

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Tomasz Szczepański

**Metoda oceny użytkowych właściwości
silnika spalinowego w stanach dynamicznych**

Promotor
prof. zw. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek

Warszawa, 2015

Spis treści

Streszczenie.....	5
Summary.....	6
Oznaczenia.....	7
1. Definicje pojęć.....	9
2. Analiza stanu wiedzy nt. badań silników spalinowych w stanach dynamicznych.....	14
2.1. Przegląd literatury specjalistycznej.....	14
2.2. Podsumowanie stanu wiedzy.....	26
3. Cel, teza i zakres pracy.....	27
4. Opis proponowanej metody oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych.....	32
4.1. Korekcja przesunięć fazowych w torach pomiarowych.....	32
4.2. Zmiana zależności operatorowych silnika na zależności funkcyjne.....	38
4.3. Wprowadzenie dziedziny zbiorów warunków.....	44
4.4. Niepowtarzalność stanów pracy silnika w danych warunkach pracy.....	48
4.5. Wizualizacja wielowymiarowych zależności.....	53
5. Empiryczna weryfikacja metody oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych.....	57
5.1. Sposób weryfikacji metody.....	57
5.2. Badania empiryczne.....	57
5.3. Przygotowanie wyników badań empirycznych do weryfikacji metody.....	60
6. Zastosowanie i weryfikacja proponowanej metody oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych.....	76
6.1. Korekcja przesunięć fazowych w torach pomiarowych.....	76
6.2. Zmiana zależności operatorowych silnika na zależności funkcyjne.....	85
6.3. Wprowadzenie dziedziny stanów.....	93
6.4. Niepowtarzalność stanów pracy silnika w danych warunkach pracy.....	103
6.5. Wizualizacja wielowymiarowych zależności.....	114
7. Podsumowanie wyników pracy.....	122
7.1. Ocena metody.....	122
7.2. Możliwości wykorzystania metody.....	123
7.3. Propozycje dalszego rozwoju zagadnienia.....	123
Piśmiennictwo.....	125

Streszczenie

Metoda oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych

Praca omawia pięć podstawowych problemów, związanych z analizą pracy silnika spalinowego w stanach dynamicznych. Część teoretyczna pracy stanowi propozycje ich rozwiązania. W efekcie proponowana jest metoda obliczeniowa, służąca do oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych.

Omawiane problemy oraz ich proponowane rozwiązania.

- Przesunięcia fazowe w poszczególnych torach pomiarowych laboratorium hamownianego. Zaproponowano metody korekcji występujących przesunięć: jedną empiryczną i trzy teoretyczne, aby możliwe było ich wzajemne porównanie.
- Operatorowe zależności pomiędzy parametrami wejściowymi i wyjściowymi silnika. Zaproponowano sposób zamiany zależności operatorowych na zależności funkcyjne oraz metodę weryfikacji tego przejścia za pomocą analizy korelacyjnej.
- Wielowymiarowa dziedzina zależności pomiędzy parametrami pracy silnika. Zaproponowano metodę przejścia do dziedziny zbiorów warunków pracy silnika, definiujących zbiory stanów jego pracy.
- Niepowtarzalność stanów pracy silnika dla zadanych warunków jego pracy. Przedstawiono sposób oceny przyczyn zjawiska niepowtarzalności za pomocą teorii liczb rozmytych.
- Trudności z wizualizacją zależności pomiędzy wieloma parametrami pracy silnika. Zaproponowano dwie niezależne metody wizualizacji: jedną do oceny właściwości silnika w pojedynczych stanach pracy, a drugą do oceny zależności na podstawie porównania kilku podobnych zbiorów stanów.

Wszystkie proponowane rozważania przedstawiono również w praktyce, na podstawie wyników trzech testów hamownianych. Każdy test był wykonany kilkakrotnie i dla każdej jego realizacji wykonano niezależne obliczenia. Pozwoliło to na ocenę powtarzalności wniosków formułowanych na podstawie badań za pomocą prezentowanej metody, a tym samym na weryfikację słuszności przedstawianych rozważań. Metoda została zweryfikowana pozytywnie.

Summary

Method of evaluating engine usable properties in dynamic states

The work discusses the five basic problems associated with the analysis of combustion engine work in dynamic states. The theoretical part consist suggestions for their solution. As a result it is proposed the calculation method to evaluate usable properties of engine in dynamic states.

Discussed problems and their proposed solutions.

- The phase shifts in each measurement tracks in the dynamometer laboratory. It is proposed a few methods to compensate of the shifts: one empirical and three theoretical (to compare them).
- Operator relationships between input and output engine parameters. It is proposed the way to change the operator relationships with the functional ones and the method of verification this change using correlation analysis.
- Multidimensional relation field between engine work parameters. It is presented the method of transition to the field of sets of engine working conditions defining sets of engine working states.
- Unrepeatability of engine working states in imposed working conditions. It is proposed the way to evaluate the reason of unrepeatability using the theory of fuzzy numbers.
- Difficulties with visualization the relationship between the number of engine working parameters. Two independent methods have been proposed to visualization: one to evaluation engine usable properties in a single working states, and second to evaluation relationships in the way of comparison of a few similar sets of working states.

All proposed considerations are presented also in practice, based on the results of the three dynamometer tests. Each test was performed several times and then for each one independent calculations was done. Thereby it was possible to estimate repeatability of conclusions that was drawn from research using presented method. This way it was possible to verify the equity of presented considerations. The method has been positively verified.

Oznaczenia

Symbole matematyczne

f_x – funkcja opisująca zależność x

F_x – operator opisujący zależność x

F_{ch} – funkcja charakterystyczna (w teorii liczb rozmytych)

H – histogram

N – moc zbioru

P – wartość progowa dla funkcji charakterystycznych

W – wskaźnik niepowtarzalności

σ – odchylenie standardowe

μ – wartość średnia

Symbole fizyczne

E_x – natężenie emisji wybranej substancji x w spalinach

I – moment bezwładności

L – liczba zbiorów warunków lub stanów pracy silnika

M_e – efektywny moment obrotowy generowany przez silnik na wale korbowym

M_r – moment oporów zadawany na wale korbowym silnika

M_r' – pochodna momentu oporów zadawanych na wale korbowym silnika

n – prędkość obrotowa wału korbowego silnika

n' – pochodna prędkości obrotowej wału korbowego silnika

s – parametr sterowania silnikiem

s' – pochodna parametru sterowania silnikiem

t – czas

t_b – bieżąca chwila czasu

T – czas zwłoki (przesunięcie w czasie)

V_a – natężenie przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika

V_s – natężenie przepływu spalin

v – prędkość przepływu gazu

Symbole chemiczne

HC – węglowodory

CO – tlenek węgla

NO_x – tlenki azotu

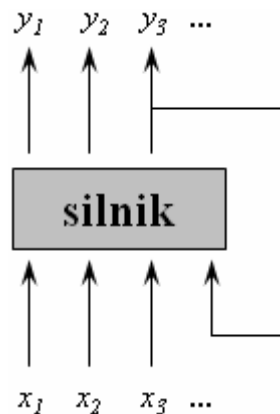
CO₂ – dwutlenek węgla

PM – cząstki stałe

1. Definicje pojęć

Model pracy silnika przyjęty w niniejszej rozprawie

W niniejszej pracy silnik spalinowy jest modelowany jako układ automatyki. W modelu tym wybierane są określone wielkości fizyczne, które definiują jego pracę, a sam silnik stanowi powiązanie między wszystkimi interesującymi wielkościami. Podejście to zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1.1. Model pracy silnika

Jak widać, w układzie można wyróżnić wielkości wejściowe i wyjściowe oraz takie, które można zakwalifikować do obydwu powyższych grup, co stanowi sprzężenie zwrotne w modelu. W przypadku rzeczywistych badań silnika wybór, które wielkości należy uwzględnić oraz które z nich uznać za wejściowe, a które za wyjściowe, zależy od tego, jakie cechy silnika są w danym przypadku interesujące.

Dla takiego modelu możemy zdefiniować kilka pojęć.

Parametry pracy silnika

Praca silnika jest procesem, w którym przebiegają różne zjawiska fizyczne. Każde zjawisko (które w danym przypadku zostało uznane za interesujące) jest reprezentowane przez jedną wielkość fizyczną (lub ewentualnie większą ich liczbę). Każdą taką wielkość, jako że opisuje zjawiska dotyczące pracy silnika, można nazwać parametrem pracy silnika.

Ogół parametrów pracy silnika przyjętych w danym przypadku opisuje więc kompleksowo pracę silnika.

Warunki pracy silnika

Ogół parametrów wejściowych stanowi informację o czynnikach zewnętrznych, wpływających na pracę silnika. Niektóre z nich mogą być niezależne od zjawisk, zachodzących w silniku. Do takich parametrów można zazwyczaj zaliczyć moment oporu zadawany na wał korbowy silnika przez odbiornik mocy. Na stanowisku hamownianym moment oporu zależy jedynie od testu realizowanego w czasie badań. Z kolei inne parametry mogą zależeć od zjawisk, zachodzących w silniku, co nie zmienia faktu, że wpływają one na sposób jego pracy. Przykładem może być prędkość obrotowa wału korbowego silnika, która wpływa bardzo mocno na sposób pracy, ale jednocześnie wynika z ustawienia parametrów wejściowych, będąc niejako odpowiedzią silnika na zadane wymuszenie. W modelu automatyki mamy wówczas do czynienia ze sprzężeniem zwrotnym, kiedy to parametr wyjściowy układu stanowi jednocześnie jego parametr wejściowy.

Zbiór wszystkich parametrów wejściowych (zarówno niezależnych, jak i zależnych) definiuje warunki pracy silnika.

Stan pracy silnika

Stan pracy silnika jest zespołem zjawisk fizycznych, zachodzących w jego wnętrzu. Moglibyśmy go opisywać na przykład takimi parametrami jak średnie ciśnienie użyteczne w cylindrze, wyprzedzenie kąta zapłonu (lub wtrysku), szybkość spalania mieszanki paliwowo-powietrznej itd. W przyjętym modelu nie mamy bezpośredniego wglądu do tego typu informacji, ponieważ mierzymy tylko dane wyjściowe z silnika, a nie to, co dzieje się w środku. Możemy jednak pośrednio wnioskować o stanie pracy silnika na podstawie parametrów wyjściowych. Na przykład ciśnienie w cylindrze przekłada się na moment obrotowy na wale korbowym, a procesy spalania mają swoje odzwierciedlenie między innymi w natężeniu emisji poszczególnych substancji w spalinach.

Dlatego ogół parametrów wyjściowych będzie definiował (pośrednio) stan pracy silnika.

Proces stanu pracy silnika i proces warunków jego pracy

Zbiór kolejno występujących stanów pracy silnika tworzą proces stanu. Odnosi się to również do interpretacji fizycznej, zgodnie z którą stan pracy silnika ujmuje kompleksowo ogół zjawisk zachodzących w jego wnętrzu, a przebieg każdego z tych zjawisk jest procesem,

więc również sam stan pracy stanowi proces. Jest to jednak proces zdefiniowany w dziedzinie wielowymiarowej, gdyż jest opisywany przez wiele parametrów.

W analogiczny sposób zdefiniowany zostanie proces warunków pracy silnika, który stanowi zbiór kolejno występujących warunków.

Na potrzeby niniejszej rozprawy przyjmuje się, że sformułowania: stan pracy i warunki pracy będą odnosiły się do wartości chwilowych. Jeśli będzie mowa o ich przebiegu, zostaną użyte sformułowania: proces stanu i proces warunków.

Proces statyczny i dynamiczny

Proces stanu lub warunków może być statyczny, czyli taki, w którym wszystkie parametry są stałe w czasie, albo dynamiczny, w którym choć jeden parametr zmienia się w czasie.

Warto jednak zauważyć, że pojęcie niezmienności parametrów jest dość umowne. Idealna niezmiennosc bowiem nie istnieje, ponieważ musielibyśmy wykazać absolutny brak jakichkolwiek wahań wartości wszystkich wielkości fizycznych w nieskończenie długim przedziale czasu. Z tych względów stosuje się więc nieco „łagodniejszą” definicję niezmienności. W statycznych badaniach hamownianych zwykle przyjmuje się, że proces jest niezmienny, jeżeli wszystkie jego parametry nie zmieniają się o więcej niż 2% wartości średniej w czasie 2 min.[69] Takie podejście dobrze sprawdza się w przypadku badań, gdzie zjawiska dynamiczne nie są pożądane. Jednak w sytuacji, kiedy chcemy analizować płynne przejścia od procesów dynamicznych do statycznych (i na odwrót), potrzebna jest znacznie mniej wymagająca definicja.

Proponuje się więc przyjęcie, że proces jest statyczny w danej chwili, jeżeli wszystkie jego parametry mają w danej chwili odpowiednio małe wartości pochodnych ich przebiegów. Pojęcie małych wartości w odniesieniu do pochodnych może być różnie definiowane, w zależności od potrzeb w danym badaniu. Takie ujęcie zagadnienia pozwala przede wszystkim pozbyć się wymagania, aby proces był niezmienny w dłuższym przedziale czasu. Jeżeli niezmiennosc (stacyzność) procesu określamy jedynie na podstawie wartości pochodnych przebiegów jego parametrów, to w jednej chwili proces może być dynamiczny, a w chwili sąsiedniej już statyczny (lub na odwrót).

Stan dynamiczny i statyczny, oraz warunki dynamiczne i statyczne

Zgodnie z powyższymi definicjami stan pracy silnika będzie statyczny w danej chwili, jeżeli wartości wszystkich parametrów, które opisują stan pracy, mają w danej chwili odpowiednio małe wartości pochodnych. Podobnie warunki pracy silnika.

Pojęcie statyczności (lub dynamiczności) w danej chwili (na przykład w pojedynczym stanie pracy silnika) może budzić pewne zastrzeżenia. Pojedyncza chwila czasu nie pozwala bowiem na określenie zmienności procesu. Dopiero mając wiedzę o co najmniej dwóch chwilach czasu, możemy stwierdzić, czy proces jest statyczny, czy dynamiczny. Jednak samo pojęcie pochodnej sprowadza informację o dwóch sąsiednich wartościach do jednej, rozpatrywanej chwili czasu. Tak więc możemy mówić o statyczności (lub dynamiczności) stanu (lub warunków) w danej chwili na takiej samej zasadzie, jak mówimy o wartości pochodnej jedynie w danej chwili.

Użytkowe właściwości silnika spalinowego

W przyjętym modelu silnik wiąże parametry wejściowe (warunki pracy) z parametrami wyjściowymi (pośrednio definiującymi stan pracy). Od właściwości samego silnika zależy, jaki będzie skutek wymuszenia za pomocą danych warunków. Dlatego użytkowymi właściwościami silnika będą nazywane zależności pomiędzy parametrami wyjściowymi a wejściowymi.

Można oczywiście zauważyć, że właściwościami silnika są nie tylko zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami, ale również wartości parametrów, które opisują cechy charakterystyczne danego silnika. Jednak w sytuacji, w której te parametry są opisane za pomocą zależności, ich wartość wynika z danej zależności. Dlatego zbiór zależności jest najogólniejszym sposobem opisu właściwości użytkowych silnika, a wartości wybranych parametrów stanowią jedynie szczególną informację, wynikającą z zależności pomiędzy parametrami.

Ogół właściwości użytkowych silnika można więc przedstawiać jako zależność pomiędzy wielowymiarowo opisanym stanem pracy silnika, a wielowymiarowo opisanymi warunkami, albo jako zależności elementarne, o ile uda się takie odnaleźć. Dobrym rozwiązaniem wydaje się również określenie tyłu właściwości, ile jest parametrów, opisujących stan pracy silnika. Wówczas każdy parametr wyjściowy będzie zależał od wszystkich parametrów wejściowych. Każda taka zależność, będąca jedną z właściwości

silnika, będzie w ogólności zależnością operatorową, zależną od całego przebiegu każdego parametru wejściowego.

2. Analiza stanu wiedzy nt. badań silników spalinowych w stanach dynamicznych

2.1. Przegląd literatury specjalistycznej

W porównaniu z innymi dziedzinami wiedzy nie istnieje zbyt wiele publikacji na temat pracy silników spalinowych w warunkach dynamicznych. Po części może to być spowodowane dużymi wymaganiami odnośnie do zaplecza technicznego przy prowadzeniu badań w tym zakresie [27, 60, 84]. Wydaje się jednak, że główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest bardzo duża złożoność problemów, występujących podczas pracy silnika w stanach dynamicznych. Istnieje wiele czynników, wpływających na przebieg procesów dynamicznych, kształtujących zarówno warunki pracy silnika, jak i stany jego pracy [19, 8, 11, 66, 85], co utrudnia w znacznym stopniu usystematyzowanie zjawisk, dotyczących tej dziedziny. Ponadto wyniki pomiarów są bardzo często obarczone dużą niepewnością otrzymanych wartości [12, 45, 48, 46, 49, 64], co utrudnia interpretację wyników i wyciąganie jednoznacznych wniosków z prowadzonych badań.

Pomimo występowania powyższych problemów, powstały jednak pewne publikacje, dotyczące tego zagadnienia. Niektóre z nich stanowią próbę opisaną problematyki dynamiki pracy silnika w sposób bardziej lub mniej całościowy, a inne dotyczą wąskiego, konkretnego problemu, należącego do tej dziedziny. Poniżej przedstawiono przegląd zagadnień, jakie zostały poruszone w istniejących publikacjach na ten temat.

Teoretyczne podstawy pracy silnika w stanach dynamicznych

Istnieją prace, w których prezentowana jest systematyka pojęć, związanych z dynamicznymi procesami pracy silników spalinowych [23, 48]. W wielu publikacjach występuje duża niejednoznaczność lub wręcz niespójność pojęć. To sprawia, że niekiedy trudno jest porównywać ze sobą poszczególne prace badawcze. Dlatego publikacje poświęcone właściwemu nazewnictwu są szczególnie istotne.

Można tutaj wyróżnić pracę prof. Z. Chłopka: *Uwagi do badań silników spalinowych w stanach dynamicznych* [23]. Stanowi ona usystematyzowanie pojęć charakterystycznych dla pracy silnika w stanach dynamicznych, takich jak: warunki pracy, stan pracy, proces wielkości fizycznej. Opisano w niej również propozycję doboru kryteriów kwalifikacji

procesu jako dynamicznego lub statycznego – zarówno jako podstawy teoretyczne, jak również jako praktyczna aplikacja przyjętych kryteriów.

Podobną systematykę wykonał prof. R. Longwic w pracy: *Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpedzania* [48]. Chociaż zasadnicza część pracy poświęcona jest badaniom pracy silnika w czasie swobodnego przyspieszania, jednak rozbudowany wstęp stanowi przegląd pojęć wykorzystywanych w czasie badań w warunkach dynamicznych.

Do podstaw teoretycznych należy również zaliczyć prace dotyczące metodyki badań silników w stanach dynamicznych. Niektóre z nich opisują wymagania stanowiskowe do prowadzenia badań [27, 60, 84], inne dotyczą samego procesu badawczego [19, 8, 11, 14, 27, 66, 84, 85], a jeszcze inne poświęcone są problematyce interpretacji wyników [12, 45, 48, 49, 64].

Warto wspomnieć o pracy prof. M. Cichego: *Nowe metody badawcze silników spalinowych i środki techniczne ich realizacji* [27], poświęconej opracowaniu metod, przyrządów oraz programów komputerowych do badań silników metodą wybiegu i rozbiegu.

Cenną publikacją jest książka dr. W. Voosa: *Dynamic engine testing* [84]. Zaprezentowano w niej podział metod badania silników spalinowych w warunkach dynamicznych, a wśród nich szczególnie wyróżniono badania w warunkach testów symulacyjnych. Ponadto oceniano w niej przydatność różnych rodzajów hamulców do tego typu testów.

Również dr hab. J. Mamala z prof. J. Jantosem w pracy: *Stanowisko dynamiczne do badań układu pojazd – silnik techniką symulacji stanowiskowej* [60] przedstawili wymagania stanowiskowe do badań silników w warunkach dynamicznych.

W kontekście metodyki badań warto wspomnieć o pracach prof. Z. Chłopka: *Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie* [19], *Analiza stanów pracy silnika w warunkach eksploatacji trakcyjnej* (wraz z dr. Z. Danielczykiem i prof. S. Kruczyńskim) [8], *Analiza dynamiczna emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym* (wraz z mgr. M. Pawlickim i mgr. R. Sypowiczem) [11] oraz: *Testy dynamiczne do badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych* (wraz z mgr. J. Rostkowskim) [14]. W pierwszej z nich znajduje się przegląd metod badań silników w warunkach, które mają symulować rzeczywiste warunki pracy. W drugiej i trzeciej publikacji przedstawiono systematykę warunków dynamicznych pracy silnika (m.in. na podstawie badań

stanowiskowych w teście EKG – regulamin 83). Ostatnia wspomniana praca omawia natomiast i porównuje wybrane testy jezdne wykonywane na hamowni podwoziowej.

Praca dr. J. Nuszkwoskiego i dr. G. Thompsona: *The influence of accelerator pedal position control during transient laboratory testing on heavy duty diesel engine* [66] ukazuje z kolei wpływ sposobu naciskania pedału przyspieszenia w czasie testów jezdnych na wyniki pomiarów natężenia emisji substancji toksycznych. Rzuca to pewne światło na wrażliwość silnika na warunki dynamiczne, oraz na potrzebę precyzyjnego doboru metodyki badań.

Do ciekawych wniosków doszedł też dr J. Wang (wraz ze współautorami) w pracy: *Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle sizer* [85]. Opisany został w niej wpływ zastosowanego paliwa w dynamicznych testach jezdnych. Dla niektórych paliw przyspieszenie pojazdu nie miało większego znaczenia i natężenie emisji badanych substancji w spalinach było uzależniane głównie od momentu obrotowego i od prędkości obrotowej. Dla niektórych paliw jednak przyspieszenie pojazdu (a więc dynamiczność procesu pracy silnika) miało kluczowe znaczenie przy pomiarach tego typu.

W kontekście interpretacji wyników pomiarów przy badaniu silnika w warunkach dynamicznych przydatne okażą się badania prof. Z. Chłopka, mgr. M. Pawlickiego i mgr. R. Sypowicza przedstawione w pracy: *Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne* [12]. Udowodniono w nich, że rozkład odchyłeń standardowych wartości natężenia emisji zanieczyszczeń w spalinach (w czasie testów dynamicznych) od wartości oczekiwanej nie pokrywa się z rozkładem normalnym.

Podobnymi zagadnieniami zajmował się prof. R. Longwic w pracach: *Cycle – to cycle variations of the parameters of the combustion process in the conditions of free running up of the diesel engine* [49] oraz: *Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania* [48]. Stanowią one próbę odpowiedzi na pytanie, skąd bierze się niepowtarzalność wyników wartości mierzonych podczas pracy silnika w warunkach swobodnego rozpędzania.

Również prof. G. Litak (wraz ze współautorami) w pracy: *Cycle-to-cycle oscillations of heat release in a spark ignition engine* [45] poruszył problem zmienności i niepowtarzalności zarejestrowanych parametrów procesu spalania oraz wtrysku w silniku.

Porównanie stanów statycznych i dynamicznych

Spora część literatury poświęcona jest porównaniu parametrów pracy silnika w stanach statycznych z parametrami pracy w stanach dynamicznych [7, 16, 22, 9, 39, 43, 48, 81]. Choć prace te zazwyczaj różnią się stawianymi celami badań, a więc ich wyniki trudno jest porównać, można z nich wyciągnąć bardzo ważny, wspólny wniosek. Procesy, zachodzące w silniku w czasie pracy statycznej i dynamicznej, są w dużej mierze różne, czego konsekwencją są różne wartości mierzonych parametrów, opisujących stan pracy silnika. Powyższy wniosek jest o tyle ważny, że uzasadnia celowość prowadzenia wszelkiego rodzaju prac, zmierzających do poznania zależności, rządzących pracą silnika w (słabo poznanych jak dotąd) stanach dynamicznych.

Prof. Z. Chłopek podjął ten temat w pracach: *Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego* [16], *Statyczne testy badawcze silników spalinowych do symulacji testów dynamicznych* [22] oraz (wraz z dr. D. Domańskim): *Optymalizacja algorytmów sterowania silnika o zapłonie samoczynnym* [9]. W pierwszej przytoczonej pracy porównano różne dynamiczne testy jezdne, a otrzymywane wartości zestawiano z wartościami, odpowiadającymi pracy w warunkach statycznych. Wyniki były zasadniczo różne. Druga publikacja dotyczy tworzenia testów statycznych w oparciu o statystyki występowania poszczególnych stanów pracy silnika w testach dynamicznych. Zwrócona została tam też szczególna uwaga na wrażliwość otrzymywanych wyników na kryteria doboru parametrów. W ostatniej pracy podjęto temat optymalizacji parametrów sterowania silnikiem w warunkach dynamicznych na podstawie doboru parametrów w warunkach statycznych.

Praca dr J. Blacka i prof. P. Eastwooda: *Diesel engine transient control and emissions response during a European extra-urban drive cycle (EUDC)* [7] przedstawia porównanie wyników emisji zanieczyszczeń w stanach, występujących w teście EUDC oraz w podobnych stanach statycznych, gdzie kryterium podobieństwa były: zbliżone wartości momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz zużycie paliwa. Wykazano również, że optymalizacja dawkowania paliwa oraz sterowanie zaworem EGR na podstawie stanów statycznych nie jest korzystna.

Dr R. Kee i dr G. Blair w pracy *Acceleration test method for a high performance two-stroke racing engine* [39] zajmowali się pracą silnika w warunkach rozpędzania zdeterminowanych przez parametry zamontowanego koła masowego. Powstałe w ten sposób warunki dynamiczne porównywano z odpowiadającymi im warunkami statycznymi. Również

tutaj widoczna była wyraźna różnica w wynikach dla statycznych i dynamicznych stanów pracy silnika.

Dr hab. J. Kropiwnicki natomiast poświęcił swoją pracę: *Wykorzystanie matematycznego modelu silnika w zadaniach optymalizacji sterowania układem napędowym pojazdu* [43] zagadnieniu modelowania silnika i optymalizacji procesów sterowania. Tworzył przy tym zarówno modele statyczne, jak i dynamiczne, co umożliwiło porównanie zjawisk, zachodzących w silniku w tak odmiennych stanach.

Podobnego problemu dotyczy (omawiana już wcześniej) praca prof. R. Longwica: *Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania* [48]. Wyniki pomiarów ciśnienia w cylindrze są w niej porównywane w przypadku pracy w warunkach statycznych oraz dynamicznych.

Dr A. Ubysz natomiast skupił się w swojej pracy: *Sprawność efektywna silnika ZI samochodu osobowego w dynamicznych warunkach pracy* [81] na porównaniu sprawności silnika w warunkach statycznych i w warunkach dynamicznych. W tym przypadku warunki dynamiczne były reprezentowane przez przyspieszanie silnika i wykazana została różnica między pracą dynamiczną i statyczną.

Warto ponadto zauważyć, że prof. R. Longwic w swojej pracy: *Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych* [46] stwierdził, że praca silnika występuje głównie w warunkach nieustalonych.

Do podobnych wniosków doszedł dr C. Rakopoulos i dr E. Giakoumis w pracy: *Diesel Engine Transient Operation - Principles of Operation and Simulation Analysis* [72], stwierdzając, że silnik pracuje zazwyczaj w stanach dynamicznych, a wśród nich głównie w stanach nieustalonych.

Badanie silnika w testach dynamicznych

Istniejące testy dynamiczne składają się z sekwencji zmiennych warunków dynamicznych, w czasie których mierzone są wybrane parametry, opisujące stan pracy silnika. Następnie mierzone wielkości uśrednia się dla całego testu. Istnieje sporo prac, dotyczących badań silnika w takich warunkach [1, 7, 13, 18, 66, 67, 80, 85, 2, 4, 10].

Spośród niewymienionych dotychczas publikacji warto wspomnieć o pracy prof. Z. Chłopka i mgr. P. Laskowskiego: *Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczone metodą Monte Carlo* [10]. Na podstawie istniejących dynamicznych testów jezdnych wykonywano

operacje statystyczne oparte na metodzie Monte Carlo, generującej przebiegi pseudolosowe. Wykonano w ten sposób między innymi zestawienie wartości natężenia emisji zanieczyszczeń z wartościami prędkości średnich samochodu.

Praca dr. H. Ogawy (wraz ze współautorami): *Cycle-to-cycle transient characteristics of exhaust gas emissions from a diesel engine with different increasing and decreasing load patterns* [67] skupiała się natomiast na doborze parametrów samego testu jezdny. W tym celu generowano różne testy o łatwo powtarzalnym charakterze (jak interwałowa oraz „schodkowa” zmiana obciążeń) i porównywano emisję poszczególnych składników w spalinach.

Dr A. Ubysz w pracy: *Optymalizacja zużycia paliwa w samochodzie osobowym w ruchu na obszarze zabudowanym* [80] przedstawił problem optymalizacji parametrów pracy silnika w obrębie testów jezdnych.

Z kolei dr V. Bermudeza (wraz ze współautorami) w pracy: *Transient particle emission measurement with optical techniques* [4] poruszył problem pomiaru cząstek stałych w testach jezdnych. Porównano tam metodę pomiaru optycznego wykonywaną w poszczególnych chwilach trwania testu z metodą całkującą, polegającą na osadzaniu cząstek na filtrach.

Publikacja dr. J Arregle (oraz współautorów): *Procedure for engine transient cycle emission testing in real time* [2] dotyczy natomiast zagadnienia modyfikacji metod pomiarowych w teście UDC.

Wiele badań zostało poświęconych porównaniu średnich parametrów pracy silnika w testach jezdnych przy zmianie wybranego czynnika (na przykład rodzaju paliwa) [1, 13, 18].

To zagadnienie poruszają między innymi prace prof. Z. Chłopka: *Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych* (wraz z mgr. J. Rostkowskim) [13] oraz: *Ekologiczne skutki zasilania autobusów miejskich paliwem biogazowym* [18]. Pierwsza praca dotyczy wpływu zawartości siarki w zastosowanych paliwach na właściwości emisyjne silnika o zapłonie samoczynnym w ramach testów dynamicznych. Druga natomiast analizuje zastosowanie paliw biogazowych w autobusach miejskich w przypadku testu jezdny ETC.

Podobne zagadnienia można znaleźć w pracy dr O. Armasa: *Diesel emissions from an emulsified fuel during engine transient operation* [1], w której autor porównuje właściwości

silnika w testach dynamicznych dla zwykłego paliwa oraz dla paliwa, będącego emulsją wodną.

Chociaż większość tego typu testów wykonuje się na stanowisku hamownianym (ze względu na lepszą powtarzalność zadawanych warunków pracy silnika), prowadzone są też badania o podobnym charakterze w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego [17, 62].

Prof. Z. Chłopek przedstawił takie zagadnienie w pracy: *Analiza zanieczyszczeń z silników autobusowych w warunkach rzeczywistego użytkowania* [17]. Wówczas układ poboru spalin wraz z analizatorami składu spalin oraz urządzeniami rejestrującymi znajdował się na pokładzie autobusu. Pojazd natomiast poruszał się w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego.

Podobnym problemem zajmował się również prof. J. Merkisz w pracy: *Badanie emisji spalin pojazdu zasilanego gazem ziemnym w rzeczywistych warunkach ruchu* [62]. Urządzenia pomiarowe były przymocowane do poruszającego się po drodze samochodu. Dodatkowo w wymienionej pracy poruszony został problem zasilania samochodu gazem ziemnym w tak przygotowanych warunkach.

Modelowanie pracy silnika lub jego części w wybranych stanach dynamicznych

Bardzo duża część publikacji podejmuje problem modelowania silnika, pracującego w warunkach dynamicznych. Często takie modelowanie odbywa się jedynie dla niektórych, wybranych stanów dynamicznych.

Można wyróżnić tutaj tworzenie modeli w postaci matematycznego opisu zależności pomiędzy parametrami traktowanymi jako sygnały wejściowe oraz parametrami traktowanymi jako sygnały wyjściowe z silnika [3, 5, 6, 20, 26, 28, 24, 43, 42, 58, 68, 86, 87].

Bardzo ciekawą pracą jest rozprawa prof. Z. Chłopka: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych* [20], dotycząca modelowania procesów emisji spalin. Przedstawiono w niej systematykę zjawisk, wpływających na proces emisji spalin, przedstawiono metodykę modelowania warunków pracy silnika oraz procesów determinujących emisję spalin. Powyższe zabiegi wykonano w oparciu o zjawiska, zachodzące w dynamicznych testach jezdnych. Opracowano również metodę syntezy testów statycznych, symulujących testy dynamiczne.

Dr Z. Bazari w pracy: *Diesel exhaust emissions prediction under transient operating conditions* [3] opracował program komputerowy do szukania zależności pomiędzy

wielkościami, opisującymi emisję spalin, a parametrami, determinującymi pracę silnika. W pracy (w ramach programu komputerowego) stworzono model procesów spalania, nadający się do opisu zjawisk w warunkach dynamicznych.

Prof. M. Bernhardt w książce: *Silniki Samochodowe* (wraz z doc. S. Dobrzyńskim i prof. E. Lothem) [5] oraz w artykule: *Praca silnika w warunkach nieustalonych* (z prof. S. Kruczyńskim) [6] omówił między innymi problem modelowania pracy silnika spalinowego w warunkach dynamicznych.

Prof. M. Cichy prace: *Model energetyczny systemu silnik - odbiornik w stanach nieustalonych* [26], *Silniki o działaniu cyklicznym. Podstawy teorii i działania* [28] oraz: *Model silnika spalinowego w formie grafów wiązań (GW)* [24] poświęcił problemowi modelowania silników spalinowych. W pierwszych dwóch publikacjach znajdują się propozycje metodyki modelowania pracy silnika odniesione do zagadnienia wykorzystania pracy silnika w warunkach nieustalonych (przyspieszania) do diagnostyki. Ostatnia praca dotyczy modelowania silnika za pomocą metody grafów wiązań.

Problematyką modelowania silnika w warunkach dynamicznych zajmował się również dr hab. J. Kropiwnicki w pracy: *Modeling of Reciprocating Engine Transient Torque* [42]. Poszukiwano w niej zależności między momentem obrotowym i prędkością obrotową, a stopniem nacisku na pedał przyspieszenia przy uwzględnieniu dynamicznych procesów parametrów pracy silnika w chwilach czasu poprzedzających rozpatrywany czas pracy.

Również prof. M. Wendeker w pracy: *Dynamiczny model silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim* [86] przedstawił problemy modelowania pracy silnika w stanach dynamicznych oraz wykorzystania metody przyspieszeń do diagnozowania bieżącego stanu technicznego silnika.

Dr R. Wijetunge w pracy: *Dynamic behavior of a high-speed, direct injection diesel engine* [87] porównywał natomiast charakterystyki silnika przy dużych prędkościach jazdy samochodu, podczas realizacji typowych zadań dynamicznych przez silnik.

Do modelowania stosowane są niekiedy niestandardowe metody matematyczne [32, 50, 52, 59, 58, 70].

Dr hab. J. Mamala i prof. J. Jantos w pracach: *Odwzorowanie charakterystyk silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych* [59] oraz: *Charakterystyki eksploatacyjne silnika samochodowego* [58] przedstawili propozycje modelowania dynamicznych charakterystyk pracy silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

Dr Y. He i dr C. Rutland natomiast przedstawili w pracy: *Neural cylinder model and its transient results* [32] propozycję modelowania za pomocą sieci neuronowych procesów, zachodzących wewnątrz cylindra.

Prof. R. Longwic zajmował się podobną tematyką w pracach: *Dynamic Aspects of Work of the Diesel Engine* [50], *Modeling the Combustion Process in the Diesel Engine with the use of Neural Networks* [51] oraz: *Modelowanie przebiegu średniego ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach rozruchu z wykorzystaniem sieci neuronowych* [52]. Modelowaniu za pomocą sztucznych sieci neuronowych poddane były procesy, zachodzące w cylindrze podczas pracy silnika w warunkach swobodnego rozruchu.

Innym podejściem jest modelowanie poszczególnych procesów (m.in. termodynamicznych), zachodzących w silniku podczas pracy w zadanych warunkach, w tym także w warunkach dynamicznych [31, 30, 32, 38, 54, 64, 71, 73, 74, 75, 72, 83].

Dr E. Giakoumis w pracach: *Cylinder wall insulation effects on the first and second law balances of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions* [31] oraz: *Parametric study of transient turbocharged diesel engine operation from the second-law perspective* (wraz z dr. C. Rakopoulosem) [30] przedstawił model procesów termodynamicznych, zachodzących w cylindrze silnika doładowanego o zapłonie samoczynnym.

Dr L. Jarrier (wraz ze współautorami) natomiast przedstawił w pracy: *Warm-up of a D.I. diesel engine experiment and modeling* [38] problem modelowania procesu nagrzewania się silnika.

Prof. W. Lotko, prof. R. Longwic i dr hab. K. Górski w pracy: *Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo-tert butylowym* [54] modelowali procesy wtryskowe w cylindrze w stanach dynamicznych.

Z kolei dr S. Nakayama (wraz ze współautorami) zajmował się w pracy: *An application of a model based combustion control to transient cycle-by-cycle diesel combustion* [64] problemem modelowania zarówno procesów wtryskowych, jak i procesów termodynamicznych w silniku.

Warto również wspomnieć o licznych pracach dr. C. Rakopoulosa i dr. E. Giakoumisa: *Availability analysis of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions* [71], *Review of thermodynamic diesel engine simulations under transient*

operating conditions [73], *Simulation and analysis of a naturally aspirated IDI Diesel engine under transient conditions comprising the effect of various dynamic and thermodynamic parameters* [74], *Simulation and energy analysis of transient diesel engine operation* [75], które poświęcili budowaniu termodynamicznego modelu silnika spalinowego.

Istnieją także prace poświęcone modelowaniu poszczególnych elementów silnika, optymalizujące ich parametry do pracy w stanach dynamicznych [34, 43, 44, 65, 83] oraz prace modelujące procesy sterowania silnikiem [37, 41, 61].

Spośród nie przytaczanych dotychczas publikacji warto wspomnieć o pracy dr. D. Hountalasa i dr. A. Kouremenosa: *Development of a fast and simple simulation model for the fuel injection system of diesel engines* [34]. Przedstawiono w niej problematykę modelowania wtrysku paliwa w dynamicznych stanach pracy silnika.

Podobne zagadnienie poruszył dr J. Li (wraz ze współautorami) w pracy: *Individual cylinder control of diesel engines* [44], modelując wtrysk paliwa.

Prof. G. Vachtsevanos i prof. E. Boukas w pracy: *Modeling and control of transient engine conditions* [83] poruszyli również problem modelowania silnika w warunkach dynamicznych, ale odnieśli to zagadnienie do optymalizacji parametrów wtrysku przy zimnym silniku.

Dr K. Narusawa (wraz ze współautorami) natomiast w pracy: *An EGR control method for heavy-duty diesel engines under transient operations* [65] podjęli się problemu modelowania zaworu recyrkulacji spalin w dynamicznych stanach pracy silnika.

W kontekście modelowania procesów sterowania warto przytoczyć także pracę dr. hab. J. Mamali i prof. J. Jantosa: *Weryfikacja algorytmów sterowania samochodowym układem napędowym z wykorzystaniem sieci neuronowych* [61], w której porównywano istniejące schematy sterowania silnikiem z parametrami sterowania proponowanymi przez wytrenowaną w dynamicznych warunkach pracy silnika sztuczną sieć neuronową.

Szczegółowa analiza pracy silnika w wybranych warunkach dynamicznych

Często podejmowanym tematem jest również szczegółowy opis zjawisk, występujących w silniku w czasie pracy w wybranych warunkach dynamicznych [25, 33, 35, 36, 39, 42, 48, 47, 56, 55, 53, 63, 76, 79, 81, 82, 40].

Prof. J. Jantos i dr hab. J. Mamala w pracy: *Zużycie paliwa podczas ruchu samochodu ze zmienną prędkością* [36] poruszyli problem różnych wartości natężenia zużycia paliwa w stanach dynamicznych reprezentowanych przez zmienność prędkości obrotowej silnika.

Podobnym zagadnieniem zajmował się dr A. Ubysz w pracy: *Wyznaczanie kwazistacjonarnych warunków pracy silnika ZI w samochodzie* [82]. Analizowano w niej sprawność silnika w różnych warunkach rozpędzania. Założono przy tym, że obciążenie będzie niezmiennie w przypadku stałego ustawienia urządzenia sterującego silnikiem, a różnice pomiędzy stanami dynamicznymi będzie można rozróżnić na podstawie zmienności prędkości obrotowej silnika. Wprowadzono w tym celu wskaźnik dynamiczności w postaci średniej wartości pochodnej prędkości obrotowej.

Prof. M. Cichy natomiast w pracy: *Badania silników samochodowych w stanach nieustalonych za pomocą wymuszeń sygnałem zdeterminowanym* [25] przedstawił zachowanie się silnika w stanach dynamicznych realizowanych za pomocą zmienności parametru sterowania.

Również dr N. Miyamoto (wraz ze współautorami) w pracy: *Time series analysis of diesel exhaust gas emissions under transient operation* [63] przedstawił badania silnika w warunkach zmienności prędkości obrotowej. Tym razem jednak badania wykonywano z załączonym hamulcem, co determinowało osiągnięte przyspieszenia.

Ciekawe zagadnienie podjął dr H. Head (wraz ze współautorami) w pracy: *Noise of diesel engine under transient conditions* [33]. Analizowano w niej dźwięki emitowane z silnika spalinowego w stanach dynamicznych reprezentowanych przez rozpędzanie silnika.

Dr T. Resch i dr B. Klarin natomiast w pracy: *Analysis of engine dynamic under transient run-up conditions* [76] przedstawili problem dynamiki silnika w trakcie jego rozruchu.

Podobnym zagadnieniem zajmował się dr hab. T. Kniaziewicz wraz z prof. L. Piasecznym i dr R. Zadrąg w pracy: *Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu* [40], przy czym problemy dynamiki w trakcie rozruchu rozpatrywał na bazie silnika okrętowego.

Podczas analizy wybranych stanów dynamicznych bardzo często rozpatrywane są poszczególne cykle (suwy) pracy silnika na podstawie tworzonych wykresów indykatorowych [48, 46, 49, 53, 65, 79].

Warto w tym kontekście wspomnieć o pracy prof. W. Lotko, prof. R. Longwica i dr. hab. K. Górskiego: *Analiza wybranych parametrów procesu spalania oleju napędowego w stanach nieustalonych pracy silnika spalinowego* [53], w których badano zachowanie silnika w czasie procesu swobodnego rozpędzania, przy jednoczesnej rejestracji ciśnienia indykowanego w cylindrze. Wyniki porównywano dla zastosowania różnych paliw.

Dr J. Serrano (wraz ze współautorami) natomiast w pracy: *Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation* [79] wykonywał rejestrację wykresów indykatorowych w stanach dynamicznych przy stałej, dużej prędkości, ale przy zmiennym obciążeniu silnika.

Niejednokrotnie w wybranych warunkach dynamicznych porównuje się różne paliwa [35, 47, 56, 55, 53].

Najstarsza praca z tej dziedziny pochodzi z 1933 r. Napisał ją dr. A. Jante: *Spezifische Schnellaufzahlen* [35] i przedstawił w niej ocenę jakości paliw silnikowych w odniesieniu do uzyskiwanych przyspieszeń pojazdu.

Podobne zagadnienie przedstawił prof. R. Longwic w pracy: *Analiza wpływu mieszanin paliwa roślinnego z olejem napędowym na efektywność pracy silnika wysokoprężnego w warunkach nieustalonych* [47]. Oceniano w niej zachowanie silnika w procesie swobodnego rozpędzania przy zastosowaniu paliwa o różnych proporcjach oleju napędowego i oleju rzepakowego.

Prof. W. Lotko w pracach: *Dynamiczne własności pracy silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego nowymi rodzajami paliw węglowodorowych* [56] oraz: *Nieustalone stany pracy silnika zasilanego paliwem rzepakowym* (wraz z prof. R. Longwicem) [55] w podobnych warunkach badał zachowanie silnika zasilanego innymi paliwami.

Istnieją również prace, wykorzystujące informacje o parametrach pracy silnika w wybranych warunkach dynamicznych do diagnozowania stanu technicznego silnika [5, 6, 26, 28, 68, 86].

Spośród nieomawianych jeszcze publikacji warto wspomnieć o pracy prof. A. Piętaka: *Diagnozowanie silników o ZS na podstawie przebiegu procesu przejściowego* [68], w której przedstawiono metodę postępowania przy diagnozowaniu silników spalinowych na podstawie zarejestrowanego procesu prędkości obrotowej silnika w czasie jego swobodnego rozpędzania.

Podobny problem przedstawiono w pracy prof. M. Cichego: *Model energetyczny systemu silnik - odbiornik w stanach niestabilnych* [26], w której zastosowano metodę przyspieszeń w diagnostyce silników spalinowych.

2.2. Podsumowanie stanu wiedzy

Jak widać, istniejące opracowania dotyczą bardzo wielu zagadnień związanych z dynamiką pracy silnika. Większość z nich dotyczy bardzo szczegółowych tematów, badając jedynie wybrane aspekty zachowania silnika w dynamicznych warunkach. Choć są to bardzo ciekawe badania, wynikające z nich wnioski trudno uogólnić do całościowego opisu zmiennych procesów pracy silników spalinowych. Inne prace, o bardziej ogólnym charakterze, stanowią cenną podstawę do prowadzenia kolejnych prac badawczych w tej dziedzinie, jednak zdecydowanie nie wyczerpują tematu dynamiki pracy silników.

Nie istnieją jak dotąd opracowania, opisujące kompleksowo to zagadnienie, zawierające systematyczny przegląd warunków i stanów dynamicznych, omawiające parametry pracy silników w poszczególnych stanach, czy próbujące opisać ogólne zależności zauważalne w całościowym spojrzeniu na poszczególne stany dynamiczne.

3. Cel, teza i zakres pracy

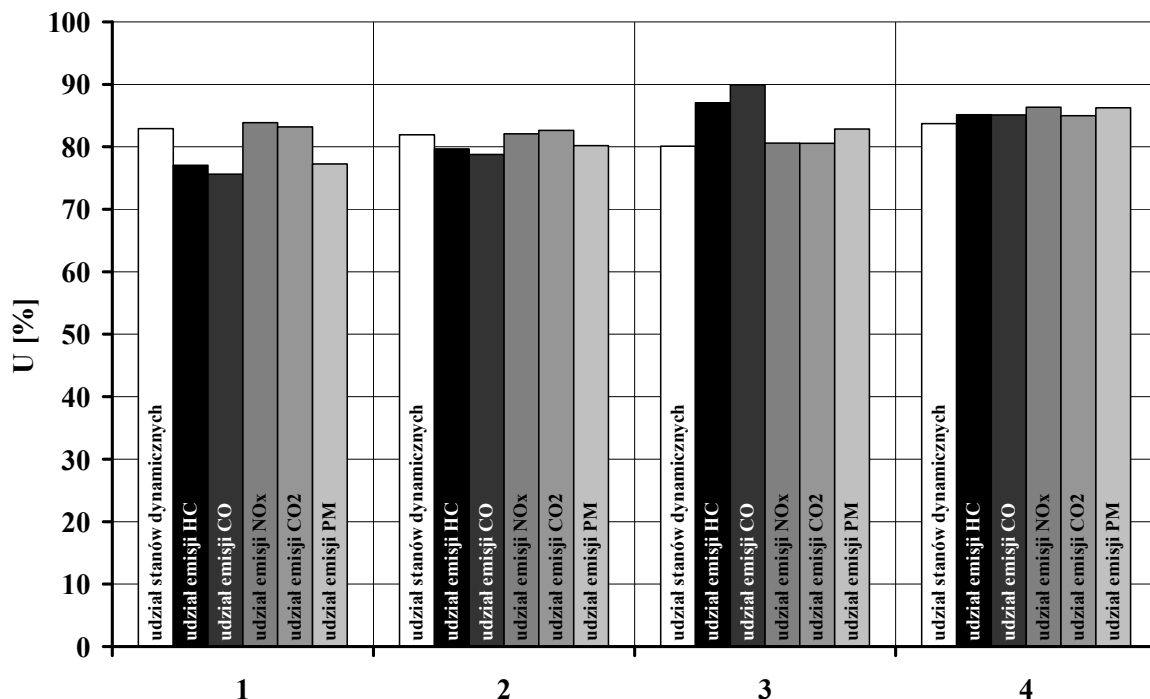
Po analizie obecnego stanu wiedzy (przedstawionej w rozdziale 2. oraz na podstawie własnych obserwacji, zostały sformułowane następujące uwagi, które miały wpływ na cel i zakres pracy.

Występowanie dynamicznych stanów pracy

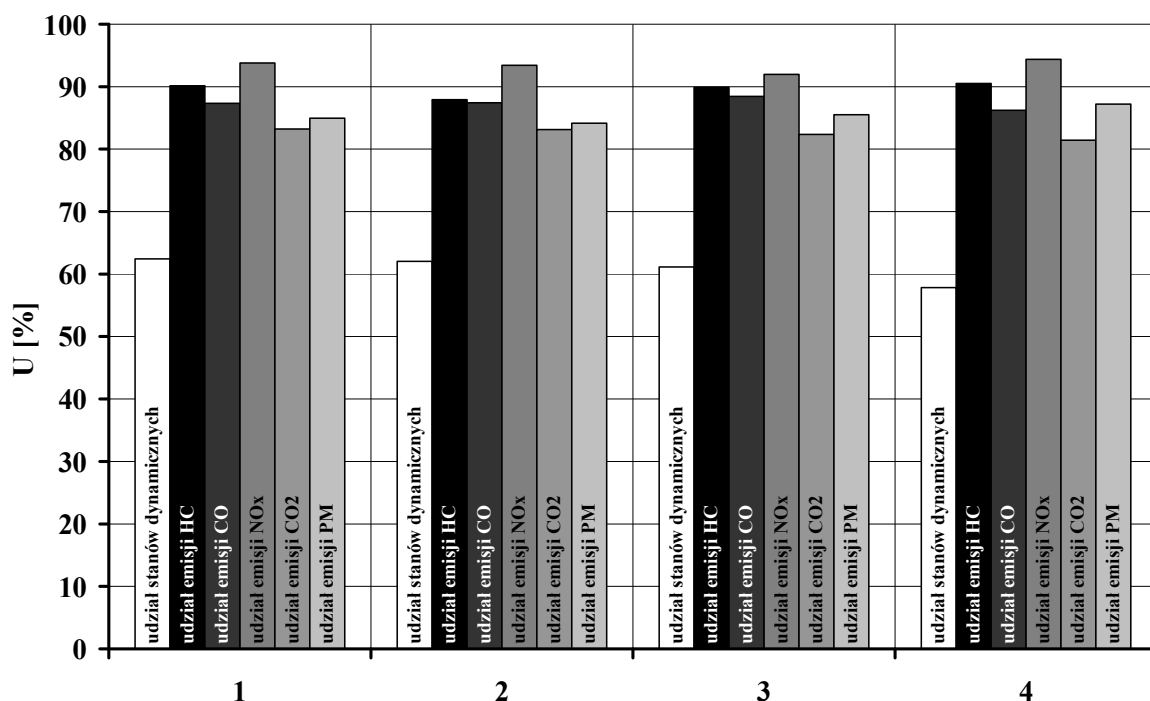
W czasie rzeczywistej pracy silnika spalinowego, wykorzystywanego do napędu samochodów, proces pracy silnika ma zwykle charakter dynamiczny. Oznacza to, że stany dynamiczne występują znacznie częściej niż stany statyczne [46, 72].

Problem ten warto zilustrować za pomocą wyników trzech testów wykonanych na stanowisku hamownianym: Autobahn, FTP-75, oraz Stop&Go, z których każdy został zrealizowany czterokrotnie. Szczegółowe informacje, dotyczące wykonania tych testów, zostaną omówione w rozdziale 3. „Badania hamowniane wykorzystane do weryfikacji metody”. Każdy z testów reprezentuje inny rodzaj ruchu: test Autobahn modeluje ruch autostradowy, test FTP-75 – ruch miejski, a test Stop&Go – ruch w zatorach ulicznych. W przypadku każdego z nich, oddzielnie dla każdej realizacji, obliczono udział czasu, w którym silnik pracował w stanach dynamicznych, a także udział emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających w spalinach wyemitowanych w stanach dynamicznych w odniesieniu do ich emisji w całym teście. Wyniki przedstawiono na rys. 3.1. – 3.3. Liczba na osi poziomej oznacza numer realizacji danego testu.

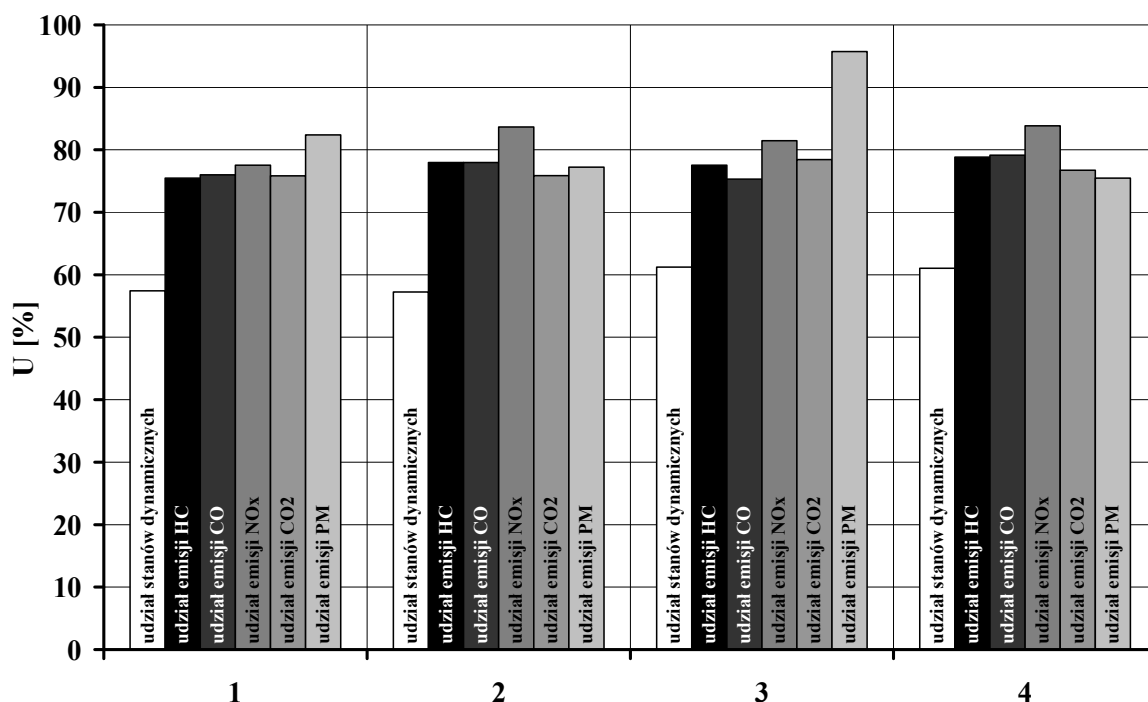
Jak widać na poniższych wykresach, udział stanów dynamicznych każdorazowo przekracza 50%, a udział emisji zanieczyszczeń każdorazowo przekracza 70%. Stanowi to więc dość ważną przesłankę, aby zwrócić uwagę na dynamiczne stany pracy silnika.



Rys. 3.1. Udział czasu trwania stanów dynamicznych w odniesieniu do czasu trwania całego testu, oraz emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających w odniesieniu do całkowitej ich emisji w poszczególnych realizacjach testu Autobahn



Rys. 3.2. Udział czasu trwania stanów dynamicznych w odniesieniu do czasu trwania całego testu, oraz emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających w odniesieniu do całkowitej ich emisji w poszczególnych realizacjach testu FTP-75



Rys. 3.3. Udział czasu trwania stanów dynamicznych w odniesieniu do czasu trwania całego testu, oraz emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających w odniesieniu do całkowitej ich emisji w poszczególnych realizacjach testu Stop&Go

Użytkowe właściwości silnika w stanach dynamicznych

Informację o powszechności występowania stanów dynamicznych podczas pracy silnika w warunkach rzeczywistych (lub symulujących warunki rzeczywiste) warto zestawić z informacją o odmienności stanów dynamicznych od stanów statycznych. Stosunkowo duża część literatury przytoczonej w rozdziale 2. omawia właśnie to zagadnienie. [7, 16, 22, 9, 39, 43, 48, 81] Wskazuje się w nich zarówno na odmienne właściwości silnika, pracującego w stanach dynamicznych, odmienne parametry procesów, panujących wówczas w silniku, jak również na potrzebę odmiennych schematów sterowania procesami wewnątrz silnika w stanach dynamicznych.

Jeśli stany dynamiczne są tak powszechne, a przy tym użytkowe właściwości silnika w stanach dynamicznych różnią się od tych w stanach statycznych, istnieje potrzeba opracowywania narzędzi do ich oceny. Dlatego niniejsza praca jest poświęcona ocenie użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych.

Problemy związane z oceną użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych

Wiele publikacji spośród tych przytoczonych w rozdziale 2. omawia trudności, jakie wiążą się z badaniem właściwości silników w stanach dynamicznych [19, 8, 11, 12, 45, 48, 46, 49, 64, 66, 85]. Można w związku z tym wyróżnić pięć podstawowych problemów:

- przesunięcia fazowe w torach pomiarowych w laboratoriach hamownianych, występujące głównie pomiędzy wielkościami mierzonymi na wale hamulca, oraz w analizatorach spalin,
- operatorowy charakter zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy silnika, a więc trudne do jednoznacznego określenia właściwości silnika,
- wielowymiarowe zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy silnika, a więc właściwości silnika zależne jednocześnie od wielu czynników,
- stosunkowo duża niepowtarzalność wartości wielkości fizycznych, opisujących stan pracy silnika podczas jego pracy w podobnych warunkach,
- problemy z wizualizacją (lub inną formą przedstawienia) zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy silnika ze względu na wielowymiarowość tych zależności.

Cel pracy

Celem rozprawy jest opracowanie metody oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych dzięki rozwiązaniu najważniejszych problemów metodycznych. Do najważniejszych zaproponowanych rozwiązań należy zaliczyć aproksymację zależności operatorowych, opisujących właściwości silnika, funkcjami o wartościach liczbowych oraz racjonalizację oceny niepowtarzalności wyników badań empirycznych.

Teza pracy

Dzięki aproksymacji zależności operatorowych, opisujących właściwości silnika, funkcjami o wartościach liczbowych oraz racjonalizacji oceny niepowtarzalności wyników badań empirycznych istnieje możliwość kompleksowego ujęcia zagadnienia stanów

dynamicznych w silniku spalinowym, co w konsekwencji doprowadzi do oceny jego użytkowych właściwości w czasie dynamicznej pracy.

4. Opis proponowanej metody oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych

Proponowana metoda oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych jest próbą rozwiązania problemów przedstawionych w poprzednim rozdziale. Polega ona na przeprowadzeniu przez te problemy procesu analizy wyników. W kolejnych podrozdziałach (od 4.1. do 4.5.) zostaną omówione poszczególne rozwiązania, stanowiące elementy składowe prezentowanej metody.

4.1. Korekcja przesunięć fazowych w torach pomiarowych

Przyczyna przesunięć fazowych

W laboratorium hamownianym poszczególne wielkości fizyczne są mierzone i rejestrowane w odrębnych torach pomiarowych. Taki układ wynika z odrębności charakteru poszczególnych wielkości fizycznych i konieczności wykonywania pomiaru różnymi metodami. Wiąże się to jednak z poważnym problemem. Każdy tor pomiarowo-rejestracyjny ma inny czas opóźnienia T , mierzony od chwili zaistnienia mierzonego zjawiska fizycznego do chwili jego zarejestrowania.

Największych różnic można się spodziewać między wielkościami mierzonymi na wale hamulca hamowni, a wielkościami, wynikającymi z pracy analizatorów spalin. Na przykład prędkość obrotowa wału korbowego silnika n oraz moment obrotowy silnika M_e powinny charakteryzować się małym czasem opóźnienia. Za mały czas należy uznać taki, który jest dużo mniejszy od okresu próbkowania. Z kolei znacznie większym czasem opóźnienia będą charakteryzowały się wyniki natężenia emisji E_x poszczególnych składników spalin.

Największym problemem jest jednak nie tyle sam fakt opóźnienia, ale jego zmienność w trakcie trwania testów hamownianych. Warto zauważyć, że na opóźnienie wyników pomiaru natężenia emisji poszczególnych substancji w spalinach (w przypadku pomiaru spalin rozcieńczonych) wpływają następujące czynniki: a) czas przelotu spalin przez rurę wylotową, b) czas przelotu spalin przez przewody, doprowadzające spaliny do przewodu o stałym natężeniu przepływu, c) czas przelotu spalin przez przewód o stałym natężeniu przepływu, d) czas analizy spalin, oraz rejestracji wyników. Istotnym jest fakt, że czynniki a) i b) są zmienne i zależne od natężenia emisji spalin. Tak więc czas opóźnienia jest funkcją natężenia emisji spalin V_s , zgodnie ze wzorem 4.1.

$$T = T(V_s) \quad (4.1.)$$

Powyższy problem nie byłby kłopotliwy, gdyby silnik poddać badaniu w stanach statycznych lub w sytuacji badań dynamicznych, kiedy badana byłaby jedynie sumaryczna emisja poszczególnych substancji dla danego testu. Jednak kiedy interesujące są poszczególne stany dynamiczne pracy silnika, istnieje potrzeba przyporządkowania poszczególnych wartości natężeń emisji zanieczyszczeń poszczególnym wartościom takich parametrów, jak prędkość obrotowa n czy moment obrotowy M_e . Takie przyporządkowanie nie jest jednak możliwe, ponieważ przebiegi $n(t)$ lub $M_e(t)$ nie odpowiadają wartościom $E_x(t)$ w przebiegach, ale wartościom $E_x(t + T(V_s))$.

Jako wynik testu otrzymuje się więc przebiegi natężenia emisji wybranych składników spalin obciążone nieznanymi, zmiennymi przesunięciami fazowymi. Istnieje więc potrzeba znalezienia tych przesunięć i wprowadzenia odpowiednich korekcyj.

Korekcja przesunięć

Jak to wynika ze wzoru 4.1., czas zwłoki T jest funkcją natężenia emisji spalin V_s . Jeśli uda się wyznaczyć tę zależność, wprowadzenie korekcji będzie polegało na następującej procedurze. Mając jako wyniki badań przebiegi $E_x(t)$ i $V_s(t)$, na podstawie $V_s(t)$ wyznaczamy przebieg $T(t)$. Następnie każdą wartość $E_x(t)$ zastępujemy wartością $E_x(t + T(t))$.

W efekcie poszczególne wartości prędkości obrotowej lub momentu obrotowego będą odpowiadały wartościom natężenia emisji wybranych składników spalin. Jedynym problemem jest znalezienie zależności $T(V_s)$.

Znajdowanie empirycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie doświadczeń laboratoryjnych

Najskuteczniejszym sposobem na znalezienie zależności $T(V_s)$ jest wykonanie odpowiednich doświadczeń w laboratorium hamownianym. Proponuje się w tym celu przeprowadzenie serii testów odpowiedzi na wymuszenie impulsowe. Każdy kolejny pomiar wykonywany byłby przy innej początkowej prędkości obrotowej silnika, a samo wymuszenie dotyczyłoby impulsu zadanego poprzez urządzenie sterujące silnikiem. Rejestrowanymi wielkościami fizycznymi są: prędkość obrotowa (w celu kontrolowania ustawień początkowych), moment obrotowy (w celu wyznaczenia korelacji z przebiegiem natężenia emisji składników spalin), natężenie emisji spalin (w celu wyznaczenia dziedziny funkcji),

natężenie emisji wybranej substancji w spalinach (w celu wyznaczenia korelacji z momentem obrotowym silnika).

W każdym takim teście w przebiegach momentu obrotowego i natężenia emisji wybranego składnika spalin powinny być widoczne wyraźne odpowiedzi na wymuszenia, niesynchronizowane ze sobą w czasie. Możliwe będzie wówczas odczytanie wartości zwłoki czasowej T , odpowiadającej ich względnemu przesunięciu w czasie. Wyznaczona w ten sposób wartość T powinna zostać przypisana do wartości natężenia emisji spalin, stanowiącej dziedzinę. Jeśli takie doświadczenie zostanie wykonane przy różnych wartościach początkowych prędkości obrotowej, spowoduje to występowanie różnych wartości natężenia emisji spalin. Przyporządkowując kolejne wartości T odpowiadającym im wartościom natężenia emisji spalin, otrzymamy poszukiwaną funkcję $T(V_s)$. Takie badanie należy przeprowadzić dla każdej substancji, której natężenie emisji będzie rozpatrywane.

W powyższym toku obliczeń występuje jedno niebezpieczeństwo, mogące przynieść fałszywe wyniki. Natężenie emisji wybranej substancji w spalinach może być w rzeczywistości skorelowane nie tyle z samą wartością momentu obrotowego, co z jej zmiennością (na przykład z jej pochodną). Oznacza to, że czas t występowania maksimum w przebiegu natężenia emisji wybranego składnika spalin nie będzie odpowiadał chwili czasu t , w której przebieg momentu obrotowego przyjmuje największą wartość, ale chwili w której moment obrotowy rośnie w sposób najbardziej gwałtowny. Należy więc zachować szczególną ostrożność podczas odczytywania wartości zwłoki czasowej T , odpowiadającej względnemu przesunięciu momentu obrotowego i natężenia emisji składników spalin, robiąc to z uwzględnieniem zjawisk fizycznych, zachodzących podczas pracy silnika.

Dodatkowo można rejestrować w trakcie badań przebieg sterowania silnikiem s . Na jego podstawie możliwe będzie wyznaczenie czasów zwłoki momentu obrotowego względem sterowania, a więc opóźnień występujących wewnątrz silnika. Nie przypuszcza się jednak, żeby ta zwłoka była funkcją natężenia emisji spalin. Znacznie bardziej prawdopodobne jest, że będzie ona zależała od prędkości obrotowej, ponieważ ten parametr wpływa na czas trwania cykli pracy silnika. Należy też zaznaczyć, że spodziewane czasy zwłoki wewnątrz silnika mogą się okazać zbyt małe, żeby możliwe było ich wychwycenie przy często stosowanej częstotliwości próbkowania, wynoszącej 1 Hz. Trzeba by tutaj zastosować częstotliwość próbkowania rzędu 100 Hz.

Omówiony powyżej sposób wyznaczania zależności $T(V_s)$ powinien przynieść najdokładniejsze wyniki, ujmujące kompleksowo wszystkie zjawiska, wpływające na przesunięcia fazowe w poszczególnych torach pomiarowych. Niekiedy jednak wykonanie takich badań może się okazać niemożliwe – na przykład w sytuacji, kiedy chcemy poddać analizie zjawisk dynamicznych wyniki badań przeprowadzone w przeszłości i nie istnieje możliwość odtworzenia panujących wówczas warunków badań. Z tego względu proponuje się zastąpienie badań empirycznych metodami, pozwalającymi na obliczenie przesunięć w sposób teoretyczny. Zostaną one opisane w dalszej części tego podrozdziału.

Metody teoretyczne mają charakter przybliżony i nie ujmują całościowo wszystkich zjawisk, które wpływają na występowanie przesunięć fazowych w poszczególnych torach pomiarowych. Dlatego proponuje się przyjęcie więcej niż jednej metody teoretycznej, żeby możliwe było porównanie wyników otrzymanych różnymi sposobami.

Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie przepływu spalin w przewodach

Obliczenie czasu przepływu spalin przez przewody jest możliwe na podstawie prawa ciągłości przepływu czynnika nieściśliwego, które wprowadza zależność między objętościowym natężeniem przepływu V_s , prędkością przepływu v , oraz polem przekroju przewodu A , którą przedstawia wzór 4.2.

$$V_s = v \cdot A \quad (4.2.)$$

Zgodnie z definicją prędkości powyższy wzór można przekształcić do postaci wyrażonej przez wzór 4.3., gdzie S_n oznacza długość kolejnego przewodu, odpowiadającego zmiennemu natężeniu przepływu, A_n – jego pole przekroju, a T_c oznacza stałe opóźnienie w czasie, wynikające z przepływu przez przewody o stałym natężeniu przepływu, oraz wynikające z czasu analizy spalin i rejestracji wyników.

$$T = \frac{1}{V_s} (S_1 \cdot A_1 + S_2 \cdot A_2 + \dots) + T_c \quad (4.3.)$$

Jest to więc funkcja hiperboliczna, gdzie wyrażenie w nawiasie odpowiada za aspekt zależny od natężenia przepływu, a wyrażenie T_c odpowiada za stałe opóźnienie w czasie. Mając szczegółową wiedzę na temat budowy stanowiska laboratoryjnego, można więc teoretycznie obliczyć wartości opóźnień, wynikających z poszczególnych natężeń przepływu spalin. Istotne informacje do wyznaczenia wartości T_c (jak natężenie przepływu w

przewodach o stałym natężeniu przepływu, czas analizy spalin w poszczególnych analizatorach) powinny zostać podane przez producenta aparatury badawczej.

Duże trudności mogą jednak wystąpić podczas obliczania czasu przepływu przez układ wylotowy samochodu. Znajdują się tam bowiem elementy, wprowadzające istotne opory przepływu (tłumik dźwięków, reaktor katalityczny, filtr cząstek stałych), które nie sposób opisać za pomocą wzoru 4.3. Identyfikacja parametrów przepływu przez te elementy polegałaby na wykonaniu takich badań, które zostały zaproponowane w poprzednim punkcie. W prezentowanych obliczeniach teoretycznych nie jest więc możliwe uwzględnienie tej części zjawisk. Trzeba się wobec tego liczyć z faktem, że zależność $T(V_s)$ wyznaczona tą drogą przyniesie jedynie wartości przybliżone.

Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie optymalizacji parametrów

Ze wzoru 4.3. wynika, że zależność $T(V_s)$ ma postać funkcji hiperbolicznej. Można ją zatem wyrazić w postaci pokazanej we wzorze 4.4.

$$T(V_s) = \frac{a}{V_s} + b \quad (4.4.)$$

gdzie a i b – stałe współczynniki, dobierane na drodze optymalizacji.

Teoretycznie istnieje możliwość przeprowadzenia optymalizacji parametrów a i b tak, żeby doprowadzić do możliwie najlepszego powiązania pomiędzy przebiegami wielkości fizycznych, pomiędzy którymi występują przesunięcia fazowe. Kryterium optymalizacji mogłaby być wartość współczynnika korelacji wzajemnej tych dwóch przebiegów.

Ten sposób wyznaczenia zależności $T(V_s)$ charakteryzuje się kompleksowym modelowaniem zjawisk odpowiedzialnych za przesunięcia fazowe w poszczególnych torach pomiarowych.

W praktyce jednak funkcja korelacji wzajemnej może się okazać bardzo niedoskonałym kryterium oceny. Wychwytuje ona bowiem wiele zjawisk okresowych, występujących w analizowanych przebiegach, i w odpowiadających im miejscach występują maksima lokalne, które czasami przewyższają nawet maksimum dla przesunięcia zerowego. W takiej sytuacji kryterium to byłoby bezużyteczne. Ograniczenie zakresu optymalizowanych współczynników a i b nie naprawi tego problemu, ponieważ funkcja, opisująca kryterium optymalizacji, nie musi mieć maksimum lokalnego w dziedzinie ograniczonej przez nas w

sposób arbitralny. Wówczas otrzymane wartości a i b będą tożsame z przyjętymi granicami optymalizacji.

Z tego względu, po przeprowadzeniu optymalizacji tą metodą, należy sprawdzić, czy wartości przesunięć $T(V_s)$ odpowiadają choćby w przybliżeniu wartościom otrzymanym za pomocą pierwszej metody teoretycznej. Jeśli całkowicie wykraczają poza zakres spodziewanych przesunięć fazowych, oznacza to, że funkcja korelacji, jako kryterium optymalizacji, wychwyciła zupełnie inne zjawiska niż te, które należało w ten sposób zbadać. W takim przypadku należy odrzucić wyniki tej metody.

Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie krótkich funkcji korelacji

Proponowanym sposobem na ominięcie problemów związanych z metodą optymalizacji jest zastosowanie owej optymalizacji jedynie dla krótkich przedziałów czasu. Należy w tym celu przeprowadzić następującą procedurę obliczeniową.

Jako parametr, reprezentujący wielkość fizyczną nie obciążoną znacznymi przesunięciami fazowymi, można wybrać prędkość obrotową silnika, ponieważ jest ona zwykle dość silnie skorelowana z przebiegami natężenia emisji wybranych składników spalin. Dla każdego czasu t jest obliczana wartość funkcji korelacji między przebiegami prędkości obrotowej i natężenia emisji wybranego składnika spalin, ale nie dla całego przebiegu, tylko dla kilku sąsiadujących punktów pomiarowych. Wyraża to wzór 4.5.

$$R[n(t), E_x(t)] = \sum_{i=0}^m [n(t+i) \cdot E_x(t+i)], \quad (4.5)$$

gdzie parametr m określa, dla ilu par punktów będzie obliczany współczynnik korelacji.

Tak obliczona wartość funkcji korelacji stanowi informację, jak bardzo prędkość obrotowa jest skorelowana z natężeniem emisji wybranej substancji w spalinach na podstawie kilku sąsiadujących punktów. Oczywiście trzeba tę wartość porównać z wartością funkcji korelacji dla przebiegu natężenia emisji wybranego składnika spalin przesuniętego w fazie. Postać funkcji korelacji w dziedzinie przesunięć fazowych z wyraża wzór 4.6.

$$R[n(t), E_x(t+z)] = \sum_{i=0}^m [n(t+i) \cdot E_x(t+i+z)] \quad (4.6)$$

Zakres wartości przyjmowanych przez parametr z powinien obejmować spodziewany zakres opóźnień czasowych, jakie mogą wystąpić w trakcie badań hamownianych. W ten sposób powstanie fragment funkcji korelacji wzajemnej (w dziedzinie z), obliczany nie dla całych

przebiegów, ale dla kilku sąsiednich par punktów pomiarowych, gdzie liczba tych par jest równa wartości parametru m .

Przesunięcie fazowe z , dla którego wartość funkcji korelacji będzie największa, powinno stanowić poszukiwaną wartość zwłoki T . Wyznaczając wartość opóźnienia sygnału dla kolejnych chwil czasu, otrzymamy przebieg $T(t)$, opisujący zmienność czasu opóźnienia w czasie trwania testu. Tak wyznaczony przebieg można bezpośrednio wykorzystać do procedury korekcji opisanej nieco wyżej. W celu porównania wyników tej metody z innymi metodami teoretycznymi, można również zestawić przebieg $T(t)$ z przebiegiem $V_s(t)$ i wyznaczyć zależność $T(V_s)$.

Niestety trzeba się liczyć z możliwością bardzo dużej niepewności takich wyników. Wiąże się to z trudnościami w doborze parametru m , czyli liczby par punktów branych pod uwagę podczas obliczania wartości funkcji korelacji. Z jednej strony istotne jest, żeby parametr m był jak najmniejszy, ponieważ chcemy znaleźć opóźnienie dla bieżących wartości przebiegów, a nie dla wartości, które wystąpią kilka sekund później. Z drugiej strony zbyt mała wartość parametru m oznacza wyznaczanie wartości funkcji korelacji z bardzo małej liczby próbek, co w konsekwencji doprowadzi do przypadkowości wyników pod względem numerycznym. Tak więc zbyt mała wartość parametru m oznacza zwiększanie błędów analizy numerycznej, a zbyt duża wartość spowoduje zwiększanie błędów wynikających ze zjawisk fizycznych.

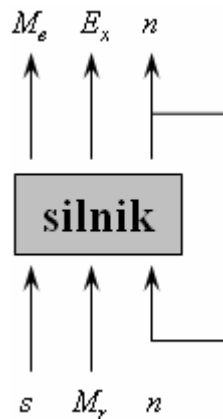
Spodziewana duża niepewność wyników powoduje dużą niejednoznaczność ich interpretacji. Nie wiadomo bowiem, czy tak wyznaczony przebieg $T(t)$ będzie wynikał z rzeczywistego opóźnienia toru pomiarowego analizy spalin, czy będzie efektem „szumu” powstałego z operacji numerycznych, prowadzonych z ograniczoną dokładnością. Należy się spodziewać, że efekt końcowy będzie wynikał z nałożenia na siebie tych dwóch zjawisk. W celu oceny, wiarygodności wyników warto porównać je z wynikami otrzymanymi z innej metody teoretycznej, sprawdzając, czy funkcje $T(V_s)$ przebiegają w obydwu przypadkach podobnie.

4.2. Zmiana zależności operatorowych silnika na zależności funkcyjne

Model silnika

Jak to przedstawiono w rozdziale 1., w omawianej metodzie silnik modelowany jest jako układ automatyki, wiążący parametry wejściowe i wyjściowe. Dobór rozpatrywanych

parametrów pracy silnika może być różny, w zależności od właściwości, które mają zostać zbadane. Jako przykładowy układ do celów prezentowania metody, zostanie przyjęty następujący schemat (rys. 4.1.).



Rys. 4.1. Model silnika

Jak widać, warunki pracy silnika (parametry wejściowe) reprezentowane są przez: parametr sterowania s , moment oporu zadawany na wał korbowy silnika M_r , oraz prędkość obrotową wału korbowego silnika n . Do parametrów wyjściowych, definiujących stan pracy silnika, należą: moment obrotowy generowany przez silnik na wale korbowym M_e , natężenie emisji wybranych substancji w spalinach E_x , oraz prędkość obrotowa wału korbowego silnika n . Prędkość obrotowa występuje zarówno w parametrach wejściowych, jak i w wyjściowych, co powoduje wystąpienie sprzężenia zwrotnego układu. Ponieważ jego wartość jest taka sama na wejściu i na wyjściu z przyjętego modelu, w dalszych rozważaniach zostanie on przypisany do parametrów wejściowych, ponieważ odgrywa znaczącą rolę przy definiowaniu warunków pracy silnika. Należy jednak pamiętać, że wartość prędkości obrotowej wynika ze stanu pracy silnika.

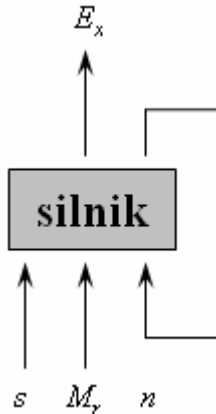
W celu uproszczenia modelu, istnieje możliwość pominięcia momentu obrotowego, ponieważ jego wartość można w sposób jawny opisać wzorem 4.7., który wynika z odniesienia drugiego prawa dynamiki Newtona do ruchu obrotowego (I – moment bezwładności elementów masowych sprowadzonych do osi obrotu wału korbowego silnika, n' – pochodna prędkości obrotowej wału korbowego silnika względem czasu).

$$M_e = M_r + I \cdot n' \quad (4.7.)$$

W przypadku badań w warunkach statycznych, kiedy prędkość obrotowa nie zmienia się w czasie, jej pochodna n' wynosi 0. Wówczas zależność 4.7. przyjmuje postać 4.8.

$$M_e = M_r \quad (4.8.)$$

Niezależnie od warunków (statycznych lub dynamicznych) wartości M_e wynikają z przekształcenia tożsamościowego parametrów wejściowych, więc nie ma praktycznej potrzeby powtarzać tego parametru w układzie, chociaż formalnie parametr M_e w istotny sposób określa stan pracy silnika. Ostateczna postać modelu została przedstawiona na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Model silnika po uproszczeniu.

W dalszych rozważaniach stan pracy silnika będzie opisywany przez natężenie emisji wybranych składników spalin. Jest to zabieg celowy, ponieważ zjawiska emisji spalin są najbardziej wrażliwe na występowanie stanów dynamicznych.

Zależności operatorowe

Dla modelu przedstawionego powyżej można zapisać zależności, będące użytkowymi właściwościami silnika spalinowego, w następującej postaci.

$$E_x(t) = F_x[n(t), M_r(t), s(t)] \quad (4.9)$$

gdzie F_x wyraża poszukiwaną zależność. Jak widać F_x , jest zależnością operatorową, czyli taką, która przekształca funkcje o wartościach liczbowych $n(t)$, $M_r(t)$, $s(t)$ w funkcję $E_x(t)$. Jest to możliwie najogólniejszy zapis. W sytuacji, kiedy zależność F_x nie jest znana, wartość E_x w bieżącej chwili t_b może teoretycznie zależeć od wartości n , M_r i s w dowolnych innych chwilach t . Jest to sytuacja bardzo trudna, ponieważ nie sposób zdefiniować w praktyce zależności F_x , które opisywałyby tak szerokie zjawisko. Istnieje więc potrzeba uproszczenia tych zależności, najlepiej do postaci funkcyjnej (w sensie funkcji o wartościach liczbowych).

Formalnie, aby lepiej zdefiniować stan pracy silnika, do zależności 4.9. należałoby dopisać zależność 4.7. (definiującą moment obrotowy), oraz 4.11. (definiującą prędkość obrotową).

$$n_{wyjściowe} = n_{wejściowe} \quad (4.11.)$$

Ma to oczywiście jedynie znaczenie formalne, ponieważ co prawda parametry n i M_e określają stan pracy silnika, ale podanie tych zależności nie wnosi nic do poszukiwania jego użytkowych właściwości. Ostatecznie więc, zgodnie z rys. 4.2. stan pracy będzie zdefiniowany w praktyce przez natężenie emisji poszczególnych substancji w spalinach.

Zawężenie dziedziny funkcji wejściowych

Traktując silnik jako układ przyczynowy, możemy wykluczyć wpływ na bieżący stan pracy wszystkie warunki, występujące w chwilach następnych względem chwili bieżącej. Pozostają do rozważenia jedynie warunki w chwili bieżącej oraz w chwilach poprzednich. Powstaje więc pytanie, jak daleko sięgające w przeszłość warunki mogą mieć wymierny wpływ na stan pracy w chwili bieżącej. Traktując czas t jako wielkość dyskretną, można zapisać to w następującej postaci (4.12.).

$$E_x(t_b) = F_x[n(t_b \div t_{b-k}), M_r(t_b \div t_{b-k}), s(t_b \div t_{b-k})] \quad (4.12.)$$

Parametr k określa, jak odległe w czasie warunki są brane pod uwagę.

Jeśli silnik ma silne właściwości całkujące, należy się liczyć z sytuacją, w której wszystkie warunki pracy (począwszy od początkowych) będą miały istotny wpływ na bieżący stan pracy. Jeśli jednak właściwości całkujące silnika są niewielkie (lub wręcz nie występują), wówczas bieżący stan pracy będzie zależał tylko od bieżących warunków, a zależność 4.12. przyjmie postać funkcyjną. W ten sposób zostaną jednak wyeliminowane informacje o warunkach w chwilach poprzednich, a więc również o ich zmienności.

Jako pewien kompromis, przy założeniu względnie małych właściwości całkujących silnika, proponuje się przyjęcie wartości parametru k równego 1. Jest to najmniejsza liczba k , dla której jeszcze zachowane są informacje o zmienności warunków pracy silnika. W takim przypadku możemy zapisać zależność 4.13.

$$E_x(t_b) = f_x(n(t_b), n(t_{b-1}), M_r(t_b), M_r(t_{b-1}), s(t_b), s(t_{b-1})) \quad (4.13.)$$

Jak widać, jest to już zależność funkcyjna f_x , chociaż liczba parametrów, stanowiących dziedzinę, powiększyła się dwukrotnie.

Wprowadzenie pochodnych funkcji

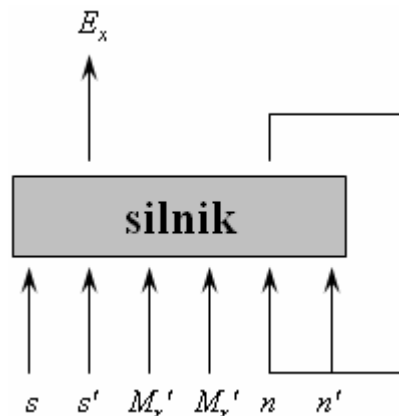
Dla dowolnego przebiegu $x(t)$ zbiór parametrów w postaci: $x(t_b)$ i $x(t_{b-1})$ niesie w sobie tę samą informację, co zbiór w postaci: $x(t_b)$, oraz $x'(t_b)$. Wprowadza to również bardziej czytelny rozdział parametrów na te, które informują o wartości danej wielkości fizycznej w danej chwili i na te, które informują o ich zmienności.

Wzór 4.13. można zatem zapisać w postaci 4.14.

$$E_x(t_b) = f_x(n(t_b), n'(t_b), M_r(t_b), M_r'(t_b), s(t_b), s'(t_b)) \quad (4.14.)$$

Gdyby wprowadzać do powyższej zależności informacje o warunkach pracy w chwilach jeszcze wcześniejszych, byłoby to tożsame z wprowadzaniem kolejnych pochodnych poszczególnych parametrów: $x''(t_b)$, $x'''(t_b)$... Taki zabieg nie wydaje się jednak celowy, ponieważ ilość informacji, od których zależałby stan pracy silnika ponownie zwiększałby się do wartości niemożliwych do opisu.

Dla przyjętej procedury zamiany zależności operatorowych na funkcyjne można przedstawić zmodyfikowany model pracy silnika (rys. 4.3.).



Rys. 4.3. Model silnika do badań w stanach dynamicznych

Weryfikacja przejścia do zależności funkcyjnych

Zastąpienie całego przebiegu danego parametru wejściowego jego wartością bieżącą, oraz wartością pochodnej w danej chwili, sprowadza się faktycznie do bardzo silnego ograniczenia zależności w czasie. Istnieje więc niebezpieczeństwo, że jeśli silnik miał właściwości całkujące, zostały one niemal całkowicie pominięte. Dlatego proponuje się metodę sprawdzenia zasadności takiego zabiegu, wykorzystującą funkcje korelacji wzajemnej.

Układ, nie mający żadnych właściwości całkujących, powinien zależeć jedynie od wartości bieżących parametrów wejściowych. Powinno to znaleźć swoje odzwierciedlenie w funkcjach korelacji wzajemnych pomiędzy dowolnym przebiegiem dowolnego parametru wejściowego i parametru wyjściowego. Teoretycznie niezerowa korelacja powinna występować jedynie dla przesunięcia zerowego, a dla wszystkich pozostałych przesunięć korelacja powinna wynosić 0.

W praktyce oczywiście taki kształt funkcji korelacji nie jest możliwy do osiągnięcia, ze względu na specyficzne właściwości samej funkcji. Można wśród nich wymienić następujące. [88]

- Funkcja korelacji przebiegów prostokątnych ma kształt trójkątny. Oznacza to, że nawet w przypadku analizowanych funkcji o idealnie skokowej zmienności, funkcja korelacji wzajemnej zmienia się stosunkowo łagodnie, niemal symetrycznie wokół punktu, w którym występuje największe powiązanie pomiędzy badanymi przebiegami.
- Funkcja korelacji bardzo rzadko przyjmuje wartości zerowe. Nie oznacza to, że dla każdego przesunięcia istnieje powiązanie między badanymi przebiegami. Niezerowe wartości wynikają z faktu, że wartość korelacji w danym punkcie jest sumą iloczynów wszystkich wartości w obydwu przebiegach, podczas gdy suma iloczynów par wartości, nawet dla przypadkowo wybranej kolejności punktów w obydwu przebiegach, bardzo rzadko będzie równa 0.
- Funkcja korelacji przebiegów o charakterze okresowym jest również okresowa. Oznacza to, że jeśli w teście hamownianym odwzorowywane są przebiegi, w których da się zauważyć właściwości choćby zbliżone do okresowych, to w całej dziedzinie funkcji korelacji będą widoczne maksima lokalne, z których niektóre mogą nawet przewyższać maksimum, odpowiadające właściwemu powiązaniu pomiędzy rozpatrywanymi przebiegami.

Wszystkie te właściwości sprawiają, że nieraz trudno jest ocenić, czy pomiędzy dwoma przebiegami występuje korelacja, czy też nie. Ponadto przesunięcie, dla którego istnieje powiązanie, niekiedy trudno jest odczytać w sposób jednoznaczny. Z tych względów trzeba sformułować nieco „łagodniejsze” kryterium oceny jakości powiązania pomiędzy parametrami wejściowymi i wyjściowymi. Oczekuje się, żeby dla przesunięć bliskich zeru wartość funkcji korelacji była wyraźnie większa, niż dla pozostałych przesunięć.

W przypadku niektórych par parametrów może się jednak zdarzyć, że funkcja korelacji z założenia nie powinna mieć maksimum dla przesunięcia względnego przebiegów równego 0. Na przykład natężenie emisji danej substancji w spalinach może zależeć nie tylko od prędkości obrotowej silnika, ale w równym lub nawet w większym stopniu od szybkości jej narastania. W takim przypadku poszczególne „piki” w obydwu przebiegach nie będą sobie idealnie odpowiadały, ale będą lekko przesunięte w czasie względem siebie. Funkcja korelacji wzajemnej będzie wówczas miała maksimum globalne, odpowiadające powiązaniu tych dwóch przebiegów, lekko przesunięte w czasie.

W związku z powyższym kryterium oceny zasadności zawężenia dziedziny czasowej powinno ponownie ulec zmianie. Można je teraz sformułować następująco: funkcja korelacji wzajemnej rozpatrywanej pary przebiegów powinna osiągać wartości wyraźnie większe w okolicy przesunięcia fazowego, dla którego należy spodziewać się największego powiązania między nimi, a dla pozostałych przesunięć wartości funkcji korelacji powinny być wyraźnie mniejsze. Taki kształt funkcji korelacji powinien występować dla każdej pary przebiegów: wejściowego i wyjściowego. Dopiero wówczas można mówić o zasadności ograniczenia dziedziny czasowej.

Jak widać, ostateczna forma oceny istniejących powiązań jest dość umowna i daje możliwość różnej interpretacji wyników. Z pewnością wymagana jest w tym względzie duża znajomość procesów, zachodzących w silniku, zależności fizycznych, jakich można się spodziewać i pewnego doświadczenia w ocenie wykresów korelacyjnych.

4.3. Wprowadzenie dziedziny zbiorów warunków

Wielowymiarowa dziedzina układu

Przedstawione w poprzednim podrozdziale przykładowe modele, opisujące pracę silnika, zawierają wiele parametrów wejściowych (opisujących warunki pracy silnika). Oznacza to, że zależności pomiędzy parametrami wejściowymi i wyjściowymi (opisujące właściwości użytkowe silnika) są zdefiniowane w dziedzinie wielowymiarowej. Po zamianie zależności operatorowych na zależności funkcyjne liczba parametrów podwaja się, ponieważ trzeba uwzględnić zarówno parametry, informujące o bieżącej wartości poszczególnych wielkości fizycznych, jak również parametry, mówiące o ich zmienności w czasie. To sprawia, że duża liczba wymiarów dziedziny układu staje się poważnym problemem.

W prezentowanej metodzie oceny użytkowych właściwości silnika proponuje się więc przejście do dziedziny zdefiniowanej nie bezpośrednio za pomocą wartości poszczególnych parametrów wejściowych, ale za pomocą zbiorów warunków pracy silnika. Procedura takiej zamiany zostanie omówiona poniżej.

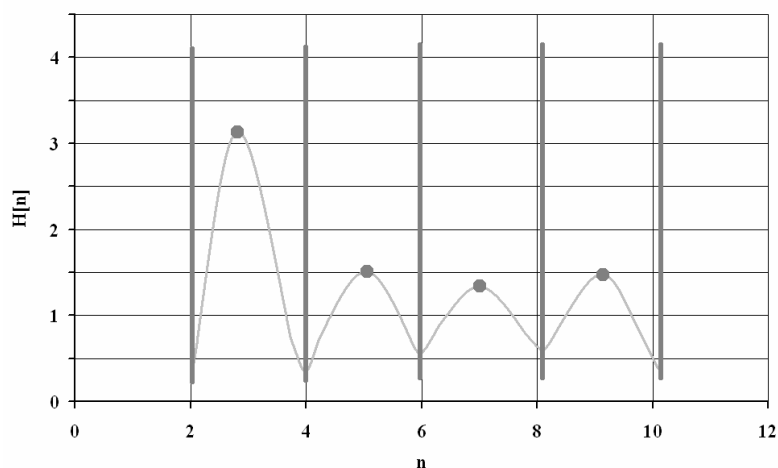
Podział zakresów wartości na przedziały

Pierwszym zabiegiem, prowadzącym do zdefiniowania zbiorów warunków jest podział zakresu wartości każdego parametru wejściowego na przedziały. W najprostszym przypadku można by wybrać arbitralnie liczbę przedziałów, a następnie wyznaczyć taką samą szerokość każdego przedziału, wynikającą z ilorazu zakresu wartości i liczby przedziałów. Nie jest to jednak zalecany sposób postępowania.

Proponuje się dla każdego parametru wejściowego wyznaczenie jego histogramu, który pokaże, jak często występują poszczególne wartości. Wówczas możliwe będzie stwierdzenie, które wartości są najważniejsze (najliczniejsze). Granice poszczególnych przedziałów należy wtedy wyznaczyć pomiędzy wartościami przyjętymi jako najważniejsze, w taki sposób, żeby w każdym przedziale znajdowała się jedna wartość o względnie dużej wadze.

Przy takim rozwiązaniu każdy przedział będzie reprezentował jedną, charakterystyczną wartość, która występuje względnie często.

Rys. 4.3. przedstawia przykładowy (teoretyczny) kształt histogramu prędkości obrotowej. Widoczne są tam cztery maksima, na których kropkami zaznaczono wartości najistotniejsze (lokalnie najliczniejsze). Z kolei w minimach pomiędzy maksimami mogą przebiegać granice przedziałów, zaznaczone pionowymi liniami.



Rys. 4.3. Przykładowy histogram prędkości obrotowej n

Zbiory warunków

Pojedynczy zbiór warunków pracy silnika zostanie teraz zdefiniowany jako przynależność do danej kombinacji przedziałów określonych dla poszczególnych parametrów wejściowych. W efekcie w każdym zbiorze znajdą się warunki reprezentowane przez określone wartości charakterystyczne (najliczniej występujące) dla każdego z parametrów. Liczność występowania poszczególnych wartości w danej kombinacji nie oznacza jednak liczności występowania danej kombinacji.

Liczba zbiorów warunków

Niestety tak zdefiniowanych zbiorów może się okazać bardzo wiele. Na przykład, jeśli dla każdego z sześciu parametrów wejściowych przyjmujemy po 5 przedziałów, liczba kombinacji wyniesie 15625. Liczbę zbiorów można bowiem wyznaczyć ze wzoru 4.15.

$$L_{zb} = L_{przedz.}^{L_{param.}} \quad (4.15.)$$

gdzie: L_{zb} – liczba zbiorów warunków, $L_{przedz.}$ – liczba przedziałów przyjętych dla każdego parametru wejściowego, $L_{param.}$ – liczba parametrów wejściowych.

Dla przykładowej liczby zbiorów, wynoszącej 15625, oczywiste jest, że większość zbiorów będzie pustych. Jeśli test hamowniany będzie składał się z 1000 – 2000 punktów pomiarowych, warunki pracy, które faktycznie wystąpią w czasie testu, będą stanowiły tylko niewielką część warunków zdefiniowanych poprzez ich zbiory. Nie należy się więc obawiać konieczności analizowania tak wielkiej liczby zbiorów, gdyż większość z nich będzie pusta.

Wybór najistotniejszych zbiorów warunków

Ciekawym zagadnieniem jest również to, jak warunki, występujące w danym teście, mogą się rozłożyć w zdefiniowanych zbiorach warunków (które teoretycznie mogłyby zaistnieć). Idealnym przypadkiem byłby ten, w którym wszystkie warunki rozdzieliłyby się na niewielką liczbę zbiorów w taki sposób, żeby wszystkie niepuste zbiory miały podobną moc. Drugim, skrajnym przypadkiem jest ten, w którym wszystkie warunki pracy silnika rozproszyły się po zdefiniowanych zbiorach w taki sposób, że moc żadnego zbioru nie przekroczy 1.

Dużo korzystniejszym jest przypadek pierwszy, ponieważ występujące warunki są tam pogrupowane i możliwe jest prowadzenie obliczeń statystycznych wewnątrz wybranych zbiorów lub inna analiza właściwości silnika w danych zbiorach warunków. Należy się jednak spodziewać, że w wyniku rzeczywistych badań w warunkach dynamicznych, zaistnieje sytuacja pośrednia, pomiędzy dwoma przedstawionymi powyżej. Oznacza to, że część zbiorów warunków będzie się charakteryzowała dużą mocą, a część małą. Można się nawet spodziewać płynnego przejścia mocy zbiorów od dużej mocy do zbiorów pustych.

W takiej sytuacji istnieje możliwość wyboru tylko tych zbiorów stanów o dużej mocy. Można w tym celu wybrać arbitralnie moc graniczną, na przykład taką, dla której istnieje dostatecznie uzasadniona interpretacja operacji statystycznych, które planuje się wykonać na wybranych zbiorach. Można również założyć, jaką część wszystkich pomiarów pracy silnika, zaistniałych w czasie testu, należy uwzględnić. Wówczas warto sporządzić wykres sumy mocy zbiorów o mocy niemniejszej niż graniczna, zależny od wartości granicznej. Na jego podstawie będzie można określić, jaką wartość graniczną mocy zbiorów trzeba przyjąć, żeby w dalszej analizie wyników uwzględnić zadaną liczbę pomiarów wykonanych w teście.

Moc zbiorów nie jest jedynym kryterium, na podstawie którego można wybierać zbiory warunków do dalszej analizy. Można wybrać również te zbiory, w których właściwości silnika będą najbardziej interesujące. Jako przykład można podać średnią wartość natężenia emisji wybranej substancji w spalinach, albo średnią wartość sumy natężenia emisji wszystkich substancji zanieczyszczających mierzonych w spalinach (może to być również suma ważona).

Dość ciekawym kryterium wyboru zbiorów warunków może się okazać połączenie dwóch kryteriów przedstawionych powyżej. Przykładem niech będzie sumaryczna emisja wszystkich substancji zanieczyszczających, mierzonych w spalinach. Wartość tego parametru

będzie zależała zarówno od średniej wartości natężenia emisji wszystkich substancji, jak również od mocy danego zbioru. W ten sposób wybrane zostaną te warunki pracy silnika, które są szczególnie niebezpieczne dla środowiska, ponieważ nie dość, że w danych warunkach natężenie emisji jest duże, to warunki te występują częściej, niż inne.

Podsumowanie

Możliwość wyboru najistotniejszych zbiorów warunków pracy silnika pod względem różnych kryteriów istotności jest właściwie największą zaletą stosowania dziedziny zbiorów warunków. Pozwala to nie tylko na wychwycenie tych warunków, które są najbardziej interesujące w danym badaniu, ale też na radykalne zmniejszenie liczby analizowanych zbiorów.

4.4. Niepowtarzalność stanów pracy silnika w danych warunkach pracy

Niepowtarzalność wyników

Wykonując kilkakrotnie dowolny pomiar, otrzymujemy zbiór wyników pomiarów. Bardzo często okazuje się, że poszczególne elementy tego zbioru (czyli poszczególne wyniki pomiarów) nie są sobie równe. Takie zjawisko nazywamy niepowtarzalnością wyników pomiarów. Aby zmierzyć zjawisko niepowtarzalności w sposób ilościowy najczęściej korzysta się ze wskaźnika niepowtarzalności w postaci przedstawionej we wzorze 4.16. [15, 21]

$$W = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (4.16.)$$

gdzie: μ – wartość średnia wyników pomiarów, σ – odchylenie standardowe wyników.

Przyczyny niepowtarzalności

Można wyróżnić dwie podstawowe grupy przyczyn niepowtarzalności wyników pomiarów:

- zjawiska przypadkowe,
- niedoskonałość analizy wyników.

Pod pojęciem zjawisk przypadkowych należy rozumieć wszystkie przyczyny niepowtarzalności, na które nie mamy bezpośredniego wpływu i w pewnym stopniu

uproszczenia przyjmujemy, że mają charakter przypadkowy. Do takich przyczyn należą między innymi: zmienne warunki pracy silnika, zmienny charakter jego pracy, niedoskonałość przyrządów pomiarowych, niedoskonałość metod pomiarowych itp. Tego typu zjawiska są niepożądane, ale nie sposób ich całkowicie uniknąć. Oczywiście zawsze istnieje możliwość zastosowania przyrządów pomiarowych wyższej klasy, jednak wzięwszy pod uwagę zmienny charakter pracy silnika, generujący wiele zjawisk przypadkowych, nie zawsze takie przedsięwzięcie będzie uzasadnione.

Niedoskonałość analizy wyników wiąże się natomiast z interpretacją niektórych informacji zawartych w wynikach pomiarów jako niepowtarzalności, podczas gdy w rzeczywistości może to być na przykład efekt niewłaściwego przyporządkowania do zbiorów stanów. Dlatego też czynnik ten będzie dalej szczegółowo omawiany.

O ile wpływ zjawisk przypadkowych na niepowtarzalność jest nieunikniony i powinien być dobrze wyeksponowany przez metodę analizy wyników, o tyle wpływ przyporządkowania do zbiorów warunków jest efektem niedoskonałości metody analizy i powinien być minimalizowany.

Niedoskonałość przyporządkowania do zbiorów warunków

Zgodnie z wnioskami z podrozdziału 4.3., przyporządkowanie danych warunków pracy silnika do wybranego zbioru warunków polega na przynależności do danej kombinacji przedziałów określonych dla poszczególnych parametrów wejściowych. Problem wynika z niezerowej szerokości poszczególnych przedziałów. Im węższy przedział, tym jest bardziej jednoznacznie zdefiniowany. W przypadku przedziałów o dużej szerokości poszczególne zbiory warunków są tak naprawdę zdefiniowane niejednoznacznie. W efekcie do jednego zbioru warunków przypisane są warunki różniące się od siebie. W szczególnym przypadku różnice mogą występować we wszystkich parametrach wejściowych, definiujących warunki pracy silnika. Właśnie stąd wynika niepowtarzalność wyników w obrębie pojedynczego zbioru warunków, ponieważ różne warunki powodują różne stany pracy silnika.

Teoretycznie rozwiązaniem tego problemu byłoby zawężenie przedziałów definiowanych na poszczególnych parametrach wejściowych. Jednak taki zabieg doprowadziłby do zwiększenia liczby przedziałów, a zatem również do zwiększenia liczby zbiorów warunków. Jest to więc rozwiązanie, które można zastosować jedynie w ograniczonym zakresie.

Istnieje więc potrzeba znalezienia narzędzia, które pozwoli na ocenę, jaka część niepowtarzalności wyników pochodzi ze zjawisk przypadkowych (których nie unikniemy), a jaka część wynika z niedoskonałości przyporządkowania wyników do zbiorów warunków pracy silnika. W tym celu zostanie wykorzystana teoria liczb rozmytych.

Pojęcie liczb rozmytych [57]

Pojęcie liczb rozmytych nie jest zbyt ściśle, ponieważ same liczby są definiowane w tym przypadku dokładnie tak samo, jak w rozważaniach klasycznych. Rozmycie dotyczy dosłownie przedziałów wartości, definiujących zbiory liczb.

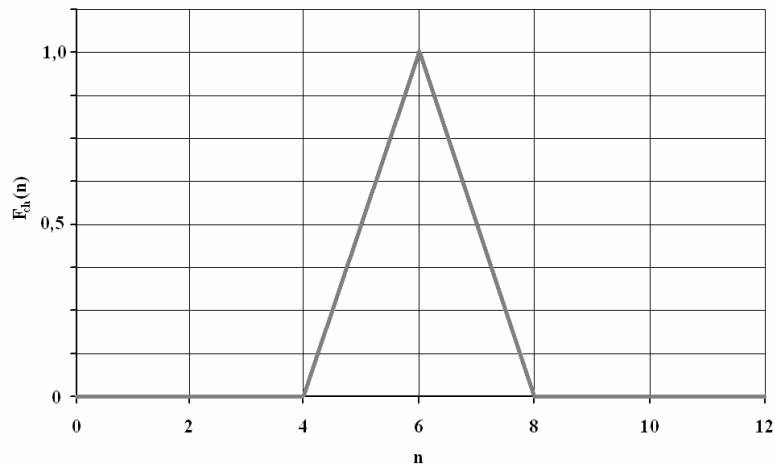
Rozmyty przedział wartości, w odróżnieniu od przedziału klasycznego, jest zdefiniowany za pomocą pojedynczej wartości charakterystycznej, a nie za pomocą granic, wewnątrz których liczby przynależą do przedziału. Wartość charakterystyczna reprezentuje idealny przypadek liczby, która w najdoskonalszy sposób przynależy do danego przedziału.

Oprócz wartości charakterystycznej definiowana jest również funkcja charakterystyczna, której wartość informuje, na ile dany argument (dana liczba) przynależy do rozpatrywanego przedziału. Jej wartość równa 1 oznacza, że dana liczba całkowicie przynależy do danego przedziału. Zazwyczaj funkcja charakterystyczna przyjmuje wartość równą 1 tylko dla wartości charakterystycznej. Z kolei wartość równa 0 oznacza całkowity brak przynależności do rozpatrywanego przedziału. Funkcja charakterystyczna przyjmuje cały zakres wartości od 0 do 1 dla różnych argumentów, dzięki czemu różne wartości przynależą do rozpatrywanego przedziału w różnym stopniu.

Kształt funkcji charakterystycznych może być różny w zależności od potrzeb. Ważne jest jedynie, żeby była to funkcja obustronnie malejąca wokół wartości charakterystycznej. Stromość spadku funkcji będzie niosła informację o tym, jak bliskie sąsiedztwo wartości charakterystycznej należy uznać za silnie przynależące do przedziału, który ta wartość reprezentuje. Niekiedy wartości zerowe funkcja przyjmuje dopiero w nieskończoności (oraz w minus nieskończoności), a czasami wyznacza się arbitralnie pewne granice, poza którymi wartość funkcji charakterystycznej wynosi 0.

Często spotykanym rozwiązaniem jest trójkątny kształt funkcji. Wartość równa 1 jest oczywiście przypisana wartości charakterystycznej, a oprócz tego wyznaczone są granice, poza którymi funkcja ma wartość 0. W zakresach wartości pomiędzy wartością charakterystyczną, a wspomnianymi granicami, funkcja ma kształt linii prostych. Takie

rozwiązanie będzie właśnie proponowane w niniejszej metodzie. Przykładowy kształt trójkątnej funkcji charakterystycznej przedstawiono na rys 4.4. Granice przedziału znajdują się w wartościach 4, oraz 8, a wartość charakterystyczna w wartości 6.



Rys. 4.4. Przykładowy kształt trójkątnej funkcji charakterystycznej

W podrozdziale 4.3. zostało zaproponowane wyznaczenie przedziałów (klasycznych) w taki sposób, żeby wewnątrz każdego z nich znajdowała się jedna wartość najistotniejsza (lokalnie najczęściej występująca). Będzie ona teraz utożsamiana z wartością charakterystyczną. Z kolei granice, poza którymi funkcja charakterystyczna będzie przyjmowała wartości równe 0, będą tożsame z granicami przedziałów klasycznych. W efekcie przedział rozmyty będzie miał taki sam zakres, jak przedział klasyczny, a dodatkowo jego funkcja charakterystyczna będzie określała, na ile wartości w jego wnętrzu są zbliżone do wartości charakterystycznej dla danego przedziału.

Wykorzystanie zbiorów rozmytych do oceny przyczyn niepowtarzalności

Omówiony zostanie teraz problem przynależności nie tylko do pojedynczego przedziału dla danego parametru wejściowego, ale do zbioru warunków pracy silnika, czyli przynależności do kombinacji przedziałów dla poszczególnych parametrów wejściowych. Zostanie w tym celu zdefiniowana funkcja charakterystyczna zbioru F_{ch} , opisująca stopień przynależności do danego zbioru warunków, jako iloczyn wartości funkcji charakterystycznych przyporządkowanych do przedziałów rozmytych, których kombinacja jest rozpatrywana.

Zdefiniowana zostanie ponadto wartość progowa P , informująca o tym, które warunki pracy silnika są kwalifikowane do rozpatrywanego zbioru warunków. P będzie przyjmowała

wartości od 0 do 1 (jak funkcja F_{ch}). Dla P równego 0 do danego zbioru zostaną przyporządkowane wszystkie te warunki, które należały do niego w przypadku zbiorów klasycznych. Dla P równego 1 zostaną przyporządkowane tylko te przypadki, dla których wartości parametrów wejściowych idealnie odpowiadają przyjętym wartościom charakterystycznym (wzorcowym). W tym przypadku może się okazać, że nie istnieje żaden przypadek odnotowany w danych badaniach, który tak idealnie odzwierciedla warunki uznane za wzorcowe dla rozpatrywanego zbioru warunków. Dla wartości P pośrednich, pomiędzy 0 i 1, do danego zbioru będą kwalifikowane warunki w pewnym stopniu podobne do warunków wzorcowych, ale nie odpowiadające im w zupełności.

Następnie dla wybranego zbioru warunków można sporządzić wykres dwóch zależności:

- niepowtarzalności wyników W danego parametru wyjściowego dla warunków pracy silnika zakwalifikowanych przy zadanej wartości progowej P w funkcji wartości progowej P ,
- liczba warunków pracy silnia L zakwalifikowanych przy zadanej wartości progowej P w funkcji wartości progowej P .

Te dwie zależności (najlepiej naniesione na jeden wykres) pozwolą na ocenę przyczyn zjawiska niepowtarzalności w danym zbiorze warunków. Zwiększanie P będzie bowiem eliminowało wpływ niedoskonałości przyporządkowania do zbiorów warunków na niepowtarzalność wyników. Jeśli więc wraz ze zmianą wartości P wartość W będzie się zmieniać, będzie możliwa ocena tego zjawiska. Możliwe interpretacje tych wyników zostaną przedstawione w punkcie poniżej.

W prezentowanej metodzie nie proponuje się zastąpienia zbiorów klasycznych zbiorami rozmytymi. Teoria liczb rozmytych może jedynie pomóc ocenić zjawisko niepowtarzalności w zbiorach, które ostatecznie pozostaną w wersji klasycznej.

Możliwe interpretacje wyników

Wśród możliwych kształtów funkcji $W(P)$ i $L(P)$, opisanych w poprzednim punkcie, warto wymienić kilka szczególnych przypadków, z których wnioski będą świadczyły o przyczynach zjawiska niepowtarzalności wyników.

- $W(P)$ stałe (lub rosnące). Oznacza to, że niepowtarzalność w tym przypadku nie wynika z niedoskonałości przyporządkowania do danego zbioru warunków.

- $W(P)$ malejące i stabilizujące się na wartości powyżej 0. W tym przypadku niepowtarzalność zależy zarówno od zjawisk przypadkowych, jak i od niedoskonałości przyporządkowania do zbioru stanów. Tę drugą przyczynę udało się wyeliminować, a wartość, na której się ustabilizowała, jest wartością niepowtarzalności, odpowiadającą zjawiskom przypadkowym.
- $W(P)$ malejące do 0 zanim $L(P)$ zmaleje do 1. Oznacza to, że niepowtarzalność w tym przypadku zależała jedynie od niedoskonałości przyporządkowania do zbioru warunków i udało się ją całkowicie wyeliminować (sprowadzić do wartości zerowej).
- $W(P)$ malejące do 0 wraz z $L(P)$ malejącym do 1 w tym samym czasie. W tym przypadku niepowtarzalność zależy od niedoskonałości przyporządkowania do zbioru stanów i może również zależeć od zjawisk przypadkowych, ale nie sposób tego określić, ponieważ zmniejszenie L do 1 lub 0 samo w sobie zmniejsza niepowtarzalność wyników. Nie jest wówczas możliwe jednoznaczne oszacowanie udziału zjawisk przypadkowych jako przyczyny niepowtarzalności, choć można się spodziewać, że nie mają one dominującego wpływu.
- $W(P)$ stałe na poziomie wartości równym 0. Jest to przypadek szczególny, dla którego nie występuje w ogóle zjawisko niepowtarzalności, a więc nie ma też swoich przyczyn, które poddawane są ocenie.

4.5. Wizualizacja wielowymiarowych zależności

Trudności w wizualizacji zależności wielowymiarowych

Zgodnie ze spostrzeżeniami przedstawionymi w podrozdziale 4.3., model silnika w stanach dynamicznych jest opisany w przestrzeni wielowymiarowej. Jak wiadomo, graficzne przedstawienie zależności dla dziedziny o więcej niż trzech wymiarach jest bardzo trudne. W prezentowanym przykładzie pojawiła się dziedzina sześciowymiarowa, co sprawia, że bezpośrednie przedstawienie tych zależności jest niemożliwe.

Tymczasem brak możliwości graficznego lub innego przedstawienia wyników analizy stanów pracy silnika sprawia, że dotychczas zaproponowane rozważania są mało użyteczne. Żeby umożliwić ocenę właściwości silnika spalinowego, potrzebne jest narzędzie do zaprezentowania tych właściwości. W niniejszej pracy proponuje się dwa niezależne

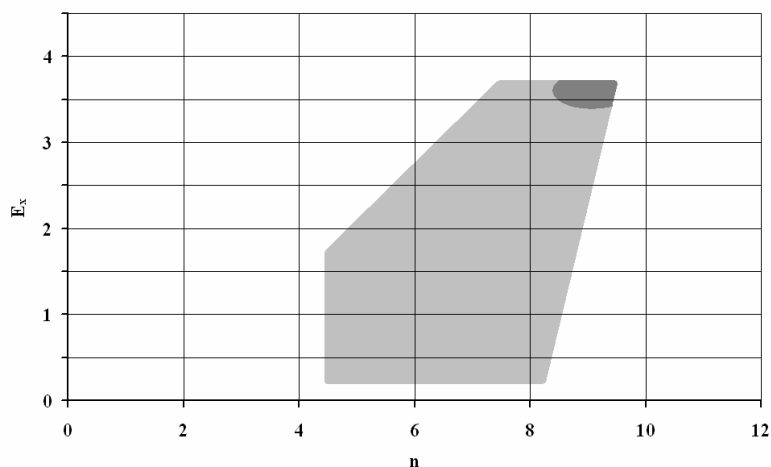
rozwiązania tego problemu, z których każdy może się okazać przydatny do oceny innych właściwości użytkowych silnika w stanach dynamicznych.

Warto omówić jeszcze w tym miejscu pewną uwagę formalną, odnoszącą się do stosowanego nazewnictwa. Ze względu na to, że zadane warunki pracy silnika wymuszają jego pracę w konkretnym stanie, te określenia będą niekiedy stosowane zamiennie. Silnik pracujący w danych warunkach znajduje się również w określonym stanie pracy. Zbiór warunków pracy silnika definiuje pośrednio stan pracy silnika. Uwagę tę podaje się dopiero teraz, ponieważ w poprzednim podrozdziale, kiedy poszukiwana była rozbieżność stanów pracy w danym zbiorze warunków, nie można było stosować takiego uproszczenia, gdyż ze względu na niepowtarzalność stanów pracy nie były to określenia tożsame.

Wizualizacja wyników w pojedynczym zbiorze stanów pracy

Dla wybranego zbioru stanów pracy silnika (zdefiniowanego za pomocą wyboru zbioru warunków jego pracy) proponuje się sporządzić wykresy, odnoszące wartości parametrów wyjściowych w danym zbiorze stanów do wartości, występujących we wszystkich stanach w danym badaniu.

Rozważmy jako przykład następującą parę wielkości: parametr wejściowy w postaci prędkości obrotowej n i parametr wyjściowy w postaci natężenia emisji E_x wybranego składnika spalin x . Istnieje możliwość sporządzenia wykresu zależności $E_x(n)$ dla wszystkich stanów pracy silnika, oraz naniesienia na ten sam wykres zależności $E_x(n)$ dla wybranego zbioru stanów (zaznaczając drugą zależność na przykład innym kolorem). Teoretyczny wygląd przykładowego wykresu został przedstawiony na rys. 4.5.

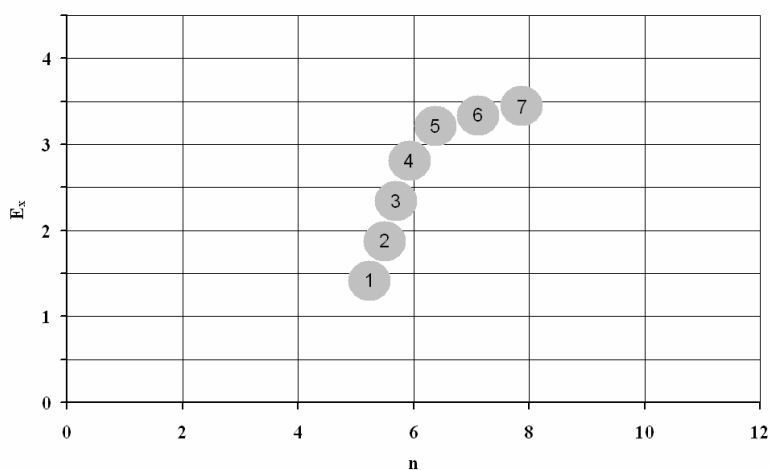


Rys. 4.5. Teoretyczna zależność $E_x(n)$ dla wszystkich stanów pracy silnika (jasny obszar) i dla wybranego zbioru stanów jego pracy (ciemny obszar)

Z teoretycznego przykładu przedstawionego na rys. 4.5. wynikałoby, że wybrany zbiór stanów charakteryzuje się bardzo dużym natężeniem emisji wybranej substancji w odniesieniu do całego zakresu natężenia emisji we wszystkich możliwych stanach. Aby poznać w pełniejszy sposób użytkowe właściwości silnika w danym zbiorze stanów pracy, należałoby sporządzić podobne wykresy dla każdej pary parametrów wyjściowych i wejściowych.

Wizualizacja zależności dla kilku sąsiadujących zbiorów stanów

Drugą propozycją wizualizacji użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych jest zestawienie na jednym wykresie wyników z kilku sąsiadujących zbiorów stanów jego pracy. Należy w tym celu wybrać jeden parametr wejściowy, którego wpływ na stan pracy silnika będzie rozważany. Następnie wybiera się zestaw kilku zbiorów stanów pracy, mających identyczne wartości wszystkich wielkości, opisujących warunki pracy silnika z wyjątkiem tego jednego parametru, którego zmienność jest analizowana. W efekcie wybrane zbiory stanów będą się różniły tym jednym parametrem. Na wykresie będzie wówczas widoczna zależność wybranego parametru wyjściowego od wybranego parametru wejściowego, przy zachowaniu ograniczeń w postaci niezmiennych wszystkich innych parametrów wejściowych, opisujących warunki pracy silnika w danym przypadku.



Rys. 4.6. Teoretyczne zestawienie wyników E_x dla kilku sąsiadujących stanów pracy silnika, różniących się od siebie jedynie wartością prędkości obrotowej n

Teoretyczny wygląd takiego wykresu przedstawiono na rys. 4.6. Są tam zaznaczone okrągłe obszary (ponumerowane od 1 do 7), odpowiadające poszczególnym zbiorom stanów pracy. Całość tworzy zależność natężenia emisji E_x wybranej substancji x w spalinach od prędkości obrotowej silnika n . Oczywiście w rzeczywistości wartości, odpowiadające

poszczególnym zbiorom stanów nie będą ponumerowane, a ich zakresy wartości mogą się nawzajem przenikać, co może uniemożliwić ocenę, które wartości pochodzą z którego zbioru stanów. Nie jest to jednak istotne, ponieważ najważniejszą informacją do odczytania z takiego wykresu jest zależność wybranego parametru wyjściowego od wybranego parametru wejściowego, przy narzuconych więzach w postaci niezmienności pozostałych parametrów wejściowych. Taka zależność odpowiada bowiem konkretnej właściwości silnika w wybranych stanach dynamicznych.

Aby otrzymać pełniejszy obraz tego typu zależności, można wybrać jeden zbiór stanów pracy silnika, a następnie sporządzić dla niego zestaw wykresów odpowiadających zależnościom wszystkich interesujących parametrów wyjściowych od wszystkich parametrów wejściowych. Należy pamiętać, żeby rozważając wpływ zmienności wybranych parametrów wejściowych nie ograniczać się do wyników jedynie wybranego zbioru stanów, ale nanieść na wykres również sąsiednie stany, które różnią się tylko tym jednym parametrem wejściowym.

5. Badania empiryczne wykorzystane do weryfikacji metody

5.1. Sposób weryfikacji metody

Konieczność weryfikacji

Dotychczasowe rozważania, przedstawiające metodę oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych były jedynie rozważaniami teoretycznymi. Miały one na celu próbę rozwiązania szeregu problemów, jakie zazwyczaj pojawiają się przy analizie zagadnień dynamicznych. Istnieje potrzeba weryfikacji teorii, czy faktycznie sugerowana procedura rozwiązuje omawiane problemy, czy nadaje się ona do interpretacji wyników w przypadku takich zjawisk, z jakimi należy się liczyć podczas rzeczywistych badań hamownianych.

Ocena na podstawie powtarzalności dla poszczególnych realizacji testów

Brak wzorcowych wyników, opisujących stan pracy silnika w wybranych warunkach dynamicznych, sprawia, że nie ma możliwości odnieść do nich wyników powstałych po zastosowaniu prezentowanej metody. W związku z tym nie da się bezpośrednio zweryfikować wyników na podstawie oceny poszczególnych wartości.

Zamiast tego proponuje się ocenę jakościową, sprawdzającą powtarzalność wniosków, wynikających ze stosowanej metody obliczeniowej. W tym celu wykorzystano badania empiryczne, zrealizowane kilkakrotnie dla każdego z przyjętych testów hamownianych. Następnie dla każdej realizacji każdego testu został przeprowadzony niezależny tok obliczeniowy, wykorzystujący prezentowaną metodę. Na podstawie każdego takiego toku obliczeń (dla wszystkich realizacji poszczególnych testów) zostały sformułowane wnioski, będące oceną użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych. Istnieje wobec tego możliwość oceny tych wniosków pod kątem ich powtarzalności w poszczególnych realizacjach wszystkich testów.

5.2. Badania empiryczne

Obiektem badań empirycznych, wykonanych na hamowni podwoziowej, był samochód osobowy z silnikiem o zapłonie iskrowym, o objętości skokowej $1,4 \text{ dm}^3$, o wielopunktowym wtrysku paliwa. Samochód spełniał wymagania emisji zanieczyszczeń na poziomie Euro 3.

Badania przeprowadzono na hamowni podwoziowej, spełniającej wymogi następujących przepisów.

- Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają zostać podjęte przeciwko emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych przez silniki o zapłonie samoczynnym stosowane w pojazdach oraz emisji zanieczyszczeń gazowych z silników o zapłonie wymuszonym, napędzanych gazem ziemnym lub skroplonym gazem ropopochodnym, stosowanych w pojazdach, oraz zmieniająca dyrektywę Rady 88/77/EWG [29].
- Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji, dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów [77].
- Rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 z dnia 18 lipca 2008 r., wykonujące i zmieniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady, w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń, pochodzących z lekkich pojazdów osobowych i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji, dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów [78].

Do badań wykorzystano trzy testy, odwzorowujące użytkowanie samochodu w warunkach rzeczywistego ruchu (a więc wymuszające pracę silnika w warunkach dynamicznych). Były to: Autobahn, FTP-75, oraz Stop&Go, z których każdy reprezentuje inny rodzaj ruchu samochodu – odpowiednio: ruch autostradowy, ruch mieszany (miejski i pozamiejski), oraz ruch w zatorach ulicznych. Można się spodziewać, że w różnych testach silnik będzie pracował w innych stanach lub poszczególne stany będą występowały z inną częstotliwością. Różnorodność testów umożliwia zatem porównanie proponowanej metody w zastosowaniu do pracy silnika w różnych stanach dynamicznych.

Każdy z testów został wykonany pięciokrotnie.

Wymuszenie obciążenia na wale korbowym silnika, oraz zapewnienie możliwości obrotu napędowych kół trakcyjnych było realizowane za pomocą stanowiska rolkowego, z wykorzystaniem układu przeniesienia napędu w pojeździe.

Pomiar i rejestracja wielkości fizycznych, wynikających bezpośrednio z pracy tego stanowiska (moment hamujący na rolkach i prędkość obrotowa rolek), był realizowany przez komputerowy układ sterujący. Wielkości te były następnie przeliczane na moment hamujący zadany na wale korbowym silnika oraz prędkość obrotową wału korbowego silnika. Dodatkowo układ ten rejestrował wielkość, opisującą sterowanie silnikiem, realizowane przez operatora badań, wielkości mierzone przez zestaw analizatorów spalin, oraz natężenie przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika.

Pomiar natężenia emisji poszczególnych składników spalin polegał na poborze spalin, rozcieńczeniu ich powietrzem i wprowadzeniu do przewodu o wymuszonym, stałym przepływie krytycznym. Następnie próbki spalin trafiały do odpowiednich analizatorów, gdzie poddawane były analizie modalnej.

Wszystkie wielkości fizyczne rejestrowane były z częstotliwością 1 Hz, jako wartość średnia arytmetyczna z wyników pomiarów wykonywanych co 0,1 s.

Fakt wykorzystania hamowni podwoziowej (a nie silnikowej) w badaniach można uznać za pewnego rodzaju mankament, ponieważ wyniki badań obejmują nie tylko właściwości samego silnika, ale całego układu napędowego w samochodzie. Nie niesie to jednak ze sobą zbyt poważnych konsekwencji, ponieważ celem prezentacji metody jest przedstawienie wniosków jakościowych, a nie ilościowych. Ewentualne straty energii, wynikające z pracy układu przeniesienia napędu i ze współpracy kół napędowych z rolkami hamowni, wpływają raczej na wartości bezwzględne wyników badań, a nie na istnienie określonych zależności w pracy silnika w stanach dynamicznych.

Rozcieńczanie spalin i przekazywanie ich do analizatorów na drodze przepływu krytycznego jest zjawiskiem korzystnym, ponieważ minimalizuje to przesunięcia fazowe w poszczególnych torach pomiarowych, opisane w podrozdziale 4.1. Im większą część drogi spaliny pokonują w postaci przepływu krytycznego, tym mniejszy jest wpływ natężenia emisji spalin V_s na czas zwłoki T w rozpatrywanym torze pomiarowym.

Dokładność pomiarowa urządzeń zastosowanych do wykonania badań jest zadowalająca, ponieważ nadają się one do pomiaru emisji na poziomie norm Euro 5 i Euro 6, podczas gdy samochód, stanowiący obiekt badań, charakteryzował się poziomem emisji zgodnym z normą Euro 3.

Niepokojącym faktem jest jednak mała częstotliwość rejestrowania wszystkich wielkości, wynosząca 1 Hz. Zjawiska fizyczne, zachodzące w silniku mogą zmieniać się

znacznie częściej, w ogólności wraz z każdym cyklem pracy. Dla przykładowej prędkości obrotowej 3000 min^{-1} , jeden obrót wału korbowego trwa $0,02 \text{ s}$. W przypadku czterocylindrowego silnika czterosuwowego, oznacza to rozpoczęcie kolejnego cyklu pracy co $0,01 \text{ s}$. Z tego względu częstotliwość próbkowania, która zgodnie z zasadami analizy sygnałów dyskretnych mogłaby wychwycić wszystkie zjawiska dynamiczne, powinna wynosić co najmniej 200 Hz .

Przyjęcie częstotliwości próbkowania na poziomie 1 Hz oznacza w rzeczywistości badanie stanów pracy silnika uśrednionych w czasie. Jakkolwiek jest to niewątpliwa wada wykorzystanych w pracy badań, nie oznacza to braku ich przydatności do weryfikacji prezentowanej metody oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych. Wnioski wyciągnięte z uśrednionych wyników mogą pomijać niektóre zjawiska, zachodzące w bardzo krótkich przedziałach czasu. Poza tym jednak nie powinno to mieć wpływu na większość ogólnych zależności, poddawanych analizie w całym toku obliczeniowym. Innymi słowy, ograniczenie częstotliwości próbkowania wprowadza rodzaj filtra dolnoprzepustowego na zjawiska zachodzące w silniku, które zostaną uwzględnione przez prezentowaną metodę.

5.3. Przygotowanie wyników badań empirycznych do weryfikacji metody

Forma wyników

Wyniki pomiarów zostały przekazane do analizy w postaci cyfrowej, jako zbiory liczb, reprezentujących wartości wszystkich mierzonych wielkości fizycznych w kolejnych chwilach czasu. Taki zestaw danych odpowiadał każdej z pięciu realizacji każdego z trzech testów.

Do pracy zostały wykorzystane dane, odnoszące się do następujących wielkości fizycznych:

- prędkość obrotowa silnika n ,
- moment oporów zadawany na wale korbowym silnika M_r ,
- stopień ustawienia urządzenia sterującego silnikiem s ,
- natężenie przepływu powietrza w kolektorze dolotowym silnika V_a ,
- natężenie emisji węglowodorów E_{HC} ,
- natężenie emisji tlenu węgla E_{CO} ,

- natężenie emisji tlenków azotu E_{NOx} ,
- natężenie emisji dwutlenku węgla E_{CO2} ,
- natężenie emisji cząstek stałych E_{PM} .

Odrzucenie niektórych realizacji

Z każdego testu, spośród pięciu realizacji została odrzucona jedna realizacja, dla której wyniki pomiarów najbardziej odbiegały od pozostałych realizacji. Zabieg taki był podyktowany dążeniem do zachowania jak największej powtarzalności wyników w obrębie poszczególnych realizacji. Weryfikacja prezentowanej w pracy metody ma się bowiem koncentrować na powtarzalności wniosków wyciąganych z proponowanej procedury obliczeniowej. Tymczasem podstawowym warunkiem, żeby taka powtarzalność mogła nastąpić jest zachowanie powtarzalności w samych wynikach badań, stanowiących dane wejściowe dla metody obliczeniowej.

Ostatecznie więc każdy z trzech testów hamownianych był reprezentowany przez cztery jego realizacje.

Wstępne przetwarzanie wyników

Tak wyselekcjonowane dane należało poddać wstępnemu ich przetworzeniu w celu przygotowania do analizy. Były to następujące zabiegi.

- Odrzucenie wartości ujemnych. W efekcie występowania niedoskonałości pomiarowych w niektórych (nielicznych) przypadkach, zarejestrowane wartości były mniejsze od zera. Ponieważ nie istnieje uzasadniona interpretacja fizyczna takiego stanu rzeczy, wszystkie wartości ujemne zostały zastąpione wartością 0. Pozostałe wartości nie były zmieniane.
- Filtrowanie dolnoprzepustowe. Ze względu na występujące w sygnałach szumy, wszystkie przebiegi zostały poddane filtrowaniu dolnoprzepustowemu, zrealizowanemu drogą uśredniania dla pięciu kolejnych wartości.
- Obliczenie wartości pochodnych. W przypadku takich wielkości, jak prędkość obrotowa n , moment obrotowy M_r , oraz sterowanie s , występowała (zgodnie z podrozdziałem 4.2.) potrzeba obliczenia przebiegów pochodnych. Wartości pochodnych obliczono jako różnicę między wartością bieżącą i wartością poprzednią.

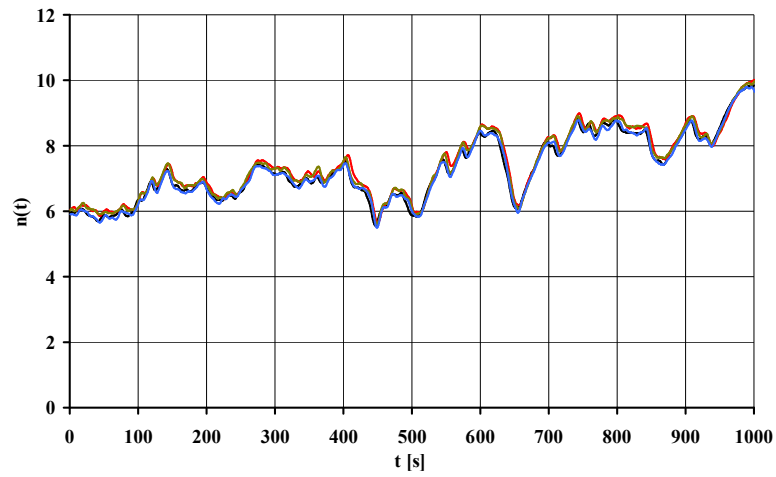
Następnie przebiegi pochodnych poddano takiemu procesowi filtrowania, jak w punkcie poprzednim.

- Standaryzacja. Każdy z przebiegów został również poddany standaryzacji, aby zakresy przyjmowanych wartości były łatwiejsze do porównywania. Taki zabieg, jak wiadomo, eliminuje informację o rzeczywistych wartościach wszystkich wielkości fizycznych. Jednak zgodnie z wnioskami przedstawionymi w podrozdziale 5.1., takie informacje nie były przydatne, ponieważ nie istnieje żadne źródło odniesienia, pozwalające ocenić poprawność bezwzględnych wartości, otrzymanych w wyniku analizy danych. Natomiast możliwość łatwego porównywania wyników dla różnych realizacji poszczególnych testów, pełni kluczową rolę podczas oceny skuteczności prezentowanej metody.

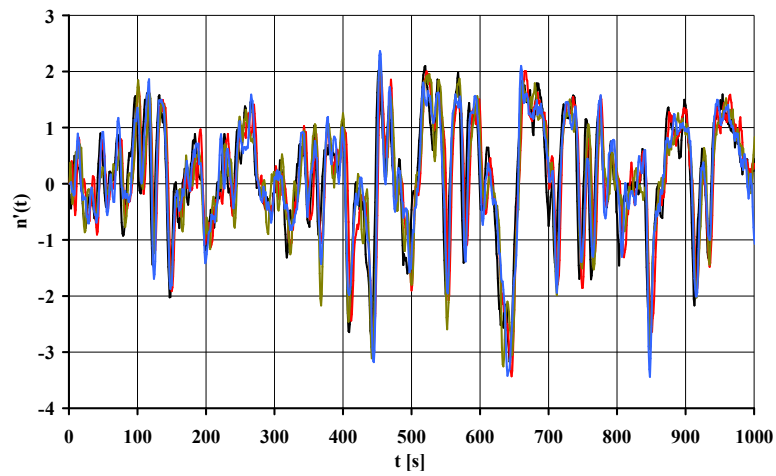
Ocena powtarzalności wyników badań

Ostatecznym efektem wstępnego przetwarzania danych było otrzymanie dwunastu przebiegów (dwunastu wielkości fizycznych: n , n' , M_r , M_r' , s , s' , V_a , E_{HC} , E_{CO} , E_{NOx} , E_{CO2} , E_{PM}) dla każdego z dwunastu badań (po cztery realizacje dla każdego z trzech testów).

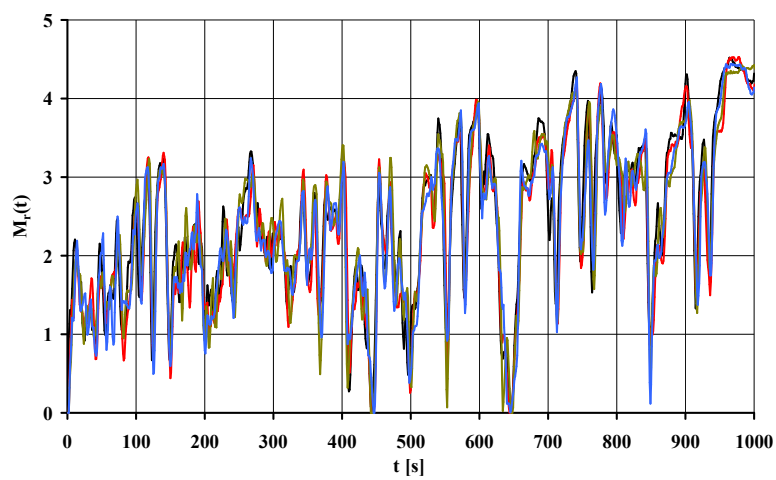
Poniżej, na rys. 5.1. – 5.36. zostały przedstawione tak przygotowane wyniki badań. Na każdym wykresie zestawiono ze sobą wybraną wartość dla wszystkich czterech realizacji danego testu w celu oceny powtarzalności wyników badań.



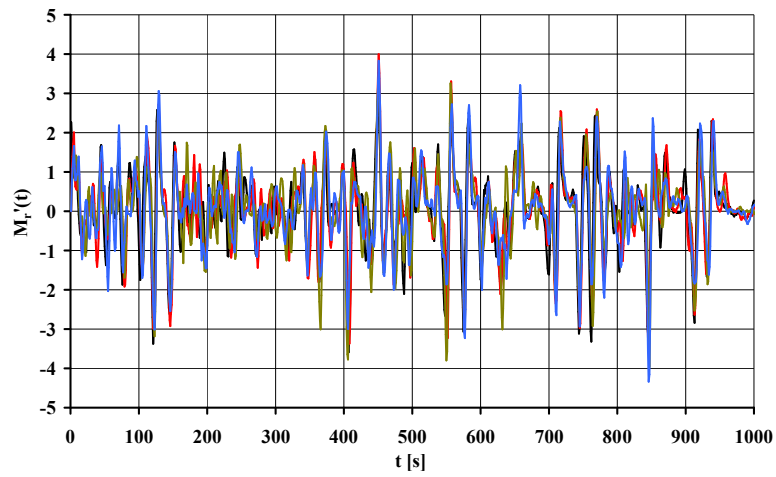
Rys. 5.1. Przebieg prędkości obrotowej n w teście Autobahn



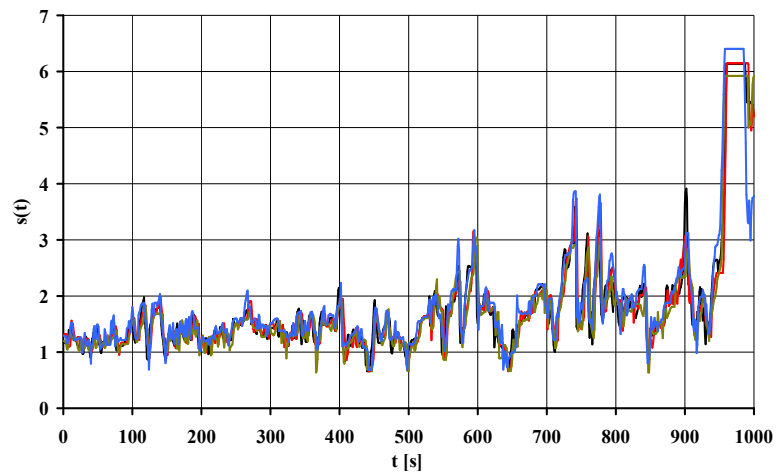
Rys. 5.2. Przebieg pochodnej prędkości obrotowej n' w teście Autobahn



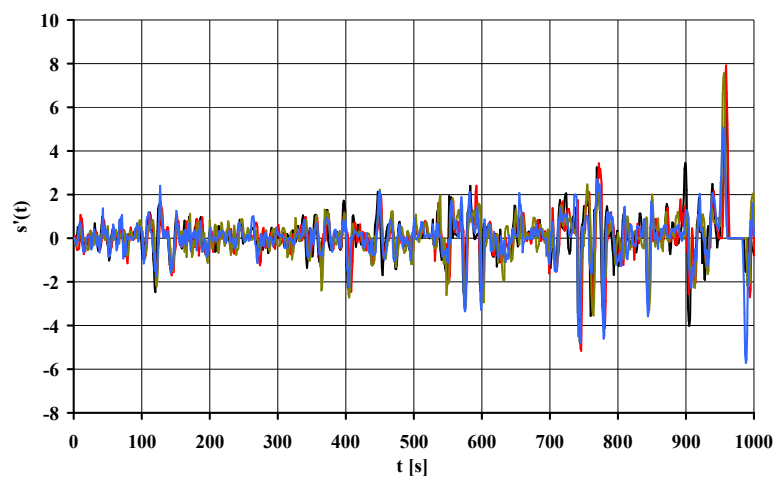
Rys. 5.3. Przebieg momentu obrotowego M_r w teście Autobahn



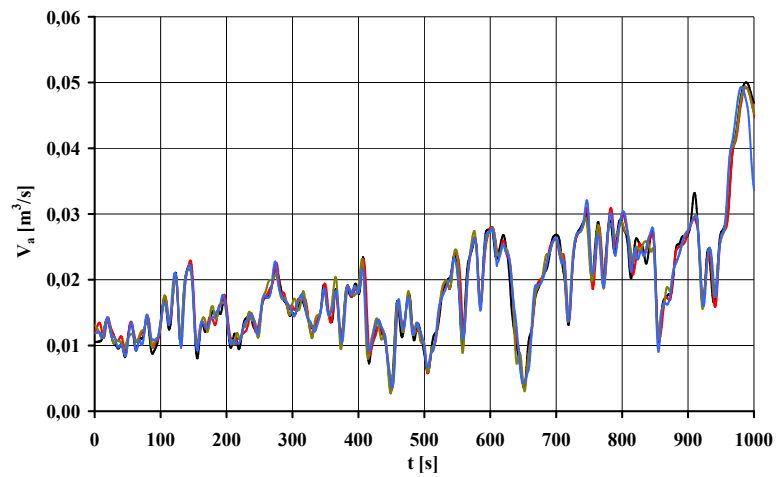
Rys. 5.4. Przebieg pochodnej momentu obrotowego M_r' w teście Autobahn



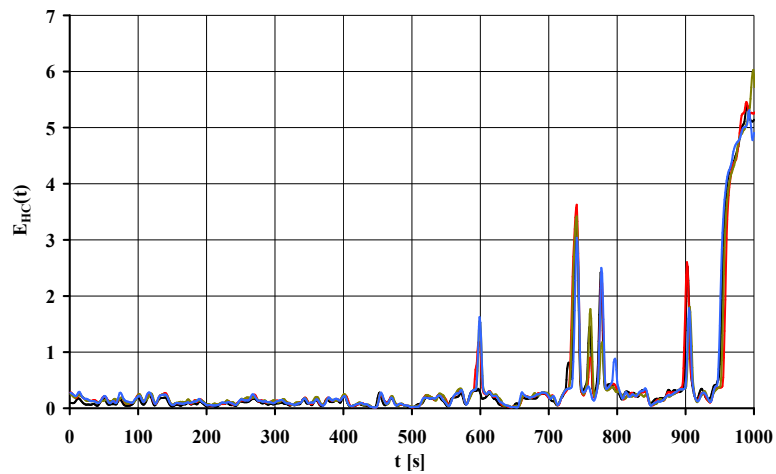
Rys. 5.5. Przebieg sterowania s w teście Autobahn



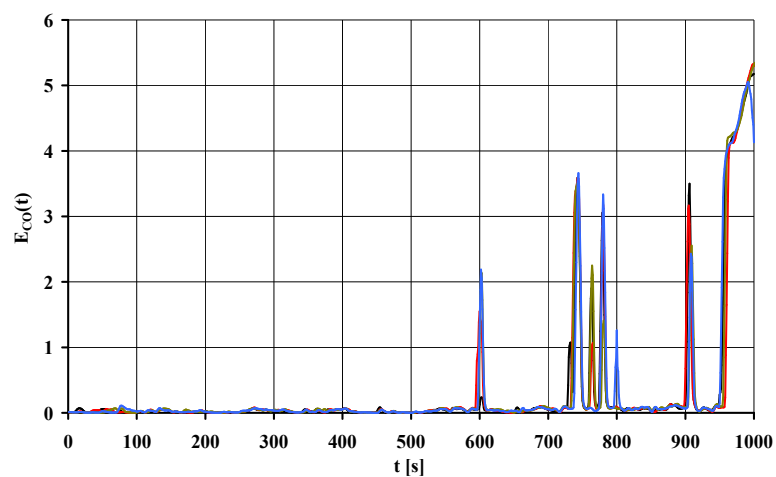
Rys. 5.6. Przebieg pochodnej sterowania s' w teście Autobahn



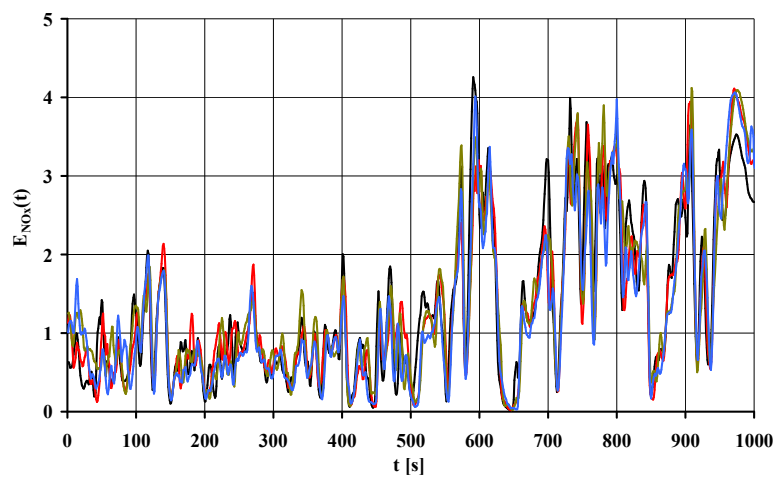
Rys. 5.7. Przebieg natężenia przepływu powietrza V_a w teście Autobahn



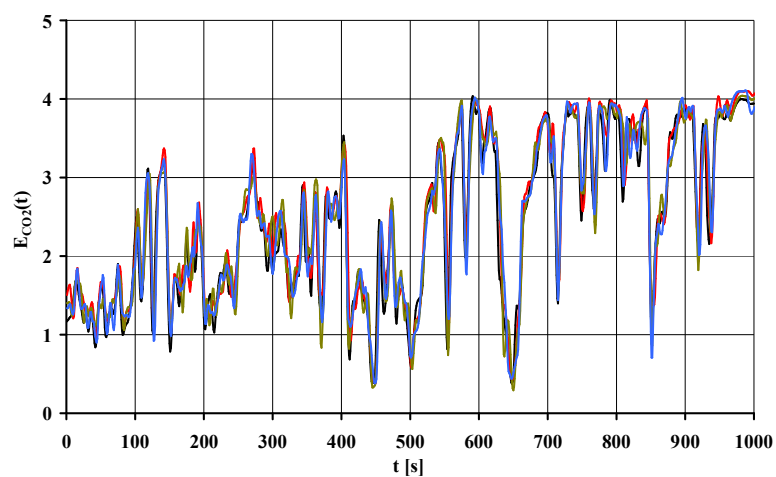
Rys. 5.8. Przebieg natężenia emisji węglowodorów E_{HC} w teście Autobahn



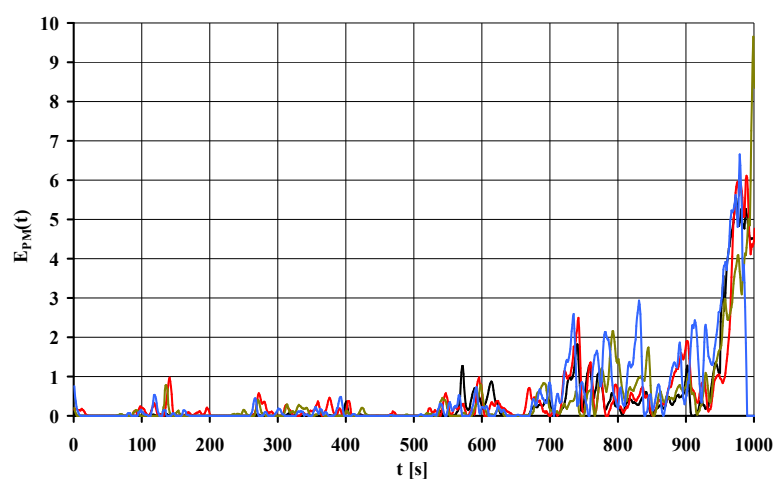
Rys. 5.9. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} w teście Autobahn



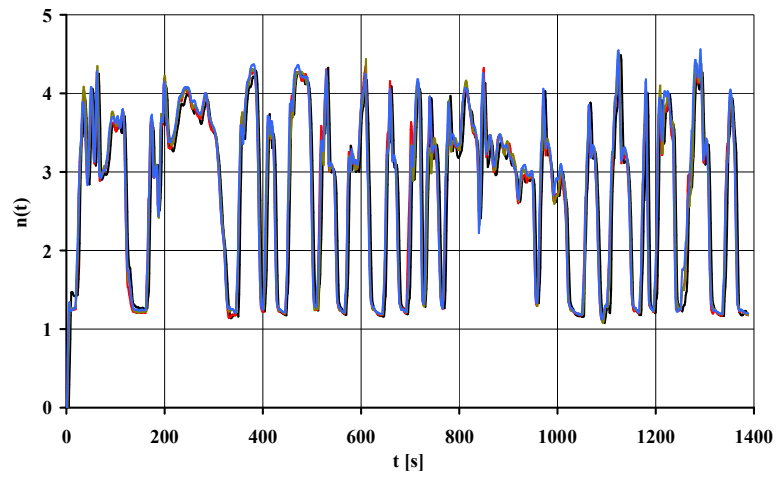
Rys. 5.10. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} w teście Autobahn



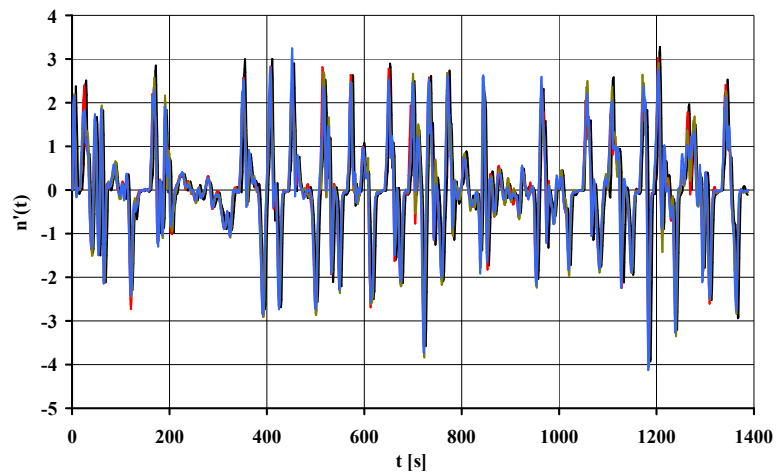
Rys. 5.11. Przebieg natężenia emisji dwutlenków węgla E_{CO2} w teście Autobahn



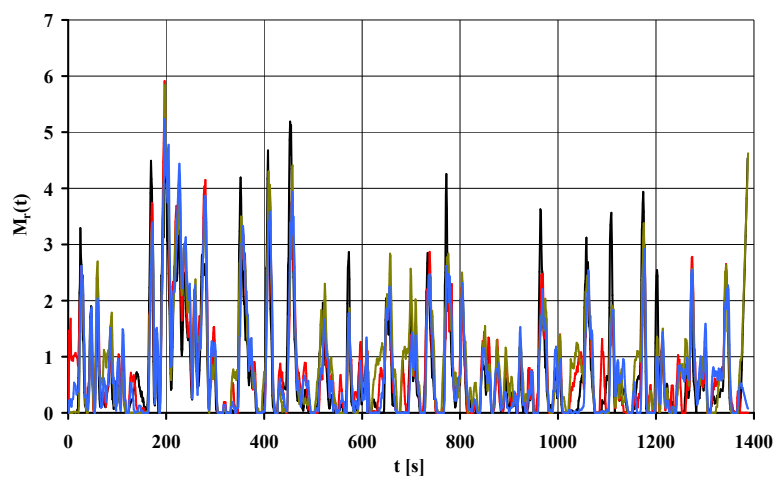
Rys. 5.12. Przebieg natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} w teście Autobahn



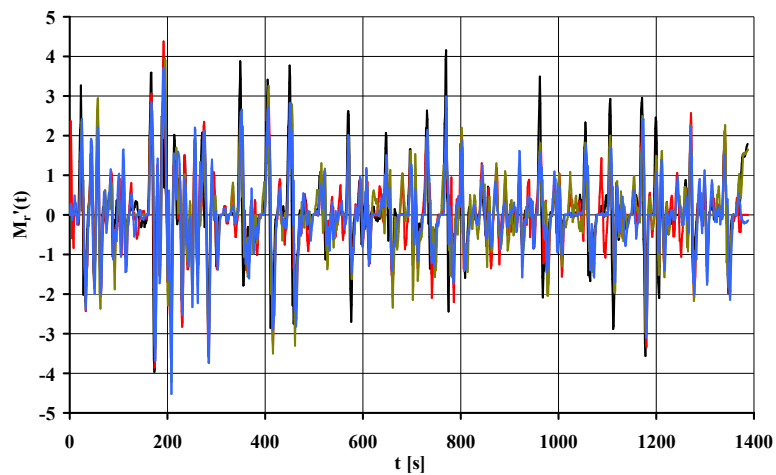
Rys. 5.13. Przebieg prędkości obrotowej n w teście FTP-75



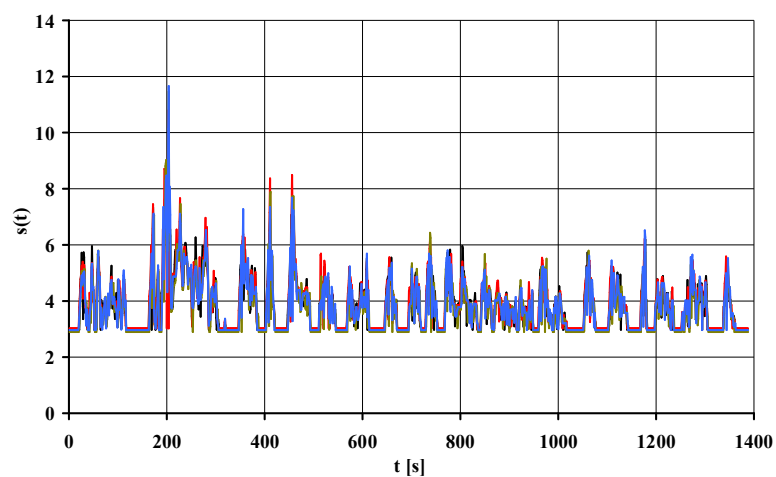
Rys. 5.14. Przebieg pochodnej prędkości obrotowej n' w teście FTP-75



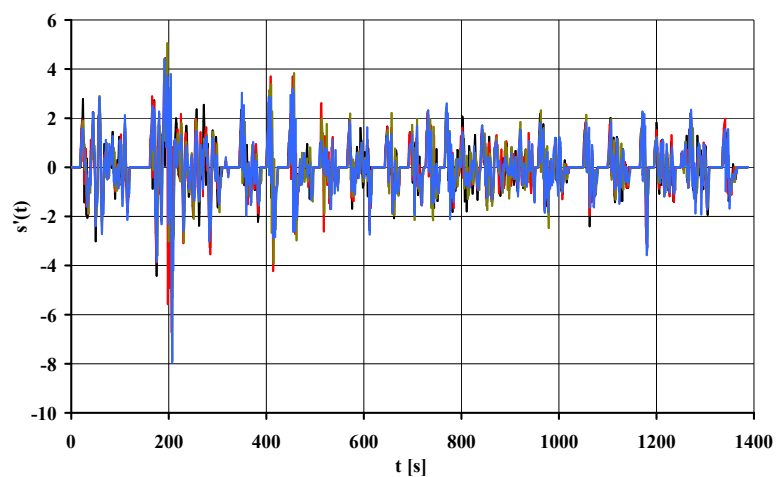
Rys. 5.15. Przebieg momentu obrotowego M_r w teście FTP-75



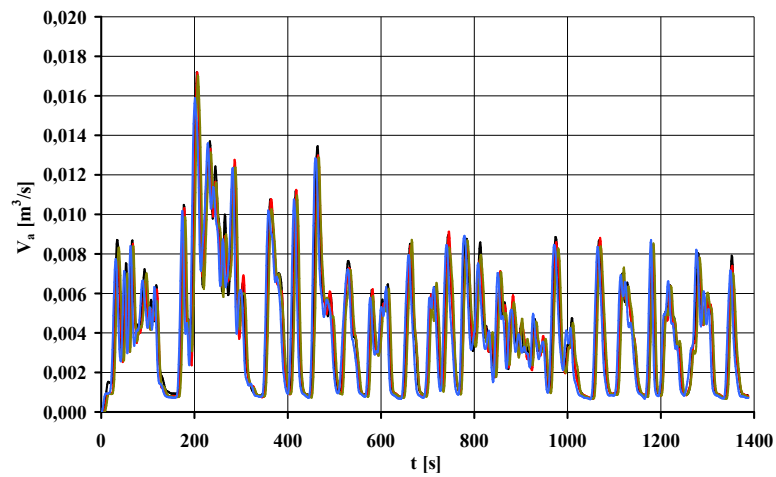
Rys. 5.16. Przebieg pochodnej momentu obrotowego M_r' w teście FTP-75



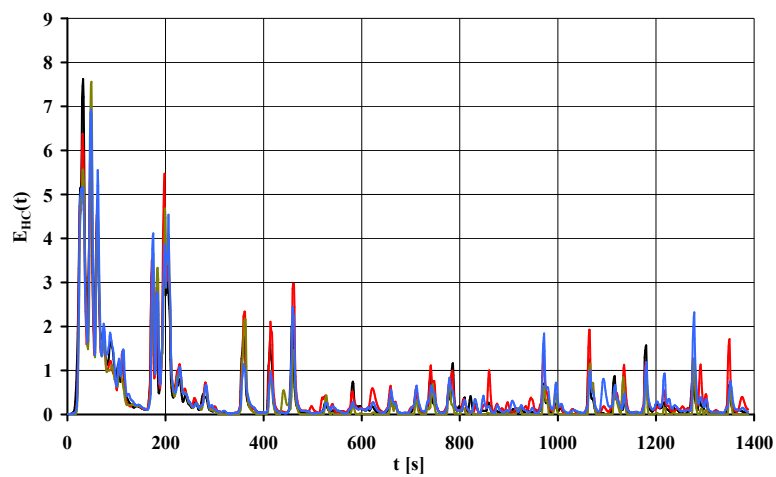
Rys. 5.17. Przebieg sterowania s w teście FTP-75



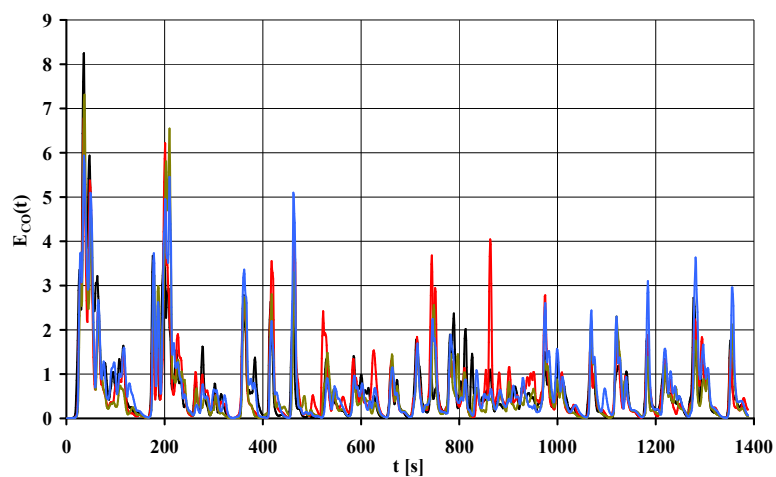
Rys. 5.18. Przebieg pochodnej sterowania s' w teście FTP-75



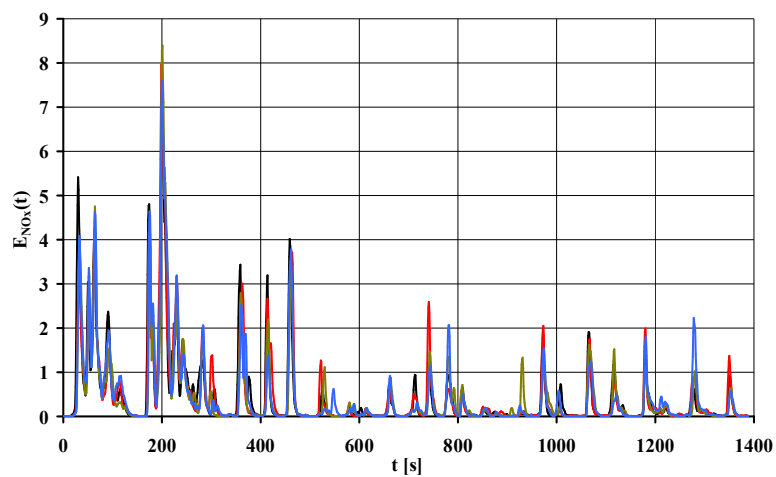
Rys. 5.19. Przebieg natężenia przepływu powietrza V_a w teście FTP-75



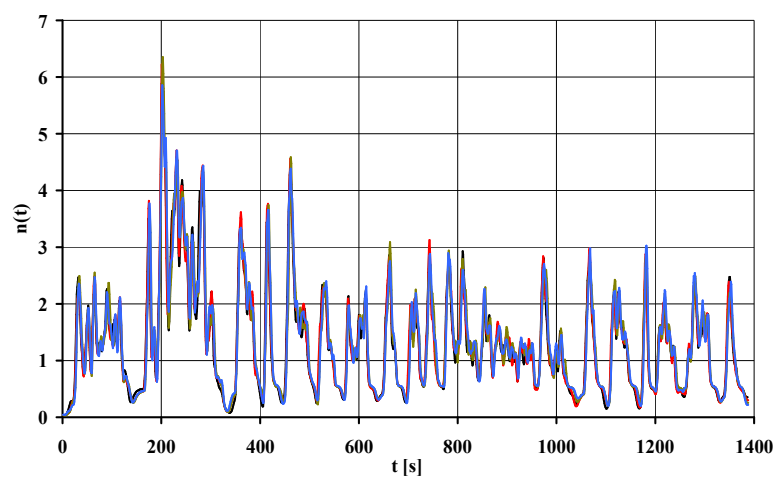
Rys. 5.20. Przebieg natężenia emisji węglowodorów E_{HC} w teście FTP-75



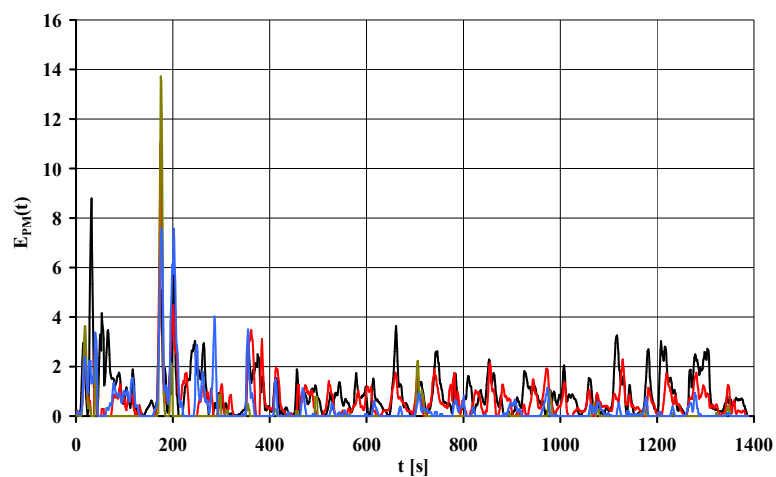
Rys. 5.21. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} w teście FTP-75



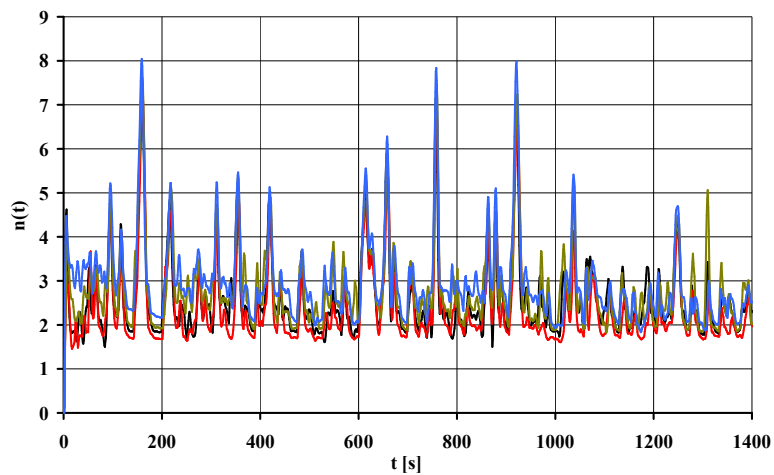
Rys. 5.22. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} w teście FTP-75



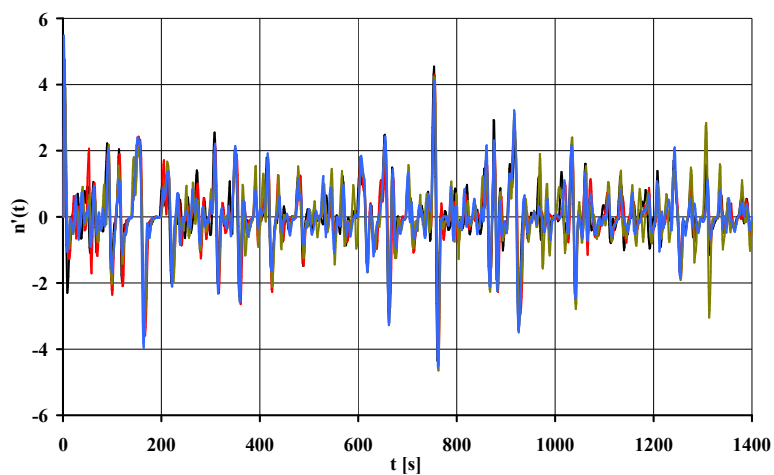
Rys. 5.23. Przebieg natężenia emisji dwutlenków węgla E_{CO2} w teście FTP-75



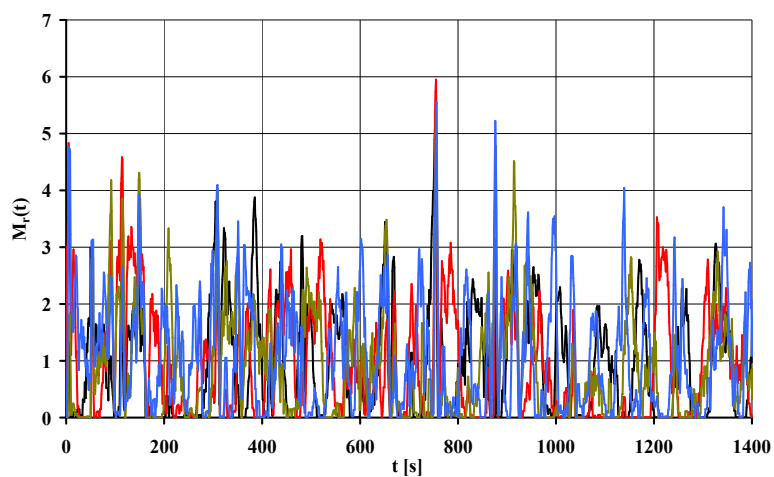
Rys. 5.24. Przebieg natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} w teście FTP-75



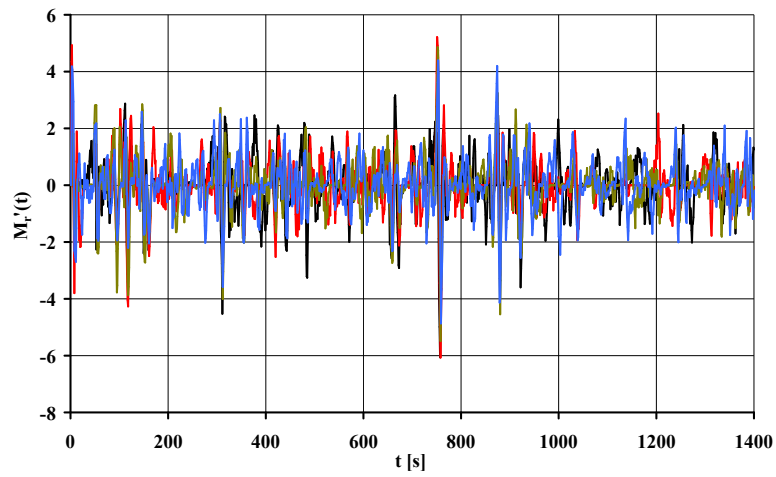
Rys. 5.25.Przebieg prędkości obrotowej n w teście Stop&Go



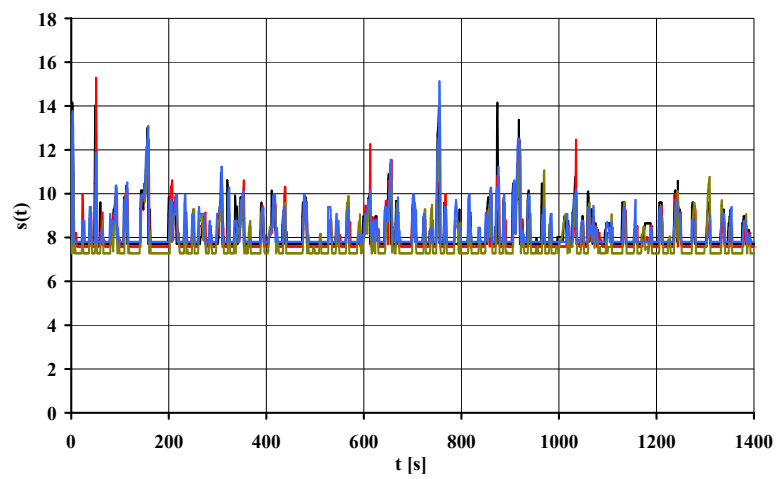
Rys. 5.26.Przebieg pochodnej prędkości obrotowej n' w teście Stop&Go



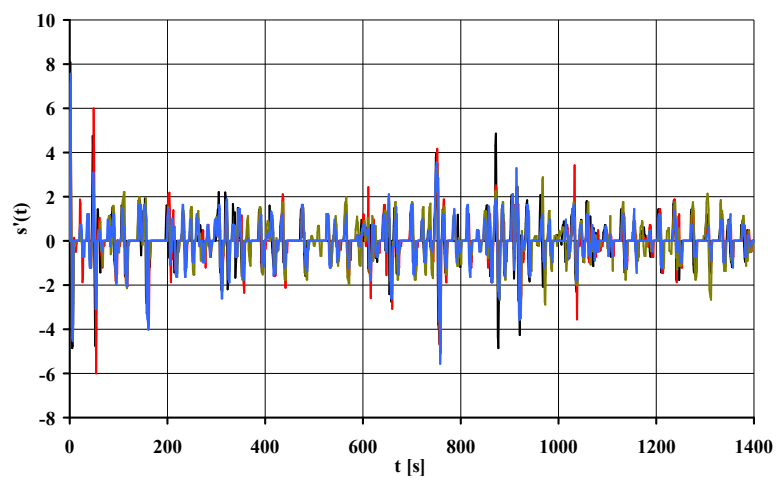
Rys. 5.27.Przebieg momentu obrotowego M_r w teście Stop&Go



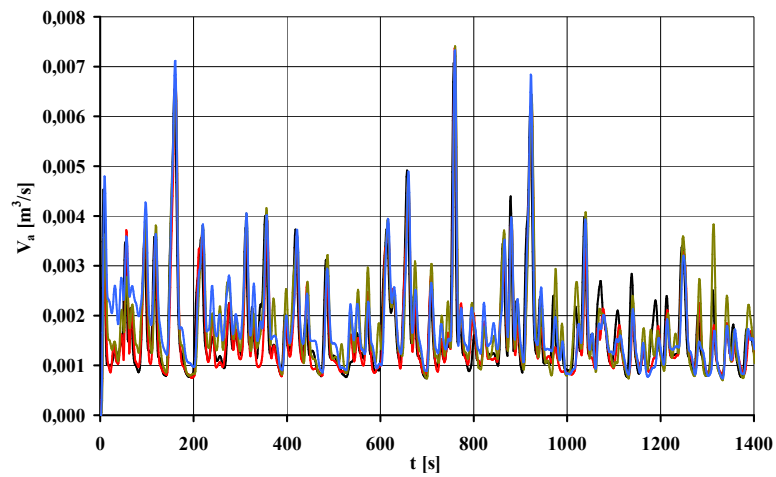
Rys. 5.28. Przebieg pochodnej momentu obrotowego M_r' w teście Stop&Go



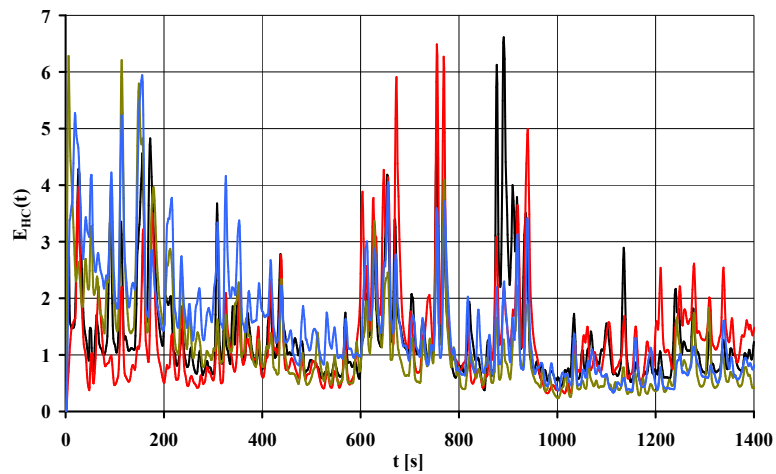
Rys. 5.29. Przebieg sterowania s w teście Stop&Go



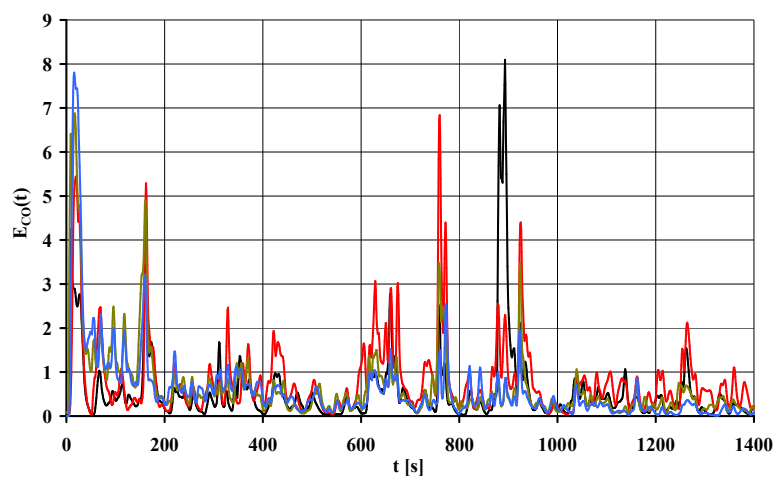
Rys. 5.30. Przebieg pochodnej sterowania s' w teście Stop&Go



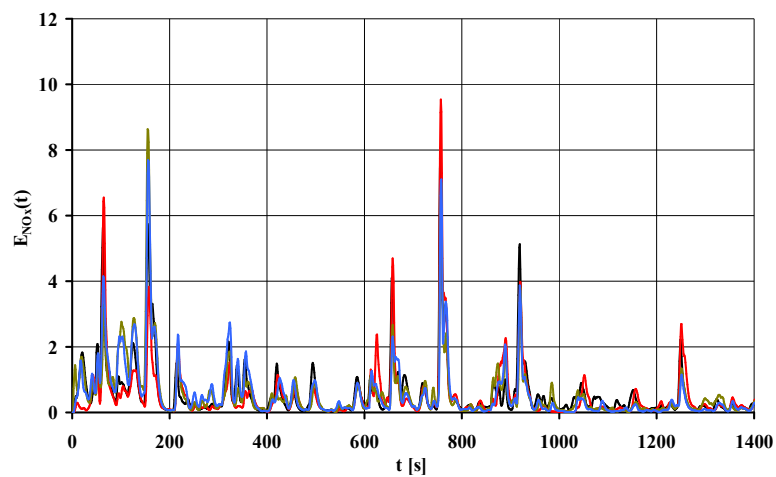
Rys. 5.31. Przebieg natężenia przepływu powietrza V_a w teście Stop&Go



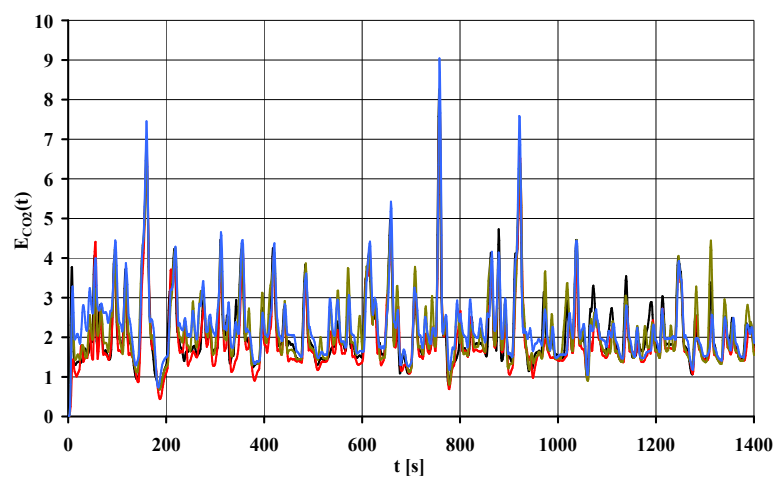
Rys. 5.32. Przebieg natężenia emisji węglowodorów E_{HC} w teście Stop&Go



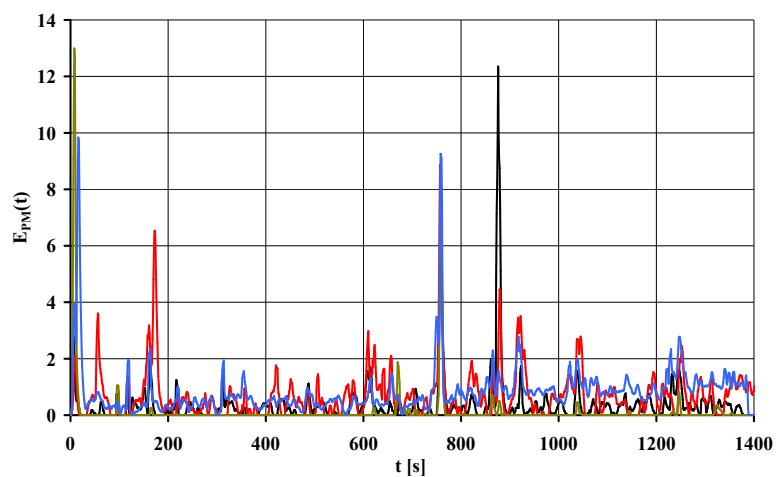
Rys. 5.33. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} w teście Stop&Go



Rys. 5.34. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} w teście Stop&Go



Rys. 5.35. Przebieg natężenia emisji dwutlenków węgla E_{CO2} w teście Stop&Go



Rys. 5.36. Przebieg natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} w teście Stop&Go

Po analizie powyższych wykresów można stwierdzić, że powtarzalność wyników badań jest zadowalająca. Największa powtarzalność występuje w testach: Autobahn i FTP-75, a nieznacznie mniejsza w teście Stop&Go. Przyczyną takiego stanu rzeczy może być fakt, że w ostatnim teście występowały dużo gwałtowniejsze zmiany prędkości obrotowej silnika, a jest to dość trudne do wykonania dla operatora testu i może powodować większe różnice w kolejnych jego realizacjach.

Większa powtarzalność widoczna jest dla parametrów wejściowych (szczególnie dla: n , n' , M_r , M_r' , s , s'), ponieważ zależą one w dość bezpośredni sposób od definiowanych wartości w teście. Natomiast pozostałe parametry (głównie: E_{HC} , E_{CO} , E_{NO_x} , E_{CO_2} , E_{PM}) zależą również od zjawisk, zachodzących w silniku, które same w sobie obarczone są pewną niepowtarzalnością. Wśród parametrów wyjściowych najmniejszą powtarzalność zauważa się dla E_{PM} . Prawdopodobnie jest to w tym przypadku związane z bardzo małymi wartościami emitowanych cząstek stałych w porównaniu z dokładnością pomiaru tej wielkości przez urządzenie pomiarowe.

6. Zastosowanie i weryfikacja proponowanej metody oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione wyniki obliczeń, powstałe w efekcie zastosowania prezentowanej metody do badań omówionych w rozdziale poprzednim. Ze względu na fakt, że metoda stanowi sekwencję pięciu etapów obliczeniowych, stanowiących rozwiązanie pięciu kolejnych problemów, podobnie też wyniki obliczeń będą podzielone na pięć podrozdziałów.

6.1. Korekcja przesunięć fazowych w torach pomiarowych

Przed przystąpieniem do korekcji przesunięć fazowych należało wyznaczyć przebieg zwłoki czasowej $T(t)$.

Znajdowanie empirycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie doświadczeń laboratoryjnych

Niestety, nie było możliwe przeprowadzenie badań laboratoryjnych w celu wyznaczenia poszukiwanej zależności, ponieważ do pracy wykorzystano badania, wykonane w przeszłości, w ramach projektu, którego zakres prac nie obejmował takich testów.

Zgodnie z sugestiami z podrozdziału 4.1., zastąpiono więc te wyniki rozważaniami teoretycznymi, próbującymi określić, jakie przesunięcia fazowe mogły wystąpić. Obliczenia te wykonano według wszystkich trzech opisanych metod teoretycznych, z których wyniki dwóch okazały się użyteczne i zostały ze sobą porównane.

Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_a)$ na podstawie przepływu spalin w przewodach

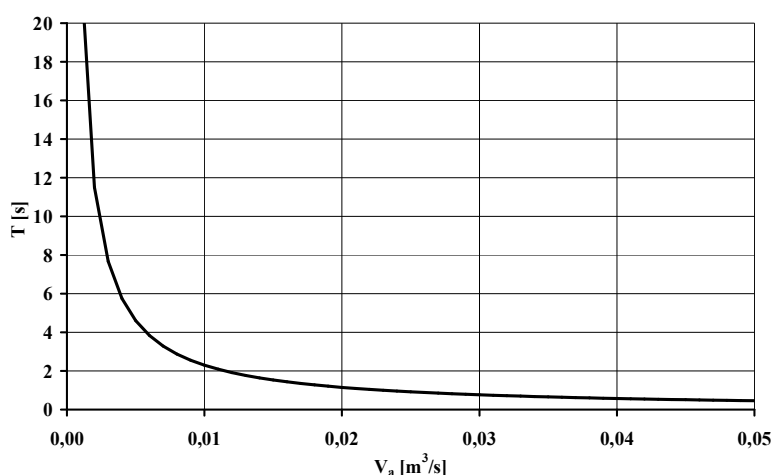
Do wyznaczenia poszukiwanej zależności został wykorzystany wzór 4.3. Zostały w tym celu zmierzone wymiary przewodów, prowadzących spaliny (długości – S i pola przekroju – A), aby uzupełnić parametry zależności teoretycznej.

Trudnym problemem było oszacowanie wartości T_c (we wzorze 4.3.), oznaczającej stałe przesunięcie w czasie, wynikające między innymi z czasu samej analizy spalin w analizatorach. Nie były bowiem dostępne dane producenta urządzenia, dotyczące tego tematu. Istnieje możliwość, że proces przetwarzania danych w urządzeniu sterującym wprowadza pewne stałe przesunięcia korygujące o nieznannej wartości. Ostatecznie T_c nadano wartość 0.

Kolejną niedogodnością był brak zarejestrowanego w wynikach badań natężenia przepływu spalin. Spośród zarejestrowanych parametrów pracy silnika najsilniej skorelowanym z tą wielkością było natężenie przepływu powietrza V_a . Dlatego we wzorze 4.3. wielkość V_s została zastąpiona przez V_a .

Należy mieć świadomość, że zostały w ten sposób wprowadzone uproszczenia do metody obliczeniowej, która sama w sobie opiera się na uproszczonym modelu, opisującym zjawiska, zachodzące w układzie poboru spalin. Prowadzi to nieuchronnie do otrzymania wyników obarczonych dużą niepewnością, trudną do oszacowania. Trzeba jednak pamiętać, że jest to jedynie metoda zastępcza, stosowana z powodu braku możliwości przeprowadzenia odpowiednich badań laboratoryjnych. W celu poznania zjawisk odpowiedzialnych za przesunięcia fazowe w torach pomiarowych, przeprowadzenie proponowanych badań wydaje się konieczne.

W wyniku zastosowania metody teoretycznej, modelującej przepływ spalin w przewodach, otrzymano zależność $T(V_a)$, przedstawioną na rys. 6.1.

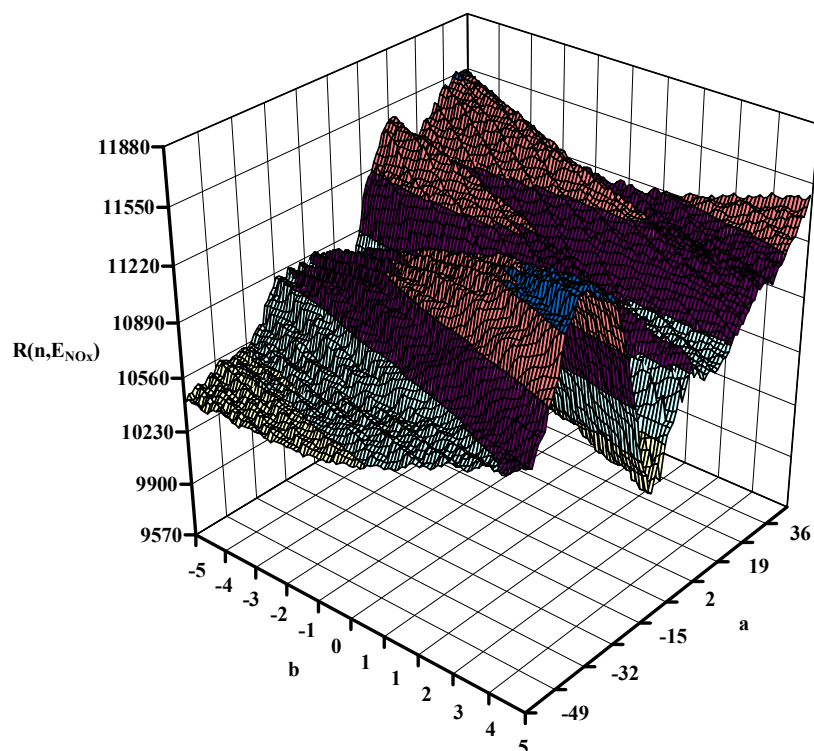


Rys. 6.1. Zależność $T(V_a)$ otrzymana na podstawie modelowania przepływu gazów w układzie poboru spalin

Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_a)$ na podstawie optymalizacji parametrów

Zgodnie z założeniami tej metody, do wyznaczenia poszukiwanej zależności został wykorzystany wzór 4.4., w którym parametry a i b zostały poddane optymalizacji. Kryterium optymalizacji był współczynnik korelacji R przebiegów: prędkości obrotowej $n(t)$ i natężenia emisji tlenków azotu $E_{NOx}(t)$, realizowanych według testu Autobahn. Wybrano właśnie te przebiegi, ponieważ istniała pomiędzy nimi wyraźna korelacja, dzięki czemu kryterium dotyczyło zjawiska faktycznie występującego w danym badaniu.

Rys. 6.2. przedstawia wykres zależności $R[n(t), E_{NOx}(t)]$ od parametrów a i b , stanowiący „mapę” optymalizacji.



Rys. 6.2. Wykres zależności $R[n(t), E_{NOx}(t)]$ od parametrów a i b

Niestety, zgodnie z obawami przedstawionymi w podrozdziale 4.1., metoda ta wychwyciła zjawiska o zupełnie innym charakterze, niż te, które mają zasadniczy wpływ na przesunięcia fazowe w torach pomiarowych. W efekcie optymalizowanym parametrom a i b zostały nadane wartości absurdalne, to znaczy takie, dla których zależność $T(V_a)$ nie miała uzasadnionej interpretacji fizycznej.

Wyniki tej metody zostały więc pominięte.

Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_a)$ na podstawie krótkich funkcji korelacji

W tej metodzie został wykorzystany wzór 4.6. Poniżej zostaną omówione przyjęte parametry i dane wejściowe do obliczeń.

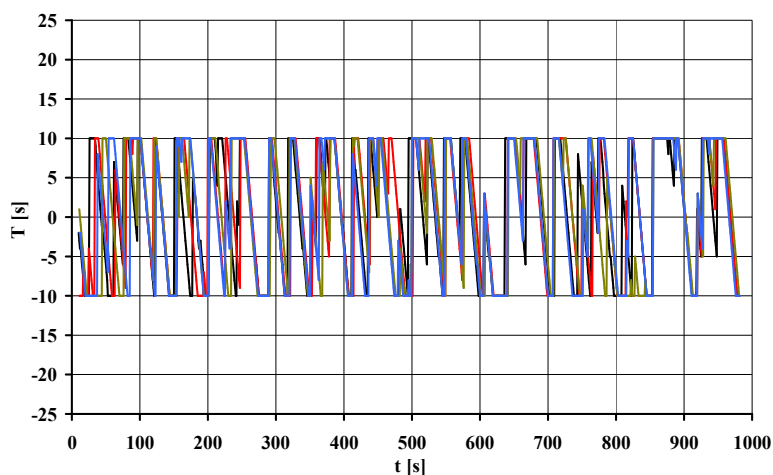
W rozdziale 4.1. omówiono problemy związane z doбором parametru m , opisującego długość funkcji korelacji (mierzoną w dziedzinie czasu). Mała częstotliwość próbkowania w badaniach nasilała te problemy, ponieważ występowało wówczas niewiele punktów pomiarowych w zadanym przedziale czasu. Aby złagodzić skutki małej częstotliwości próbkowania, wybrano do obliczeń test Autobahn, dla którego zmienność procesów jest

bardziej rozciągnięta w czasie. Na podstawie analizy szybkozmienności zjawisk w tym teście dobrano wartość parametru m , równą 10 s.

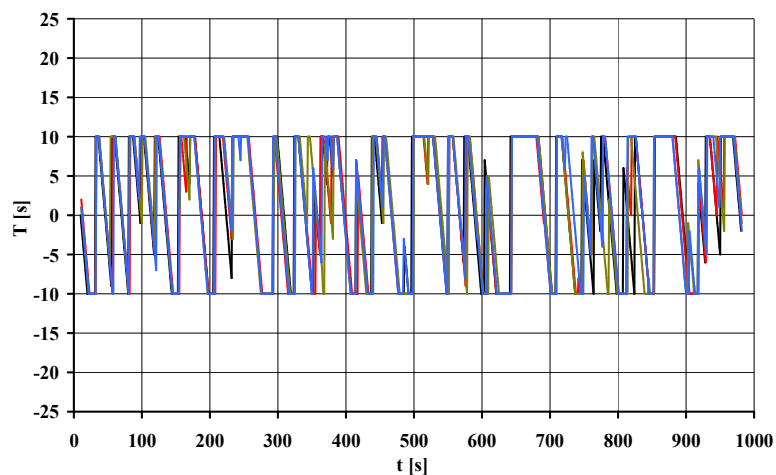
Zakres przesunięć w czasie funkcji korelacji, odpowiadający spodziewanym wartościom czasów zwłoki T , ustalono na przedział od -10 do 10 s. Wartości ujemne dla czasu zwłoki przewidziano na wypadek, gdyby aparatura rejestrująca na stanowisku hamownianym wprowadzała pewne stałe przesunięcia korygujące. Wówczas dla małych rzeczywistych przesunięć, występujące w zarejestrowanych przebiegach przesunięcia byłyby ujemne.

Do obliczeń przyjęto przebieg prędkości obrotowej n (jako wzorcowy, nie mający przesunięć fazowych) oraz przebiegi: E_{NOX} i E_{CO2} (jako przebiegi obarczone przesunięciami fazowymi, a jednocześnie silnie skorelowane z n , aby analizowane współczynniki korelacji odnosiły się do zjawisk faktycznie występujących w analizowanych przebiegach).

Obliczenia wykonano zgodnie z opisanymi powyżej parametrami i na wspomnianych przebiegach, dla wszystkich czterech realizacji testu Autobahn. Rys. 6.3. i 6.4. przedstawiają otrzymane przebiegi zwłoki czasowej $T(t)$, odpowiednio dla $E_{NOx}(t)$ i $E_{CO2}(t)$, dla wszystkich czterech realizacji testu Autobahn.

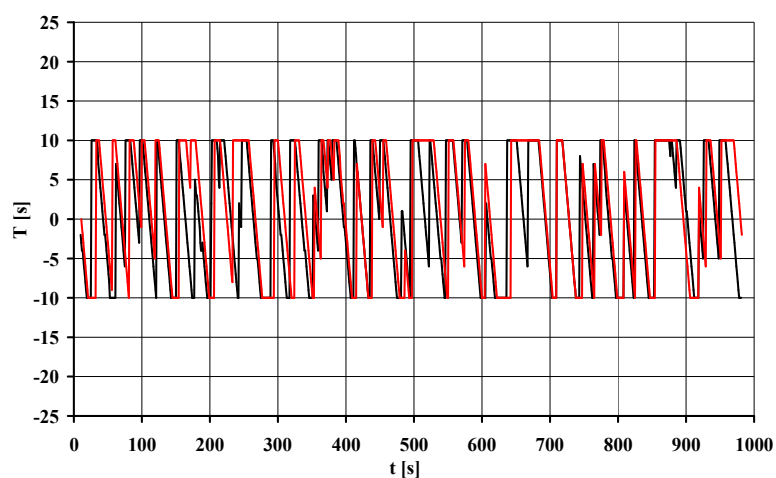


Rys. 6.3. Przebiegi $T(t)$ obliczone na podstawie przebiegów $n(t)$ i $E_{NOx}(t)$ dla wszystkich czterech realizacji testu Autobahn



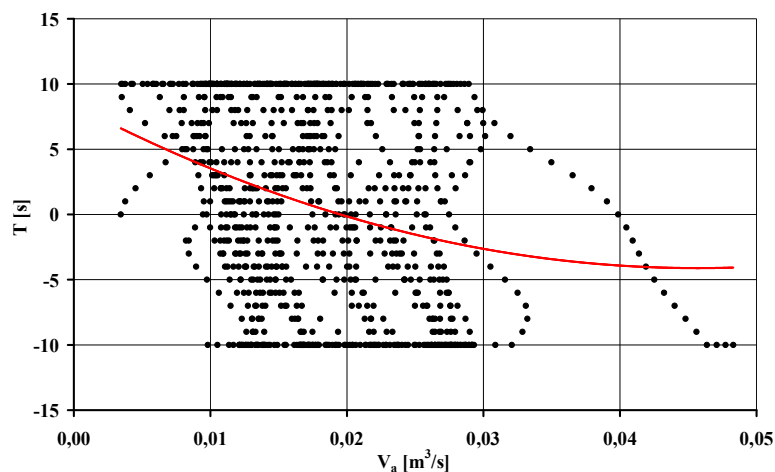
Rys. 6.4. Przebiegi $T(t)$ obliczone na podstawie przebiegów $n(t)$ i $E_{CO_2}(t)$ dla wszystkich czterech realizacji testu Autobahn

Na powyższych wykresach widoczna jest duża powtarzalność przebiegów $T(t)$ dla poszczególnych realizacji testu. Świadczy to o nieprzypadkowości wyników. Podobna powtarzalność występowała pomiędzy przebiegami, odpowiadającymi korelacji n z $E_{NO_x}(t)$ i z $E_{CO_2}(t)$. Przykładowe porównanie tych przebiegów (dla pierwszej realizacji testu) przedstawiono na rys. 6.5.



Rys. 6.5. Przebiegi $T(t)$ obliczone na podstawie przebiegów $n(t)$ i $E_{CO_2}(t)$, oraz $n(t)$ i $E_{NO_x}(t)$ dla pierwszej realizacji testu Autobahn

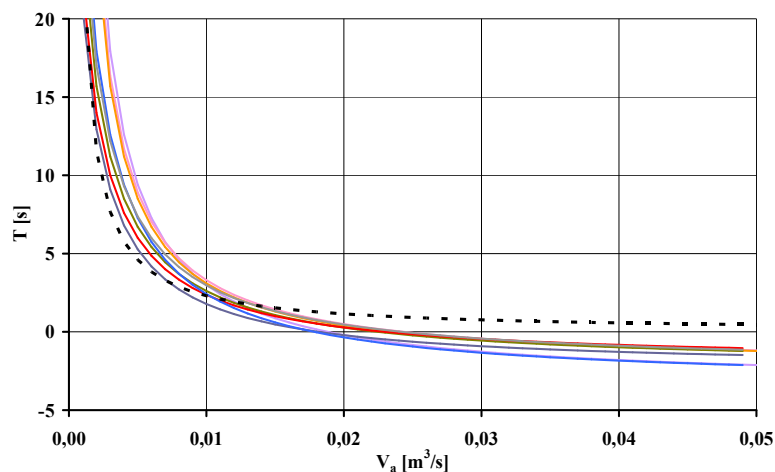
Nie wiadomo jednak, na ile przyjęte w tej metodzie kryterium oceny przesunięć (w postaci krótkich funkcji korelacji wzajemnej) wychwytuje poszukiwane przesunięcia fazowe w torach pomiarowych, a na ile zupełnie inne zjawiska. Aby to ocenić, zostały sporządzone wykresy zależności $T(V_a)$ dla wszystkich (ośmiu) obliczonych przebiegów $T(t)$. Przykładowy wykres został przedstawiony na rys. 6.6.



Rys. 6.6. Zależność $T(V_a)$ dla pierwszej realizacji testu, obliczona na podstawie krótkich korelacji przebiegów oraz $n(t)$ i $E_{NO_x}(t)$

Na powyższym wykresie widać bardzo dużą rozbieżność wartości T niemal w całym zakresie V_a . Świadczy to o silnym wpływie zjawisk nie związanych z przesunięciami fazowymi w torach pomiarowych na wartości T . Mimo wszystko, aproksymacja tej zależności za pomocą funkcji wielomianowej drugiego stopnia (widoczna na wykresie w postaci linii ciągłej) ma kształt zbliżony do oczekiwanej zależności $T(V_a)$, wynikającej z teoretycznych przyczyn przesunięć fazowych. Może to świadczyć, że oprócz informacji nieistotnych, odwzorowywanych przez zależność na powyższym wykresie (będących silnym szumem), jest tam ukryta również poszukiwana informacja o przesunięciach fazowych. Na poparcie tego spostrzeżenia warto zauważyć, że przyjęta do aproksymacji funkcja wielomianowa nie narzuca swojej istotą oczekiwanej zależności hiperbolicznej. Jeśli mimo to ma kształt podobny do hiperbolicznego, możliwe, że faktycznie odwzorowuje informację o przesunięciach fazowych. Podobne spostrzeżenia można wyciągnąć na podstawie pozostałych wykresów $T(V_a)$.

W celu sprawdzenia powyższej hipotezy, zestawiono aproksymacje wszystkich (ośmiu) obliczonych zależności $T(V_a)$ na jednym wykresie. Tym razem użyto już do aproksymacji funkcji hiperbolicznej, aby możliwe było porównanie wyników z teoretyczną zależnością, wyznaczoną na podstawie modelowania przepływu spalin w przewodach, służących do ich poboru. Takie zestawienie zostało pokazane na rys. 6.7.



Rys. 6.7. Zestawienie zależności $T(V_a)$ dla ośmiu przypadków obliczonych metodą krótkich funkcji korelacji (linie ciągłe) oraz dla przypadku obliczonego na podstawie modelowania przepływu spalin (linia kreskowa)

Powyższy wykres ukazuje względnie dużą zbieżność pomiędzy wszystkimi wynikami. Może to stanowić pewne potwierdzenie zasadności proponowanych teoretycznych sposobów wyznaczenia zależności $T(V_a)$. Nie oznacza to oczywiście, że otrzymane wyniki można uznać za doskonale zweryfikowane, ponieważ obydwie metody teoretyczne są bardzo uproszczone, a zgodność pomiędzy nimi nie jest idealna. Jedynym wiarygodnym potwierdzeniem metod teoretycznych mogłyby być badania empiryczne, przeprowadzone zgodnie z sugestiami opisanymi w podrozdziale 4.1.

Wykonanie korekcji przesunięć fazowych

Do wykonania korekcji przesunięć została wykorzystana zależność teoretyczna $T(V_a)$, wyznaczona na podstawie modelowania przepływu spalin. Po korekcie oceniano jej efekty w następujący sposób. Wyznaczano współczynnik korelacji wzajemnej przebiegu $n(t)$ i modyfikowanego przebiegu $E_x(t)$ przed i po korekcie i obliczano ich różnicę względną.

W tabelach 6.1. – 6.3. przedstawiono wyniki tak przeprowadzonej oceny dla wszystkich trzech testów, dla każdej wielkości – oddzielnie dla poszczególnych realizacji oraz jako wartość średnią dla czterech realizacji danego testu.

Tabela 6.1. Różnice względne $R[n(t), E_x(t)]$ obliczone przed i po korekcji dla poszczególnych realizacji testu Autobahn (oraz wartości średnie z czterech realizacji).

	E_{HC}	E_{CO}	E_{NOx}	E_{CO2}	E_{PM}
	[%]				
Realizacja 1	0,32	0,15	0,97	1,11	0,07
Realizacja 2	0,35	0,11	0,83	0,96	0,42
Realizacja 3	0,49	0,11	1,02	1,13	0,29
Realizacja 4	0,46	0,13	0,98	1,07	0,19
Wart. średnia	0,41	0,13	0,95	1,07	0,24

Tabela 6.2. Różnice względne $R[n(t), E_x(t)]$ obliczone przed i po korekcji dla poszczególnych realizacji testu FTP-75 (oraz wartości średnie z czterech realizacji).

	E_{HC}	E_{CO}	E_{NOx}	E_{CO2}	E_{PM}
	[%]				
Realizacja 1	0,25	7,82	10,68	3,10	3,12
Realizacja 2	-0,15	15,95	15,09	7,60	10,06
Realizacja 3	-2,44	17,10	15,58	7,13	5,24
Realizacja 4	8,65	-1,22	7,26	1,99	3,44
Wart. średnia	1,58	9,91	11,90	4,96	5,47

Tabela 6.3. Różnice względne $R[n(t), E_x(t)]$ obliczone przed i po korekcji dla poszczególnych realizacji testu Stop&Go (oraz wartości średnie z czterech realizacji).

	E_{HC}	E_{CO}	E_{NOx}	E_{CO2}	E_{PM}
	[%]				
Realizacja 1	-10,82	8,02	5,31	-8,44	-19,02
Realizacja 2	-5,30	9,57	-1,02	-9,87	-9,22
Realizacja 3	-10,53	-0,30	1,26	-11,05	-35,80
Realizacja 4	-10,73	1,32	3,35	-6,29	-7,43
Wart. średnia	-9,35	4,65	2,23	-8,91	-17,87

Ze względu na różnice w powyższych wynikach, warto omówić je oddzielnie dla każdego testu.

W przypadku testu Autobahn, efekt zastosowania korekcji był jednoznacznie korzystny, ale występował w niewielkim stopniu. Przyczyną tego jest fakt, że przez większość czasu trwania tego testu prędkość obrotowa silnika jest duża, co powoduje duże natężenie emisji spalin. W efekcie spaliny przelatują przez układ poboru spalin w krótkim

czasie i występujące przesunięcia fazowe są bardzo niewielkie. W większości przypadków teoretyczne przesunięcia znajdują się poniżej wartości 1 s, co dla częstotliwości próbkowania, wynoszącej 1 Hz, oznacza, że korekcja nie jest potrzebna. Korzyści, które wystąpiły w wyniku wprowadzenia korekcji, pochodzą jedynie z tych nielicznych odcinków testu, na których prędkość obrotowa silnika zmniejszała się, czemu towarzyszyło chwilowe zmniejszenie się natężenia przepływu spalin.

W przypadku testu FTP-75 korzyści z przeprowadzenia korekcji są również korzystne, a przy tym występują w znacznie większym stopniu, niż to miało miejsce w teście Autobahn. Stopień skorelowania przebiegów zwiększył się średnio o niemal 7%.

W teście Stop&Go natomiast zabieg korekcji przyniósł efekt negatywny (stopień skorelowania wykresów zmniejszył się o niemal 6%). Prawdopodobną przyczyną jest to, że w teście Stop&Go występują najmniejsze wartości V_a . Tymczasem w obliczonej zależności $T(V_a)$ zakres, odpowiadający najmniejszym wartościom V_a , był obciążony największymi błędami, ponieważ kształt tej części wykresu jest najbardziej czuły na niedokładność doboru parametrów, szacowanych na podstawie rozważań teoretycznych.

Podsumowując, można wyciągnąć następujące wnioski:

- W teście Autobahn występowały natężenia przepływu powietrza V_a niemal nie powodujące przesunięć fazowych, więc korekcja była potrzebna w niewielkim stopniu, a jej zastosowanie modyfikowało przebiegi bardzo nieznacznie.
- W teście FTP-75 natężenia przepływu znajdowały się w zakresie wartości, dla którego występowała potrzeba korekcji, a przy tym obliczona zależność $T(V_a)$ cechowała się stosunkowo nienajgorszą dokładnością. Dlatego zastosowanie korekcji przyniosło pozytywny efekt.
- W teście Stop&Go natężenia przepływu były najmniejsze, co powodowało największe przesunięcia fazowe w torach pomiarowych. Taki stan rzeczy w największym stopniu wymagał wprowadzenia korekcji. Jednak dla tak małych natężeń przepływu dokładność wyznaczenia zależności $T(V_a)$ cechowała się zbyt małą dokładnością, żeby na tej podstawie przeprowadzić pomyślną korekcję.
- Powyższe trzy wnioski wydają się o tyle uzasadnione, że widoczna jest powtarzalność wyników (a zatem i wniosków) dla poszczególnych realizacji wszystkich testów.

Zaistniały stan rzeczy wskazuje, że koncepcja tej części prezentowanej metody (dotyczącej korekcji przesunięć fazowych w torach pomiarowych) może być słuszna. Jednak, jak to już wielokrotnie podkreślano, do pełnego poznania tego zagadnienia potrzebne jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych (proponowanych w podrozdziale 4.1.).

Ostatecznie, do dalszej analizy wyników wykorzystano badania z testów: Autobahn i FTP-75 w wersji skorygowanej, a badania z testu Stop&Go w wersji bez korekcji.

6.2. Zmiana zależności operatorowych silnika na zależności funkcyjne

Wprowadzenie pochodnych przebiegów wejściowych

Wprowadzenie przebiegów, zawierających wartości pochodnych prędkości obrotowej n , momentu hamującego M_r i sterowania s , zostało przeprowadzone w ramach wstępnego przetwarzania wyników badań i tam też zostało omówione (w podrozdziale 5.3.).

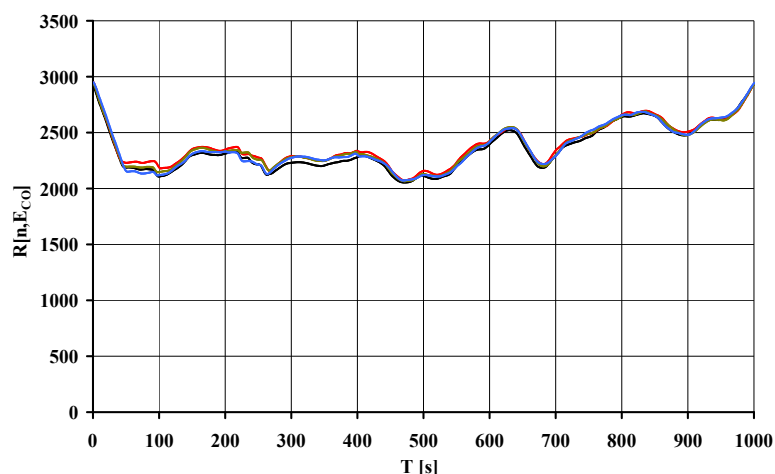
Poniżej zostanie więc jedynie omówiona weryfikacja przejścia od zależności operatorowych do funkcyjnych na podstawie funkcji korelacyjnych.

Weryfikacja metody za pomocą funkcji korelacyjnych

Kształt funkcji korelacji wzajemnej sporządzonych dla poszczególnych par parametrów wejściowych i wyjściowych wskazuje w większości przypadków na słabe występowanie właściwości całkujących w badanym silniku, co jest zgodne z oczekiwaniami. Zazwyczaj na wykresach funkcji korelacji występuje bowiem wyraźnie większa wartość korelacji dla przesunięć bliskich 0.

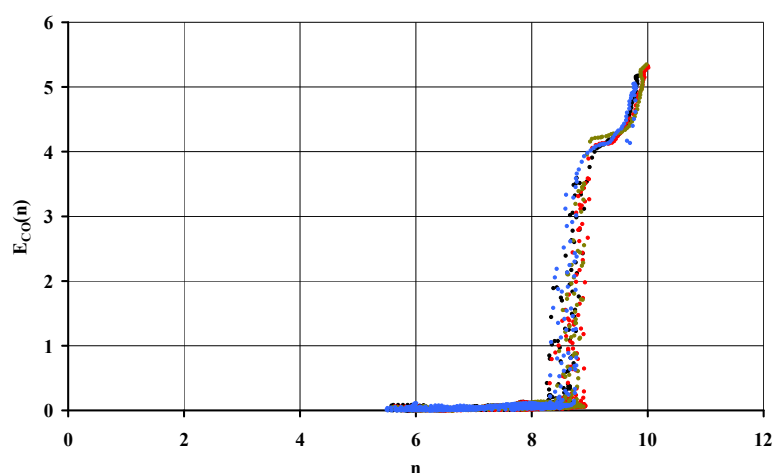
Liczba wszystkich wykresów, zestawiających po cztery zależności korelacyjne dla kolejnych realizacji wszystkich testów, wynosiła 90. Dlatego w tym miejscu zostaną przedstawione jedynie przykładowe ich kształty. Będzie to miało na celu zaprezentowanie kilku charakterystycznych kształtów, jakie można spotkać przy analizie tego typu wykresów, a także porównanie kształtów tych funkcji dla różnych realizacji testów, co pozwoli na ocenę powtarzalności wyników.

Na rys. 6.8. pokazano wykres korelacji R prędkości obrotowej n i natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} dla czterech realizacji testu Autobahn.



Rys. 6.8. Wykres funkcji korelacji $R[n(t), E_{CO}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu Autobahn

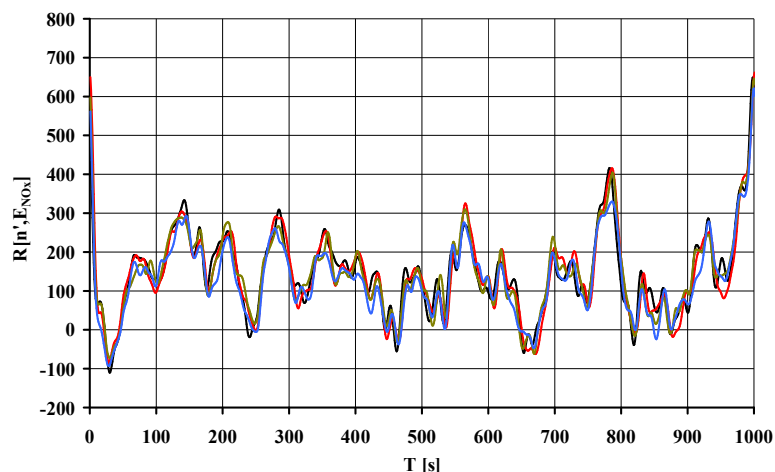
Powyższy wykres odpowiada dość często występującym kształtom. Widoczna jest wyraźna, ale nie bardzo silna zależność korelacyjna, występująca głównie dla przesunięcia zerowego. Ponadto funkcje, odpowiadające czterem realizacjom tego testu, niemal idealnie pokrywają się, co świadczy o spójności wyników. Taka sytuacja odpowiada zależności $E_{CO}(n)$, przedstawionej na rys. 6.9.



Rys. 6.9. Wykres funkcji $E_{CO}(n)$ dla czterech realizacji testu Autobahn

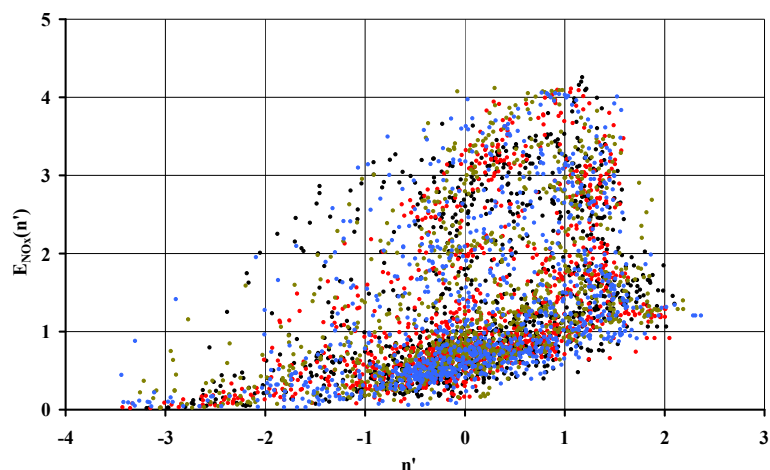
Jak widać, w pewnym zakresie n zależność jest stosunkowo słaba, a w części zakresu silna. Znajduje to swoje odbicie w wykresie korelacji, który odzwierciedla wyraźne, ale niezbyt silne powiązanie pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami.

Innym przykładem zależności korelacyjnej jest zależność między pochodną prędkości obrotowej n' , a natężeniem emisji tlenków azotu E_{NOx} . Przedstawia to rys. 6.10.



Rys. 6.10. Wykres funkcji korelacji $R[n'(t), E_{NOx}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu Autobahn

Widoczne jest tutaj dużo silniejsze powiązanie korelacyjne, występujące bardzo wyraźnie tylko dla przesunięć zerowych. Występuje również dobra powtarzalność dla wszystkich realizacji. Taki stan rzeczy odpowiada zależności $E_{NOx}(n')$, przedstawionej na rys. 6.11.



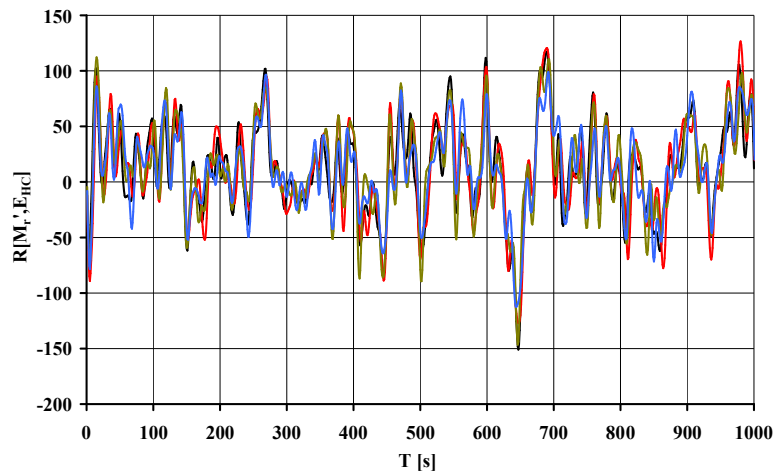
Rys. 6.11. Wykres funkcji $E_{NOx}(n')$ dla czterech realizacji testu Autobahn

Wartości E_{NOx} są co prawda trochę rozproszone w dziedzinie wartości funkcji, ale największe ich zagęszczenie wyznacza dość konsekwentną zależność, a przede wszystkim zależność ta występuje dla całego zakresu dziedziny n' , co prawdopodobnie przekłada się na tak silną korelację, widoczną na rys. 6.10.

Jeszcze jedną cechą charakterystyczną funkcji korelacji z rys. 6.10. jest występowanie licznych i stosunkowo wysokich maksimum lokalnych. Można się zastanowić, czy reprezentują one faktyczne powiązania korelacyjne, czy są raczej efektem zjawisk okresowych, omówionych w podrozdziale 4.2. Przykładowe maksimum lokalne występuje

dla wartości przesunięcia bliskiej 150 s. To sprawia, że jest oddalone od maksimum głównego o ponad 200 s, czyli o około 2,5 min. Oznaczałoby to, że na wartość natężenia emisji tlenków azotu miałyby wpływ wartość pochodnej prędkości, występująca 2,5 min. wcześniej, podczas gdy wartości n' , występujące w międzyczasie mają marginalne znaczenie. Taka interpretacja oczywiście nie jest uzasadniona, dlatego z całą pewnością można przyjąć, że widoczne na wykresie maksima lokalne są efektem ubocznym zjawisk okresowych w przebiegach n' i E_{NOx} .

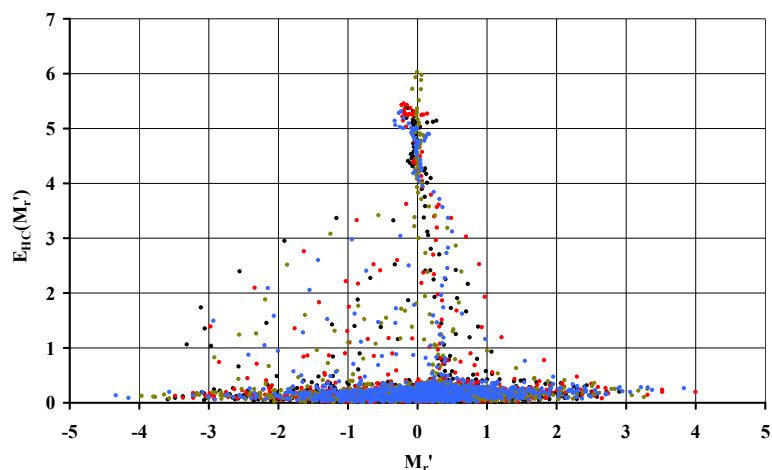
Powyższe wykresy reprezentują przypadki najczęściej występujących kształtów funkcji korelacji wzajemnej w testach Autobahn i FTP-75. Czasami jednak można spotkać również inny ich wygląd. Na rys. 6.12. przedstawiono zależność korelacyjną dla przebiegów pochodnej momentu obrotowego M_r' i natężenia emisji węglowodorów E_{HC} .



Rys. 6.12. Wykres funkcji korelacji $R[M_r'(t), E_{HC}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu Autobahn

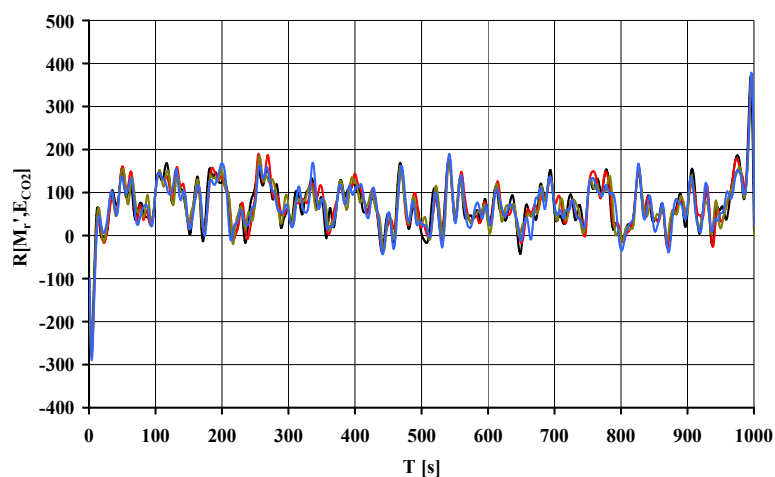
Powyższy wykres przedstawia przykład braku korelacji pomiędzy rozpatrywanymi przebiegami. Warto jednak zauważyć, że pomimo to występuje powtarzalność funkcji w obrębie wszystkich czterech realizacji.

Bezpośrednią zależność $E_{HC}(M_r')$ przedstawia rys. 6.13. Zauważalna zależność na tym wykresie jest tak zbliżona do funkcji stałej, że funkcja korelacji prezentuje to w formie braku powiązania. Jest to jednak rzadki przypadek wśród wykresów funkcji korelacji, sporządzanych dla testów Autobahn i FTP-75.



Rys. 6.13. Wykres funkcji $E_{HC}(M_r')$ dla czterech realizacji testu Autobahn

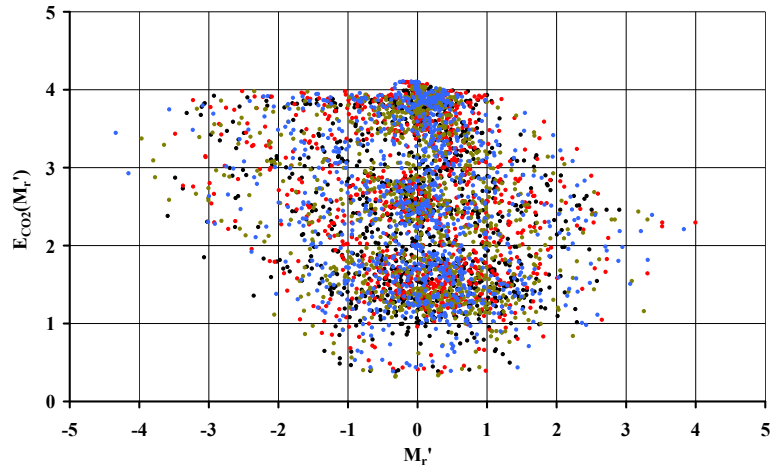
Ciekawy przypadek (choć jeszcze rzadziej występujący) został pokazany na rys. 6.14. Jest to funkcja korelacji dla przebiegów pochodnej momentu obrotowego M_r' i natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} .



Rys. 6.14. Wykres funkcji korelacji $R[M_r'(t), E_{CO_2}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu Autobahn

Dla małych wartości dodatnich przesunięć widoczna jest korelacja ujemna, a dla małych wartości przesunięć ujemnych, korelacja dodatnia. Dla przesunięcia zerowego występuje natomiast rodzaj punktu przelomowego pomiędzy korelacją dodatnią i ujemną. Taki stan rzeczy odpowiada przypadkowi braku korelacji, a widoczne korelacje są efektem raczej przypadkowego nałożenia na siebie zjawisk okresowych w rozpatrywanych przebiegach.

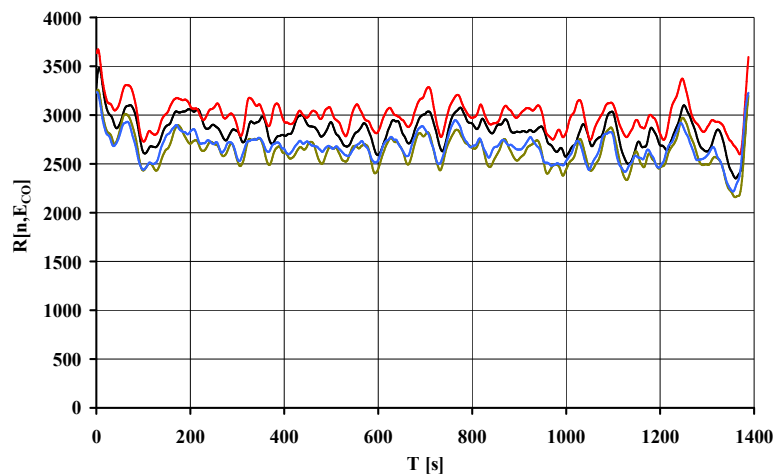
Samą zależność $E_{CO_2}(M_r')$ ilustruje rys. 6.15. Nie widać na nim żadnej zależności wiążącej obydwie wielkości.



Rys. 6.15. Wykres funkcji $E_{CO_2}(M_r')$ dla czterech realizacji testu Autobahn

Wszystkie powyższe wykresy przedstawiały powiązania pomiędzy wielkościami zmierzonymi w teście Autobahn. Większość tego typu wykresów (te, na których widoczna jest korelacja) potwierdzają założenie o niewielkich właściwościach całkujących badanego silnika. Pozostałe wykresy (na których nie jest widoczna korelacja) nie zaprzeczają tym założeniom. Ponadto na wszystkich wykresach zauważalna jest dobra powtarzalność wyników w dziedzinie poszczególnych realizacji testu.

Podobny stan rzeczy obserwuje się w przypadku testu FTP-75. Jako przykład wyraźnej, ale niezbyt silnej korelacji można podać ten sam przypadek, co w teście Autobahn (rys. 6.8.). Został on przedstawiony na rys. 6.16.

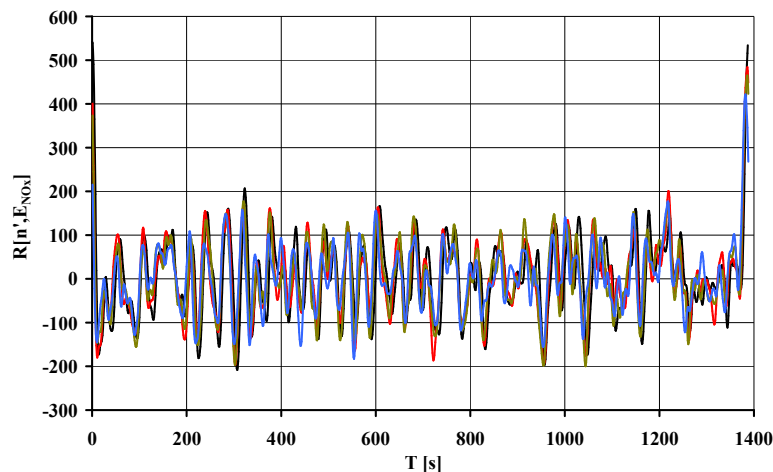


Rys. 6.16. Wykres funkcji korelacji $R[n(t), E_{CO}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu FTP-75

Podobnie jak w teście Autobahn, w teście FTP-75 występuje wyraźna, ale niezbyt silna korelacja między prędkością obrotową n , a natężeniem emisji E_{CO} . Wartości bezwzględne korelacji dla poszczególnych realizacji testu FTP-75 różnią się nieco między

sobą, ale odwzorowują one ten sam kształt, dlatego wciąż można mówić o dużej powtarzalności wyników.

Podobnie wygląda przypadek korelacji pomiędzy pochodną prędkości obrotowej n' , a natężeniem emisji tlenków azotu E_{NOx} , dla którego w teście Autobahn widoczna była bardzo silna zależność korelacyjna (rys. 6.10). Analogiczny przykład dla testu FTP-75 został przedstawiony na rys. 6.17.

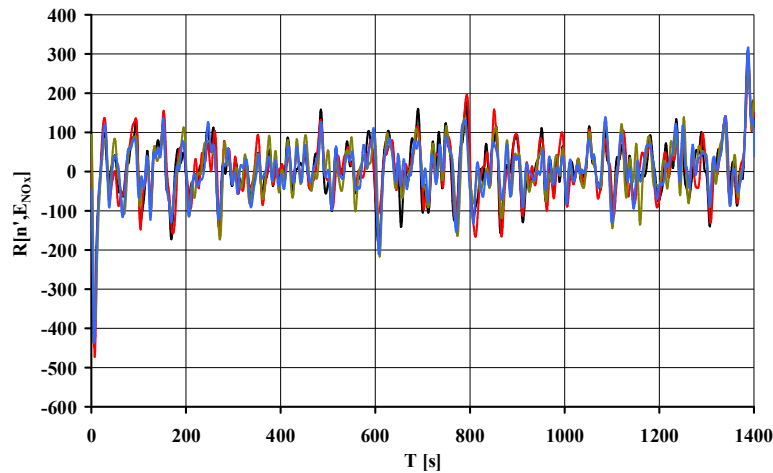


Rys. 6.17. Wykres funkcji korelacji $R[n'(t), E_{NOx}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu FTP-75

Na powyższym wykresie (podobnie jak na rys. 6.10) widoczna jest bardzo silna korelacja, a także występują charakterystyczne maksima lokalne.

Na podstawie testów Autobahn i FTP-75 można wyciągnąć wniosek, że powtarzalność wyników występuje nie tylko pomiędzy poszczególnymi realizacjami danych testów, ale również pomiędzy testami. Stanowi to silne poparcie dla słuszności zastąpienia zależności operatorowych zależnościami funkcyjnymi w prezentowanej metodzie.

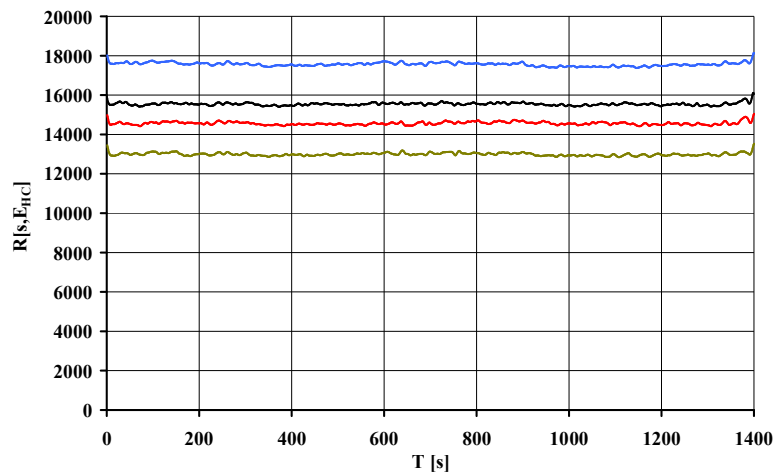
Zupełnie inaczej prezentują się jednak wyniki testu Stop&Go. Korelacje są słabo widoczne lub występuje ich brak. Jako przykład można podać $R[n'(t), E_{NOx}(t)]$, dla którego w poprzednich przykładach widoczne było bardzo silne powiązanie. Zostało ono przedstawione na rys. 6.18.



Rys. 6.18. Wykres funkcji korelacji $R[n'(t), E_{NOx}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu Stop&Go

Na powyższym wykresie widać przypadek występowania w bliskim sąsiedztwie przesunięcia zerowego zarówno korelacji dodatniej, jak i ujemnej, co świadczy o braku powiązania pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami.

Innym przykładem może być rys. 6.19., na którym przedstawiono zupełny brak ewentualnych powiązań pomiędzy przebiegami sterowania s i natężenia emisji węglowodorów $E_{HC}(t)$.



Rys. 6.19. Wykres funkcji korelacji $R[s(t), E_{HC}(t)]$ w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu Stop&Go

Trudno jest jednoznacznie stwierdzić, co jest przyczyną tak słabych korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami, opisującymi pracę silnika w teście Stop&Go. Można jednak przypuszczać że, główną lub jedną z bardziej znaczących przyczyn jest brak korekcji przesunięć fazowych pomiędzy torami pomiarowymi. W tym przypadku nie dość, że korekcja nie została ostatecznie wykonana, to ze względu na małe wartości natężenia przepływu spalin,

korekcja taka była bardzo potrzebna, ponieważ przesunięcia w torach pomiarowych były największe.

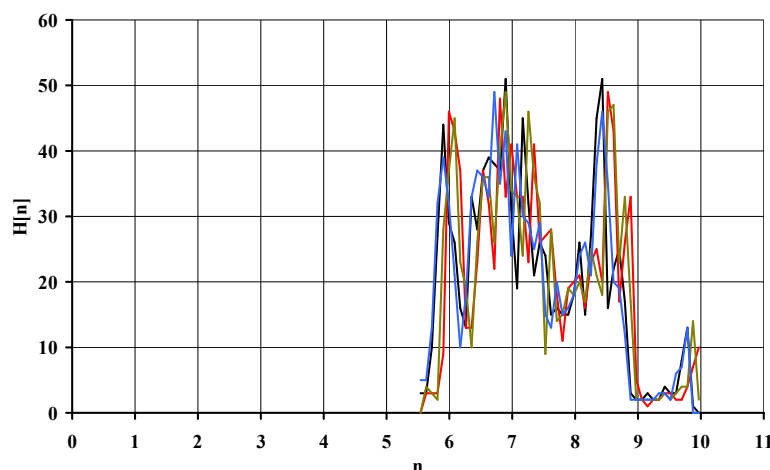
Wyniki testu Stop&Go nie zostaną jednak wyeliminowane z dalszych rozważań. Zostaną one użyte, jako materiał porównawczy.

6.3. Wprowadzenie dziedziny stanów

Podział zakresów wartości na przedziały

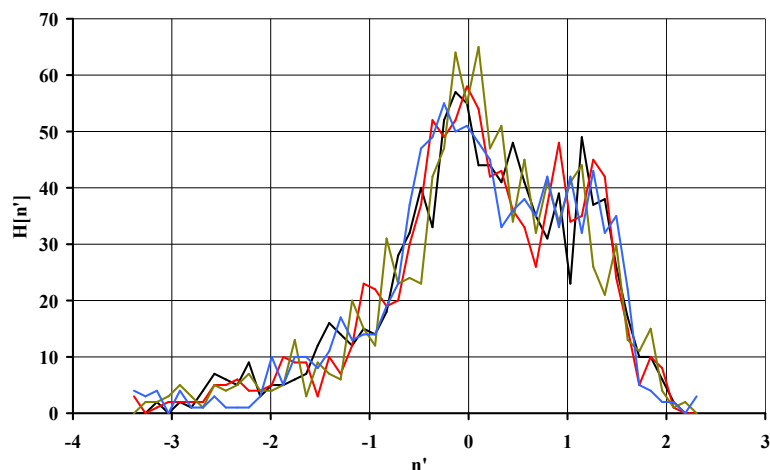
Zgodnie z wytycznymi, opisanymi w podrozdziale 4.3., podział zakresów wartości na przedziały został przeprowadzony w oparciu o analizę ich histogramów. Ze względu na różny charakter testów Autobahn, FTP-75 i Stop&Go, histogramy sporządzone dla poszczególnych testów znacznie się różniły. Dlatego też podział na przedziały został przeprowadzony niezależnie dla każdego z nich. W efekcie nie jest możliwe porównanie stanów pracy pomiędzy poszczególnymi testami, ponieważ warunki pracy zdefiniowane zostały dla innych przedziałów wartości. Jest jednak możliwość porównania stanów pracy silnika pomiędzy kolejnymi realizacjami danych testów i takie porównanie zostanie przedstawione.

Występujące kształty histogramów i sposób doboru przedziałów zostanie pokazany na przykładzie testu Autobahn. Na rys. 6.20. – 6.25. przedstawiono wykresy histogramów, sporządzone dla sześciu parametrów wejściowych, opisujących warunki pracy silnika.



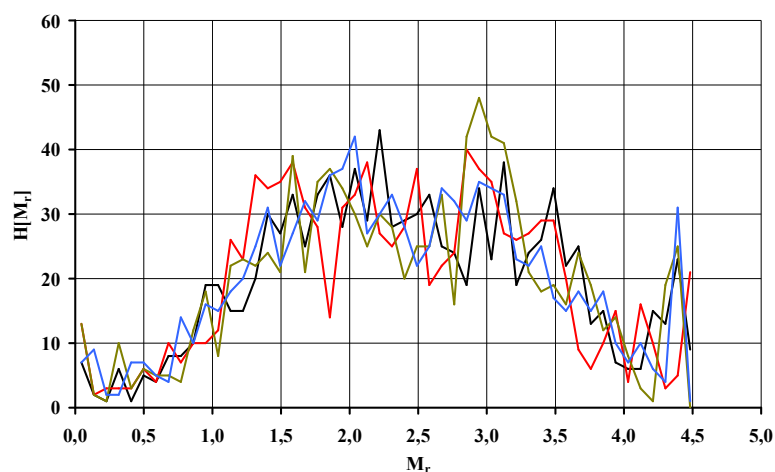
Rys. 6.20. Histogram prędkości obrotowej n dla czterech realizacji testu Autobahn

Dla powyższego histogramu zostało przyjętych pięć najistotniejszych wartości (wartości charakterystycznych): 6,0, 6,8, 7,2, 8,5 i 9,8. Granice przedziałów zostały przeprowadzone pośrodku, pomiędzy tymi wartościami.



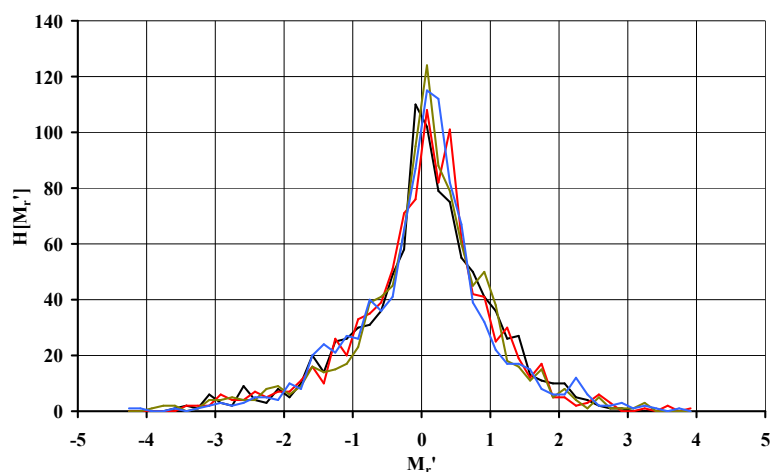
Rys. 6.21. Histogram pochodnej prędkości obrotowej n' dla czterech realizacji testu Autobahn

Na powyższym histogramie widoczne są tylko dwa maksima lokalne. Jednak nie obejmują one całego zakresu wartości, przyjmowanego przez n' . Dlatego zostało wybranych pięć wartości charakterystycznych: -2,0, -0,8, 0,0, 1,0, 1,8.



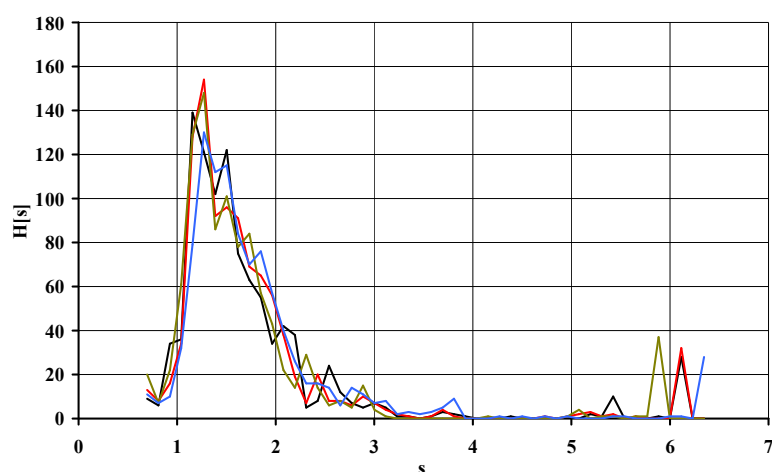
Rys. 6.22. Histogram momentu obrotowego M_r dla czterech realizacji testu Autobahn

Dla momentu obrotowego M_r (rys. 6.22.) zostały wybrane następujące wartości: 0,1, 1,3, 2,2, 3,0, 4,4. Dwie skrajne wartości reprezentują maksima, występujące na brzegach zakresu, z których jedno jest dość słabo widoczne. Środkowe wartości natomiast rozciągają się na trzech maksimach, widocznych w zakresie większych wartości histogramu.



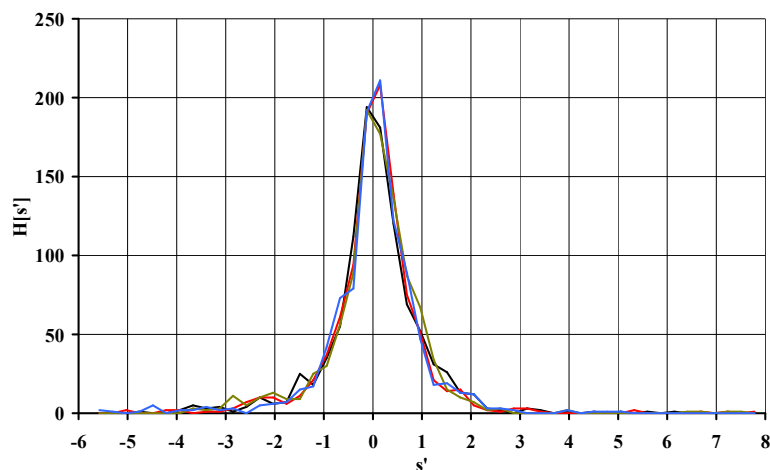
Rys. 6.23. Histogram pochodnej momentu obrotowego M_r' dla czterech realizacji testu Autobahn

Powyższy histogram przedstawia tylko jedno maksimum. Ponownie zostało jednak wybranych pięć wartości charakterystycznych, żeby objąć nimi różne wartości, jakie może przyjmować M_r' : -2,5, -1,0, 0,0, 1,0, 2,5.



Rys. 6.24. Histogram sterowania s dla czterech realizacji testu Autobahn

Dla wartości sterowania przyjęto następujące wartości charakterystyczne: 1,2, 1,8, 2,5, 3,7, 6,0. Pierwsza z nich odpowiada maksimum globalnemu, a ostatnia małowemu maksimum lokalnemu, występującemu na końcu zakresu wartości. Druga i trzecia wartość reprezentuje dość często występujące wartości, nie będące jednak maksimumami lokalnymi (mieszczące się na zboczu wykresu). Wartość 3,7 natomiast reprezentuje rzadko występujące wartości, ale została wybrana, aby nie pominąć tych nielicznych wartości, które czasami pojawiają się w tym zakresie.



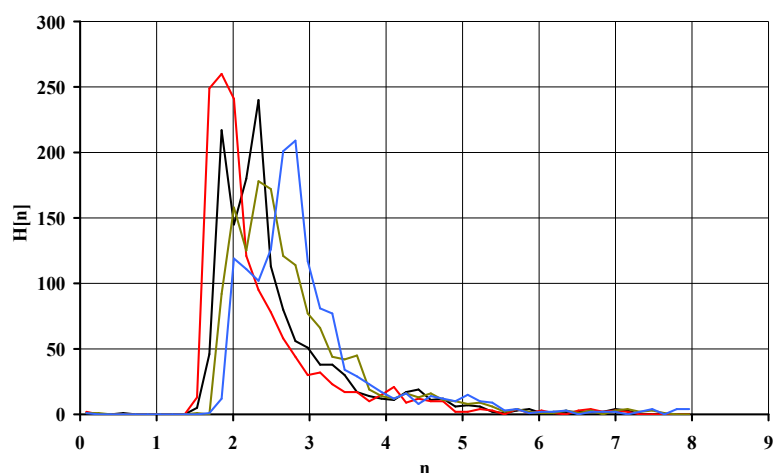
Rys. 6.25. Histogram pochodnej sterowania s' dla czterech realizacji testu Autobahn

Na powyższym histogramie występuje podobny problem, jak dla pochodnej momentu oborowego (6.23.). Zostały w tym przypadku wybrane wartości: -3,0, -1,5, 0,0, 1,5, 3,0, z których tylko jedna reprezentuje maksimum funkcji. Wartości -1,5 i 1,5 mieszczą się na zboczach wykresu i odpowiadają wartościom, występującym w teście z umiarkowaną częstotliwością. Natomiast skrajne punkty reprezentują wartości występujące rzadko, ale zostały wybrane, żeby nie pominąć zakresu, który mimo małej częstotliwości wystąpień, istnieje w badaniach.

Dla pozostałych dwóch testów (FTP-75 i Stop&Go) sposób wyboru wartości charakterystycznych wyglądał tak samo, choć sam kształt histogramów był nieznacznie różny, dlatego zostały wybrane inne wartości. Powyższe przykłady omawiają jednak wszystkie możliwe problemy, jakie można napotkać przy analizie histogramów tego typu przebiegów.

Jedyną różnicą w teście Stop&Go była gorsza powtarzalność niektórych wielkości fizycznych. O ile w poprzednich testach histogramy niemal idealnie pokrywały się ze sobą, w tym teście występowały pewne rozbieżności. Jako przykład zostanie podany histogram prędkości obrotowej n (rys. 6.26.). Zostały dla niego wybrane następujące wartości charakterystyczne: 1,9, 2,4, 2,8, 3,6, 5,1.

W zakresie małych wartości n widoczne są stosunkowo duże rozbieżności w wartościach najczęściej występujących prędkości obrotowych silnika. Warto porównać ten wykres z przebiegiem prędkości obrotowej, pokazanym na rys. 5.25. Widać tam, że spadki prędkości do wartości minimalnych zatrzymują się w poszczególnych realizacjach na różnym poziomie.



Rys. 6.26. Histogram prędkości obrotowej n dla czterech realizacji testu Stop&Go

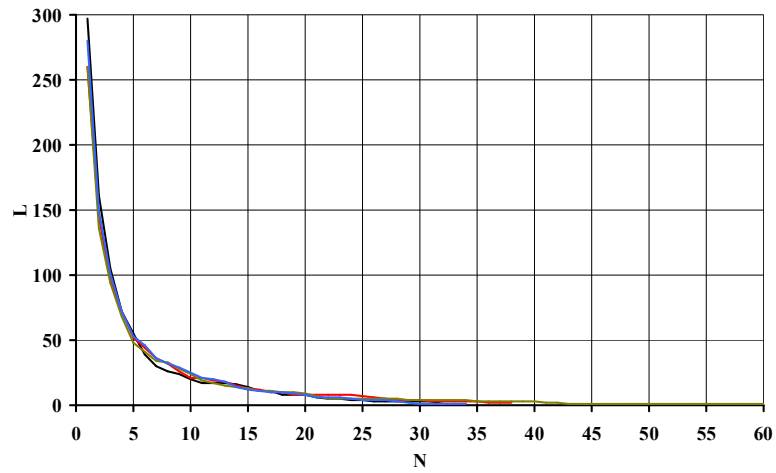
Można się spodziewać, że efektem takich różnic w zadanych warunkach pracy silnika w poszczególnych realizacjach testu Stop&Go będzie mniejsza powtarzalność stanów pracy silnika. Ten problem zostanie jednak omówiony poniżej.

Ostatecznie we wszystkich testach dla każdego z sześciu parametrów wejściowych zakres występujących wartości został podzielony na pięć przedziałów.

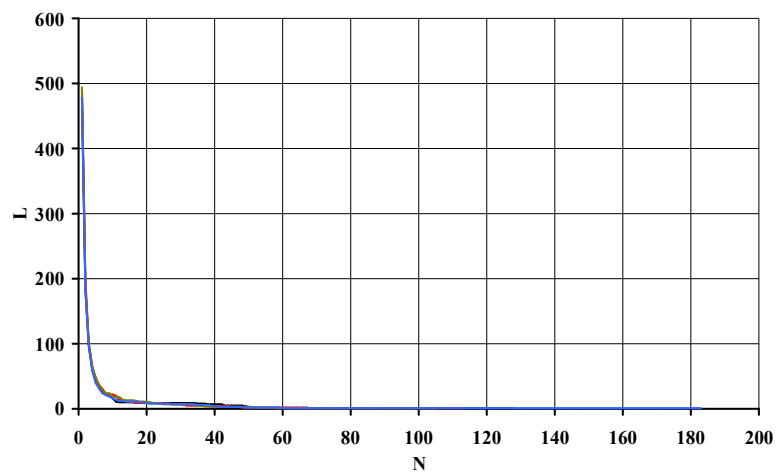
Liczba i moc zbiorów warunków pracy silnika

Jeżeli dla każdego z sześciu parametrów, opisujących warunki pracy silnika, zostało zdefiniowanych pięć przedziałów, to istnieje 5^6 kombinacji przynależności do tych przedziałów. Tworzy to liczbę 15625 zbiorów warunków pracy silnika teoretycznie możliwych do zaistnienia. Sama liczba punktów pomiarowych w prowadzonych testach jest wielokrotnie mniejsza i waha się pomiędzy 1000, a 1400. Dlatego oczywistym jest fakt, że większość zdefiniowanych zbiorów warunków pracy silnika będzie pusta.

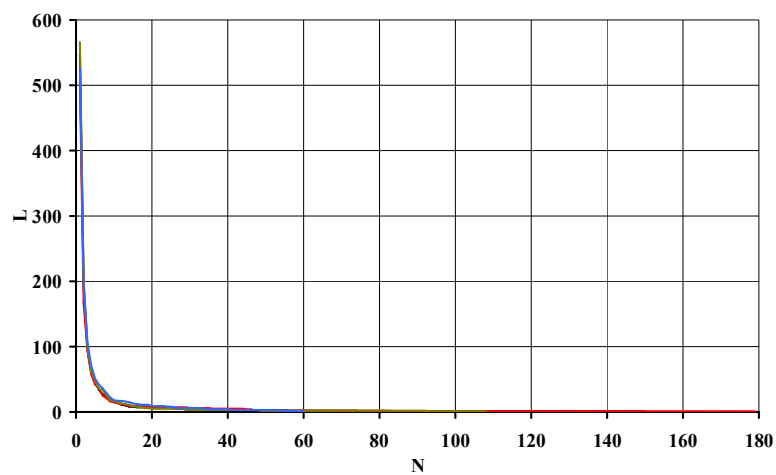
W celu zilustrowania liczebności niepustych zbiorów oraz ich mocy, zostały sporządzone wykresy zależności $L(N)$, gdzie: L jest liczbą zbiorów warunków o mocy nie mniejszej, niż N . Na rys. 6.27. – 6.28. pokazano te wykresy dla wszystkich trzech testów.



Rys. 6.27. Zależność liczności zbiorów L o mocy nie mniejszej od N dla czterech realizacji testu Autobahn



Rys. 6.28. Zależność liczności zbiorów L o mocy nie mniejszej od N dla czterech realizacji testu FTP-75

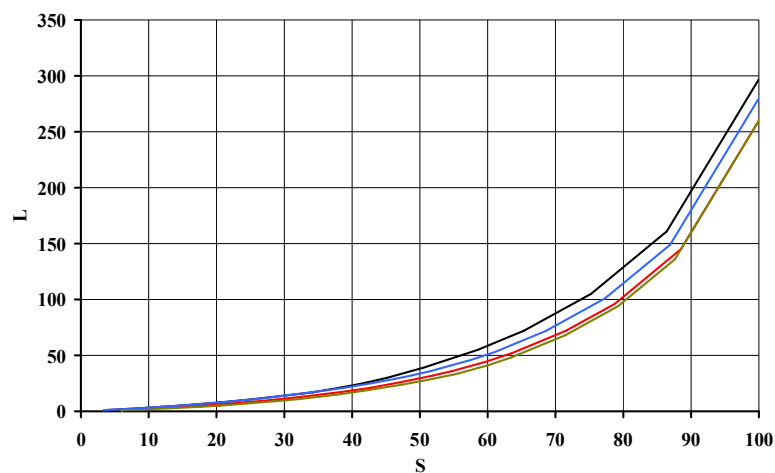


Rys. 6.29. Zależność liczności zbiorów L o mocy nie mniejszej od N dla czterech realizacji testu Stop&Go

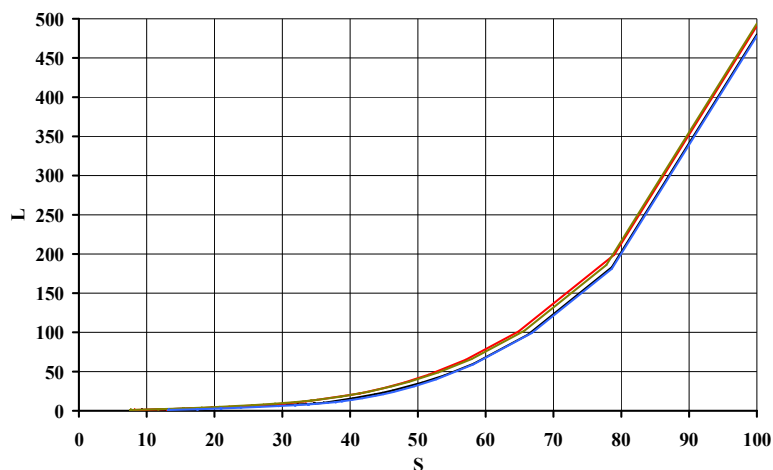
Na powyższych wykresach widać, że istnieje dużo zbiorów warunków, w których mieści się tylko jeden punkt pomiarowy. Jest to liczba około 300 dla testu Autobahn oraz około 500 dla pozostałych dwóch testów. Liczba zbiorów bardzo gwałtownie spada, wraz ze wzrostem mocy zbiorów. Dla zbiorów zawierających co najmniej 10 punktów pomiarowych, ich liczba wynosi około 20. Największa moc zbiorów sięga nawet do niemal 200, ale są to przypadki jednostkowe.

Warto zadać sobie również pytanie: Ile punktów pomiarowych, występujących w danym teście, zostanie wziętych pod uwagę w przypadku wyboru jedynie kilku najliczniejszych zbiorów warunków pracy silnika? W tym celu zostały sporządzone wykresy zależności $L(S)$, gdzie: S oznacza procentowy udział punktów pomiarowych, mieszczących się w sumie w wybranych zbiorach warunków pracy silnika, a L oznacza liczbę zbiorów warunków pracy silnika, jaką należy przyjąć, aby zawrzeć w nich zadany udział S .

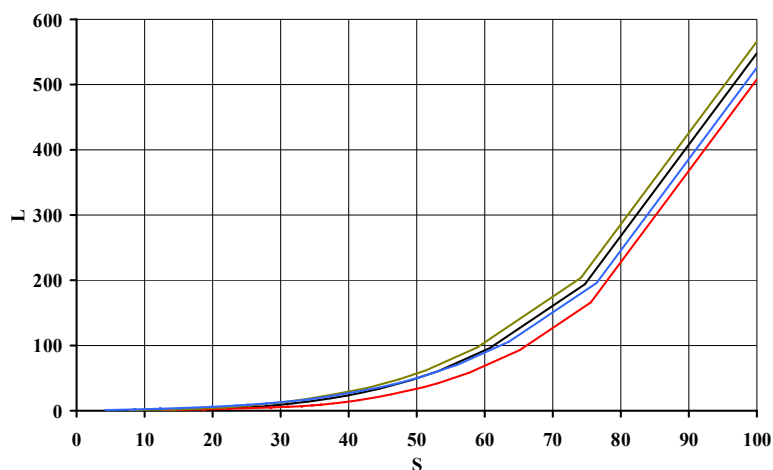
Zależności te zostały przedstawione na rys. 6.30. – 6.32. W przypadku testu Autobahn, aby ująć łącznie 80% wszystkich punktów pomiarowych w teście, należałoby uwzględnić około 100 zbiorów warunków pracy silnika. W przypadku testu FTP-75 potrzebna byłaby dwukrotnie większa liczba zbiorów, wynosząca 200, a w przypadku testu Stop&Go, liczba 250.



Rys. 6.30. Zależność liczności zbiorów L , mieszczących w sobie zadany procentowy udział punktów pomiarowych, występujących w teście Autobahn



Rys. 6.31. Zależność liczności zbiorów L , mieszczących w sobie zadany procentowy udział punktów pomiarowych, występujących w teście FTP-75



Rys. 6.32. Zależność liczności zbiorów L , mieszczących w sobie zadany procentowy udział punktów pomiarowych, występujących w teście Stop&Go

Ze względu na tak dużą licznosc zbiorów koniecznych do analizy, aby uwzględnić w badaniach co najmniej 80% wszystkich pomiarów, warto jest (zgodnie z sugestiami z podrozdziału 4.3.) skupić uwagę na tych zbiorach warunków pracy silnika, które wydają się najbardziej interesujące.

W każdym teście wyznaczono w tym celu zbiory warunków najbardziej istotnych pod względem: największej mocy zbiorów, największemu średniemu natężeniu emisji substancji zanieczyszczających, największej sumarycznej emisji substancji zanieczyszczających.

W przypadku testu Autobahn największa moc zbiorów warunków pracy silnika występowała dla warunków, charakteryzujących się dość dużą i stałą prędkością obrotową silnika, dość dużą i stałą wartością momentu hamującego, oraz dość małą i stałą wartością parametru sterowania. Takie warunki pracy silnika odpowiadają jeździe ze stałą prędkością w

warunkach podmiejskich. Natomiast warunki, odpowiadające największemu średniemu natężeniu emisji substancji zanieczyszczających, charakteryzowały się dużą i jednocześnie rosnącą wartością prędkości obrotowej, dużą i stałą wartością momentu hamującego, oraz dużą i jednocześnie rosnącą wartością parametru sterowania. Takie warunki pracy silnika odpowiadają przyspieszaniu przy dużej prędkości jazdy. Warunki reprezentujące największą sumaryczną emisję substancji zanieczyszczających były tożsame z tymi, dla których moc zbioru była największa. Jak widać liczba punktów pomiarowych w danym zbiorze ma większe znaczenie na sumaryczną emisję, niż wartość jej natężenia.

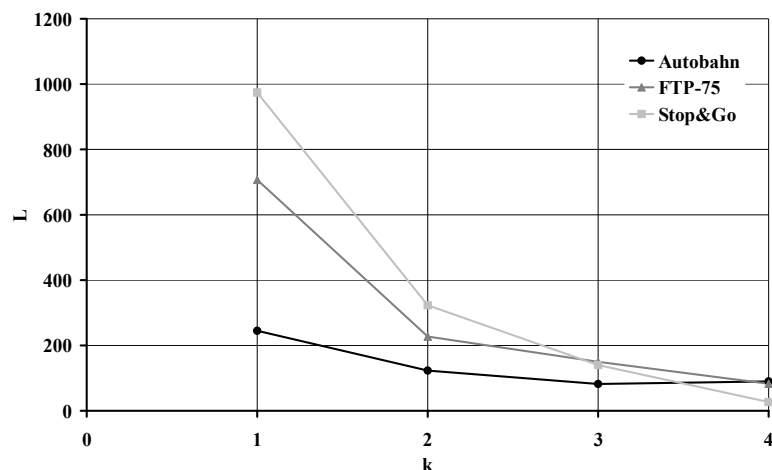
W przypadku testów FTP-75 i Stop&Go największa moc zbiorów warunków pracy silnika występowała dla warunków, odpowiadających pracy na biegu jałowym. Dla tych warunków występowała również największa sumaryczna emisja substancji zanieczyszczających. Natomiast największe średnie natężenie emisji występowało w różnych warunkach pracy silnika, odpowiadających zazwyczaj gwałtownemu przyspieszaniu podczas jazdy z dużą prędkością.

Powtarzalność występowania zbiorów warunków

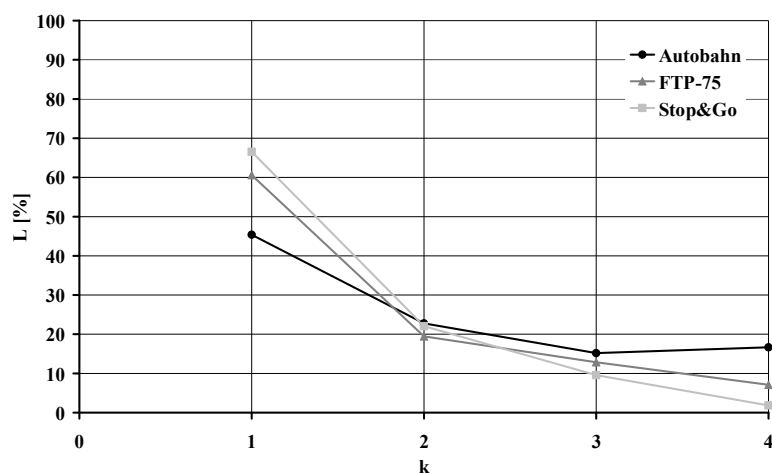
Istotnym zagadnieniem jest również powtarzalność występowania zbiorów warunków w poszczególnych realizacjach danego testu. Aby ocenić to zjawisko, dla każdego testu sporządzono listę niepustych zbiorów warunków, występujących w którejkolwiek realizacji. Następnie zliczono, ile zbiorów wystąpiło we wszystkich czterech realizacjach, ile wystąpiło jedynie w trzech realizacjach, w dwóch, a ile zbiorów wystąpiło tylko w jednej realizacji.

Sporządzono na tej podstawie zależności $L(k)$, gdzie k jest liczbą realizacji, w których występują dane zbiory warunków, a L jest liczbą zbiorów, które wystąpiły k razy. Wykres tych zależności (oddzielnie dla poszczególnych testów) przedstawiono na rys. 6.33.

Podobną zależność przedstawia rys. 6.34. Tam jednak licznosc zbiorów L , występujących w k realizacjach, przedstawiona została w skali procentowej, odnoszącej się do liczby wszystkich zbiorów, występujących w danym teście.



Rys. 6.33. Liczność zbiorów L , występujących w k realizacjach w poszczególnych testach

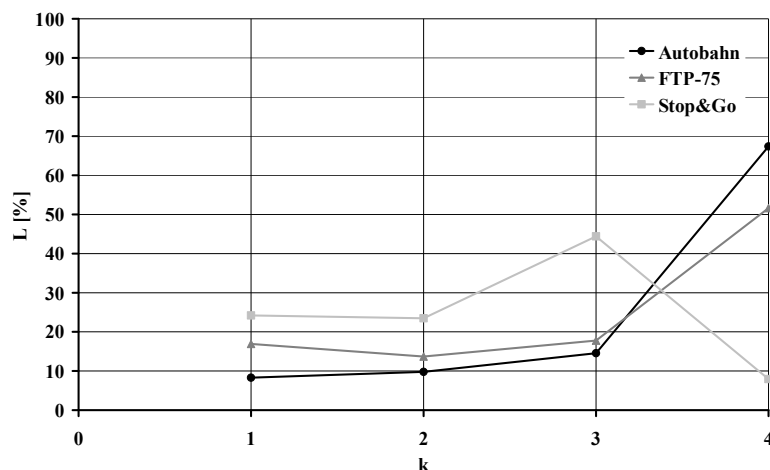


Rys. 6.34. Udział licznosci zbiorów L , występujących w k realizacjach w poszczególnych testach

Na powyższych wykresach widać, że największa powtarzalność występowania zbiorów warunków występuje w teście Autobahn. Łącznie około jedna trzecia zbiorów występuje tam w co najmniej trzech realizacjach testu, a jedynie 45% zbiorów występuje tylko w pojedynczej realizacji.

Zdecydowanie najgorzej przedstawia się ten problem w przypadku testu Stop&Go. Tylko dwa zbiory stanów występują tam we wszystkich czterech realizacjach tego testu. Można przypuszczać, że problem ten jest związany rozbieżnościami warunków pracy silnika, przedstawianymi na histogramie z rys. 6.26.

Zliczono również wszystkie punkty pomiarowe, występujące w zbiorach warunków, które wystąpiły w zadanej liczbie k realizacji. W ten sposób sporządzono zależność $L(k)$, gdzie L jest procentowym udziałem sumarycznej liczby punktów pomiarowych (względem wszystkich punktów pomiarowych w danym teście), znajdujących się w zbiorach warunków, które wystąpiły w k realizacjach. Zależność tę przedstawiono na rys. 6.35.



Rys. 6.35. Udział liczości punktów pomiarowych L , znajdujących się w zbiorach stanów, które wystąpiły w k realizacjach w poszczególnych testach

Z powyższego wykresu wynika, że w teście Autobahn dwie trzecie punktów pomiarowych znajduje się w zbiorach warunków, które wystąpiły we wszystkich czterech realizacjach testu. Nieznacznie gorzej przedstawia się to zagadnienie w teście FTP-75. Oznacza to, że te zbiory, które występują czterokrotnie w poszczególnych realizacjach, mają jednocześnie największą moc. Świadczy to bardzo dobrze o powtarzalności wyników w poszczególnych realizacjach tych testów.

Natomiast w teście Stop&Go punkty pomiarowe ze zbiorów, które powtórzyły się we wszystkich realizacjach, stanowią najmniej liczną grupę. Oznacza to, że zbiory warunków, które wystąpiły we wszystkich czterech realizacjach nie mają dużej mocy. Świadczy to o niezadowalającej powtarzalności wyników, występujących w tym teście. Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska jest gorsza powtarzalność warunków pracy silnika w tym teście (pokazana na rys. 6.25.).

6.4. Niepowtarzalność stanów pracy silnika w danych warunkach pracy

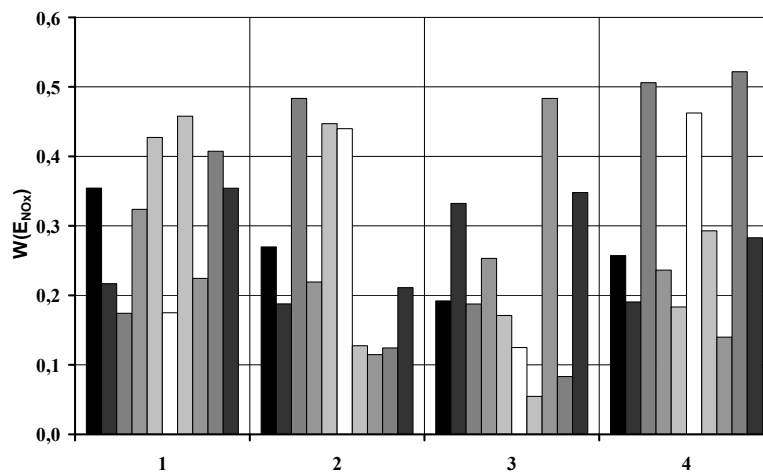
Niezależnie od powtarzalności występowania zbiorów warunków w poszczególnych realizacjach danego testu, można rozpatrywać powtarzalność (lub niepowtarzalność) stanów pracy silnika w obrębie pojedynczego zbioru warunków. Zjawisko to zostało omówione w podrozdziale 4.4. Tam też została przedstawiona metoda oceny, na ile niepowtarzalność stanów w danym zbiorze warunków jest spowodowana zjawiskami przypadkowymi, a na ile niedoskonałością przyporządkowania różnych warunków do jednego zbioru.

Poniżej zostanie omówione zarówno samo zjawisko niepowtarzalności, jak również wyniki jego oceny.

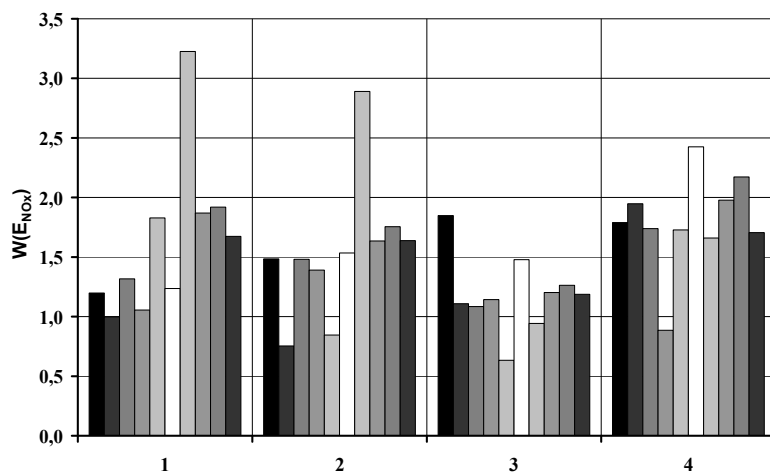
Niepowtarzalność stanów w poszczególnych zbiorach warunków

Dla każdej realizacji każdego z testów wybrano dziesięć zbiorów warunków o największej mocy. Dla każdego z nich, dla natężenia emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających obliczono niepowtarzalność wyników. Zostały wybrane najliczniejsze zbiory warunków, żeby później łatwiejsza była ocena zjawiska niepowtarzalności za pomocą liczb rozmytych.

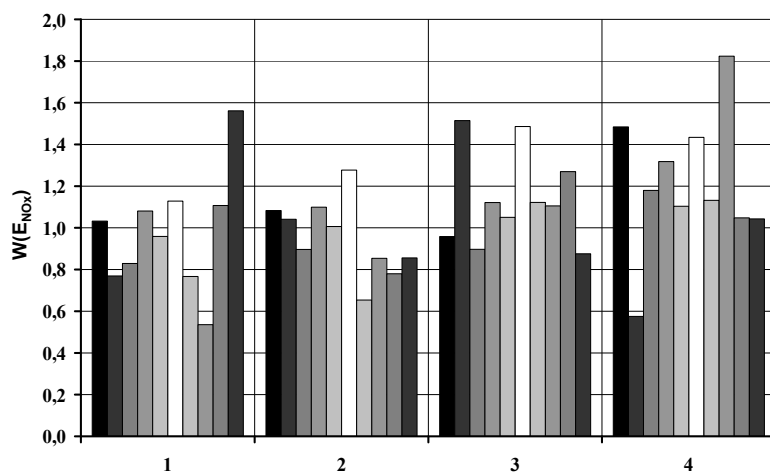
W celu zilustrowania występującego zjawiska niepowtarzalności parametrów wyjściowych (opisujących stany pracy silnika), zostaną poniżej przedstawione wykresy, sporządzone dla natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} (rys. 6.36. – 6.38.). Liczby na osi poziomej oznaczają numer realizacji danego testu, w obrębie której znajduje się dziesięć wartości niepowtarzalności, obliczonych dla dziesięciu wybranych zbiorów warunków pracy silnika.



Rys. 6.36. Niepowtarzalność wyników W , obliczona dla natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} , w kolejnych zbiorach warunków, dla poszczególnych realizacji testu Autobahn



Rys. 6.37. Niepowtarzalność wyników W , obliczona dla natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} , w kolejnych zbiorach warunków, dla poszczególnych realizacji testu FTP-75



Rys. 6.38. Niepowtarzalność wyników W , obliczona dla natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} , w kolejnych zbiorach warunków, dla poszczególnych realizacji testu Stop&Go

Na powyższych wykresach widać, że wartości niepowtarzalności, mieszczą się w granicach od 0,05 do niemal 2. Faktycznie w takim zakresie przedstawiają się wartości niepowtarzalności również dla innych substancji, których natężenie emisji było mierzone w spalinach. Warto zaznaczyć, że dla niepowtarzalności równej 1, odchylenie standardowe jest równe wartości średniej, a więc niepewność w przypadku takiej wartości jest bardzo duża.

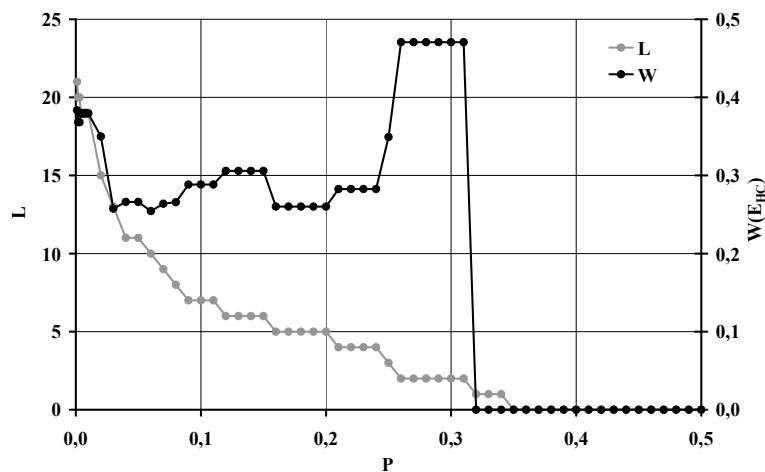
Prowadzi to do wniosku, że różnice w wartościach parametrów wyjściowych, opisujących stan pracy silnika, są znaczne w poszczególnych zbiorach warunków pracy. Celowe są więc próby oceny tego zjawiska pod kątem ich przyczyn.

Ocena przyczyn zjawiska niepowtarzalności

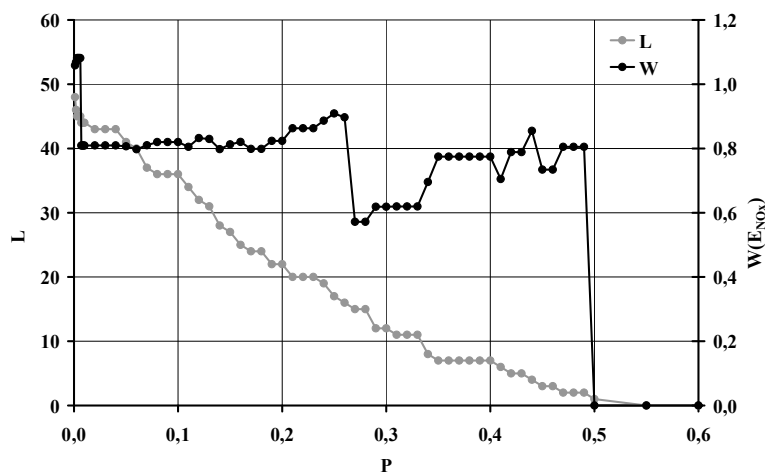
Dla powyższych zbiorów warunków pracy silnika została przeprowadzona analiza przyczyn zjawiska niepowtarzalności przy pomocy teorii liczb rozmytych, opisana w podrozdziale 4.4.

W podrozdziale tym zostało również wymienionych kilka charakterystycznych przypadków, jak mogą układać się funkcje $W(P)$ i $L(P)$ – niepowtarzalność i moc zbioru, zależne od wartości progowej P i jak świadczy to o przyczynach zjawiska niepowtarzalności. Poniżej zostaną przedstawione przykładowe wykresy, reprezentujące te przypadki.

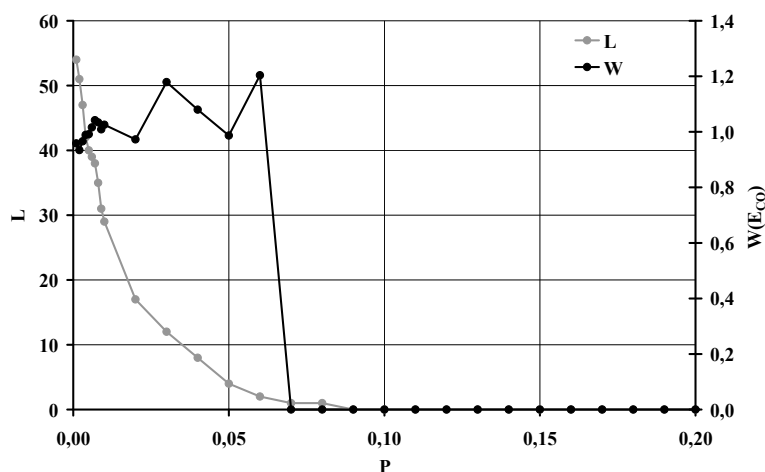
Sytuacja, w której niepowtarzalność W jest funkcją stałą (lub rosnącą) w dziedzinie wartości progowej P , została przedstawiona na rys. 6.39. – 6.41.



Rys. 6.39. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji węglowodorów E_{HC} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu Autobahn



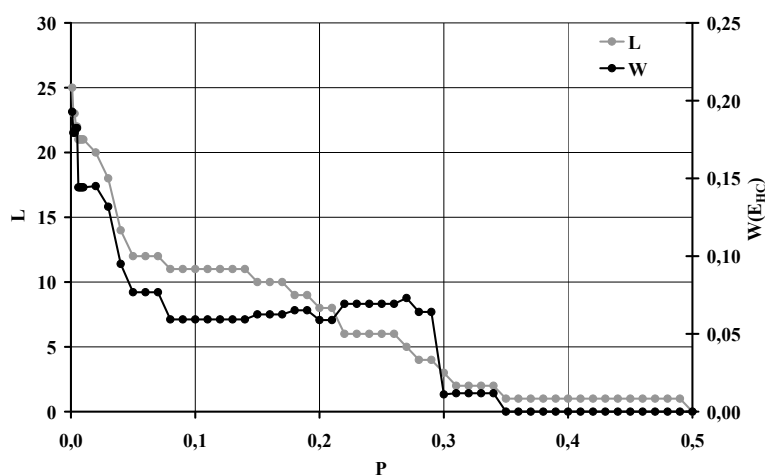
Rys. 6.40. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu FTP-75



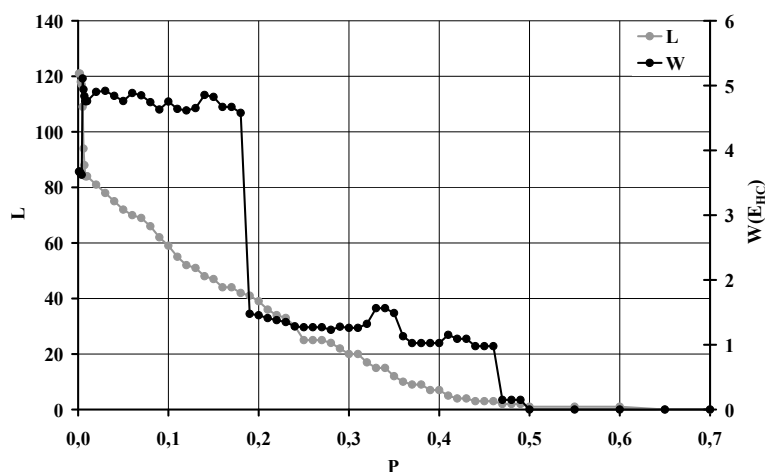
Rys. 6.41. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu Stop&Go

W chwili, kiedy moc zbioru osiąga wartość 1, niepowtarzalność musi wynosić 0, ponieważ z definicji wskaźnika niepowtarzalności, dla pojedynczego pomiaru nie istnieje możliwość osiągnięcia jakiegokolwiek innej wartości. Należy więc zwrócić uwagę na powyższych wykresach, jak kształtuje się funkcja $W(P)$ dla L większych od 1. Najwyraźniej niepowtarzalność w powyższych przypadkach nie zmniejsza się wraz ze wzrostem P , a więc zjawisko niepowtarzalności nie jest spowodowane niedoskonałością przyporządkowania warunków pracy silnika do danego zbioru warunków.

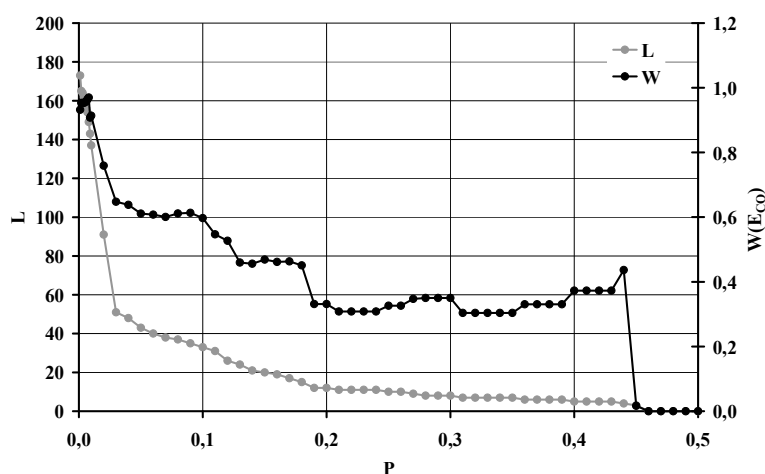
Na rys. 6.42. – 6.44. zostaną przedstawione przypadki, w których $W(P)$ stabilizuje się na pewnym poziomie.



Rys. 6.42. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji węglowodorów E_{HC} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu Autobahn



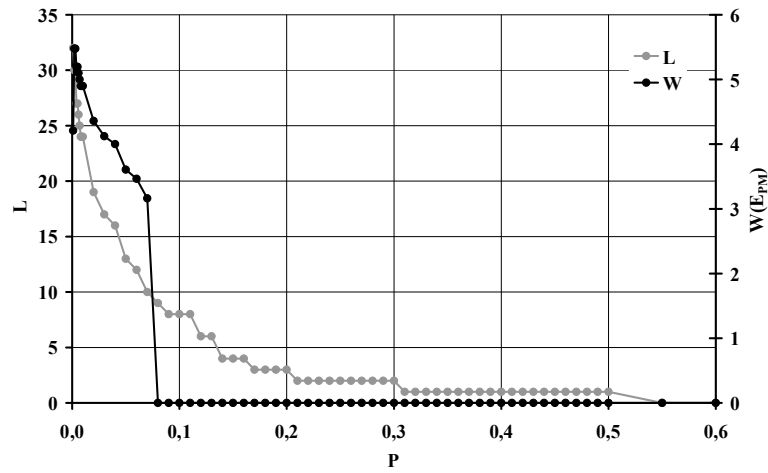
Rys. 6.43. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji węglowodorów E_{HC} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu FTP-75



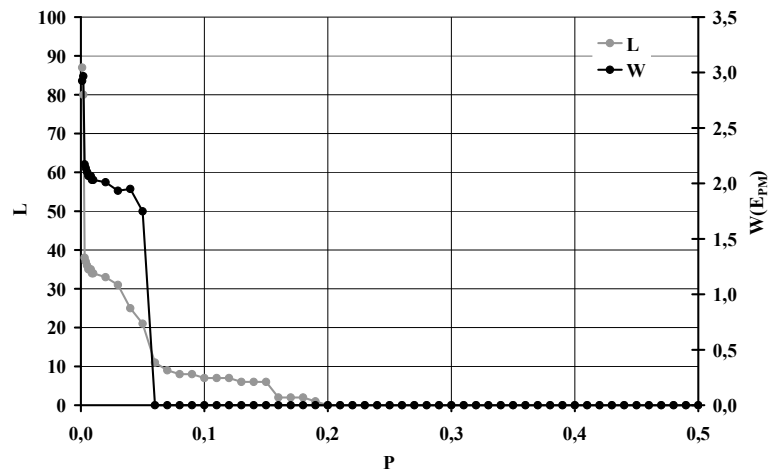
Rys. 6.44. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w drugiej realizacji testu Stop&Go

Na powyższych trzech wykresach widać, że niepowtarzalność W zmniejsza się wraz ze wzrostem wartości progowej P . Niekiedy dzieje się to skokowo, innym razem w sposób płynny. Jednak za każdym razem wartość W zatrzymuje się i stabilizuje, nie osiągając mniejszych wartości tak długo, aż moc zbioru L nie zmniejszy się do wartości 1. Oznacza to, że zwiększanie P do pewnego stopnia eliminuje zjawisko niepowtarzalności, ale nie całkowicie. Wartość W , na której wykres stabilizuje się, prawdopodobnie reprezentuje tę część niepowtarzalności, która nie wynika z niedoskonałości przyporządkowania do zbioru warunków. Jej przyczyną są zjawiska przypadkowe, zachodzące w pracy silnika lub zaistniałe w procesie pomiaru i rejestracji wyników badań.

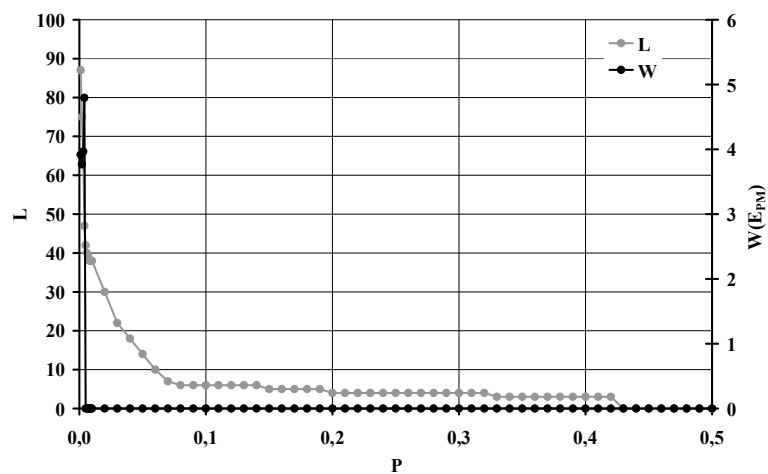
Na rys. 6.45. – 6.47. zostaną przedstawione przypadki, w których niepowtarzalność zmniejsza się do 0, zanim moc zbioru osiągnie wartość 1.



Rys. 6.45. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w drugiej realizacji testu Autobahn



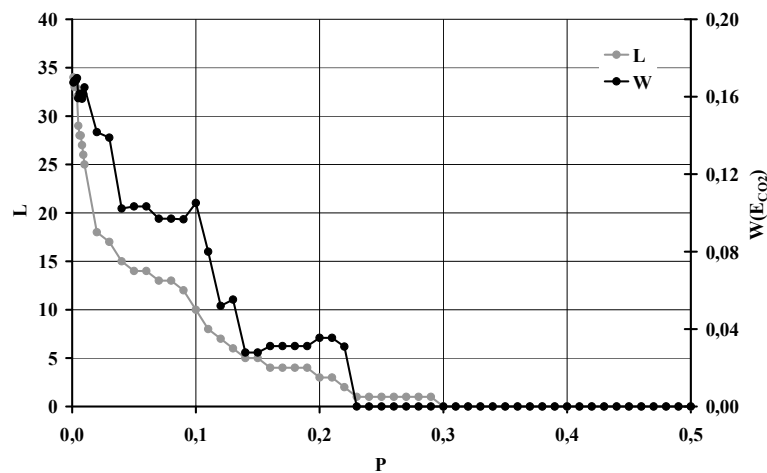
Rys. 6.46. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w trzeciej realizacji testu FTP-75



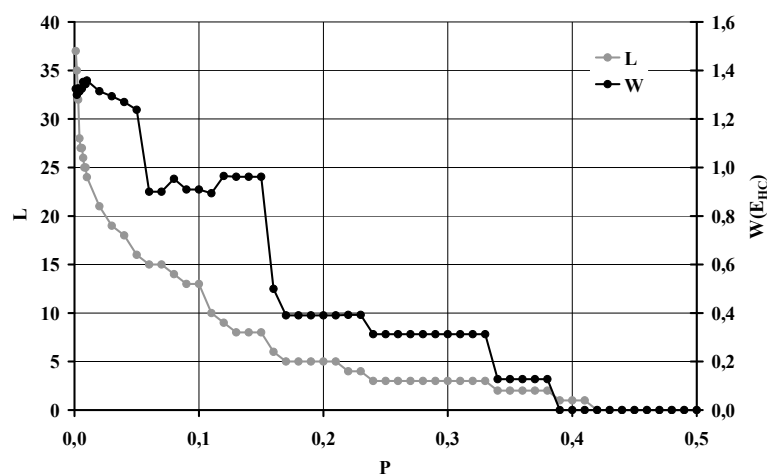
Rys. 6.47. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w trzeciej realizacji testu Stop&go

Powyższe trzy wykresy reprezentują dość szczególny przypadek, występujący jedynie dla natężenia emisji cząstek stałych. Po przekroczeniu pewnej wartości progowej P następuje takie zawężenie zbioru warunków, że pozostają w nim jedynie punkty pomiarowe o identycznych wartościach liczbowych. W efekcie niepowtarzalność zmniejsza się do 0. Zjawisko to wiąże się z ograniczoną dokładnością pomiarową cząstek stałych, przy której analizator nadaje takie same wartości, podczas gdy rzeczywiste natężenia emisji są bardzo zbliżone do siebie. Zazwyczaj ma to miejsce podczas pracy silnika w stanach, w których natężenie emisji jest bliskie 0.

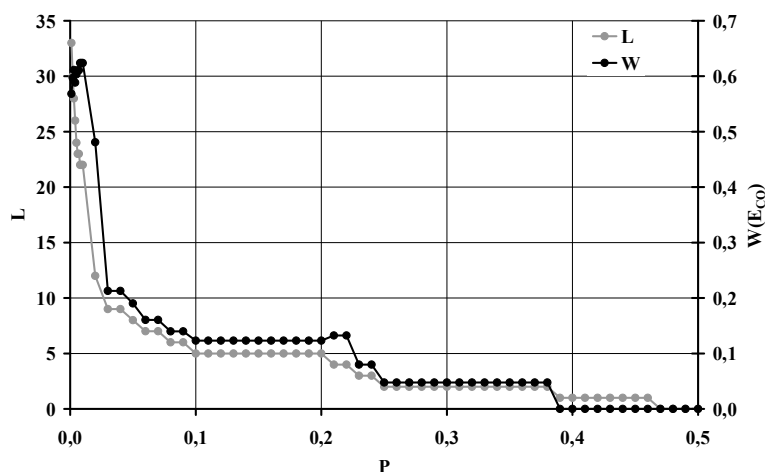
Kolejne trzy rys.: 6.48. – 6.50. przedstawiają sytuację, w której W maleje do 0 wraz z L malejącym do 1.



Rys. 6.48. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu Autobahn



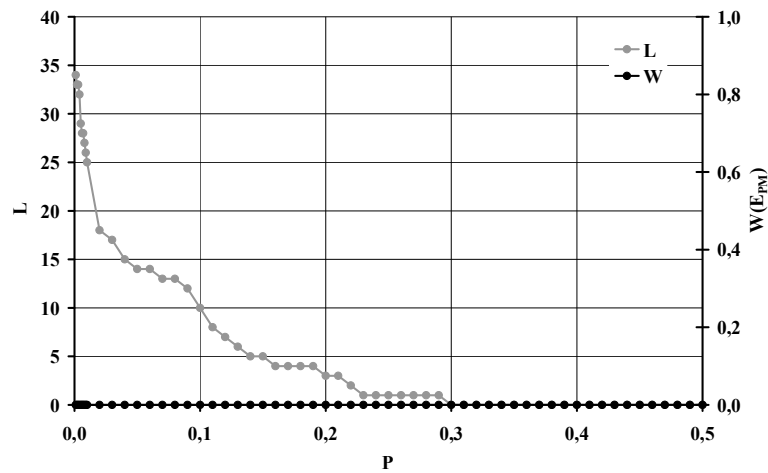
Rys. 6.49. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji węglowodorów E_{HC} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu FTP-75



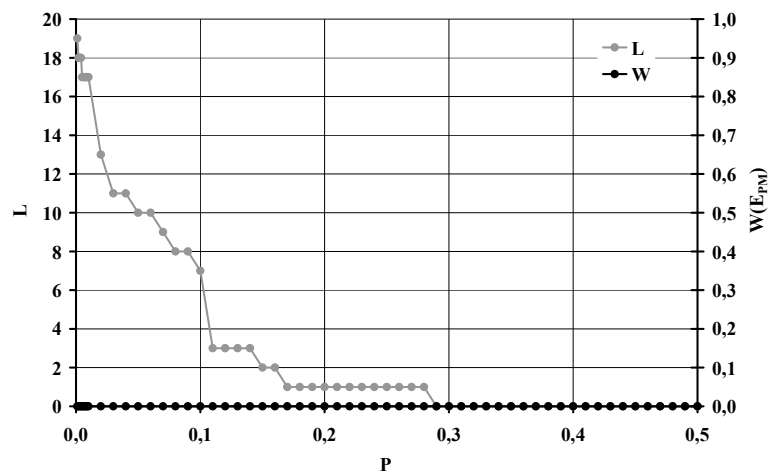
Rys. 6.50. Wykres niepewtarzalności W natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w drugiej realizacji testu Stop&Go

Teoretycznie powyższy przypadek oznacza możliwość całkowitego wyeliminowania niepewtarzalności za pomocą zwiększania P , a więc poprzez zawężanie zbioru warunków. Jest to jednak sytuacja dużo trudniejsza do interpretacji, ponieważ niepewtarzalność W musi (zgodnie z jej definicją) wynosić 0 dla mocy zbioru L , równej 1. Trudno więc ocenić, na ile niepewtarzalność W wynika ze zjawisk przypadkowych, a na ile z niedoskonałości przyporządkowania do jednego zbioru warunków. Gdyby zjawiska przypadkowe odgrywały znaczącą rolę, kształt wykresów przedstawiałby się tak, jak na rys. 6.42. – 6.44. Skoro jednak wykres zmniejsza się stopniowo wraz ze wzrostem P , można przypuszczać, że zjawiska przypadkowe nie mają w tym przypadku dominującego wpływu na niepewtarzalność, choć nie można całkowicie wykluczyć ich istnienia.

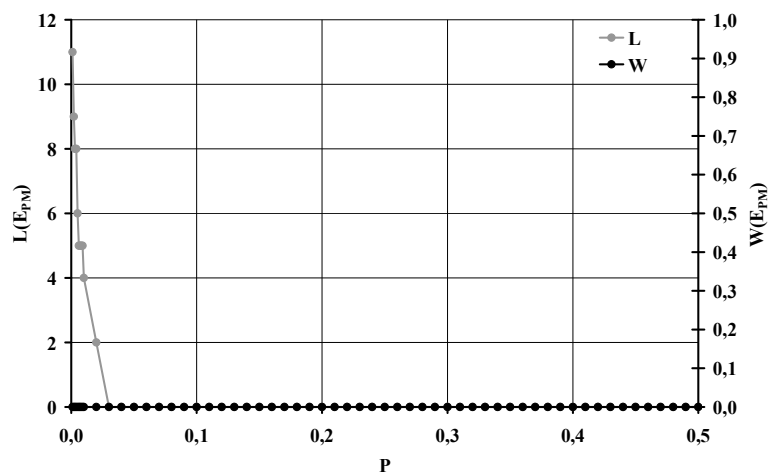
Na następnych trzech wykresach zostanie przedstawiony ostatni z omawianych przypadków, w którym wartość niepewtarzalności W jest zerowa w całym zakresie wartości progowych P .



Rys. 6.51. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w pierwszej realizacji testu Autobahn



Rys. 6.52. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w trzeciej realizacji testu FTP-75



Rys. 6.53. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P , dla wybranego zbioru warunków pracy silnika w trzeciej realizacji testu Stop&Go

Powyższa sytuacja jest bardzo zbliżona do przypadku, w którym wartości W maleją do 0 zanim L osiągnie wartość 1 (rys. 6.45. – 6.47.) i podobnie jak wcześniej, ma miejsce jedynie dla natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} . W tej sytuacji okazuje się jednak, że dla całego zbioru warunków (jeszcze przed jego zawężeniem) E_{PM} mają tę samą wartość, zwykle równą 0. Jest to przypadek o tyle szczególny, że w ogóle nie występuje w nim zjawisko niepowtarzalności, a więc nie można mówić o jego przyczynach.

Na podstawie analizy dziesięciu najliczniejszych zbiorów warunków w każdej realizacji poszczególnych testów można zauważyć, że najczęściej występują przypadki, w których zależność $W(P)$ maleje, a następnie stabilizuje się na pewnej wartości (choć nie wszędzie zjawisko to jest tak czytelne, jak na rys. 6.42. – 6.44.). Oznacza to, że zazwyczaj niepowtarzalność zależy w pewnym stopniu od zjawisk przypadkowych, a w pewnym stopniu od niedoskonałości przyporządkowania do zbioru stanów.

Trzeba jednak zaznaczyć, że niekiedy kształt wykresu nie pozwala na jednoznaczne przyporządkowanie do jednego z omówionych w tym podrozdziale przypadków. Zdarza się, że wartość, na której wykres się stabilizuje jest bardzo bliska wartości maksymalnej W . Trudno wówczas odróżnić taki przypadek od stałej funkcji $W(P)$. Innym razem stabilizacja jest słabo zaznaczona, co upodabnia sytuację do zmniejszania się W do 0 wraz ze zmniejszaniem się L do 1. Występują też przypadki, w których wartość W stabilizuje się najpierw na pewnym poziomie, żeby po przekroczeniu pewnych wartości progowych P znowu zmniejszać się, aż do kolejnej stabilizacji na niższym poziomie. Wiele z przyjmowanych kształtów zależności $W(P)$ jest trudna do interpretacji i porównywania ze sobą. Ogólnie, istnieje jednak uzasadniony wniosek, stwierdzający, że niepowtarzalność wyników W zależy w pewnym stopniu nie tylko od zjawisk przypadkowych, ale również od niedoskonałości analizy wyników i niekiedy jest możliwe oszacowanie wpływu tych dwóch czynników.

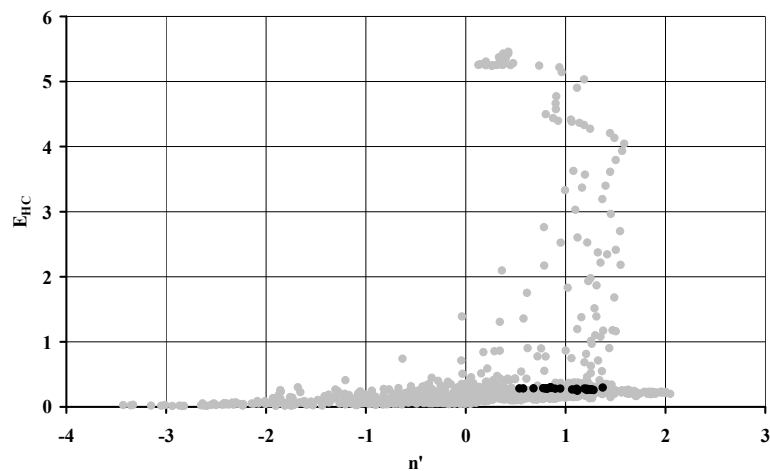
Różnorodność kształtów wykresów $W(P)$ wynika prawdopodobnie z faktu, że stosunkowo duży udział wpływu na ten kształt mają zjawiska przypadkowe. W związku z trudnościami związanymi z porównywaniem tych kształtów nie było możliwe przeprowadzenie analizy powtarzalności charakteru tych wykresów w odpowiadających sobie zbiorach warunków, występujących w różnych realizacjach danego testu.

6.5. Wizualizacja wielowymiarowych zależności

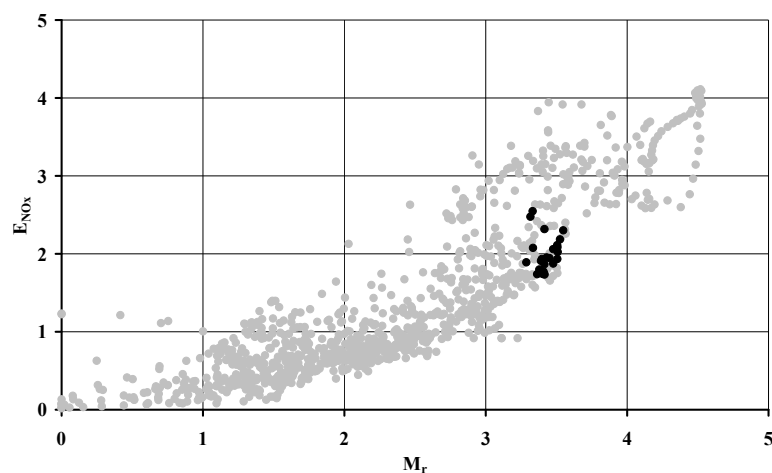
Zgodnie z sugestiami z podrozdziału 4.5., poniżej zostaną przedstawione przykłady dwóch, niezależnych sposobów wizualizacji wyników.

Wizualizacja wyników w pojedynczym zbiorze stanów pracy

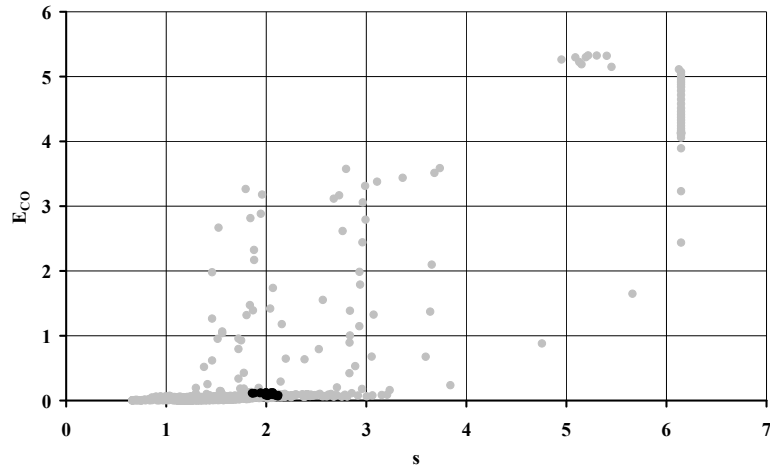
Na rys. 6.54. – 6.62. zostały przedstawione przykładowe wykresy, ilustrujące wartości wybranych parametrów wyjściowych, należących do danego zbioru stanów pracy silnika, na tle wszystkich stanów, występujących w realizacji danego testu.



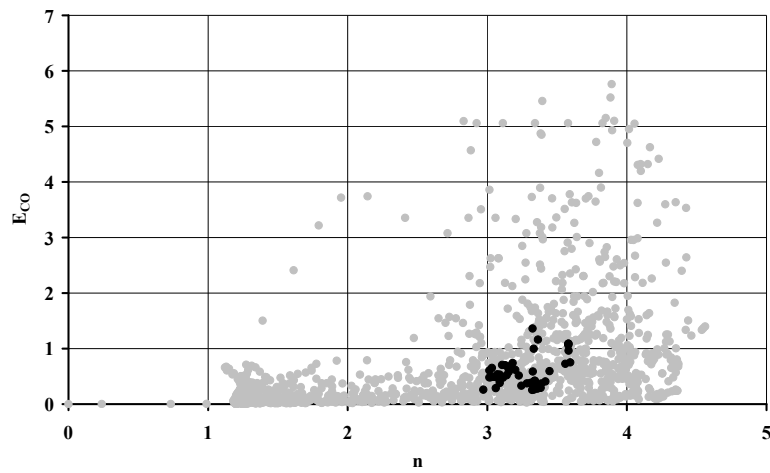
Rys. 6.54. Wykres natężenia emisji węglowodorów E_{HC} w dziedzinie pochodnej prędkości obrotowej silnika n' , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście Autobahn



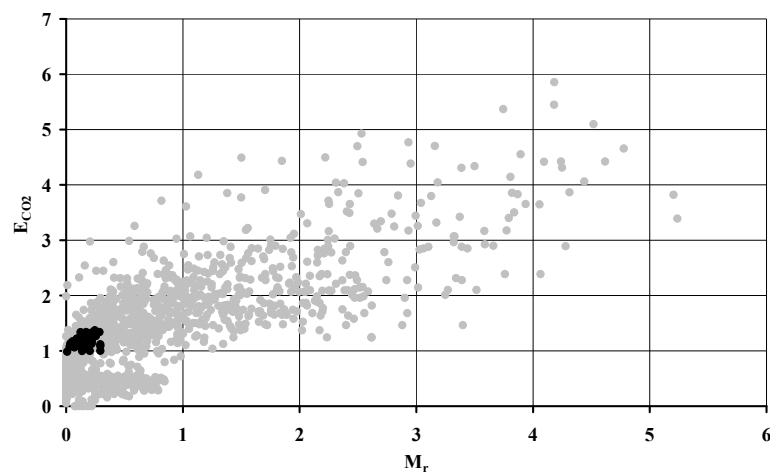
Rys. 6.55. Wykres natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} w dziedzinie momentu obrotowego silnika M_r , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście Autobahn



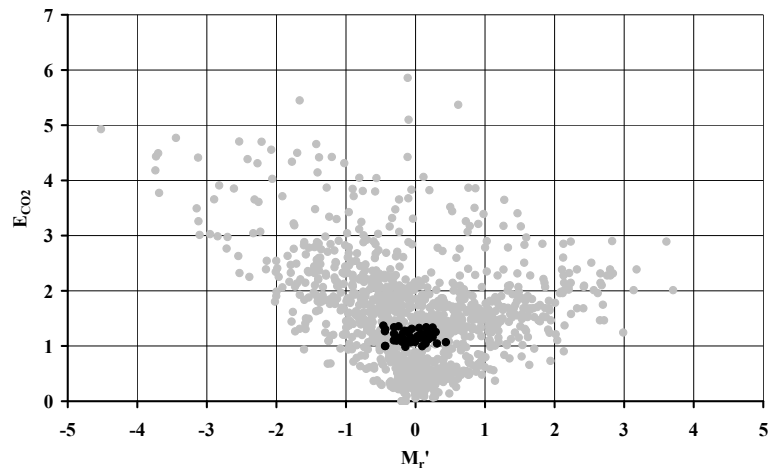
Rys. 6.56. Wykres natężenia emisji tlenu węgla E_{CO} w dziedzinie sterowania silnikiem s , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście Autobahn



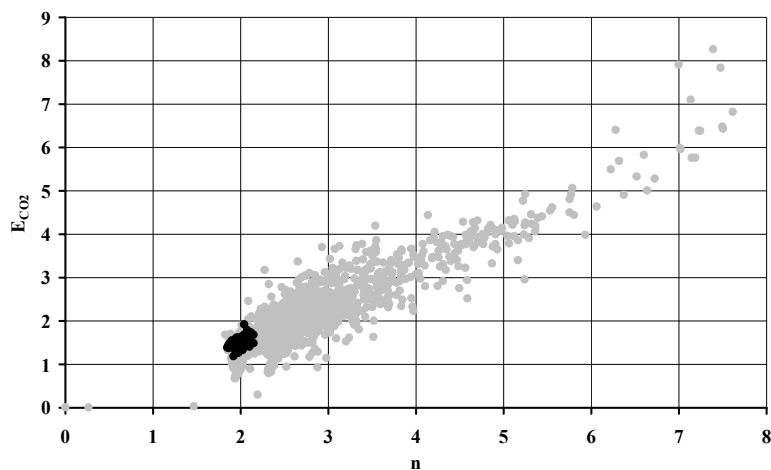
Rys. 6.57. Wykres natężenia emisji tlenu węgla E_{CO} w dziedzinie prędkości obrotowej silnika n , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście FTP-75



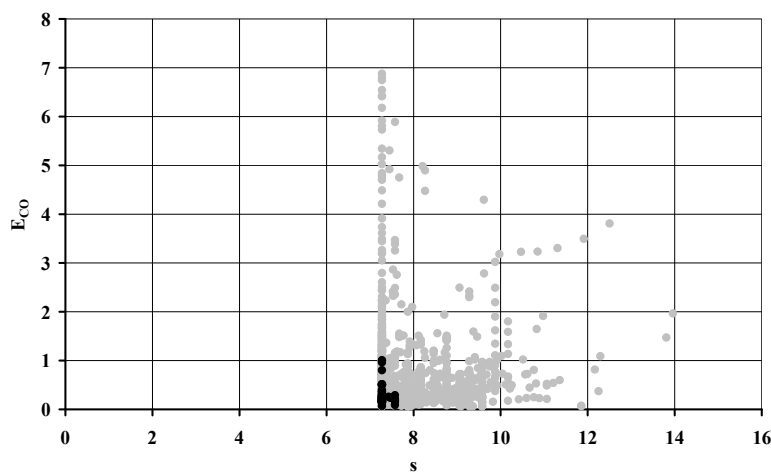
Rys. 6.58. Wykres natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} w dziedzinie momentu obrotowego silnika M_r , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście FTP-75



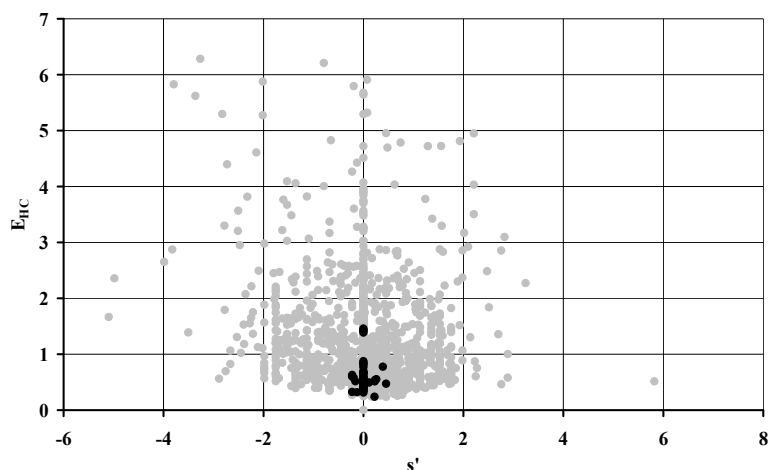
Rys. 6.59. Wykres natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} w dziedzinie pochodnej momentu obrotowego silnika M_r' , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście FTP-75



Rys. 6.60. Wykres natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} w dziedzinie prędkości obrotowej silnika n , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście Stop&Go



Rys. 6.61. Wykres natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} w dziedzinie sterowania silnikiem s , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście Stop&Go



Rys. 6.62. Wykres natężenia emisji węglowodorów E_{HC} w dziedzinie pochodnej sterowania silnikiem s' , dla wybranego zbioru stanów oraz dla wszystkich stanów pracy silnika, występujących w teście Stop&Go

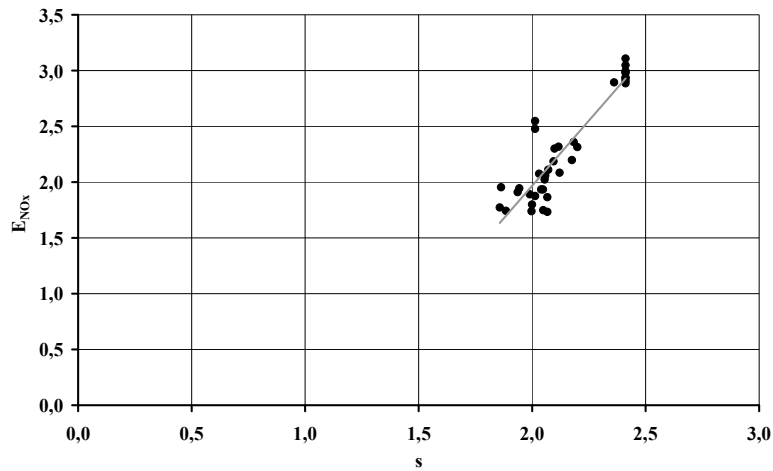
Powyższe przykłady pokazują, jak może kształtować się zbiór wartości wybranego parametru wyjściowego w danym zbiorze stanów w porównaniu ze wszystkimi stanami pracy. Zwykle da się zauważyć na wykresie zbiór punktów skoncentrowanych na stosunkowo niewielkim obszarze, na tle znacznie większej przestrzeni, wyznaczonej przez ogół występujących wartości.

Takie rozwiązanie może pomóc w ocenie użytkowych właściwości silnika spalinowego w wybranych stanach na podstawie ich porównania z właściwościami, występującymi we wszystkich stanach.

Wizualizacja zależności dla kilku sąsiadujących zbiorów stanów

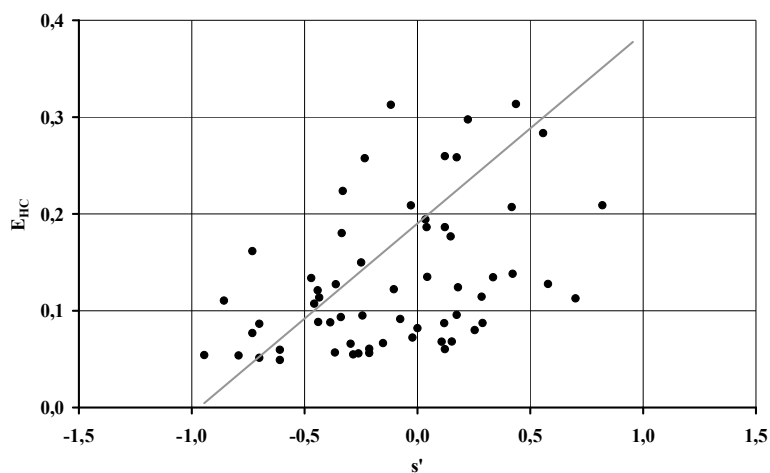
Zgodnie z propozycjami opisanymi w podrozdziale 4.5., dla pojedynczego zbioru stanów liczba wykresów, opisująca właściwości silnika w danym przypadku, jest równa iloczynowi parametrów wejściowych i wyjściowych. W przykładowym modelu, rozpatrywanym w tej pracy, liczba ta wynosi 30. Na rys. 6.63. – 6.67. zostaną przedstawione jedynie przykładowe wykresy, na których widoczne są pewne charakterystyczne cechy, warte omówienia.

Na rys. 6.63. widoczna jest stosunkowo wyraźna zależność, nadająca się do aproksymacji za pomocą funkcji liniowej. Jednoznaczne zależności pojawiają się często na tworzonych w ten sposób wykresach, choć nie zawsze są tak wyraźne.



Rys. 6.63. Wykres natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx} w dziedzinie sterowania silnikiem s dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących) w teście Autobahn

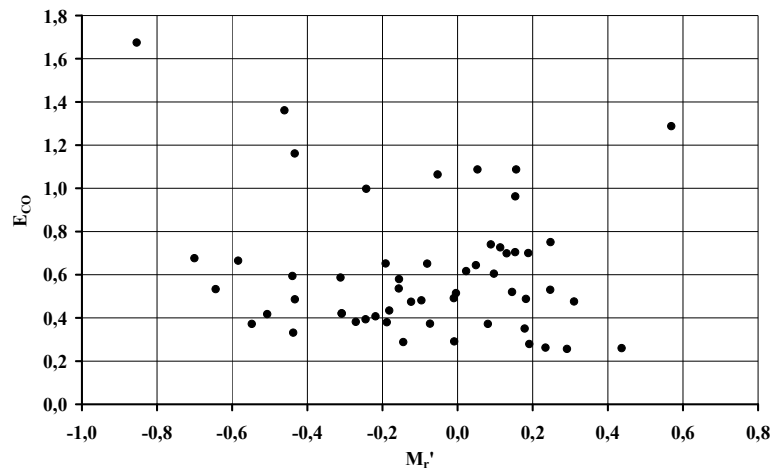
Na rys. 6.64. również widoczna jest zależność, jednak nie jest ona jednoznacznie określona. Przedstawiona przykładowa aproksymacja za pomocą wielomianu pierwszego stopnia może okazać się nie uzasadniona. Nie da się jednak zaprzeczyć, że w rozpatrywanym zbiorze stanów pracy silnika wartości natężenia emisji węglowodorów zależą od pochodnej sterowania silnikiem.



Rys. 6.64. Wykres natężenia emisji węglowodorów E_{HC} w dziedzinie pochodnej sterowania silnikiem s' dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących) w teście FTP-75

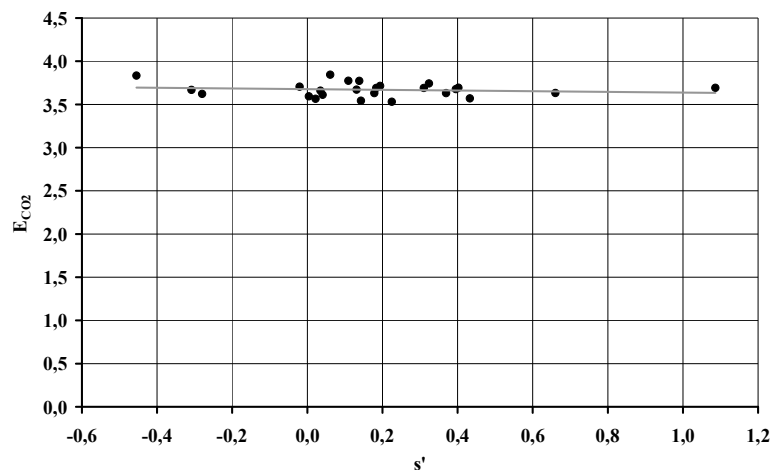
Istnieją również przypadki, w których trudno jest zauważyć jakkolwiek zależność pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami. Taka sytuacja została przedstawiona na rys. 6.65. Jednak może się okazać, że brak zależności (lub niejasna zależność) może występować tylko w kilku rozpatrywanych zbiorach stanów pracy silnika, a w innych powiązanie między tymi samymi wielkościami może być całkowicie klarowne. Wybór kilku sąsiadujących zbiorów stanów, różniących się tylko jednym parametrem, będącym dziedziną funkcji, narzuca bowiem określone więzy na wszystkie pozostałe parametry pracy silnika. Efektem tego może

być występowanie (lub brak występowania) danej zależności, podczas gdy dla innych więzów zależność ta będzie się przedstawiała zupełnie inaczej.



Rys. 6.65. Wykres natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} w dziedzinie pochodnej momentu obrotowego silnika M_s' dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących) w teście FTP-75

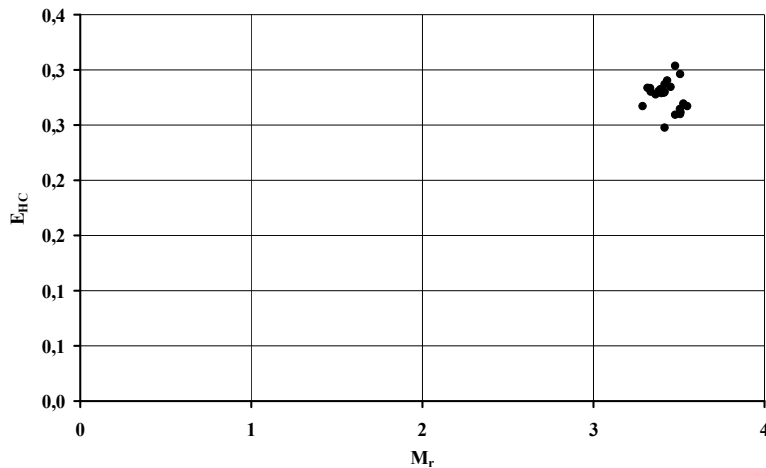
Na rys. 6.66. pokazano również dość często spotykany przypadek, kiedy wybrane zbiory stanów pracy silnika tworzą zależność w postaci funkcji stałej. Można w takiej sytuacji powiedzieć, że natężenie emisji dwutlenku węgla nie zależy od wartości pochodnej sterowania silnikiem. Z drugiej strony jednak funkcja stała jest również jednoznacznie określoną zależnością.



Rys. 6.66. Wykres natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO2} w dziedzinie pochodnej sterowania silnikiem s' dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących) w teście Autobahn

Ciekawy przypadek został zaprezentowany na rys. 6.67. Istniejące wartości, zamiast tworzyć zależność rozciągniętą w dziedzinie funkcji, są skupione niemal w jednym punkcie. Przyczyną tego zjawiska są narzucane więzy na wszystkie parametry wejściowe pracy silnika, z wyjątkiem parametru, stanowiącego dziedzinę funkcji. Może się okazać, że dla wybranych

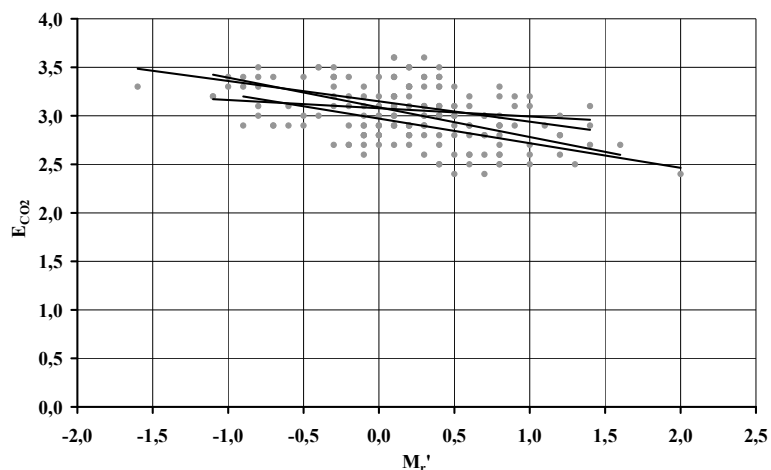
więzów parametr, stanowiący dziedzinę, występuje tylko w wąskim przedziale wartości. W efekcie, do tworzonej zależności zakwalifikuje się niewiele zbiorów. W szczególnym przypadku (jak tym na rys. 6.67.) może się zakwalifikować tylko jeden zbiór stanów i wszystkie wartości będą skupione na niewielkim obszarze.



Rys. 6.67. Wykres nateżenia emisji węglowodorów E_{HC} w dziedzinie momentu obrotowego silnika M_r dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących) w teście Autobahn

Na podstawie analizy wykresów sporządzanych dla odpowiadających sobie zbiorów stanów, występujących w różnych realizacjach poszczególnych testów można zauważyć relatywnie dużą powtarzalność zależności. Oznacza to, że ocena użytkowych właściwości silnika w wybranych stanach dynamicznych nie jest przypadkowa, ponieważ charakteryzuje się powtarzalnością w dziedzinie kolejnych realizacji testów, dla których proces obliczeniowy przebiegał niezależnie. Nie oznacza to oczywiście, że nie występują żadne rozbieżności pomiędzy wynikami obliczonymi na podstawie poszczególnych realizacji. Są to jednak różnice, które siłą rzeczy muszą wystąpić wszędzie tam, gdzie wśród badanych zjawisk występują również pewne zjawiska przypadkowe.

Dla zilustrowania omawianej powtarzalności na rys. 6.68. został przedstawiony wykres zależności nateżenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} od pochodnej momentu obrotowego silnika M_r' dla zbioru stanów, odpowiadających powolnemu przyspieszaniu podczas jazdy ze średnią prędkością.



Rys. 6.68. Wykres natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} w dziedzinie pochodnej momentu obrotowego M_r' dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących), wykonany dla wszystkich czterech realizacji testu Autobahn

Na powyższym wykresie widnieją cztery linie, będące aproksymacją zależności, sporządzonych dla czterech realizacji testu Autobahn. Rozbieżność pomiędzy położeniem owych linii reprezentuje typowy charakter rozbieżności, występujących często pomiędzy obliczeniami, prowadzonymi na podstawie różnych realizacji danego badania. Jakkolwiek różnice są widoczne, zachowany jest ogólny charakter funkcji (podstawowa zależność malejąca).

7. Podsumowanie wyników pracy

7.1. Ocena metody

Celem pracy było znalezienie rozwiązania kilku podstawowych problemów, jakie można spotkać podczas analizy zagadnień, związanych z pracą silnika spalinowego w stanach dynamicznych, aby na ich podstawie opracować metodę oceny użytkowych właściwości silnika w tych stanach.

W części teoretycznej pracy zostało omówionych pięć podstawowych problemów, a następnie zaproponowano ich rozwiązania. Przejście przez szereg tych pięciu zagadnień stanowi propozycję toku obliczeniowego, jakiemu można poddać wyniki badań silnika w stanach dynamicznych, aby umożliwić ocenę jego właściwości użytkowych.

W dalszej części pracy wykorzystano badania hamowniane silnika, aby zastosować prezentowaną metodę w praktyce i zweryfikować ją. Obliczenia dla każdego z trzech testów hamownianych zostały wykonane czterokrotnie – oddzielnie dla każdej realizacji testu. Dzięki temu możliwa była ocena powtarzalności wniosków, wyciąganych za pomocą prezentowanej metody.

Niewątpliwym utrudnieniem w pracy był brak badań, potrzebnych do precyzyjnego rozwiązania pierwszego z pięciu problemów. Na potrzeby pracy zastąpiono brakujące badania empiryczne obliczeniami teoretycznymi, które pozwoliły jedynie na przybliżone rozwiązanie tego zagadnienia. Pomimo tych niedogodności udało się wykonać przykładowe obliczenia, pozwalające na rozwiązanie pięciu podstawowych problemów analizy stanów dynamicznych pracy silnika, omówionych na początku pracy.

Ocena zgodności wniosków sformułowanych na poszczególnych etapach obliczeń z poszczególnych realizacji testów jest trudna, ponieważ same badania są obarczone pewną niepowtarzalnością, wynikającą ze zjawisk przypadkowych. Wydaje się jednak, że zaistniała względna zgodność wśród wyników obliczeń, prowadzonych dla poszczególnych realizacji testów, pozwala uznać prezentowane w pracy rozważania, jako uzasadnione.

7.2. Możliwości wykorzystania metody

Metoda obliczeniowa zaproponowana w pracy może służyć między innymi do:

- korekcji przesunięć fazowych w poszczególnych torach pomiarowych na stanowisku hamownianym,
- weryfikacji modelu pracy silnika, polegającej na doborze parametrów wejściowych i wyjściowych modelu, które będą uwzględniały istnienie powiązania pomiędzy nimi,
- wyboru warunków pracy silnika, w których stan pracy jest najbardziej interesujący (pod względem przyjętych kryteriów),
- oceny przyczyn zjawisk niepowtarzalności wyników pomiarów dla wybranego zbioru wyników,
- wizualizacji zależności, występujących pomiędzy parametrami modelu, opisanych w dziedzinie wielowymiarowej,
- oceny użytkowych właściwości silnika, pracującego w stanach dynamicznych.

Ogólnie, proponowana metoda pozwala na kompleksowe ujęcie zagadnienia pracy silnika spalinowego w stanach dynamicznych.

7.3. Propozycje dalszego rozwoju zagadnienia

Praca silnika spalinowego w stanach dynamicznych jest zagadnieniem bardzo obszernym, które należy wciąż poznawać. Warto również rozwijać narzędzia, pozwalające na bardziej świadome wykorzystanie zjawisk zachodzących wówczas w silniku. Jako pewną formę kontynuacji niniejszej rozprawy można zaproponować przykładowe kierunki dalszych badań.

- Porównanie występujących stanów pracy silnika podczas realizacji różnych testów. Takie rozważania mogłyby pomóc odpowiedzieć na pytanie, jak dobór testów wpływa na występowanie poszczególnych stanów pracy silnika i jakie jego cechy są faktycznie sprawdzane podczas różnych badań.
- Wyodrębnienie typowych zadań realizowanych przez silnik, charakteryzujących się występowaniem określonych stanów pracy. Przykładami takich zadań może być: gwałtowne przyspieszanie podczas jazdy z dużą prędkością, przy stałych oporach jazdy, albo zmiana oporów wynikająca z silnego powiewu wiatru podczas jazdy ze

stałą prędkością. Poszczególne zadania można by porównywać ze sobą na podstawie rozkładu występujących stanów pracy.

- Opracowanie testów dynamicznych na podstawie syntezy wybranych stanów pracy silnika. Mogłoby to pozwolić na przygotowywanie takich testów hamownianych, które sprawdzają właściwości użytkowe silnika w precyzyjnie dobranych, szczególnie interesujących dynamicznych warunkach jego pracy (na przykład w takich, w których zazwyczaj występuje największe natężenie emisji substancji zanieczyszczających w spalinach).

Piśmiennictwo

1. Armas O.: Diesel emissions from an emulsified fuel during engine transient operation, Paper No. 2008-01-2430, Wydawnictwo SAE 2008.
2. Arregle J., Bermudez V., Serrano J., Fuentes E.: Procedure for engine transient cycle emission testing in real time, *Experimental Thermal And Fluid Science*. 2006. Volume 30, no5. 485-496.
3. Bazari Z.: Diesel exhaust emissions prediction under transient operating conditions, Paper No. 2008-01-2430, Wydawnictwo SAE 2008.
4. Bermudez V., Lucjan J., Serrano J., Pla B.: Transient particle emission measurement with optical techniques, *Measurement Science and Technology* 2008 - 19 065404,
5. Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: *Silniki Samochodowe*, WK i Ł, Warszawa, 1988.
6. Bernhardt M., Kruczyński S.: *Praca silnika w warunkach nieustalonych*, *Technika Motoryzacyjna* nr 4, 1982.
7. Black J., Eastwood P. i inni: Diesel engine transient control and emissions response during a European extra-urban drive cycle (EUDC), Paper No. 2007-01-1938, Wydawnictwo SAE 2007.
8. Chłopek Z., Danilczyk W., Kruczyński S.: Analiza stanów pracy silnika w warunkach eksploatacji trakcyjnej, 23rd International Conference of Combustion Engines, *Journal of KONES* 1997.
9. Chłopek Z., Domański D.: Optymalizacja algorytmów sterowania silnika o zapłonie samoczynnym, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów / Politechnika Warszawska*, 2007, z. 3/66, s. 69-76.
10. Chłopek Z., Laskowski P.: Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczone metodą Monte Carlo, *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* Nr 1 (21)/2004. 3-13.
11. Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: Analiza dynamiczna emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej* 3(58)/2005, s. 95–102.

12. Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne, *Archiwum Motoryzacji*, Wydawnictwo Naukowe PTNM, 2005.
13. Chłopek Z., Rostkowski J.: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych, *Archiwum Motoryzacji* 3/2003.
14. Chłopek Z., Rostkowski J.: Testy dynamiczne do badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych, *The Sixth International Symposium „Combustion Engines in Military Applications”*, Jurata 2003.
15. Chłopek Z., Stasiak P.: The analysis of an unrepeatability of cylinder pressure signal in internal combustion engines. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* Nr1/2005 (120), s. 31-39.
16. Chłopek Z.: Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego, *Mechanics and Mechanical Engineering* 1/2005. Volume 9. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2005. 43–68.
17. Chłopek Z.: Analiza zanieczyszczeń z silników autobusowych w warunkach rzeczywistego użytkowania, *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 2003, vol. 10, 34.
18. Chłopek Z.: Ekologiczne skutki zasilania autobusów miejskich paliwem biogazowym, *XIX Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe Motoryzacyjne Problemy Ochrony Środowiska*, 2011.
19. Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie, *Archiwum Motoryzacji* 4/2010, s. 187-210.
20. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych, *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
21. Chłopek Z.: Niepowtarzalność emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego o zapłonie iskrowym, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 1–2/2004, s. 5-14.
22. Chłopek Z.: Statyczne testy badawcze silników spalinowych do symulacji testów dynamicznych, *KONES 2000. 26 Międzynarodowa Konferencja Silników Spalinowych*. Nałęczów 2000.

23. Chłopek Z.: Uwagi do badań silników spalinowych w stanach dynamicznych, *Silniki spalinowe* nr 4/2010.
24. Cichy M., Kropiwnicki J., Makowski S.: Model silnika spalinowego w formie grafów wiązań (GW), *Silniki Spalinowe* 2004 R. 43 nr 2 s. 40-47.
25. Cichy M.: Badania silników samochodowych w stanach nieustalonych za pomocą wymuszeń sygnałem zdeterminowanym, *ZNPG 32 Mechanika*. Gdańsk 1970.
26. Cichy M.: Model energetyczny systemu silnik - odbiornik w stanach nieustalonych, *Symposium „Modelowanie cyfrowe w technice samochodowej”*, Kazimierz Dolny, 1989.
27. Cichy M.: Nowe metody badawcze silników spalinowych i środki techniczne ich realizacji, grant badawczy KBN, 1995-1998.
28. Cichy M.: *Silniki o działaniu cyklicznym. Podstawy teorii i działania*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1989.
29. Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich, odnoszących się do działań, jakie mają zostać podjęte przeciwko emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych przez silniki o zapłonie samoczynnym stosowane w pojazdach oraz emisji zanieczyszczeń gazowych z silników o zapłonie wymuszonym, napędzanych gazem ziemnym lub skroplonym gazem ropopochodnym, stosowanych w pojazdach, oraz zmieniająca dyrektywę Rady 88/77/EWG.
30. Giakoumis E., Rakopoulos C.: Parametric study of transient turbocharged diesel engine operation from the second-law perspective, Paper No. 2004-01-1679, Wydawnictwo SAE 2004.
31. Giakoumis E.: Cylinder wall insulation effects on the first- and second law balances of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions, *Energy Conversion and Management* 48, Wydawnictwo Science Direct 2007.
32. He Y., Rutland C.: Neural cylinder model and its transient results, Paper No. 2003-01-3232, Wydawnictwo SAE 2003.
33. Head H., Wake J.: Noise of diesel engine under transient conditions, Paper No. 800404, Wydawnictwo SAE 1980.

34. Hountalas D., Kouremenos A.: Development of a fast and simple simulation model for the fuel injection system of diesel engines, Wydawnictwo Elsevier, Advances in Engineering Software Vol. 29, No. 1, 1998.
35. Jante A.: Spezifische Schnellaufzahlen, ATZ 24, 1933.
36. Jantos J., Mamala J.: Zużycie paliwa podczas ruchu samochodu ze zmienną prędkością, Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych, PAN oddział w Krakowie, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Kraków 1999, z.18 str.121-126, 1999.
37. Jantos J.: Zintegrowane sterowanie samochodowym, spalinowym układem napędowym o przełożeniu zmiennym w sposób ciągły, Studia i Monografie, z. 141, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2003.
38. Jarrier L., Champoussin J.: Warm-up of a D.I. diesel engine experiment and modeling, Paper No. 2000-01-0299, Wydawnictwo SAE 2000.
39. Kee R., Blair G.: Acceleration test method for a high performance two-stroke racing engine, Paper No. 942478, Wydawnictwo SAE 1994.
40. Kniaziewicz T., Piaseczny L., Zadrąg R.: Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej 1999 nr 2. 51-63.
41. Kropiwnicki J., Makowski S.: Wyznaczanie sygnału sterowania silnikiem dla zadanych parametrów ruchu pojazdu, Materiały konf. II Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy jakościowe, energetyczne i eksploatacyjne w maszynach cieplnych”, Bydgoszcz.
42. Kropiwnicki J.: Modeling of Reciprocating Engine Transient Torque, Materiały konf. Bałttiechmasz, Kaliningrad 20-23.06.2006.
43. Kropiwnicki J.: Wykorzystanie matematycznego modelu silnika w zadaniach optymalizacji sterowania układem napędowym pojazdu, Materiały konf. Konferencja Naukowa MECHANIKA 2005. Gdańsk, 4 luty 2005. s. 139-145.
44. Li J., Ming Z., Xihao L.: Individual cylinder control of diesel engines, Paper No. 2002-01-0199, Wydawnictwo SAE 2002.

45. Litak G., Kamiński T., Czarnigowski J., Żukowski D., Wendeker M.: Cycle-to-cycle oscillations of heat release in a spark ignition engine, Wydawnictwo Springer, Meccanica 42, 2007.
46. Longwic R.: Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych, Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
47. Longwic R.: Analiza wpływu mieszanin paliwa roślinnego z olejem napędowym na efektywność pracy silnika wysokoprężnego w warunkach nieustalonych, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1997.
48. Longwic R.: Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania, Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
49. Longwic R.: Cycle – to cycle variations of the parameters of the combustion process in the conditions of free running up of the diesel engine, Silniki Spalinowe, SC-092, 2009.
50. Longwic R.: Dynamic Aspects of Work of the Diesel Engine, Paper No. 2007-01-4210, Wydawnictwo SAE 2007.
51. Longwic R.: Modeling the Combustion Process in the Diesel Engine with the use of Neural Networks, Paper No. 2008-01-2446, Wydawnictwo SAE 2008.
52. Longwic R.: Modelowanie przebiegu średniego ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach rozpędzania z wykorzystaniem sieci neuronowych, Silniki Spalinowe 2007.
53. Lotko W., Longwic R., Górski K.: Analiza wybranych parametrów procesu spalania oleju napędowego w stanach nieustalonych pracy silnika spalinowego, Journal o KONES, Internal Combustion Engines, Vol. 7, No 1-2, 2000.
54. Lotko W., Longwic R., Górski K.: Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo – tert butylowym, Monografia, WNT 2010.
55. Lotko W., Longwic R.: Nieustalone stany pracy silnika zasilanego paliwem rzepakowym, Monografia, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, Radom 1999.

56. Lotko W.: Dynamiczne własności pracy silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego nowymi rodzajami paliw węglowodorowych, Politechnika Radomska 2003. ISBN 83-7351-136-9.
57. Łachwa A.: Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
58. Mamala J., Jantos J.: Charakterystyki eksploatacyjne silnika samochodowego, Journal of KONES Internal Combustion Engines 2005, vol. 12, 1-2.
59. Mamala J., Jantos J.: Odwzorowanie charakterystyk silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych, Zeszyt naukowy Politechniki Opolskiej, seria Mechanika, Opole 2005 (w druku), 2005.
60. Mamala J., Jantos J.: Stanowisko dynamiczne do badań układu pojazd - silnik techniką symulacji stanowiskowej, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna AUTOPROGRES'98, Jachranka 1998, ss. 19-27, 1998.
61. Mamala J., Jantos J.: Weryfikacja algorytmów sterowania samochodowym układem napędowym z wykorzystaniem sieci neuronowych, Badania symulacyjne w technice samochodowej, Lublin 2005.
62. Merkisz J.: Badanie emisji spalin pojazdu zasilanego gazem ziemnym w rzeczywistych warunkach ruchu, Silniki spalinowe, 2/2010, s. 56-65.
63. Miyamoto N., Ogawa H., Shibuya M., Fuwa N.: Time series analysis of diesel exhaust gas emissions under transient operation, Paper No. 930976, Wydawnictwo SAE 1993.
64. Nakayama S., Ibuki T., Hosaki H., Tominaga H.: An application of a model based combustion control to transient cycle-by-cycle diesel combustion, Paper No. 2008-01-1311, Wydawnictwo SAE 2008.
65. Narusawa K. i inni: An EGR control method for heavy-duty diesel engines under transient operations, Paper No. 900444, Wydawnictwo SAE 1990.
66. Nuzzkowski J., Thompson G.: The influence of accelerator pedal position control during transient laboratory testing on heavy duty diesel engine, Paper No. 2009-01-00619, Wydawnictwo SAE 2009.

67. Ogawa H., Miyamoto N., Reksowardojo I.: Cycle-to-cycle transient characteristics of exhaust gas emissions from a diesel engine with different increasing and decreasing load patterns, Paper No. 970750, Wydawnictwo SAE 1997.
68. Piętaś A.: Diagnostowanie silników o ZS na podstawie przebiegu procesu przejściowego, Monografia, Poznań, 1998.
69. PN-88/S-02005 Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Podstawowe parametry pracy.
70. Qiao J., Dent J., Garner C.: Diesel engine modeling under steady and transient conditions using a transputer based concurrent komputer, Paper No. 922226, Wydawnictwo SAE 1992.
71. Rakopoulos C., Giakoumis E.: Availability analysis of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions, Wydawnictwo Elsevier, Energy vol. 29, 2004.
72. Rakopoulos C., Giakoumis E.: Diesel Engine Transient Operation - Principles of Operation and Simulation Analysis, Wydawnictwo Springer 2009.
73. Rakopoulos C., Giakoumis E.: Review of thermodynamic diesel engine simulations under transient operating conditions, Paper No. 2006-01-0884, Wydawnictwo SAE 2006.
74. Rakopoulos C., Giakoumis E.: Simulation and analysis of a naturally aspirated IDI Diesel engine under transient conditions comprising the effect of various dynamic and thermodynamic parameters, Wydawnictwo Pergamon, Energy Convers. Mgmt vol. 39, No. 5/6, 1998.
75. Rakopoulos C., Giakoumis E.: Simulation and exergy analysis of transient diesel engine operation, Wydawnictwo Pergamon, Energy vol. 22, No. 9, 1997.
76. Resch T., Klarin B.: Analysis of engine dynamic under transient run-up conditions, Paper No. 2004-01-1454, Wydawnictwo SAE 2004.
77. Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń, pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji, dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów.

78. Rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 z dnia 18 lipca 2008 r., wykonujące i zmieniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń, pochodzących z lekkich pojazdów osobowych i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji, dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów.
79. Serrano J. i inni: Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation, Paper No. 2001-01-3262, Wydawnictwo SAE 2001.
80. Ubysz A.: Optymalizacja zużycia paliwa w samochodzie osobowym w ruchu na obszarze zabudowanym, IV Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej, Olsztyn 9-12.09.2008.
81. Ubysz A.: Sprawność efektywna silnika ZI samochodu osobowego w dynamicznych warunkach pracy, Diagnostyka, PTDT, nr 1(45)/2008.
82. Ubysz A.: Wyznaczanie kwazistacjonarnych warunków pracy silnika ZI w samochodzie, Czasopismo Techniczne M, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
83. Vachtsevanos G., Boukas T.: Modeling and control of transient engine conditions, Wydawnictwo SAE, 2001-01-3231, 2001.
84. Voos W.: Dynamic engine testing, Paper No. 920254, Wydawnictwo SAE 1992.
85. Wang J., Storey J., Domingo N., Huff S., Thomas J., West B.: Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle sizer., Aerosol Science and Technology. Volume 40, Issue 11. November 2006.
86. Wendeker M.: Dynamiczny model silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 1991.
87. Wijetunge R.: Dynamic behavior of a high-speed, direct injection diesel engine, Paper No. 1999-01-0829, Wydawnictwo SAE 1999.
88. Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999.