z jedenastu do ponad 23 km. Ponadto (WLTP) określa prędkość i warunki obciążenia w bardziej wymagający sposób. Pomiaru są

wykonywane w temperaturze testowej 23 °C, a w Europie również w 14 °C, czyli średniej temperaturze europejskiej. Ponadto systemy oczyszczania spalin pojazdów są testowane w rzeczywistych warunkach środowiskowych podczas dodatkowych przejazdów drogowych, tzw. testy (RDE). Przenośny system pomiaru emisji (PEMS) mierzy emisję zanieczyszczeń, ale jednocześnie rejestruje powiązane parametry pojazdu i warunki środowiskowe. Regulacja prawna (RDE) nie zastępuje (WLTP), ale ją uzupełnia. Dzięki temu pomiar emisji zanieczyszczeń staje się jeszcze dokładniejszy, przez co oszustwa są prawie niemożliwe. Zgodnie z rozporządzeniem pomiar (RDE) musi trwać od 90 do 120 minut, a każdy odcinek trasy (miejski, wiejski i autostradowy) musi mieć co najmniej 16 kilometrów. Część śródmiejska charakteryzuje się maksymalną prędkością pojazdów 60 km/h, część pozamiejską maksymalną prędkością 90 km/h, a część autostradowa co najmniej 90 km/h [176]

Tabela 3. Różnice pomiędzy pomiarami NEDC i WLTP [Opracowanie na podstawie NEDC i WLTP]

Kryteria badania	NEDC	WLTP
Cykl testowy	Jeden cykl testowy	Cykl dynamicznej jazdy daje bardziej miarodajny obraz stanu rzeczywistego
Czas trwania cyklu	20 minut	30 minut
Pokonany dystans	11 km	23,25 km
Fazy jazdy	2 fazy, 66% w mieście i 34% poza miastem	4 fazy o większej dynamice, każda faza – niska, średnia, wysoka i bardzo wysoka – oznacza wyższą prędkość i moc
Średnia prędkość	34 km/h	46,5 km/h
Wpływ wyposażenia opcjonalnego	Testy NEDC nie uwzględniają wpływu na emisję CO ₂ i zużycia paliwa	Brane są pod uwagę dodatkowe właściwości (mogą być różne w zależności od pojazdu)
Zmiany biegów	Dla pojazdów określono stałe punkty zmiany biegów	Inne punkty zmiany biegów dla każdego pojazdu
Temperatury testowe	Pomiary przy 20-30 °C	Pomiary przy 23 °C, wartość CO ₂ skorygowana do 14°C

Ponadto istnieją ścisłe kryteria dotyczące prędkości i sposobu przyspieszenia, takie jak prędkość maksymalna, prędkość średnia lub wartości procentowe przyspieszenia. Ponadto pomiary mogą być wykonywane tylko w zakresie temperatur od 0 do 30 °C lub w rozszerzonym zakresie od -7 do 35 °C.

2.4. Green NCAP

Kolejnym działaniem zmierzającym do oceny obciążenia dla środowiska jakie niesie za sobą eksploatacja pojazdów silnikowych jest inicjatywa organizacji znanej pod skrótem NCAP (New Car Assessment Programme) określana jako tzw. Green NCAP. Ścisłej rzecz ujmując jest to inicjatywa Euro NCAP (European New Car Assessment Programme), która od wielu lat testuje i ocenia pojazdy pod względem bezpieczeństwa osób podróżujących samochodami oraz innych uczestników ruchu drogowego. W ramach działania Green NCAP ocenia się przyjazność dla środowiska, samochodów osobowych zgodnie z jednolitymi i przyszłościowymi standardami. Zielona ocena gwiazdkowa NCAP koncentruje się na emisji zanieczyszczeń, paliw, zużyciu energii i szkodliwych dla klimatu gazów cieplarnianych. Od roku 2022 zostały wprowadzone dodatkowe oceny tzw. cyklu życia (LCA), w którym określa się rzeczywisty wpływ samochodów na środowisko w całym okresie ich eksploatacji. Jest to jeden z najważniejszych aspektów, ponieważ aby zrozumieć prawdziwy wpływ na środowisko i zrównoważony rozwój samochodu, należy postrzegać go nie tylko w kontekście zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń, ale całego jego cyklu życia. Oznacza to, że należy wziąć pod uwagę wszystkie procesy przepływu zasobów i energii związanych z produkcją, użytkowaniem i recyklingiem pojazdu. Ocena życia (LCA) to metoda, która szacuje wszystkie te czynniki prowadzi predykcję wpływu pojazdu na środowisko przez cały okres jego użytkowania [133].

Interesujące badanie przeprowadzone ostatnio przez Volvo pokazuje jednak bardziej złożony obraz sytuacji. Volvo porównało emisję dwutlenku węgla w całym cyklu życia każdego modelu XC40, począwszy od wydobywania surowców i procesów produkcyjnych potrzebnych do jego wyprodukowania, przez tankowanie paliwa i jazdę przez przewidywany okres eksploatacji wynoszący 200 tys. km a skończywszy na jego utylizacji. Szczegółowa analiza wykazała, że produkcja elektrycznego C40 generuje o 70 proc. większą emisję niż produkcja XC40 ze standardowym silnikiem spalinowym, przy czym oba samochody zbudowane są na tej samej platformie i mają wiele wspólnych części. Same tylko akumulatory stanowią niemal jedną trzecią śladu węglowego, jaki pozostawia budowa C40 lub XC40 Recharge. Różnica pojawia się po rozpoczęciu jazdy, każdy kilometr przejechany samochodem benzynowym powoduje spalanie paliwa i zwiększa emisję CO₂, podczas gdy w przypadku jego elektrycznego odpowiednika jest odwrotnie. Punkt krytyczny, w którym rosnący ślad węglowy samochodu spalinowego przewyższa ślad węglowy samochodu elektrycznego zależy od tego, skąd pochodzi energia elektryczna służąca do naładowania elektryka. Volvo opublikowało trzy różne dane liczbowe, w zależności od średniej globalnej podaży energii elektrycznej,

przewidywanego bilansu „EU28” (UE plus Wielka Brytania) z regularnych i odnawialnych źródeł energii oraz w pełni odnawialnej energii. W okresie 200 tys. km w pełni elektryczny C40 emituje o 15 proc. mniej dwutlenku węgla niż benzynowy XC40, a zanim osiągnie próg rentowności, musi przejechać 110 tys. km. Jeśli C40 jest ładowany wyłącznie energią odnawialną, emisja CO₂ w całym okresie eksploatacji jest o połowę niższa niż w przypadku XC40 z silnikiem spalinowym, a próg rentowności osiąga się po przejechaniu nieco ponad 50 tys. km [177].

2.5. Niektóre niedozwolone praktyki producentów samochodów

Pomimo rygorystycznych metod kontroli produkowanych pojazdów pod względem ich oddziaływania na środowisko naturalne, wielu producentów podejmowało działania zmierzające do ominięcia stawianych wymagań. Działania te w zasadzie rozpoczęły się już na samym początku wprowadzania ograniczeń w emisji toksycznych składników spalin. Dla przykładu w roku 1973 Chrysler, Ford Motor Company, General Motors, Toyota i Volkswagen musiały usunąć przełączniki temperatury otoczenia, które wpływały na wyniki badań emisji, choć firmy zaprzeczyły celowemu oszustwu i twierdziły, że strategie takie jak wzbogacenie mieszanki paliwa podczas okresów rozgrzewania zimnego silnika mogą zmniejszyć ogólną ilość zanieczyszczeń, przełączniki kazano usunąć z produkcji, ale samochody już sprzedane nie musiały być poprawiane, a grzywny były stosunkowo niskie [49].

Następnie w roku 1993 kontrolerzy EPA odkryli, że samochody marki Cadillac (GM) emitują niemal trzykrotnie więcej tlenku węgla, gdy mają włączoną klimatyzację lub ogrzewanie kabiny. Problem objawiał się nagłym gaśnięciem silnika. W celu wyeliminowania problemu firma zainstalowała specjalny układ scalony, który sterował proporcjami mieszanki paliwo-powietrznej, zwiększając w niej zawartość benzyny, gdy pracowała klimatyzacja. Silnik przestał gasnąć, ale kosztem zablokowania systemu kontroli emisji spalin – stąd zwiększona zawartość tlenku węgla. W sensie prawnym ów układ scalony był urządzeniem zakłócającym, bo w sposób ukryty powodował zmniejszenie efektywności systemu kontroli emisji spalin. W GM wiedziano, że EPA nie włącza klimatyzacji podczas testów, stąd też takie działania. Producent programując system sterownia silnikiem tak, aby do zwiększonej emisji dochodziło tylko przy włączonej klimatyzacji, koncern miał pewność, że modyfikacja, której celem było rozwiązanie problemu z dławieniem silnika, a skutkiem ubocznym trzykrotne zwiększenie wydzielania tlenku węgla – nigdy nie zostanie odkryta w laboratorium Agencji Ochrony Środowiska. Przy włączonej klimatyzacji z ich rur wydechowych wydobywało się

nawet 10 gramów tlenu węgla na każdą przejechaną milę, podczas gdy limit wynosił 3.4 grama. Dochodzenie wykazało, że urządzenia zakłócające zainstalowano w 470 000 Cadillaców z lat 1991-1995 w modelach Seville i Deville [49].

W roku 1997 w furgonetkach Forda Econoline zostało odkryte urządzenie, które przy prędkościach autostradowych wyłączało układ ograniczający emisję szkodliwych substancji. W skutek działania owego urządzenia zakłócającego, silnik spalał mniej paliwa, natomiast drastycznie rosła zawartość tlenków azotu. Sterownik silnika zaprogramowano w ten sposób, aby zmieniał punkt zapłonu paliwa z chwilą wrzucenia 7 biegu, działało to w czasie, gdy kierowca zmieniał bieg z 6 na 7, co w normalnych warunkach oznacza przyspieszenie do prędkości autostradowej, [49].

W roku 1998 w silnikach pojazdów ciężarowych Cummins Engine Company, Caterpillar Inc., Detroit Diesel Corporation, Mack Trucks, Navistar International, Renault Vehicules Industriels i Volvo Trucks, wprowadzona została ingerencja w oprogramowanie sterujące momentem wtrysku paliwa do cylindra, który był zależny od tego, czy pojazd porusza się po drodze, czy przechodził federalną procedurę testową [49].

Rok 2004 – Audi będąca poligonem doświadczalnym dla innowacji stosowanych w pojazdach grupy VW, od wielu lat używała oprogramowania, by omijać przepisy o emisji szkodliwych substancji. Od roku 1999 inżynierowie Audi dysponowali techniką przed wtrysku, która pozwalała zniwelować „klekot” słyszalny podczas rozruchu silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim paliwa.

Redukcja hałasu wiązała się jedna z przekroczeniem norm emisji spalin [49]. W związku z tym opracowano oprogramowanie, które wykrywało symulowany cykl jazdy stosowany podczas badań w europejskich laboratoriach. W Audi owe oprogramowanie nazywano „funkcją akustyczną”. Była ona stosowana w ECU trzylitrowych V6 sprzedawanych w Europie w latach 2004-2008.

Jednakże w 2015 – Inżynierowie VW przystosowują „funkcję akustyczną” znaną wcześniej z modeli 3.0 V6 od Audi do pozostałych modeli produkowanych przez grupę VAG. Kod owej funkcji ukryto w oprogramowaniu jednostki sterującej silnika wysokoprężnego o oznaczeniu EA 189 za którego sterowanie odpowiedzialny był sterownik firmy Bosch EDC17. W warunkach testowych pozwalało to zaniżać wartość emisji tlenków azotu prawie 40 krotnie. Działanie to znane jest pod pojęciem Dieselgate.

2.6. Złożoność problemu procedur testowania silników pod kątem emisji spalin

Problem przeprowadzania testów WLTP (ang. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) związany jest głównie z próbą dostosowania procedur testowych do rzeczywistych warunków użytkowania pojazdów oraz skomplikowanego charakteru nowoczesnych technologii samochodowych. Mimo tych problemów, testy WLTP stanowią krok w kierunku bardziej realistycznego i wiarygodnego pomiaru emisji spalin z samochodów. Dają one konsumentom lepsze informacje o rzeczywistym zużyciu paliwa i emisjach spalin, co pomaga w podejmowaniu bardziej świadomych decyzji zakupowych. Jednak dalsze prace nad usprawnieniem procedur testowych oraz skuteczne monitorowanie i egzekwowanie wyników są nadal konieczne. Procedura testowa WLTP obejmuje także procedurę testową RDE (ang. Real Driving Emissions), ale są to dwie różne części procesu homologacji pojazdów. Przeprowadzanie testów RDE, czyli emisji w rzeczywistej eksploatacji, stanowi wyzwanie z kilku powodów.

Procedury testowe muszą uwzględniać różnorodne warunki jazdy, takie jak jazda po mieście, na autostradach czy w ruchu miejskim, co sprawia, że są one bardziej złożone niż tradycyjne testy na hamowniach laboratoryjnych. Dodatkowym problemem jest trudność w kontroli warunków testowych, ponieważ testy odbywają się na otwartych drogach, gdzie istnieją zmienne czynniki, takie jak ruch drogowy, pogoda czy jakość nawierzchni. To wszystko może wpłynąć na wyniki testów, co utrudnia standaryzację i powtarzalność procedur. Wyniki testów mogą być zmienne, ponieważ różne sytuacje na drodze mogą prowadzić do różnych emisji spalin. Oznacza to, że konieczne jest przeprowadzenie wielu testów, aby uzyskać wiarygodne wyniki. Podczas testów RDE konieczne jest monitorowanie rzeczywistych emisji spalin w czasie rzeczywistej jazdy, co wymaga zaawansowanej aparatury pomiarowej i technologii, aby dokładnie mierzyć emisje podczas jazdy. Procedury testowe muszą być regularnie aktualizowane, aby uwzględniać nowe technologie i zmieniające się normy emisji, co sprawia, że utrzymanie tych testów na bieżąco jest wyzwaniem. Przeprowadzenie testów RDE wymaga znacznych zasobów finansowych i ludzkich ze strony producentów pojazdów oraz urzędów certyfikujących, co jest kosztowne i czasochłonne. Wobec powyższego nie wszystkie laboratoria testowe są wyposażone w odpowiednią infrastrukturę do przeprowadzania takich testów, co może wprowadzać ograniczenia w dostępności tych testów. Interpretacja wyników testów RDE może być trudna, ponieważ wyniki mogą być zmienne i zależeć od wielu czynników. Konieczne jest określenie, kiedy emisje spalin są zgodne z normami, a kiedy przekraczają dopuszczalne limity.

Urządzenia do analizy spalin dzielą się na stacjonarne i mobilne. Analizatory stacjonarne, choć precyzyjne, ograniczają się do testów w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Wprowadzenie analizatorów mobilnych, jak PEMS (Portable Emissions Measurement Systems), umożliwia badania w realnych warunkach drogowych, co jest kluczowe dla wiarygodnej oceny emisji spalin z pojazdów. Urządzenia PEMS, dzięki swojej mobilności i adaptowalności, pozwalają na szerokie badanie emisji z różnych źródeł w różnych warunkach, od pojazdów osobowych po maszyny budowlane. Pomimo istnienia zaawansowanych metod pomiarowych, utrzymanie jednolitych standardów testowania i interpretacji wyników nadal stanowi wyzwanie. Różnice w wynikach testów mogą wynikać z wielu czynników, które są trudne do ustandaryzowania. W kontekście ochrony środowiska, zarówno WLTP, jak i RDE pełnią kluczową rolę w ocenie realnego wpływu pojazdów na jakość powietrza. Zapewniają one cenne informacje, które mogą prowadzić do dalszych regulacji prawnych i technologicznych usprawnień pojazdów w celu zmniejszenia ich negatywnego wpływu na środowisko. Testy te są nie tylko ważnym narzędziem dla producentów w procesie homologacji pojazdów, ale także istotnym źródłem informacji dla konsumentów, decydujących o zakupie pojazdu na podstawie jego ekologicznych parametrów. W efekcie, ciągła ewolucja i optymalizacja procedur testowych oraz technologii pomiarowych są kluczowe dla zrównoważonego rozwoju transportu i ochrony środowiska naturalnego.

Mimo tych wyzwań, testy RDE są istotnym krokiem w kierunku bardziej realistycznego podejścia do pomiaru emisji spalin z pojazdów i zwiększenia ochrony środowiska naturalnego. Dają one lepszy obraz tego, jak pojazdy emitują szkodliwe substancje w rzeczywistości, co pomaga w bardziej precyzyjnym określeniu, czy spełniają one wyznaczone normy emisji spalin. Obecnie testy WLTP i testy RDE są obowiązkowym elementem procesu homologacji pojazdów w Europie, a wyniki obu rodzajów testów są brane pod uwagę, aby ocenić, czy pojazd spełnia wymogi dotyczące zużycia paliwa i emisji spalin oraz czy może być wprowadzony na rynek.

Poniżej przedstawiono zależności mające wpływ na emisję spalin [20, 59, 62, 93, 96, 117].

1. Charakterystyka pojazdu

- masa – ma wpływ na to jaką pracę musi wykonać silnik;
- rozmiar, kształt (aerodynamika) – mają wpływ na współczynnik oporu powietrza (C_x);
- wyposażenie dodatkowe – systemy informatyczne, moduły komfortu - są to urządzenia zasilane prądem elektrycznym, które poprzez alternator obciążają silnik jednocześnie podnosząc zużycie paliwa;

-
- rocznik – czym nowszy pojazd tym wyższa (surowsza) norma emisji spalin.

2. Przebyta trasa.

[3] całkowita długość trasy - pokonanie dłuższej trasy wymaga zużycia większej ilości paliwa, kluczowe przy pojazdach hybrydowych typu PHEV (przejechanie pierwszych 100km przy w pełni naładowanej baterii ogranicza uruchamianie silnika spalinowego. Problem pojawia się z każdym następnym kilometrem, gdyż układ przechodzi na napęd całkowicie spalinowy bądź co gorsze, zaczyna ładować baterię, co wiąże się z jeszcze większym zużyciem paliwa a co za tym idzie podwyższoną emisją spalin. Natomiast pojazdy badane zgodnie z obowiązującym cyklem WLTP pokonują podczas testów 23.25 km, stąd tak niskie zużycie paliwa (ok. 1-3 l/100 km), podawane przez producentów pojazdów z układem napędowym PHEV. Cykl pomiarowy WLTP miał lepiej odzwierciedlać realne warunki użytkowania, jednak pokazuje on, że w przypadku pojazdów hybrydowych założenia różnią się z rzeczywistością.

- styl jazdy – prędkość, przyspieszanie, hamowanie.
- fazy pracy silnika – zimny start, praca ustabilizowana, ciepły start, stygnięcie

3. Infrastruktura drogowa.

- rodzaj i jakość nawierzchni – współczynnik tarcia, rodzaj nawierzchni (luźna, utwardzona)
- ukształtowanie terenu – wysokość n.p.m, zakręty
- organizacja ruchu – skrzyżowania, sygnalizacje świetlne, progi zwalniające, ograniczenia prędkości, stopień urbanizacji obszaru.

4. Zdarzenia losowe.

- warunki atmosferyczne – deszcz, śnieg, wiatr, temperatura, wilgotność
- zdarzenia drogowe – wypadki, remonty, uszkodzenia jezdni.
- inne nieprzewidzenie czynniki, których wymienienie nie jest możliwe, ponieważ trudno jest przewidzieć przyczynę i okoliczność ich występowania.
- jakość paliwa.

To tylko niektóre z czynników wpływających na emisję spalin z pojazdów samochodowych. W rzeczywistości jest to bardzo złożony temat, który jest przedmiotem badań wielu naukowców na całym świecie.

3. URZĄDZENIA KONTROLNO-POMIAROWE WYKORZYSTYWANE W POMIARACH EMISJI SPALIN

3.1. Analizatory GUM

Analizatory zaliczane do grupy GUM są to urządzenia wprowadzone na rynek polski pomiędzy 1994 a 2006 rokiem a związana z listą opracowaną przez Główny Urząd Miar. Lista modeli GUM jest zatwierdzana przez Główny Urząd Miar jest ona kompletna i nie mogą do niej być dodawane kolejne pozycje. Lista zawiera urządzenia takich firm jak: Arcon, Atal, AVL, AWAT, Bosch, Brisk, Cartec, Crypton, DIP, Galio, Global, Grundig, Hermann, ISC, Maha, Motorscan, Radiotechnika, Optima, Sagem, Saxon, Siemens, SUN, Tecnotest, VTL. Pozostające w użytku analizatory z listy GUM należy poddawać systematycznej legalizacji, niektóre analizatory wymagają ponownej kalibracji co 365 lub nawet co 186 dni (np.: produkty firmy Radiotechnika). Przykładowe analizatory GUM przedstawione zostały na (rys.11) pierwszy od lewej to analizator firmy SUN model DGA 100, środkowy to AVL LIST DiGas 465, ostatni to Sagem Ultima 600.



Rys. 11. Przykładowe analizatory GUM [analizatory.info.pl]

3.2. Analizatory MID

Kolejną grupą są analizatory MID, jest to grupa urządzeń przeznaczona do badania składu spalin silników spalinowych, które zostały wprowadzone na polski rynek po 2006 roku. Według deklaracji producentów urządzenia spełniają normy unijne, które reguluje dyrektywa (dyrektywa MID). Cechą charakterystyczną wymienionej dyrektywy jest fakt, że deklarację o spełnianiu jej wymogów wystawia sam producent. Co istotne nie istnieje żadna instytucja

prowadząca wykaz zatwierdzonych urządzeń lub nadzorująca spełnianie norm, lista producentów jest równie obszerna jak w poprzednim przypadku, dodatkowo na liście znalazły się tacy producenci jak: Applus, Autec, Brain, Capelec, Fog, Gutmann, Kane, Opus, Saarloos, Seltec, Ten, Texa, Ultratec. Lista analizatorów MID jest niekompletna i wciąż poszerzana o nowe modele, a informacja o spełnianiu norm przez poszczególne urządzenia nie jest potwierdzona przez żadne zewnętrzne źródło. Podobnie jak w przypadku analizatorów GUM niektóre analizatory wymagają ponownej kalibracji w różnych interwałach czasowych. Na rysunku 12 przedstawiono przykładowy układ pomiarowy służący do badania emisji toksycznych składników spalin wykonywanego na hamowni w cyklu NEDC przy użyciu analizatorów stacjonarnych.



Rys. 12. Badanie spalania i emisji w cyklu NEDC [icm.edu.pl]

3.3. Urządzenia mobilne (PEMS)

Najciekawszą z punktu widzenia pomiarów metrologicznych jest grupa urządzeń mobilnych urządzeń pomiarowych, ich pojawienie jest ściśle związane z koniecznością stworzenia nowych procedur pomiaru emisji toksycznych składników spalin. Głównym bodźcem było przejście z cyklu badań NEDC na WLTP. Wymusiło ono na producentach aparatury pomiarowej opracowanie nowych konstrukcji analizatorów, które będą potrafiły sprostać wymaganiom nowych procedur pomiarowych. Zgodnie z założeniami urządzenia te powinny być na tyle kompaktowe, aby była możliwość zamontowania ich w lub na pojeździe. Za pierwsze mobilne urządzenie pomiarowe można uznać opracowane w Wielkiej Brytanii przez Warren Spring Laboratory, niestety brak jest wiarygodnych źródeł opisujących to rozwiązanie. Natomiast jednym z pierwszych dobrze udokumentowanych i opisanych urządzeń

typu PEMS jest aparatura pomiarowa skonstruowana przez Leo Bretona. Był on inżynierem EPA. W połowie lat dziewięćdziesiątych był pionierem testów emisji i zużycia paliwa w warunkach drogowych. Wynalazł on przełomowe technologie, które nadal są używane w dzisiejszych systemach PEMS. Wyniki jego prac należy uznać za przełomowe, szczególnie w aspekcie wiarygodności testów laboratoryjnych. Ponieważ udowodnił, że badania wykonywane w warunkach laboratoryjnych różnią się diametralnie od tych w warunkach rzeczywistych. Między innymi system ROVER opracowany przez Leo Bretona umożliwił wykrycie urządzenia zakłócającego stosowanego przez koncern Volkswagen do zaniżania wartości emisji szkodliwych czynników podczas badań w cyklu NEDC. Poniższe fotografie (rys.13-14) przedstawiają ewolucję i możliwości zastosowania systemu PEMS.



Rys. 13. Przykład pierwszego zastosowania urządzenia konstrukcji Leo Bretona zamontowanego do kosiarki [EPA]

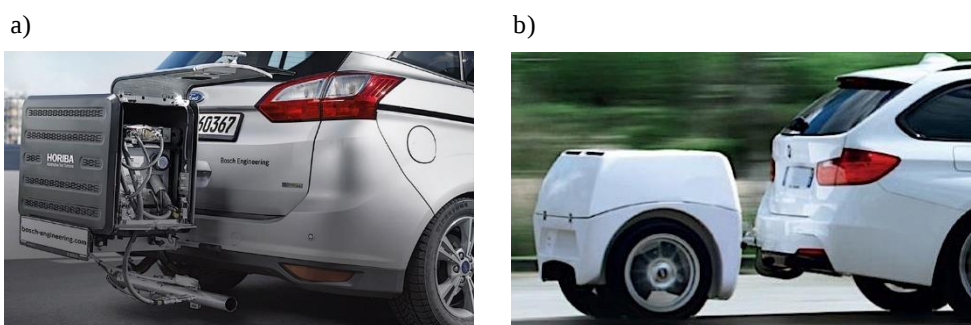


Rys. 14. Badanie EPA podczas Emission Testing in Progress [EPA]



Rys. 15. Urządzenie, które umożliwiło wykrycie nieprawidłowości w pojazdach marki VW [EPA]

Pomimo upływu ponad 40 lat od opracowania pierwszych analizatorów PEMS ich rozmiary oraz sposób mocowania do pojazdu praktycznie nie uległ zmianie. Są to urządzenia zajmujące sporo miejsca w badanym pojeździe (rys.15), bądź też dosyć znacznie wystające poza obrys pojazdu w trakcie badania (rys.16), nie rzadko potrzebują również zasilania zewnętrznego.



Rys. 16. Analizatory PEMS (a) Horiba, b) Addair]

Jednak w porównaniu z analizatorami stacjonarnymi istotną ich przewagą, poza oczywiście możliwością zbadania pojazdu w jego naturalnym środowisku pracy jest niski koszt, waga (w porównaniu do urządzeń laboratoryjnych) oraz powszechniejszy dostęp urządzeń typu PEMS. Istotną zaletą analizatorów PEMS jest ich uniwersalność oraz szeroki zakres możliwości konfiguracji.

Można tutaj wyróżnić projekt Clean Air Communities - WTC Diesel Emissions Reduction Project [74], gdzie jeden z wczesnych systemów typu PEMS został użyty do przebadania zanieczyszczeń wydobywających się z maszyn budowlanych w trakcie ich realnych warunków pracy na palcu budowy. Wśród przebadanych jednostek można było wyróżnić takie urządzenia jak: pompy do betonu, spychacze, równiarki oraz żurawie, raczej trudno sobie wyobrazić takie badania w laboratorium (gabaryty maszyn, transport) [80]. Najważniejsze było jednak to, aby

przebadać maszyny w ich realnych warunkach pracy, do czego urządzenia typu PEMS nadają się wręcz idealnie. Począwszy od roku 2000 coraz więcej podmiotów zaczęło instalować urządzenia PEMS do pomiaru emisji spalin w warunkach trakcyjnych do setek silników wysokoprężnych zamontowanych w autobusach miejskich, tranzytowych, samochodach dostawczych, wszelkiego rodzaju maszynach budowlanych, wózkach widłowych, pojazdach wojskowych, a nawet znane są przypadki montażu w lokomotywach lub promach. Jak wskazują przytoczone powyżej przypadki, dzięki urządzeniom typu PEMS jesteśmy w stanie dokonać analizy emisji zanieczyszczeń w praktycznie każdym silniku spalinowym dostępnym obecnie na rynku.

Ze względu na zastosowanie systemu PEMS w warunkach trakcyjnych, wymagania jakim musi sprostać to: mała, lekka i wytrzymała na trudne warunki pracy konstrukcja, która nie może stanowić zagrożenia dla bezpieczeństwa kierowcy, pasażerów oraz innych użytkowników dróg. Dodatkowo powinna nadawać się do instalacji w jak najszerszej gamie silników spalinowych.

W kontekście kompaktowości analizatorów typu PEMS należy wspomnieć o urządzeniach typu iPEMS, których jedną z cech jest to, iż jest to system modułowy, posiada wbudowane źródło zasilania, waży nie więcej niż 7 kg (wraz z całym oprzyrządowaniem) oraz posiada możliwość pomiaru tlenków azotu (NO_x), dwutlenku węgla (CO_2), oraz cząstek stałych (PM) przez co najmniej 2 godziny, a jego dokładność pomiarowa musi mieścić się w granicy 10% [97-98].

4. SONDY LAMBDA

W celu spełnienia obowiązujących norm emisyjnych i ochrony środowiska sondy lambda odgrywają kluczową rolę w nowoczesnych systemach kontroli emisji spalin, zapewniając optymalną pracę konwerterów katalitycznych oraz systemów recyrkulacji spalin (EGR). Należą do rodziny czujników elektrolityczno-rezystancyjnych (rys.17). Dzięki precyzyjnemu monitorowaniu składu spalin, umożliwiają one dostosowanie procesu spalania w taki sposób, aby zminimalizować emisję szkodliwych substancji, takich jak tlenki azotu (NO_x) i węglowodory (HC), do atmosfery. Ich głównym zadaniem jest pomiar stężenia tlenu w spalinach, co umożliwia precyzyjne sterowanie mieszanką paliwowo-powietrzną oraz optymalizację procesów katalitycznej redukcji szkodliwych substancji. Na rynku dostępne są różne rodzaje sond lambda, z których każdy ma swoje specyficzne zastosowania i charakterystyki [156, 157, 161, 174].

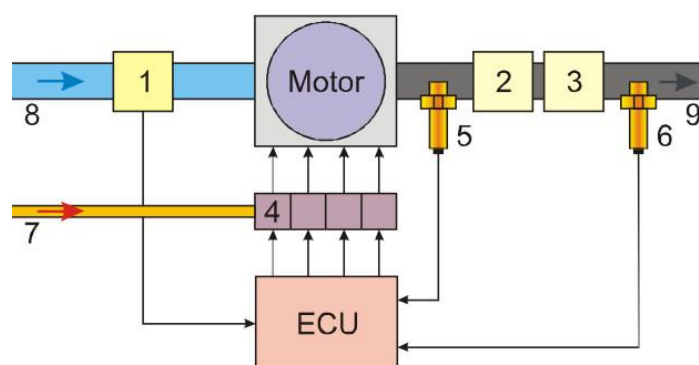


Rys. 17. Wygląd przykładowej sondy lambda [Bosch]

Sondy lambda umieszcza się zazwyczaj w dwóch kluczowych miejscach w układzie wydechowym pojazdu (rys.18). Pierwsza sonda lambda jest montowana bezpośrednio za kolektorem wydechowym, jeszcze przed katalizatorem. Jej głównym zadaniem jest monitorowanie składu spalin wychodzących bezpośrednio z silnika. Informacje z tej sondy są wykorzystywane do regulacji mieszanki paliwowo-powietrznej, co jest kluczowe dla efektywnej pracy silnika i minimalizacji emisji szkodliwych substancji. Druga sonda, umieszczona za katalizatorem, sprawdza efektywność jego działania. Mierzy ona poziom tlenu w spalinach po przejściu przez katalizator, co pozwala ocenić, czy katalizator prawidłowo redukuje szkodliwe substancje. Informacje z tej sondy są używane głównie do monitorowania stanu katalizatora i nie mają bezpośredniego wpływu na regulację mieszanki paliwowej [105, 106, 107, 108, 115, 125, 132]. Sonda lambda przed katalizatorem dostarcza danych na temat stężenia tlenu w spalinach, co umożliwia sterownikowi silnika dostosowanie proporcji

mieszanki paliwowo-powietrznej w celu osiągnięcia optymalnego spalania. Idealna mieszanka, zwana „stechiometryczną”, zapewnia najbardziej efektywne spalanie, redukując jednocześnie emisję szkodliwych substancji. Sonda za katalizatorem monitoruje jego skuteczność. Nieprawidłowe wartości wskazań tej sondy mogą sygnalizować problemy z katalizatorem, co może prowadzić do wcześniejszych interwencji serwisowych, przed poważniejszymi uszkodzeniami układu wydechowego [122].

Sondy lambda są kluczowym elementem systemów sterowania silnikiem oraz systemu OBD (On-Board Diagnostics) w pojazdach [95, 116]. Ich prawidłowe działanie jest niezbędne nie tylko dla osiągnięcia ekonomii jazdy, ale także dla ochrony środowiska przez minimalizowanie emisji szkodliwych gazów wydechowych [17, 18, 52, 53, 55, 56]. Podsumowując, sondy lambda są nieodzownym elementem nowoczesnych pojazdów, zapewniającym nie tylko optymalną pracę silnika, ale także spełnianie coraz bardziej restrykcyjnych norm emisji spalin.



Rys. 18. Schemat umieszczenia sond lambda w pojeździe [Wikipedia]

1. czujnik masowego przepływu powietrza
2. katalizator pierwotny – w zależności od modelu pojazdu może być również tylko jeden
3. katalizator wtórny - w zależności od modelu pojazdu może być również tylko jeden
4. wtryskiwacz paliwa
5. sonda lambda (regulacyjna)
6. sonda lambda (diagnostyczna)
7. obwód zasilania paliwem
8. układ dolotowy
9. kolektor wydechowy

Z punktu widzenia fizyki i chemii fizycznej działanie sondy opiera się na zjawisku powstawania siły elektromotorycznej (SEM) wskutek różnicy stężeń tlenu po obu stronach elektrolitu w sondzie. Fundamentalne znaczenie ma tu równanie Nernsta (4.1), które opisuje

zależność pomiędzy napięciem wyjściowym sondy a wartością stosunku ciśnień (lub aktywności) tlenu wewnątrz i na zewnątrz czujnika.

Ogólna postać równania Nersta:

$$E = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{a_{\text{ox}}}{a_{\text{red}}} \right) \quad (4.1)$$

dla temperatury 298 K i roztworów na tyle rozcieńczonych, że współczynnik aktywności jonów w nich zawartych jest z dobrym przybliżeniem równy 1 upraszcza się do:

$$E = E^0 + \frac{0,05917}{z} \log \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]} \quad (4.2)$$

gdzie:

R – stała gazowa równa $8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
 T – temperatura wyrażona w kelwinach,
 z – liczba elektronów wymienianych w reakcji połówkowej,
 a – aktywność molowa indywiduów w chemicznych biorących udział w reakcji
 F – stała Faradaya równa $96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$,
[red] – stężenie molowe formy zredukowanej,
[ox] – stężenie molowe formy utlenionej,
współczynnik 0,05917 ma wymiar V.

Obliczenie stężenia molowego (4.3)

$$c_B = \frac{n_B}{V} = \frac{m_B}{M_B V} \quad (4.3)$$

gdzie:

c_B to stężenie molowe składnika B,
 n_B to liczba moli składnika B,
 V to objętość mieszaniny (roztworu),
 m_B to masa składnika B,
 M_B to masa molowa składnika B.

Zmiana ciśnienia cząstkowego tlenu wpływa na potencjał elektrody w czujnikach tlenu, co jest fundamentalne dla kontroli i optymalizacji procesów spalania w silnikach spalinowych (4.4).

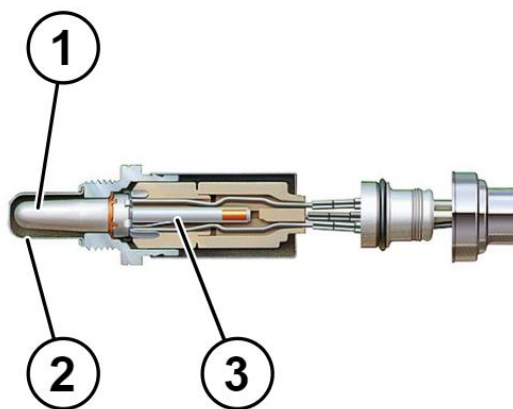
$$E = E^0 + \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{\text{O}_2, \text{ref}}}{p_{\text{O}_2, \text{spaliny}}} \right) \quad (4.4)$$

Sondy lambda, pełniące kluczową rolę w systemach zarządzania silnikami spalinowymi poprzez mierzenie stężenia tlenu w spalinach, są narażone na szereg problemów eksploatacyjnych i awarii, które mogą znacząco wpływać na ich funkcjonowanie. Jednym

z głównych problemów jest zanieczyszczenie czujnika, które może wynikać z nieprawidłowej pracy silnika lub stosowania złej jakości paliwa. Zanieczyszczenia, takie jak osady węglowe czy pozostałości olejów silnikowych, mogą pokryć czujnik, zakłócając jego zdolność do precyzyjnego pomiaru stężenia tlenu. Innym wyzwaniem jest ekspozycja na wysokie temperatury w układzie wydechowym, która może uszkodzić wrażliwe komponenty sondy, w tym elementy ceramiczne, prowadząc do ich nieprawidłowego działania. Sondy lambda są także podatne na uszkodzenia mechaniczne, które mogą wystąpić podczas jazdy po nierównych powierzchniach; wibracje i uderzenia mogą spowodować pęknięcia lub całkowite odłączenie czujnika od układu wydechowego. Dodatkowo, sondy lambda mogą ulec przebiegom elektrycznym lub korozji spowodowanej wilgocią i solą drogową, co uszkadza ich elementy elektryczne i prowadzi do problemów z przewodnością [42, 58, 84]. Wreszcie, naturalne starzenie się materiałów, z których zbudowana jest sonda, może skutkować zmniejszeniem jej dokładności pomiarowej. Wszystkie te czynniki razem wzięte składają się na trudności w utrzymaniu sond lambda w dobrym stanie operacyjnym i mogą skutkować koniecznością ich regularnej wymiany lub naprawy, aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie silnika i efektywność spalania [146].

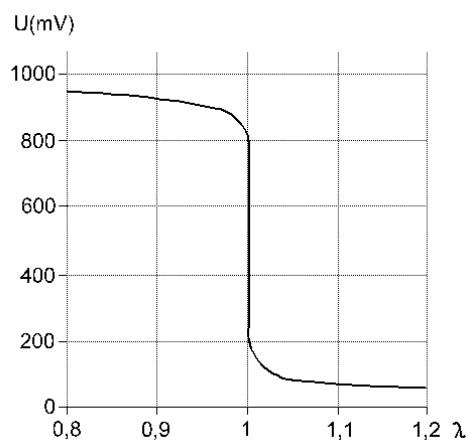
4.1. Sondy dwustanowe – napięciowe, rezystancyjne (cyrkonowa)

Są to najbardziej podstawowe typy sond lambda, wykorzystujące ceramiczny element z tlenku cyrkonu (ZrO_2) do pomiaru stężenia tlenu (rys.19). Ich główną cechą jest zdolność do szybkiego określenia, czy mieszanka paliwowo-powietrzna jest bogata (mniej tlenu) czy uboga (więcej tlenu) w stosunku do idealnej mieszanki stechiometrycznej. Sondy te są stosunkowo tanie w produkcji i najczęściej używane w starszych systemach.



Rys. 19. Napięciowa sonda lambda [Inter Cars]
Napięciowa sonda lambda: Element czujnikowy – 1 Rura ochronna – 2 Ogrzewanie sondy – 3

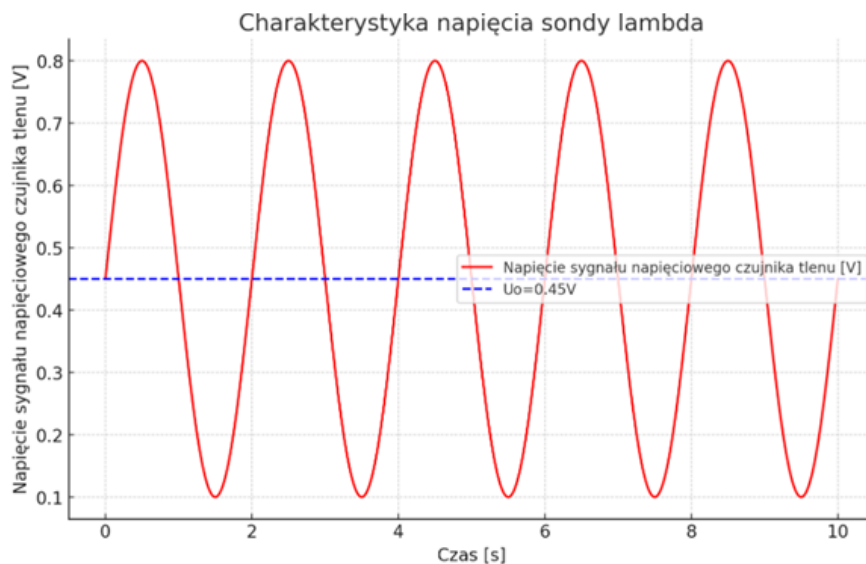
Napięciowa sonda lambda mierzy zawartość tlenu w spalinach i generuje w stanie nagrzanym do temperatury roboczej ($\geq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) napięcie w zakresie 0 ... 1000 mV (rys.20-22).



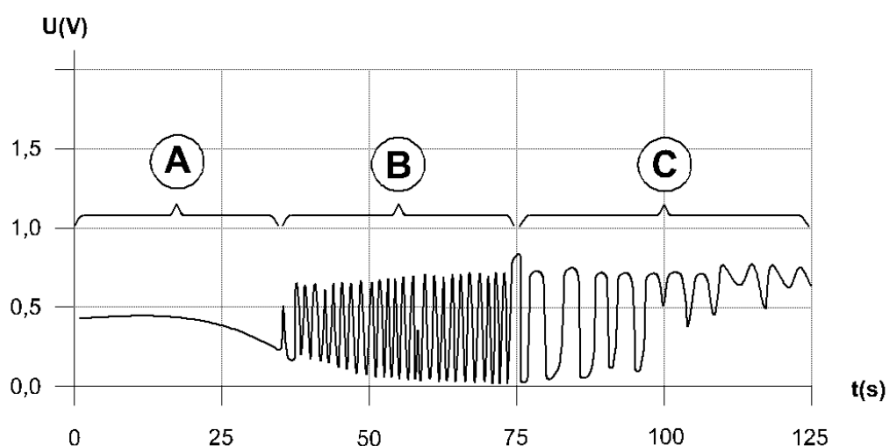
Rys. 20. Przebieg sygnału prawidłowo działającej sondy [Inter Cars]

$\lambda < 1$ = bogata mieszanka.

$\lambda > 1$ = uboga mieszanka.

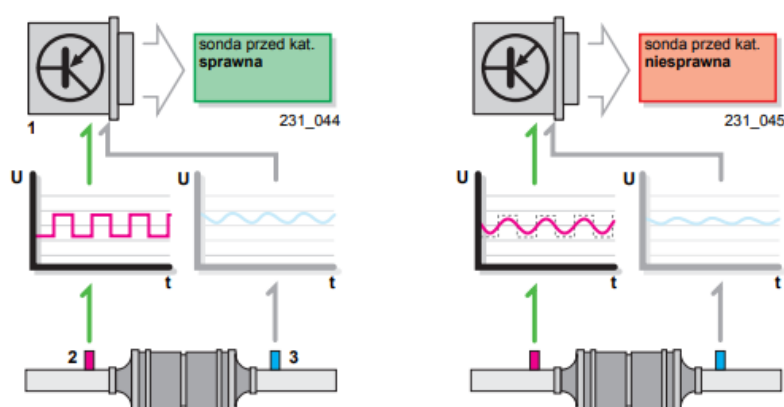


Rys. 21. Wartość referencyjna sondy przed katalizatorem (regulacyjnej) [Inter Cars]



Rys. 22. Wartość zmierzona sondą katalizatorem (diagnostycznej) [Inter Cars]

Napięcie generowane przez sondę lambda jest bezpośrednio zależne od zawartości tlenu w spalinach. Zmiana tego napięcia następuje w sposób skokowy, co umożliwia sterownikowi silnika (ECU) rozróżnienie czy mieszanka paliwowa jest bogata (zawiera więcej paliwa niż teoretyczna idealna mieszanka) czy uboga (zawiera więcej powietrza). Sterownik silnika, poprzez ciągłe dostosowywanie czasu wtrysku paliwa, dąży do utrzymania wartości współczynnika λ na poziomie optymalnym, znanym jako $\lambda = 1$, co odpowiada idealnej mieszance powietrza do paliwa. Proces ten powoduje niewielkie wahania wartości λ wokół punktu $\lambda = 1$, co z kolei indukuje zmiany w sygnale generowanym przez napięciową sondę lambda (rys.23).



Rys. 23. Sygnał przed katalizatorem zmienia się wraz z modulacją składu mieszanki [Bosch]

Dynamika pracy sondy lambda jest kluczowa, ponieważ sterownik silnika musi na bieżąco dostosowywać czas wtrysku paliwa. Wymagana jest co najmniej jedna zmiana sygnału na sekundę, aby zachować precyzyjne sterowanie składem mieszanki paliwowej. Czynniki takie

jak starzenie się sondy, przegrzewanie, osady wynikające ze spalania oraz użycie paliwa zawierającego ołów mogą negatywnie wpłynąć na jej szybkość reakcji, co jest niepożądane. W celu przyspieszenia osiągnięcia przez sondę lambda optymalnej temperatury pracy po uruchomieniu silnika, zastosowano w niej element grzewczy. Ten element jest zdolny do podgrzania korpusu ceramicznego sondy do wymaganej temperatury w przeciągu 20 do 30 sekund od momentu uruchomienia silnika. Podczas pracy silnika, element grzewczy utrzymuje temperaturę pracy sondy lambda na optymalnym poziomie, co jest kluczowe dla jej prawidłowego funkcjonowania.

4.2. Sondy rezystancyjne (tytanowe)

Sondy rezystancyjne wykorzystujące tlenek tytanu (TiO_2) jako element czujnikowy prezentują odmienny sposób reagowania na obecność tlenu w spalinach w porównaniu do tradycyjnych sond z tlenku cyrkonu, które generują napięcie w odpowiedzi na różnicę stężeń tlenu. Głównym mechanizmem działania tych sond jest zmiana oporności elektrycznej tlenku tytanu w zależności od stężenia tlenu w otaczającym środowisku, co następnie jest przekształcane na sygnał elektryczny możliwy do odczytu i interpretacji przez system sterowania silnikiem. Jednakże, działanie sond z tlenku tytanu jest ograniczone przez ich czułość na niskie temperatury, co wymaga utrzymania ich w odpowiednio wysokiej temperaturze dla zapewnienia optymalnego funkcjonowania. Ta specyfika sprawia, że mogą one znajdować zastosowanie w ograniczonym zakresie sytuacji, szczególnie tam, gdzie ich szybka reakcja na zmiany stężenia tlenu przewyższa potencjalne wyzwania operacyjne.

Trwałość sond z tlenku tytanu również uznaje się za mniejszą w porównaniu do ich cyrkonowych odpowiedników, co jest efektem ich większej wrażliwości na zanieczyszczenia oraz tendencji do zmiany oporności w czasie. Ta cecha sprawia, że są one droższe i mniej dostępne na rynku, co może ograniczać ich szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym i innych sektorach wymagających precyzyjnego monitorowania stężeń tlenu. Pomimo tych ograniczeń, unikalne właściwości sond rezystancyjnych z tlenku tytanu czynią je wartościowym narzędziem w specyficznych aplikacjach, gdzie ich specjalistyczne zastosowanie może przynieść korzyści niedostępne przy użyciu tradycyjnych technologii. Ich zdolność do szybkiej zmiany oporności w odpowiedzi na zmiany stężenia tlenu może być wykorzystana nie tylko w motoryzacji, ale również w niektórych procesach przemysłowych, gdzie tradycyjne metody mogą nie oferować wystarczającej precyzji lub szybkości odpowiedzi. W związku z tym, choć sondy z tlenku tytanu mogą nie być idealnym rozwiązaniem dla każdej

aplikacji, ich specyficzne właściwości i potencjalne zastosowania nadal stanowią cenną część rozwijającego się krajobrazu technologicznego w dziedzinie sensorów gazowych.

4.3. Sondy szerokopasmowe

Sondy szerokopasmowe stanowią kluczowy element w nowoczesnych systemach zarządzania silnikami spalinowymi, oferując precyzyjne i ciągłe monitorowanie stężenia tlenu w spalinach. Te zaawansowane czujniki są zdolne do działania w szerszym zakresie stężeń tlenu, w przeciwieństwie do tradycyjnych sond lambda, które zapewniają dokładne odczyty tylko w wąskim zakresie wokół stosunku stechiometrycznego. Dzięki tej charakterystyce, sondy szerokopasmowe umożliwiają optymalizację procesu spalania w silniku, co prowadzi do redukcji emisji szkodliwych substancji, poprawy efektywności paliwowej i zwiększenia ogólnej wydajności silnika. W centrum sondy szerokopasmowej znajduje się czujnik, który, podobnie jak w przypadku tradycyjnych sond lambda, wykorzystuje tlenek cyrkonu (ZrO_2) lub tlenek tytanu (TiO_2) jako materiał czujnikowy. Jednak w przeciwieństwie do swoich wąskopasmowych odpowiedników, sondy szerokopasmowe są wyposażone w dodatkowe elementy, takie jak pompa jonowa i dodatkowe obwody elektroniczne, które umożliwiają im działanie w szerokim zakresie stężeń tlenu. To połączenie pozwala na precyzyjne kontrolowanie stosunku paliwo-powietrze (AFR) w całym zakresie pracy silnika, od ubogich mieszanek (wysokie stężenie tlenu) do bogatych (niskie stężenie tlenu). Kluczową cechą pracy sond szerokopasmowych jest ich zdolność do bezpośredniego i ciągłego pomiaru stosunku paliwo-powietrze w spalinach. Dzięki temu, systemy zarządzania silnikiem mogą dynamicznie dostosowywać wtrysk paliwa, aby utrzymać optymalne warunki spalania, niezależnie od warunków pracy silnika. Jest to szczególnie ważne w kontekście nowoczesnych wymagań dotyczących emisji spalin, gdzie precyzyjna kontrola AFR może znacząco przyczynić się do obniżenia emisji NO_x , CO i węglowodorów. Ich zastosowanie pozwala na dokładniejsze dostosowanie mieszanki paliwowej, co przekłada się na lepszą efektywność spalania, mniejsze zużycie paliwa i niższą emisję szkodliwych substancji. Dzięki temu, sondy szerokopasmowe stanowią kluczowy element w dążeniu do bardziej ekologicznych i wydajnych silników spalinowych, odpowiadając na rosnące wymagania środowiskowe i regulacyjne.

Wybór odpowiedniego rodzaju sondy lambda jest kluczowy dla efektywności systemów redukcji emisji spalin. Sondy szerokopasmowe oferują wysoką dokładność i szybką reakcję, co pozwala na bardziej precyzyjną regulację procesu spalania i optymalizację pracy konwerterów katalitycznych oraz systemów EGR, co przekłada się na znaczące zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Rozwój technologii sond lambda koncentruje się na

zwiększaniu ich dokładności, trwałości oraz odporności na zanieczyszczenia, co ma kluczowe znaczenie dla dalszego postępu w dziedzinie redukcji emisji spalin. Innowacje w zakresie materiałów i technologii produkcyjnych mają na celu poprawę parametrów eksploatacyjnych pojazdów i minimalizację negatywnego wpływu motoryzacji na środowisko.

5. CEL TEZA I ZAKRES PRACY

Celem głównym rozprawy jest opracowanie, wdrożenie oraz weryfikacja modelu predykcyjnego szacowania poziomu emisji spalin silnika o zapłonie iskrowym z wykorzystaniem napięcia sondy lambda oraz algorytmów predykcyjnych.

Na podstawie analizy literatury sformułowano następującą hipotezę oraz tezę rozprawy:

Hipoteza badawcza:

Istnieje możliwość uzyskania wyraźnie wyższej skuteczności identyfikacji pojazdów o ponadnormatywnej emisji toksycznych składników spalin oraz przyczyn nadmiernej emisji zanieczyszczeń emitowanych przez silniki o zapłonie iskrowym dzięki połączeniu analizy w czasie rzeczywistym sygnałów z pokładowych sond lambda oraz jednoczesnego monitorowania parametrów pracy silnika wspomaganej algorytmami predykcyjnymi, co umożliwia szybką ocenę stanu technicznego układu wydechowego, predykcyjne wykrywanie potencjalnych usterek oraz redukcję emisji podczas codziennej eksploatacji pojazdu.

W pracy weryfikuje się wyżej wymienioną hipotezę w badaniach przeprowadzonych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów wyposażonych w silniki o zapłonie iskrowym

Teza pracy:

Wdrożenie mobilnego systemu opartego na czujnikach tlenu (sondach lambda) oraz układach telemetrycznych realizujących pomiary w czasie rzeczywistym, pozwoli na sprawne i skuteczne monitorowanie składu spalin w warunkach trakcyjnych, co istotnie może wspomagać wczesne wykrywanie pojazdów przekraczających normy emisji i przyczynić się może do ograniczenia negatywnego oddziaływania transportu drogowego na środowisko naturalne.

Dla osiągnięcia głównego celu pracy założono następujące cele szczegółowe:

- analiza aktualnego stanu wiedzy na temat systemów telemetrycznych i pomiaru emisji spalin;
- przegląd aktów prawnych regulujących normy emisji spalin;
- przegląd procedur testowych w zakresie pomiaru emisji spalin;
- opracowanie koncepcji systemu mobilnej analizy spalin z wykorzystaniem sonda lambda;
- opracowanie algorytmu oprogramowania do archiwizacji, analizy i wizualizacji danych;

-
- przeprowadzenie badań porównawczych na stacji diagnostycznej oraz w rzeczywistych warunkach trakcyjnych, pojazdów w różnym stanie technicznym (z konwerterem/bez) i pojemności silnika;
 - wyznaczenie zależności wpływu wartości napięcia sondy lambda na emisję szkodliwych czynników (CO, HC, NO_x).

Pomiar emisji spalin jest kluczowy w kontekście monitorowania i ograniczania zanieczyszczeń powietrza. Spaliny samochodowe są znaczącym źródłem zanieczyszczeń, takich jak tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), węglowodory (HC) i cząstki stałe (PM), które wpływają na jakość powietrza, zwłaszcza w miastach o dużym natężeniu ruchu. Ponadto pomiary te są niezbędne, aby skutecznie wdrażać i egzekwować przepisy środowiskowe, które mają na celu ochronę środowiska przed nadmiernym zanieczyszczeniem powietrza i jego skutkami. Regularne monitorowanie emisji pozwala identyfikować pojazdy przekraczające normy ekologiczne, co sprzyja długoterminowej poprawie jakości powietrza oraz redukcji negatywnego wpływu na zdrowie ludzi i stan środowiska. Jednakże obowiązujące w kraju i w Europie normy kontroli emisji spalin oparte o okresowe przeglądy wykonywane na SKP, są mało skuteczne. Mając na uwadze powyższe przyjęto jako główny cel stworzenia mobilnego systemu monitorowania emisji spalin, umożliwiającego identyfikację pojazdów, które przekraczają właściwe dla siebie normy emisji. Taka strategia umożliwi eliminację pojazdów z uszkodzonymi systemami oczyszczania spalin oraz będzie zapobiegać dalszej eksploatacji pojazdów, które z innych nieznanych przyczyn generują emisję powyżej dopuszczalnych norm. Wykorzystanie pokładowych czujników tlenu powinno umożliwić szybszą ocenę efektywności procesów spalania w silnikach pojazdów. W przypadku, gdy emisja spalin przekroczy normy, będzie to sygnał o potencjalnych problemach z układem napędowym lub systemem oczyszczania spalin. Dzięki temu możliwe będzie szybkie podjęcie działań naprawczych lub wycofanie pojazdu z ruchu, co przyczynia się do poprawy jakości powietrza i ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

6. WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW NIEZBĘDNYCH DO BUDOWY ALGORYTMU PREDYKCYJNEGO

Ze względu, iż po pierwsze istnieje istotna różnica pomiędzy wynikami pomiarów podawanymi przez typowe analizatory spalin używane w Stacjach Kontroli Pojazdów jak również używane w typowych badaniach na hamowni a wymogami homologacyjnymi i wymogami norm Euro (normy wyrażone są w g/km a analizatory podają wyniki w % lub ppm), po drugie z konieczności dostarczenia odpowiednich danych dla algorytmów predykcyjnych w niniejszym rozdziale zaprezentowano niezbędne informacje oraz wykonano odpowiednie obliczenia i przekształcenia.

6.1. Obliczenia emisji w warunkach zachowania stechiometrii procesu spalania

Procesy spalania prostych paliw węglowodorowych zostały już w znacznym stopniu zbadane pod kątem mechanizmów chemicznych. Ponieważ paliwa silnikowe stanowią zazwyczaj mieszaninę wielu różnych węglowodorów, dokładne opisanie reakcji chemicznych wymaga uwzględnienia tysięcy różnorodnych przemian zachodzących równocześnie. Z tego powodu konieczne jest zastosowanie znacznie uproszczonego modelu chemicznego. Dotychczasowe próby modelowania sugerują, że wystarczy uwzględnić 12 komponentów pozostających w stanie równowagi chemicznej: C_nH_m , O_2 , CO_2 , H_2O , CO , H_2 , OH , H , O , N . Składniki reagują ze sobą zgodnie z przyjętym, uproszczonym mechanizmem, który obejmuje reakcje kinetyczne oraz 7 równań równowagi chemicznej.

- reakcje kinetyczne:



- reakcje równowagowe:



6.2. Wpływ rodzaju paliwa na osiągnięte wyniki

Konwencjonalny silnik spalinowy zasilany jest najczęściej paliwami płynnymi, ropopochodnymi. Są one mieszaninami następujących węglowodorów:

- izookatan C_8H_{18} (parafina);
- toluol C_7H_8 (aromaty);
- dizobutylen C_8H_{16} (olefina);
- inne.

Dla paliw tego typu można zastosować ogólny wzór chemiczny $\text{C}_a\text{H}_m\text{O}_n\text{N}_k$. Reakcja takiego paliwa następuje z powietrzem zawierającym O_2 , N_2 i Ar przy współczynniku nadmiaru powietrza λ . Skład chemiczny paliw określa się za pomocą udziałów masowych, oznaczonych jako:

- *c* - węgiel,
- *h* - wodór,
- *s* - siarka,
- *o* - tlen,
- *n* - azot.

Suma udziałów składników masowych wynosi 1.

$$c + h + s + o + n = 1 \tag{6.3}$$

udziały masowe poszczególnych składników w paliwach konwencjonalnych:

- benzyna

- $c = 0,855$
- $h = 0,145$
- $o = 0$
- $s = 0$

- olej napędowy:

- $c = 0,870$
- $h = 0,125$
- $o = 0,005$
- $s = 0$

Procentowy udział poszczególnych komponentów może wykazywać niewielkie wahania w zależności od rodzaju paliwa. W olejach napędowych obecne są minimalne ilości siarki, które nie wpływają na ich wartość energetyczną. Każde paliwo posiada swoją wartość opałową, definiowaną jako ilość ciepła uwolnionego podczas całkowitego spalania 1 kg paliwa w idealnych warunkach. Wartość opałowa wynosi:

benzyny:

- $W_O = 43,000 - 44,000 \text{ [kJ/kg]}$

oleju napędowego:

- $W_O = 35,000 - 42,000 \text{ [kJ/kg]}$

Do obliczeń niezbędna jest gęstość paliwa, która w warunkach normalnych wynosi:

- benzyna: $\rho = 0,735 \text{ kg/dm}^3$
- olej napędowy: $\rho = 0,87 \text{ kg/dm}^3$

Wartości są zmienne w zależności od warunków zewnętrznych oraz składników lotnych.

6.3. Teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze

Spalanie zupełne i całkowite przebiega według reakcji:



Przy obliczaniu teoretycznej ilości tlenu potrzebnej do zupełnego i całkowitego spalania jednostki paliwa, należy odliczyć tlen zawarty w paliwie. Przy spaleniu dawki paliwa B_0 wyrażonej w kg należy dostarczyć n_0 kilomoli świeżego ładunku, przy czym dla silników gaźnikowych:

$$[n_o = (\lambda L_t + \frac{1}{M_p}) B_0 \quad [\text{kmol}]] \tag{6.5}$$

dla silników z wtryskiem paliwa:

$$n_0 = \lambda L_t B_p \tag{6.6}$$

gdzie:

λ - współczynnik nadmiaru powietrza,

M_p - masa molowa paliwa dla silników benzynowych równa 110–120 kg/kmol

L_t - teoretyczne zapotrzebowanie powietrza suchego.

6.4. Skład chemiczny spalin

Przy spalaniu zupełnym i całkowitym dawki paliwa B_0 przy współczynniku $\lambda \geq 1$ otrzymamy następującą ilość n_{ss} kmoli spalin:

$$n_{ss} = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{s}{32} + \lambda L_t - \right) n_{0min} B_0 [\text{kmol}] \tag{6.7}$$

Przy spaleniu 1 kg węgla C otrzymuje się 1 kmol CO_2 . Identycznie jest dla wodoru. Stąd otrzymujemy następujące wzory na ilość składników spalin powstałych przy spaleniu paliwa w [kmol/kg] paliwa:

Lambda $\lambda > 1$:

$$\begin{aligned}
n'' [\text{CO}_2] &= \frac{c}{12} \\
n'' [\text{N}_2] &= 0,79 \lambda L_t \\
n'' [\text{O}_2] &= 0,21 (\lambda - 1) L_t \\
n'' [\text{H}_2\text{O}] &= \frac{h}{2} + X_{za} n'_a
\end{aligned}
\tag{6.8}$$

gdzie:

$X_{za} n'_a$ – jest wilgocią pochodzącą z powietrza, które z reguły pomijamy w obliczeniach.

Lambda $\lambda \leq 1$:

$$\begin{aligned}
 n''[\text{CO}_2] &= \frac{c}{12} - 0,42(1 - \lambda)L_t \\
 n''[\text{CO}] &= 0,42(1 - \lambda)L_t \\
 n''[\text{N}_2] &= 0,79\lambda L_t \\
 n''[\text{O}_2] &= 0 \\
 n''[\text{H}_2\text{O}] &= \frac{h}{2} + X_{\text{za}}n'_a
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Po przekształceniu otrzymamy wzory na ilość spalin w zależności od nadmiaru powietrza:

Lambda ≥ 1 :

$$n_s = \lambda L_t + \frac{h}{4} + \frac{o}{32} - \frac{s}{32} \text{ [kmol/kg paliwa]} \tag{6.10}$$

Lambda $\lambda < 1$:

$$n_s = 0,79\lambda L_t + \frac{h}{2} + \frac{c}{12} \text{ [kmol/kg paliwa]} \tag{6.11}$$

Udziały molowe składników spalin r.

$$\begin{aligned}
 r[\text{CO}_2] &= \frac{n''[\text{CO}_2]}{n_s} \\
 r[\text{N}_2] &= \frac{n''[\text{N}_2]}{n_s} \\
 r[\text{O}_2] &= \frac{n''[\text{O}_2]}{n_s} \\
 r''[\text{H}_2\text{O}] &= \frac{n''[\text{H}_2\text{O}]}{n_s}
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Wielkość $n''[\text{CO}_2]$ zawiera dwutlenek siarki. Masę molową spalin M_s można obliczyć z następującej zależności:

$$M_s = \sum r_i M_i \tag{6.13}$$

gdzie:

r_i – udziały molowe składników spalin,

M_i – masy molowe składników spalin.

Stałą gazową spalin obliczamy z bilansu równowagi poszczególnych składników spalin

(6.14):

$$R_{sp} = \frac{n''[\text{CO}_2]R_{\text{CO}_2} + n''[\text{CO}]R_{\text{CO}} + n''[\text{H}_2\text{O}]R_{\text{H}_2\text{O}} + n''[\text{N}_2]R_{\text{N}_2} + n''[\text{O}_2]R_{\text{O}_2}}{n_s} \tag{6.14}$$

Stałe gazowe R poszczególnych składników występujące w powyższym wzorze wyznaczamy następująco:

$$\begin{aligned}
R_{\text{CO}_2} &= \frac{MR}{2M[\text{O}] + M[\text{C}]} \\
R_{\text{CO}} &= \frac{MR}{M[\text{C}] + M[\text{O}]} \\
R_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{MR}{2M[\text{H}] + M[\text{O}]} \\
R_{\text{O}_2} &= \frac{MR}{2M[\text{O}]} \\
R_{\text{N}_2} &= \frac{MR}{2M[\text{N}]}
\end{aligned} \tag{6.15}$$

gdzie:

$M [\dots]$ - oznaczają masy cząsteczkowe gazów [kg/mol]

$M_{[\text{O}]} = 15,999$

$M_{[\text{H}]} = 1,008$

$M_{[\text{C}]} = 12,011$

$M_{[\text{N}]} = 14,007$

6.5. Toksyczne składniki spalin

W modelowaniu procesów spalania używa się zwykle reakcji równowagowych, w których przebieg tworzenia się związków nie zależy od czasu. Ważna jest ilość substancji poszczególnych składników wytworzonych po spalaniu. Reakcję równowagową dla paliwa o ogólnym wzorze $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_l\text{N}_k$ opisuje równanie:

$$\begin{aligned}
y_{13} \left[\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_l\text{N}_k + \lambda \left(n + \frac{m}{4} - \frac{l}{2} \right) (\text{O}_2 + 3.7274\text{N}_2 + 0.0444\text{Ar}) \right] \\
\rightarrow y_1\text{H} + y_2\text{O} + y_3\text{N} + y_4\text{H}_2 + y_5\text{OH} + y_6\text{CO} \\
+ y_7\text{NO} + y_8\text{O}_2 + y_9\text{H}_2\text{O} + y_{10}\text{CO}_2 + y_{11}\text{N}_2 \\
+ y_{12}\text{Ar}
\end{aligned} \tag{6.16}$$

wartości $y_1 + y_{13}$ obliczamy z układu równań:

- bilans pierwiastków:

$$\begin{aligned}
\text{C: } y_6 + y_{10} &= n y_{13} \\
\text{H: } y_1 + 2 y_4 + y_5 + 2 y_9 &= m y_{13} \\
\text{O: } y_2 + y_5 + y_6 + y_7 + 2 y_8 + y_9 + 2 y_{10} &= 2 r' y_{13} \\
\text{N: } y_3 + y_1 + 2 y_{11} &= 2 r' y_{13} \\
\text{Ar: } y_{12} &= r'' y_{13}
\end{aligned} \tag{6.17}$$

- bilans udziałów molowych:

$$\sum_{i=1}^{12} y_i = 1 \tag{6.18}$$

- warunki równowagi chemicznej:

$$\begin{aligned}
K_1 &= y_1 \sqrt{\frac{p}{y_4}}, & K_2 &= y_2 \sqrt{\frac{p}{y_8}} \\
K_3 &= y_3 \sqrt{\frac{p}{y_{11}}}, & K_5 &= \frac{y_5}{\sqrt{y_4 y_8}}
\end{aligned} \tag{6.19}$$

$$K_7 = \frac{y_7}{\sqrt{y_4 y_{11}}}, \quad K_9 = \frac{y_9}{\sqrt{p y_8}}, \quad K_{10} = \frac{y_{10}}{\sqrt{y_6 y_8}}$$

gdzie:

p – ciśnienie wyrażone w barach.

Stałą równowagi K_i oblicza się z zależności aproksymacyjnej Olikary i Bormana:

$$\log K = A \ln T + \frac{B}{T} + C + DT + ET^2 \tag{6.20}$$

Wartości stałych A, B, C, D, E podane są w tabeli 4. Zawartość tlenu w rurze wdechowej może się zmieniać w dużych granicach, w zależności od zupełności spalania:

- dla silników czterosuwowych wynosi 0-2% O₂

Tabela 4. Wartości stałych w zależności od aproksymacyjnej

REAKCJA	A	B	C	D	E
$H_2 \rightleftharpoons 2H$	0.432168	-0.112464×10^5	-0.312621	-0.745744×10^4	0.242484×10^8
$O_2 \rightleftharpoons 2O$	0.310805	-0.129540×10^5	0.107083×10^1	-0.738336×10^4	0.344645×10^8
$N_2 \rightleftharpoons 2N$	0.389716	-0.245828×10^5	0.452987	-0.963730×10^4	0.585643×10^8
$O_2 + H_2 \rightleftharpoons 2OH$	-0.141784	-0.213308×10^4	0.183287×10^1	0.355015×10^{-4}	-0.310227×10^8
$O_2 + N_2 \rightleftharpoons 2NO$	0.0150879	-0.470959×10^4	0.541872	0.272805×10^{-5}	-0.154444×10^8
$H_2 + 0.5O_2 \rightleftharpoons H_2O$	-0.752364	0.124210×10^3	0.259429×10^1	0.259556×10^{-3}	-0.162687×10^7
$CO + 0.5O_2 \rightleftharpoons CO_2$	-0.00415302	0.148627×10^5	-0.472877×10^1	0.124699×10^{-3}	-0.900227×10^8

5.5.1 Powstawanie tlenków azotu

Tlenki azotu NO_x powstają w silnikach o wysokich temperaturach spalania, dużej ilości powietrza, a zatem i tlenu ($\lambda > 1$) oraz przy krótkim czasie reakcji. Największe ich ilości powstają w silnikach wysokoprężnych. Reakcja powstania tlenków azotu opisywana jest ogólnie mechanizmem Zeldowicza rozszerzonym o reakcje azotu znajdującego się w powietrzu z rodnikiem wodorotlenowym:

I - reakcja Zeldowicza:



II - reakcja Zeldowicza:



III - reakcja rozszerzona



Reakcje powstawania tlenków azotu zachodzą głównie w silnikach wysokoprężnych i w mniejszym stopniu, w silnikach czterosuwowych o zapłonie iskrowym. Szybkość powstawania tlenków azotu określa się wzorem:

$$\frac{d(NO)}{dt} = \frac{(MR)T}{p} \cdot \frac{1}{6n} \left[\frac{2R_1(1 - \alpha^2)}{\alpha \cdot \frac{R_1}{R_2 + R_3} + 1} \right] \left[\frac{\text{mol}}{\text{cm}^3 \text{s}} \right] \quad (6.24)$$

Rozprężenie czynnika następuje po całkowitym spaleniu paliwa tj. przy kącie $\phi \geq \phi_k$, kiedy współczynnik $\chi=1$ i trwa aż do momentu otwarcia zaworu wydechowego. Wszystkie procesy występujące podczas fazy spalania przebiegają dalej, z wyjątkiem zakończonego już procesu wydzielania energii (6.25).

$$\frac{dQ_s}{d\phi} = 0 \quad (6.25)$$

Wzór ten uwzględnia wyłącznie powstawanie tlenków azotu według mechanizmu Zeldowicza poszerzonego o reakcję z rodnikiem OH. Wielkości wchodzące do wzoru określa się na podstawie udziałów molowych $[NO]$, $[N]$ i $[OH]$ wyznaczonych z równania (6.24). Wielkości udziałów molowych określone są odpowiednio do wartości y_1 , y_3 , y_5 . Szybkość reakcji prostych składników określają symbole R_i wyrażone w $[\text{mol}/(\text{cm}^3 \text{ s})]$,

gdzie:

$$R_1 = k_1 [NO]_e [N]_e \quad (6.26)$$

$$R_2 = k_2 [O_2]_e [N]_e \quad (6.27)$$

$$R_3 = k_3 [OH]_e [N]_e \quad (6.28)$$

Wielkości równowagowe wyrażone są w $[\text{mol}/\text{cm}^3]$. Stałe reakcje szybkości prostych k_1 , k_2 i k_3 można wyznaczyć:

$$k_1 = 2.7 \cdot 10^{-11}; \quad k_2 = 1.1 \cdot 10^{-14} e^{(-3159/T)}; \quad k_3 = 7 \cdot 10^{-11} \quad (6.29)$$

Wielkości te wyrażone są w cm^3/s . Do wzoru (5.24) wchodzi również wielkości ciśnienia p i temperatury T , uniwersalna stała gazowa (MR) oraz prędkość obrotowa silnika n [obr/min], a także wielkość bezwymiarowa α ,

gdzie:

$$\alpha = \frac{[NO]}{[NO]_e} \quad (6.30)$$

Równanie (5.23) jest równaniem różniczkowym zależnym od temperatury T , ciśnienia p , współczynnika nadmiaru powietrza oraz składu paliwa. Równanie to można przedstawić jako funkcję tych wielkości oraz bieżącej koncentracji tlenków azotu NO_x :

$$\frac{d[NO]}{d\phi} = f(p, T, \lambda, [NO]) \quad (6.31)$$

Algorytm przedstawia się następująco. Najpierw obliczamy koncentracje równowagową $[NO]_e$, $[N]_e$ i $[OH]_e$ z równań (6.26 – 6.28). Następnie znajdujemy szybkość reakcji prostych R_i . W pierwszym kroku obliczeń zakłada się, że wielkość $[NO]$ i α z poprzedniego kroku. Równanie (5.24) można rozwiązać metodą Rungego-Kutty 4 rzędu. Znajduje się nową Wartość $[NO]$, na podstawie, której wylicza się nową wartość α . Wykonujemy następne kroki obliczeń dla nowych wartości α i $[NO]$ aż do spełnienia jednego z warunków:

$$| [NO]_{i+1} - [NO]_i | \leq \epsilon_1 \quad (6.32)$$

$$| \alpha_{i+1} - \alpha_i | \leq \epsilon_2 \quad (6.33)$$

Rozszerzony mechanizm Zeldowicza jest wystarczający do opisu powstawania tlenków azotu w silnikach spalinowych.

5.5.2 Formowanie się tlenku węgla

Tlenek węgla powstaje zazwyczaj przy niedoborze tlenu w czasie spalania. Zjawisko to ma miejsce zwykle w silniku dwusuwowym, gdzie współczynnik nadmiaru powietrza jest zazwyczaj mniejszy od 1. Formowanie się CO przebiega bardzo szybko. Przyjmuje się, że stężenia CO są stężeniami równowagowymi. Stężenia równowagowe poszczególnych składników wchodzących do reakcji powstawania tlenków węgla oblicza się z równania (6.34). Szybkość powstawania tlenku węgla określa się zazwyczaj według równania Howarda:

$$\frac{d[CO]}{dt} = k_o [CO] \sqrt{[O_2]} [H_2O] \exp\left(\frac{-E}{(MR)T}\right) \quad (6.34)$$

gdzie:

$[CO]$, $[O_2]$, $[H_2O]$ – udziały molowe;

$k_o = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^3/(\text{mol s})$ – stałe szybkości reakcji;

$E = 30 \text{ kcal/mol}$ – energia aktywizacji.

5.5.3 Powstawanie węglowodorów

Do tej pory nie został jeszcze dostatecznie opracowany i zweryfikowany model emisji niespalonych węglowodorów. Węglowodory te pozostają głównie z niespalonego paliwa w czasie wygaszania gorącego płomienia na chłodniejszych ściankach cylindra oraz szczelinach i zagłębieniach komory spalania (szczeliny pierścieniowe tłoka, zagłębienia

świecy, klinowa przestrzeń między tłokiem i głowicą). Węglowodory ulegają częściowemu spalaniu w przewodzie wylotowym. Badania wykazały mnóstwo różnych związków typu C_nH_m . Dlatego określenie szybkości powstawania poszczególnych węglowodorów napotyka na trudności. Wyniki zgodne z eksperymentem pozwala uzyskać „globalne” równanie przedstawione przez Edelmana [18] dla węglowodorów alkanowych:

$$-\frac{d[C_nH_m]}{dt} = 6 \cdot 10^4 \gamma T p^{0.2} \exp\left[-\frac{12\,200}{T}\right] [C_nH_m] \sqrt{[O_2]} \quad (6.35)$$

gdzie:

p – ciśnienie w atm,

$\gamma = 1$ dla przepływu bez mieszania,

$\gamma = 80$ dla przepływu całkowicie wymieszanego,

$[C_nH_m], [O_2]$ – koncentracja równowagowa składników.

6.6. Reakcje w trójfunkcyjnym konwerterze katalitycznym (TWC)

Spalanie benzyny to proces, w którym węglowodory zawarte w benzynie reagują z tlenem (O_2), tworząc dwutlenek węgla (CO_2), wodę (H_2O) oraz energię. Benzyna jest mieszaniną różnych węglowodorów, ale dla uproszczenia, często stosuje się oktan (C_8H_{18}) jako reprezentatywny składnik benzyny w przykładach chemicznych. Uproszczony przykład reakcji spalania oktanu wzór (6.36).



Jeśli potrzebujemy ogólnych obliczeń lub analizy różnych węglowodorów, bardziej przydatny będzie ogólny wzór:



W analizie rzeczywistej emisji spalin często używa się szczegółowego równania dla oktanu, gdyż pozwala to na dokładniejszą ocenę produkowanych zanieczyszczeń. W rzeczywistych warunkach pracy silnika spalanie nie zawsze przebiega całkowicie, co prowadzi do powstawania dodatkowych produktów, takich jak tlenek węgla (CO), niespalone węglowodory (HC), tlenki azotu (NOx) oraz cząstki stałe (PM). Dlatego w silnikach stosuje się systemy kontroli emisji, aby zmniejszyć ilość szkodliwych substancji.

Trójfunkcyjne katalizatory (TWC) służą do redukcji trzech głównych zanieczyszczeń: tlenków azotu (NOx), węglowodorów (HC) oraz tlenku węgla (CO). Model matematyczny

TWC można opisać za pomocą reakcji chemicznych oraz równań różniczkowych, które opisują dynamikę tych reakcji.

TWC katalizuje następujące reakcje:

1. Redukcja NO_x przez CO lub H_2 :



2. Utlenianie węglowodorów niespalonych (HC) do CO_2 i H_2O :



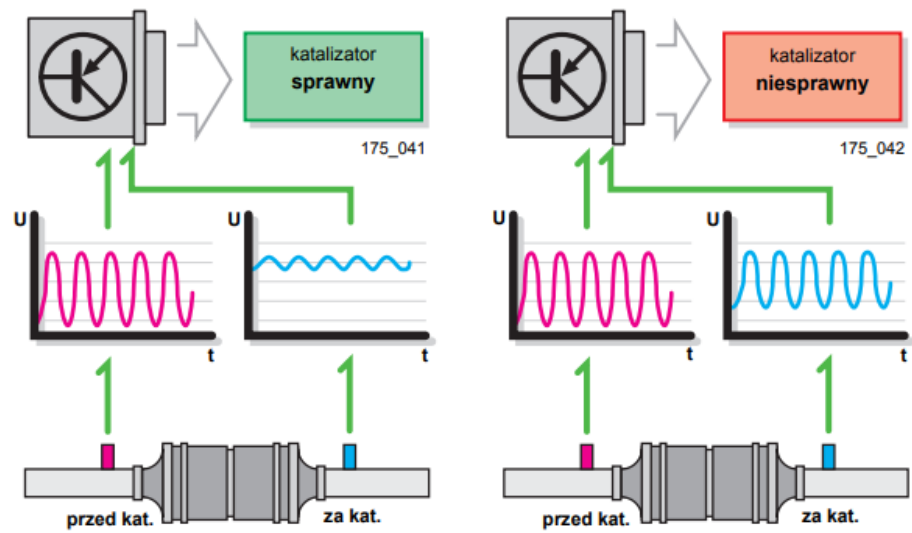
3. Utlenianie tlenku węgla (CO) do CO_2 :



Każdą z tych reakcji możemy modelować przy użyciu równań kinetycznych.

Test sprawności katalizatora

Test opiera się na porównywaniu przez sterownik napięcia sond przed i za katalizatorem. Na tej podstawie sterownik wyznacza stosunek sygnałów przed i za katalizatorem (rys.24). Gdy wyliczony stosunek odbiega od wartości zadanej, sterownik rozpoznaje nieprawidłowe działanie katalizatora. Po spełnieniu warunków zapamiętania błędu w pamięci błędów pojawia się zapis na temat niesprawności katalizatora. Jest on sygnalizowany lampką kontrolną spalin (MIL).



Rys. 24. Sygnały sprawnego i niesprawnego układu [Bosch]

7. MOBILNY SYSTEM TELMETRYCZNY

Rosnąca świadomość ekologiczna i coraz bardziej rygorystyczne przepisy dotyczące ochrony środowiska i monitoringu emisji spalin. Odpowiednie kontrolowanie tych zjawisk nie tylko ogranicza negatywny wpływ transportu na środowisko, ale zapewnia zgodność pojazdów z obowiązującymi normami prawnymi. W związku z tym, istotne jest nie tylko mierzenie dokładnych wartości emisji spalin, ale również szybka weryfikacja czy pojazd spełnia normy zgodnie z przyznaną mu homologacją. Kluczowym aspektem monitorowania jest determinacja czy pojazd przekracza ustalone normy emisji. Rozwiązania umożliwiające nie tylko pasywną ocenę, ale i aktywną reakcję na przekroczenia tych norm, mogą znacząco przyczynić się do poprawy jakości powietrza oraz efektywności energetycznej pojazdów. Wprowadzenie systemu mobilnej analizy spalin zamontowanego bezpośrednio na pojazdach umożliwia nie tylko ciągłe monitorowanie stanu technicznego pojazdu, ale także wczesne wykrywanie i eliminowanie potencjalnych usterek, które mogą prowadzić do nieprawidłowości w obszarze emisji spalin.

Wejście w elektromobilność nie następuje nagle, ale przebiega stopniowo, co ciągle daje przestrzeń do rozwijania silnika spalinowego. Jednocześnie wymaga większej niż kiedykolwiek kreatywności w dziedzinie analizy i monitorowania emisji zanieczyszczeń. Analizowane są potencjalne korzyści i wyzwania związane z wdrożeniem OBM oraz jego miejsce wśród innych narzędzi monitorowania emisji. Jakość powietrza w Europie stale się poprawia dzięki skuteczności obecnych przepisów dotyczących emisji, takich jak Euro 6d-temp i Euro 6d. Zapowiadane wprowadzenie Euro 7 ma na celu nie tylko dalsze ograniczenie emisji, ale także uproszczenie i dostosowanie przepisów do nowych rozwiązań technologicznych. OBM polega na mierzeniu emisji bezpośrednio w pojeździe, co pozwala na ocenę rzeczywistego stanu emisji pojazdu. System ten może wykrywać usterki lub celowe manipulacje w systemie wydechowym. OBM ma potencjał dostarczania dokładnych informacji o stanie emisji pojazdu, co może czynić go bardziej efektywnym niż tradycyjne metody monitorowania. Wprowadzenie owego systemu wymaga dostępności odpowiednich czujników na pokładzie pojazdu, zdolnych do dokładnego pomiaru poszczególnych składników spalin w różnych warunkach eksploatacji przez cały okres użytkowania pojazdu. Istnieje bardzo duża potrzeba dalszych badań nad wykorzystaniem systemu OBM w przepisach Euro 7. Aktualne przepisy dotyczące emisji są skomplikowane zaś sama instrukcja związana z nimi obejmuje ponad 1000 stron. W opinii autora rozprawy norma Euro 7 powinna być bardziej przejrzysta i łatwa do zastosowania. Istnieje potrzeba zastąpienia nieaktualnych procedur testowych

nowoczesnymi narzędziami monitorowania, takimi jak On Board Monitoring. System. Wobec powyższego OBM ma potencjał stać się kluczowym narzędziem w przyszłych przepisach dotyczących emisji spalin w Europie. Jego skuteczność, dokładność i zdolność do dostarczania aktualnych danych o emisji w czasie realizowana rzeczywistością czynią go atrakcyjnym rozwiązaniem dla przyszłych standardów emisji. System OBM ma za zadanie stałe rejestrowanie poziomu emisji zanieczyszczeń bezpośrednio w pojeździe. Główne cele tego systemu to:

- wykrywanie przypadków nadmiernych emisji, które nie zostały zidentyfikowane przez układ OBD (system diagnostyki pokładowej);
- okresowe przekazywanie wartości emisji do centralnych serwerów, co ma na celu ułatwienie działań w zakresie nadzoru rynku, kontroli zgodności eksploatacyjnej oraz badań zdolności do ruchu drogowego.

Wprowadzenie systemu OBM może przynieść znaczące korzyści w zakresie monitorowania i kontroli emisji zanieczyszczeń. Może to przyczynić się do uproszczenia procesów monitorowania i zapewnić bardziej dokładne dane na temat rzeczywistych emisji szkodliwych czynników z pojazdów. Jednakże wdrożenie tego systemu wiąże się z wyzwaniami, takimi jak opracowanie odpowiednich przepisów technicznych określających wymagania dla sprzętu, takiego jak czujniki i oprogramowanie. Z uwagi na skomplikowaną naturę systemu OBM oraz potrzebę opracowania szczegółowych przepisów technicznych, przewiduje się, że wprowadzenie tej zmiany będzie wymagało okresu kilku lat od momentu publikacji odpowiedniego przepisu technicznego. Wprowadzenie takiego systemu może mieć znaczący wpływ na użytkowników, zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym. System OBM stanowi ważny krok w kierunku realizacji celów Zielonego Ładu w zakresie jakości powietrza i ochrony środowiska. Chociaż wiąże się z nim wiele korzyści, jego wdrożenie wymaga starannego planowania i uwzględnienia potencjalnych wyzwań.

Według badania, propozycja Euro 7 dotycząca emisji zanieczyszczeń wiązałaby się z bezpośrednimi wzrostami kosztów produkcji samochodów. Według badania przeprowadzonego przez Frontier Economics, koszty Euro 7 na jeden pojazd wyniosą około 2000 euro dla samochodów osobowych z silnikiem spalinowym oraz około 12 000 euro dla pojazdów ciężarowych i autobusów z silnikiem diesla.

Trzeba dopisać założenia tego systemu – to do aneksu

7.1. Mobilny system monitorowania CO

Jeszcze przed realizacją zasadniczych zadań związanych postawionym celem pracy. Przeprowadzono badania wstępne, które obejmowały opracowanie i stworzenie mobilnego uniwersalnego urządzenia, aktywnie mierzącego poprawność procesu spalania poprzez pomiar zawartości CO w spalinach. Weryfikacja działania rozwiązania systemu telemetrycznego monitorowania zawartości CO została przeprowadzona na rzeczywistych obiektach samochodowych różnych marek. Wykorzystujących bezpośredni montaż na rurze wydechowej samochodu z wykorzystaniem elastycznego reduktora pozwalającego przeprowadzić montaż na różnych średnicach rur wydechowych. Rozwiązanie zostało objęte ochroną patentową (zgłoszenie patentowe P.436184). Takie rozwiązanie znacznie rozszerza możliwości bezpośredniego kontrolowania produktów spalania na elemencie do tego przystosowanym w każdych warunkach drogowych (podłoże) i pogodowych. Wykorzystanie Wifi znacznie ułatwia rejestrację danych, ich akwizycję i sposób agregowania, dając możliwość wykorzystania zarówno komputera jak i urządzeń mobilnych. W zależności od stopnia skomplikowania i poziomu umiejętności kierowcy/obsługi. Dzięki temu opracowane zostało oprogramowanie, które znacznie rozszerza możliwości wykorzystania baz danych w celu analizy pozyskanych danych a głównie CO do określenia współzależności pozostałych produktów procesu spalania w silnikach samochodowych oraz innych tego typu rozwiązaniach spalinowych wykorzystujących różne odmiany paliw.

Mobilny system pomiaru stężenia tlenku węgla (CO) w pojazdach, mimo swojej innowacyjności, posiada liczne ograniczenia, które mogą skłonić do rezygnacji z tej metody. Instalacja systemu na rurze wydechowej jest technicznie skomplikowana i wymaga specjalistycznego sprzętu, co może wpływać na integralność układu wydechowego i ogólną wydajność silnika. Dodatkowo, koszty związane z zakupem, montażem, kalibracją i konserwacją są znaczne, a system wymaga regularnych przeglądów, by zapewnić dokładność pomiarów. Zmienne warunki atmosferyczne, takie jak deszcz, śnieg czy niskie temperatury, mogą również wpływać na wyniki pomiarów, zmniejszając ich wiarygodność. Ponadto, czujniki CO mają określone limity działania i mogą nie być w stanie mierzyć bardzo wysokich lub niskich stężeń, co prowadzi do ryzyka błędów pomiarowych. Trwałość urządzenia jest kolejnym problemem, gdyż jest ono narażone na uszkodzenia mechaniczne z powodu swojego położenia na zewnątrz pojazdu. Wszystkie te czynniki razem wzięte mogą prowadzić do częstych awarii lub potrzeby regularnej wymiany, co jeszcze bardziej podnosi ogólne koszty eksploatacji systemu. W obliczu wyzwań związanych z aktualnie stosowanym mobilnym

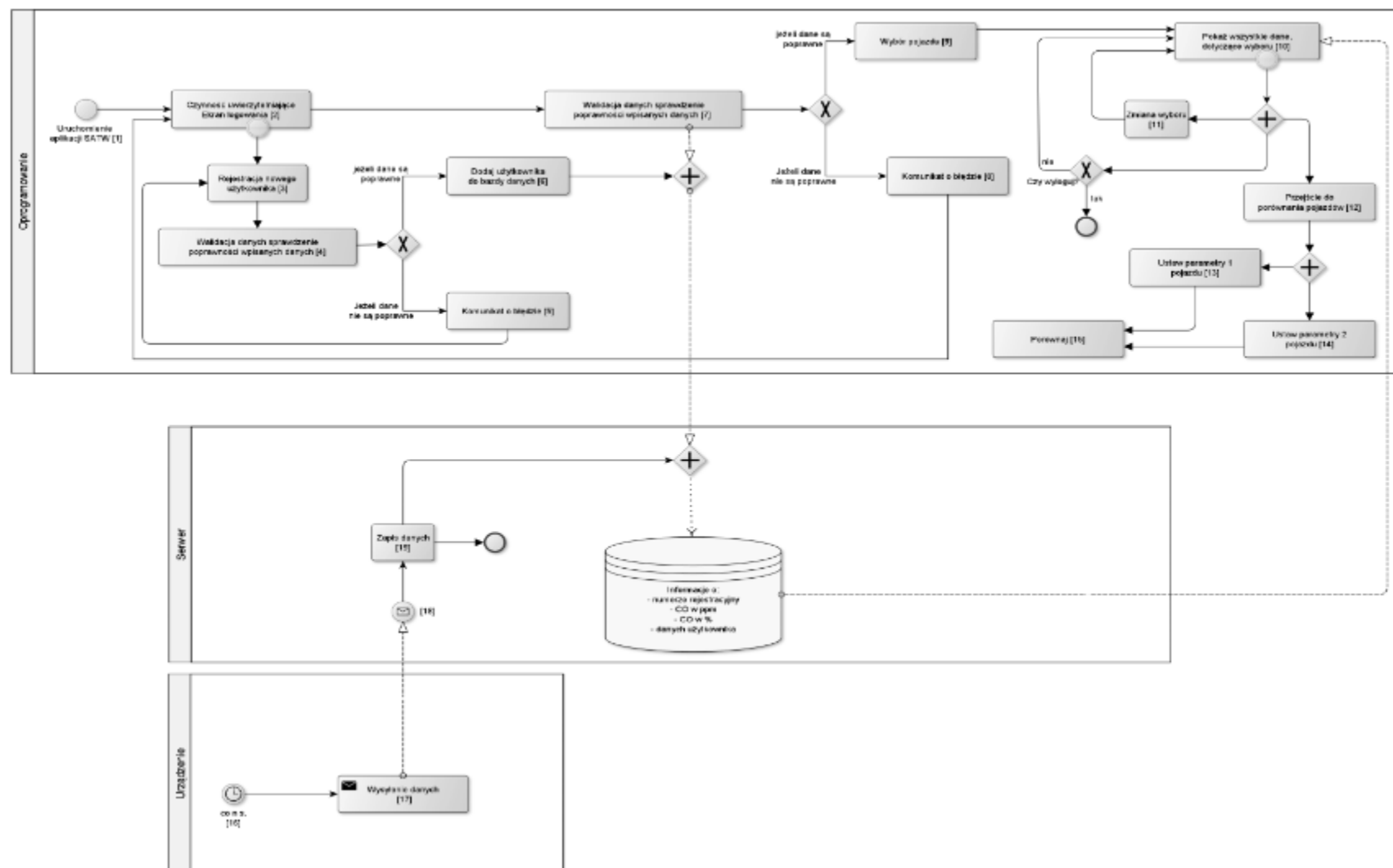
systemem pomiaru stężenia tlenu węgla (CO) w pojazdach, autor skupia się na identyfikacji i opracowywaniu alternatywnych metod.

7.1.1. Konstrukcja mobilnej sondy zawartości tlenu węgla (CO)

Rozwiązanie, które zostało zaproponowane zawiera czujnik do pomiaru stężenia tlenu węgla CO, lokalny procesor, urządzenia nadawczo odbiorcze do przesyłania i odbierania danych, charakteryzuje się tym, że urządzenie pomiarowe zamontowane jest na rurze wydechowej pojazdu. System mobilny utworzony jest z sondy, serwera i aplikacji. Sonda zawiera mikrokontroler z wbudowanym modulem Wi-Fi oraz procesor [143]. Do mikrokontrolera podłączony jest bezpośrednio za pomocą przewodów czujnik pomiaru stężenia tlenu węgla CO. Całość zasilana jest z ogniwa litowo-jonowego. Mikrokontroler posiada zaimplementowany algorytm sterujący i zarządzający danymi pomiarowymi stężenia CO, ma algorytm kalibrujący, algorytm przeliczający wartości pomiarów oraz inne algorytmy które zostały użyte w celu poprawności działania całości systemu [109]. Mikrokontroler przesyła przez Wi-Fi ciągle monitorowane dane do serwera, na którym gromadzone są one w postaci plików badanego pojazdu [19, 28, 31, 48, 90, 102]. System do analizy pomiaru stężenia tlenu węgla CO ma opracowaną aplikację, która pozwala na przedstawianie chwilowego, bieżącego lub wycinkowego odczytu zawartości tych danych w jednostkach ppm oraz procentowych. Aplikacja umożliwia przeanalizowanie używanego paliwa i prawidłowego używania pojazdu, i prezentuje je w sposób zrozumiały przez użytkownika pojazdu. Aplikacja pozwala na wizualizację mierzonych stężeń tlenu węgla CO na diagramach, które zawierają dane pojazdu, numer rejestracyjny, model pojazdu, rodzaj paliwa do zasilania pojazdu, normę Euro, datę i czas pomiarów [112].

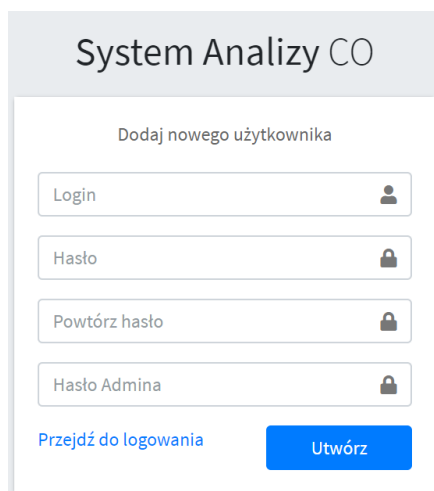
W celach pełnego zrozumienia systemu, działania całego projektu oraz łatwiejszego zidentyfikowania problemu przepływu informacji w systemie na potrzeby niniejszej pracy został zaprojektowany diagram przepływu danych, zaprezentowany na (rys.25), który obrazuje przypadki użycia ww. systemu. Przypadki użycia obrazują współpracę pomiędzy urządzeniami, oprogramowaniem oraz użytkownikiem.

Diagram reprezentuje samą ideę działania, wyraża ją ogólnikowo, dlatego też nie wszystkie funkcje zostały w nim ujęte.



Rys. 25. Diagram BPMN

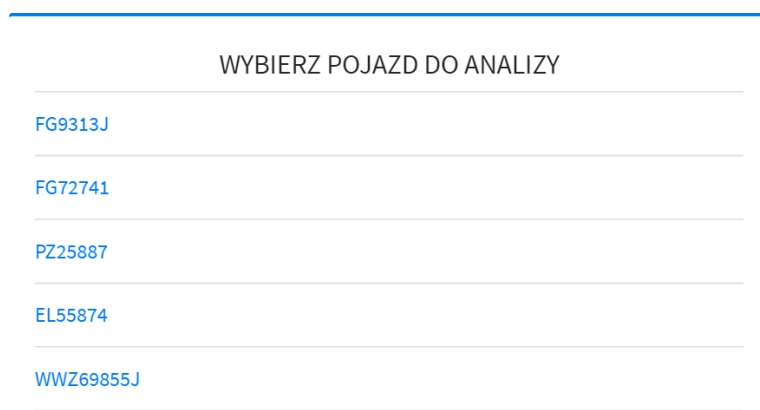
Dostęp do aplikacji możliwy jest po zarejestrowaniu nowego użytkownika (rys.26). W dalszej kolejności, użytkownik może dokonać wyboru konkretnego pojazdu, który zostanie poddany analizie.



The screenshot shows a web form titled 'System Analizy CO' with a subtitle 'Dodaj nowego użytkownika'. It contains four input fields: 'Login' (with a person icon), 'Hasło' (with a lock icon), 'Powtórz hasło' (with a lock icon), and 'Hasło Admina' (with a lock icon). Below the fields are two buttons: a blue link 'Przejdź do logowania' and a blue button 'Utwórz'.

Rys. 26. Ekran rejestracji nowego użytkownika [Opracowanie własne]

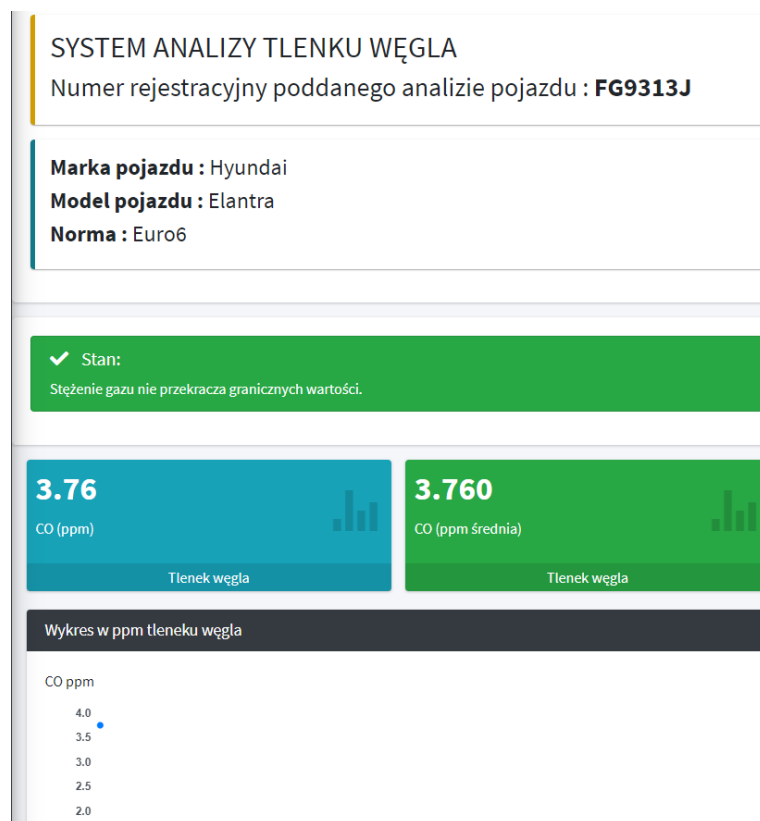
Administrator systemu ma możliwość skonfigurowania metod identyfikacji pojazdów, na przykład poprzez wykorzystanie numeru rejestracyjnego, identyfikatora VIN (Vehicle Identification Number) lub nazwy użytkownika (rys.27). Wybór ten jest zależny od preferencji administratora oraz specyfiki zastosowania aplikacji. Zmodyfikowanie tej funkcji pozwala na dostosowanie systemu do konkretnych potrzeb użytkowników, co zwiększa jego użyteczność i elastyczność w różnych kontekstach użytkowania.



The screenshot shows a screen titled 'WYBIERZ POJAZD DO ANALIZY'. It features a list of five vehicle identification numbers (VINs) in blue text, each on a separate line with a horizontal separator below it: FG9313J, FG72741, PZ25887, EL55874, and WWZ69855J.

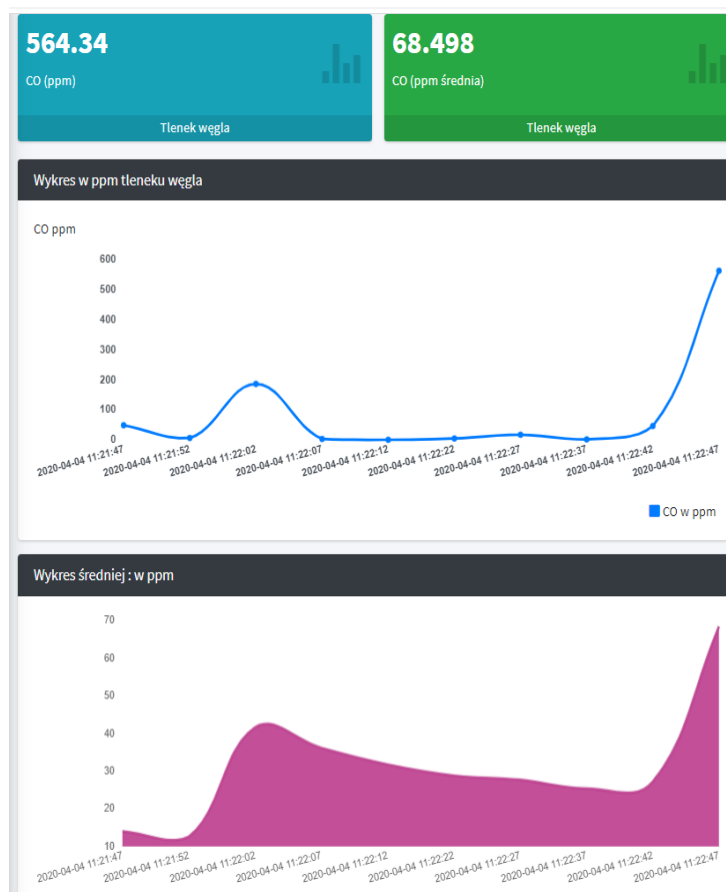
Rys. 27. Ekran główny – okno wyboru pojazdu [Opracowanie własne]

Po wyborze pojazdu, użytkownik zostaje przekierowany do interfejsu analizy emisji spalin. Aplikacja oferuje kompleksową analizę danych dotyczących emisji spalin, obejmującą parametry takie jak poziomy dwutlenku węgla (CO), ewentualnie w zależności od wersji sondy również dwutlenku węgla CO₂, węglowodorów (HC), tlenków azotu (NO_x), cząstek stałych oraz innych substancji zanieczyszczających (rys.28).



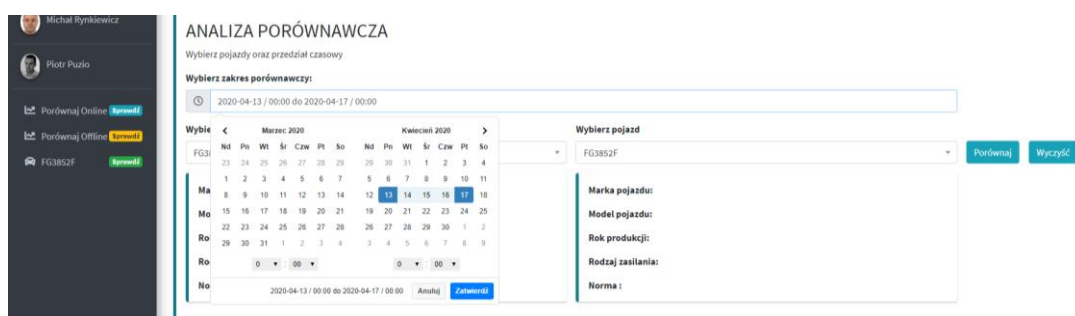
Rys. 28. Ekran główny – informacje dostarczane po wyborze pojazdu
[Opracowanie własne]

Interfejs prezentuje te dane w czytelnej formie graficznej oraz tabelarycznej, umożliwiając użytkownikowi szybkie zrozumienie i interpretację wyników (rys.29).



Rys. 29. Informacje dostarczane podczas pomiarów stężenia tlenku węgla C
[Opracowanie własne]

Dodatkowo, aplikacja może zawierać funkcje analizy trendów emisyjnych oraz porównywania wyników między różnymi pojazdami lub okresami czasowymi (rys. 30)



Rys. 30. Okno wyboru pojazdów do analizy porównawczej
[Opracowanie własne]

Dzięki temu użytkownicy mogą śledzić zmiany w emisji spalin, identyfikować obszary poprawy oraz podejmować świadome decyzje w celu redukcji negatywnego wpływu na środowisko. Ponadto, aplikacja może integrować się z systemami monitorowania flot pojazdów, umożliwiając ciągłą ocenę i optymalizację wydajności ekologicznej całej floty.

Przebieg trasy testowej z podziałem na poszczególne etapy przedstawiony został na mapie (rys.31).

7.1.2. Analiza wyników pomiarów emisji CO; weryfikacja działania dynamicznego pomiaru zawartości tlenu węgla w spalinach

Prezentacja uzyskanych wyników z testowych jazd próbnych z wykorzystaniem mobilnej sondy CO.

- Etap pierwszy - polegał na zbadaniu wartości tlenu węgla w czasie, gdy silnik pracował na biegu jałowym,
- Etap drugi – polegał na zbadaniu wartości tlenu węgla w ustalonych stanach pracy silnika, zmieniając jego obciążenie przy prędkości 2000 i 3000 obr/min.
- Etap trzeci - polegał na zbadaniu wartości tlenu węgla w czasie, gdy silnik pracował pod obciążeniem w czasie jazdy po drodze asfaltowej prostej, z prędkością nominalną 50 km/h,
- Etap czwarty - polegał na zbadaniu wartości tlenu węgla w czasie, gdy silnik pracował pod obciążeniem w czasie jazdy po drodze pod górę na drodze asfaltowej z prędkością 20 - 50 km/h,
- Etap piąty - polegał na zbadaniu wartości tlenu węgla w czasie, gdy silnik pracował pod obciążeniem w czasie jazdy po drodze z góry na drodze asfaltowej, z prędkością nominalną 50 km/h.

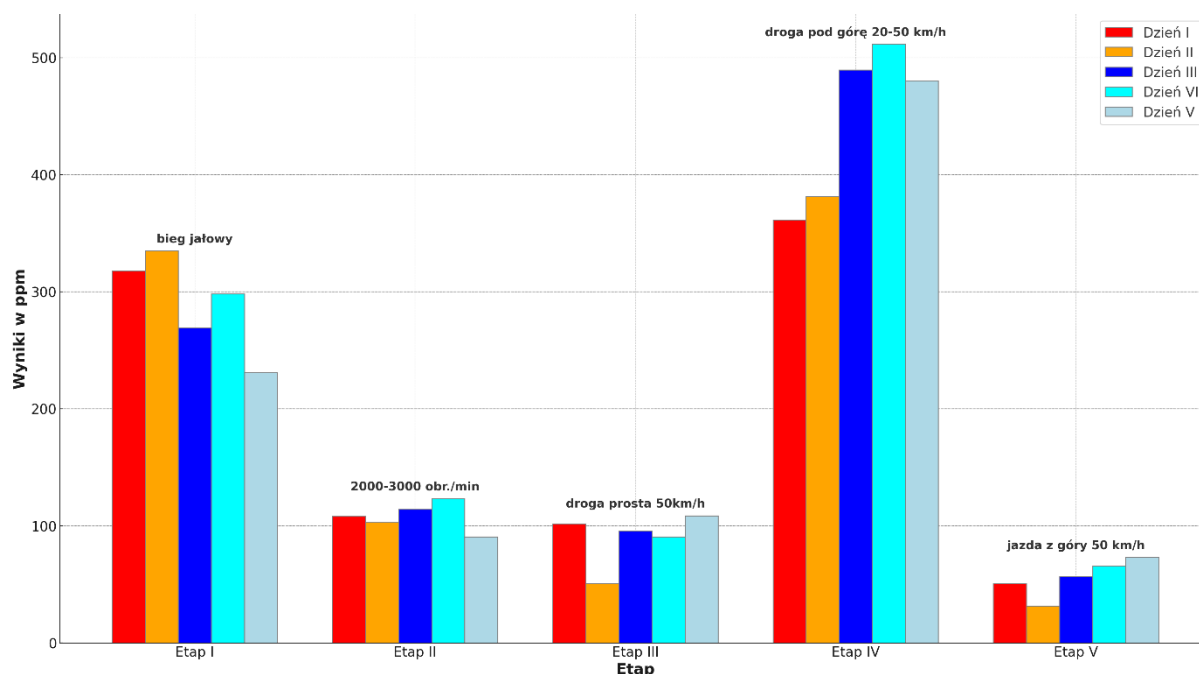


Rys. 31. Mapa pokazująca przebytą drogę przez pojazdy z podziałem na etapy [google maps]

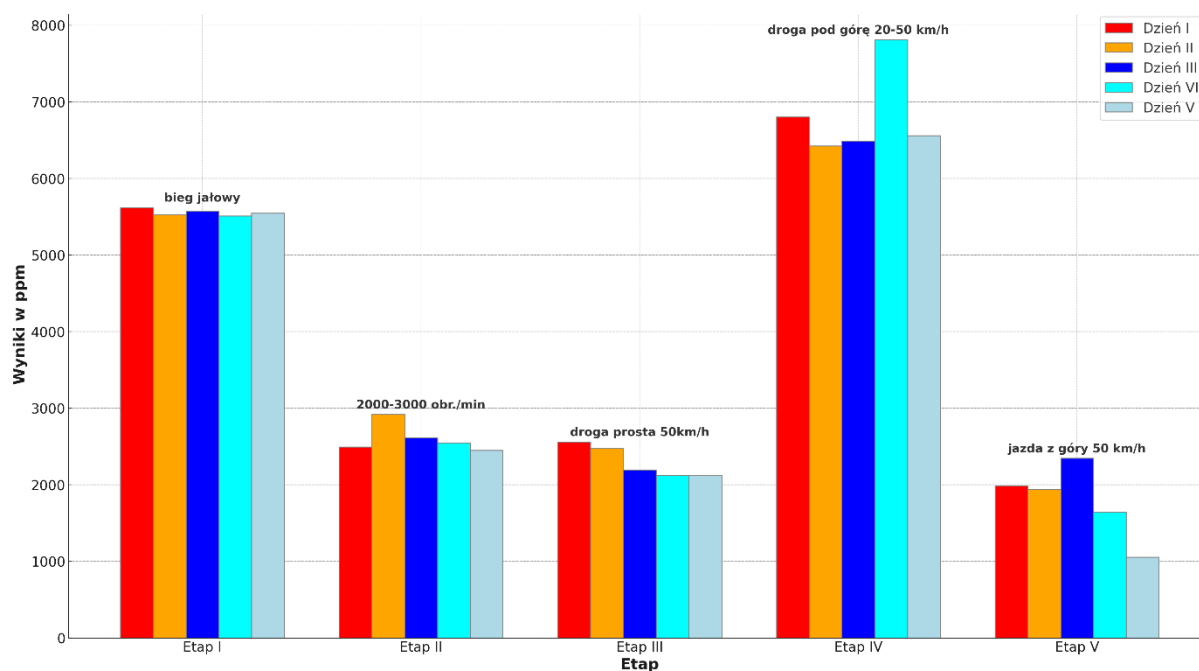
Zaprezentowane wyniki badań wstępnych przeprowadzonych na pojazdach spełniających normę EURO 6 (rys. 32) i normę EURO 4 (rys. 33) wskazują na podobne zachowanie pojazdów

podczas ich eksploatacji. Już w etapach pierwszych, które to odwzorowują badanie na stacji diagnostycznej okazało się, że wartości te nie są wartościami stałymi. Stężenie tlenu węgla nie jest statyczne, lecz zachodzą ciągle zmiany. Co więcej, ilość wydobywającego się tlenu węgla może się drastycznie zmieniać w przypadku awarii komponentów odpowiedzialnych za prawidłowe funkcjonowanie systemu spalin [140].

Kolejnym etapem były testy, które dotyczyły zwiększenia obrotów silnika w zakresie 2000-3000 obr/min. Przy znacznym zwiększeniu obrotów w krótkim odstępie czasu czujnik przekazywał informacje, które znacznie wybiegały poza jego zakres mierzenia, a wartości zarejestrowane nie mogły zostać odczytane.



Rys. 32. Wyniki etapów dla pojazdu pierwszego – norma Euro



Rys. 33. Wyniki etapów dla pojazdu pierwszego – norma Euro 4

Trzeci etap, który polegał na badaniu pojazdu podczas jazdy, potwierdził wcześniej zauważoną zależność. Podczas przyspieszania wartości wydobywającego się tlenu węgla znacznie przekraczały wartości 5000 ppm w przypadku pojazdu z normą EURO 4. Przy swobodnej pracy silnika wartości z tego etapu nie przekroczyły wartości granicznych jakie określa norma Euro, a problem stanowiły momenty przyspieszania.

Etap czwarty był najbardziej skomplikowanym etapem pod względem warunków realizacji. Problem polegał na tym, że podczas jazdy pod górę pojazd znacznie zwalnia. Aby pokonać przeszkodę następuje zwiększenie obrotów silnika, w celu umożliwienia podjechania pod górę, czego skutkiem było zwiększenie stężenia tlenu węgla, które to niejednokrotnie przekraczało obowiązujące normy dla danego pojazdu. Ostatni etap był etapem najprostszym pod kątem jego przeprowadzenia. W badaniu tym wartości pokrywały się z przypuszczeniami autorów. Stężenie CO było najniższe czego potwierdzeniem są wyniki badań.

Wcześniejsze założone hipotezy badań wstępnych są po części trafne. Zakładano, że wartości przekraczają normy Euro i faktycznie może tak być, tyle że w tym przypadku trzeba byłoby doliczyć wartości niemierzalne podczas przyspieszenia. Tutaj warto również zadać sobie pytanie: jak często, podczas jazdy w mieście, stoimy na światłach, jak często ruszamy i przyspieszamy dynamicznie. I czy rzeczywiście, sumując wszystkie wyniki, dopasowywałyby się do normy Euro. W przypadku przejazdu długich tras, gdzie poruszamy się po autostradach i drogach szybkiego ruchu, można przypuszczać, że normy Euro są spełniane. Wiadomym jest, że eksploatacja pojazdu zależy od jego użytkowników i to na nich spoczywa odpowiedzialność

prawidłowej eksploatacji. Jednakże badania pokazują, że podczas normalnego użycia sprawnych technicznie pojazdów normy Euro faktycznie odwzorowują zanieczyszczenie, jakie pojazdy pozostawiają po sobie podczas jazdy. Ponadto ważnym aspektem badań było również testowanie, zarówno urządzenia, jak i aplikacji. To dzięki właśnie tym narzędziom udało się je przeprowadzić z wynikiem podnoszącym naszą świadomość dotyczącą wydobywania się tlenku węgla podczas eksploatacji pojazdów. Aplikacja oraz urządzenie były w pełni kompatybilne ze sobą w czasie przeprowadzenia badań. Warunki, w jakich pracowało urządzenie, nie miały wpływu na jakość badań. Urządzenie zostało wykorzystane do dynamicznych pomiarów stężenia CO w spalinach w testach mobilnego systemu telemetrycznego sond lambda. Jego podstawową zaletą w stosunku do tradycyjnych urządzeń pomiarowych

7.2. System telemetryczny monitorowania sond lambda

Ciągłe monitorowanie emisji spalin jest niezmiernie ważne, jednak obecnie badania emisji spalin podczas okresowych badań pojazdu są przeprowadzane dość sporadycznie. Mała częstotliwość badań może prowadzić do opóźnienia w wykrywaniu i naprawie usterek, które przyczyniają się do zwiększonej emisji szkodliwych substancji. Regularne kontrole i konserwacja pojazdu, w tym systemów redukcji emisji, są niezbędne do utrzymania pojazdu w dobrym stanie technicznym i minimalizacji jego negatywnego wpływu na środowisko. Wzmoczone monitorowanie oraz obowiązkowe badanie emisji spalin pozwoliłoby na szybszą interwencję w przypadku wystąpienia problemów technicznych, co jest jednym z kluczowych aspektów ochrony środowiska. Badania te, mimo że są wymogiem prawnym, nie są wystarczająco częste, aby skutecznie kontrolować przestrzeganie obecnych norm emisji spalin, takich jak standardy EURO. Podczas tych badań, kontroli podlegać powinny m.in. poziom emisji CO, HC, NO_x, oraz poprawność działania elektronicznego modułu sterującego (ECU) wraz z czujnikami odpowiedzialnymi za monitorowanie różnych parametrów pracy silnika. Niestety, niewystarczająca częstość i dokładność tych kontroli mogą prowadzić do sytuacji, gdzie pojazdy niespełniające normami nadal uczestniczą w ruchu drogowym, co przyczynia się do pogorszenia jakości powietrza i zwiększenia negatywnego wpływu na środowisko. Jedną z możliwości przeciwdziałania nadmiernej emisji spalin jest zwiększenie częstotliwości tych badań lub ciągłe monitorowanie emisji podczas użytkowania pojazdu. Bez tego, wprowadzanie nowych, wyższych standardów emisji może okazać się nieskuteczne, jeśli nie zostaną wdrożone odpowiednie metody monitorowania, kontroli i egzekwowania norm już obecnych.

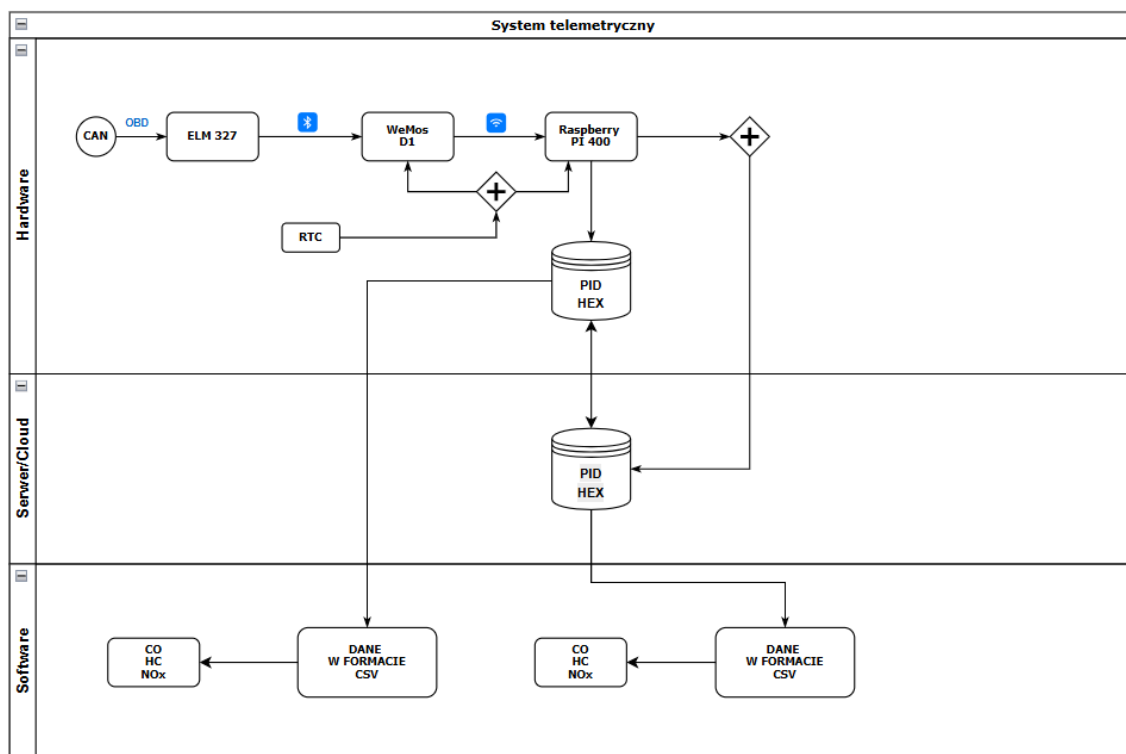
Istotą rozwiązania jest sposób monitorowania emisji szkodliwych czynników z pojazdów samochodowych, który polega na tym, że do monitorowania wykorzystuje się sterownik z silnika lub bezpośrednio z sond w telemetrycznym systemie monitorowania (rys. 26) odczytuje się wartości napięć z sondy regulacyjnej i sondy diagnostycznej przez sterownik silnika, a mikrokontroler odbiera dane z modułu interfejsu diagnostycznego, dalej przetwarza się otrzymane dane, następnie dekoduje się na czytelne wartości napięć sond lambda, po czym mikrokontroler wyświetla przetworzone wartości napięcia na podłączonym wyświetlaczu do bieżącego podglądu stanu sondy oraz monitoruje emisję spalin na wyświetlaczu - napięcie prawidłowe $V(\lambda = 1)$ – podwyższona emisja CO_2 ; napięcie odpowiadające temu stanowi ($\lambda > 1$): podwyższona emisja O_2 ; napięcie poniżej stanu równowagi ($\lambda < 1$): podwyższona emisja CO , HC ; napięcie $\lambda = 1.05 - 1.1$ podwyższona emisja NO_x , dalej przez mikrokontroler zapisuje się odczytane wartości i wysyła zapisane dane na serwer lub w chmurę gdzie zapisuje się w bazie danych, dalej aplikacja pobiera dane z bazy, przetwarza je i wyświetla w formie graficznej, natomiast w systemie monitorowania pokładowego następuje akwizycja danych w celu dalszej obróbki i klasyfikacji uzyskanych wyników w zależności od potrzeb oraz od rodzaju systemu sterowania silnikiem np. brak czujnika MAF.



Rys. 34. Zestawiony układ monitorowania z czytnikiem OBD.

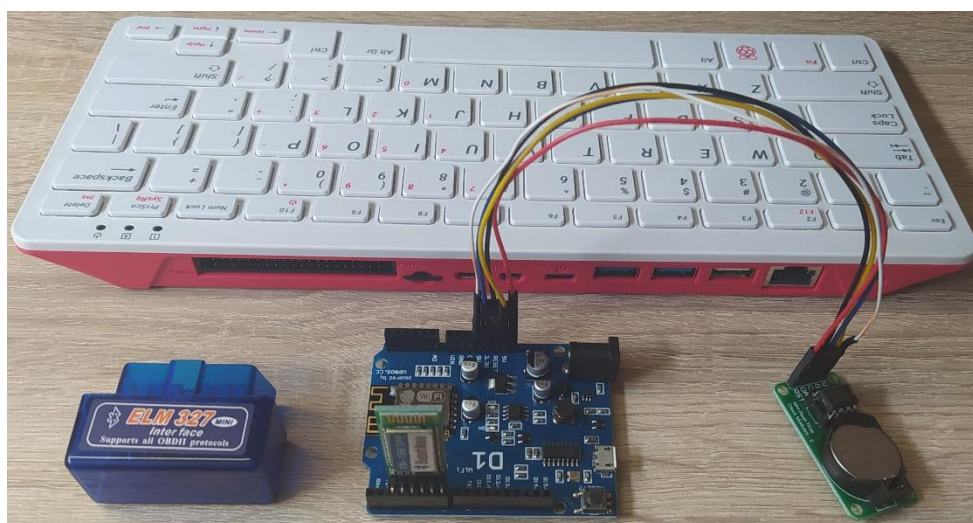
Przedstawiony na rysunku 35 diagram obrazuje architekturę systemu telemetrycznego przeznaczonego do zbierania, przesyłania i analizy danych diagnostycznych z pojazdu, opartą na trójwarstwowym modelu funkcjonalnym: sprzętowym, serwerowo-chmurowym oraz programowym. Źródłem danych jest magistrala CAN pojazdu, z której informacje diagnostyczne pozyskiwane są za pomocą interfejsu ELM327. Urządzenie to konwertuje dane z protokołu OBD-II na sygnały cyfrowe możliwe do dalszego przetwarzania, transmitowane następnie bezprzewodowo – w zależności od konfiguracji – za pomocą interfejsu Bluetooth do mikrokontrolera WeMos D1 który przesyła dane do komputera jednopłytkowego Raspberry Pi 400 poprzez interfejs Wi-Fi. WeMos D1, wyposażony w łączność bezprzewodową oraz możliwość pracy jako klient HTTP lub MQTT, stanowi pierwszy punkt odbiorczy danych, który jednocześnie współpracuje z zewnętrznym zegarem czasu rzeczywistego (RTC), zapewniając precyzyjne znacznikowanie danych w czasie. Raspberry Pi 400 pełni rolę lokalnego węzła obliczeniowego, umożliwiającego nie tylko odbiór danych diagnostycznych, ale również ich buforowanie w lokalnej pamięci w postaci wartości PID zapisanych w formacie szesnastkowym. Format ten odzwierciedla strukturę danych OBD-II i pozwala na późniejsze odwzorowanie wartości fizycznych takich jak obroty silnika, temperatura płynu chłodzącego, napięcie sondy lambda czy korekty paliwowe.

Zarówno dane zgromadzone na Raspberry Pi, jak i dane bezpośrednio z WeMos D1 mogą zostać przesłane do zewnętrznego serwera lub chmury obliczeniowej. W warstwie serwerowej następuje dalsza replikacja oraz wstępne przetwarzanie danych PID. Etap ten obejmuje konwersję wartości HEX, które następnie służą do szacowania stężeń toksycznych składników spalin, takich jak tlenek węgla (CO), węglowodory niespalone (HC) oraz tlenki azotu (NO_x). Tak przetworzone dane są następnie zapisywane w ustandaryzowanym formacie CSV co umożliwia ich dalszą analizę statystyczną, modelowanie emisji, tworzenie raportów oraz integrację z systemami predykcyjnymi lub sztuczną inteligencją.



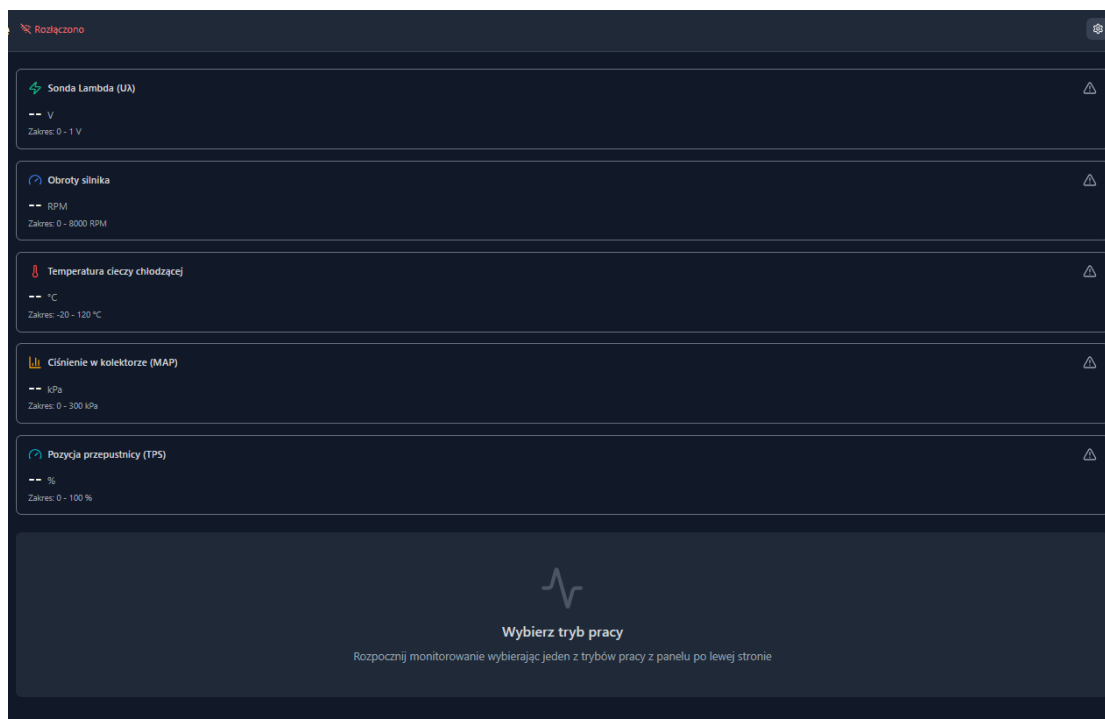
Rys. 35. Diagram obrazujący architekturę systemu telemetrycznego.

Rysunek 36 stanowi ilustrację fizycznej realizacji opisanego wcześniej systemu telemetrycznego, prezentując główne komponenty sprzętowe wchodzące w skład warstwy akwizycji danych oraz ich czasowego oznaczania. Całość układu obrazowanego na rysunku stanowi funkcjonalny prototyp systemu telemetrycznego umożliwiającego pozyskiwanie, oznaczanie czasowe, lokalne przetwarzanie i dalszą analizę parametrów emisji spalin w czasie rzeczywistym, z możliwością jego dalszej rozbudowy o algorytmy predykcyjne lub modele uczenia maszynowego.

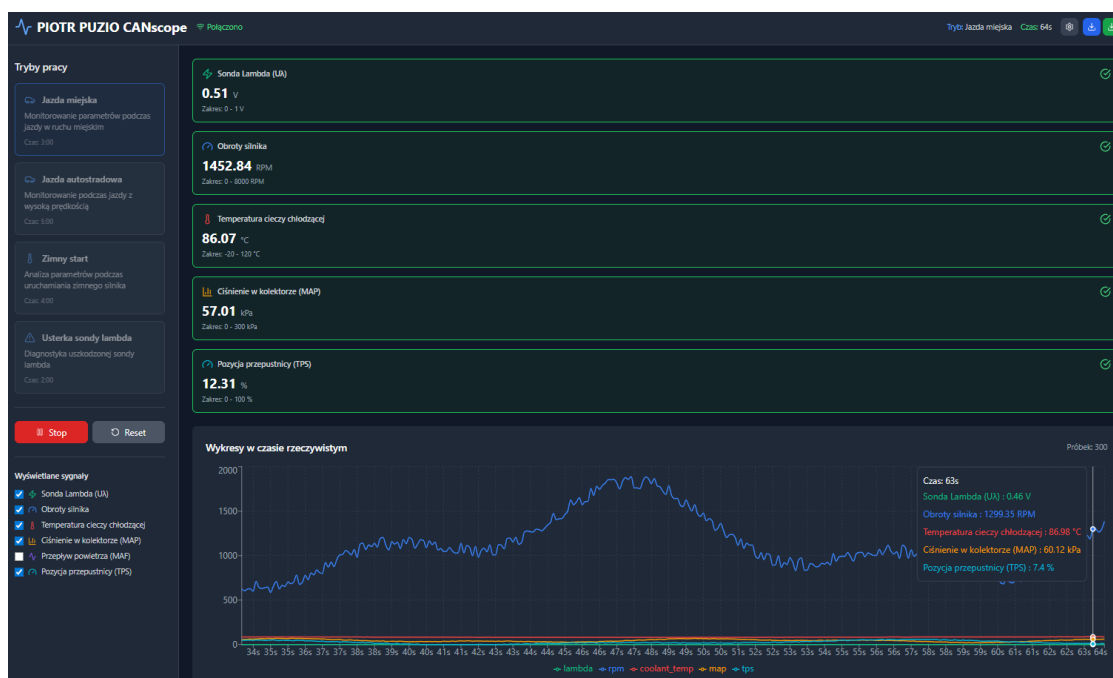


Rys. 36. Główne komponenty systemu telemetrycznego.

Aplikacja, która jest integralną częścią systemu telemetrycznego stanowi zaawansowane narzędzie do monitorowania i analizy danych telemetrycznych pozyskanych z magistrali CAN pojazdu, zgodnych z protokołem OBD-II. Interfejs graficzny prezentuje w czasie rzeczywistym kluczowe parametry diagnostyczne, takie jak napięcie sondy lambda, częstotliwość obrotów silnika, temperatura płynu chłodzącego, ciśnienie w kolektorze dolotowym oraz kąt otwarcia przepustnicy, wizualizowane w postaci dynamicznych wykresów trendów (rys. 37-38). Funkcjonalność obejmuje rejestrację danych w formacie umożliwiającym dalszą analizę statystyczną oraz integrację z modelami predykcyjnymi, wspierając badania emisyjne i diagnostykę techniczną, z opcjami zatrzymania i resetu pomiarów dla precyzyjnego zarządzania eksperymentem.



Rys. 37. Widok aplikacji telemetrycznej – oprogramowanie nie połączone z pojazdem.



Rys. 38. Aplikacja połączona z pojazdem – oprogramowanie rejestruje wybrane parametry pracy silnika.

Dzięki zastosowaniu rozwiązania uzyskano następujące efekty techniczno-użytkowe:

- ciągle monitorowanie emisji CO_2 , O_2 , CO , HC i NO_x ,
- możliwość wykrywania usterek w układzie wydechowym i silniku na podstawie wartości lambda,
- możliwość porównywania danych z obu sond lambda w celu uzyskania dokładniejszych informacji o stanie pojazdu,
- wysoka dokładność pomiaru dzięki bezpośredniemu odczytowi sygnałów z sond lambda;
- szybka reakcja na zmiany w emisji spalin;
- możliwość wykrywania usterek na wczesnym etapie;
- łatwość instalacji i użytkowania.

Zastosowane algorytmy pozwalają na przeliczanie zarejestrowanych emisji do wartości spójnych z odpowiednią normą Euro.

Weryfikacja działania rozwiązania systemu telemetrycznego monitorowania sond lambda została przeprowadzona na rzeczywistych obiektach samochodowych różnych marek. Badania weryfikacyjne realizowano Wykorzystujących bezpośredni montaż na rurze wydechowej samochodu z wykorzystaniem elastycznego reduktora pozwalającego przeprowadzić montaż na różnych średnicach rur wydechowych. Docelowo rozwiązanie zostanie objęte ochroną patentową. System telemetryczny wykorzystuje komunikację Wifi co znacznie ułatwia

rejestrację danych, ich akwizycję i sposób agregowania, dając możliwość wykorzystania zarówno komputera jak i urządzeń mobilnych. Ponadto opracowano oprogramowanie, które znacznie rozszerza możliwości wykorzystania baz danych w celu analizy pozyskanych danych do określenia współzależności pozostałych produktów procesu spalania w silnikach samochodowych oraz innych tego typu rozwiązaniach spalinowych wykorzystujących różne odmiany paliw [151].

Niezmierzalnym ważnym elementem systemu telemetrycznego jest opracowany klasyfikator szacowanego poziomu emisji, którego istota została opisana w rozdziale 8 niniejszej rozprawy.

Ze względu na czystość patentową podano jedynie ogólne informacje na temat systemu telemetrycznego.

8. PROCEDURA BADAWCZA

W obliczu rosnącej świadomości ekologicznej i konieczności redukcji emisji spalin pojazdów, opracowanie nowych, bardziej efektywnych metod monitorowania stanu pojazdu stało się niezbędne. W odpowiedzi na rosnące wymagania dotyczące kontroli emisji spalin oraz potrzeby predykcyjnej diagnostyki układów napędowych, zaproponowano autorski system monitorowania emisji spalin oparty na analizie danych z czujników tlenu w czasie rzeczywistym. System ten bazuje na przetwarzaniu i interpretacji sygnałów pochodzących z sond lambda oraz dodatkowych czujników wspierających analizę warunków pracy silnika. Celem rozwiązania jest nie tylko bieżące monitorowanie składu spalin, ale także predykcja ewentualnych przekroczeń norm emisji oraz wczesne wykrywanie nieprawidłowości w pracy układu paliwowego i wydechowego. Zastosowanie algorytmów analitycznych oraz modeli predykcyjnych umożliwia dokładniejszą ocenę efektywności spalania oraz wykrywanie anomalii mogących prowadzić do wzrostu emisji szkodliwych substancji. Zaproponowane rozwiązanie wykorzystuje dane telemetryczne pobierane w czasie rzeczywistym, co pozwala na dynamiczną analizę i natychmiastową reakcję na zmieniające się warunki eksploatacyjne pojazdu. Opracowany algorytm bazuje na analizie korelacji pomiędzy zmianami napięcia na sondzie lambda a emisją CO, HC i NO_x. Na podstawie sygnałów napięciowych sond lambda określone są parametry mieszanki paliwowo-powietrznej, co pozwala na przewidywanie składu spalin. Analiza wielowymiarowa uwzględnia zarówno dynamikę zmian napięcia, jak i ich charakterystyczne wzorce w różnych warunkach obciążeniowych silnika. Dzięki temu możliwe jest wykrywanie stanów granicznych, które mogą wskazywać na zbyt ubogą lub zbyt bogatą mieszankę prowadzącą do wzrostu emisji szkodliwych substancji.

Końcowym etapem przedstawionej metodyki badań jest weryfikacja uzyskanych danych za pomocą analizatora spalin. Ten krytyczny etap procesu badawczego ma na celu zapewnienie obiektywności, dokładności i wiarygodności rezultatów, poprzez ich porównanie z wynikami uzyskanymi za pomocą standardowej metody pomiarowej. Analiza danych uzyskanych w trakcie weryfikacji będzie obejmować statystyczną ocenę zgodności między odczytami z systemu telemetrycznego i zaproponowanym algorytmem predykcyjnym a danymi z analizatora spalin. Wykorzystane zostaną techniki statystyczne które pozwolą na ocenę dokładności, precyzji i wiarygodności proponowanych systemów monitorowania w kontekście rzeczywistych warunków eksploatacji pojazdów. Dodatkowo, szczegółowa analiza przypadków odstających lub niezgodności w wynikach pozwoli na identyfikację potencjalnych obszarów do dalszej optymalizacji i ulepszenia proponowanego rozwiązania.

Wobec powyższego plan badań z wykorzystaniem opracowanego systemu telemetrycznego, mobilnej sondy CO, mobilnych i stacjonarnych analizatorów spalin oraz systemu akwizycji danych z OBD pojazdu ma

1. Cel badań

- Określenie skuteczności i precyzji telemetrycznego systemu w monitorowaniu sygnałów sond lambda w czasie rzeczywistym.
- Porównanie wyników pomiarów z różnych metod (mobilna sonda emisji, analizatory spalin, hamownia, SKP) dla oceny spójności i wiarygodności danych.

2. Zakres badań

- Ustalenie scenariuszy pracy silnika do badań: rozruch zimnego silnika, praca jałowa, obciążenie stałe, przyspieszenia, praca na różnych obrotach.
- Wykonanie obliczeń w celu ustalenia danych do algorytmów predykcyjnych niezbędnych do szacowania emisji toksycznych składników spalin,
- Określenie metody szybkiego przeliczania danych pozyskanych z analizatorów spalin do wymagań norm Euro.
- Ustalenie zakresu pomiarów sygnałów sond lambda (np. napięcie, częstotliwość przełączania) oraz stężeń gazów spalinowych.

3. Metodyka badań

- Badania wstępne – główny cel badań weryfikacja poprawności działania systemu dynamicznego pomiaru CO oraz poprawności działania systemu telemetrycznego monitorowania sond lambda,
- Synchronizacja zastosowanych układów pomiarowych,

3.1. Przygotowanie pojazdu i systemu pomiarowego

- Instalacja telemetrycznego systemu kontroli sond lambda: Podłączenie sond lambda do systemu telemetrycznego, zapewnienie stabilnego zasilania i transmisji danych.
- Instalacja mobilnej sondy emisji CO: Montaż sondy w układzie wydechowym pojazdu w sposób minimalizujący wpływ na przepływ spalin.
- Instalacja analizatorów spalin: Przygotowanie sprzętu do pomiaru CO, HC, NO_x, CO₂ zgodnie z wymaganiami.
- Kalibracja wszystkich urządzeń: Sprawdzenie poprawności pomiarów, regulacja czujników.

-
- Testy wstępne: Krótkie testy działania systemów pomiarowych bez obciążenia silnika.

3.2. Badania w warunkach laboratoryjnych (hamownia podwoziowa)

- Przygotowanie hamowni: Ustawienie warunków testowych (temperatura otoczenia, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne).
- Wykonanie serii testów silnika:
 - Praca jałowa (bez obciążenia) – pomiar emisji i sygnałów sond lambda.
 - Praca przy stałych obrotach i obciążeniu – np. 1500, 2500, 3500 obr./min.
 - Symulacja cyklu jazdy (przyspieszenia, zwolnienia).
- Rejestracja i synchronizacja danych: Zbieranie danych z sond lambda, mobilnej sondy emisji i analizatorów spalin w czasie rzeczywistym.
- Analiza wstępna: Sprawdzenie spójności danych pomiarowych, identyfikacja ewentualnych błędów pomiarowych.
- Kalibracja i korekta systemu telemetrycznego: Poprawki w oprogramowaniu lub konfiguracji systemu na podstawie wyników.

3.3. Badania w warunkach rzeczywistych (przejazdu testowe - jazda drogowa)

- Planowanie trasy testowej: Wybór trasy zróżnicowanej pod względem prędkości i obciążenia.
- Montaż systemów pomiarowych: Zapewnienie stabilności i bezpieczeństwa montażu podczas jazdy.

Przeprowadzenie testów:

- Pomiar emisji i sygnałów sond lambda podczas rozruchu, przyspieszeń, jazdy ze stałą prędkością i hamowania silnikiem.
- Monitorowanie parametrów pracy silnika (temperatura, obroty, obciążenie).
- Rejestrowanie danych telemetrycznych: Transmisja i zapisywanie danych w czasie rzeczywistym.
- Analiza danych: Porównanie zmian emisji z sygnałami sond lambda, identyfikacja momentów nieprawidłowej pracy silnika.

3.4. Badania kontrolne na stacji kontroli pojazdów (SKP)

- Przeprowadzenie standardowych testów emisji: Zgodnie z obowiązującymi przepisami (np. pomiar CO i HC na wolnych obrotach, testy przy określonych obrotach).
- Kontrola pracy sond lambda: Pomiar napięcia sondy lambda, sprawdzenie przełączania się sygnału (jeśli dotyczy).
- Porównanie wyników: Analiza zgodności wyników uzyskanych na Stacji Kontroli Pojazdów z danymi pozyskanymi z systemu telemetrycznego i mobilnych urządzeń.
- Dokumentacja: Sporządzenie protokołu pomiarów, w tym ewentualnych rozbieżności i ich przyczyn.

4. Analiza danych i ocena wyników

- Weryfikacja dokładności systemu telemetrycznego: Porównanie danych z różnych źródeł.
- Identyfikacja anomalii: Wskazanie sytuacji, kiedy sygnały sond lambda nie odpowiadają rzeczywistej emisji (np. awarie sondy, błędy pomiarowe).
- Ocena wpływu warunków pracy silnika: Analiza jak różne tryby pracy wpływają na emisję i sygnały pomiarowe.

5. Wnioski i rekomendacje

- Podsumowanie efektywności systemu telemetrycznego: Ocena przydatności do monitoringu emisji w czasie rzeczywistym.
- Rekomendacje do dalszych badań: Propozycje usprawnień sprzętowych i programowych, rozszerzenia zakresu pomiarów.

8.1. Pojazdy wytypowane do badań

Do badań wytypowano modele pojazdów z segmentu B, wyposażone w benzynowe silniki o zbliżonej pojemności. Wybór obejmuje Fiata Punto (rys.39), który był eksploatowany w warunkach miejskich jako pojazd szkoły nauki jazdy o przebiegu 115000, Renault Modus (rys.39), używany w mieście do celów prywatnych o przebiegu 162000. Taki dobór pojazdów umożliwia przeprowadzenie kompleksowych badań, które obejmują szerokie spektrum aspektów związanych z eksploatacją pojazdów. Zróżnicowanie modeli oraz warunki, w jakich były użytkowane, pozwala na głębsze zrozumienie, jak stan techniczny pojazdów, różnice w sposobie użytkowania oraz zastosowane technologie wpływają na emisję spalin. Dzięki temu możliwe jest także ocenienie efektywności obowiązujących norm emisji spalin. Wyniki takich

badania mogą dostarczyć istotnych wskazówek dla kształtowania przyszłych regulacji prawnych, rozwoju metod diagnostycznych w motoryzacji oraz implementacji nowoczesnych rozwiązań technologicznych. Wybór samochodów przeznaczonych do badań był celowy a kryteriami jakimi kierowano się przy ich kwalifikacji był wiek pojazdów odpowiadający średniemu wiekowi pojazdów w Polsce oraz sposób eksploatacji jeden użytek prywatny (Renault Modus) i wykorzystanie jako pojazd użytkowy (Fiat Punto – pojazd przeznaczony do nauki jazdy). Oba pojazdy mają podobne zarejestrowane przebiegi liczone w tys. km. Ponadto w ramach eksperymentu wykonano pomiary w pojeździe bez konwertera katalitycznego [75, 77].

Poniżej tabeli 5 podano dane techniczne pojazdów poddanych badaniom.

Tabela 5. Dane techniczne pojazdów [Auto Centrum]

Parametr	P1 Fiat Punto	P2 Renault Modus
Przeznaczenie	Nauka	Prywatny
Rodzaj trasy	jazdy Miejskie	Miejskie
Przebieg km	130000	155000
Liczba cylindrów	R4	R4
Pojemność skokowa [ccm3]	1400	1149
Moc maks.: [kW] przy [obr/min]	95	55
Skrzynia biegów	M5	M5
Paliwo	PB 95	PB 95
Układ oczyszczania spalin	TAK	TAK
Zużycie paliwa w cyklu mieszanym [dm ³ /100 km]	5,9	6
Emisja CO ₂ [g/km] NDEC	-	-
Emisja CO ₂ [g/km] WLTP	163	145
Emisja CO [mg/km]	359	314
Emisja THC [mg/km]	84	74
Emisja NO _x [mg/km]	41	36
Norma emisji spalin	Euro 4	Euro 4

Poniższa tabela przedstawia maksymalne dopuszczalne wartości emisji spalin (w mg/km) dla badanych pojazdów o masie własnej mniejszej niż 2620 kg, wyposażonych w silniki z zapłonem iskrowym (PI) zasilane benzyną. Zestawione limity dotyczą emisji tlenu węgla (CO), węglowodorów (HC) oraz tlenków azotu (NO_x). Dane stanowią podstawę w ocenie zgodności pojazdów z wymaganiami norm emisyjnych EURO 4.

Tabela 6. Limity emisji toksycznych składników spalin dla pojazdów norma Euro 4.
[opracowanie na podstawie Dyrektywy Komisji 2002/80/WE]

Marka	Masa własna	Rodzaj silnika	Rodzaj paliwa	CO [mg/km]	HC [mg/km]	NOx [mg/km]
Fiat	m < 2620 kg	ZI	Benzyna	1000	100	80
Renault	m < 2620 kg	ZI	Benzyna	1000	100	80



Rys. 39. Obiekty badań P1 i P2. Pomiar z wykorzystaniem analizatora Gasbox

8.2. Opis stanowiska badawczego

Badania wykonano w trakcie jazdy i codziennej eksploatacji pojazdów, hamowni podwoziowej oraz na **Stacji Kontroli Pojazdów SKP FG/08/Pw**.

Badania na SKP przeprowadzono zgodnie z wymogami zawartymi w *Dzienniku ustaw z dnia 10 czerwca 2015 r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach*. – Załącznik nr. 1 do ustawy Prawo o ruchu drogowym.

W celu sprawdzenia poprawności działania zaproponowanych rozwiązań oraz weryfikacji wyników, przeprowadzono testy porównawcze za pomocą specjalistycznych urządzeń diagnostycznych. W badaniu wykorzystano różnorodne modele sprzętu, które są cenione w branży motoryzacyjnej za ich zaawansowane możliwości i precyzję pomiarową. Do testów wybrano następujące urządzenia: Bosch KTS 560, który jest znanym narzędziem diagnostycznym zapewniającym szeroki zakres funkcji diagnostycznych i pomiarowych (rys.40) [85].



Rys. 40. Bosch KTS 560 [Bosch]

Dodatkowo, w badaniach uwzględniono diagnoskop stacjonarny FSA 740 (rys.41), narzędzie charakteryzujące się wysoką efektywnością i dokładnością w dostarczaniu danych diagnostycznych, posiada również 2-kanałowy oscyloskop o czasie próbkowania 50 MS/s, który umożliwia precyzyjną analizę sygnałów elektrycznych i szybką lokalizację usterek. Uniwersalność tego urządzenia polega na stworzeniu jednej płaszczyzny komunikacyjnej i pomiarowej umożliwiającej współpracę z testerami usterek typu KTS oraz z analizatorem spalin typu BEA.



Rys. 41. Badania na hamowni podwoziowejz wykorzystaniem analizatorów FSA 740 + KTS540 oraz opracowanych systemów telemetrycznych

W celu weryfikacji zebranych danych i potwierdzenia postawionej tezy wykorzystano analizator spalin Texa GASBOX Autopower (rys.42) przeznaczony do analizy spalin z silników czterosówowych o zapłonie iskorowym.

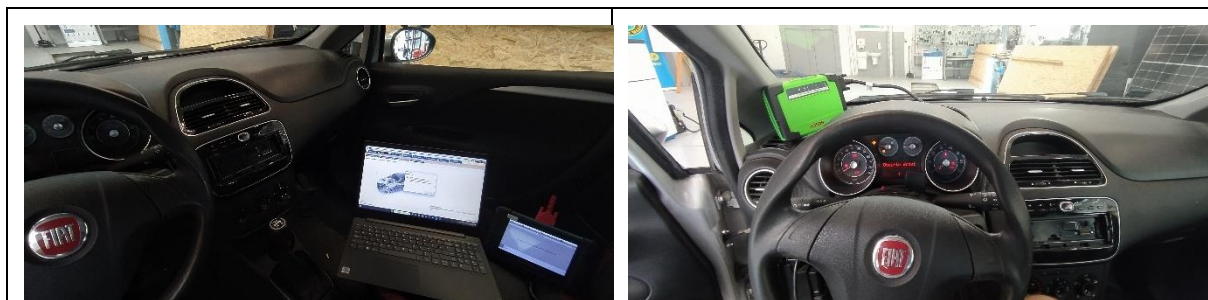


Rys. 42. Analizator spalin TEXA – GASBOX AUTOPOWER [Texa]

Tabela 7 prezentuje wybrane parametry metrologiczne analizatora spalin Gasbox Autopower, stanowiącego zaawansowane narzędzie diagnostyczne w analizie składu spalin. Wstępne opracowanie tej charakterystyki metrologicznej umożliwia ocenę precyzji, dokładności oraz dynamiki odpowiedzi urządzenia, co jest kluczowe przy zastosowaniach inżynierskich w kontroli procesów spalania. Analiza parametrów, takich jak czułość, zakres pomiarowy, czas odpowiedzi czy margines błędu, pozwala na ilościowe określenie możliwości urządzenia oraz dostosowanie jego funkcjonalności do specyficznych wymagań diagnostycznych. W kontekście zastosowań motoryzacyjnych, gdzie proces spalania musi być monitorowany z wysoką dokładnością, przedstawione parametry stanowią podstawę do dalszych analiz porównawczych oraz optymalizacji systemów kontroli emisji.



Rys. 43. Widok kompletnego układu mobilnego pomiaru toksyczności spalin zamontowanego w pojeździe



Rys. 44. Wnętrze pojazdu testowego z zamontowanymi urządzeniami pomiarowymi

Tabela 7. Wybrane parametry metrologiczne analizatora spalin Gasbox Autopower [Texa]

Typ pomiaru	Zakres pomiaru	Jednostka pomiaru	Rozdzielczość wskazań	Zakres błęd	
				Bezwzględny (*)	Względny (*)
CO	0 ÷ 9,99	% obj.	roz. 0,01	± 0,03	± 5%
CO ₂	0 ÷ 19,9	% obj.	roz. 0,1	± 0,5	± 5%
HC	0 ÷ 5000	ppm obj.	roz. 1	± 10	± 5%
O ₂	0 ÷ 21,4	% obj.	roz. 0,1	± 0,1	± 5%
NO _x	0 ÷ 5000	ppm obj.	roz. 5 (opcja)	± 30	± 5%
Lambda	0,5 ÷ 1,50		roz. 0,01	± 0,001	-
OBR./MIN	0 ÷ 9990	obr./min	roz. 10	50	± 5%
Temp. oleju	5 ÷ 200	°C	roz. 0,1	± 2	± 5%
Temp. otocz.	0 ÷ 45	°C	roz. 0,1	± 0,5	± 5%
Ciśn. otocz.	800 ÷ 1060	hPa	roz. 1	± 2,5	-

Sposób wyliczania współczynnika Lambda

Obliczanie współczynnika lambda oparte jest o pomiary następujących gazów: CO, CO₂, HC, i O₂ (8.1).

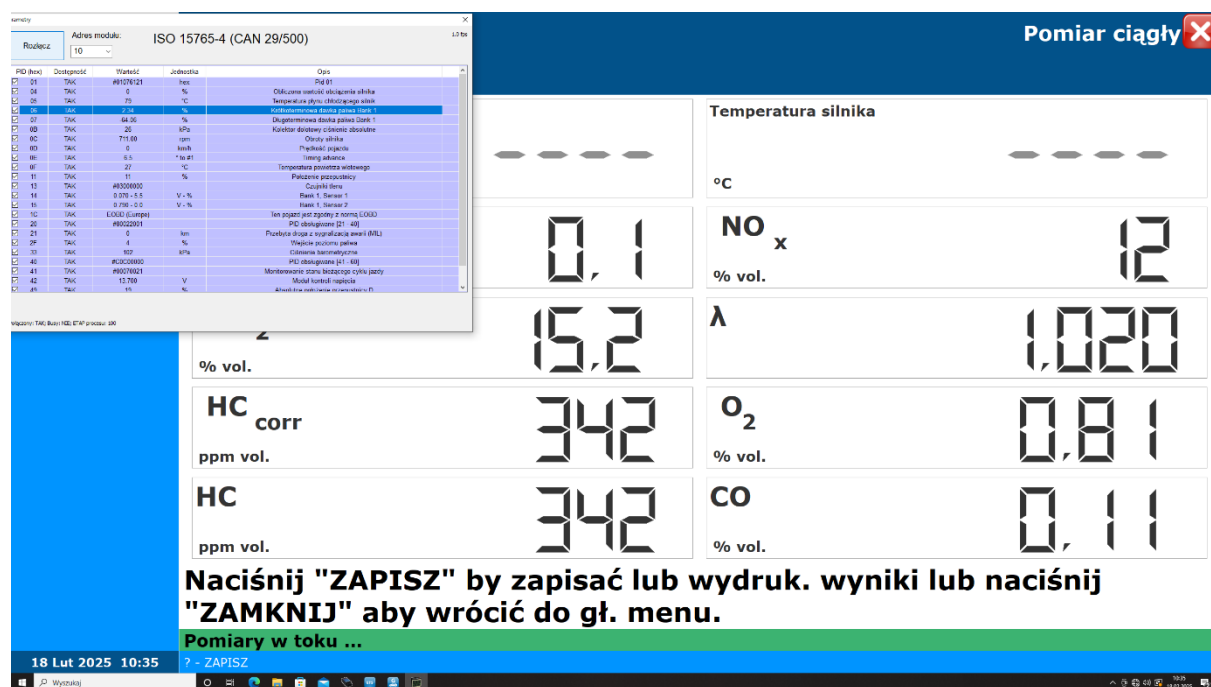
$$\lambda = \frac{[CO_2] + \frac{[CO]}{2} + [O_2] + \left(\frac{H_{cv}}{4} \times \frac{3.5}{3.5 + \frac{[CO]}{[CO_2]}} - \frac{O_{cv}}{2} \right) \times ([CO_2] + [CO])}{\left(1 + \frac{H_{cv}}{4} - \frac{O_{cv}}{2} \right) \times \{([CO_2] + [CO]) + K_1 \times [HC]\}} \quad (8.1)$$

Tabela 8 przedstawia dla wybranych paliw wartości H_{cv} - wartość opałowa oraz O_{cv} oznaczające ułamek zawartości tlenu w paliwie, np. w formie ułamka masowego lub objętościowego. Wysoka wartość H_{cv} wskazuje na duży potencjał energetyczny paliwa (np. CNG = 4,0), a rosnąca zawartość tlenu (O_{cv}) wiąże się m.in. ze zmianami w procesie spalania i wpływa na emisję spalin.

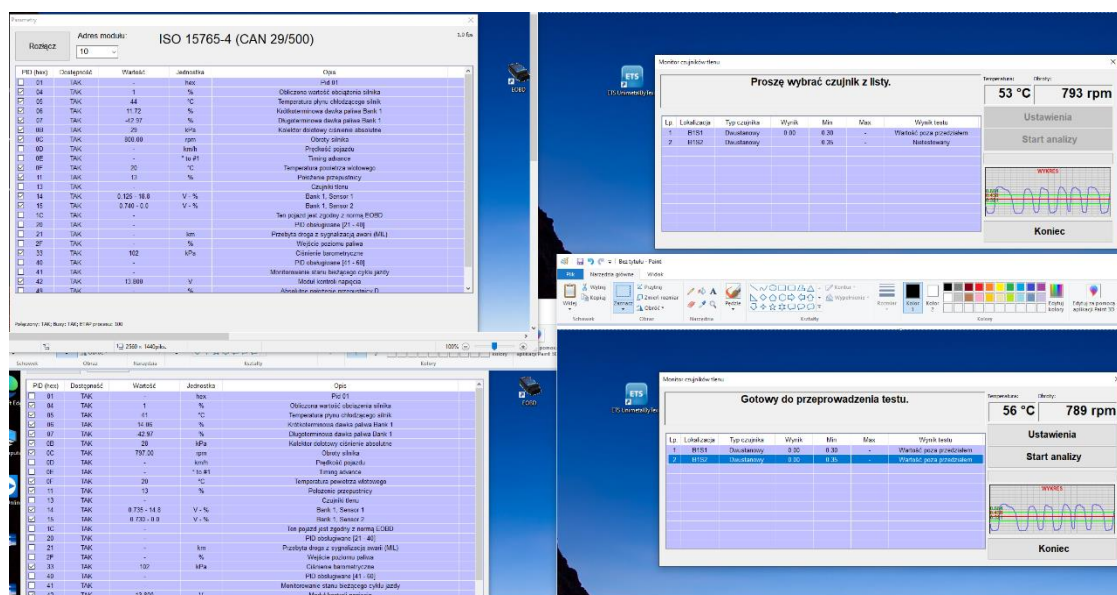
Tabela 8. Wartości H_{CV} i O_{CV} wybranych paliw

H_{CV}	O_{CV}	PALIWO
1,89	0,016	Benzyna E5
1,93	0,033	Benzyna E10
2,53	0,00	LPG
4,0	0,00	CNG
2,74	0,390	Etanol E85
2,61	0,032	Etanol E75

Wykonując pomiar za pomocą systemu telemetrycznego oraz korzystając z danych uzyskanych z analizatora spalin dokonano kalibracji systemu telemetrycznego, układu dynamicznego pomiaru zawartości CO w spalinach oraz korzystając z danych zegara RTC dokonano synchronizacji układu pomiarowego (rys 45 i rys. 46) [91].



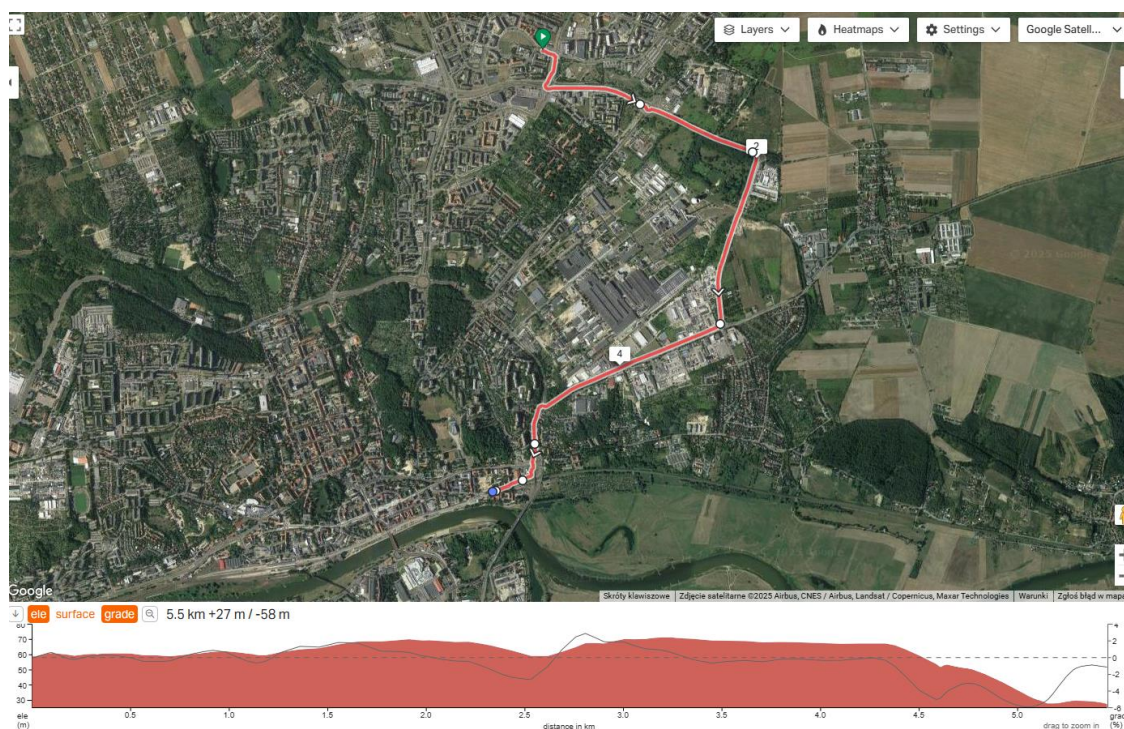
Rys. 45. Wyniki referencyjne uzyskane z analizatora spalin praca - na biegu jałowym



Rys. 46. Dane z szyny CAN

8.3. Pomiary drogowe

Badania zostały przeprowadzone w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego, z uwzględnieniem stylu jazdy typowego dla pozostałych uczestników ruchu, na trasie miejskiej w Gorzowie Wlkp. o długości 5,5 km. Średnia prędkość przejazdu wyniosła 23,7 km/h. Całkowite wzniesienie wynosi 27 metrów, natomiast całkowite obniżenie 58 metrów. Pomiary były wykonywane w dwóch kierunkach jazdy. Największe różnice wysokości występują w środkowym odcinku, pomiędzy 2,5 a 3,5 kilometrem trasy (rys.47). W trakcie pomiarów średnia temperatura powietrza wynosiła 15°C, ciśnienie atmosferyczne 991 hPa, a wilgotność względna 71%. Pojazd był obciążony masą własną oraz masą kierowcy. Pomiary rozpoczynano przed osiągnięciem przez silnik temperatury roboczej. Analogiczne testy zostały wykonane również w warunkach jazdy podmiejskiej. Jednak ze względu na bardziej ustabilizowany przebieg tych przejazdów, w niniejszym opracowaniu przedstawiono jedynie wyniki uzyskane podczas jazdy miejskiej. Wybór tych wyników jest podyktowany faktem, iż są one ciekawsze jak również dostarczają więcej interesujących informacji. Niemniej jednak uzyskane wyniki potwierdzają poprawność przyjętych założeń.



Rys. 47. Plan trasy przejazdu dla pomiaru drogowego [gogle maps]

8.4. Przykładowe wyniki badań

Ponieważ analizator spalin umożliwia jedynie pomiar objętościowych udziałów wybranych składników spalin, bez możliwości bezpośredniego określenia ich strumienia masowego, konieczne jest rozbudowanie projektowanego układu o element pozwalający na jego wyznaczenie. W tym celu możliwe jest wykorzystanie danych z interfejsu DLC, rejestrując przepływ powietrza zasysanego przez kolektor dolotowy. Aby obliczyć masowy strumień danego składnika spalin, należy w pierwszej kolejności znać jego udział objętościowy, a następnie przeliczyć go na udział masowy względem całości spalin. Przy założeniu, że całkowita masa spalin równa się sumie masy zużytego powietrza i wtryskiwanego paliwa, można oszacować masowy udział każdego składnika. W rzeczywistości masa ta może być nieco niższa ze względu na kondensację niektórych produktów spalania. Dane dotyczące udziałów objętościowych wybranych związków zostały uzyskane przy użyciu analizatora spalin. Jednakże, aby uzyskać pełny obraz składu gazów, konieczne było również oszacowanie udziału azotu (N_2), pary wodnej (H_2O) oraz argonu (Ar). W tym celu przeprowadzono analizę stechiometrii reakcji spalania.

Analiza procesu spalania oraz udziału objętościowego nie zmierzonych składników spalin.

$$\begin{aligned} C_{\beta}H_{\alpha}O_{\varepsilon} + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2 + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{78}{21} N_2 + \lambda \\ \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{1}{21} Ar \rightarrow \\ \rightarrow \beta \cdot CO_2 + \frac{\alpha}{2} H_2O + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{78}{21} N_2 + \lambda \\ \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{1}{21} Ar \rightarrow +(\lambda - 1) \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2 \end{aligned} \quad (8.2)$$

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 literaturze dostępne są różne składy cząsteczkowe benzyn, do modelu przyjęto uproszczony wzór $C_1H_{1,89}O_{0,016}$, przyjęto również że spalanie przebiega stechiometrycznie ($\lambda = 1$). Na podstawie powyższych wyliczeń wyznaczono współczynniki produktów procesu spalania oraz ich udziały objętościowe [66, 121].

$$\begin{aligned} C_1H_{1,89}O_{0,016} + 1,4645 \cdot O_2 + 5,4396 \cdot N_2 + 0,0697 \cdot Ar \rightarrow \\ \rightarrow 1 \cdot CO_2 + 0,945 \cdot H_2O + 5,4396 \cdot N_2 + 0,0697 \cdot Ar \end{aligned} \quad (8.3)$$

gdzie:

Paliwo

$C_1H_{1,89}O_{0,016}$ – zastępczy wzór paliwa (uproszczony model)

C_1 – jeden atom węgla

$H_{1,89}$ – 1,89 atomów węgla

$O_{0,016}$ – 0,016 atomów tlenu

Powietrze

$1,4645 \cdot O_2$ – ilość tlenu niezbędna do zupełnego spalania paliwa

$5,4396 \cdot N_2$ – ilość azotu obecnego w powietrzu

$0,0697 \cdot Ar$ – ilość argonu obecnego w powietrzu

Produkty spalania

$1 \cdot CO_2$ – jeden atom dwutlenku węgla

$0,945 \cdot H_2O$ – 0,945 atomów wody

$5,4396 \cdot N_2$ – azot pozostaje niezmienny

$0,0697 \cdot Ar$ – argon pozostaje niezmienny

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano następujące przybliżone wartości udziałów objętościowych głównych składników spalin:

$$\text{Udział objętościowy } H_2O = \frac{7.4543}{0.945} \approx 0.1268 \text{ lub } 12.68 \%$$

$$\text{Udział objętościowy } CO_2 = \frac{7.4543}{1} \approx 0.1342 \text{ lub } 13.42\%$$

$$\text{Udział objętościowy } N_2 = \frac{7.4543}{5.4396} \approx 0.7297 \text{ lub } 72.97\% \quad (8.4)$$

$$\text{Udział objętościowy } Ar = \frac{7.4543}{0.0697} \approx 0.0094 \text{ lub } 0.94\%$$

Są to podstawowe składniki spalin generowanych przez silnik benzynowy pracujący z mieszanką stechiometryczną. Należy jednak zaznaczyć, że zestawienie to nie obejmuje emisji produktów ubocznych powstających wskutek niedoskonałości rzeczywistego procesu spalania. W uproszczeniu przyjęto, że ich zawartość jest na tyle niska, iż nie ma istotnego wpływu na wyniki dalszych obliczeń. W analizach wykorzystano wartości objętościowe N_2 oraz Ar uzyskane na drodze obliczeń (2), natomiast dla pozostałych składników posłużono się bezpośrednimi wynikami pomiarów. Udział pary wodnej (H_2O) został oszacowany jako wartość pochodna, wynikająca ze stechiometrii spalania. Warto również podkreślić, że przy spalaniu mieszanki stechiometrycznej masa emitowanych spalin przekracza masę zasysanego powietrza o wartość odpowiadającą masie spalonego paliwa, która wynosi około 1/14,28 masy powietrza. W końcowej fazie analizy uwzględniono również niewielkie odchylenia współczynnika nadmiaru powietrza λ , korzystając ze wzoru Brettschneidera (8.5) oraz danych pomiarowych dotyczących udziałów objętościowych tlenku węgla (CO), dwutlenku węgla (CO_2), węglowodorów (HC), tlenu (O_2) oraz tlenków azotu (NO_x).

$$\frac{[CO_2] + \frac{[CO]}{2} + [O_2] + \left(\frac{H_{cv}}{4} \times \frac{3.5}{3.5 + \frac{[CO]}{[CO_2]}} - \frac{O_{cv}}{2} \right) \times ([CO_2] + [CO])}{\left(1 + \frac{H_{cv}}{4} - \frac{O_{cv}}{2} \right) \times \{([CO_2] + [CO]) + K_1 \times [HC]\}} \quad (8.5)$$

gdzie:

- $[]$ stężenie w % obj.

- λ współczynnik nadmiaru powietrza (λ);
- CO, CO₂, O₂, NO – zawartości objętościowe składników gazowych w spalinach [%];
dla HC tylko w ppm objętości;
- K^1 jest współczynnikiem przeliczeniowym dla HC z pomiaru wg metody FID na metodę NIDR, wyrażonym w ppm objętości ekwiwalentu n-hexanu (C₆H₁₄). Wartość jego we wzorze równa jest 6×10^{-4} ;
- H_{cv} jest to iloraz liczb atomów wodoru do węgla w paliwie. Jego wartość bezwzględna jest równa 1,89;
- O_{cv} jest to iloraz liczby atomów tlenu do węgla w paliwie. Jego wartość bezwzględna dla benzyny wynosi 0,016.

CO _{corr} % vol.	0.4	NO _x % vol.	268
CO ₂ % vol.	14.6	λ	1.022
HC _{corr} ppm vol.	497	O ₂ % vol.	1.14
HC ppm vol.	497	CO % vol.	0.38
Naciśnij "ZAPISZ" by zapisać lub wydruk. wyniki lub naciśnij "ZAMKNIJ" aby wrócić do gł. menu.			

Rys. 48. Przykładowa ramka uzyskanych danych z systemu ETS

Przykładowe dane podstawione z pomiarów analizatorem w celu weryfikacji poprawności dalszych obliczeń (rys. 48), uzyskany wynik $\lambda = 1,02$ co jest potwierdzeniem poprawności obliczeń.

$$\frac{14.6 + \frac{0.4}{2} + 1.14 + \left(\frac{1.89}{4} \times \frac{3.5}{3.5 + \frac{0.4}{14.6}} - \frac{0.016}{2} \right) \times (14.6 + 0.4)}{\left(1 + \frac{1.89}{4} - \frac{0.016}{2} \right) \times \{ (14.6 + 0.4) + 6.0 \times 10^{-4} \times 497 \}} = 1,02 \quad (8.6)$$

Wyznaczenie zależności określającej wydatek spalin oraz poszczególnych składników (8.7)

$$q_i = q_{air} \cdot \left(1 + \frac{1}{\lambda \cdot AFR} \right) \cdot x_{mi} \quad (8.7)$$

gdzie:

q_i – masowy wydatek i -tego składnika [$g \cdot s^{-1}$],

q_{air} – masowy wydatek powietrza [$g \cdot s^{-1}$],

x_{mi} – udział masowy i -tego składnika [-].

Na podstawie relacji (7.8) określono udziały objętościowe i masowe poszczególnych składników wykorzystując ich masy molowe.

$$x_{mi} = \frac{c_i \cdot \mu_i}{\sum_{j=n}^{j=1} c_j \cdot \mu_j} \quad (8.8)$$

gdzie:

c_i – udział objętościowy i -tego składnika [-],
 μ_i – masa molowa danego składnika [$g \cdot mol^{-1}$],

Wyznaczenie masy molowej wybranych składników spalin (8.9)

$$\sum_{j=0}^{j=1} c_j \cdot \mu_j = \mu_{CO} \cdot c_{CO} + \mu_{HC} \cdot c_{HC} + \mu_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + \mu_{O_2} \cdot c_{O_2} + \mu_{NO_x} \cdot c_{NO_x} + \mu_{N_2} \cdot c_{N_2} + \mu_{Ar} \cdot c_{Ar} + \mu_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + \left(1 - (c_{CO} + c_{HC} + c_{CO_2} + c_{O_2} + c_{NO_x} + c_{N_2} + c_{Ar})\right) \cdot \mu_{H_2O} \quad (8.9)$$

gdzie

Masa molowa wybranych składników spalin wyrażona w [$g \cdot mol^{-1}$]

$\mu_{CO} = 28,01$ [$g \cdot mol^{-1}$],
 $\mu_{CO_2} = 44,009$ [$g \cdot mol^{-1}$],
 $\mu_{O_2} = 31,999$ [$g \cdot mol^{-1}$],
 $\mu_{HC} = 86,202$ [$g \cdot mol^{-1}$],
 $\mu_{NO_x} = 38,006$ [$g \cdot mol^{-1}$],
 $\mu_{N_2} = 28,013$ [$g \cdot mol^{-1}$],
 $\mu_{H_2O} = 18,015$ [$g \cdot mol^{-1}$].

Uzyskane zależności służą do wyznaczenia poprawności pomiaru za pomocą analizatora oraz zestawienia uzyskanych wyników z normą Euro. W związku z brakiem czujnika przepływu powietrza MAF w badanych pojazdach w celu obliczenia objętościowego składu spalin zastosowano wzór (8.10). Postępowanie przy obliczaniu emisji substancji w pojazdach bez czujnika MAF zostały szczegółowo opisane w dalszej części pracy w rozdziale 8.5.

$$E_x [mg/km] = \frac{Cx \cdot V_{spalin} \cdot \rho_x}{L} \cdot 10^6 \quad (8.10)$$

gdzie

E_x - emisja substancji x [mg/km],
 Cx - stężenie objętościowe substancji x w spalinach (w ułamku objętościowym: dla procentów [%] dzielimy przez 100, dla ppm dzielimy przez 10^6),
 V_{spalin} - całkowita objętość spalin emitowanych podczas pomiaru [m^3],
 ρ_x - gęstość substancji xxx [kg/m^3],

L - długość trasy pomiarowej [km],
 10^6 - przelicznik z kilogramów na miligramy.

Emisja substancji x zmienna ta stanowi końcowy wynik obliczeń i jest wyrażona w [mg/km], co jest standardową jednostką używaną w normach emisji spalin (normy Euro). Wybór tej jednostki pozwala na bezpośrednie porównanie z wartościami granicznymi w normach. Odniesienie emisji do jednostki pokonanej drogi, co umożliwia porównywanie pojazdów o różnej wielkości i charakterystyce. Praktyczne zarządzanie wartościami liczbowymi (mg zamiast g czy μ g). Pomiar stężenia objętościowego substancji w spalinach jest podstawowym parametrem mierzonym bezpośrednio przez analizatory spalin. Jest to parametr dostępny do bezpośredniego pomiaru (w przeciwieństwie do masy emisji) wyrażony w ułamku objętościowym (% lub ppm). Całkowita objętość spalin [m^3]. Ten parametr jest krytyczny, gdyż przekształca stężenie procentowe na rzeczywistą ilość substancji. Stosuje się go, ponieważ samo stężenie bez odniesienia do całkowitej objętości nie daje informacji o bezwzględnej ilości emitowanej substancji. W pojazdach bez czujnika MAF musi być szacowany pośrednio, uwzględnia zmienność warunków pracy silnika podczas pomiarów [, 128, 138].

Gęstość jest niezbędna do przekształcenia objętości danej substancji na jej masę, ponieważ normy emisji są wyrażone w jednostkach masowych, nie objętościowych, różne substancje zanieczyszczające mają bardzo różne gęstości wpływ temperatury i ciśnienia na gęstość gazów wymaga uwzględnienia w dokładnych pomiarach. Długość trasy pomiarowej [km], ten parametr pozwala na normalizację emisji całkowitej do emisji jednostkowej, co jest istotne, gdyż, umożliwia standaryzację wyników niezależnie od długości test pozwala na bezpośrednie porównanie z normami, które są wyrażone w mg/km uwzględnia różnice w emisji na różnych dystansach (np. rozgrzewanie silnika). Przyjęcie tych zmiennych w formule obliczeniowej wynika z kompromisu między dostępnością pomiarową, wymaganiami norm oraz praktycznymi aspektami prowadzenia badań emisji w warunkach rzeczywistych, szczególnie gdy brak jest bezpośredniego pomiaru przepływu powietrza [150].

$$E_{co} = \frac{0.004 \cdot 1.2 \text{ m}^3 \cdot 1.25 \text{ kg/m}^3}{5.5 \text{ km}} \cdot 10^6 = 1090.9 \text{ mg/km} \quad (8.11)$$

gdzie:

$$C_{co} = \frac{100}{0.4} = 0.004$$

$$V_{spalin} = 1.2 \text{ m}^3$$

$$\rho_{CO} = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$L = 5.5 \text{ km}$$

Przed przystąpieniem do pomiarów zdefiniowano wartości (PID) które podlegać będą akwizycji podczas przejazdów testowych. Ilość możliwych do rejestracji parametrów jest ściśle związana z pojazdu, rodzajem wyposażenia, użytego silnika oraz wersją oprogramowania ECU. Badany pojazd wyposażony był w sterownik Siemens sim 32 jest to popularny sterownik stosowany w silnikach Renault i Dacia w różnych odmianach silnika 1.2 16V o mocach 60 – 100 KM.

Istotnym z punktu widzenia klasyfikacji pojazdu pod względem poziomu emisji jest kodowanie poszczególnych przedziałów emisji. W wyniku badań oraz analizy dostępnej literatury wydzielono 6 poziomów emisji toksycznych składników spalin są to emisja:

- Bardzo niska,
- Niska,
- Średnia,
- Wysoka,
- Bardzo wysoka,
- Najwyższa.

Poszczególne wartości progowe szacowanej emisji toksycznych składników spalin zaprezentowano w tabeli 9. Zostały one opracowane oraz zweryfikowane na podstawie pomiarów zebranych w trakcie prób dynamicznych oraz na podstawie prac Myszkowskiego i Heywooda [66, 106, 107, 108]. Dla ułatwienia interpretacji wyników zastosowano podwójne kodowanie poprzez oznaczenie kolorem oraz oznaczenie liczbowe. Udział poszczególnych w cyklu życia pojazdy oraz obserwowana tendencja zmian może być klasyfikatorem spełnienia norm Euro przez dany pojazd. Przykładowe wykresy szacowane emisji wraz z kodowaniem zaprezentowano w podrozdziałach 8.4.1 i 8.4.2.

Tabela 9. Wartości zmierzonych emisji [67, 106, 107, 108]

Symbol	1	2	3	4	5	6
Oznaczenie kolorystyczne/kodowanie	b. niska	niska	średnia	wysoka	b. wysoka	najwyższa
Zakres emisji [mg/km] CO	<250	251-1000	1001-2000	2001-3000	3001-4000	>4000
Zakres emisji [mg/km] HC	<25	26-100	101-140	141-180	181-220	>220
Zakres emisji [mg/km] NO _x	<20	21-80	81-120	121-160	161-200	>200

Tabela 10 przedstawia szacowaną wielkość emisji spalin dla wartości $\lambda = 1,07$. Ta wartość odpowiada wartości napięcia w przedziale 1 do 102 mV. Dane w tabeli 10 pokrywają się z wyliczeniami (8.14) dla pojazdu P2, wskazują jednocześnie na podwyższoną emisję HC, NO_x oraz prawidłową emisję CO dla normy Euro 4 (porównaj tabela 11).

Tabela 10. Szacowana emisja dla wartości $\lambda = 1,07$.

[mV]	lambda	[λ]	[V]	Charakterystyka mieszanki	CO	HC	NOX
100	1,07	1,070	0,1	bardzo uboga	1	4	4
101	1,0698	1,070	0,1	bardzo uboga	1	4	4
102	1,0696	1,070	0,1	bardzo uboga	1	4	4
103	1,0694	1,069	0,1	bardzo uboga	1	4	4

Tabela 11. Wartości zmierzonych emisji.

Marka	Masa własna	Rodzaj silnika	Rodzaj paliwa	CO [mg/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
Fiat P2	m < 2620 kg	PI	Benzyna	572,7	144	89,5
Renault P1	m < 2620 kg	PI	Benzyna	1090,9	217,5	120

Analiza wyników przedstawionych w Tabeli 11 pozwala na ocenę zgodności emisji spalin z normą Euro 4, która dla pojazdów osobowych (napędzanych benzyną) zakłada następujące limity emisji (w przybliżeniu):

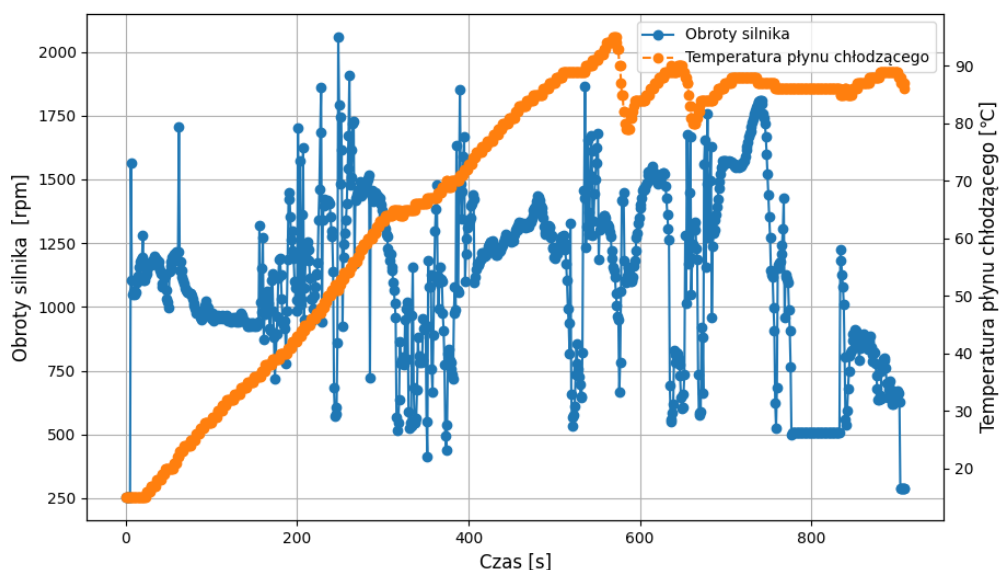
CO: $\leq 1000 \text{ mg/km}$,

HC: $\leq 100 \text{ mg/km}$,

NO_x: $\leq 80 \text{ mg/km}$.

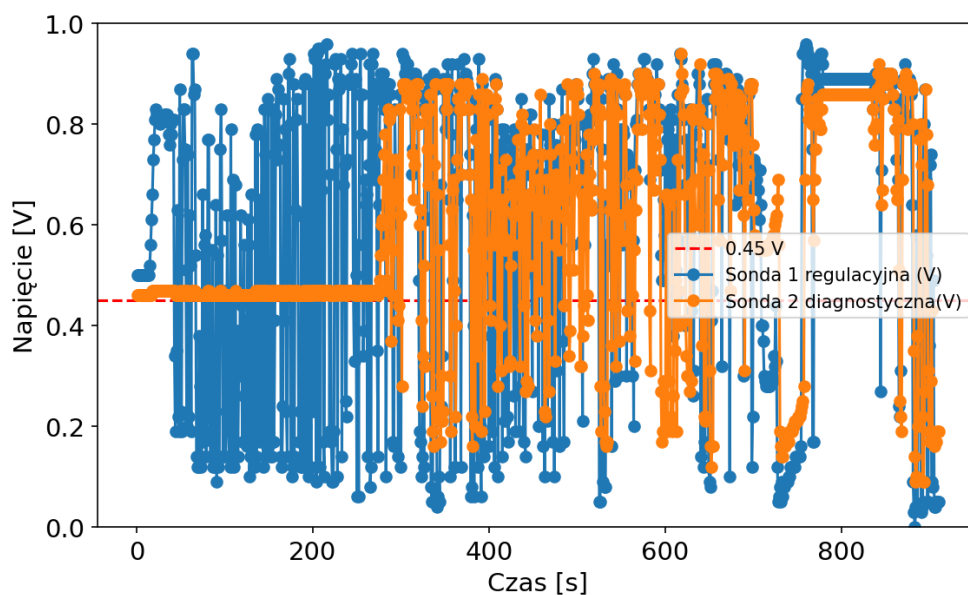
8.4.1. Badania drogowe. Przejazdy testowe - Renault Modus

Ze względu, iż badania skupiają się w obszarze działania sond lambda i ich wpływem na emisję szkodliwych substancji, pod uwagę wzięto tylko wartości mające według autora bezpośredni wpływ na emisję spalin. Wykres przedstawia przebieg zmienności prędkości obrotowej silnika oraz temperatury płynu chłodzącego w funkcji czasu. Wartości prędkości obrotowej silnika (oznaczone kolorem niebieskim) charakteryzują się dużą zmiennością, prezentując nieregularny przebieg, który wskazuje na dynamiczne warunki eksploatacyjne (rys.49). Jest to jedno z zestawień, z wielu możliwości dostępnych w aplikacji.



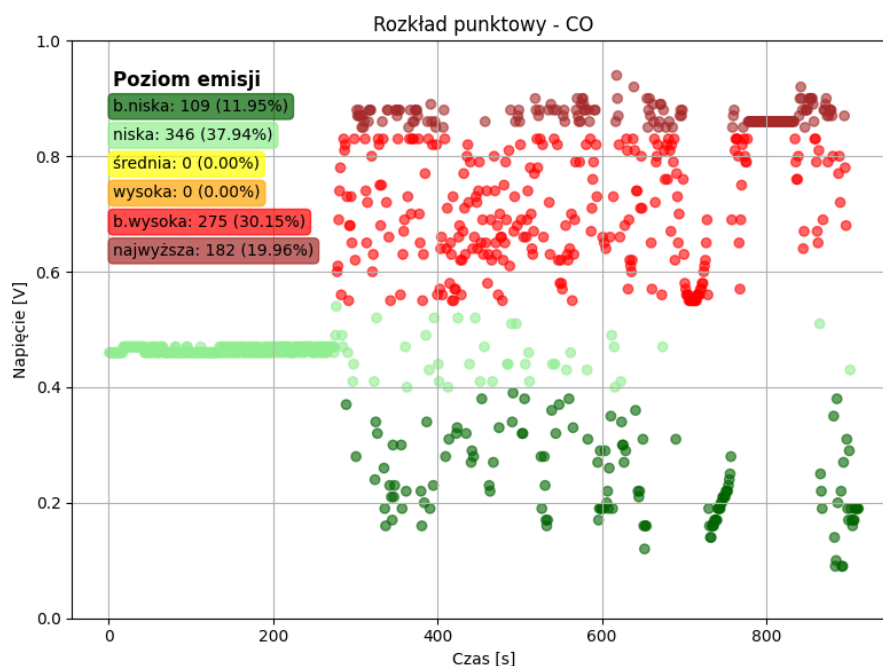
Rys. 49. Przebieg zmienności prędkości obrotowej silnika w funkcji czasu

Początkowa faza rejestracji pokazuje niższe wartości obrotów, stopniowo wzrastające wraz z przebiegiem czasu, osiągając chwilowe maksymalne wartości ok. 2000 obr/min. Temperatura płynu chłodzącego silnika (oznaczona kolorem pomarańczowym) wykazuje monotoniczny wzrost, stabilizując się w pobliżu temperatury roboczej około 90°C po upływie około 600 sekund. Na podstawie charakteru tego przebiegu można wywnioskować proces nagrzewania się silnika, zbliżający się asymptotycznie do stanu ustalonego, typowego dla osiągnięcia równowagi cieplnej układu chłodzenia. Oba parametry przedstawione na wykresie wskazują na początkowy etap pracy silnika od zimnego startu, poprzez fazę rozgrzewania, aż do osiągnięcia warunków eksploatacyjnych. Widoczne fluktuacje prędkości obrotowej sugerują zmienne obciążenie silnika w warunkach jazdy miejskiej, co istotnie wpływa na dynamikę zmian emisji substancję szkodliwych w spalinach.



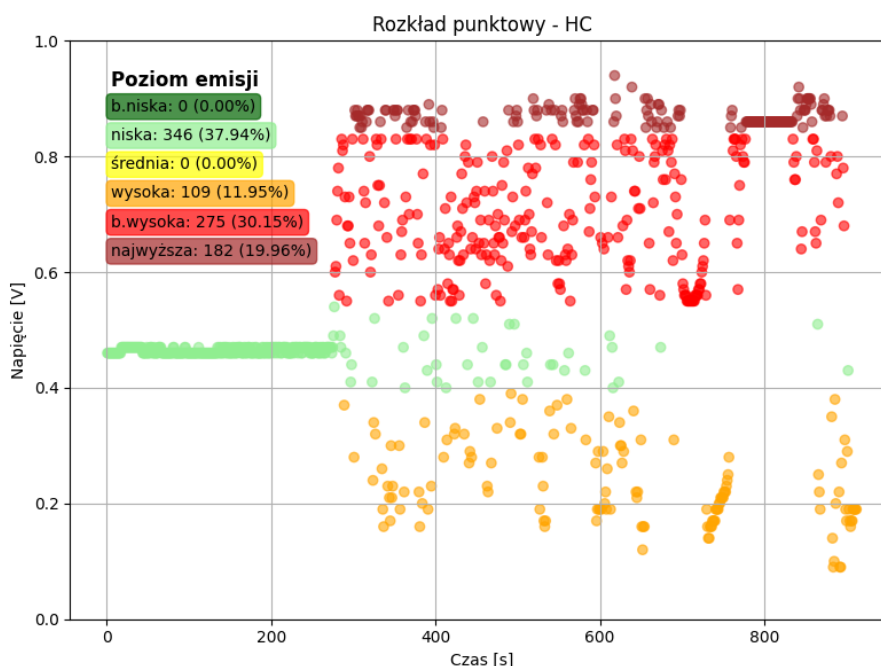
Rys. 50. Wykres charakterystyki napięciowej sond

Wykres przedstawia charakterystyki napięciowe dwóch sond lambda – regulacyjnej (sonda 1) oraz diagnostycznej (sonda 2) – w funkcji czasu (rys.50). Na wykresie zaznaczono również wartość odniesienia wynoszącą 0,45 V (linia czerwona przerywana), która jest teoretyczną wartością napięcia odpowiadającą stechiometrycznemu składowi mieszanki paliwowo-powietrznej ($\lambda=1$). Obserwowana charakterystyka sondy regulacyjnej (oznaczona na wykresie kolorem niebieskim) wykazuje intensywne, okresowe fluktuacje napięcia pomiędzy wartościami bliskimi 0,1 V a około 0,8–0,9 V, co świadczy o cyklicznych zmianach składu mieszanki (bogata–uboga), typowych dla pracy sond lambda regulujących skład mieszanki paliwowej w silnikach spalinowych. Taki sygnał świadczy o poprawnej, dynamicznej regulacji układu sterowania silnikiem, reagującego na zmieniające się warunki eksploatacji pojazdu. Charakterystyka sondy diagnostycznej jest podobnie dynamiczna, jednak fluktuacje napięcia są mniej regularne i mają mniejszą amplitudę niż w przypadku sondy regulacyjnej. Wynika to z umiejscowienia drugiej sondy za katalizatorem, przez co jej wskazania odzwierciedlają efektywność działania układu oczyszczania spalin. Mniejsze amplitudy napięcia i wolniejsze zmiany wartości mogą wskazywać na prawidłowe funkcjonowanie katalizatora, który skutecznie redukuje zmienność składu chemicznego spalin. Widoczne okresy ustabilizowania napięcia sond mogą świadczyć o stabilnych warunkach pracy silnika (np. praca na biegu jałowym lub w warunkach ustalonego obciążenia), podczas gdy okresy dużej dynamiki sygnałów obu sond sugerują zmiany parametrów pracy silnika, takie jak dynamiczne przyspieszanie lub hamowanie.



Rys. 51. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji CO pojazd P1

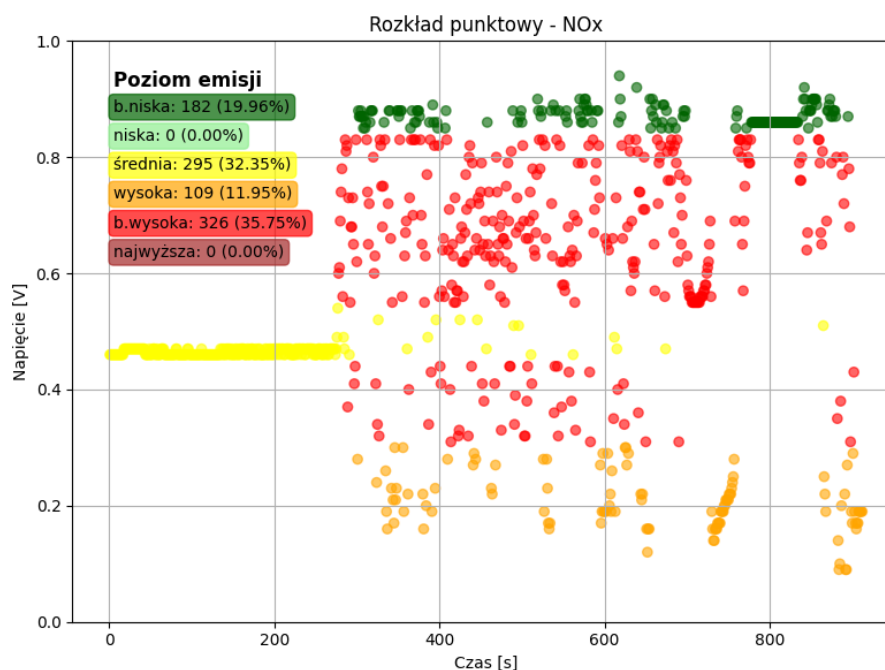
Wykres prezentuje napięciową charakterystykę emisji tlenku węgla (CO), przedstawioną w funkcji czasu. Napięcie sondy lambda przedstawiono na osi pionowej w zakresie od 0 do 1 V. Dodatkowo, wykres zawiera klasyfikację poziomu emisji CO przedstawioną w formie graficznej oraz liczbowej wraz z procentowym udziałem każdego z poziomów (rys.51). Przebieg sygnału napięciowego jest bardzo dynamiczny i wyraźnie podzielony na segmenty o niskim i bardzo niskim napięciu (oznaczone kolorem zielonym) oraz segmenty o napięciu odpowiadającym wysokiej emisji (oznaczone kolorem czerwonym). Na podstawie analizy wykresu wyraźnie widać intensywne i szybkie przejścia napięcia między wartościami niskimi (około 0,1–0,3 V) a wysokimi (powyżej 0,7–0,9 V). Świadczy to o intensywnych zmianach warunków pracy silnika, które powodują szybkie wahania składu mieszanki paliwowo-powietrznej pomiędzy stanami ubogiej i bogatej mieszanki, co bezpośrednio wpływa na poziom emisji tlenku węgla (CO). Taki rozkład ilościowy i jakościowy świadczy jednoznacznie o dynamicznym charakterze procesu spalania i zmiennej emisji tlenku węgla, związanej bezpośrednio z warunkami pracy silnika. Analizując gęstość rozkładu emisji można zauważyć, iż w tym przejeździe samochód charakteryzował się wysoką emisją CO, udział emisji wysokiej i najwyższej sięgał powyżej 50% zaś emisja niska miała swój udział na poziomie blisko 38%.



Rys. 52. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji HC pojazd P1

Wykres przedstawia zmienność emisji węglowodorów (HC) poprzez analizę napięcia sondy lambda w funkcji czasu. Dodatkowo na wykresie zaprezentowano podział ilościowy poziomów emisji HC, z wyraźnym procentowym udziałem w poszczególnych klasach intensywności (rys.52). Przebieg napięcia charakteryzuje się wyraźnym podziałem na dwie zasadnicze fazy. Pierwsza faza, trwająca około 300 sekund, przedstawia stabilne napięcia o wartościach bliskich 0,45 V, odpowiadających niskiemu poziomowi emisji HC. Druga faza, rozpoczynająca się po 300 sekundzie, cechuje się dynamicznymi zmianami napięcia w zakresie od około 0,1 V do wartości bliskich 0,9 V. Intensywność tych fluktuacji jednoznacznie wskazuje na zmienne warunki eksploatacji pojazdu i związane z nimi intensywne zmiany emisji węglowodorów.

Obserwowany przebieg napięcia sondy lambda świadczy o dużych zmianach w składzie mieszanki paliwowo-powietrznej, prowadzących do podwyższonych emisji HC w różnych etapach pracy silnika. Widoczna stabilizacja w pierwszej fazie pomiaru świadczy o pracy silnika w stałych warunkach eksploatacji, np. biegu jałowego, natomiast późniejsze wyraźne skoki napięcia wskazują na dynamiczną zmianę warunków pracy, jak gwałtowne przyspieszanie i hamowanie. Analizując gęstość rozkładu emisji można zauważyć, iż w tym przejeździe samochód charakteryzował się wysoką emisją HC udział procentowy emisji wysokiej, bardzo wysokiej i najwyższej sięgał ponad 62%.



Rys. 53. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji NO_x pojazd P1

Wykres przedstawia przebieg napięcia sondy lambda w funkcji czasu, odzwierciedlający poziomej emisji tlenków azotu (NO_x). Analiza obejmuje klasyfikację poziomów emisji NO_x wraz z ich procentowym udziałem. Charakter przebiegu napięciowego wyraźnie wskazuje na istotne zmiany warunków eksploatacji silnika. Początkowy etap rejestracji (około pierwszych 300 sekund) utrzymuje napięcia na średnim poziomie (około 0,45 V), co świadczy o umiarkowanym poziomie emisji NO_x w warunkach pracy stabilnej (rys.53). Po tym czasie sygnał ulega intensywnym i szybkim zmianom, osiągając zarówno wartości niskie (poniżej 0,3 V), jak i wysokie (powyżej 0,7–0,9 V), co jednoznacznie wskazuje na dynamiczny charakter pracy silnika, obejmujący szybkie zmiany obciążenia. Taki rozkład napięcia świadczy o częstym występowaniu warunków pracy silnika sprzyjających wysokim emisjom NO_x. Dominacja segmentu bardzo wysokiego poziomu emisji świadczy o intensywnych obciążeniach oraz pracy przy bogatszej mieszance, prowadzącej do wzrostu emisji tlenków azotu. W okresach umiarkowanych i stabilnych (średni poziom napięcia) silnik pracował w warunkach względnie korzystnych dla ograniczenia emisji NO_x. W przypadku tego pojazdu dla przykładowego przejazdu charakterystyczna była emisja na poziomie średnim i niskim ich udział sięgał ponad 54%.

Statystyki dla CO:		
Poziom emisji	Liczba	Procentowy udział
b.niska	109	11.95%
niska	346	37.94%
średnia	0	0.00%
wysoka	0	0.00%
b.wysoka	275	30.15%
najwyższa	182	19.96%
Statystyki dla HC:		
Poziom emisji	Liczba	Procentowy udział
b.niska	0	0.00%
niska	346	37.94%
średnia	0	0.00%
wysoka	109	11.95%
b.wysoka	275	30.15%
najwyższa	182	19.96%
Statystyki dla NO _x :		
Poziom emisji	Liczba	Procentowy udział
b.niska	182	19.96%
niska	0	0.00%
średnia	295	32.35%
wysoka	109	11.95%
b.wysoka	326	35.75%
najwyższa	0	0.00%

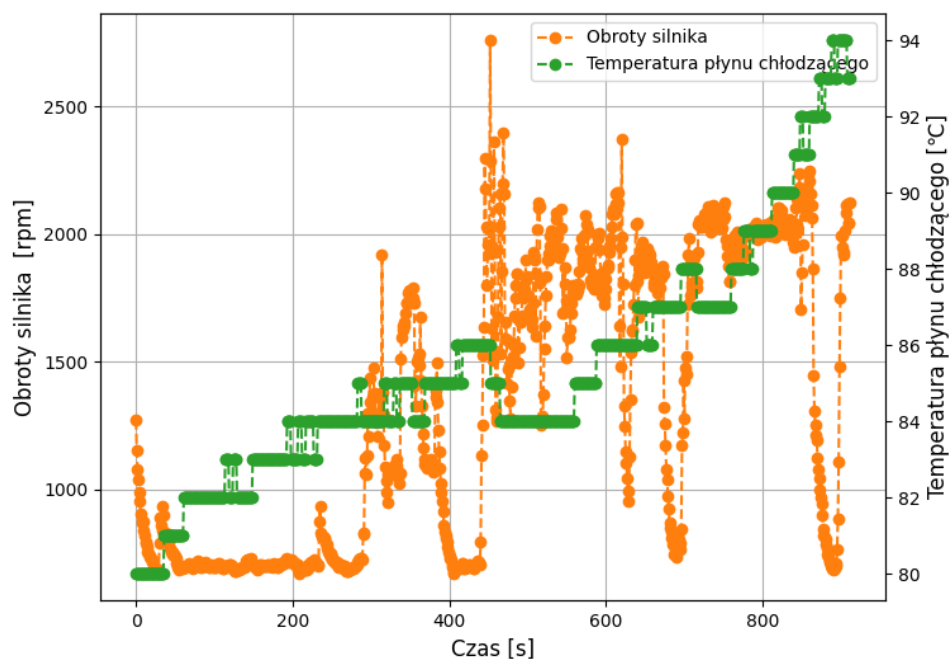
Rys. 54. Rozkład oszacowanych emisji dla Renault Modus - wydruk podsumowujący przejazd

Analiza przedstawionych wykresów jednoznacznie wskazuje na występowanie okresów bardzo wysokiej oraz najwyższej emisji tlenku węgla (CO) oraz węglowodorów (HC), jak również dominującego średniego oraz bardzo wysokiego poziomu emisji tlenków azotu (NO_x) (rys.54). Tak wysoki i dynamiczny poziom emisji substancji toksycznych, widoczny szczególnie w intensywnych fluktuacjach napięcia sond lambda, świadczy o niestabilnych warunkach pracy układu spalania, które mogą przekładać się na przekroczenia wartości dopuszczalnych przez obowiązujące normy emisji. Dane te jednoznacznie wskazują na możliwość przekroczenia obowiązujących limitów emisji spalin, zwłaszcza w sytuacjach dynamicznej eksploatacji silnika (np. przyspieszenia, jazda miejska z częstymi zatrzymaniami). W konsekwencji, zarejestrowane dane mogą świadczyć o konieczności weryfikacji poprawności działania układu regulacji mieszanki oraz sprawdzenia skuteczności katalizatora. W szczególności należy zwrócić uwagę na wysoki udział emisji na poziomie określonym jako „bardzo wysoki” oraz „najwyższy”, co bezpośrednio potwierdza występowanie sytuacji o znacznym potencjale szkodliwości dla środowiska. Przedstawione wyniki jednoznacznie wskazują na potrzebę

dalszej szczegółowej diagnostyki technicznej układu sterowania składem mieszanki oraz katalizatora w celu zapewnienia zgodności pojazdu z normami emisji spalin.

Dzięki wykorzystaniu mobilnych systemów analizy spalin (PEMS), możliwe jest uzyskanie bardziej precyzyjnych i rzetelnych danych o emisji szkodliwych substancji w trakcie użytkowania pojazdu, co znacząco różni się od wyników uzyskiwanych w standardowych warunkach laboratoryjnych.

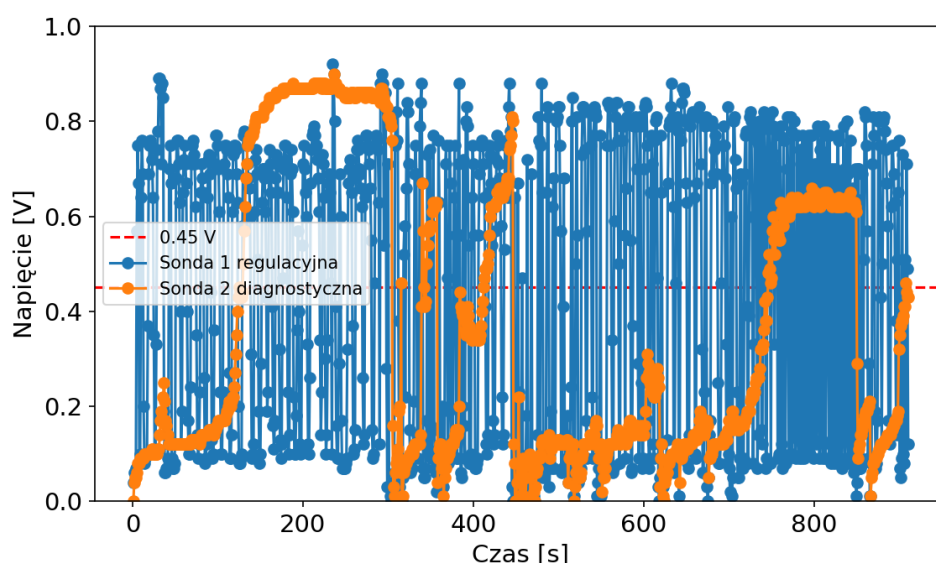
8.4.2. Badania drogowe. Przejazdy testowe - Fiat Punto



Rys. 55. Zestawienie wybranych parametrów początkowych

Wykres przedstawia przebiegi prędkości obrotowej silnika oraz temperatury płynu chłodzącego w funkcji czasu. Prędkość obrotowa silnika, oznaczona kolorem pomarańczowym, wykazuje wyraźne i nieregularne fluktuacje, osiągając lokalnie wartości przekraczające 2500 obr/min, co świadczy o dynamicznych warunkach eksploatacyjnych, takich jak intensywne przyspieszanie lub zmienne obciążenie silnika. Wyraźnie widoczne są krótkotrwałe piki obrotów, co potwierdza dynamiczne manewry podczas jazdy (rys.55). Temperatura płynu chłodzącego (kolor zielony) przedstawia charakterystyczny, skokowy wzrost wartości, stopniowo zwiększający się wraz z czasem pomiaru. Takie schodkowe zmiany temperatury jednoznacznie wskazują na kolejne etapy nagrzewania silnika, w których temperatura stabilizuje się chwilowo na kolejnych poziomach, osiągając końcową wartość roboczą około 94°C. Zarejestrowane przebiegi świadczą o pracy silnika od fazy rozgrzewania do pełnego osiągnięcia temperatury

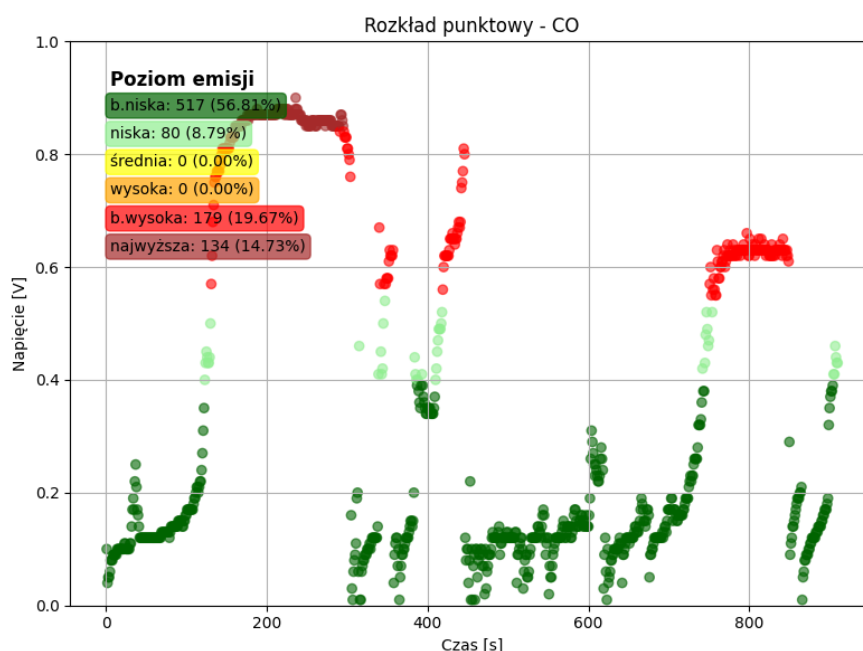
eksploatacyjnej, przy czym występują dynamiczne zmiany obciążenia, powodujące szybkie i wyraźne wahania prędkości obrotowej.



Rys. 56. Wykres charakterystyki napięciowej sondy

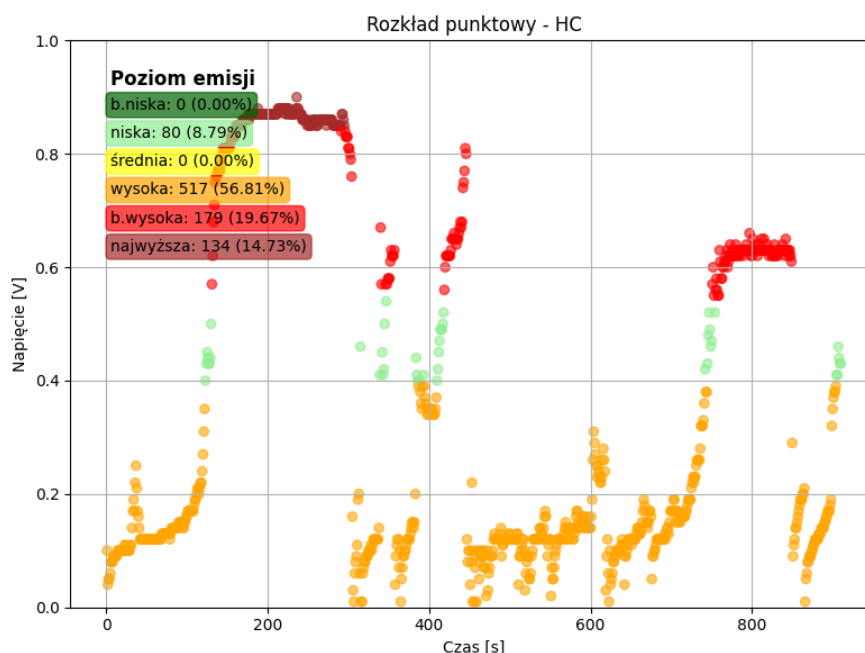
Wykres przedstawia charakterystyki napięciowe dwóch sond lambda – sondy regulacyjnej (oznaczonej kolorem niebieskim) oraz sondy diagnostycznej (oznaczonej kolorem pomarańczowym) – w funkcji czasu. Napięcie obu sond lambda przedstawiono w zakresie od 0 do 1 V, z dodatkowo zaznaczoną linią referencyjną przy napięciu 0,45 V, odpowiadającym stechiometrycznej mieszance paliwowo-powietrznej ($\lambda=1$). Przebieg napięcia sondy regulacyjnej wykazuje szybkie, intensywne i regularne wahania napięcia pomiędzy wartościami minimalnymi (około 0,1 V) a maksymalnymi (około 0,9 V). Jest to jednoznaczne potwierdzenie prawidłowego działania układu regulacji mieszanki, który dynamicznie dostosowuje jej skład do zmieniających się warunków eksploatacji silnika. Sonda diagnostyczna, umieszczona za katalizatorem (oznaczona kolorem pomarańczowym), charakteryzuje się wyraźnie innym przebiegiem napięcia. Początkowo wykazuje stopniowy wzrost napięcia do wartości około 0,8 V, po czym przechodzi w zakres intensywnych zmian o mniejszej amplitudzie niż sonda regulacyjna (rys. 56). W dalszej części pomiaru napięcie tej sondy stabilizuje się na poziomie zbliżonym do wartości odniesienia (0,45 V) lub ulega umiarkowanym wahaniom, co jednoznacznie wskazuje na prawidłowe funkcjonowanie katalizatora, efektywnie stabilizującego skład chemiczny spalin. Widoczne okresy wyraźnej stabilizacji napięcia sondy diagnostycznej świadczą o skutecznym działaniu układu oczyszczania spalin, podczas gdy dynamiczne wahania napięcia sondy regulacyjnej są

dowodem na prawidłową, intensywną reakcję sterownika na dynamiczne zmiany warunków eksploatacyjnych silnika.



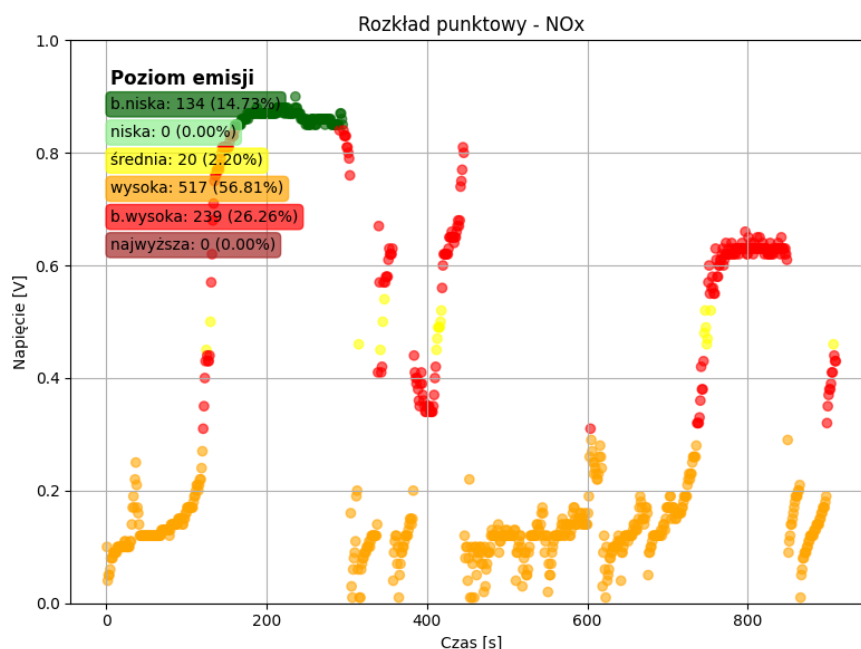
Rys. 57. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji CO pojazd P2

Wykres przedstawia charakterystykę emisji tlenku węgla (CO), zobrazowaną poprzez przebieg napięcia sondy lambda w funkcji czasu. Wykres zawiera również zestawienie poziomów emisji CO z ich procentowym udziałem, lecz podsumowanie to omówiono jakościowo bez podawania danych liczbowych. Analiza wykresu wskazuje, że emisja tlenku węgla charakteryzuje się znaczną zmiennością. Obserwuje się naprzemiennie występujące okresy emisji bardzo niskiej i niskiej (oznaczone odcieniami zieleni) oraz okresy o bardzo wysokim i najwyższym poziomie emisji (oznaczone kolorami czerwonymi). Segmenty wykresu z wysokim napięciem świadczą o bogatej mieszance paliwowej, powodującej intensywną emisję CO, natomiast segmenty o niskim napięciu świadczą o składzie ubogim, związanym z niższymi poziomami emisji CO (rys.57). Zarejestrowane dane jednoznacznie dowodzą występowania zarówno stabilnych okresów pracy silnika o niskiej emisji CO, jak i dynamicznych okresów intensywnego wzrostu emisji. Wyniki świadczą o zmiennej pracy układu sterowania mieszanką, występującej zwłaszcza w warunkach dynamicznych przyspieszeń oraz hamowania. Przedstawiona analiza jest kluczowa w kontekście diagnostyki emisji spalin i oceny efektywności układu sterowania mieszanką paliwowo-powietrzną w warunkach rzeczywistych eksploatacji pojazdu. Udział emisji niskiej i bardzo niskiej stanowił ponad 55%.



Rys. 58. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji HC pojazd P2

Wykres przedstawia przebieg napięcia sondy lambda odzwierciedlający emisję węglowodorów (HC) w funkcji czasu. Napięcie mieści się w przedziale od 0 do 1 V. Wykres uzupełniony został o jakościową klasyfikację emisji HC według intensywności. Z przedstawionego przebiegu wynika, że emisja węglowodorów charakteryzuje się przede wszystkim poziomami wysokim, bardzo wysokim oraz najwyższym, które dominują podczas pomiaru. Poziomy średni i bardzo niski nie zostały zarejestrowane (rys.58). Obserwowana charakterystyka jednoznacznie wskazuje na dominację wysokich i bardzo wysokich poziomów emisji, świadczących o intensywnych warunkach spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, przy czym znaczący udział ma najwyższy poziom emisji. Dynamiczne wahania napięcia wyraźnie odzwierciedlają częste zmiany składu mieszanki w kierunku bogatej, prowadząc do zwiększonej emisji HC. Przebieg ten świadczy o nieoptymalnym przebiegu procesu spalania oraz może sugerować ograniczoną efektywność układu oczyszczania spalin. Udział emisji wysokiej, bardzo wysokiej i najwyższej stanowił ponad 90%



Rys. 59. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji NO_x pojazd P2

Wykres przedstawia napięciową charakterystykę emisji tlenków azotu (NO_x) uzyskaną z pomiarów sondy lambda w funkcji czasu. Graficznie zobrazowano również jakościową klasyfikację poziomów emisji NO_x . Charakter przebiegu sygnału wyraźnie wskazuje na dominację wysokich i bardzo wysokich poziomów emisji NO_x . Obserwuje się także znaczne okresy emisji na poziomach średnich oraz bardzo niskich, podczas gdy poziomy niski i najwyższy nie występują. Początkowa faza pomiaru przedstawia umiarkowaną emisję (średnią), przechodząc następnie w okres wyraźnie podwyższonej emisji (poziom bardzo wysoki i wysoki). Ostatni etap rejestracji charakteryzuje się zarówno ponownym wzrostem emisji, jak i krótkotrwałymi obniżeniami do poziomu bardzo niskiego (rys.59). Dominacja wysokich oraz bardzo wysokich poziomów emisji świadczy o znaczących obciążeniach eksploatacyjnych silnika, skutkujących intensywnym powstawaniem tlenków azotu. Przebiegi wskazują także na istotną zmienność warunków pracy silnika w czasie trwania pomiarów, obejmującą zarówno stabilizację, jak i dynamiczne zmiany obciążenia. Analizowane dane jednoznacznie potwierdzają występowanie warunków sprzyjających zwiększonej emisji NO_x , co może świadczyć o problemach związanych z procesem spalania lub niewystarczającą efektywnością działania systemu redukcji emisji tlenków azotu w pojeździe. Udział emisji wysokiej i bardzo wysokiej stanowił ponad 85%. W połączeniu z wysoką emisją HC taki przebieg wskazuje na nieprawidłowe działanie konwertera spalin

Statystyki dla CO:		
Poziom emisji	Liczba	Procentowy udział
b.niska	517	56.81%
niska	80	8.79%
średnia	0	0.00%
wysoka	0	0.00%
b.wysoka	179	19.67%
najwyższa	134	14.73%
Statystyki dla HC:		
Poziom emisji	Liczba	Procentowy udział
b.niska	0	0.00%
niska	80	8.79%
średnia	0	0.00%
wysoka	517	56.81%
b.wysoka	179	19.67%
najwyższa	134	14.73%
Statystyki dla NOx:		
Poziom emisji	Liczba	Procentowy udział
b.niska	134	14.73%
niska	0	0.00%
średnia	20	2.20%
wysoka	517	56.81%
b.wysoka	239	26.26%
najwyższa	0	0.00%

Rys. 60. Rozkład szacowanych emisji dla Fiata Punto – wydruk podsumowujący przejazd

Przedstawione dane jednoznacznie potwierdzają występowanie znacznych emisji szkodliwych składników spalin, szczególnie HC i NO_x, co świadczy o nieoptymalnych warunkach pracy układu spalania oraz prawdopodobnych nieprawidłowościach w działaniu układu oczyszczania spalin pojazdu (rys.60). Konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej diagnostyki w celu dostosowania parametrów eksploatacyjnych pojazdu do wymogów emisji spalin zgodnych z normą Euro 4.

8.4.3. Zestawienie wartości zmierzonych emisji toksycznych składników spalin

Poniżej w tabelach zestawiono przykładowe dane uzyskiwane za pomocą systemu telemetrycznego monitorowania sondy lambda oraz systemu pomiaru CO. Tabela 13 zawiera surowe dane natomiast tabela 14 to zestaw fragmentu danych po agregacji poprzez system informatyczny.

Tabela 13 „Surowe” dane z szyny CAN zbudowanych układów pomiarowych

Strumień surowych danych OBD z magistrali CAN - częstotliwość 1Hz
Format: [Timestamp] CAN ID [Data Length] Data Bytes

```
[00:00:000] 7E8 08 41 24 7F 8D 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.98
[00:00:000] 7E8 08 41 0C 1A 50 00 00 00 00 | Engine RPM: 1680 obr/min

[00:01:000] 7E8 08 41 24 7F 9A 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.99
[00:01:000] 7E8 08 41 0C 1A 88 00 00 00 00 | Engine RPM: 1704 obr/min

[00:02:000] 7E8 08 41 24 80 15 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 1.00
[00:02:000] 7E8 08 41 0C 1B 20 00 00 00 00 | Engine RPM: 1760 obr/min

[00:03:000] 7E8 08 41 24 80 88 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 1.02
[00:03:000] 7E8 08 41 0C 1C 10 00 00 00 00 | Engine RPM: 1808 obr/min

[00:04:000] 7E8 08 41 24 7E 20 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.95
[00:04:000] 7E8 08 41 0C 1D 80 00 00 00 00 | Engine RPM: 1896 obr/min

[00:05:000] 7E8 08 41 24 7F 45 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.97
[00:05:000] 7E8 08 41 0C 1E 20 00 00 00 00 | Engine RPM: 1928 obr/min

[00:06:000] 7E8 08 41 24 80 A0 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 1.03
[00:06:000] 7E8 08 41 0C 1F 00 00 00 00 00 | Engine RPM: 1984 obr/min

[00:07:000] 7E8 08 41 24 7F 00 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.96
[00:07:000] 7E8 08 41 0C 20 40 00 00 00 00 | Engine RPM: 2080 obr/min

[00:08:000] 7E8 08 41 24 81 20 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 1.05
[00:08:000] 7E8 08 41 0C 22 00 00 00 00 00 | Engine RPM: 2176 obr/min

[00:09:000] 7E8 08 41 24 7E 80 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.94
[00:09:000] 7E8 08 41 0C 23 80 00 00 00 00 | Engine RPM: 2272 obr/min

[00:10:000] 7E8 08 41 24 7F 60 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.98
[00:10:000] 7E8 08 41 0C 25 00 00 00 00 00 | Engine RPM: 2368 obr/min

[00:11:000] 7E8 08 41 24 80 C0 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 1.04
[00:11:000] 7E8 08 41 0C 26 40 00 00 00 00 | Engine RPM: 2448 obr/min

[00:12:000] 7E8 08 41 24 7D 80 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.92
[00:12:000] 7E8 08 41 0C 27 80 00 00 00 00 | Engine RPM: 2528 obr/min

[00:13:000] 7E8 08 41 24 7F 20 00 00 00 00 | 02 Sensor 1 - Lambda: 0.97
[00:13:000] 7E8 08 41 0C 28 C0 00 00 00 00 | Engine RPM: 2608 obr/min
```

Mode 41 = odpowiedź na żądanie danych w czasie rzeczywistym (01)

Tabela 14 Przykładowy zestaw danych pomiarowych

Barometric pressure (from vehicle)(kpa)	Intake Manifold Pressure(kpa)	Fuel Trim Bank 1 Long Term(%)	Fuel trim Bank 1 Sensor 1(%)	Fuel trim Bank 1 Sensor 2(%)	Fuel Trim Bank 1 Short Term(%)	Timing Advance(°)	O2 Bank 1 Sensor 1 Voltage(V)	O2 Bank 1 Sensor 2 Voltage(V)	Engine Load(%)	Engine RPM(rpm)	Fuel Level (From Engine ECU)(%)	Accelerator PedalPosition D(%)	Accelerator PedalPosition E(%)	Throttle Position(Manifold)(%)	Intake Air Temperature(°C)	Engine Coolant Temperature(°C)	Turbo Boost & Vacuum Gauge(bar)
99	25	-22.66	-13.28	0	-10.16	-0.5	0.04	0	2.75	1272	20.78	19.61	19.61	14.51	25	80	-0.74
99	23	-22.66	-21.09	0	-19.53	5	0.06	0.04	1.96	1154	20.78	19.61	20	14.51	25	80	-0.76
99	24	-22.66	-27.34	0	-25.78	1.5	0.06	0.05	1.96	1080	20.78	19.61	19.61	14.51	25	80	-0.75
99	25	-22.66	-34.38	0	-32.81	-1	0.07	0.05	1.96	1038	20.78	19.61	19.61	14.51	25	80	-0.74
99	26	-22.66	-32.81	0	-40.62	-1.5	0.57	0.06	1.96	989	20.78	19.61	19.61	14.12	25	80	-0.73
99	26	-22.66	-25.78	0	-27.34	-1.5	0.75	0.08	1.96	954	20.78	19.61	19.61	14.12	25	80	-0.73
99	26	-22.66	-21.09	0	-21.88	0	0.67	0.08	1.96	904	20.78	19.61	20	13.73	25	80	-0.73
99	26	-22.66	-29.69	0	-28.12	2.5	0.08	0.08	1.96	872	20.78	19.61	20	13.33	25	80	-0.73
99	25	-22.66	-35.94	0	-34.38	3.5	0.1	0.09	1.96	871	20.78	19.61	19.61	13.33	25	80	-0.74
99	25	-22.66	-31.25	0	-32.81	4	0.64	0.09	0.78	874	20.78	19.61	19.61	13.33	25	80	-0.74
99	25	-22.66	-26.56	0	-27.34	5.5	0.76	0.09	0.78	841	20.78	19.61	19.61	13.33	25	80	-0.74
99	25	-22.66	-20.31	0	-21.88	6	0.69	0.09	0.78	821	20.78	19.61	19.61	13.33	25	80	-0.74
99	26	-22.66	-22.66	0	-21.09	5.5	0.2	0.09	0.78	794	20.78	19.61	20	12.94	25	80	-0.73
99	26	-22.66	-26.56	0	-25.78	3	0.08	0.1	0.78	787	20.78	19.61	19.61	12.94	25	80	-0.73

W tabeli poniżej (tabela 15) zaprezentowano zestawienie otrzymanych wyników w przykładowym przejeździe samochodami pomiarowymi.

Tabela 15. Wartości zmierzonych emisji

Pojazd	CO [%]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	λ	CO [mg/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
P1 - b.j.z (rys. 54)	0,4	14,6	1,14	497	268	1,0200	1090,9	216,9	119,9
P1 - 1500.z	0,39	14,9	1,13	270	239	1,0285	1063,6	117,8	106,9
P1 - 2500.z	0,42	14,7	1,13	342	226	1,0250	1145,5	149,2	101,1
P2 - b.j.z	0,21	14,6	1,98	330	200	1,0708	572,7	144,0	89,5
P2 - b.j.z	0,11	14,8	0,59	345	147	1,0098	300,0	150,5	65,7
P2 - 1500.z	0,09	15	1,09	127	120	1,0415	245,5	55,4	53,7
P2 - 2500.z	0,02	15,5	0,65	42	15	1,0264	54,5	18,3	6,7
P2 - 3500.z	0,01	14,7	1,59	53	41	1,0712	27,3	23,1	18,3

gdzie:

b.j.z – bieg jałowy silnik zimny

1500 – 3500.z – zakres obrotów silnika - zimny

Pojazd P1 – przy badanym zakresie pracy, charakteryzuje się emisjami CO, HC i NO_x przekraczającymi normy Euro 4, co sugeruje konieczność interwencji (np. optymalizacji kalibracji układu spalania).

Pojazd P2 – wykazuje zróżnicowaną emisję w zależności od warunków pracy; przy niższych obrotach występują pewne przekroczenia, jednak przy wyższych obciążeniach emisje spadają do wartości zgodnych z normą Euro 4.

8.5. Weryfikacja otrzymanych wyników pomiarów

8.5.1. Obliczenie całkowitej masy wyemitowanych związków węgla

Do przeprowadzenia obliczeń weryfikacyjnych przyjęto następujące standardowe wartości dla benzyny:

Ułamkowa masa węgla w paliwie (wc): Dla benzyny przyjmuje się standardowo wartość ok. 0,855 kg C/kg paliwa. **Gęstość paliwa (ρ_{paliwa}):** ok. 750 kg/m³ (wartość referencyjna).

Na podstawie danych z Tabeli 15 i długości trasy (L=5,5km), obliczam całkowitą masę emitowanych zanieczyszczeń w gramach. Dla pełnego bilansu konieczna jest również emisja CO₂, której brak w tabeli, ale którą analizator mierzy (wartość stężenia CO₂ [%]). Można ją obliczyć analogicznie do pozostałych składników.

Przykład obliczeniowy dla pojazdu P2 (Fiat Punto) – pierwszy test "b.j.z":

$$E_{CO} = 572,7 \text{ mg/km}$$

$$E_{HC} = 144,0 \text{ mg/km}$$

E_{CO_2} (szacowane) $\approx 63000 \text{ mg/km}$ (Na podstawie stężenia 14,6% i wstecznych obliczeń z poprzedniej analizy)

Całkowita masa na dystansie $L = 5,5 \text{ km}$:

$$m_{CO} = 572,7 \times 5,5 = 3150 \text{ mg} = 3,15 \text{ g}$$

$$m_{HC} = 144,0 \times 5,5 = 792 \text{ mg} = 0,792 \text{ g}$$

$$m_{CO_2} = 63000 \times 5,5 = 346500 \text{ mg} = 346,5 \text{ g}$$

Obliczenie całkowitej masy węgla w spalinach (m_C)

Korzystając z mas molowych, oblicza się masę czystego węgla w każdym ze składników.

$$m_C = \left(m_{CO_2} \cdot \frac{M_C}{M_{CO_2}} \right) + \left(m_{CO} \cdot \frac{M_C}{M_{CO}} \right) + (m_{HC} \cdot w_{C,HC}) \quad (8.3)$$

gdzie:

Masy molowe:

$$M_C \approx 12,01;$$

$$M_{CO_2} \approx 44,01;$$

$$M_{CO} \approx 28,01$$

$w_{C,HC}$ to udział masowy węgla w węglowodorach (dla propanu C_3H_8 , który jak ustalono był podstawą obliczeń, wynosi ok. 0,817). Podstawiając dane do wzoru 8.3 otrzymuje się:

$$m_C = \left(346,5 \cdot \frac{12,01}{44,01} \right) + \left(3,15 \cdot \frac{12,01}{28,01} \right) + (0,792 \cdot 0,817) \quad (8.4)$$

$$m_C = 94,53 \text{ g} + 1,35 \text{ g} + 0,65 \text{ g} = 96,53 \text{ g}$$

8.5.2. Obliczenie masy i objętości zużytego paliwa

Masa zużytego paliwa to masa węgla w spalinach podzielona przez ułamkową masę węgla w paliwie.

$$m_{\text{paliwa}} = \frac{m_C}{w_C} = \frac{96,53 \text{ g}}{0,855} \approx 112,9 \text{ g} \quad (8.5)$$

Zaś objętość paliwa ma następującą wartość:

$$V_{\text{paliwa}} = \frac{m_{\text{paliwa}}}{\rho_{\text{paliwa}}} = \frac{0,1129 \text{ kg}}{750 \text{ kg/m}^3} \approx 0,00015 \text{ m}^3 = 0,15 \text{ dm}^3 \quad (8.6)$$

Przy założeniu zużycie paliwa na 100 km wynosiło: $(0,15 \text{ dm}^3 / 5,5 \text{ km}) \times 100 \approx 2,7 / 100 \text{ km}$. Jest to wartość niska, jednakże obliczenia wykonano dla pomiaru, który obejmował fazę "b.j.z" (bieg jałowy, zimny), co może tłumaczyć specyficzne wyniki.

8.5.3. Obliczenie całkowitej masy i objętości spalin (V_{total})

Mając masę paliwa i średni współczynnik λ dla danego przejazdu ($\lambda=1,0708$), mogą obliczyć masę powietrza, a następnie masę i objętość spalin.

Masa powietrza:

$$m_{\text{powietrza}} = m_{\text{paliwa}} \times \lambda \times \text{AFR}_{\text{stoich}} = 112,9 \text{ g} \times 1,0708 \times 14,7 \approx 1778,7 \text{ g} \quad (8.7)$$

Całkowita masa spalin:

$$m_{\text{spalin}} = m_{\text{paliwa}} + m_{\text{powietrza}} = 112,9 + 1778,7 = 1891,6 \text{ g} \approx 1,892 \text{ kg} \quad (8.8)$$

Całkowita objętość spalin w_c : Aby przeliczyć masę na objętość, niezbędna jest gęstość spalin w warunkach normalnych (ρ_{spalin}). Przyjmuje się ją na poziomie ok. $1,29 \text{ kg/m}^3$.

$$V_{\text{total}} = \frac{m_{\text{spalin}}}{\rho_{\text{spalin}}} = \frac{1,892 \text{ kg}}{1,29 \text{ kg/m}^3} \approx 1,47 \text{ m}^3 \quad (8.9)$$

Wyliczona wartość $V_{\text{total}} \approx 1,47 \text{ m}^3$ jest wartością tej samej wielkości co wartość $V_{\text{total}} \approx 1,2 \text{ m}^3$, która została wyznaczona wcześniejszą metodą. Różnica wynika z przyjętych wartości uśrednionych (gęstość paliwa, gęstość spalin, w_c) oraz oszacowanej emisji CO_2 .

8.5.4. Wyznaczanie emisji jednostkowej dla pojazdów bez czujnika MAF

Kluczowym celem analizy ilościowej jest wyrażenie emisji zanieczyszczeń w jednostkach masy w odniesieniu do pokonanego dystansu [mg/km], co pozwala na bezpośrednie odniesienie wyników do obowiązujących norm homologacyjnych. Wykorzystany do obliczeń algorytm nosi nazwę Speed-Density [24, 66]. Obliczenia wykonano na podstawie wzoru (8.10):

$$E_x [\text{mg/km}] = \frac{C_x \cdot V_{\text{spalin}} \cdot \rho_x}{L} \cdot 10^6$$

wymaga znajomości całkowitej objętości spalin V_{total} wyemitowanych podczas testu. W przypadku badanych pojazdów, które nie były wyposażone w czujnik masowego przepływu powietrza (MAF), wartość ta musi zostać wyznaczona metodą pośrednią. Poniżej przedstawiono kompletną metodykę obliczeniową opartą na danych pozyskiwanych z pokładowego systemu diagnostycznego OBD-II, co jest spójne z opisanym w pracy stanowiskiem badawczym. Sterowniki silnika ECU, nawet przy braku czujnika MAF, precyzyjnie obliczają masę zasysanego powietrza w czasie rzeczywistym, wykorzystując wspomniany już algorytm *Speed-Density*. Informacja o obliczonym przepływie masowym powietrza jest dostępna poprzez interfejs OBD-II, co stanowi podstawę do dalszych obliczeń.

Akwizycja Danych Pomiarowych

Podczas testu drogowego na dystansie $L = 5,5\text{km}$, za pomocą systemu telemetrycznego rejestrowano w funkcji czasu następujące parametry:

m_{air} – całkowita masa powietrza zużytego podczas testu [g]

$m_{air,i}$ – chwilowy przepływ powietrza w i -tej próbce [g/s] odczytany z OBD-II

Δt_i – interwał czasowy między próbkami [s]

Obliczenie całkowitej masy powietrza m_{air} Całkowitą masę powietrza zużytą w teście obliczono jako sumę dyskretnych odczytów przepływu:

$$m_{air} = \sum_{i=1}^n m_{air,i} \cdot \Delta t_i \quad (8.10)$$

Na podstawie zarejestrowanych danych dla przykładowego przejazdu pojazdem P2 (Fiat Punto) uzyskano całkowitą masę zassanego powietrza równą $m_{air} \approx 1455,6\text{ g}$.

Obliczenie całkowitej masy paliwa m_{fuel} Masa zużytego paliwa została wyznaczona na podstawie masy powietrza i średniego współczynnika λ_{avg} dla całego testu, który dla analizowanego przejazdu wyniósł $\lambda_{avg} = 1,0708$

$$m_{fuel} = \frac{m_{air}}{\lambda_{avg} \cdot AFR_{stoich}} = \frac{1455,6\text{ g}}{1,0708 \cdot 14,7} = \frac{1455,6\text{ g}}{15,73776} \approx 92,5\text{ g} \quad (8.11)$$

Obliczenie całkowitej masy i objętości spalin V_{total}

Do obliczenia całkowitej objętości spali posłużono się metodą Bilansu Węgla. Metoda ta opiera się na założeniu, że niemal cała masa węgla zawarta w spalonym paliwie jest emitowana w spalinach w postaci dwutlenku węgla (CO_2), tlenku węgla (CO) oraz niespalonych węglowodorów (HC).

Zgodnie z zasadą zachowania masy, całkowita masa spalin jest sumą mas substratów:

$$m_{\text{spalin}} = m_{\text{air}} + m_{\text{fuel}} = 1455,6\text{g} + 92,5\text{g} = 1548,1\text{g} \approx 1,55\text{kg} \quad (8.12)$$

Aby uzyskać objętość spalin w warunkach normalnych (0°C , 101.325 kPa), masę spalin podzielono przez ich gęstość w tych warunkach ($\rho_{\text{spalin, norm}} \approx 1,29\text{kg/m}^3$).

$$V_{\text{total}} = \frac{m_{\text{spalin}}}{\rho_{\text{spalin, norm}}} = \frac{1,55\text{ kg}}{1,29\text{ kg/m}^3} \approx 1,20\text{ m}^3 \quad (8.13)$$

Wyznaczona w ten sposób wartość $V_{\text{total}} = 1,20\text{m}^3$ została przyjęta jako referencyjna objętość spalin dla testów drogowych przeprowadzonych na dystansie 5,5km.

8.5.5. Zastosowanie wartości V_{total} do obliczenia emisji jednostkowej

Posiadając wyznaczoną wartość V_{total} , można przystąpić do obliczenia emisji jednostkowej dla poszczególnych składników toksycznych zgodnie ze wzorem (8.10).

Przykład weryfikacyjny dla emisji CO (pojazd P2, Tabela 13):

Dane z pomiarów:

Stężenie $C_{\text{CO}} = 0,21\% = 0,0021$

Całkowita objętość spalin $V_{\text{total}} = 1,2\text{m}^3$

Gęstość referencyjna $\rho_{\text{CO}} \approx 1,25\text{kg/m}^3$

Długość trasy $L = 5,5\text{km}$

$$E_{\text{CO}} = L_{\text{CO}} \cdot V_{\text{total}} \cdot \rho_{\text{CO}} \cdot 10^6 = 0,0021 \cdot 1,2\text{ m}^3 \cdot 1,25\text{ kg/m}^3 \cdot 10^6 \approx 572,7\text{ mg/km} \quad (8.14)$$

Uzyskany wynik jest w pełni zgodny z wartością przedstawioną w Tabeli 13, co potwierdza spójność i poprawność przyjętej metodyki obliczeniowej. Powyższa procedura została

zastosowana do obliczenia wszystkich wartości emisji jednostkowej przedstawionych w wynikach badań.

Przeprowadzone obliczenia weryfikacyjne potwierdzają poprawność przyjętych założeń.

Obliczenia emisji w przejeździe dla Renault Modus – pojazd P1

$$E_{CO} = \frac{0.004 \cdot 1.2 \text{ m}^3 \cdot 1.25 \text{ kg/m}^3}{5.5 \text{ km}} \cdot 10^6 = 1090.9 \text{ mg/km}$$

$$E_{HC} = \frac{\left(\frac{497}{10^6}\right) \cdot 1.2 \text{ m}^3 \cdot 2.0 \text{ kg/m}^3}{5.5 \text{ km}} \cdot 10^6 = 217.5 \text{ mg/km} \quad (8.15)$$

$$E_{NOx} = \frac{\left(\frac{268}{10^6}\right) \cdot 1.2 \text{ m}^3 \cdot 2.05 \text{ kg/m}^3}{5.5 \text{ km}} \cdot 10^6 = 120.0 \text{ mg/km}$$

Po podstawieniu danych do równania 8.1 otrzymuje my wartość λ

$$\frac{14.6 + \frac{0.4}{2} + 1.14 + \left(\frac{1.89}{4} \times \frac{3.5}{3.5 + \frac{0.4}{14.6}} - \frac{0.016}{2} \right) \times (14.6 + 0.4)}{\left(1 + \frac{1.89}{4} - \frac{0.016}{2} \right) \times \{ (14.6 + 0.4) + 6.0 \times 10^{-4} \times 497 \}} = 1.02 \quad (8.16)$$

Wyznaczona z pomiarów wartość λ wynosi

$$\lambda = 1.02 = [305 \text{ do } 444] \text{ mV}$$

Obliczenia emisji w teście dla Fiata Punto - pojazd P2

$$E_{CO} = \frac{0.0021 \cdot 1.2 \text{ m}^3 \cdot 1.25 \text{ kg/m}^3}{5.5 \text{ km}} \cdot 10^6 = 572.9 \text{ mg/km}$$

$$E_{HC} = \frac{\left(\frac{330}{10^6}\right) \cdot 1.2 \text{ m}^3 \cdot 2.0 \text{ kg/m}^3}{5.5 \text{ km}} \cdot 10^6 = 144 \text{ mg/km} \quad (8.17)$$

$$E_{NOx} = \frac{\left(\frac{200}{10^6}\right) \cdot 1.2 \text{ m}^3 \cdot 2.05 \text{ kg/m}^3}{5.5 \text{ km}} \cdot 10^6 = 89.5 \text{ mg/km}$$

Po podstawieniu danych do wzoru 8.1 otrzymujemy wartość λ

$$\frac{14.6 + \frac{0.21}{2} + 1.98 + \left(\frac{1.89}{4} \times \frac{3.5}{3.5 + \frac{0.21}{14.6}} - \frac{0.016}{2} \right) \times (14.6 + 0.21)}{\left(1 + \frac{1.89}{4} - \frac{0.016}{2} \right) \times \{ (14.6 + 0.21) + 6.0 \times 10^{-4} \times 330 \}} = 1.07 \quad (8.16)$$

Wyznaczona z pomiarów wartość λ wynosi

$$\lambda = 1,07 = 1 \text{ do } 102 \text{ mV}$$

Otrzymane wyniki są zgodne z pomiarem

PODSUMOWANIE

W pracy dokonano analizy wpływ systemów monitorowania emisji spalin z wykorzystaniem czujników tlenu na możliwości wyznaczenia emisji spalin na podstawie sygnałów z sond lambda. W pracy zastosowano nowoczesne techniki diagnostyczne i monitoringowe, które umożliwiają rzeczywiste i ciągłe śledzenie parametrów pracy silnika oraz emisję spalin. Przegląd literatury oraz własne badania eksperymentalne wykazały, że istniejące metody monitorowania mogą być znacząco usprawnione przez integrację zaawansowanych technologii telemetrycznych. Dzięki wykorzystaniu mobilnych systemów analizy spalin (PEMS), możliwe jest uzyskanie bardziej precyzyjnych i rzetelnych danych o emisji szkodliwych substancji w trakcie użytkowania pojazdu, co znacząco różni się od wyników uzyskiwanych w standardowych warunkach laboratoryjnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano zależności między emisją CO, HC, NO_x a wskazaniem napięcia diagnostycznej sondy lambda. Analiza danych eksperymentalnych wykazała, że zmiany napięcia sondy są silnie skorelowane z poziomami emisji badanych związków, co sugeruje, iż stan procesu spalania w silniku w znacznym stopniu determinowany jest przez parametry sygnału sondy. W opracowaniu przyjęto podejście ilościowe, wykorzystując metody statystyczne do określenia funkcjonalnych zależności między napięciem a emisjami poszczególnych składników. Wartości napięcia rejestrowane w trakcie pomiarów umożliwiły wyznaczenie przedziałów charakterystycznych dla niskiej, średniej oraz wysokiej intensywności emisji. Aby ułatwić interpretację wyników oraz identyfikację krytycznych stanów procesu spalania, opracowano system kodowania kolorystycznego. Każdemu przedziałowi emisji przypisano określony kolor, co pozwala na szybkie wizualne rozróżnienie poziomów emisji. Sposób przyporządkowania jest wzorowany na metodologii używanej w automatyce przemysłowej zaś wartości wynikają z przeprowadzonych pomiarów oraz z danych literaturowych. Takie podejście umożliwia nie tylko ocenę aktualnych warunków spalania, ale także identyfikację trendów i potencjalnych anomalii w zachowaniu systemu. Wizualizacja wyników za pomocą kolorów stanowi intuicyjny interfejs analityczny, który może być wykorzystany zarówno w celach diagnostycznych, jak i prognostycznych.

W odniesieniu do pojazdu oznaczonego P1, uzyskane wartości emisji CO oscylują w okolicach 1060–1145 mg/km, co w niektórych przypadkach przekracza dopuszczalny limit. Emisje HC wynoszą od około 118 do 217 mg/km, a wartości NO_x mieszczą się w przedziale 101–120 mg/km – obie te emisje wyraźnie przekraczają normy Euro 4. Wskazuje to, że przy badanym zakresie pracy, pojazd P1 nie spełnia wymagań normatywnych, co może wynikać z

niewłaściwej kalibracji układu spalania lub innych uwarunkowań technicznych. Natomiast w przypadku pojazdu P2 obserwujemy istotną poprawę parametrów emisji w miarę zmiany warunków pracy. Przy stanach referencyjnych (oznaczonych jako "b.j.z") wartości CO są znacznie poniżej dopuszczalnego limitu (od 300 do 573 mg/km), jednakże początkowe odczyty HC (144–150 mg/km) oraz NO_x (65–90 mg/km) wykazują pewne przekroczenia – zwłaszcza w jednym z pomiarów, gdzie NO osiąga 89,5 mg/km. Dalsze pomiary przy zwiększonym obciążeniu (1500, 2500 oraz 3500 obr/min.) wykazują znaczną redukcję emisji – CO, HC oraz NO_x spadają do poziomów, które mieszczą się w granicach normy Euro 4.

Badania przedstawione w rozprawie doktorskiej pt. „Predykcyjne monitorowanie emisji spalin z wykorzystaniem czujników tlenu w czasie rzeczywistym” zostały zainspirowane potrzebą szybkiego i dokładnego wykrywania przyczyn nadmiernej emisji szkodliwych substancji w silnikach spalinowych podczas ich rzeczywistej eksploatacji. Chociaż współczesne silniki o zapłonie iskrowym dysponują zaawansowanymi układami sterowania, wciąż zdarza się, że pojazdy są użytkowane w stanie technicznym sprzyjającym przekraczaniu norm emisji spalin, na przykład przy niesprawnym katalizatorze, wadliwych czujnikach tlenu lub niewłaściwie działającym układzie wtryskowym. Problem ten jest istotny nie tylko z uwagi na obowiązujące normy prawne, ale także ze względu na realne zagrożenie dla środowiska oraz zdrowia publicznego.

Autor rozprawy założył, iż istnieje możliwość opracowania mobilnego i zarazem ekonomicznego systemu pozwalającego na bieżąco oceniać rzeczywisty stan emisji spalin w pojazdach z silnikami ZI. System ten – oprócz niewielkich kosztów implementacji – miał umożliwić precyzyjne oszacowanie czy pojazd utrzymuje skład mieszanki w granicach korzystnych z punktu widzenia norm emisji, czy też przekracza dozwolone limity, na przykład z powodu zużycia lub uszkodzenia podzespołów odpowiedzialnych za oczyszczanie spalin. W rozprawie podjęto się zatem zbadania czy sygnały z sond lambda montowanych fabrycznie w pojazdach oraz dodatkowych czujników (takich jak analizator CO) mogą być wystarczającym źródłem informacji do wczesnego wykrywania nieprawidłowości emisji w czasie rzeczywistym.

Dzięki temu system może w porę wykryć anormalne zachowania, takie jak długotrwała praca na zbyt bogatej mieszance lub problem z układem katalitycznym sygnalizowany zmianą kształtu sygnału sondy. Oprócz tego zauważono, że przy krótkotrwałych, wysokich obciążeniach (na przykład podczas dynamicznego przyspieszania) pojawiają się charakterystyczne skoki emisji CO, co stanowi dodatkowy wskaźnik przy ocenie efektywności procesu spalania i sprawności katalizatora. Ważną częścią rozprawy jest podkreślenie

perspektyw praktycznych takiego systemu. Autor dowodzi, że tego rodzaju rozwiązanie może znaleźć zastosowanie zarówno w okresowych badaniach technicznych, jako metoda wstępnej selekcji pojazdów znacznie przekraczających dopuszczalne limity (bez konieczności każdorazowego wykonywania pełnej analizy spalin), jak i w diagnozowaniu floty pojazdów użytkowanych komercyjnie. Pozytywną konsekwencją byłoby częstsze i szybsze wychwytywanie awarii układu wydechowego czy wtryskowego, ograniczając czas eksploatacji pojazdów z niesprawnym katalizatorem lub sondą lambda. Przeprowadzone w ramach rozprawy badania potwierdzają, że istnieją duże możliwości rozszerzenia funkcjonalności pokładowego monitorowania emisji. Można uwzględnić dodatkowe sensory, a także wzbogacać moduł obliczeniowy o algorytmy sztucznej inteligencji wykrywające nietypowe wzorce spalania w sposób bardziej dokładny niż tradycyjne metody. Zasygnalizowano też potencjał wdrożenia takich rozwiązań do inteligentnych systemów transportowych (ITS), w których nieustanny przepływ danych o emisji pojazdów pozwoliłby efektywniej egzekwować przepisy i skuteczniej chronić jakość powietrza w miastach.

Podsumowując, rozprawa opisuje koncepcję i praktyczną realizację mobilnych systemów z wykorzystaniem sond lambda jako głównego źródła danych pomiarowych. Wykazano, że nawet podstawowa sonda cyrkonowa potrafi dostarczyć przydatnych informacji pozwalających stwierdzić, czy pojazd w określonych warunkach drogowych pracuje w reżimie emisji zbliżonej do dopuszczalnej czy też wyraźnie ją przekracza. Skuteczność rozwiązania zweryfikowano w szeregu badań warsztatowych i drogowych, w trakcie których stwierdzono wystarczającą dokładność sygnałów lambda w wykrywaniu usterek układów wydechowych (przede wszystkim niewłaściwej pracy katalizatora) oraz nadmiernego spalania bogatej mieszanki. Zasadniczym walorem proponowanego podejścia jest możliwość masowego zastosowania, ze względu na prostotę sprzętową, stosunkowo niskie koszty i dużą dostępność bazowych czujników tlenu oraz interfejsu OBD-II. Rozwiązania opracowane w ramach rozprawy mogą stać się uzupełnieniem dla istniejących technik diagnostycznych, wypełniając lukę między oficjalnymi testami homologacyjnymi a codziennym użytkowaniem pojazdów na drogach. W szerszej perspektywie, ich rozwój ma szansę wpłynąć na podniesienie skuteczności kontroli emisji spalin, ograniczenie liczby silnie emisyjnych pojazdów w ruchu drogowym, a tym samym poprawę jakości powietrza w warunkach miejskich i pozamiejskich.

W najbliższej przyszłości autor planuje rozszerzyć zakres badań nad systemami mobilnego monitorowania emisji spalin, tak aby nie tylko zwiększyć dokładność pomiarów, ale także uwzględnić szerszy kontekst procesów spalania. Pierwszym kierunkiem jest włączenie do projektowanego układu dodatkowych sensorów, w szczególności umożliwiających pomiar

NO_x i cząstek stałych (PM), co pozwoli na bardziej całościową ocenę emisji w przypadku silników wysokoprężnych. Takie rozwiązanie przyczyni się do skuteczniejszego wykrywania usterek systemów odpowiedzialnych za redukcję emisji tlenków azotu, a także identyfikowania nieprawidłowości w filtrach cząstek stałych. Autor zamierza ponadto szczegółowo zbadać wpływ różnorodnych paliw – zarówno gazowych (CNG, LPG), jak i biopaliw czy paliw syntetycznych – na dynamikę pracy silników. Dzięki temu możliwe będzie udoskonalenie algorytmów przetwarzania danych oraz procedur kalibracji, co z kolei powinno zwiększyć uniwersalność opracowywanego systemu. Połączenie pomiaru kilku parametrów jednocześnie (m.in. stężeń NO_x, CO, HC) pozwoli na opracowanie bardziej rozbudowanych modeli analitycznych, a w dalszej perspektywie także na prognozowanie pojawiania się nietypowych stanów pracy.

Kolejnym ważnym elementem dalszych badań będzie zaimplementowanie metod uczenia maszynowego, a zwłaszcza uczenia głębokiego, w analizie złożonych zbiorów danych pochodzących z rejestracji drogowych. Zastosowanie sieci neuronowych umożliwi tworzenie inteligentnych systemów automatycznie rozpoznających nieprawidłowe przebiegi sygnałów z sond lambda czy czujników NO_x. Efektem będzie szybsze i dokładniejsze diagnozowanie usterek silnika oraz układu wydechowego, co jest szczególnie cenne w intensywnie eksploatowanych flotach pojazdów. Badania będą również poszerzane o testy przeprowadzane w szerokim zakresie warunków atmosferycznych i drogowych, od niskich temperatur w warunkach zimowych po wysokie obciążenia podczas długotrwałej jazdy w terenie górzystym. W planach jest również stosowanie różnorodnych strategii eksploatacyjnych, tak aby przeanalizować wpływ stylu jazdy na osiągnięte wyniki pomiarów. Zróżnicowanie próby badawczej pozwoli na zwiększenie wiarygodności opracowywanych metod i skuteczniejszą walidację systemu. Autor zamierza także zwrócić większą uwagę na interfejs i ergonomię stosowanego oprogramowania, tak aby ułatwić wykorzystanie systemu przez diagnostów i kierowców. W dłuższej perspektywie rozważane jest wprowadzenie funkcjonalności typu „asystent diagnostyczny”, który w sposób interaktywny i intuicyjny sygnalizowałby możliwe przyczyny zaobserwowanych anomalii i rekomendował dalsze kroki, na przykład przeprowadzenie dodatkowej diagnostyki czy naprawy. Niezwykle istotnym obszarem będzie ponadto zintegrowanie rozwiązań z systemami zarządzania flotą i systemami ITS. Autor zakłada, że dane z czujników monitorujących emisję spalin mogą zostać w przyszłości przesyłane w czasie rzeczywistym do centralnych baz danych, co pozwoliłoby na szybkie wychwytywanie pojazdów znacząco przekraczających normy emisji oraz przyczyniłoby się do tworzenia bardziej zaawansowanych strategii ograniczania zanieczyszczeń w miastach.

Ostatecznym celem podejmowanych działań jest zwiększanie potencjału diagnostycznego oraz prewencyjnego, tak aby nie tylko możliwie wcześnie wykrywać przekroczenia norm emisji, ale też – w miarę możliwości – zapobiegać ich powstawaniu poprzez korekty w działaniu silnika i systemów oczyszczania spalin. Autor przewiduje, że zintegrowanie opisanych wyżej kierunków rozwojowych doprowadzi do stworzenia kompleksowego rozwiązania, ułatwiającego efektywniejsze zarządzanie emisjami w transporcie drogowym i tym samym przyczyniającego się do poprawy jakości powietrza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Air quality in Europe – EEA Report No 09/2020.
- [2] Air Toxic Emission from On-road Vehicle in MOVES 2014.
- [3] Anderson J., Wedekind B.: *Particulate Research Programme 1998-2001*, Summary Report, DETR/SMMT/CONAVE, no 5, 2001.
- [4] Andrych-Zalewska M., Sitnik L., Walkowiak W.: *Modelowanie bilansu cieplnego silnika spalinowego przy zasilaniu go zróżnicowanymi paliwami*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 2, 2014 17-20.
- [5] Andrych-Zalewska M., Sitnik L., Walkowiak W., Tkaczyk M.: *Badania modelowe przebiegu reakcji utleniania w konwerterze z powłoką katalityczną*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 2, 2014, 126-129.
- [6] Andrzejewski M.: *Telematyka w służbie ekologii*. Samochody Specjalne nr 9/2012, s. 94-96.
- [7] Andrzejewski M.: *Wpływ stylu jazdy kierowcy na zużycie paliwa i emisję substancji szkodliwych w spalinach*. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, 2013.
- [8] Andrzejewski M., Nowak M.: *Wpływ stylu jazdy według zasad eco-drivingu na emisję substancji toksycznych z lekkiego samochodu użytkowego*. Bezpieczeństwo i ekologia. Autobusy 2019.
- [9] Aravind S., Ragupathi P., Sathish Kumar D., Vignesh G.: *A Numerical Investigation of Automotive Lambda Sensor to Improve the Life Span of the Sensor using CFD*. 18th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS), USA 2020.
- [10] Auto Technika Motoryzacyjna, nr 12 (574) grudzień 2005.
- [11] Auto Technika Motoryzacyjna, nr 2 (599) luty 2008.
- [12] Auto Technika Motoryzacyjna, nr 4 (601) kwiecień 2008.
- [13] Ashby M.: *Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim*. Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 1998.
- [14] Baczewski K., Kałdoński T.: *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*. WKŁ, Warszawa 2004.
- [15] Baczewski K., Kałdoński T.: *Paliwa do silników o zapłonie iskrowym*. WKŁ, Warszawa 2005.
- [16] Badyda A.: *Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu*. Nauka, 2010, 4, 115-125.
- [17] Bałaziński W.: *CAN, czyli każdy z każdym, byle po kolei*. „AutoEXPERT” nr 3/1999 i 4/1999.
- [18] Bałaziński W.: *Sieci informatyczne z magistralami CAN*. „AutoEXPERT” nr 4/2000.

- [19] Baranowski R.: *Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce*. BTC, Warszawa 2005.
- [20] Barzykowski J.: *Współczesna metrologia, zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 2004.
- [21] Bernhard M., Dobrzyński S., Loth E.: *Silniki samochodowe*. WKŁ, Warszawa 1988.
- [22] Bielaczyc P., Merksiz J., Pielecha J.: *Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [23] Biszko K., Oskarbski J.: *Modelowanie emisji z wykorzystaniem symulacji mikroskopowych*. Transport miejski i regionalny. Kraków 2022.
- [24] Blair G. P.: *Design and Simulation of Four-Stroke Engines*. Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, Pa. 1999
- [25] Boriboonsomsin K., Barth M.J.: *Real-World CO2 Impacts of Traffic Congestion*: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008.
- [26] Bortel E., Konieczny H.: *Zarys technologii chemicznej*. PWN, Warszawa 1992.
- [27] Boś P., Sitarz S.: *Podstawy budowy maszyn*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2018.
- [28] Boxall J.: *Arduino. 65 praktycznych projektów*. Helion, Gliwice 2014.
- [29] Burk P., Hochmuth J., Anderson D., Sung S., Tauster S., Tolentino C., Rogalo J., Miles G., Niejako M., Punke A., Dahle U.: *Cloud start hydrocarbon emissions control*. Automotive Engineering, 10, 1995.
- [30] Commission Regulation (EC) 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, European Commission (EC), Official J. European Union, L171, 2007.
- [31] Cormen T.H.: *Algorytmy bez tajemnic*, Helion, Gliwice 2013.
- [32] Budney E., Chłopek Z., Chłosta M.: Ocena skuteczności zasilania silnika spalinowego gazem ziemnym w celu ograniczenie emisji zanieczyszczeń w warunkach użytkowania silnika w maszynie do robót ziemnych ciągniku gąsienicowym. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 9 T12 D 013 23. Warszawa 2009. (Praca niepublikowana).
- [33] Chłopek Z., Piaseczny L.: Correlational investigation of pollutant emissions from a marine engine in dynamic states. V International Congress on Combustion Engines 2013. V International Congress on Combustion Engines 2013. Combustion Engines 2013.

-
- [34] Chłopek Z., Szczepański T.: *Research concept of the combustion engines properties in dynamic states. V International Congress on Combustion Engines 2013. Combustion Engines 2013.*
- [35] Chłopek Z.: *A correlation analysis of the pollutant emission from a self ignition engine. Silniki Spalinowe Combustion Engines 1(140)/2010, s. 25–32.*
- [36] Chłopek Z.: *Badania korelacyjne emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego. Mechanika z. 6–M/2004. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004, s. 151–156.*
- [37] Chłopek Z.: *Some remarks on engine testing in dynamic states. Silniki Spalinowe – Combustion Engines 4/2010(143), s. 60–72.*
- [38] Chłopek Z., Piaseczny L.: *Analiza korelacyjna właściwości silnika spalinowego w statycznych warunkach pracy. Mechanika z. 6-M/2004. Kraków: WPK, 2004, s. 163–170.*
- [39] Chłopek Z.: *Ochrona środowiska naturalnego. WKŁ, Warszawa 2002.*
- [40] Chłopek Z., Szczepański T.: *Ocena zagrożenia środowiska cząstkami stałymi ze źródeł cywilizacyjnych, Inżynieria Ekologiczna nr 30, 2012, s. 174–193.*
- [41] Chłopek Z.: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.*
- [42] Chmoczyk W.: *Podstawy konstrukcji maszyn. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 2017.*
- [43] Dąbrowski M., Kowalczyk S., Trawiński G.: *Diagnostyka pojazdów samochodowych. WSiP, Warszawa 2011.*
- [44] Dobrzański L. D.: *Leksykon materiałoznawstwa. Praktyczne zestawienie norm polskich, zagranicznych i międzynarodowych. Tom IV. Wydawnictwo Verlage Dashofer, 2005.*
- [45] Duer S., Warczyk.: *„Badanie sondy lambda w systemie motronic.” Eksploatacja i testy, Autobusy 7-8 2017.*
- [46] Dauer S., Hintzka P., Banaszek K., Struski B.: *„Badanie sondy lambda z użyciem diagnostyki”, Eksploatacja i testy, Autobusy 8/2015.*
- [47] EMEP/EEA *Emission Inventory Guidebook. Raport instytutowy, European Environment Agency, 2019.*
- [48] Engst A., Fleishman G.: *Sieci bezprzewodowe. Praktyczny przewodnik, Helion, Gliwice 2005.*
- [49] Ewing J.: *Szybciej, wyżej dalej. Skandale Volkswagena, Rebis, Poznań 2017.*

- [50] Filipczyk J.: *Badania wpływu stanu technicznego silnika na poziom emisji zanieczyszczeń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 64. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.*
- [51] Filipczyk J., Kutrzyk A.: *Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych i stanu technicznego silnika na poziom emisji zanieczyszczeń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 63. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.*
- [52] Frei M.: *Samochodowe magistrale danych w praktyce warsztatowej.* WKŁ, Warszawa 2018
- [53] Frykowski B., Grzeszczyk E.: *Systemy transmisji danych.* WKŁ, Warszawa 2010.
- [54] Fuć P., Sokolnicka B., Szymlet N., Siedlecki M.: *Analiza emisji węglowodorów z pojazdu z bezpośrednim wtryskiem benzyny w rzeczywistych warunkach ruchu. Bezpieczeństwo i ekologia.* Autobusy 2017.
- [55] Fundowicz P., Radzimiński M., Wieczorek M.: *Podstawy elektrotechniki i elektroniki pojazdów samochodowych.* WSiP, Warszawa 2015.
- [56] Gajek A., Juda Z.: *Czujniki,* WKŁ, Warszawa 2009.
- [57] Ge Y., Hou P., Lyu T., Lai Y., Su S., Luo W., He M., Xiao L.: *Machine Learning-Aided Remote Monitoring of NOx Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on OBD Data Streams.* Wydział Nauki, Uniwersytet Technologii i Edukacji w Tianjin. Chiny 2023.
- [58] Gibilisco S.: *Schematy elektroniczne i elektryczne. Przewodnik dla początkujących,* Helion, Gliwice 2014.
- [59] Gładysiek J., Gładysiek M.: *Poradnik diagnostyki samochodowej. Diagnoskop silnikowy Bosch FSA serii 7XX.* Bosch, Kraków 2008.
- [60] Gronowicz J.: *Ochrona środowiska w transporcie lądowym.* Wyd. Instytutu Technologii i Eksploatacji, Radom 2003.
- [61] Gustof P.: *Badania techniczne z diagnostyką pojazdów samochodowych,* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2013.
- [62] Górski K.: *Wybrane aspekty diagnostyki pokładowej pojazdów samochodowych.* Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2007.
- [63] Hennek K., Prażnowski K., Bieniek A.: *Wpływ modyfikacji map sterowania silnikiem na wybrane wskaźniki jego pracy.* Badania, Technika Transportu Szynowego 08.2015.
- [64] Herner A.: *Elektronika w samochodzie. Wybrane układy.* WKŁ, Warszawa 2001.
- [65] Herner A., Hans-Jurgen R.: *Elektronika i elektrotechnika w pojazdach samochodowych.* WKŁ, Warszawa 2019.

-
- [66] Hinc A.: *Transformacja gospodarki w kierunku niskoemisyjnym*. Biuro Analiz Sejmowych, 2012, 1(29), 109-136.
- [67] Heywood J. B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education, (1988).
- [68] Idzior M., Czapliński E.: *Badania wpływu stanu technicznego eksploatowanych pojazdów samochodowych na emisję szkodliwych składników spalin*. Combustion Engines 2015.
- [69] Jankowski M.: *Wprowadzenie do pokładowego diagnozowania pojazdów samochodowych*. XII Konferencja - Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów. Diagnostyka'33. Bydgoszcz 2005.
- [70] Jamroz K., Oskarbiński J.: *Inteligentny system transportu dla aglomeracji trójmiejskiej*. Telekomunikacja i techniki informacyjne, nr 1-2/2009, s 66-76.
- [71] Janicka A., Koleanek C., Walkowiak W.: *Ecology of road transportation: the logistic system of end-of-liefe vehicles recycling*. PRINTPAP, Łódź 2011.
- [72] Janka R.M.: *Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe*, PWN, Warszawa 2013.
- [73] Kajda S.C.: *Chemia i fizykochemia ropy naftowej*, WNT, Warszawa 1979.
- [74] Kardasz P., Sitnik L., Szuberski K., Haller P.: *Ekologiczne skutki motoryzacji*. Autonaprawa, 9, 2010, 22-24.
- [75] Kijewski J.: *Silniki spalinowe*. WSiP, Warszawa 1988.
- [76] Kirwan J. E.: *CO₂ reduction for spark-ignition engines – two paths to success*. SAE International, 3rd February 2009.
- [77] Kleczkowski P.: *Smog w Polsce*, PWN, Warszawa 2019.
- [78] Kneba Z., Makowski S.: *Zasilanie i sterowanie silników*, WKŁ, Warszawa 2004.
- [79] Kolanek Cz.: *Diagnostyka współczesnych silników spalinowych*. NAVIGATOR, Wrocław 1996.
- [80] Kołodziejczyk L. M., Zając P.: *Silniki spalinowe*, WSiP, Warszawa 2001.
- [81] Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990-2019. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, 2014.
- [82] Kruczyński S.W.: *Filtracja cząstek stałych w spalinach pojazdów samochodowych*. Wyd. SPATIUM, Radom 2011.
- [83] Krzak J.: *Ograniczenie misyjności pojazdów w transporcie drogowym. Pojazdy hybrydowe i elektryczne w Polsce – perspektywy i bariery rozwoju*. Biuro Analiz Sejmowych, 2012, 1(29), 161-184.
- [84] Kubiak P., Burdzik R., Fabiś P., Smalcerz A.: *Diagnozowanie elektrycznych i elektronicznych układów pojazdów samochodowych*. Nowa Era, Warszawa 2015.

- [85] Kukiela L.: *Podstawy badań inżynierskich*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2000.
- [86] Kundzewicz Z.W., Juda-Rezler K.: *Zagrożenia związane ze zmianami klimatu*. Nauka 04/2010.
- [87] Ligtering N., Elstgeest M., Frateur T., Ruiter J., Paschinger P.: *Approaches for detecting high NO_x emissions of aged petrol cars during the periodic technical inspection*. Raport Ministerstwa Infrastruktury i Zarządzania Wodami Holandii. Haga 2022.
- [88] Luft S.: *Podstawy budowy silników*, WKŁ, Warszawa 2018.
- [89] Łukasik Z., Olszańska S.: *Wpływ przeglądów technicznych na bezpieczeństwo w transporcie drogowym*. Efektywność transportu. Autobusy 2016.
- [90] Martin R.C.: *Czysty kod. Podręcznik dobrego programisty*, Helion, Gliwice 2013.
- [91] Matyka.: *Symulacje komputerowe w fizyce*. Wyd. Helion, Gliwice 2002.
- [92] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. *Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO*. Raport syntetyczny za lata 1990-2019.
- [93] Merkisz J.: *Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1995.
- [94] Merkisz-Guranowska A., Pielecha J.: *Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych a parametry ruchu drogowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa-Poznań 2014, s. 134.
- [95] Merkisz J., Mazurek S.: *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*. WKŁ, Warszawa 2002.
- [96] Merkisz J., Pielecha I.: *Układy mechaniczne pojazdów hybrydowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.
- [97] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S., *Emisja zanieczyszczeń motoryzacyjnych w świetle nowych przepisów Unii Europejskiej*, WKŁ, Warszawa 2012.
- [98] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S.: *Pragmatyczne podstawy ochrony powietrza atmosferycznego w transporcie drogowym*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
- [99] Merkisz J., Pielecha J.: *Możliwości obniżenia emisji cząstek stałych w silnikach ZS poprzez zastosowanie katalizatora*. IV Sympozjum EKODIESEL'98. Instytut Lotnictwa, Warszawa 1998.
- [100] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski.: *New Trends in Emission Control in the European Union*. Springer Tracts on Transportation and Traffic, 4, 2014.
- [101] Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012. European Environment Agency, 2014.

-
- [102] Monk S.: *Elektronika z wykorzystaniem Arduino i Rapsberry Pi*, Helion, Gliwice 2018.
- [103] Mrozek B.: *MATLAB 5.0x, SIMULINK 2.x poradnik użytkownika*. Warszawa PLJ, 1998.
- [104] Mysłowski J. K.: *Zanieczyszczenie powietrza przez pojazdy samochodowe*. WKŁ, Warszawa 2011
- [105] Myszkowski S.: *Szerokopasmowy czujnik tlenu w spalinach. Część II. „AutoEXPERT”* nr 6/2012.
- [106] Myszkowski S.: *Analiza składu spalin silników ZI cz.1. Kompendium praktycznej wiedzy dodatek techniczny do WIADOMOŚCI Inter Cars nr 28 / Wrzesień 2008.*
- [107] Myszkowski S.: *Analiza składu spalin silników ZI cz.2 Kompendium praktycznej wiedzy dodatek techniczny do WIADOMOŚCI Inter Cars nr 30/ marzec 2009.*
- [108] Myszkowski S.: *Trójfunkcyjne konwertery katalityczne Kompendium praktycznej wiedzy dodatek techniczny do WIADOMOŚCI Inter Cars nr 47/Grudzień 2012.*
- [109] Ochwat S., Walentynowicz J.: *Zastosowanie matematycznych planów eksperymentu w badaniach silników spalinowych*. Biuletyn WAT nr.7 Warszawa 1978.
- [110] Pałubicki S., Czapiewski W.: *Wpływ okresowych badań technicznych na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Bezpieczeństwo i ekologia. Autobusy 2017.*
- [111] Pedryc N.: *Sonda lambda jako sprzężenie zwrotne układu zasilnia*. Technika. Autobusy 2012.
- [112] Petersen J.: *Wprowadzenie do baz danych*, Helion, Gliwice 2003.
- [113] Pielecha J. (red.): *Badania emisji zanieczyszczeń silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2017
- [114] Pielecha J.: *Identyfikacja parametrów cząstek stałych z silników spalinowych*. Rozprawa habilitacyjna, Rozprawy nr 467, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [115] Piotrowski J.: *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [116] Praca zbiorowa. *Sieci wymiany danych w pojazdach samochodowych. Seria informatory techniczne Bosch*. WKŁ, Warszawa 2016.
- [117] Praca zbiorowa, red. Choromański W. *Ekomobilność. Innowacyjne i ekologiczne środki transportu*. Tom I, WKŁ, Warszawa 2015.
- [118] Przybyłowicz K.: *Metaloznawstwo*. WNT, Warszawa 1993.
- [119] Puzio P., Rynkiewicz M., Wójcik R.: *Zgłoszenie patentowe „Mobilny system analizy i dynamicznego pomiaru spalin w pojazdach samochodowych”* PL 436184 dnia 12.01.2021 r.

- [120] Puzio P., Rynkiewicz M., Wójcik R.: Monografia „*Aktywny pomiar tlenu węgla w silnikach spalinowych*” Akademia im. Jakuba z Paradyża w Gorzowie Wielkopolskim, 2023 r. - 166 s
- [121] Rychter T., Teodorczyk A.: *Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego*. PWN, Warszawa 1980.
- [122] Rokosz U.: *Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD*. WKŁ, Warszawa 2007.
- [123] Rupp D., Onder Ch., Guzzella L.: „*Iterative adaptive Air/Fuel ratio control*” Measurment and Control Laboratory, ETH Zurich, Switzerland 2007.
- [124] Schejbal M.: *Periodic lean/rich operation of NO_x, storage and reduction catalytic converter (NSRC, lean NO_x trap, LNT)*. Research on heterogeneous catalysts for exhaust gas conversion. Monolith – Institute of Chemical Technology, Prague (<http://old.vscht.cz/monolith/>) [dostęp: 13.05.2022].
- [125] Schneehage G.: *Czujniki układu sterowania silnika w praktyce warsztatowej*. WKŁ, Warszawa 2017.
- [126] Serdecki W.: *Badania silników spalinowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012 r.
- [127] Shuk P., Jantz R., Guth H.U.: *Oxygen Sensor with Advanced Oxide Electrode Materials*, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Drezno, Niemcy 2012.
- [128] SI engine downsizing – *The potential and limitations for two- and three-cylinder concepts*. FEV Spectrum, Aachen 2011.
- [129] Siedlecki M.: *Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofitingu w rzeczywistych warunkach eksploatacji*. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska. 2020.
- [130] Sitek K.: *Badania techniczne pojazdów. Poradnik diagnosty*. WKŁ, Warszawa 2020.
- [131] Sitek K., Syta S.: *Badania stanowiskowe i diagnostyka*, WKŁ, Warszawa 2011.
- [132] Sobieszczański M.: *Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych*. WKŁ, Warszawa 2000
- [133] Sosinsky B.: *Sieci komputerowe. Biblia*, Helion, Gliwice 2011.
- [134] Strzelec A., Kasab J.: „*Automotive Emissions Regulations and Exhaust Aftertreatment Systems*” SAE International 2020.
- [135] Stojacki A.: *Badania wpływu topografii terenu na emisję związków szkodliwych spalin samochodów osobowych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska 2015

-
- [136] Szkoła A., Rychter M.: *Rozwój systemu diagnostyki pokładowej samochodów osobowych w świetle zasady działania systemu OBD*. Eksploatacja i testy. Autobusy 2018.
- [137] Tarkowski S.: *Wykorzystanie pokładowych rejestratorów parametrów ruchu pojazdów do oceny komfortu jazdy*. Rozprawa doktorska, Wyd. Politechniki Poznańskiej, 2013.
- [138] Tarnowski W.: *Symulacja komputerowa procesów ciągłych*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin 1996.
- [139] Toema M.A.: *Physics-based characterization of lambda sensor output to control emissions from natural gas fueled engines*. Kansas State University rozprawa doktorska, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, College of Engineering. 2010
- [140] Tompkins F. C.: *Chemisorpcja gazów na metalach*. PWN, Warszawa 1985.
- [141] Ubysz A.: *Poszanowanie energii w pojazdach samochodowych. Część 1: Obliczanie zużycia paliwa w pojeździe w ruchu rzeczywistym*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [142] U.S. Census Bureau, International Database.
- [143] Widerski T.: *Samochodowe sieci informatyczne*. Seria „Poradnik serwisowy” nr 5/2005, Instalator Polski, Warszawa 2005.
- [144] Wielgoński G., Zarzycki R.: *Technologie i procesy ochrony powietrza*, PWN, Warszawa 2018.
- [145] Wierzbicki S.: *Procedury diagnozowania pojazdów samochodowych zgodnych z normą OBD II*. Diagnostyka’28. Olsztyn 2003.
- [146] Wróblewski P., Kupiec J.: *Diagnozowanie podzespołów i zespołów pojazdów samochodowych*. WKŁ, Warszawa 2015.
- [147] Wójcik R., Puzio P., Rynkiewicz M.: "Aktywny pomiar tlenku węgla w silnikach" [w:] *Technologie przyszłości. Inżynieria wytwarzania i konstrukcje maszyn 2021*, red. Jakubus A., Perec A., Kostrzewa J. Gorzów Wielkopolski 2019, s. 121-132.
- [148] Zieliński J.: *Metodologia Pracy Naukowej*. Aspra – JR, 2012.
- [149] Zimmermann W., Schmigdall R.: *Magistrale danych w pojazdach. Protokoły i standardy*. WKŁ, Warszawa 2008.
- [150] Zeigler B.P.: *Teoria modelowania i symulacji*. PWN Warszawa 1984.
- [151] Zwierzycki W.: *Oleje, paliwa i smary dla motoryzacji i przemysłu*, Rafineria „Glimar” SA, Gorlice 2001.
- [152] Żywica P.: *Modelowanie i symulacja zużycia paliwa i emisji spalin w ruchu miejskim*. Praca magisterska. Uniwersytet Im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. 2012.

- [153] Żółtowski B.: *Cempel Cz. (red.): Inżynieria diagnostyki maszyn*. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2004.
- [154] www.acea.be (dostęp z dnia 02.05.2022).
- [155] www.adac.de/news/katalysator-diebstahl/ (dostęp z dnia 24.02.2022).
- [156] www.autoexpert.pl/diagnostyka (dostęp z dnia 22.05.2022).
- [157] www.automotivepowertraintechnologyinternational.com/ (dostęp z dnia 22.05.2022).
- [158] www.auto-swiat.pl/porady/eksploatacja/plaga-kradziezy-katalizatorow-jak-zabezpieczyc-auto/ (dostęp z dnia 25.01.2022).
- [159] www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/info-specialists/effects-of-air-pollution/effects-of-air-pollution-on-ecosystems.html (dostęp z dnia 15.05.2022).
- [160] www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/info-specialists/effects-of-air-pollution/effects-of-air-pollution-on-health.html (dostęp z dnia 15.05.2022).
- [161] www.bosch-press.pl/pressportal/pl/pl/press-release-17536.html (dostęp z dnia 14.05.2022).
- [162] www.cleanaircommunities.org (dostęp z dnia 15.08.2022)
- [163] www.controlengineering.pl (dostęp z dnia 02.05.2022).
- [164] www.consumerist.com/consumermediallc.files.wordpress.com/2016/07/new-york-vw-complaint-7-19.pdf (dostęp z dnia 15.08.2022)
- [165] www.e-biobaliwa.pl (dostęp z dnia 02.05.2022).
- [166] www.eea.europa.eu (dostęp z dnia 02.05.2022).
- [167] www.enginebuildermag.com/ (dostęp z dnia 22.05.2022)
- [168] www.engineerine.com (dostęp z dnia 02.05.2022).
- [169] www.eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/reducing-pollution-from-light-motor-vehicles.html (dostęp z dnia 05.06.2022).
- [170] www.eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32007R0715 (dostęp z dnia 05.03.2024).
- [171] www.eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0858 (dostęp z dnia 05.03.2024).
- [172] www.naukawpolsce.pl/technologia (dostęp z dnia 22.05.2022)
- [173] www.nicb.org/news/blog/catalytic-convert-thefts-skyrocket-across-nation (dostęp z dnia 15.05.2022)
- [174] www.popularmechanics.com/technology/infrastructure/g2431/the-most-powerful-things-in-the-world/ (dostęp z dnia 17.03.2024).
- [175] www.nik.gov.pl/aktualnosci/ (dostęp z dnia 24.05.2022).

-
- [176] www.urbanaccessregulations.eu (dostęp z dnia 22.05.2022)
- [177] www.volvocars.com/images/v/-/media/project/contentplatform/data/media/my23/xc40-electric-light/volvo-cars-LCA-report-xc40.pdf (dostęp z dnia 16.08.2022)
- [178] www.warsztat.pl/artykuly/kradzieze-katalizatorow-to-duzy-proceder-miedzynar,72175 (dostęp z dnia 25.05.2024).

SPIS TABEL

Tabela 1. Normy Euro dla silników benzynowych	40
Tabela 2. Normy Euro dla silników o zapłonie samoczynnym.....	41
Tabela 3. Różnice pomiędzy pomiarami NEDC i WLTP [Opracowanie na podstawie NEDC i WLTP]	43
Tabela 4. Wartości stałych w zależności od aproksymacyjnej.....	73
Tabela 5. Dane techniczne pojazdów [Auto Centrum]	101
Tabela 6. Limity emisji toksycznych składników spalin dla pojazdów norma Euro 4. ..	102
Tabela 7. Wybrane parametry metrologiczne analizatora spalin Gasbox Autopower [Texa]	105
Tabela 8. Wartości H _{CV} i O _{CV} wybranych paliw	106
Tabela 9. Wartości zmierzonych emisji [67, 106, 107, 108].....	114
Tabela 10. Szacowana emisja dla wartości $\lambda = 1,07$	115
Tabela 11. Wartości zmierzonych emisji.	115

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Stężenie PM 2.5 w roku 2019 [EEA]	12
Rys. 2. Zgony związane z zanieczyszczeniem powietrza [WHO]	13
Rys. 3. Średnie stężenie PM 2.5 w latach 2000-2019 na terenie 27 krajów UE	14
Rys. 4. Emisja pyłu PM2.5 w Polsce w wybranych latach [KOBiZE]	14
Rys. 5. Szacowane skrócenie długości życia w 2000 roku [EEA]	15
Rys. 6. Szacowane skrócenie długości życia po wdrożeniu środków zapobiegawczych [EEA].....	16
Rys. 7. Emisja pyłów pochodzących ze spalania paliw [KOBiZE]	16
Rys. 8. Emisja pyłów pochodzących z transportu [KOBiZE]	17
Rys. 9. Pojazdy samochodowe zarejestrowane w Polsce – stan na grudzień 2020r	17
Rys. 10. Procentowy udział uszkodzeń [Eurotax]	18
Rys. 11. Przykładowe analizatory GUM [analizatory.info.pl]	50
Rys. 12. Badanie spalania i emisji w cyklu NEDC [icm.edu.pl]	51
Rys. 13. Przykład pierwszego zastosowania urządzenia konstrukcji Leo Bretona	52
Rys. 14. Badanie EPA podczas Emission Testing in Progress [EPA]	52
Rys. 15. Urządzenie, które umożliwiło wykrycie	53

Rys. 16. Analizatory PEMS [a) Horiba, b) Addair]	53
Rys. 17. Wygląd przykładowej sonda lambda [Bosch]	55
Rys. 18. Schemat umieszczenia sond lambda w pojeździe [Wikipedia]	56
Rys. 19. Napięciowa sonda lambda [Inter Cars]	58
Rys. 20. Przebieg sygnału prawidłowo działającej sondy [Inter Cars]	59
Rys. 21. Wartość referencyjna sondy przed katalizatorem (regulacyjnej) [Inter Cars]	59
Rys. 22. Wartość zmierzona sondy za katalizatorem (diagnostycznej) [Inter Cars]	60
Rys. 23. Sygnał przed katalizatorem zmienia się wraz z modulacją składu mieszanki	60
Rys. 24. Sygnały sprawnego i niesprawnego układu [Bosch]	78
Rys. 25. Diagram BPMN.....	83
Rys. 26. Ekran rejestracji nowego użytkownika [Opracowanie własne]	84
Rys. 27. Ekran główny – okno wyboru pojazdu [Opracowanie własne]	84
Rys. 28. Ekran główny – informacje dostarczane po wyborze pojazd	85
Rys. 29. Informacje dostarczane podczas pomiarów stężenia tlenku węgla C	86
Rys. 30. Okno wyboru pojazdów do analizy porównawczej	86
Rys. 31. Mapa pokazująca przebytą drogę przez pojazdy z podziałem na etapy [google maps]	87
Rys. 32. Wyniki etapów dla pojazdu pierwszego – norma Euro	88
Rys. 33. Wyniki etapów dla pojazdu pierwszego – norma Euro 4.....	89
Rys. 34. Zestawiony układ monitorowania z czynnikiem OBD.	91
Rys. 35. Diagram obrazujący architekturę systemu telemetrycznego.	93
Rys. 36. Główne komponenty systemu telemetrycznego.....	93
Rys. 37. Widok aplikacji telemetrycznej – oprogramowanie nie połączone z pojazdem.	94
Rys. 38. Aplikacja połączona z pojazdem – oprogramowanie rejestruje wybrane parametry pracy silnika.....	95
Rys. 39. Obiekty badań P1 i P2. Pomiar z wykorzystaniem analizatora Gasbox	102
Rys. 40. Bosch KTS 560 [Bosch].....	103
Rys. 41. Badania na hamowni podwoziowej z wykorzystaniem analizatorów FSA 740 + KTS540 oraz opracowanych systemów telemetrycznych.....	103
Rys. 42. Analizator spalin TEXA – GASBOX AUTOPOWER [Texa].....	104
Rys. 43. Widok kompletnego układu mobilnego pomiaru toksyczności spalin zamontowanego w pojeździe	104
Rys. 44. Wnętrze pojazdu testowego z zamontowanymi urządzeniami pomiarowymi ..	105
Rys. 45. Wyniki referencyjne uzyskane z analizatora spalin praca - na biegu jałowym	106

Rys. 46. Dane z szyny CAN	107
Rys. 47. Plan trasy przejazdu dla pomiaru drogowego [google maps]	108
Rys. 48. Przykładowa ramka uzyskanych danych z systemu ETS	111
Rys. 49. Przebieg zmienności prędkości obrotowej silnika w funkcji czasu	116
Rys. 50. Wykres charakterystyki napięciowej sond	117
Rys. 51. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji CO pojazd P1	118
Rys. 52. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji HC pojazd P1	119
Rys. 53. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji NO _x pojazd P1	120
Rys. 54. Rozkład oszacowanych emisji dla Renault Modus - wydruk podsumowujący przejazd.....	121
Rys. 55. Zestawienie wybranych parametrów początkowych.....	122
Rys. 56. Wykres charakterystyki napięciowej sond	123
Rys. 57. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji CO pojazd P2	124
Rys. 58. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji HC pojazd P2	125
Rys. 59. Charakterystyka napięciowa z kodowanym szacowanym poziomem emisji NO _x pojazd P2	126
Rys. 60. Rozkład szacowanych emisji dla Fiata Punto – wydruk podsumowujący przejazd	127

ZAŁĄCZNIK

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, w których rejestrowano napięcie sondy (mV) wraz z odpowiadającą mu wartością współczynnika nadmiaru powietrza (λ), określono charakterystykę składu mieszanki oraz odpowiadające jej poziomy emisji tlenu węgla (CO), węglowodorów (HC) i tlenków azotu (NOx). Wyniki te posłużyły do zaproponowania korelacji pomiędzy wartością napięcia sondy a współczynnikiem λ i stężeniami analizowanych składników spalin, umożliwiając tym samym dokładniejszą ocenę warunków pracy silnika oraz szacowanie emisji związków szkodliwych w zależności od stanu mieszanki.

[mV]	[λ]	Charakterystyka mieszanek	CO	HC	NO _x
1	1,090	bardzo uboga	1	4	4
2	1,090	bardzo uboga	1	4	4
3	1,089	bardzo uboga	1	4	4
4	1,089	bardzo uboga	1	4	4
5	1,089	bardzo uboga	1	4	4
6	1,089	bardzo uboga	1	4	4
7	1,089	bardzo uboga	1	4	4
8	1,088	bardzo uboga	1	4	4
9	1,088	bardzo uboga	1	4	4
10	1,088	bardzo uboga	1	4	4
11	1,088	bardzo uboga	1	4	4
12	1,088	bardzo uboga	1	4	4
13	1,087	bardzo uboga	1	4	4
14	1,087	bardzo uboga	1	4	4
15	1,087	bardzo uboga	1	4	4
16	1,087	bardzo uboga	1	4	4
17	1,087	bardzo uboga	1	4	4
18	1,086	bardzo uboga	1	4	4
19	1,086	bardzo uboga	1	4	4
20	1,086	bardzo uboga	1	4	4
21	1,086	bardzo uboga	1	4	4
22	1,086	bardzo uboga	1	4	4
23	1,085	bardzo uboga	1	4	4
24	1,085	bardzo uboga	1	4	4
25	1,085	bardzo uboga	1	4	4
26	1,085	bardzo uboga	1	4	4
27	1,085	bardzo uboga	1	4	4
28	1,084	bardzo uboga	1	4	4
29	1,084	bardzo uboga	1	4	4
30	1,084	bardzo uboga	1	4	4
31	1,084	bardzo uboga	1	4	4
32	1,084	bardzo uboga	1	4	4
33	1,083	bardzo uboga	1	4	4
34	1,083	bardzo uboga	1	4	4
35	1,083	bardzo uboga	1	4	4
36	1,083	bardzo uboga	1	4	4
37	1,083	bardzo uboga	1	4	4
38	1,082	bardzo uboga	1	4	4
39	1,082	bardzo uboga	1	4	4
40	1,082	bardzo uboga	1	4	4
41	1,082	bardzo uboga	1	4	4
42	1,082	bardzo uboga	1	4	4
43	1,081	bardzo uboga	1	4	4
44	1,081	bardzo uboga	1	4	4
45	1,081	bardzo uboga	1	4	4
46	1,081	bardzo uboga	1	4	4
47	1,081	bardzo uboga	1	4	4

48	1,080	bardzo uboga	1	4	4
49	1,080	bardzo uboga	1	4	4
50	1,080	bardzo uboga	1	4	4
51	1,080	bardzo uboga	1	4	4
52	1,080	bardzo uboga	1	4	4
53	1,079	bardzo uboga	1	4	4
54	1,079	bardzo uboga	1	4	4
55	1,079	bardzo uboga	1	4	4
56	1,079	bardzo uboga	1	4	4
57	1,079	bardzo uboga	1	4	4
58	1,078	bardzo uboga	1	4	4
59	1,078	bardzo uboga	1	4	4
60	1,078	bardzo uboga	1	4	4
61	1,078	bardzo uboga	1	4	4
62	1,078	bardzo uboga	1	4	4
63	1,077	bardzo uboga	1	4	4
64	1,077	bardzo uboga	1	4	4
65	1,077	bardzo uboga	1	4	4
66	1,077	bardzo uboga	1	4	4
67	1,077	bardzo uboga	1	4	4
68	1,076	bardzo uboga	1	4	4
69	1,076	bardzo uboga	1	4	4
70	1,076	bardzo uboga	1	4	4
71	1,076	bardzo uboga	1	4	4
72	1,076	bardzo uboga	1	4	4
73	1,075	bardzo uboga	1	4	4
74	1,075	bardzo uboga	1	4	4
75	1,075	bardzo uboga	1	4	4
76	1,075	bardzo uboga	1	4	4
77	1,075	bardzo uboga	1	4	4
78	1,074	bardzo uboga	1	4	4
79	1,074	bardzo uboga	1	4	4
80	1,074	bardzo uboga	1	4	4
81	1,074	bardzo uboga	1	4	4
82	1,074	bardzo uboga	1	4	4
83	1,073	bardzo uboga	1	4	4
84	1,073	bardzo uboga	1	4	4
85	1,073	bardzo uboga	1	4	4
86	1,073	bardzo uboga	1	4	4
87	1,073	bardzo uboga	1	4	4
88	1,072	bardzo uboga	1	4	4
89	1,072	bardzo uboga	1	4	4
90	1,072	bardzo uboga	1	4	4
91	1,072	bardzo uboga	1	4	4
92	1,072	bardzo uboga	1	4	4
93	1,071	bardzo uboga	1	4	4
94	1,071	bardzo uboga	1	4	4

95	1,071	bardzo uboga	1	4	4
96	1,071	bardzo uboga	1	4	4
97	1,071	bardzo uboga	1	4	4
98	1,070	bardzo uboga	1	4	4
99	1,070	bardzo uboga	1	4	4
100	1,070	bardzo uboga	1	4	4
101	1,070	bardzo uboga	1	4	4
102	1,070	bardzo uboga	1	4	4
103	1,069	bardzo uboga	1	4	4
104	1,069	bardzo uboga	1	4	4
105	1,069	bardzo uboga	1	4	4
106	1,069	bardzo uboga	1	4	4
107	1,069	bardzo uboga	1	4	4
108	1,068	bardzo uboga	1	4	4
109	1,068	bardzo uboga	1	4	4
110	1,068	bardzo uboga	1	4	4
111	1,068	bardzo uboga	1	4	4
112	1,068	bardzo uboga	1	4	4
113	1,067	bardzo uboga	1	4	4
114	1,067	bardzo uboga	1	4	4
115	1,067	bardzo uboga	1	4	4
116	1,067	bardzo uboga	1	4	4
117	1,067	bardzo uboga	1	4	4
118	1,066	bardzo uboga	1	4	4
119	1,066	bardzo uboga	1	4	4
120	1,066	bardzo uboga	1	4	4
121	1,066	bardzo uboga	1	4	4
122	1,066	bardzo uboga	1	4	4
123	1,065	bardzo uboga	1	4	4
124	1,065	bardzo uboga	1	4	4
125	1,065	bardzo uboga	1	4	4
126	1,065	bardzo uboga	1	4	4
127	1,065	bardzo uboga	1	4	4
128	1,064	bardzo uboga	1	4	4
129	1,064	bardzo uboga	1	4	4
130	1,064	bardzo uboga	1	4	4
131	1,064	bardzo uboga	1	4	4
132	1,064	bardzo uboga	1	4	4
133	1,063	bardzo uboga	1	4	4
134	1,063	bardzo uboga	1	4	4
135	1,063	bardzo uboga	1	4	4
136	1,063	bardzo uboga	1	4	4
137	1,063	bardzo uboga	1	4	4
138	1,062	bardzo uboga	1	4	4
139	1,062	bardzo uboga	1	4	4
140	1,062	bardzo uboga	1	4	4
141	1,062	bardzo uboga	1	4	4

142	1,062	bardzo uboga	1	4	4
143	1,061	bardzo uboga	1	4	4
144	1,061	bardzo uboga	1	4	4
145	1,061	bardzo uboga	1	4	4
146	1,061	bardzo uboga	1	4	4
147	1,061	bardzo uboga	1	4	4
148	1,060	bardzo uboga	1	4	4
149	1,060	bardzo uboga	1	4	4
150	1,060	bardzo uboga	1	4	4
151	1,060	bardzo uboga	1	4	4
152	1,060	bardzo uboga	1	4	4
153	1,059	bardzo uboga	1	4	4
154	1,059	bardzo uboga	1	4	4
155	1,059	bardzo uboga	1	4	4
156	1,059	bardzo uboga	1	4	4
157	1,059	bardzo uboga	1	4	4
158	1,058	bardzo uboga	1	4	4
159	1,058	bardzo uboga	1	4	4
160	1,058	bardzo uboga	1	4	4
161	1,058	bardzo uboga	1	4	4
162	1,058	bardzo uboga	1	4	4
163	1,057	bardzo uboga	1	4	4
164	1,057	bardzo uboga	1	4	4
165	1,057	bardzo uboga	1	4	4
166	1,057	bardzo uboga	1	4	4
167	1,057	bardzo uboga	1	4	4
168	1,056	bardzo uboga	1	4	4
169	1,056	bardzo uboga	1	4	4
170	1,056	bardzo uboga	1	4	4
171	1,056	bardzo uboga	1	4	4
172	1,056	bardzo uboga	1	4	4
173	1,055	bardzo uboga	1	4	4
174	1,055	bardzo uboga	1	4	4
175	1,055	bardzo uboga	1	4	4
176	1,055	bardzo uboga	1	4	4
177	1,055	bardzo uboga	1	4	4
178	1,054	bardzo uboga	1	4	4
179	1,054	bardzo uboga	1	4	4
180	1,054	bardzo uboga	1	4	4
181	1,054	bardzo uboga	1	4	4
182	1,054	bardzo uboga	1	4	4
183	1,053	bardzo uboga	1	4	4
184	1,053	bardzo uboga	1	4	4
185	1,053	bardzo uboga	1	4	4
186	1,053	bardzo uboga	1	4	4
187	1,053	bardzo uboga	1	4	4
188	1,052	bardzo uboga	1	4	4

189	1,052	bardzo uboga	1	4	4
190	1,052	bardzo uboga	1	4	4
191	1,052	bardzo uboga	1	4	4
192	1,052	bardzo uboga	1	4	4
193	1,051	bardzo uboga	1	4	4
194	1,051	bardzo uboga	1	4	4
195	1,051	bardzo uboga	1	4	4
196	1,051	bardzo uboga	1	4	4
197	1,051	bardzo uboga	1	4	4
198	1,050	bardzo uboga	1	4	4
199	1,050	bardzo uboga	1	4	4
200	1,050	bardzo uboga	1	4	4
201	1,050	bardzo uboga	1	4	4
202	1,050	bardzo uboga	1	4	4
203	1,049	bardzo uboga	1	4	4
204	1,049	bardzo uboga	1	4	4
205	1,049	bardzo uboga	1	4	4
206	1,049	bardzo uboga	1	4	4
207	1,049	bardzo uboga	1	4	4
208	1,048	bardzo uboga	1	4	4
209	1,048	bardzo uboga	1	4	4
210	1,048	bardzo uboga	1	4	4
211	1,048	bardzo uboga	1	4	4
212	1,048	bardzo uboga	1	4	4
213	1,047	bardzo uboga	1	4	4
214	1,047	bardzo uboga	1	4	4
215	1,047	bardzo uboga	1	4	4
216	1,047	bardzo uboga	1	4	4
217	1,047	bardzo uboga	1	4	4
218	1,046	bardzo uboga	1	4	4
219	1,046	bardzo uboga	1	4	4
220	1,046	bardzo uboga	1	4	4
221	1,046	bardzo uboga	1	4	4
222	1,046	bardzo uboga	1	4	4
223	1,045	bardzo uboga	1	4	4
224	1,045	bardzo uboga	1	4	4
225	1,045	bardzo uboga	1	4	4
226	1,045	bardzo uboga	1	4	4
227	1,045	bardzo uboga	1	4	4
228	1,044	bardzo uboga	1	4	4
229	1,044	bardzo uboga	1	4	4
230	1,044	bardzo uboga	1	4	4
231	1,044	bardzo uboga	1	4	4
232	1,044	bardzo uboga	1	4	4
233	1,043	bardzo uboga	1	4	4
234	1,043	bardzo uboga	1	4	4
235	1,043	bardzo uboga	1	4	4

236	1,043	bardzo uboga	1	4	4
237	1,043	bardzo uboga	1	4	4
238	1,042	bardzo uboga	1	4	4
239	1,042	bardzo uboga	1	4	4
240	1,042	bardzo uboga	1	4	4
241	1,042	bardzo uboga	1	4	4
242	1,042	bardzo uboga	1	4	4
243	1,041	bardzo uboga	1	4	4
244	1,041	bardzo uboga	1	4	4
245	1,041	bardzo uboga	1	4	4
246	1,041	bardzo uboga	1	4	4
247	1,041	bardzo uboga	1	4	4
248	1,040	bardzo uboga	1	4	4
249	1,040	bardzo uboga	1	4	4
250	1,040	bardzo uboga	1	4	4
251	1,040	bardzo uboga	1	4	4
252	1,040	bardzo uboga	1	4	4
253	1,039	bardzo uboga	1	4	4
254	1,039	bardzo uboga	1	4	4
255	1,039	bardzo uboga	1	4	4
256	1,039	bardzo uboga	1	4	4
257	1,039	bardzo uboga	1	4	4
258	1,038	bardzo uboga	1	4	4
259	1,038	bardzo uboga	1	4	4
260	1,038	bardzo uboga	1	4	4
261	1,038	bardzo uboga	1	4	4
262	1,038	bardzo uboga	1	4	4
263	1,037	bardzo uboga	1	4	4
264	1,037	bardzo uboga	1	4	4
265	1,037	bardzo uboga	1	4	4
266	1,037	bardzo uboga	1	4	4
267	1,037	bardzo uboga	1	4	4
268	1,036	bardzo uboga	1	4	4
269	1,036	bardzo uboga	1	4	4
270	1,036	bardzo uboga	1	4	4
271	1,036	bardzo uboga	1	4	4
272	1,036	bardzo uboga	1	4	4
273	1,035	bardzo uboga	1	4	4
274	1,035	bardzo uboga	1	4	4
275	1,035	bardzo uboga	1	4	4
276	1,035	bardzo uboga	1	4	4
277	1,035	bardzo uboga	1	4	4
278	1,034	bardzo uboga	1	4	4
279	1,034	bardzo uboga	1	4	4
280	1,034	bardzo uboga	1	4	4
281	1,034	bardzo uboga	1	4	4
282	1,034	bardzo uboga	1	4	4

283	1,033	bardzo uboga	1	4	4
284	1,033	bardzo uboga	1	4	4
285	1,033	bardzo uboga	1	4	4
286	1,033	bardzo uboga	1	4	4
287	1,033	bardzo uboga	1	4	4
288	1,032	bardzo uboga	1	4	4
289	1,032	bardzo uboga	1	4	4
290	1,032	bardzo uboga	1	4	4
291	1,032	bardzo uboga	1	4	4
292	1,032	bardzo uboga	1	4	4
293	1,031	bardzo uboga	1	4	4
294	1,031	bardzo uboga	1	4	4
295	1,031	bardzo uboga	1	4	4
296	1,031	bardzo uboga	1	4	4
297	1,031	bardzo uboga	1	4	4
298	1,030	bardzo uboga	1	4	4
299	1,030	bardzo uboga	1	4	4
300	1,030	bardzo uboga	1	4	4
301	1,030	bardzo uboga	1	4	4
302	1,030	bardzo uboga	1	4	4
303	1,029	bardzo uboga	1	4	4
304	1,029	bardzo uboga	1	4	4
305	1,029	uboga	2	2	5
306	1,029	uboga	2	2	5
307	1,029	uboga	2	2	5
308	1,028	uboga	2	2	5
309	1,028	uboga	2	2	5
310	1,028	uboga	2	2	5
311	1,028	uboga	2	2	5
312	1,028	uboga	2	2	5
313	1,027	uboga	2	2	5
314	1,027	uboga	2	2	5
315	1,027	uboga	2	2	5
316	1,027	uboga	2	2	5
317	1,027	uboga	2	2	5
318	1,026	uboga	2	2	5
319	1,026	uboga	2	2	5
320	1,026	uboga	2	2	5
321	1,026	uboga	2	2	5
322	1,026	uboga	2	2	5
323	1,025	uboga	2	2	5
324	1,025	uboga	2	2	5
325	1,025	uboga	2	2	5
326	1,025	uboga	2	2	5
327	1,025	uboga	2	2	5
328	1,024	uboga	2	2	5
329	1,024	uboga	2	2	5

330	1,024	uboga	2	2	5
331	1,024	uboga	2	2	5
332	1,024	uboga	2	2	5
333	1,023	uboga	2	2	5
334	1,023	uboga	2	2	5
335	1,023	uboga	2	2	5
336	1,023	uboga	2	2	5
337	1,023	uboga	2	2	5
338	1,022	uboga	2	2	5
339	1,022	uboga	2	2	5
340	1,022	uboga	2	2	5
341	1,022	uboga	2	2	5
342	1,022	uboga	2	2	5
343	1,021	uboga	2	2	5
344	1,021	uboga	2	2	5
345	1,021	uboga	2	2	5
346	1,021	uboga	2	2	5
347	1,021	uboga	2	2	5
348	1,020	uboga	2	2	5
349	1,020	uboga	2	2	5
350	1,020	uboga	2	2	5
351	1,020	uboga	2	2	5
352	1,020	uboga	2	2	5
353	1,019	uboga	2	2	5
354	1,019	uboga	2	2	5
355	1,019	uboga	2	2	5
356	1,019	uboga	2	2	5
357	1,019	uboga	2	2	5
358	1,018	uboga	2	2	5
359	1,018	uboga	2	2	5
360	1,018	uboga	2	2	5
361	1,018	uboga	2	2	5
362	1,018	uboga	2	2	5
363	1,017	uboga	2	2	5
364	1,017	uboga	2	2	5
365	1,017	uboga	2	2	5
366	1,017	uboga	2	2	5
367	1,017	uboga	2	2	5
368	1,016	uboga	2	2	5
369	1,016	uboga	2	2	5
370	1,016	uboga	2	2	5
371	1,016	uboga	2	2	5
372	1,016	uboga	2	2	5
373	1,015	uboga	2	2	5
374	1,015	uboga	2	2	5
375	1,015	uboga	2	2	5
376	1,015	uboga	2	2	5

377	1,015	uboga	2	2	5
378	1,014	uboga	2	2	5
379	1,014	uboga	2	2	5
380	1,014	uboga	2	2	5
381	1,014	uboga	2	2	5
382	1,014	uboga	2	2	5
383	1,013	uboga	2	2	5
384	1,013	uboga	2	2	5
385	1,013	uboga	2	2	5
386	1,013	uboga	2	2	5
387	1,013	uboga	2	2	5
388	1,012	uboga	2	2	5
389	1,012	uboga	2	2	5
390	1,012	uboga	2	2	5
391	1,012	uboga	2	2	5
392	1,012	uboga	2	2	5
393	1,011	uboga	2	2	5
394	1,011	uboga	2	2	5
395	1,011	uboga	2	2	5
396	1,011	uboga	2	2	5
397	1,011	uboga	2	2	5
398	1,010	uboga	2	2	5
399	1,010	uboga	2	2	5
400	1,010	uboga	2	2	5
401	1,010	uboga	2	2	5
402	1,010	uboga	2	2	5
403	1,009	uboga	2	2	5
404	1,009	uboga	2	2	5
405	1,009	uboga	2	2	5
406	1,009	uboga	2	2	5
407	1,009	uboga	2	2	5
408	1,008	uboga	2	2	5
409	1,008	uboga	2	2	5
410	1,008	uboga	2	2	5
411	1,008	uboga	2	2	5
412	1,008	uboga	2	2	5
413	1,007	uboga	2	2	5
414	1,007	uboga	2	2	5
415	1,007	uboga	2	2	5
416	1,007	uboga	2	2	5
417	1,007	uboga	2	2	5
418	1,006	uboga	2	2	5
419	1,006	uboga	2	2	5
420	1,006	uboga	2	2	5
421	1,006	uboga	2	2	5
422	1,006	uboga	2	2	5
423	1,005	uboga	2	2	5

424	1,005	uboga	2	2	5
425	1,005	uboga	2	2	5
426	1,005	uboga	2	2	5
427	1,005	uboga	2	2	5
428	1,004	uboga	2	2	5
429	1,004	uboga	2	2	5
430	1,004	uboga	2	2	5
431	1,004	uboga	2	2	5
432	1,004	uboga	2	2	5
433	1,003	uboga	2	2	5
434	1,003	uboga	2	2	5
435	1,003	uboga	2	2	5
436	1,003	uboga	2	2	5
437	1,003	uboga	2	2	5
438	1,002	uboga	2	2	5
439	1,002	uboga	2	2	5
440	1,002	uboga	2	2	5
441	1,002	uboga	2	2	5
442	1,002	uboga	2	2	5
443	1,001	uboga	2	2	5
444	1,001	uboga	2	2	5
445	1,001	Stechiometryczna	2	2	3
446	1,001	Stechiometryczna	2	2	3
447	1,001	Stechiometryczna	2	2	3
448	1,000	Stechiometryczna	2	2	3
449	1,000	Stechiometryczna	2	2	3
450	1,000	Stechiometryczna	2	2	3
451	1,000	Stechiometryczna	2	2	3
452	1,000	Stechiometryczna	2	2	3
453	0,999	Stechiometryczna	2	2	3
454	0,999	Stechiometryczna	2	2	3
455	0,999	Stechiometryczna	2	2	3
456	0,999	Stechiometryczna	2	2	3
457	0,999	Stechiometryczna	2	2	3
458	0,998	Stechiometryczna	2	2	3
459	0,998	Stechiometryczna	2	2	3
460	0,998	Stechiometryczna	2	2	3
461	0,998	Stechiometryczna	2	2	3
462	0,998	Stechiometryczna	2	2	3
463	0,997	Stechiometryczna	2	2	3
464	0,997	Stechiometryczna	2	2	3
465	0,997	Stechiometryczna	2	2	3
466	0,997	Stechiometryczna	2	2	3
467	0,997	Stechiometryczna	2	2	3
468	0,996	Stechiometryczna	2	2	3
469	0,996	Stechiometryczna	2	2	3
470	0,996	Stechiometryczna	2	2	3

471	0,996	Stechiometryczna	2	2	3
472	0,996	Stechiometryczna	2	2	3
473	0,995	Stechiometryczna	2	2	3
474	0,995	Stechiometryczna	2	2	3
475	0,995	Stechiometryczna	2	2	3
476	0,995	Stechiometryczna	2	2	3
477	0,995	Stechiometryczna	2	2	3
478	0,994	Stechiometryczna	2	2	3
479	0,994	Stechiometryczna	2	2	3
480	0,994	Stechiometryczna	2	2	3
481	0,994	Stechiometryczna	2	2	3
482	0,994	Stechiometryczna	2	2	3
483	0,993	Stechiometryczna	2	2	3
484	0,993	Stechiometryczna	2	2	3
485	0,993	Stechiometryczna	2	2	3
486	0,993	Stechiometryczna	2	2	3
487	0,993	Stechiometryczna	2	2	3
488	0,992	Stechiometryczna	2	2	3
489	0,992	Stechiometryczna	2	2	3
490	0,992	Stechiometryczna	2	2	3
491	0,992	Stechiometryczna	2	2	3
492	0,992	Stechiometryczna	2	2	3
493	0,991	Stechiometryczna	2	2	3
494	0,991	Stechiometryczna	2	2	3
495	0,991	Stechiometryczna	2	2	3
496	0,991	Stechiometryczna	2	2	3
497	0,991	Stechiometryczna	2	2	3
498	0,990	Stechiometryczna	2	2	3
499	0,990	Stechiometryczna	2	2	3
500	0,990	Stechiometryczna	2	2	3
501	0,990	Stechiometryczna	2	2	3
502	0,990	Stechiometryczna	2	2	3
503	0,989	Stechiometryczna	2	2	3
504	0,989	Stechiometryczna	2	2	3
505	0,989	Stechiometryczna	2	2	3
506	0,989	Stechiometryczna	2	2	3
507	0,989	Stechiometryczna	2	2	3
508	0,988	Stechiometryczna	2	2	3
509	0,988	Stechiometryczna	2	2	3
510	0,988	Stechiometryczna	2	2	3
511	0,988	Stechiometryczna	2	2	3
512	0,988	Stechiometryczna	2	2	3
513	0,987	Stechiometryczna	2	2	3
514	0,987	Stechiometryczna	2	2	3
515	0,987	Stechiometryczna	2	2	3
516	0,987	Stechiometryczna	2	2	3
517	0,987	Stechiometryczna	2	2	3

518	0,986	Stechiometryczna	2	2	3
519	0,986	Stechiometryczna	2	2	3
520	0,986	Stechiometryczna	2	2	3
521	0,986	Stechiometryczna	2	2	3
522	0,986	Stechiometryczna	2	2	3
523	0,985	Stechiometryczna	2	2	3
524	0,985	Stechiometryczna	2	2	3
525	0,985	Stechiometryczna	2	2	3
526	0,985	Stechiometryczna	2	2	3
527	0,985	Stechiometryczna	2	2	3
528	0,984	Stechiometryczna	2	2	3
529	0,984	Stechiometryczna	2	2	3
530	0,984	Stechiometryczna	2	2	3
531	0,984	Stechiometryczna	2	2	3
532	0,984	Stechiometryczna	2	2	3
533	0,983	Stechiometryczna	2	2	3
534	0,983	Stechiometryczna	2	2	3
535	0,983	Stechiometryczna	2	2	3
536	0,983	Stechiometryczna	2	2	3
537	0,983	Stechiometryczna	2	2	3
538	0,982	Stechiometryczna	2	2	3
539	0,982	Stechiometryczna	2	2	3
540	0,982	Stechiometryczna	2	2	3
541	0,982	Stechiometryczna	2	2	3
542	0,982	Stechiometryczna	2	2	3
543	0,981	Stechiometryczna	2	2	3
544	0,981	Stechiometryczna	2	2	3
545	0,981	bogata	5	5	2
546	0,981	bogata	5	5	2
547	0,981	bogata	5	5	2
548	0,980	bogata	5	5	2
549	0,980	bogata	5	5	2
550	0,980	bogata	5	5	2
551	0,980	bogata	5	5	2
552	0,980	bogata	5	5	2
553	0,979	bogata	5	5	2
554	0,979	bogata	5	5	2
555	0,979	bogata	5	5	2
556	0,979	bogata	5	5	2
557	0,979	bogata	5	5	2
558	0,978	bogata	5	5	2
559	0,978	bogata	5	5	2
560	0,978	bogata	5	5	2
561	0,978	bogata	5	5	2
562	0,978	bogata	5	5	2
563	0,977	bogata	5	5	2
564	0,977	bogata	5	5	2

565	0,977	bogata	5	5	2
566	0,977	bogata	5	5	2
567	0,977	bogata	5	5	2
568	0,976	bogata	5	5	2
569	0,976	bogata	5	5	2
570	0,976	bogata	5	5	2
571	0,976	bogata	5	5	2
572	0,976	bogata	5	5	2
573	0,975	bogata	5	5	2
574	0,975	bogata	5	5	2
575	0,975	bogata	5	5	2
576	0,975	bogata	5	5	2
577	0,975	bogata	5	5	2
578	0,974	bogata	5	5	2
579	0,974	bogata	5	5	2
580	0,974	bogata	5	5	2
581	0,974	bogata	5	5	2
582	0,974	bogata	5	5	2
583	0,973	bogata	5	5	2
584	0,973	bogata	5	5	2
585	0,973	bogata	5	5	2
586	0,973	bogata	5	5	2
587	0,973	bogata	5	5	2
588	0,972	bogata	5	5	2
589	0,972	bogata	5	5	2
590	0,972	bogata	5	5	2
591	0,972	bogata	5	5	2
592	0,972	bogata	5	5	2
593	0,971	bogata	5	5	2
594	0,971	bogata	5	5	2
595	0,971	bogata	5	5	2
596	0,971	bogata	5	5	2
597	0,971	bogata	5	5	2
598	0,970	bogata	5	5	2
599	0,970	bogata	5	5	2
600	0,970	bogata	5	5	2
601	0,970	bogata	5	5	2
602	0,970	bogata	5	5	2
603	0,969	bogata	5	5	2
604	0,969	bogata	5	5	2
605	0,969	bogata	5	5	2
606	0,969	bogata	5	5	2
607	0,969	bogata	5	5	2
608	0,968	bogata	5	5	2
609	0,968	bogata	5	5	2
610	0,968	bogata	5	5	2
611	0,968	bogata	5	5	2

612	0,968	bogata	5	5	2
613	0,967	bogata	5	5	2
614	0,967	bogata	5	5	2
615	0,967	bogata	5	5	2
616	0,967	bogata	5	5	2
617	0,967	bogata	5	5	2
618	0,966	bogata	5	5	2
619	0,966	bogata	5	5	2
620	0,966	bogata	5	5	2
621	0,966	bogata	5	5	2
622	0,966	bogata	5	5	2
623	0,965	bogata	5	5	2
624	0,965	bogata	5	5	2
625	0,965	bogata	5	5	2
626	0,965	bogata	5	5	2
627	0,965	bogata	5	5	2
628	0,964	bogata	5	5	2
629	0,964	bogata	5	5	2
630	0,964	bogata	5	5	2
631	0,964	bogata	5	5	2
632	0,964	bogata	5	5	2
633	0,963	bogata	5	5	2
634	0,963	bogata	5	5	2
635	0,963	bogata	5	5	2
636	0,963	bogata	5	5	2
637	0,963	bogata	5	5	2
638	0,962	bogata	5	5	2
639	0,962	bogata	5	5	2
640	0,962	bogata	5	5	2
641	0,962	bogata	5	5	2
642	0,962	bogata	5	5	2
643	0,961	bogata	5	5	2
644	0,961	bogata	5	5	2
645	0,961	bogata	5	5	2
646	0,961	bogata	5	5	2
647	0,961	bogata	5	5	2
648	0,960	bogata	5	5	2
649	0,960	bogata	5	5	2
650	0,960	bogata	5	5	2
651	0,960	bogata	5	5	2
652	0,960	bogata	5	5	2
653	0,959	bogata	5	5	2
654	0,959	bogata	5	5	2
655	0,959	bogata	5	5	2
656	0,959	bogata	5	5	2
657	0,959	bogata	5	5	2
658	0,958	bogata	5	5	2

659	0,958	bogata	5	5	2
660	0,958	bogata	5	5	2
661	0,958	bogata	5	5	2
662	0,958	bogata	5	5	2
663	0,957	bogata	5	5	2
664	0,957	bogata	5	5	2
665	0,957	bogata	5	5	2
666	0,957	bogata	5	5	2
667	0,957	bogata	5	5	2
668	0,956	bogata	5	5	2
669	0,956	bogata	5	5	2
670	0,956	bogata	5	5	2
671	0,956	bogata	5	5	2
672	0,956	bogata	5	5	2
673	0,955	bogata	5	5	2
674	0,955	bogata	5	5	2
675	0,955	bogata	5	5	2
676	0,955	bogata	5	5	2
677	0,955	bogata	5	5	2
678	0,954	bogata	5	5	2
679	0,954	bogata	5	5	2
680	0,954	bogata	5	5	2
681	0,954	bogata	5	5	2
682	0,954	bogata	5	5	2
683	0,953	bogata	5	5	2
684	0,953	bogata	5	5	2
685	0,953	bogata	5	5	2
686	0,953	bogata	5	5	2
687	0,953	bogata	5	5	2
688	0,952	bogata	5	5	2
689	0,952	bogata	5	5	2
690	0,952	bogata	5	5	2
691	0,952	bogata	5	5	2
692	0,952	bogata	5	5	2
693	0,951	bogata	5	5	2
694	0,951	bogata	5	5	2
695	0,951	bogata	5	5	2
696	0,951	bogata	5	5	2
697	0,951	bogata	5	5	2
698	0,950	bogata	5	5	2
699	0,950	bogata	5	5	2
700	0,950	bogata	5	5	2
701	0,950	bogata	5	5	2
702	0,950	bogata	5	5	2
703	0,949	bogata	5	5	2
704	0,949	bogata	5	5	2
705	0,949	bogata	5	5	2

706	0,949	bogata	5	5	2
707	0,949	bogata	5	5	2
708	0,948	bogata	5	5	2
709	0,948	bogata	5	5	2
710	0,948	bogata	5	5	2
711	0,948	bogata	5	5	2
712	0,948	bogata	5	5	2
713	0,947	bogata	5	5	2
714	0,947	bogata	5	5	2
715	0,947	bogata	5	5	2
716	0,947	bogata	5	5	2
717	0,947	bogata	5	5	2
718	0,946	bogata	5	5	2
719	0,946	bogata	5	5	2
720	0,946	bogata	5	5	2
721	0,946	bogata	5	5	2
722	0,946	bogata	5	5	2
723	0,945	bogata	5	5	2
724	0,945	bogata	5	5	2
725	0,945	bogata	5	5	2
726	0,945	bogata	5	5	2
727	0,945	bogata	5	5	2
728	0,944	bogata	5	5	2
729	0,944	bogata	5	5	2
730	0,944	bogata	5	5	2
731	0,944	bogata	5	5	2
732	0,944	bogata	5	5	2
733	0,943	bogata	5	5	2
734	0,943	bogata	5	5	2
735	0,943	bogata	5	5	2
736	0,943	bogata	5	5	2
737	0,943	bogata	5	5	2
738	0,942	bogata	5	5	2
739	0,942	bogata	5	5	2
740	0,942	bogata	5	5	2
741	0,942	bogata	5	5	2
742	0,942	bogata	5	5	2
743	0,941	bogata	5	5	2
744	0,941	bogata	5	5	2
745	0,941	bogata	5	5	2
746	0,941	bogata	5	5	2
747	0,941	bogata	5	5	2
748	0,940	bogata	5	5	2
749	0,940	bogata	5	5	2
750	0,940	bogata	5	5	2
751	0,940	bogata	5	5	2
752	0,940	bogata	5	5	2

753	0,939	bogata	5	5	2
754	0,939	bogata	5	5	2
755	0,939	bogata	5	5	2
756	0,939	bogata	5	5	2
757	0,939	bogata	5	5	2
758	0,938	bogata	5	5	2
759	0,938	bogata	5	5	2
760	0,938	bogata	5	5	2
761	0,938	bogata	5	5	2
762	0,938	bogata	5	5	2
763	0,937	bogata	5	5	2
764	0,937	bogata	5	5	2
765	0,937	bogata	5	5	2
766	0,937	bogata	5	5	2
767	0,937	bogata	5	5	2
768	0,936	bogata	5	5	2
769	0,936	bogata	5	5	2
770	0,936	bogata	5	5	2
771	0,936	bogata	5	5	2
772	0,936	bogata	5	5	2
773	0,935	bogata	5	5	2
774	0,935	bogata	5	5	2
775	0,935	bogata	5	5	2
776	0,935	bogata	5	5	2
777	0,935	bogata	5	5	2
778	0,934	bogata	5	5	2
779	0,934	bogata	5	5	2
780	0,934	bogata	5	5	2
781	0,934	bogata	5	5	2
782	0,934	bogata	5	5	2
783	0,933	bogata	5	5	2
784	0,933	bogata	5	5	2
785	0,933	bogata	5	5	2
786	0,933	bogata	5	5	2
787	0,933	bogata	5	5	2
788	0,932	bogata	5	5	2
789	0,932	bogata	5	5	2
790	0,932	bogata	5	5	2
791	0,932	bogata	5	5	2
792	0,932	bogata	5	5	2
793	0,931	bogata	5	5	2
794	0,931	bogata	5	5	2
795	0,931	bogata	5	5	2
796	0,931	bogata	5	5	2
797	0,931	bogata	5	5	2
798	0,930	bogata	5	5	2
799	0,930	bogata	5	5	2

800	0,930	bogata	5	5	2
801	0,930	bogata	5	5	2
802	0,930	bogata	5	5	2
803	0,929	bogata	5	5	2
804	0,929	bogata	5	5	2
805	0,929	bogata	5	5	2
806	0,929	bogata	5	5	2
807	0,929	bogata	5	5	2
808	0,928	bogata	5	5	2
809	0,928	bogata	5	5	2
810	0,928	bogata	5	5	2
811	0,928	bogata	5	5	2
812	0,928	bogata	5	5	2
813	0,927	bogata	5	5	2
814	0,927	bogata	5	5	2
815	0,927	bogata	5	5	2
816	0,927	bogata	5	5	2
817	0,927	bogata	5	5	2
818	0,926	bogata	5	5	2
819	0,926	bogata	5	5	2
820	0,926	bogata	5	5	2
821	0,926	bogata	5	5	2
822	0,926	bogata	5	5	2
823	0,925	bogata	5	5	2
824	0,925	bogata	5	5	2
825	0,925	bogata	5	5	2
826	0,925	bogata	5	5	2
827	0,925	bogata	5	5	2
828	0,924	bogata	5	5	2
829	0,924	bogata	5	5	2
830	0,924	bogata	5	5	2
831	0,924	bogata	5	5	2
832	0,924	bogata	5	5	2
833	0,923	bogata	5	5	2
834	0,923	bogata	5	5	2
835	0,923	bogata	5	5	2
836	0,923	bogata	5	5	2
837	0,923	bogata	5	5	2
838	0,922	bogata	5	5	2
839	0,922	bogata	5	5	2
840	0,922	bogata	5	5	2
841	0,922	bogata	5	5	2
842	0,922	bogata	5	5	2
843	0,921	bogata	5	5	2
844	0,921	bogata	5	5	2
845	0,921	bardzo bogata	6	6	1
846	0,921	bardzo bogata	6	6	1

847	0,921	bardzo bogata	6	6	1
848	0,920	bardzo bogata	6	6	1
849	0,920	bardzo bogata	6	6	1
850	0,920	bardzo bogata	6	6	1
851	0,920	bardzo bogata	6	6	1
852	0,920	bardzo bogata	6	6	1
853	0,919	bardzo bogata	6	6	1
854	0,919	bardzo bogata	6	6	1
855	0,919	bardzo bogata	6	6	1
856	0,919	bardzo bogata	6	6	1
857	0,919	bardzo bogata	6	6	1
858	0,918	bardzo bogata	6	6	1
859	0,918	bardzo bogata	6	6	1
860	0,918	bardzo bogata	6	6	1
861	0,918	bardzo bogata	6	6	1
862	0,918	bardzo bogata	6	6	1
863	0,917	bardzo bogata	6	6	1
864	0,917	bardzo bogata	6	6	1
865	0,917	bardzo bogata	6	6	1
866	0,917	bardzo bogata	6	6	1
867	0,917	bardzo bogata	6	6	1
868	0,916	bardzo bogata	6	6	1
869	0,916	bardzo bogata	6	6	1
870	0,916	bardzo bogata	6	6	1
871	0,916	bardzo bogata	6	6	1
872	0,916	bardzo bogata	6	6	1
873	0,915	bardzo bogata	6	6	1
874	0,915	bardzo bogata	6	6	1
875	0,915	bardzo bogata	6	6	1
876	0,915	bardzo bogata	6	6	1
877	0,915	bardzo bogata	6	6	1
878	0,914	bardzo bogata	6	6	1
879	0,914	bardzo bogata	6	6	1
880	0,914	bardzo bogata	6	6	1
881	0,914	bardzo bogata	6	6	1
882	0,914	bardzo bogata	6	6	1
883	0,913	bardzo bogata	6	6	1
884	0,913	bardzo bogata	6	6	1
885	0,913	bardzo bogata	6	6	1
886	0,913	bardzo bogata	6	6	1
887	0,913	bardzo bogata	6	6	1
888	0,912	bardzo bogata	6	6	1
889	0,912	bardzo bogata	6	6	1
890	0,912	bardzo bogata	6	6	1
891	0,912	bardzo bogata	6	6	1
892	0,912	bardzo bogata	6	6	1
893	0,911	bardzo bogata	6	6	1

894	0,911	bardzo bogata	6	6	1
895	0,911	bardzo bogata	6	6	1
896	0,911	bardzo bogata	6	6	1
897	0,911	bardzo bogata	6	6	1
898	0,910	bardzo bogata	6	6	1
899	0,910	bardzo bogata	6	6	1
900	0,910	bardzo bogata	6	6	1
901	0,910	bardzo bogata	6	6	1
902	0,910	bardzo bogata	6	6	1
903	0,909	bardzo bogata	6	6	1
904	0,909	bardzo bogata	6	6	1
905	0,909	bardzo bogata	6	6	1
906	0,909	bardzo bogata	6	6	1
907	0,909	bardzo bogata	6	6	1
908	0,908	bardzo bogata	6	6	1
909	0,908	bardzo bogata	6	6	1
910	0,908	bardzo bogata	6	6	1
911	0,908	bardzo bogata	6	6	1
912	0,908	bardzo bogata	6	6	1
913	0,907	bardzo bogata	6	6	1
914	0,907	bardzo bogata	6	6	1
915	0,907	bardzo bogata	6	6	1
916	0,907	bardzo bogata	6	6	1
917	0,907	bardzo bogata	6	6	1
918	0,906	bardzo bogata	6	6	1
919	0,906	bardzo bogata	6	6	1
920	0,906	bardzo bogata	6	6	1
921	0,906	bardzo bogata	6	6	1
922	0,906	bardzo bogata	6	6	1
923	0,905	bardzo bogata	6	6	1
924	0,905	bardzo bogata	6	6	1
925	0,905	bardzo bogata	6	6	1
926	0,905	bardzo bogata	6	6	1
927	0,905	bardzo bogata	6	6	1
928	0,904	bardzo bogata	6	6	1
929	0,904	bardzo bogata	6	6	1
930	0,904	bardzo bogata	6	6	1
931	0,904	bardzo bogata	6	6	1
932	0,904	bardzo bogata	6	6	1
933	0,903	bardzo bogata	6	6	1
934	0,903	bardzo bogata	6	6	1
935	0,903	bardzo bogata	6	6	1
936	0,903	bardzo bogata	6	6	1
937	0,903	bardzo bogata	6	6	1
938	0,902	bardzo bogata	6	6	1
939	0,902	bardzo bogata	6	6	1
940	0,902	bardzo bogata	6	6	1

941	0,902	bardzo bogata	6	6	1
942	0,902	bardzo bogata	6	6	1
943	0,901	bardzo bogata	6	6	1
944	0,901	bardzo bogata	6	6	1
945	0,901	bardzo bogata	6	6	1
946	0,901	bardzo bogata	6	6	1
947	0,901	bardzo bogata	6	6	1
948	0,900	bardzo bogata	6	6	1
949	0,900	bardzo bogata	6	6	1
950	0,900	bardzo bogata	6	6	1
951	0,900	bardzo bogata	6	6	1
952	0,900	bardzo bogata	6	6	1
953	0,899	bardzo bogata	6	6	1
954	0,899	bardzo bogata	6	6	1
955	0,899	bardzo bogata	6	6	1
956	0,899	bardzo bogata	6	6	1
957	0,899	bardzo bogata	6	6	1
958	0,898	bardzo bogata	6	6	1
959	0,898	bardzo bogata	6	6	1
960	0,898	bardzo bogata	6	6	1
961	0,898	bardzo bogata	6	6	1
962	0,898	bardzo bogata	6	6	1
963	0,897	bardzo bogata	6	6	1
964	0,897	bardzo bogata	6	6	1
965	0,897	bardzo bogata	6	6	1
966	0,897	bardzo bogata	6	6	1
967	0,897	bardzo bogata	6	6	1
968	0,896	bardzo bogata	6	6	1
969	0,896	bardzo bogata	6	6	1
970	0,896	bardzo bogata	6	6	1
971	0,896	bardzo bogata	6	6	1
972	0,896	bardzo bogata	6	6	1
973	0,895	bardzo bogata	6	6	1
974	0,895	bardzo bogata	6	6	1
975	0,895	bardzo bogata	6	6	1
976	0,895	bardzo bogata	6	6	1
977	0,895	bardzo bogata	6	6	1
978	0,894	bardzo bogata	6	6	1
979	0,894	bardzo bogata	6	6	1
980	0,894	bardzo bogata	6	6	1
981	0,894	bardzo bogata	6	6	1
982	0,894	bardzo bogata	6	6	1
983	0,893	bardzo bogata	6	6	1
984	0,893	bardzo bogata	6	6	1
985	0,893	bardzo bogata	6	6	1
986	0,893	bardzo bogata	6	6	1
987	0,893	bardzo bogata	6	6	1

988	0,892	bardzo bogata	6	6	1
989	0,892	bardzo bogata	6	6	1
990	0,892	bardzo bogata	6	6	1
991	0,892	bardzo bogata	6	6	1
992	0,892	bardzo bogata	6	6	1
993	0,891	bardzo bogata	6	6	1
994	0,891	bardzo bogata	6	6	1
995	0,891	bardzo bogata	6	6	1
996	0,891	bardzo bogata	6	6	1
997	0,891	bardzo bogata	6	6	1
998	0,890	bardzo bogata	6	6	1
999	0,890	bardzo bogata	6	6	1
1000	0,890	bardzo bogata	6	6	1

W celu dodatkowej weryfikacji założeń algorytmu szacowania przebadano kilka dodatkowych pojazdów Tabela 14, szczegółowe dane przedstawiono na wydrukach 1-19, dane zebrano za pomocą analizatora TEXA (rys.52). Dane potwierdzają poprawność zastosowanego algorytmu szacowania.

Tabela 14. Pomiary dodatkowe – pojazdy dodatkowe

Wydruk	CO [%]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	λ	CO [mg/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
1	0,1	16,1	0,14	382	13	0,9892	272,7	166,7	5,8
2	0,02	15,7	0	144	4	0,9940	54,5	62,8	1,8
3	1,01	14,6	0,91	642	42	0,9871	2754,5	280,1	18,8
4	2,35	13,8	0,49	825	14	0,9276	6409,1	360,0	6,3
5	2,64	13,6	0,33	707	4	0,9175	7200,0	308,5	1,8
6	1,6	14,5	0,23	561	5	0,9462	4363,6	244,8	2,2
7	0,44	15,4	0,2	138	2	0,9913	1200,0	60,2	0,9
8	0,03	15,8	0	68	3	0,9966	81,8	29,7	1,3
9	0,06	15,6	0,03	153	4	0,9938	163,6	66,8	1,8
10	0,4	15,3	0,15	117	2	0,9910	1090,9	51,1	0,9
11	0,04	15,6	0,09	29	6	1,0017	109,1	12,7	2,7
12	0,2	15,4	0,17	112	4	0,9976	545,5	48,9	1,8
13	0,04	15,6	0,13	11	4	1,0041	109,1	4,8	1,8
14	0,59	13,5	1,76	155	126	1,0600	1609,1	67,6	56,4
15	0,54	13,7	1,74	170	125	1,0593	1472,7	74,2	55,9
16	0,01	12,9	0	20	2	0,9987	27,3	8,7	0,9
17	0,01	14	0,08	19	2	1,0024	27,3	7,9	0,9
18	0,04	15,2	0,03	29	2	0,9991	109,1	12,7	0,9
19	0,04	13,9	0,1	27	3	1,0025	109,1	11,8	1,3

Wydruki 1–19 przedstawiają szczegółowe wyniki pomiarów uzyskanych w toku przeprowadzonych eksperymentów, obejmujących charakterystykę pracy silnika oraz poziom

emisji kluczowych składników spalin w zróżnicowanych warunkach testowych. Dane te zebrano z dodatkowych pojazdów, które nie brały udziału w głównym etapie badań, w celu zweryfikowania poprawności oraz efektywności opracowanego algorytmu szacowania emisji na podstawie wskazań sondy lambda. Uzyskane rezultaty jednoznacznie potwierdziły skuteczność zaproponowanej metody, stanowiąc solidną podstawę do jej dalszego rozwoju oraz zastosowań praktycznych.

Wydruk 1

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,05	% vol.
CO ₂	16,1	% vol.
HC	382	ppm vol.
O ₂	0,14	% vol.
NO _x	13	% vol.
CO _{corr}	0,1	% vol.
HC _{corr}	382	ppm vol.
Lambda	0,990	

Wydruk 2

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,02	% vol.
CO ₂	15,7	% vol.
HC	144	ppm vol.
O ₂	0,00	% vol.
NO _x	4	% vol.
CO _{corr}	0,0	% vol.
HC _{corr}	144	ppm vol.
Lambda	0,994	

Wydruk 3

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	1,01	% vol.
CO ₂	14,6	% vol.
HC	642	ppm vol.
O ₂	0,91	% vol.
NO _x	42	% vol.
CO _{corr}	1,0	% vol.
HC _{corr}	642	ppm vol.
Lambda	0,988	

Wydruk 4

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	2,35	% vol.
CO ₂	13,8	% vol.
HC	825	ppm vol.
O ₂	0,49	% vol.
NO _x	14	% vol.
CO _{corr}	2,4	% vol.
HC _{corr}	825	ppm vol.
Lambda	0,927	

Wydruk 5

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	2,64	% vol.
CO ₂	13,6	% vol.
HC	707	ppm vol.
O ₂	0,33	% vol.
NO _x	4	% vol.
CO _{corr}	2,6	% vol.
HC _{corr}	707	ppm vol.
Lambda	0,917	

Wydruk 6

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	1,60	% vol.
CO ₂	14,5	% vol.
HC	561	ppm vol.
O ₂	0,23	% vol.
NO _x	5	% vol.
CO _{corr}	1,6	% vol.
HC _{corr}	561	ppm vol.
Lambda	0,946	

Wydruk 7

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,44	% vol.
CO ₂	15,4	% vol.
HC	138	ppm vol.
O ₂	0,20	% vol.
NO _x	2	% vol.
CO _{corr}	0,4	% vol.
HC _{corr}	138	ppm vol.
Lambda	0,991	

Wydruk 8

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,03	% vol.
CO2	15,8	% vol.
HC	68	ppm vol.
O2	0,00	% vol.
NOx	3	% vol.
COcorr	0,0	% vol.
HCcorr	68	ppm vol.
Lambda	0,997	

Wydruk 9

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,06	% vol.
CO2	15,6	% vol.
HC	153	ppm vol.
O2	0,03	% vol.
NOx	4	% vol.
COcorr	0,1	% vol.
HCcorr	153	ppm vol.
Lambda	0,994	

Wydruk 10

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,40	% vol.
CO2	15,3	% vol.
HC	117	ppm vol.
O2	0,15	% vol.
NOx	2	% vol.
COcorr	0,4	% vol.
HCcorr	117	ppm vol.
Lambda	0,991	

Wydruk 11

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,04	% vol.
CO2	15,6	% vol.
HC	29	ppm vol.
O2	0,09	% vol.
NOx	6	% vol.
COcorr	0,0	% vol.
HCcorr	29	ppm vol.
Lambda	1,002	

Wydruk 12

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,20	% vol.
CO2	15,4	% vol.
HC	112	ppm vol.
O2	0,17	% vol.
NOx	4	% vol.
COcorr	0,2	% vol.
HCcorr	112	ppm vol.
Lambda	0,998	

Wydruk 13

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	----	rpm
Temperatura silnika	----	°C
CO	0,04	% vol.
CO2	15,6	% vol.
HC	11	ppm vol.
O2	0,13	% vol.
NOx	4	% vol.
COcorr	0,0	% vol.
HCcorr	11	ppm vol.
Lambda	1,004	

Wydruk 14

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	760	rpm
Temperatura silnika	19	°C
CO	0,59	% vol.
CO2	13,5	% vol.
HC	146	ppm vol.
O2	1,76	% vol.
NOx	126	% vol.
COcorr	0,6	% vol.
HCcorr	155	ppm vol.
Lambda	1,063	

Wydruk 15

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	760	rpm
Temperatura silnika	19	°C
CO	0,54	% vol.
CO2	13,7	% vol.
HC	162	ppm vol.
O2	1,74	% vol.
NOx	125	% vol.
COcorr	0,6	% vol.
HCcorr	170	ppm vol.
Lambda	1,062	

Wydruk 16

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	550	rpm
Temperatura silnika	80	°C
CO	0,01	% vol.
CO2	12,9	% vol.
HC	17	ppm vol.
O2	0,00	% vol.
NOx	2	% vol.
COcorr	0,0	% vol.
HCcorr	20	ppm vol.
Lambda	0,999	

Wydruk 17

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	550	rpm
Temperatura silnika	80	°C
CO	0,01	% vol.
CO2	14,0	% vol.
HC	18	ppm vol.
O2	0,08	% vol.
NOx	2	% vol.
COcorr	0,0	% vol.
HCcorr	19	ppm vol.
Lambda	1,003	

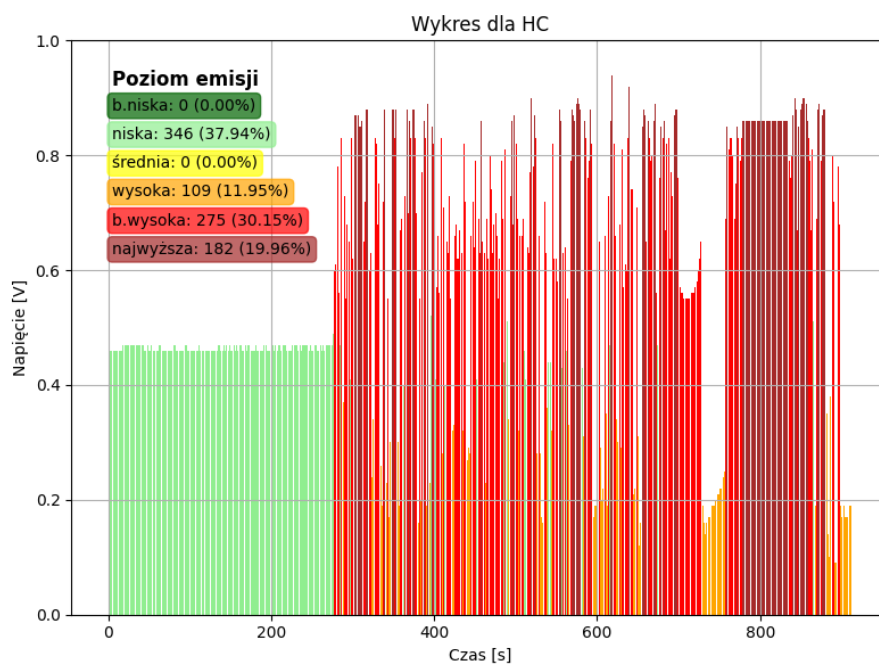
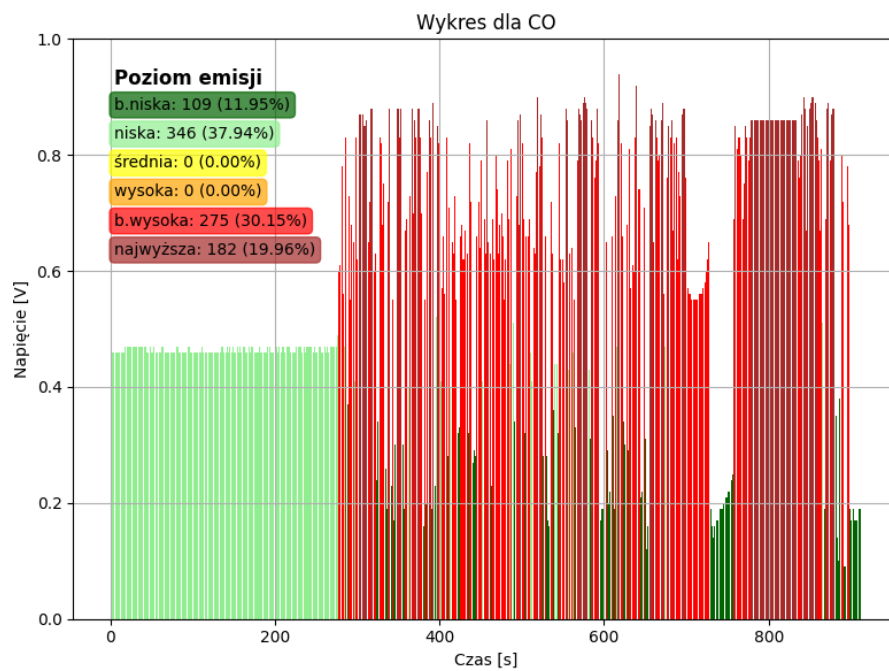
Wydruk 18

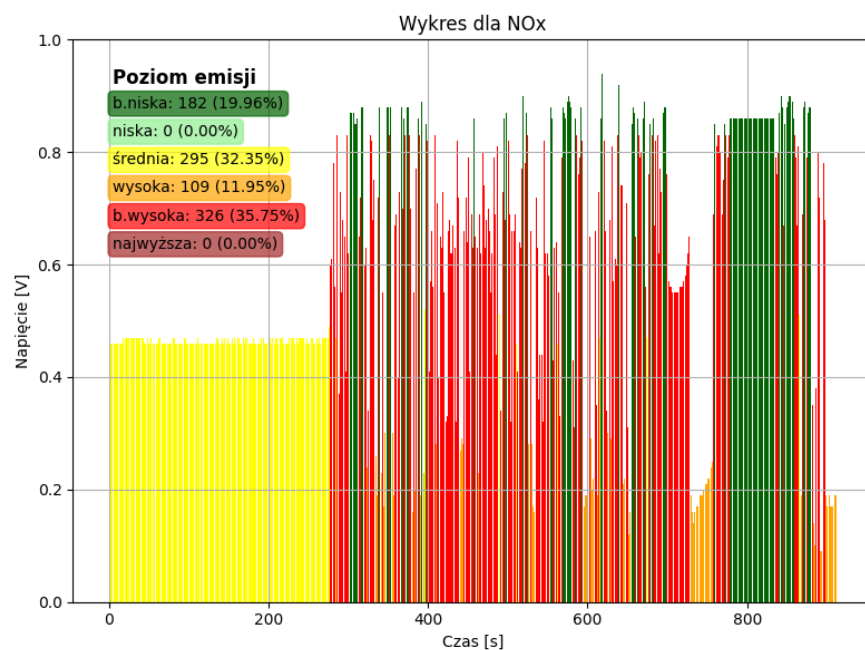
Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	650	rpm
Temperatura silnika	65	°C
CO	0,04	% vol.
CO2	15,2	% vol.
HC	29	ppm vol.
O2	0,03	% vol.
NOx	2	% vol.
COcorr	0,0	% vol.
HCcorr	29	ppm vol.
Lambda	0,999	

Wydruk 19

Wynik pomiaru		
	Wartość odczytana	Jednostka
Obroty silnika	550	rpm
Temperatura silnika	80	°C
CO	0,04	% vol.
CO2	13,9	% vol.
HC	25	ppm vol.
O2	0,10	% vol.
NOx	3	% vol.
COcorr	0,0	% vol.
HCcorr	27	ppm vol.
Lambda	1,003	

Dodatkowe wykresy: Renault Modus –





Dodatkowe wykresy Fiat Punto

