

POLITECHNIKA LUBELSKA

mgr inż. Dariusz Piernikarski

**Studium teoretyczno-eksperymentalne
zastosowania metod optoelektronicznych
do badań procesu spalania w silniku o zapłonie iskrowym**

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Jerzy Merkisz, prof. nadzw.

Lublin 1996

SPIS TREŚCI

Zestawienie ważniejszych oznaczeń	5
Rozdział 1	
Wprowadzenie, cele i tezy pracy	7
Rozdział 2	
Spalanie w silniku spalinowym	15
2.1. Fizykochemiczne podstawy procesu	17
2.2. Proces spalania jako element systemu eksploatacji	26
2.3. Diagnostyczne cechy przebiegu procesu spalania	29
2.4. Zjawiska promieniowania wewnątrz komory spalania	33
Rozdział 3	
Optyczne metody pomiarowe w badaniach procesu spalania	
w silniku o zapłonie iskrowym	37
3.1. Klasyczne metody optyczne	42
3.2. Metody laserowe	46
3.3. Metody wizyjne	53
3.4. Badanie spalania z wykorzystaniem sensorów światłowodowych	56
Rozdział 4	
Charakterystyka metrologiczna światłowodów	81
4.1. Budowa i podstawowe rodzaje światłowodów	81
4.2. Właściwości światłowodów	82
4.3. Światłowody jako elementy toru pomiarowego	84
Rozdział 5	
Badania doświadczalne	87
5.1. Cele badań	87
5.2. Obiekt badań	87
5.3. Hamownia silnikowa	88
5.4. Wyposażenie kontrolno-pomiarowe hamowni	93
5.5. Aparatura pomiarowa	96
5.6. Optoelektroniczny tor pomiarowy	100
5.6.1. Głowica pomiarowa	101
5.6.2. Światłowody transmisyjne	102
5.6.3. Złączki światłowodowe	103
5.6.4. Układy elektronicznego przetwarzania sygnału	105
5.7. Program badań	107

Rozdział 6

Opracowanie wyników badań	113
6.1. Archiwizacja danych pomiarowych	113
6.2. Matematyczna obróbka wyników.....	114
6.2.1. Program Faza_1	114
6.2.2. Program Faza_2.....	118
6.3. Analiza korelacji i regresji	119

Rozdział 7

Analiza wyników badań.....	123
7.1. Uwagi dotyczące budowy toru pomiarowego i realizacji pomiarów	123
7.2. Sygnał emisji optycznej jako źródło informacji diagnostycznej	124
7.3. Analiza otrzymanych wyników	126
7.3.1. Przebiegi czasowe	129
7.3.2. Charakterystyki wartości średnich.....	133
7.3.3. Charakterystyki zbiorcze	136
7.3.4. Charakterystyka sygnału emisji świetlnej.....	137
7.3.5. Wyniki uzupełniające	146

Rozdział 8

Spostrzeżenia i wnioski.....	149
8.1. Spostrzeżenia wynikające z przeglądu literatury.....	149
8.2. Spostrzeżenia wynikające z analizy otrzymanych wyników	152
8.3. Wnioski końcowe	153

Bibliografia	155
---------------------------	-----

Załącznik (dyskietka) – Zestawienie wyników pomiarów

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

α	– poziom ufności
α_p	– położenie katowe przepustnicy
α_z (az)	– kąt wyprzedzenia zapłonu
ε	– stopień sprężania
φ (fi)	– kąt obrotu wału korbowego
η_v	– współczynnik napełnienia
λ	– długość fali światła
λ (lambda)	– współczynnik składu mieszanki (lub lambda)
ρ	– gęstość powietrza
σ	– średnie odchylenie standardowe sygnału
A/F	– masowy stosunek powietrza do paliwa (Air-Fuel Ratio)
CO	– zawartość tlenku węgla w spalinach
dOPTmax	– maksymalny gradient sygnału optycznego
dpmax	– maksymalny gradient sygnału ciśnienia
fidOPTmax	– kąt wystąpienia maksymalnego gradientu sygnału optycznego
fidpmax	– kąt wystąpienia maksymalnego gradientu ciśnienia
fiOPTmax	– kąt wystąpienia wartości maksymalnej sygnału optycznego
fipmax	– kąt wystąpienia maksymalnego ciśnienia
G_e	– godzinowe zużycie paliwa
g_e	– jednostkowe zużycie paliwa
HC	– zawartość węglowodorów w spalinach
L_o	– stechiometryczny stosunek masowy powietrza do paliwa
M_o	– moment obrotowy
N	– liczba modów światłowodu
n	– prędkość obrotowa
N_e	– moc efektywna
NOx	– zawartość tlenków azotu w spalinach
OPT	– bieżąca wartość sygnału optycznego
OPTmax	– maksymalna wartość sygnału optycznego
p	– ciśnienie w cylindrze
p_d	– ciśnienie w kolektorze dolotowym
p_e	– średnie ciśnienie użyteczne
p_i	– średnie ciśnienie indykowane
p_{max}	– maksymalne ciśnienie w cylindrze

PoleOPT	– pole pod krzywą sygnału optycznego
Polep	– pole pod krzywą sygnału ciśnienia
q_c	– dawka paliwa wtryskiwana w 1 cyklu
R	– współczynnik korelacji
t	– czas
T_s	– temperatura spalin
T_{wtr}	– czas trwania wtrysku
V_{ss}	– objętość skokowa

Rozdział 1

WPROWADZENIE, CELE I TEZY PRACY

Ostatnie dwie dekady wykazały olbrzymie możliwości elektroniki stosowanej w technice motoryzacyjnej. Producenci samochodów przekonali się o zaletach i możliwościach elektroniki (także dzięki kalkulacjom czysto ekonomicznym) a użytkownicy nauczyli się doceniać liczne wygody płynące z zastosowania układów elektronicznych w swoich pojazdach. Rynek samochodowy po udanych próbach jest gotowy, aby „wchłonać” dużą ilość elektroniki pokładowej. Przynosi to pozytywne efekty w postaci zwiększenia niezawodności pojazdu, powstania konstrukcji doskonalszych i bezpieczniejszych, opracowania nowych metod diagnostyki i sterowania pozwalających na spełnienie stale zaostrzających się norm emisji toksycznych składników spalin przy jednoczesnym utrzymaniu względnie niskiego zużycia paliwa.

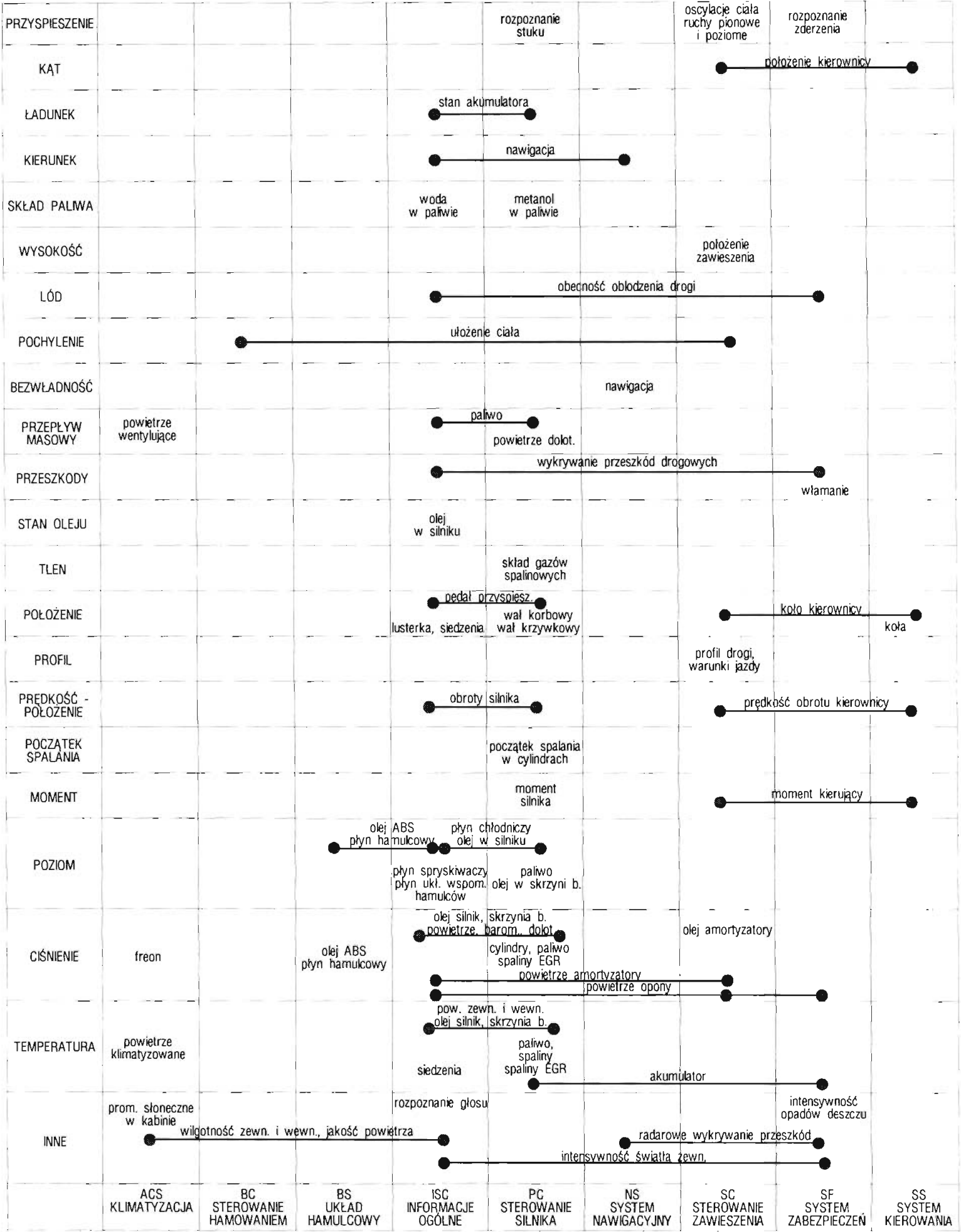
Niewątpliwie samochody konstruowane w najbliższej przyszłości będą sterowane przez układy mikroprocesorowe [58]. Komputery pokładowe, aby prawidłowo realizować swoje zadania, muszą otrzymywać różnorodne informacje z otoczenia systemu, zaś funkcje sterujące realizują za pomocą odpowiednich elementów wykonawczych. Każdy z komputerów pokładowych wymaga sygnałów przynajmniej od kilku czujników. W najbliższej przyszłości ilość różnych specjalizowanych układów mikroprocesorowych w samochodzie może dochodzić do 10-30. Oznacza to olbrzymią ilość czujników zbierających informacje, przekraczającą nawet 100 sztuk w pojeździe [10].

W tabeli 1.1 zestawiono najbardziej istotne czujniki stosowane w technice motoryzacyjnej wraz z określeniem wielkości mierzonych i obszaru ich zastosowania, przy czym największa ilość czujników związana jest z jednostką napędową – silnikiem spalinowym.

Czujniki zainstalowane w silniku spalinowym muszą funkcjonować w sposób powtarzalny i niezawodny w bardzo niekorzystnych warunkach pracy, w całym typowym okresie eksploatacji pojazdu (a więc minimum 150 tys. km). Są one narażone na zmienne temperatury, wysokie przyspieszenia wibracyjne, zakłócenia elektromagnetyczne i agresywne zanieczyszczenia: sól, płyny eksploatacyjne, pyły, wodę itp. [10, 15]

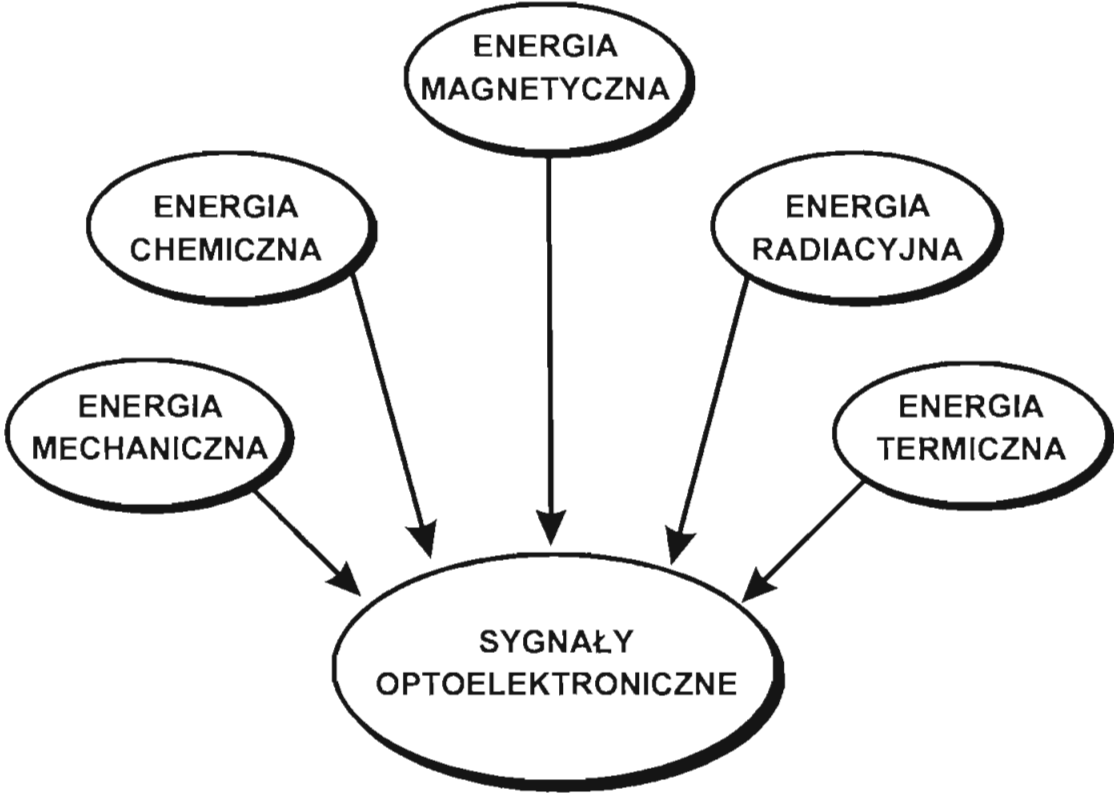
Biorąc pod uwagę wzrastającą liczbę instalowanych czujników, wyjątkowo trudne warunki pracy po zainstalowaniu w pojeździe (np. sonda lambda pracuje w temperaturach 600-900 °C), oraz rosnące wymagania dotyczące pracy całego systemu, konieczne jest opracowanie nowych typów czujników i metod dostarczania niezbędnych informacji, mogących zapewnić wystarczającą dokładność pomiaru, trwałych i tanich w konstrukcji i eksploatacji. Czujniki i metody wykorzystujące elementy optoelektroniczne, stosowane szeroko np. w telekomunikacji czy medycynie, stanowią jeden z aktualnych kierunków rozwoju motoryzacyjnych systemów gromadzenia i przetwarzania informacji [74].

Tabela 1.1. Zastosowanie czujników w motoryzacji



Pierwsze doniesienia o próbach wykorzystania optoelektroniki w motoryzacji pojawiły się w prasie fachowej w drugiej połowie lat osiemdziesiątych, tak więc jest to temat stosunkowo nowy i pozostaje nadal w fazie intensywnych badań. Czujniki światłowodowe posiadają wiele cech, umożliwiających ich szerokie zastosowanie w motoryzacji. Szczególnie na uwagę zasługuje ich uniwersalność, pozwalająca na odbiór i przetwarzanie wielu rodzajów energii

(rys. 1.1). Innym, ważnym powodem stosowania jest jednocześnie połączenie w jednym czujniku elementu pomiarowego i transmisyjnego.



Rysunek 1.1. Rodzaje energii możliwe do przetworzenia w czujniku pomiarowym na sygnał optoelektroniczny

Oczekuje się, że czujniki światłowodowe pozwolą na udoskonalenie systemów elektronicznych działających w pojazdach, zwłaszcza że we wszystkich tych systemach właśnie czujniki i metody pomiarowe decydują o ich jakości. Wykorzystanie sensorów światłowodowych w pojazdach narzuca na ich konstrukcję szereg specyficznych ograniczeń i wymagań. Przede wszystkim jest to wymóg wysokiej jakości i zdolności do pracy w trudnych warunkach przy minimum koniecznej obsługi oraz możliwie niski koszt wytworzenia.

Większość projektowanych sensorów to konstrukcje alternatywne w stosunku do bardziej konwencjonalnych technik pomiarowych i jako takie muszą równorzędnie współzawodniczyć z dobrze sprawdzonymi czujnikami do pomiarów ciśnień, przemieszczeń itp. Oznacza to, że muszą charakteryzować się niższym kosztem wytworzenia lub/i zaawansowaniem technicznym w stosunku do czujnika, który mają zastąpić. W niektórych przypadkach metody optyczne pozwalają na wykonanie unikatowych lub bardziej dokładnych pomiarów, niemożliwych do uzyskania innymi sposobami.

Podstawowe obszary motoryzacyjnych zastosowań czujników światłowodowych to diagnostyka i sterowanie silnikiem, układy hamulcowe i zawieszenia, oraz projekty bardziej zaawansowane, jak systemy unikania kolizji i systemy nawigacyjne [15]. W dziedzinie badań i diagnostyki silników spalinowych metody optoelektroniczne stosowane są przede wszystkim w aplikacjach związanych ze sterowaniem procesem roboczym. Typowe zastosowania to pomiar ciśnienia, wzniosu iglicy wtryskiwacza, rejestracja emisji optycznej z komory spalania, wykrywanie spalania stukowego i wypadania zapłonów.

Sterowanie przebiegiem procesu roboczego. Obecne i przyszłe przepisy regulujące emisję spalin wymuszają precyzyjną kontrolę parametrów pracy silnika. W systemach sterowania w pętli otwartej takie wielkości, jak kąt położenia przepustnicy, ciśnienie w kolektorze dolotowym i prędkość obrotowa, są wykorzystywane jako sygnały wejściowe, pozwalające na odśzukanie – w oparciu predefiniowaną mapę – optymalnego kąta wyprzedzenia zapłonu i dawki paliwa.

Konieczność utrzymania określonego poziomu emisji składników toksycznych i prawidłowego przebiegu spalania powoduje, że w przypadku systemów sterowania w pętli zamkniętej bazujących na złożonych procedurach wyznaczania wartości sterujących, realizujących wieloparametrową optymalizację pracy silnika, musi istnieć sprzężenie zwrotne, umożliwiające poprawną regulację składu mieszanki i kąta wyprzedzenia zapłonu. Katalizator funkcjonuje najkorzystniej, gdy spalana jest mieszanka o składzie stechiometrycznym ($\lambda = 1 \pm 0,005$), natomiast zbyt duży kąt wyprzedzenia zapłonu powodować może spalanie stukowe. Spalanie mieszanek ubogich, dające niski poziom emisji toksycznych składników spalin, związane jest z niebezpieczeństwem wypadania zapłonów. Aby odpowiednio wcześnie reagować na zmiany przebiegu procesu roboczego, niezbędna jest obecność szybkich i dokładnych układów pomiarowych.

Hamulce i zawieszenie. Zaawansowane systemy kontroli hamowania i zawieszenia pojazdu wykorzystują sensory światłowodowe do pomiaru takich wielkości, jak ciśnienie, przemieszczenie liniowe, przyspieszenie. Umożliwia to zastosowanie mechanizmów zapobiegających blokowaniu kół w trakcie hamowania i zawieszeń aktywnych, zwiększających przyczepność pojazdu i komfort jazdy.

Nawigacja i systemy antykolizyjne. W samochodzie przyszłości stosowane będą systemy nawigacyjne pozwalające na planowanie trasy lub dające informacje dotyczące warunków drogowych i utrudnień w przejazdach. Systemy takie mogą być oparte na już istniejącej infrastrukturze, otrzymując sygnały z zewnątrz lub być całkiem autonomiczne.

Całkowicie autonomiczny system nawigacyjny musi posiadać mapy drogowe oraz urządzenia pozwalające na dokładne określenie położenia pojazdu, aby móc informować kierowcę, bez konieczności odwoływania się do zewnętrznych źródeł informacji. Sensory optyczne, takie jak sensory prędkości względem podłoża i żyroskopy światłowodowe, są konkurencyjną alternatywą dla czujników konwencjonalnych takich jak czujniki prędkości koła i kompasy magnetyczne.

Żyroskopy światłowodowe są nie tylko użyteczne w systemach nawigacyjnych, ale i w układach hamulcowych i zawieszeniach, mierząc między innymi wielkości pozwalające na określenie toczenia, poślizgu i ugięcia. Obecnie dostępne żyroskopy światłowodowe są drogie, głównie dlatego, że powstały jako zastosowania w technice kosmicznej. Redukcja kosztów i produkcja masowa są dwoma głównymi czynnikami decydującymi o zastosowaniu w technice motoryzacyjnej. W systemach antykolizyjnych czujniki obrazu „widzące” przestrzeń przed pojazdem, połączone z systemem przetwarzania obrazów, mogą zapewnić automatyczną identyfikację przeszkód.

Reasumując można stwierdzić, że nowe metody badawcze wykorzystujące elementy optoelektroniczne coraz częściej brane są przez konstruktorów pod uwagę jako alternatywne źródła informacji. Dotyczy to zwłaszcza zastosowań związanych z diagnostyką i sterowaniem silników spalinowych, gdzie zastosowanie czujników optycznych otwiera nowe możliwości pomiarowe.

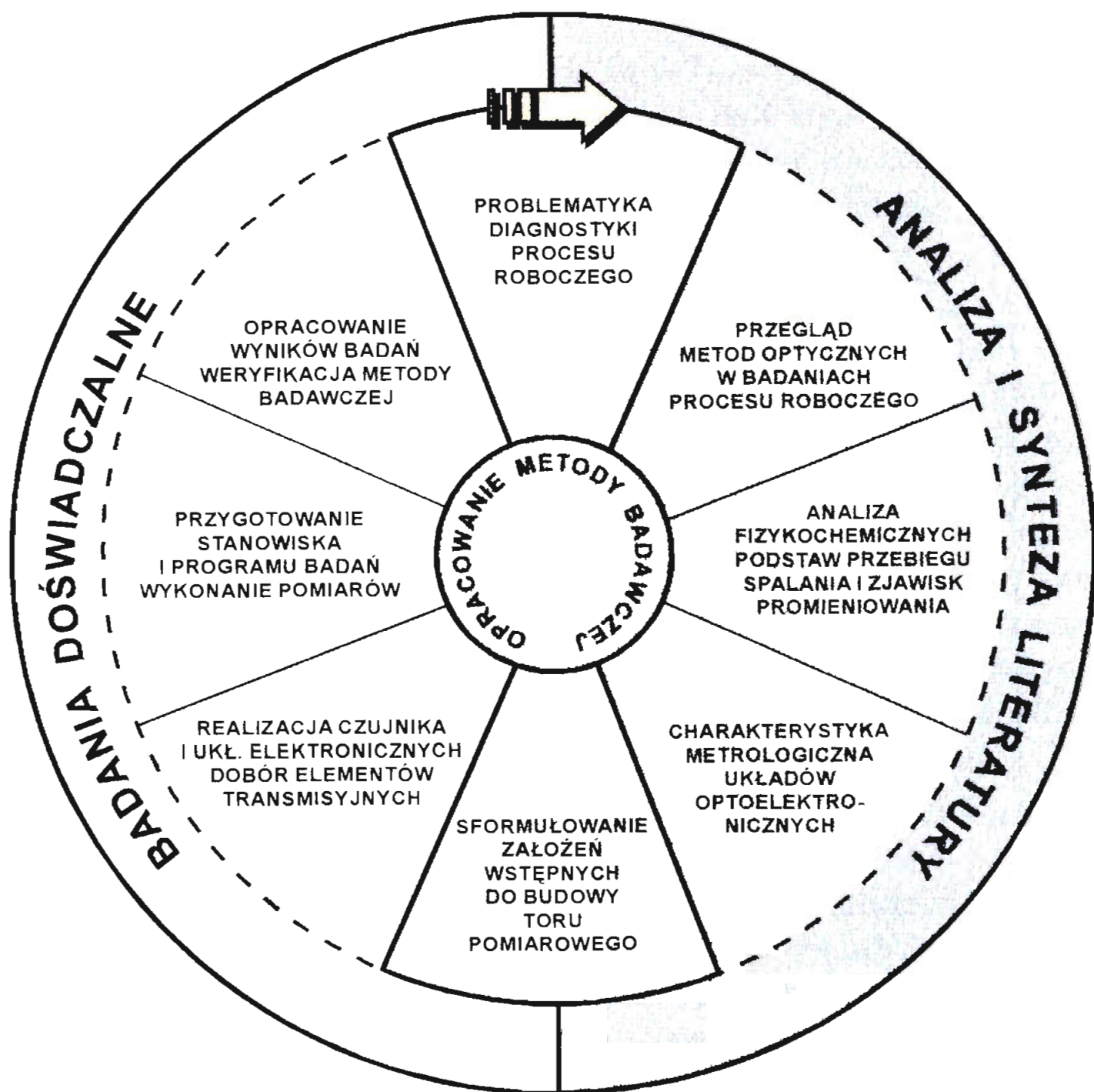
Autor, kierując się wynikami badań dostępnych w literaturze, postanowił podjąć próbę bezpośredniego zastosowania optoelektroniki na krajowym gruncie motoryzacyjnym, zwłaszcza że jak dotąd na rynku polskim nie zanotowano prób związanych z wykorzystaniem czujników optycznych do badań procesu roboczego silników o zapłonie iskrowym, a więc jednostek napędowych najczęściej stosowanych w pojazdach osobowych. Dodatkowy impuls stanowiły słowa zachęty i pomoc w przygotowaniu czujników ze strony pracowników Pracowni Technologii Światłowodów Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie oraz Katedry Elektroniki Politechniki Lubelskiej.

Główne cele pracy to:

- 1. Analiza teoretyczna możliwości zastosowania metod optoelektronicznych w badaniach procesu roboczego silników o zapłonie iskrowym.**
- 2. Przygotowanie w oparciu o aktualny stan wiedzy założeń dotyczących budowy i wykonanie optoelektronicznego toru pomiarowego służącego do obserwacji przebiegu procesu spalania w silniku o zapłonie iskrowym.**
- 3. Ocena przydatności sygnału emisji optycznej z komory spalania jako sygnału diagnostycznego, zwłaszcza w aspekcie wykrywania wypadania zapłonów.**
- 4. Metrologiczna weryfikacja przydatności zastosowanej metody do obserwacji procesu spalania.**

Wysunięto przy tym następujące tezy badawcze:

- 1. Sygnały z czujników światłowodowych dostarczają informacji o przebiegu procesu roboczego: składzie mieszanki, początku spalania, wystąpieniu spalania stukowego i braku spalania (wypadaniu zapłonów).**
- 2. Sygnał emisji świetlnej z komory spalania silnika posiada cechy właściwe sygnałom diagnostycznym.**
- 3. Istnieje istotna korelacja pomiędzy parametrami sygnału emisji optycznej z wielkościami umożliwiającymi budowę charakterystyk silnika.**
- 4. Metoda badawcza wykorzystująca optoelektroniczne elementy pomiarowe jest alternatywnym sposobem obserwacji i diagnostyki procesu spalania, zwłaszcza jako narzędzie do wykrywania wypadania zapłonów.**



Rysunek 1.2. Schematyczne ujęcie zakresu pracy

Na rysunku 1.2 przedstawiono kolejne działania prowadzące do realizacji głównego zamierzenia, jakim było opracowanie optoelektronicznej metody badawczej. Autor, podejmując problematykę diagnozowania procesu roboczego, skoncentrował się na metodach optycznych w badaniach procesu spalania.

Dalsze prace teoretyczne wymagały analizy fizykochemicznych podstaw procesu oraz dokonania charakterystyki metrologicznej układów optoelektronicznych. Przeprowadzone studium teoretyczne pozwoliło na zebranie rozproszonych wiadomości i twórczą syntezę uzyskanej wiedzy, prowadzącą do sformułowania założeń wstępnych dotyczących budowy toru pomiarowego.

Następnie rozpoczęto prace związane z badaniami doświadczalnymi. Wykonane zostały elementy toru pomiarowego, przygotowano stanowisko i opracowano program badań. Analiza wyników pomiarów i uzyskane wnioski pozwoliły na weryfikację postawionych na wstępie tez i ocenę realizacji założonych celów.

Poniżej w sposób skrócony zostanie scharakteryzowana tematyka poszczególnych rozdziałów niniejszego opracowania.

Rozdział 2 zawiera niezbędny do dalszych rozważań opis procesu spalania w silniku o zapłonie iskrowym. Scharakteryzowano fizykochemiczne podstawy procesu oraz spalanie jako element systemu eksploatacji pojazdu, wytypowano także diagnostyczne cechy przebiegu procesu.

W rozdziale 3 dokonano przeglądu różnych optycznych metod pomiarowych wykorzystywanych do badań procesu roboczego w silniku o zapłonie iskrowym, koncentrując się na metodach wykorzystujących techniki optoelektroniczne.

W rozdziale 4 scharakteryzowano możliwości metrologiczne włókien światłowodowych, omawiając ich budowę, podstawowe rodzaje oraz właściwości.

Rozdział 5 rozpoczyna eksperymentalną część pracy. Opisano w nim cele, obiekt badań, scharakteryzowano konstrukcję hamowni silnikowej oraz jej wyposażenie kontrolno-pomiarowe. Dokonano także zestawienia zastosowanej aparatury pomiarowej, opisano opracowany optoelektroniczny tor pomiarowy i przyjęty program badań.

Sposób opracowania wyników badań hamownianych omówiono w rozdziale 6, uwzględniając archiwizację danych, matematyczną obróbkę wyników oraz analizę korelacji i regresji – narzędzi stosowanych w opracowaniu wyników badań.

Rozdział 7 jest analizą wyników badań, obejmującą spostrzeżenia dotyczące toru pomiarowego i realizacji pomiarów, ocenę sygnału optycznego jako sygnału diagnostycznego oraz analizę wyników pomiarów.

W rozdziale 8 zawarto spostrzeżenia wynikające z analizy stanu wiedzy i analizy wyników pomiarów oraz wnioski dotyczące celów i tez postawionych we wstępie pracy.

Pracę zamyka bibliografia oraz załącznik (dyskietka), w którym umieszczono pełne zestawienie wyznaczonych wartości średnich parametrów sygnału optycznego.

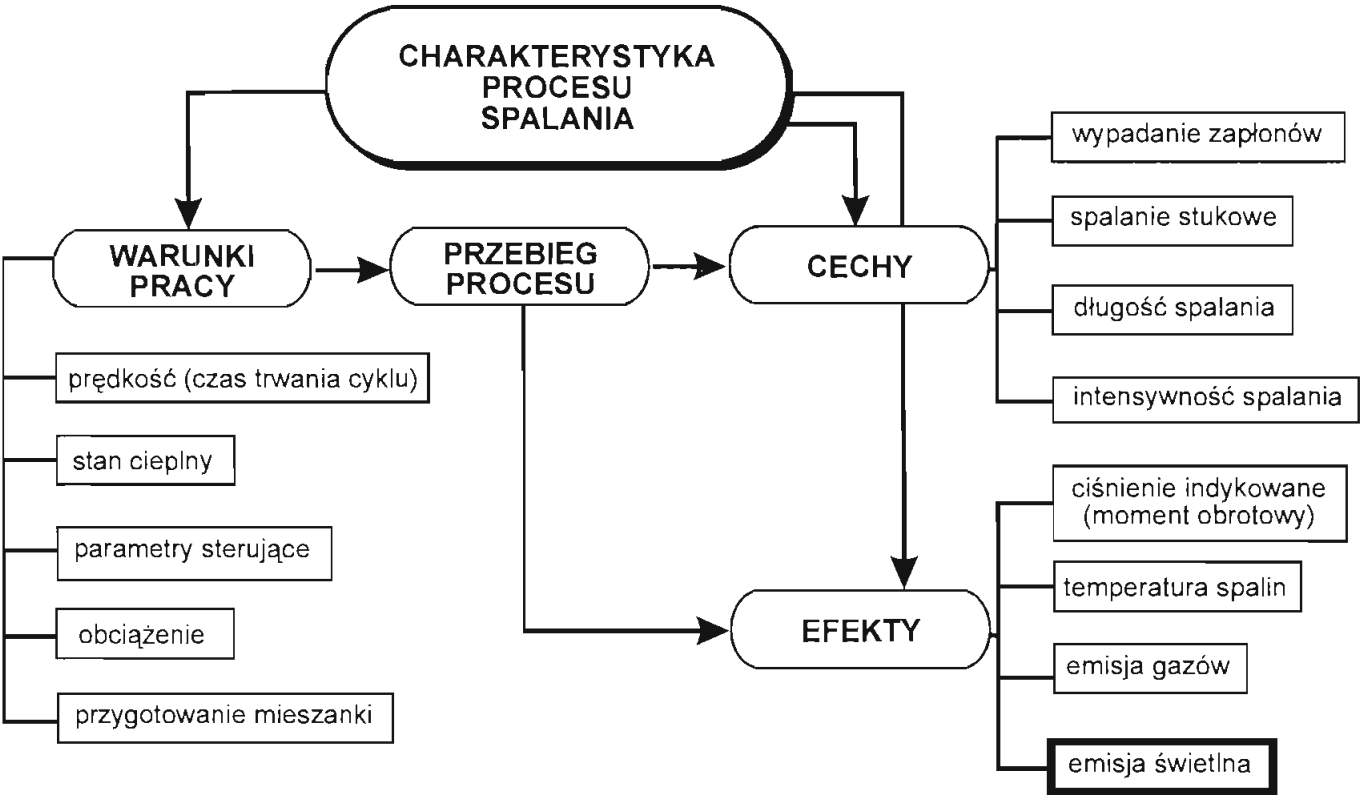
Rozdział 2

SPALANIE W SILNIKU SPALINOWYM

Głównym zadaniem trakcyjnego silnika spalinowego umieszczonego w pojeździe jest wytworzenie odpowiedniego strumienia energii, pozwalającego na uzyskanie zamierzonej przez kierującego prędkości. Oznacza to, że moment obrotowy rozwijany przez silnik musi zrównoważyć opory ruchu pojazdu, a prędkość obrotowa silnika, przy określonym przełożeniu w układzie napędowym, powinna odpowiadać założonej prędkości jazdy.

Silnik spalinowy jest złożonym obiektem technicznym, zarówno pod względem konstrukcyjnym, jak i funkcjonalnym. Użytkowanie silnika związane jest z równoczesnym przebiegiem wielu, wzajemnie na siebie wpływających procesów, z których za kluczowy, z punktu widzenia realizacji głównego celu użytkowania silnika, należy uznać proces roboczy, a zwłaszcza przebieg spalania.

W wyniku oddziaływania na silnik wielu wewnętrznych i zewnętrznych czynników wymuszających, zwanych ogólnie obciążeniami, stan silnika ulega zmianie. Niekontrolowany proces zmian prowadzi do dezorganizacji uporządkowanego systemu eksploatacji. Znając pozytywne i negatywne efekty działania silnika spalinowego, należy wytypować parametry i wskaźniki, które mogą stanowić podstawę do oceny przebiegu procesu roboczego. Na rysunku 2.1 przedstawiono charakterystykę przebiegu procesu spalania, zaproponowano także określające go najważniejsze wielkości wejściowe i wyjściowe.

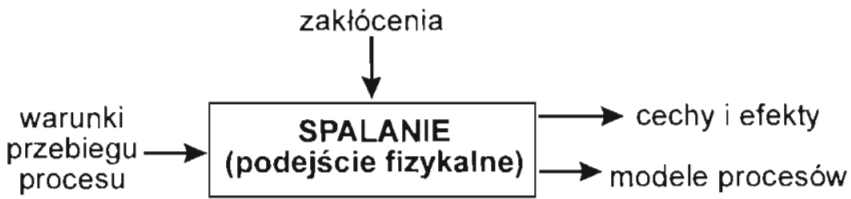


Rysunek 2.1. Charakterystyka procesu spalania



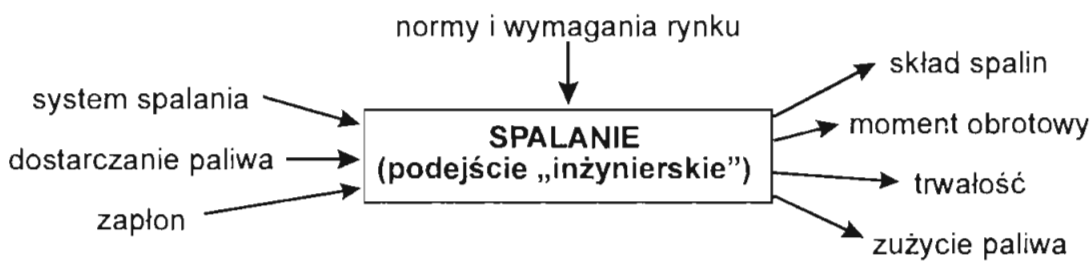
Omawiana w pracy metoda badawcza, polegająca na pomiarze promieniowania widzialnego emitowanego w trakcie spalania paliwa, jest bezpośrednią metodą pozwalającą na scharakteryzowanie przebiegu procesu roboczego.

Dążąc do optymalizacji przebiegu procesu spalania w trakcie użytkowania silnika konieczne jest dokonanie jego analizy w trzech płaszczyznach:



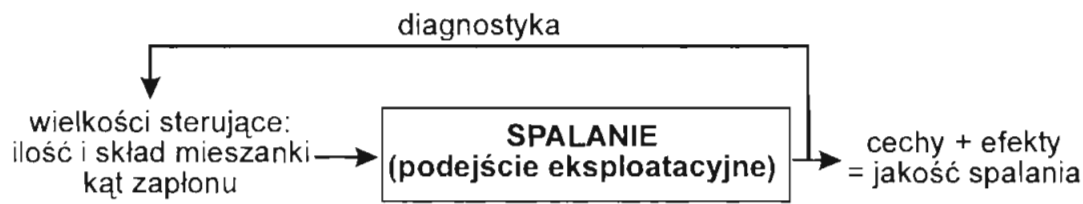
Rysunek 2.2. Fizykalne podejście do analizy procesu spalania

I. Analiza fizykochemiczna zjawisk zachodzących w trakcie trwania procesu, poznanie związków przyczynowo-skutkowych (rys. 2.2).



Rysunek 2.3. Analiza procesu spalania na etapie projektowania konstrukcji

II. Opracowanie konstrukcyjne uwzględniające aktualnie obowiązujące normy (np. toksyczności spalin, dopuszczalnego poziomu hałasu), wymagania rynku, dotyczące między innymi niezawodności, trwałości, kosztów wytworzenia i użytkowania (rys. 2.3).



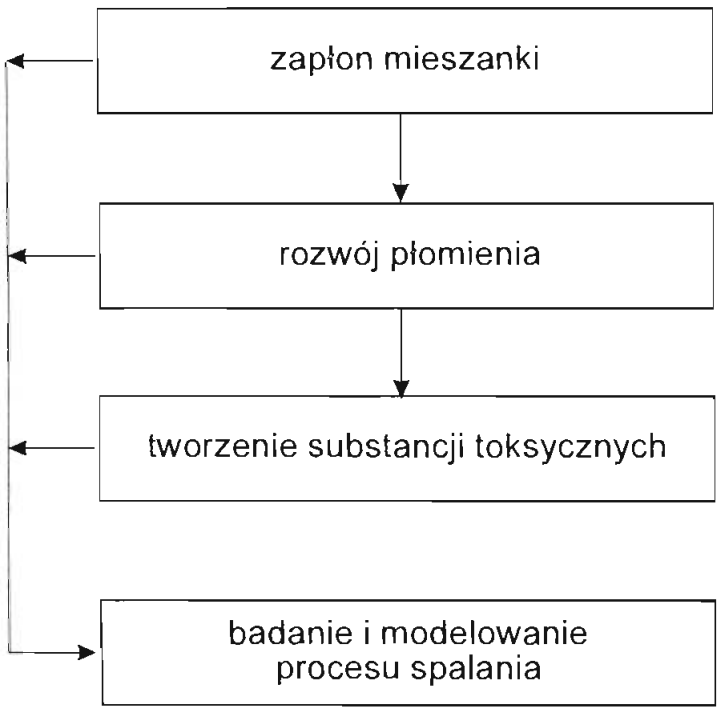
Rysunek 2.4. Analiza procesu spalania pod kątem sterowania i diagnostyki

III. Ocena przebiegu procesu z punktu widzenia jego sterowania (określenie wskaźników jakości procesu, wielkości sterujących jego przebiegiem) oraz diagnostyki (wyznaczenie najbardziej istotnych parametrów i metod diagnostycznych) (rys. 2.4).

Biorąc pod uwagę realizację celu pracy, jakim jest wdrożenie nowej metody badawczej, rozważania dotyczące procesu spalania koncentrować się powinny wokół tematów związanych z zaproponowaną grupą zagadnień eksploatacyjnych, a więc przede wszystkim dotyczących sterowania i diagnostyki procesu roboczego. Niemniej, celowe wydaje się także ogólne scharakteryzowanie procesu od strony opisu fizykalnego.

2.1. FIZYKOCHEMICZNE PODSTAWY PROCESU

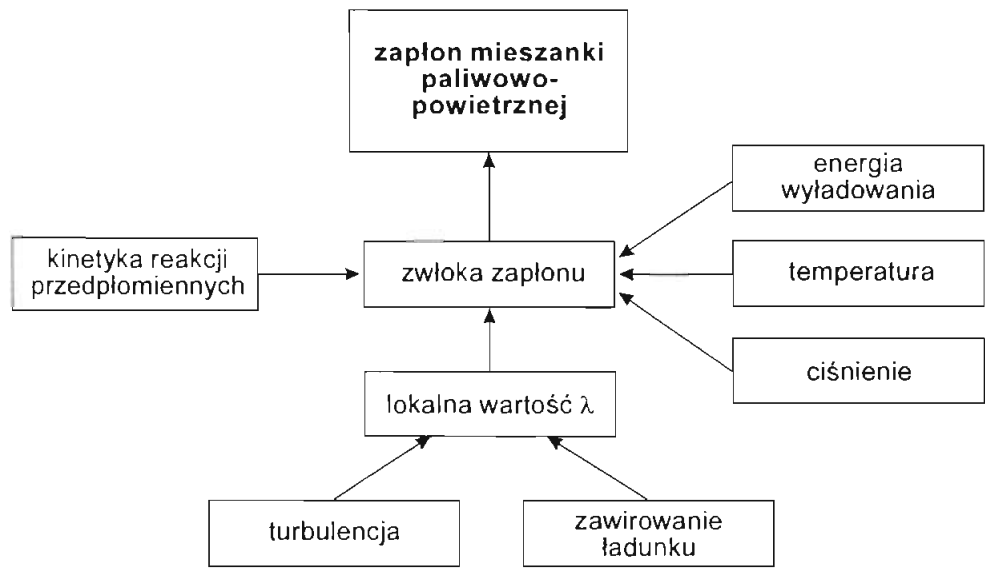
Spalanie paliw węglowodorowych jest złożonym procesem fizykochemicznym. Jest to utlenianie z intensywnym wydzielaniem ciepła, które może być opisywane przez szereg parametrów charakterystycznych, ujmowanych w sposób statyczny lub kinetyczny. Ujęcie statyczne polega na określaniu parametrów przed i po zakończeniu procesu spalania i jest typowym podejściem bilansowym (bilans masy i energii). Ujęcie kinetyczne uwzględnia zmienność tych parametrów w czasie trwania procesu.



Aby skutecznie opisać całość procesu spalania, konieczne jest jego rozbiecie na poszczególne fazy. Rysunek 2.5 przedstawia schemat wyodrębniający w procesie spalania trzy etapy pośrednie – najbardziej istotne fazy po dostarczeniu do cylindra mieszanki paliwowo-powietrznej o określonych właściwościach. Są to: zapłon mieszanki, rozwój płomienia i tworzenie substancji toksycznych. Taki podział umożliwia poprawne badanie i modelowanie zachodzących zjawisk [39, 52].

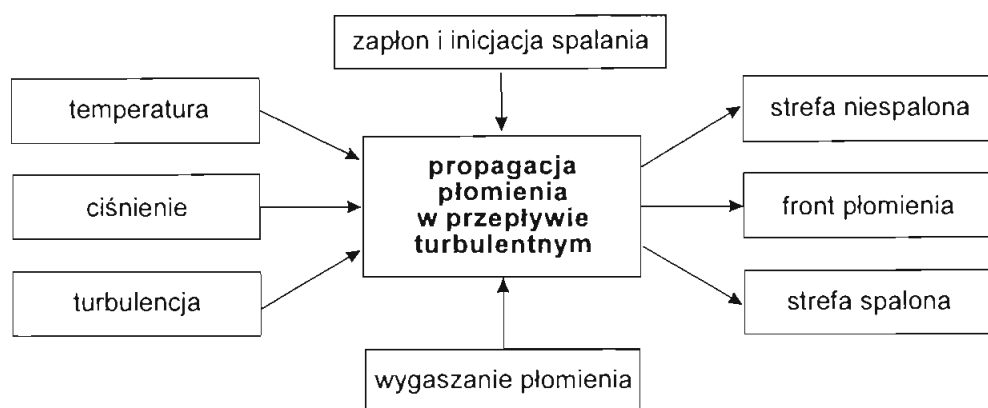
Rysunek 2.5. Fazy w modelowaniu procesu spalania

Schematy przedstawione na rysunkach 2.6, 2.7 i 2.8 przedstawiają uproszczoną analizę teoretyczną poszczególnych faz procesu spalania, z uwzględnieniem wybranych czynników wpływających na ich przebieg oraz wyodrębnionych związków przyczynowo-skutkowych.

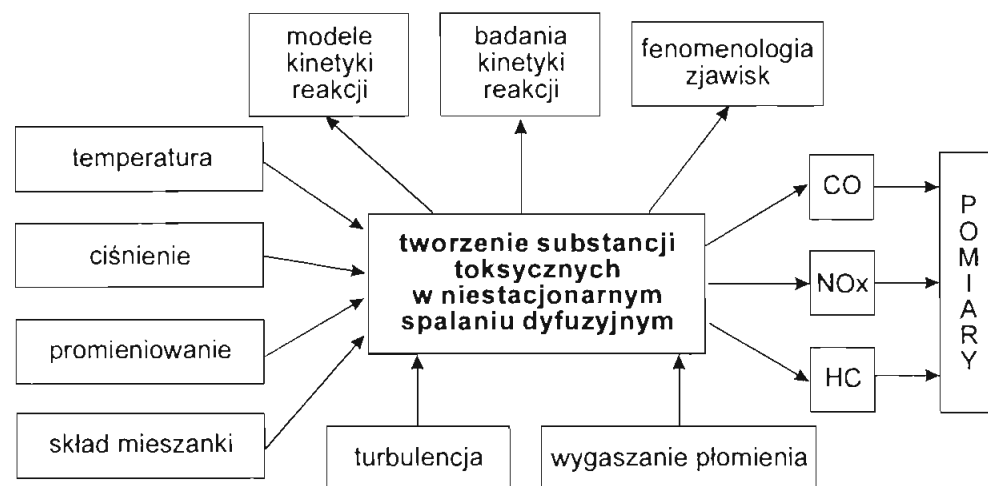


Rysunek 2.6. Czynniki prowadzące do zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej

Schemat na rysunku 2.6 ujmuje wzajemne powiązania pomiędzy zjawiskami kinetycznymi reakcji przedpłomiennych, czynnikami zewnętrznymi wpływającymi na okres zwłoki zapłonu (ciśnienie, temperatura) a parametrami mieszanki paliwowo-powietrznej. Z punktu widzenia wpływu na cechy badanego sygnału optycznego, najbardziej istotnym parametrem jest wartość współczynnika składu mieszanki λ .



Rysunek 2.7. Spalanie i rozwój płomienia w ujęciu modelowym



Rysunek 2.8. Czynniki warunkujące tworzenie substancji toksycznych

Na rysunku 2.7 pokazano typowe ujęcie stosowane w modelowaniu matematycznym rozwoju płomienia z uwzględnieniem trzech stref w komorze spalania (strefa nie spalanej mieszanki, strefa frontu płomienia, strefa spalin) [4, 49] i zjawisk wygaszania płomienia przy ściankach (efekt przyścienny).

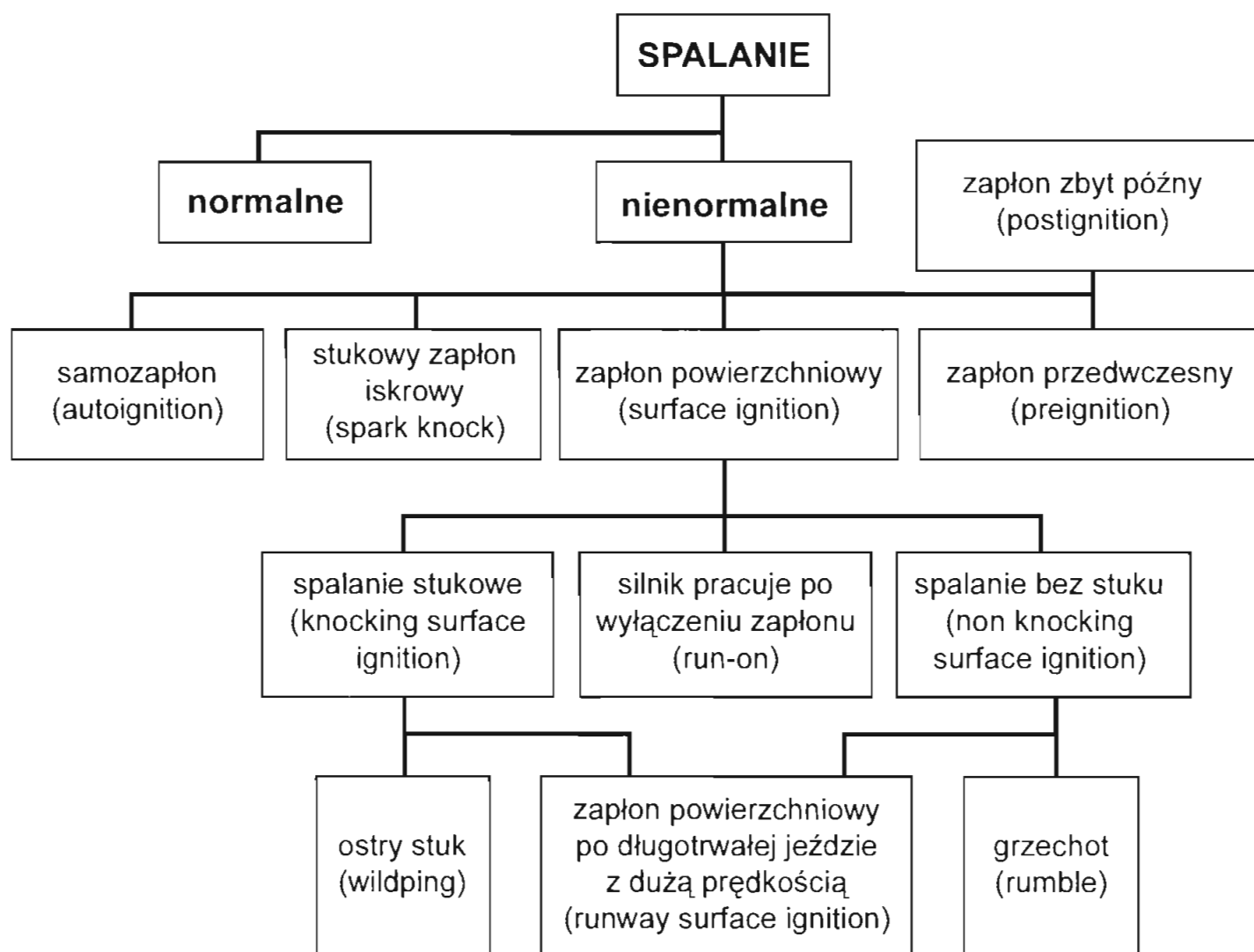
Schemat tworzenia substancji toksycznych przedstawiony na rys. 2.8 obejmuje zarówno fenomenologię zjawisk zachodzących w czasie spalania, jak i kinetykę poszczególnych reakcji [43]. Powstawanie substancji toksycznych w czasie spalania jest zjawiskiem złożonym, szczegółowo omówionym w bogatej literaturze [6, 32, 49, 60].

Analizując w dalszym ciągu przebieg procesu, możemy wyróżnić 3 sposoby spalania [4]:

- spalania kontrolowane, w którym zapłon inicjowany jest przez iskrę,
- spalanie niekontrolowane, gdy zapłon inicjują gorące miejsca w komorze spalania,
- spalanie nienormalne, w którym mieszanka paliwowo-powietrzna zapala się sama, bez źródła zapłonu – następuje samozapłon.

Bardziej ogólną klasyfikację przypadków spalania przedstawiono na rys. 2.9. Cytując za autorem [5], podano terminologię angielską, ze względu na istnienie niejednoznacznych terminów polskojęzycznych.

Przebieg procesu roboczego i parametry pracy silnika (moment obrotowy, zużycie paliwa, emisja toksycznych składników spalin) zależą w dużym stopniu od procesu dawkowania paliwa i przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej. Niemożliwe jest ujęcie wszystkich zagadnień dotyczących przygotowania ładunku, dlatego też rozważania będą dotyczyć przede wszystkim współczynnika składu mieszanki λ , jako wielkości mającej bardzo istotny wpływ na przebieg procesu spalania.



Rysunek 2.9. Klasyfikacja spalania w silnikach o zapłonie iskrowym [5]

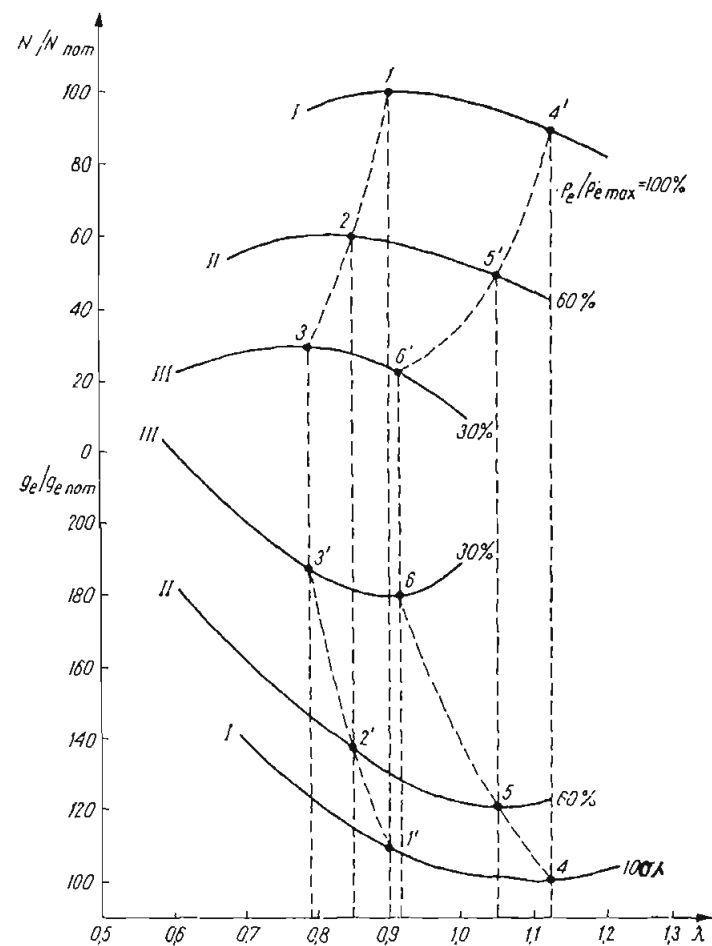
Pożądane jest ustalenie składu mieszanki tak, aby spełnić przynajmniej jedno z poniższych kryteriów:

- minimalnego jednostkowego zużycia paliwa g_e ,
- maksymalnego średniego ciśnienia użytecznego p_e ,
- minimalnej koncentracji toksycznych składników gazów wylotowych tox ,
- poziomu równomierności pracy silnika $\Delta\omega/\omega$,
- minimalnego czasu rozruchu silnika t_{roz} .

Przy doborze składu mieszanki według jednego z tych kryteriów pozostałe mogą stanowić ograniczenia. Przykładowo, dla kryterium minimalnego jednostkowego zużycia paliwa kryterium toksyczności będzie stanowić ograniczenie $tox \leq tox_{dop}$. Na rysunku 2.10 przedstawiono charakterystykę mocy i jednostkowego zużycia paliwa w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ . Widoczne jest, że moc maksymalną silnik uzyskuje dla λ nieco mniejszego od 1, tj. dla mieszanki bogatszej, natomiast minimum g_e osiągane jest dla mieszanek uboższych od stechiometrycznych ($\lambda > 1$). Przy obciążeniach częściowych wartości ekstremalne przesuwają się w kierunku mieszanek bogatszych. Możliwa jest też polioptymalizacja po ustaleniu ważności wyżej wymienionych kryteriów.

Pod koniec cyklu sprężania w komorze spalania znajduje się mniej lub bardziej homogeniczna mieszanka par paliwa i powietrza. Do zapłonu mieszanki o temperaturze w końcu

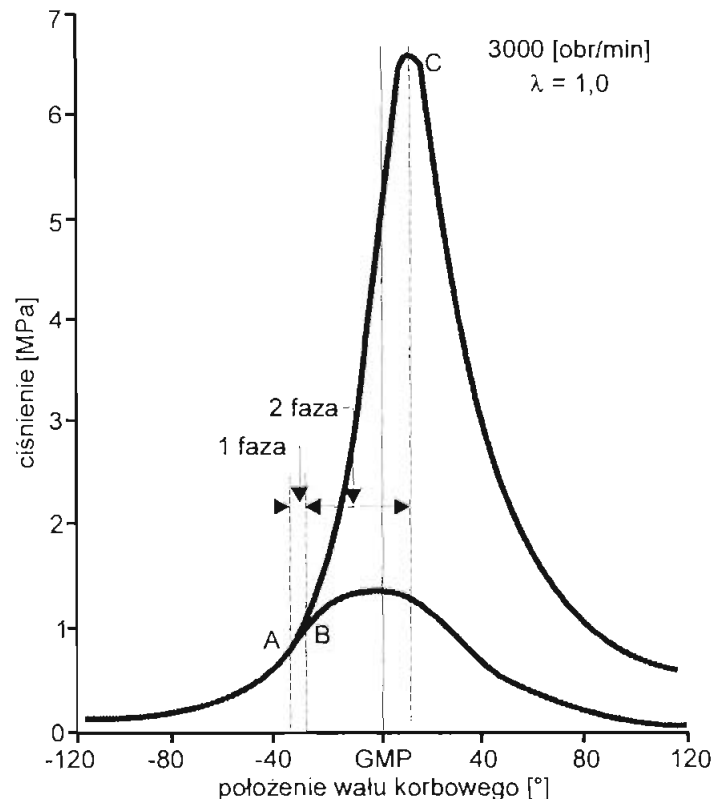
spężania niższej niż temperatura samozapłonu, dochodzi po dostarczeniu dawki energii zewnętrznej energią zapłonu. Energia zapłonu iskrowego zależy od parametrów mieszanki i od wielkości charakteryzujących wyładowanie iskrowe. Skład mieszanki i rodzaj paliwa mają tu wpływ decydujący (por. rys. 2.6).



W przypadku silników o wtrysku paliwa do cylindra, wtrysku paliwa do przewodu dolotowego (częściowo) oraz w przypadku rozruchu silników gaźnikowych, zapłon dotyczy mieszanek dwufazowych – paliwo występuje w postaci kropeł rozpylonych w powietrzu. Granice zapłonu są szersze, lecz zapłon na granicy zapalności mieszanki ma charakter probabilistyczny: iskra zapala mieszankę lub nie [29].

Rysunek 2.10. Charakterystyki mocy i jednostkowego zużycia paliwa [28]

Skuteczny zapłon, gwarantujący dalsze rozprzestrzenienie się płomienia, wymaga, aby w chwili spadku temperatury wewnątrz obszaru ograniczonego frontem płomienia do temperatury odpowiadającej reakcji spalania, masa gazów gorących była większa od masy krytycznej. Masa krytyczna odpowiada przypadkowi równowagi wywiązywania ciepła w wyniku reakcji spalania i oddawania ciepła przez promieniowanie i przejmowanie ciepła przez sąsiednie warstwy gazu.

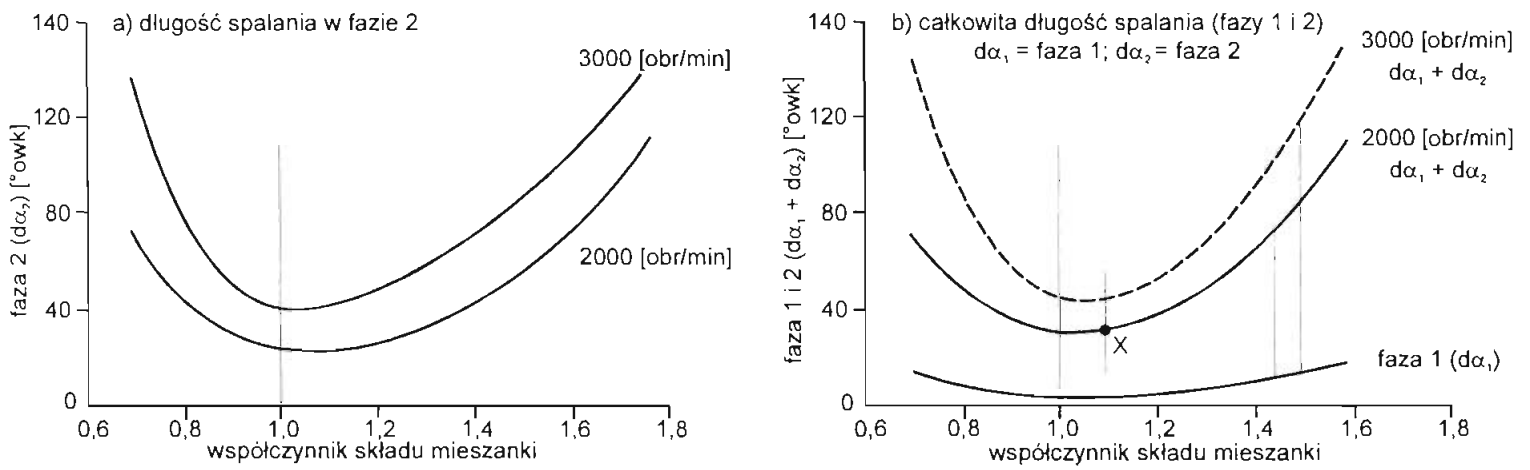


Analizując typowy wykres indykatorowy można wyróżnić dwie fazy procesu spalania (rys. 2.11). Faza pierwsza (AB) odpowiada czasowi tworzenia samorozprzestrzeniającego się jądra płomienia – jest to okres zwłoki zapłonu, faza druga (BC) – jest to rozprzestrzenianie płomienia w komorze spalania.

Rysunek 2.11. Fazy procesu spalania [5]

Niektórzy autorzy (np. [28]) wyróżniają także fazę trzecią – okres dopalania. Trwa on od wystąpienia maksymalnego ciśnienia do zakończenia wywiązywania ciepła, nie zaznaczającego się na wykresach przebiegów ciśnienia i temperatury w wyraźny sposób.

Okres zwłoki zapłonu jest głównie procesem chemicznym, jego długość zależy od rodzaju paliwa, temperatury i ciśnienia mieszanki, ilości spalin pozostałych z poprzedniego cyklu, prędkości reakcji chemicznych oraz stopnia zawirowania ładunku w komorze spalania. Po nim natępuje rozprzestrzenianie płomienia obejmujące propagację płomienia od początkowego jądra do spalania całego paliwa. Czoło płomienia rozprzestrzenia się od obszaru krytycznego przez całą objętość mieszanki, kończąc się z dojściem czoła płomienia do najodleglejszej ścianki komory spalania. Rozprzestrzenianie płomienia w quasi-jednorodnej mieszance może przebiegać w sposób laminarny lub turbulentny. Jest to proces zarówno chemiczny jak i fizyczny, zależny od geometrii komory spalania, położenia świecy zapłonowej, składu chemicznego mieszanki, temperatury, ciśnienia i stopnia turbulencji w cylindrze (por. rys. 2.7).



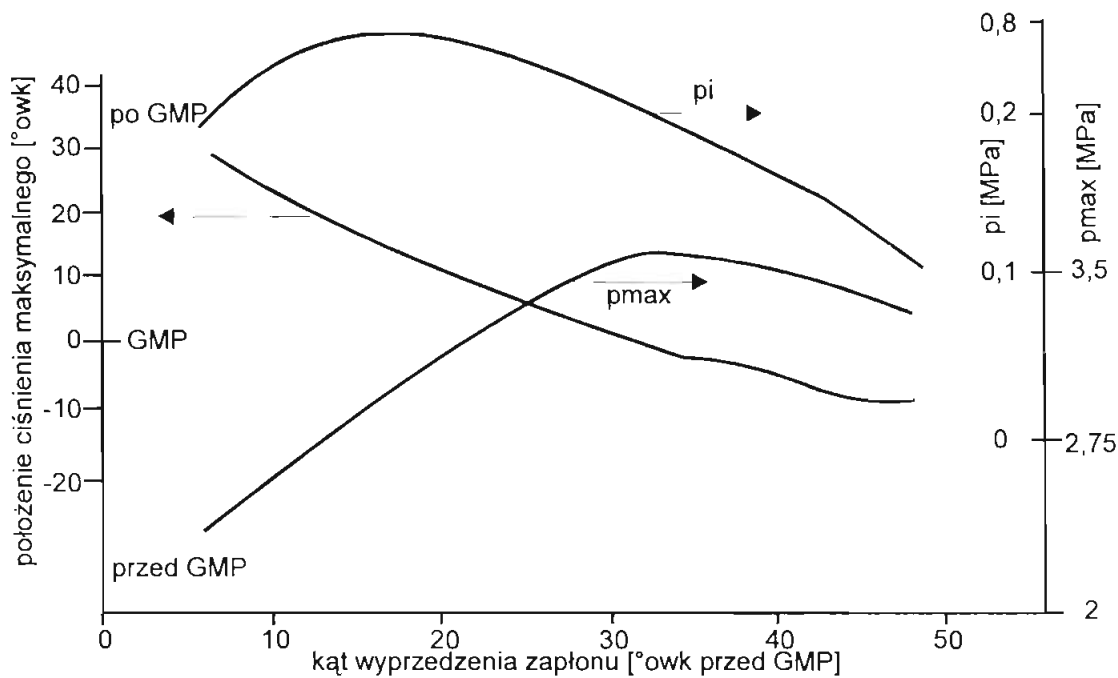
Rysunek 2.12. Przybliżone zależności między długością spalania, składem mieszanki i prędkością obrotową silnika [5]

W zakresie mieszanek o składzie $\lambda=0,83\div1,25$, okres rozprzestrzeniania płomienia (rys. 2.12a) jest w zasadzie stały. Wydłużenie drugiej fazy spalania powodowane jest przez zubożenie lub wzbogacenie mieszanki poza ten zakres. Analogiczną zależność zaobserwować można w przypadku całkowitego czasu spalania (rys. 2.12b). Maksymalny czas spalania (z uniknięciem wygaszania płomienia) wynosi około 50 °owk i jest limitowany przez otwarcie zaworu wylotowego. Narzuca to niejako ograniczenia na zakresy składu mieszanki, rosnące wraz z prędkością (linia przerywana na rys. 2.12b).

Wyprzedzanie kąta zapłonu powoduje zwiększenie sprawności procesu związane z suwem rozprężania, do punktu maksymalnego, po którym wpływ strat ciepła powoduje spadek sprawności. Zależności te wyraźnie ilustruje rysunek 2.13, na którym warto zauważyć, że dla określonego składu mieszanki i współczynnika napełnienia, sprawność cieplna jest wprost proporcjonalna do ciśnienia indykowanego.

W wielocylindrowych silnikach gaźnikowych oraz w silnikach z wtryskiem centralnym ma miejsce nierównomierność rozdziału mieszanki na poszczególne cylindry. Granicą stają się wartości λ dla mieszanek ubogich, nie powodujące jeszcze wypadania zapłonów. Stąd też kąt

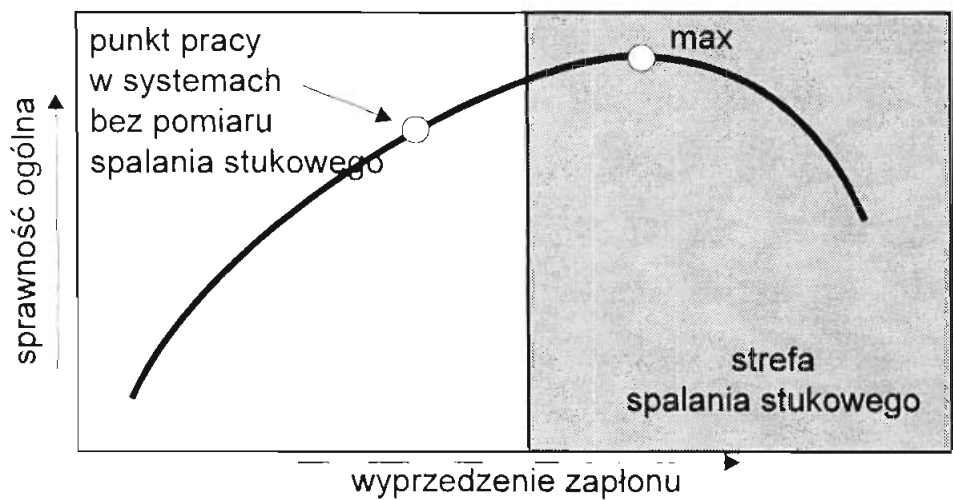
wyprzedzenia zapłonu musi zapewniać poprawne spalanie we wszystkich cylindrach – bez wypadania zapłonów i bez pojawiania się spalania stukowego.



Rysunek 2.13. Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na wartość ciśnienia maksymalnego (p_{max}) i średniego ciśnienia indykowanego (p_i) [5]

Zjawisko spalania stukowego

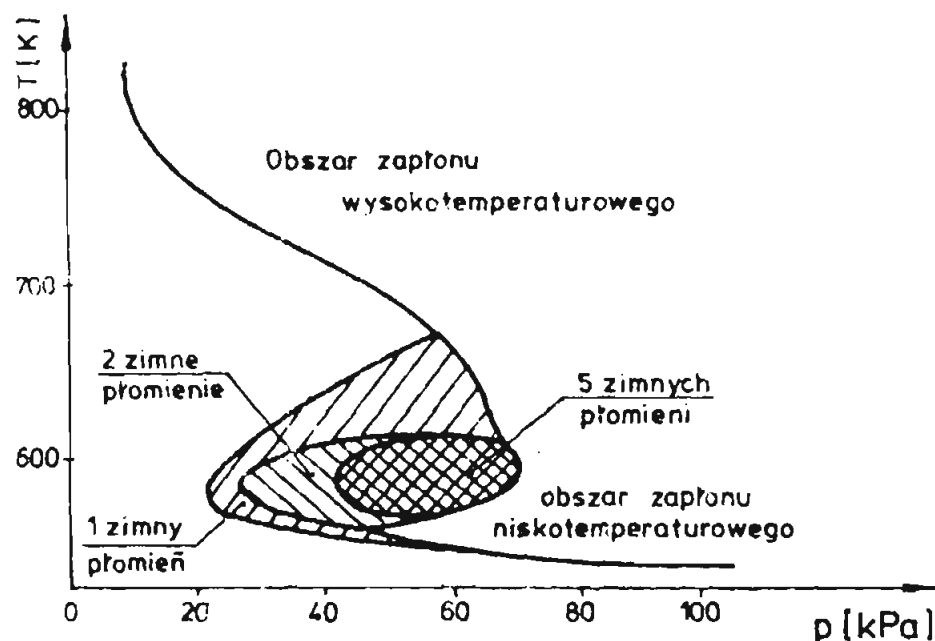
Najczęstszym przypadkiem ograniczenia wzrostu kąta wyprzedzenia zapłonu w kierunku maksymalnej sprawności obiegu jest możliwość wystąpienia spalania stukowego, co pokazano na rys. 2.14.



Rysunek 2.14. Schemat ilustrujący możliwości i ograniczenia regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu

Istota spalania stukowego związana jest z powstaniem nowego ośrodka spalania w reszcie nie-spalonej mieszanki. Przyczyną jest przyrost temperatury mieszanki powyżej temperatury samozapłonu. Ocenia się, że temperatura granicy spalania stukowego wynosi około 750-800 °C. Czoło nowego płomienia rozprzestrzenia się przeciwnie do kierunku czoła płomienia pierwotnego (prawidłowego). Wskutek przyrostu energii spalania, rośnie temperatura, a co za tym idzie – ciśnienie gazu roboczego. Powoduje to spalanie wybuchowe oraz powstanie fal uderzeniowych. Fale te odbijając się od ścianek otaczających komorę spalania, powodują pulsacje ciśnienia w cylindrze oraz powstanie efektu akustycznego zbliżonego do dzwonienia.

Badania mechanizmu spalania stukowego pozwoliły na odkrycie, że przed powstaniem ognisk samozapłonu w niespalonej części mieszaniny zachodzą wstępne reakcje utleniania, których wynikiem jest powstawanie nadtlenczków i aldehydów. Badania nad mechanizmem samozapłonu doprowadziły do odkrycia tzw. zimnych i niebieskich płomieni. W przypadku niektórych węglowodorów zwiększenie temperatury umożliwia kilkakrotne powstawanie zimnych płomieni (rys 2.15) [14].



Rysunek 2.15. Strefy samozapłonu propanu C_3H_8 [14]

Tworzenie się zimnych płomieni wiąże się z powstawaniem nadtlenczków i aldehydów, co pozwoliło na ustalenie, że to reakcje wstępne prowadzące do powstawania zimnych płomieni odpowiadają za tworzenie ognisk samozapłonu podczas spalania stukowego. Niektóre węglowodory nie wykazują skłonności do reakcji wstępnych i są odporne na spalanie stukowe (np. benzen i izooktan).

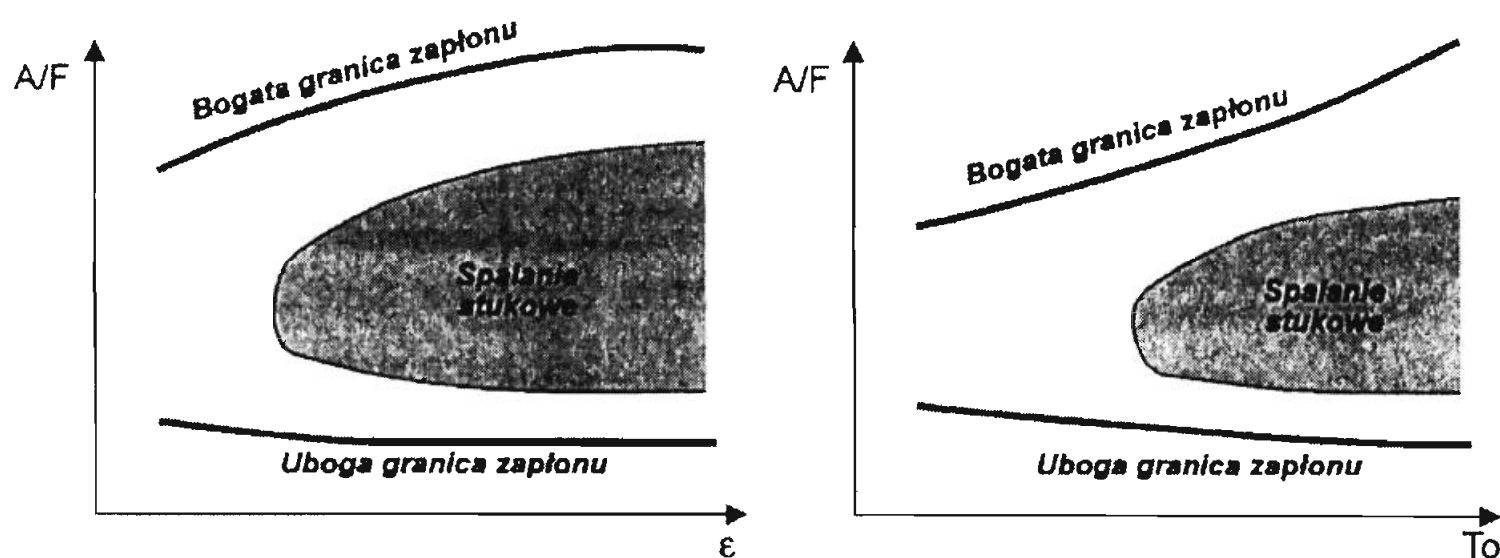
Kluczowe znaczenie w zaistnieniu spalania stukowego odgrywa czas, w którym dochodzi do rozwoju zimnych i niebieskich płomieni oraz intensywność nagrzewania mieszanki od gorących elementów otaczających komorę spalania. Zapobieganie występowaniu spalania stukowego wiąże się więc ze spowolnieniem przebiegu reakcji chemicznych zachodzących w strefie reszty mieszanki lub skróceniem czasu, jaki mają one do dyspozycji (czas ten mija w chwili dotarcia w dany punkt komory spalania płomienia pierwotnego). Chemiczne zapobieganie wiąże się z dodaniem do paliwa inhibitorów, dawniej najczęściej czteroetylnu ołowiu $Pb(C_2H_5)_4$. W przypadku mieszanek stechiometrycznych, czas opóźnienia samozapłonu (czas rozwoju niebieskich płomieni) jest najkrótszy.

W pewnych warunkach intensywne spalanie stukowe może utworzyć gorące miejsca w komorze spalania, co z kolei może spowodować samozapłon mieszanki przed wystąpieniem iskry zapłonowej. Wystąpienie samozapłonu powoduje znaczny spadek mocy silnika, a nawet możliwość uszkodzenia mechanicznego, zwłaszcza w przypadku silników wielocylindrowych, gdyby opisane zjawisko stuk i samozapłon występowało tylko w jednym z cylindrów.

Na powstawanie zjawiska spalania stukowego oddziałują oczywiście warunki pracy silnika oraz parametry eksploatacyjne, tak więc:

- skłonność do spalania stukowego zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się prędkości obrotowej (oczywiście wskutek zwiększenia czasu na rozwój reakcji w okresie rozwoju procesów przedpłomiennych);
- wyższe ciśnienie i temperatura powietrza na wlocie powoduje wzrost ciśnienia i temperatury w okresie sprężania ładunku, co przyspiesza reakcje przedpłomienne oraz samozapłon reszty mieszanki;
- zubożenie lub wzbogacenie mieszanki w odniesieniu do składu stechiometrycznego zmniejsza skłonność mieszanki do samozapłonu;
- wcześniejszy zapłon powoduje wydłużenie czasu danego „do dyspozycji” procesom chemicznym na powstanie samozapłonu;
- zwiększenie średniej temperatury obiegu poprzez zwiększenie temperatur gazów dolotowych lub cieczy chłodzącej zwiększa skłonność do spalania stukowego.

Graniczne wartości współczynnika nadmiaru powietrza, wewnątrz których występuje spalanie stukowe, zależą głównie od stopnia sprężania (rys. 2.16a) oraz temperatury powietrza na wlocie do silnika (rys. 2.16b). Wzrost stopnia sprężania oraz temperatury powietrza na wlocie powoduje rozszerzanie się tych granic.



Rysunek 2.16. Graniczne wartości współczynnika A/F dla spalania stukowego w zależności od stopnia sprężania ϵ oraz temperatury powietrza na wlocie T_0 .

Spośród miejsc wewnątrz komory spalania mogących stać się źródłem samozapłonu, a w konsekwencji spalania stukowego, należy wymienić powierzchnie grzybka zaworu wylotowego i jego okolice, elektrodę świecy zapłonowej oraz rozżarzony nagar na ściankach. Metodą na wykrywanie zapłonu od gorącej ścianki jest wyłączenie zapłonu iskrowego. W zależności od temperatury ścianki oraz włączonego/wyłączonego zapłonu, można wyróżnić sześć rodzajów przebiegu spalania (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Możliwe warianty przebiegu spalania z uwzględnieniem spalania stukowego

Temperatura ścianek	Wylączony zapłon	Włączony zapłon
stosunkowo niska	SAMOZAPŁON Zapłon jest znacznie późniejszy, niż przy zapłonie od iskry.	SPALANIE NORMALNE Spalanie ma przebieg analogiczny jak bez zjawiska samozapłonu.
podwyższona	SPALANIE PRZEDWCZESNE Zapłon od nagaru występuje wcześniej niż od iskry. Sprawność obiegu maleje.	SPALANIE STUKOWE Ogniska zapłonu od nagaru powstają później niż od iskry.
wysoka	DUDNIENIE Występuje kilka ognisk zapłonu od nagaru, wysoki poziom hałasu przy częstotliwościach <1 kHz.	NIEREGULARNE SPALANIE STUKOWE Ogniska zapłonu powstają wcześniej od iskry, częstotliwość hałasu około 3 kHz.

Występowanie wypadania zapłonów

Z teorii silników wynika, że możliwe jest zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa g_e poprzez zwiększenie wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ . Warunkiem jest zachowanie stałych wartości p_e i η_v zgodnie ze wzorem:

$$g_e \cdot \lambda = \frac{\eta_v \cdot \rho}{p_e \cdot L_o} = \text{const}$$

(2.1)

gdzie: ρ – gęstość powietrza, η_v – współczynnik napełnienia, p_e – średnie ciśnienie użyteczne, L_o – stechiometryczny stosunek masowy powietrza do paliwa.

Zubożenie mieszanki ($\lambda > 1$) w pewnym zakresie pozwala także na obniżenie emisji NOx, CO i HC. W przypadku mieszanki jednorodnej przeszkodą w jej zubażaniu jest granica zapłonu i możliwości rozprzestrzeniania się płomienia od obszaru krytycznego na cały obszar wypełniony mieszanką. Przekroczenie tych ograniczeń przy zubożeniu mieszanki powoduje wypadanie poszczególnych zapłonów, zmniejszenie mocy w wyniku niezupełnego i niecałkowitego spalania, aż do zgaśnięcia silnika.

Wypadanie zapłonu określa się jako zjawisko, gdy nie występuje spalanie ładunku w ciągu jednego lub większej liczby cykli pracy silnika, w jednym lub w kilku cylindrach. Wypadanie zapłonu jest wielce niepożądane, ponieważ występuje zmniejszenie momentu obrotowego silnika (dla cyklu, w którym wypadł zapłon), a gazy wylotowe zawierają nie spalone paliwo (węglowodory).

Ominięcie tych przeszkód możliwe było poprzez zastosowanie spalania mieszanki niejednorodnej o zróżnicowanym składzie wzdłuż drogi płomienia (gradient $d\lambda/dx > 0$). Spalanie inicjowane przez zapłon iskry w obszarze o składzie stechiometrycznym ($\lambda \approx 1$) może przenosić się do rejonów uboższych. Wykorzystanie tego zjawiska zapoczątkowało rozwój systemów spalania mieszanek ubogich o ładunku uwarstwionym.

2.2. PROCES SPALANIA JAKO ELEMENT SYSTEMU EKSPLOATACJI

Współczesne silniki spalinowe konstruuje się przede wszystkim z myślą o zapewnieniu ich niezawodności, sprawności i proekologiczności. Niezawodność związana jest z wymogiem pewnego działania silnika, niezależnie od warunków pracy i dotyczy między innymi:

- pewności rozruchu silnika zimnego i rozgrzanego,
- osiągania założonych parametrów pracy (moc, moment obrotowy, prędkość obrotowa),
- bezawaryjności działania,
- niskiego tempa zużycia.

Zapewnienie maksymalnej sprawności silnika wyraża się przede wszystkim w możliwie najniższym zużyciu paliwa w różnych stanach pracy, w tym podczas rozruchu, na biegu jałowym, przy pracy w warunkach ustalonych i nieustalonych (np. podczas hamowania silnikiem, przy rozpędzaniu).

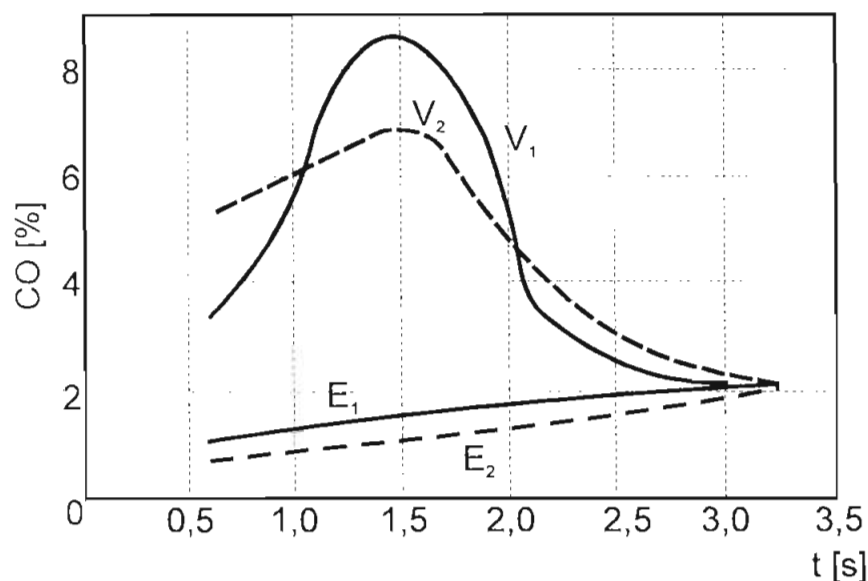
Proekologiczność silnika odnosi się do ciągle zaostrzanych norm ograniczających dopuszczalną emisję toksycznych składników spalin i hałasu. Najnowsze ograniczenia wymuszają praktycznie konieczność stosowania w silnikach benzynowych trzyfunkcyjnych katalizatorów spalin (TWC).

Skutecznym sposobem na sprostanie tym wymogom jest wyposażenie prawidłowo skonstruowanego pod względem mechanicznym silnika w elektroniczny układ sterowania procesem roboczym. System taki precyzyjnie dawkuje paliwo i ustala ilość mieszanki oraz kąt wyprzedzenia zapłonu, zgodnie z zapisanym w pamięci sterownika algorytmem w pełnym zakresie pracy silnika. Rozwój algorytmów sterujących zmierza w kierunku adaptacyjnych systemów sterowania, które w procesie wyznaczania funkcji sterujących uwzględniają ciągłą zmienność charakterystyk statycznych i dynamicznych silnika.

Różnice pomiędzy produkowanymi układami wtryskowymi polegają na doborze głównych i korekcyjnych parametrów sterujących oraz na sposobie przetwarzania danych (cyfrowy lub analogowy). Ponadto układy różnią się systemem wtrysku (sekwencyjny lub symultaniczny), miejscem umieszczenia wtryskiwacza (bezpośredni – DFI i pośredni: wielopunktowy – MPI oraz jednopunktowy – SPI) lub rodzajem wtryskiwacza (elektromagnetyczny, mechaniczny).

Zadaniem urządzenia wtryskowego jest przyporządkowanie masie powietrza pobieranego przez silnik (w jednostce czasu lub cyklu pracy) masy paliwa (także w jednostce czasu) dającej w wyniku optymalny dla danego punktu pracy silnika współczynnik składu mieszanki λ (ze względu na TWC – $\lambda = 1$).

Aby zagwarantować właściwą pracę silnika we wszystkich stanach pracy, obok głównych wielkości sterujących stosuje się wielkości korekcyjne. Pozwala to na poprawne sterowanie składem mieszanki w takich stanach, jak pełne obciążenie, przyspieszanie, hamowanie silnikiem, rozruch w niskich temperaturach, nagrzewanie do normalnej temperatury pracy itp. O konieczności takiej korekcji świadczy porównanie emisji CO dla silnika gaźnikowego i wtryskowego (rys. 2.17).

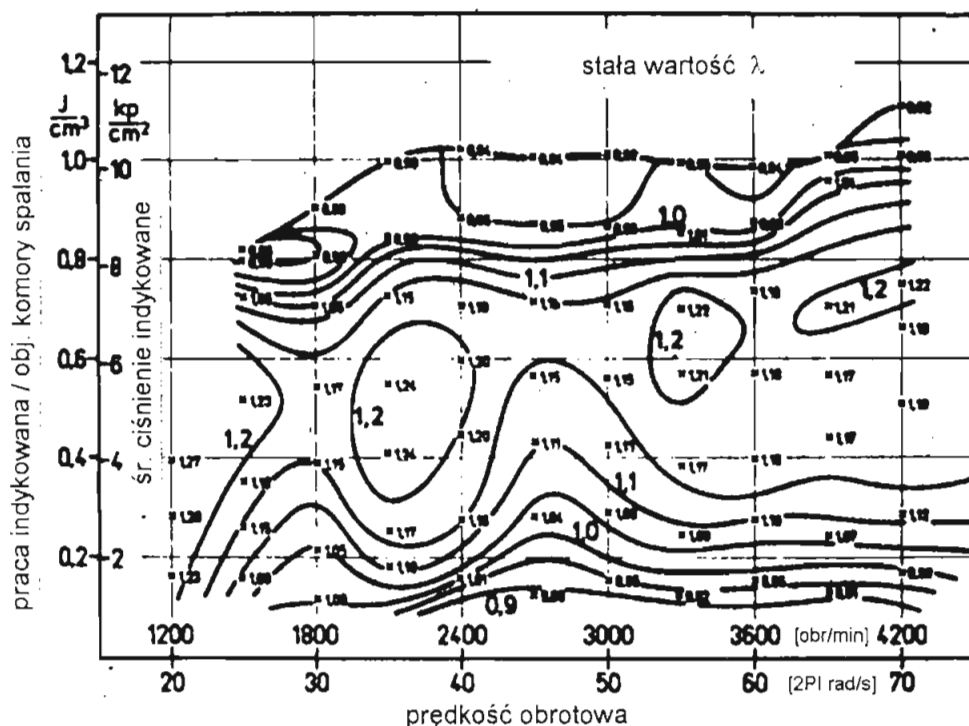


Rysunek 2.17. Porównanie zawartości CO w spalinach silnika gaźnikowego (V) i zasilanego wtryskowo (E) przy przyspieszaniu ze stanu hamownia silnikiem; 1 – prędkość 60 km/h, 2 – 20 km/h [26]

W wielu ośrodkach prowadzone są obecnie badania nad różnymi sposobami określania warunków pracy silnika i optymalizacji składu mieszanki oraz kątów wyprzedzenia zapłonu. Zastosowanie elektronicznego dawkowania paliwa pozwala na wykorzystanie bardziej złożonych algorytmów kompensujących zmiany wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ – decydującego między innymi o toksyczności spalin i równomierności pracy silnika. Bardzo istotne jest określenie zależności zmian składu mieszanki od takich parametrów, jak ruch przepustnicy, temperatura kolektora. Do układów sterowania składem mieszanki i kątem wyprzedzenia zapłonu wprowadza się sygnały działające w pętli sprzężenia zwrotnego:

- skład mieszanki (sygnał sondy λ),
- intensywność detonacji (sygnał spalania stukowego),
- nierównomierność prędkości obrotowej (sygnał wypadania zapłonów).

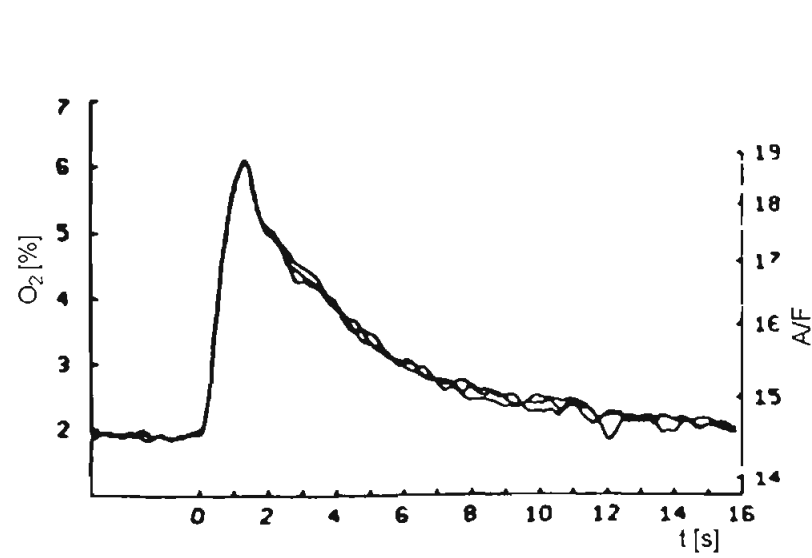
Złożoność problemu ilustruje rys. 2.18, przedstawiający rozkład współczynnika nadmiaru powietrza λ w polu pracy silnika. Sporządzony został dla silnika 4-cylindrowego, $V_{ss} = 1,6 \text{ dm}^3$ z wtryskiem paliwa Bosch K-Jetronic (silnik bez katalizatora i sondy λ) [8].



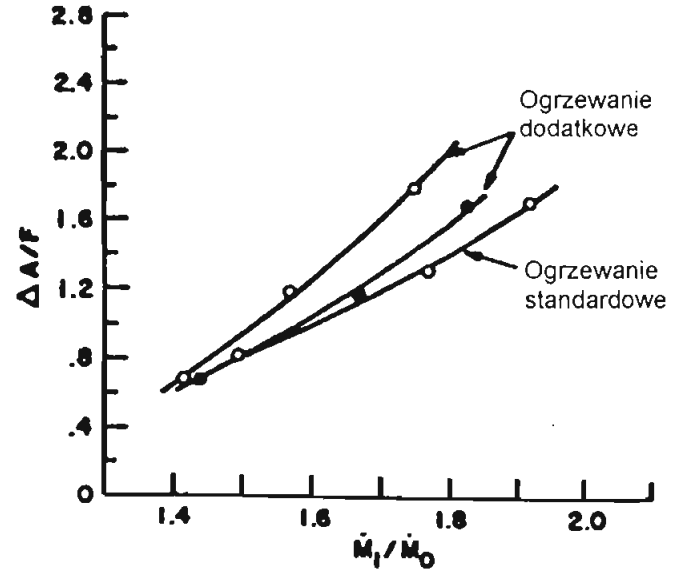
Rysunek 2.18. Rozkład współczynnika nadmiaru powietrza w polu pracy silnika [8]

Z kolei Aquino w pracy [1] badał wpływ nagłego otwarcia przepustnicy na zmiany składu mieszanki (wyrażonego jako A/F – air fuel ratio) silnika benzynowego z wtryskiem jednopunktowym SPI, $V_{ss} = 5 \text{ dm}^3$. Między innymi stwierdził, że nagłe zubożenie mieszanki spowodowane gwałtownym otwarciem przepustnicy (wyrażające się zwiększoną ilością tlenu w spalinach) może powodować zaburzenia stabilności pracy silnika (rys. 2.19).

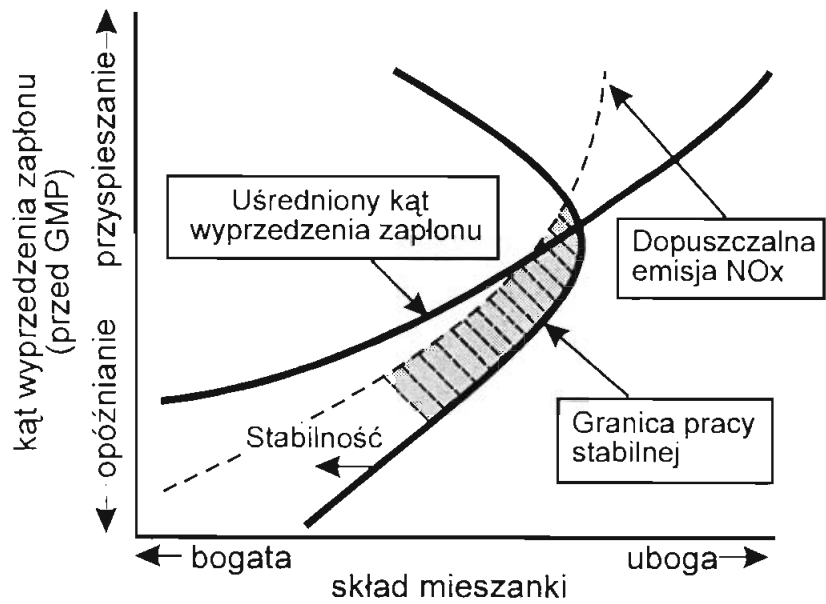
Wyniki badań dowiodły, że największy wpływ na dynamikę tworzenia mieszanki przy wtrysku jednopunktowym ma temperatura elementów układu dolotowego (przepustnicy i ścianek kolektora) oraz stosunek masy przepływającego powietrza przy końcowym ($\dot{M}_1$) i początkowym ustawieniu przepustnicy ($\dot{M}_0$) (rys. 2.20). Zdaniem autora pracy [1] możliwa jest 3-4 krotna redukcja zmian A/F poprzez ogrzanie kolektora i korpusu przepustnicy.



Rysunek 2.19. Zmiany składu mieszanki wskutek nagłego otwarcia przepustnicy [1]



Rysunek 2.20. Zmiana składu mieszanki dla silników z różnymi sposobami ogrzewania kolektora dolotowego w zależności od stopnia otwarcia przepustnicy [1]



Rysunek 2.21. Dopuszczalna strefa spalania mieszanki ubogiej

Aby poprawić ekonomikę pracy i ekologiczność silnika wprowadza się systemy spalania mieszanek ubogich. Systemy takie zapewniają obniżone zużycie paliwa oraz zredukowany poziom emisji. Aby spełnić warunki dotyczące toksyczności spalin, silnik musi pracować w granicach dopuszczalnego poziomu emisji NOx (rys. 2.21).

Strefa ta jest bardzo wąska i wrażliwa na zmianę warunków otoczenia. Kiedy dolna granica składu mieszanki zostanie przekroczona, pojawia się zjawisko wypadania zapłonów i praca silnika staje się niestabilna. Odpowiednio wczesne wykrywanie nieprawidłowości w przebiegu procesu spalania jest konieczne dla utrzymania silnika w zakresie pracy stabilnej.

Obecnie stosuje się wiele metod kontroli stabilności pracy silnika, najczęściej mierzy się przy tym następujących wielkości:

- prędkość obrotową silnika,
- wahania średniego ciśnienia indykowanego,
- drgania kadłuba silnika.

2.3. DIAGNOSTYCZNE CECHY PRZEBIEGU PROCESU SPALANIA

Ocena przebiegu procesu spalania musi być dokonywana na podstawie wskaźników jakości procesu, otrzymywanych poprzez analizę uzyskanych sygnałów diagnostycznych. Współczesne systemy sterowania wykorzystują niektóre cechy i efekty przebiegu procesu (rys. 2.1) jako sygnały w pętli sprzężenia zwrotnego. Są to zarówno wielkości pożądane (np. moment obrotowy), jak i niepożądane (np. toksyczne składniki spalin, występowanie spalania stukowego, wypadanie zapłonów). Ich pomiar odbywa się zawsze w sposób pośredni, za pomocą różnego rodzaju czujników umieszczonych w otoczeniu silnika [40]. Taki sposób pomiaru obarczony jest wieloma wadami. Najważniejsze z nich to:

- zwłoka czasowa wynikająca z bezwładności czujnika,
- zakłócenia,
- wady samego czujnika,
- uśrednianie wyników pomiarów,
- konieczność dalszego przetwarzania sygnału.

Chcąc reagować prawidłowo na zmieniające się warunki pracy tak, aby zapewnić pożądany przebieg procesu, konieczna staje się możliwość ciągłej obserwacji przebiegu spalania. Wiele ośrodków prowadzi prace dotyczące badania i sterowania spalaniem, oparte na obserwacji zmian zachodzących cyklicznie w każdym z cylindrów silnika, wykorzystując w tym celu różne czujniki i mierząc efekty lub cechy procesu.

Cechy spalania, najczęściej wykorzystywane jako sygnały diagnostyczne określające jakościowo przebieg procesu, to występowanie wypadania zapłonów oraz spalania stukowego. Jak już wspomniano, obecne przepisy regulujące dopuszczalny poziom emisji toksycznych składników gazów spalinowych, nakładają obowiązek stosowania trójdrożnych katalizatorów w układach wydechowych produkowanych pojazdów. Jak wiadomo, poprawność pracy katalizatora zależy od utrzymania przez system sterowania stechiometrycznego składu mieszanki.

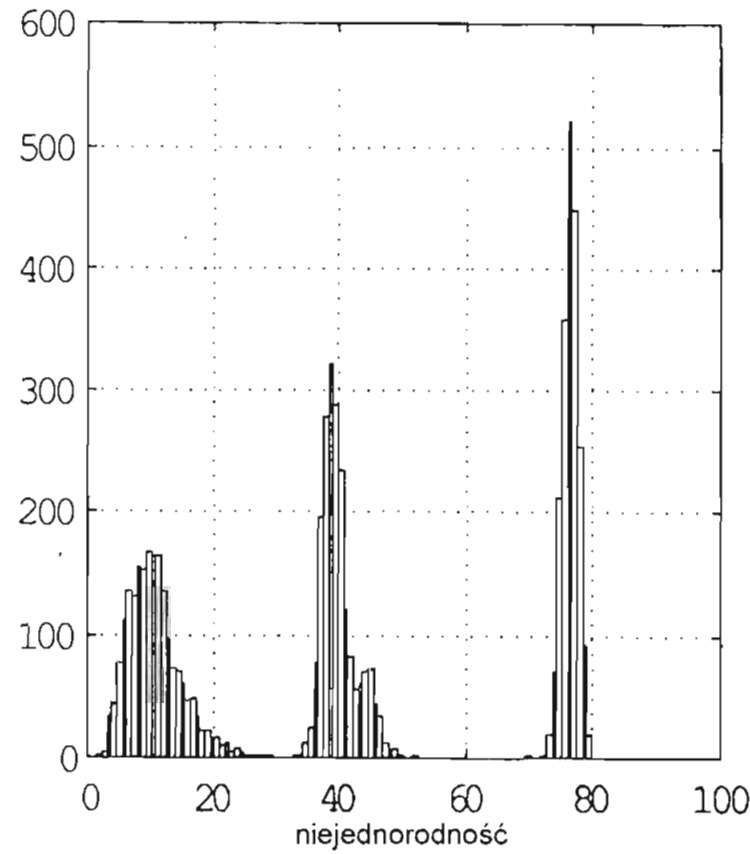
Jednym z ważniejszych czynników wpływających na żywotność katalizatora jest występowanie wypadania zapłonów. Badania wykazały, że przekroczenie pewnego poziomu ilości

wypadających zapłonów prowadzi do przyspieszonej degradacji katalizatora. Aby temu zapobiec wprowadza się odpowiednie rozwiązania konstrukcyjno-prawne. I tak np. California Air Resources Board (CARB) nałożyła obowiązek wyposażania wszystkich samochodów produkowanych po 1994 r. w systemy diagnostyczno-sterujące (OBD-II – On-Board Diagnosis), wyposażone w czujniki mogące wykrywać wypadanie zapłonów [32, 47].

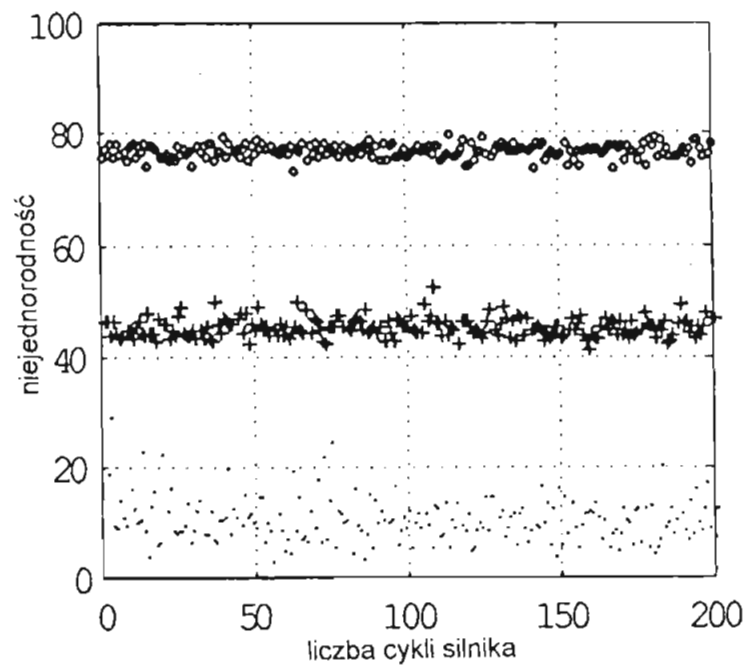
Zjawisko wypadania zapłonów nasila się szczególnie w systemach spalania opartych o mieszanki ubogie i uwarstwione. Zubożenie mieszanki realizowane może być poprzez rozrzedzenie powietrzem (spalanie ubogie) lub spalinami (EGR – recyrkulacja spalin). Wraz ze wzrostem rozrzedzenia ładunku wzrasta cykliczna niestabilność przebiegu spalania. Spowodowane tym wahania momentu mogą zostać w efekcie końcowym odebrane przez kierowcę jako nierównomierność pracy silnika.

Wielu autorów sygnalizowało o zastosowaniu algorytmów sterowania, w których poziom rozrzedzenia ładunku był utrzymywany przez pomiar cyklicznej stabilności pracy lub nierównomierności biegu [18, 47, 48]. Wybrany poziom cyklicznej niestabilności ogólnie przedstawia maksymalne rozrzedzenie możliwe do zrealizowania, zanim kierowca odczuje nierównomierność pracy.

Na rysunku 2.22 przedstawiono histogram otrzymany z danych doświadczalnych zebranych w pracy [48], będący aproksymacją gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennej losowej n – prędkości obrotowej silnika, przy założeniu trzech hipotez: H_0 – prawidłowa praca silnika, H_1 – wypadnięcie zapłonu w jednym z cylindrów, H_2 – wypadnięcie zapłonu w 2 cylindrach.



Rysunek 2.22. Histogram wskaźnika nierównomierności dla 3 hipotez [48]

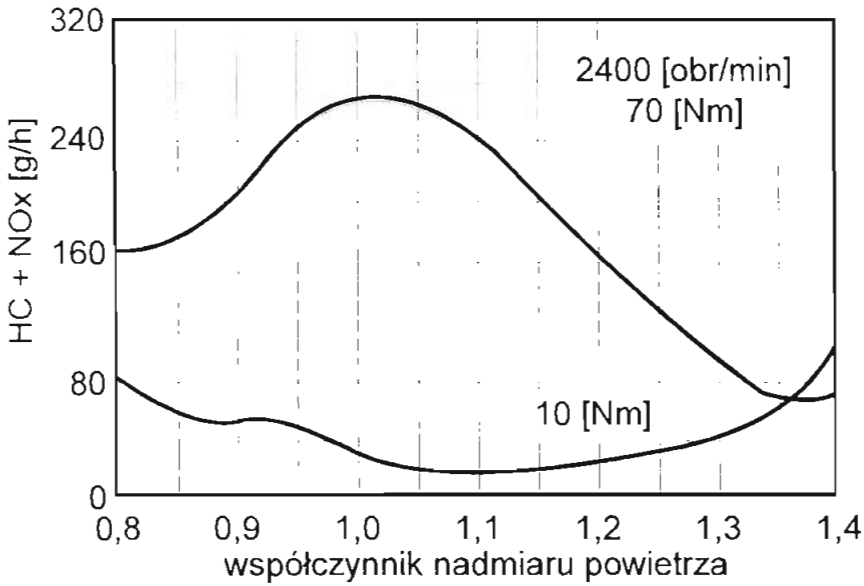


Rysunek 2.23. Zmiany współczynnika nierównomierności pracy w funkcji czasu [48]

Rozkład nierównomierności biegu dla 200 kolejnych cykli pracy silnika, dla tych samych trzech hipotez badawczych, pokazano na rysunku 2.23. Warto zauważyć, że zmienność cy-

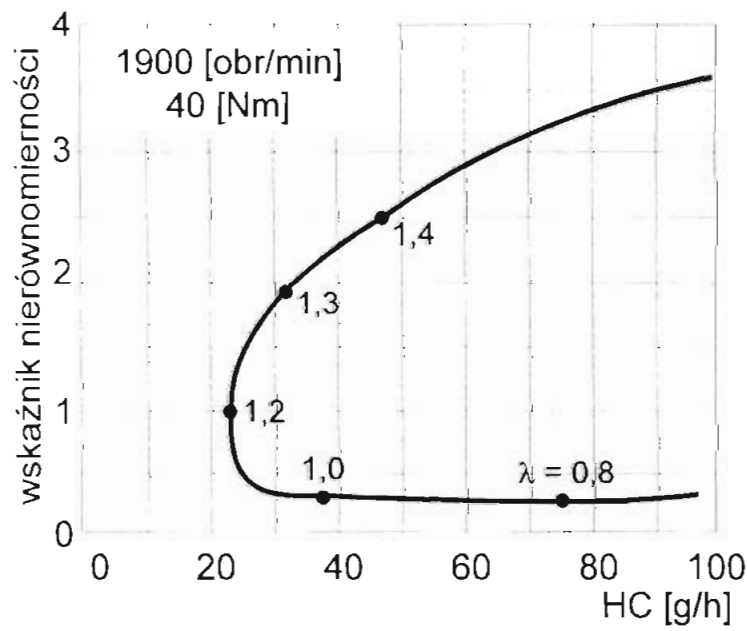
kliczna ma wpływ dominujący na rozproszenie punktów dla hipotezy H_0 , natomiast wskaźnik nierównomierności zbliżony jest do swej wartości średniej dla pracy z wypadaniem zapłonów (sposób wyznaczania wskaźnika przedstawiono w pracy [48]).

Występowanie wypadania zapłonów (poprzez pomiar nierównomierności biegu) może być wykorzystywane jako element systemu sterowania. Minimalny poziom emisji (HC+NOx), w zależności od warunków pracy silnika, waha się w dość szerokim zakresie wartości współczynnika nadmiaru powietrza (rys. 2.24).

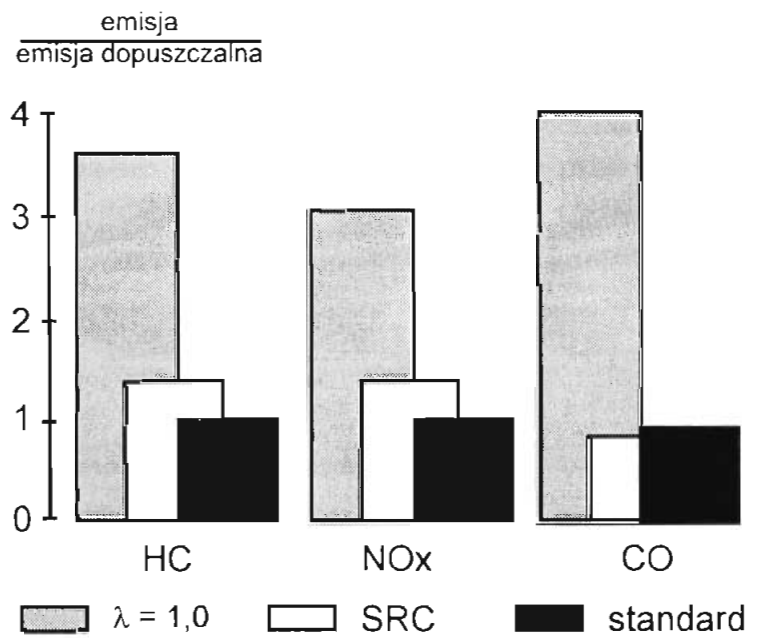


Rysunek 2.24. Położenie minimum (HC+NOx) w zależności od składu mieszanki [63]

Autorzy pracy [63] wykazali, że współczynnik nadmiaru powietrza nie jest dostatecznym parametrem zapewniającym sterowanie procesem roboczym, dające minimum emisji (HC+NOx). Zubożenie mieszanki powoduje zwiększenie nierównomierności pracy silnika, a jednocześnie powoduje wzrost zawartości HC (przy stałym obniżaniu poziomu NOx wskutek obniżania temperatury). Występujący gwałtowny wzrost nierównomierności pracy silnika ma miejsce wcześniej niż znaczący wzrost emisji HC. Nierównomierność pracy (wynikająca z wypadania zapłonów) znajduje się jednak nadal poniżej poziomu zauważalnego przez kierowcę.

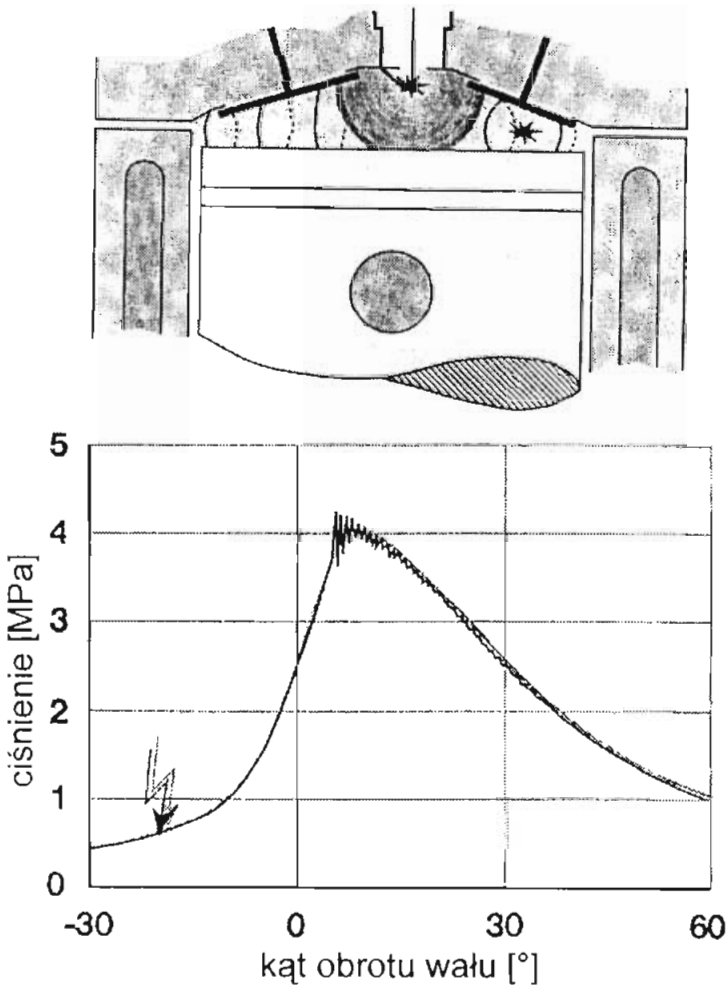


Rysunek 2.25. Zależność wskaźnika nierównomierności pracy od poziomu emisji HC [63]



Rysunek 2.26. Obniżenie poziomu emisji dla różnych sposobów sterowania [63]

Wykorzystano związek między nierównomiernością pracy a poziomem emisji HC jako wielkość wejściową w układzie sterowania silnikiem o mieszance ubogiej bez katalizatora (SRC – Smooth Running Control). Wskaźnik nierównomierności określano w oparciu o zmiany momentu obrotowego wyrażane przez prędkość obrotową koła zamachowego. Z rysunku 2.25 wynika, że możliwe było powiązanie określonej wartości wskaźnika nierównomierności z minimum HC. Dysponując wartością wskaźnika w każdym punkcie pracy silnika można go wykorzystać jako parametr sterujący, pozwalający na uzyskanie pracy na minimum (HC+NOx). Porównanie poziomu emisji (wyrażonego względem emisji dopuszczalnej dla norm amerykańskich) dla pracy z $\lambda=1$, z wykorzystaniem algorytmu SRC przedstawiono na rysunku 2.26. Wyraźne jest obniżenie emisji (HC+NOx), co nie oznacza jednak, że przedstawiona koncepcja sterowania SRC mogłaby być alternatywą wobec katalizatorów.



Trudniejszym zagadnieniem od określania poziomu nierównomierności pracy silnika jest detekcja spalania stukowego, w szczególności sformułowanie kryterium jego intensywności, czy wręcz występowania. Próby opisu właściwości sygnałów wywoływanych przez spalanie stukowe są dotychczas mało spójne, zarówno w przypadku czasowej, jak i częstotliwościowej interpretacji tych sygnałów.

Przebieg ciśnienia gazu roboczego w cylindrze stanowi (obok przebiegu strumienia ciepła wymienianego przez gaz ze ściankami otaczającymi komorę spalania) podstawowe wymuszenie działające na poszczególne elementy silnika (rys. 2.27).

Rysunek 2.27. Przebieg ciśnienia w przypadku wystąpienia spalania stukowego [21]

Informacje o spalaniu stukowym zawarte są również w sygnałach przyspieszeń poszczególnych punktów silnika oraz w odkształceniach jego elementów i występujących w nich naprężeniach. Jednocześnie przenoszenie ruchu drgającego przez elementy silnika, wywołuje w paśmie częstotliwości dźwięków słyszalnych przez człowieka, sygnał ciśnienia akustycznego. Jest on odbierany przez człowieka jako intensywne metaliczne dzwonienie, stukanie lub trzaski. W związku z różnicami przebiegów czasowych wymienionych procesów w przypadku pojawienia się spalania stukowego – występują jednocześnie różnice w częstotliwościowej reprezentacji tych procesów. Objawami towarzyszącymi pracy silnika ze spalaniem stukowym są ponadto: zmniejszenie się mocy efektywnej, sprawności ogólnej silnika oraz przegrzewanie się elementów systemu spalania (zawór wylotowy, świeca zapłonowa).

Metody detekcji spalania stukowego polegają przede wszystkim na analizie czasowych lub częstotliwościowych reprezentacji procesów towarzyszących spalaniu stukowemu albo przez wyznaczenie gęstości prawdopodobieństwa dyskretnego procesu ciśnień maksymalnych w poszczególnych cyklach pracy silnika. Najczęściej spotyka się opis analiz częstotliwościowych sygnałów ciśnienia czynnika w cylindrze $p(t)$, jego pochodnej względem czasu dp/dt oraz sygnałów przyspieszeń punktów silnika.

Zagadnienie detekcji spalania stukowego w silniku o zapłonie iskrowym jest więc integralną częścią problemów sterowania procesami zasilania i spalania, w związku z koncepcją systemów zasilania nowej generacji, umożliwiającą między innymi oszczędną pracę silnika na mieszkankach ubogich oraz zmniejszenie stężeń toksycznych składników spalin.

Z dotychczasowych rozważań wynika, że korzystne właściwości sygnału optycznego z komory spalania, zwłaszcza w zakresie wykrywania wypadania zapłonów oraz detekcji spalania stukowego, stwarzają możliwość opracowania i zastosowania metody pomiarowej na bazie optycznego czujnika spalania. Sygnał uzyskany na tej drodze mógłby być wykorzystywany jako wielkość korekcyjna w algorytmach sterowania.

2.4. ZJAWISKA PROMIENIOWANIA WEWNĄTRZ KOMORY SPALANIA

Promieniowanie i materia oddziałują na siebie na kilka sposobów. Rozgrzane ciała stałe emitują promieniowanie o widmie ciągłym. Gazy i pary pobudzone do świecenia są źródłem światła o charakterystycznej dla danej substancji długości fal $\lambda_1, \lambda_2, \dots$. Promieniowanie to stanowi widmo liniowe. Jest ono emitowane w postaci fotonów mających energię E , wyrażającą się wzorem [3]:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot c_0 \cdot \sigma \quad (2.2)$$

gdzie:

ν – mierzona częstotliwość fali, ustalona dla danego promieniowania, niezależna od ośrodka,

λ – długość fali,

c – prędkość światła, (c_0 – prędkość światła w próżni),

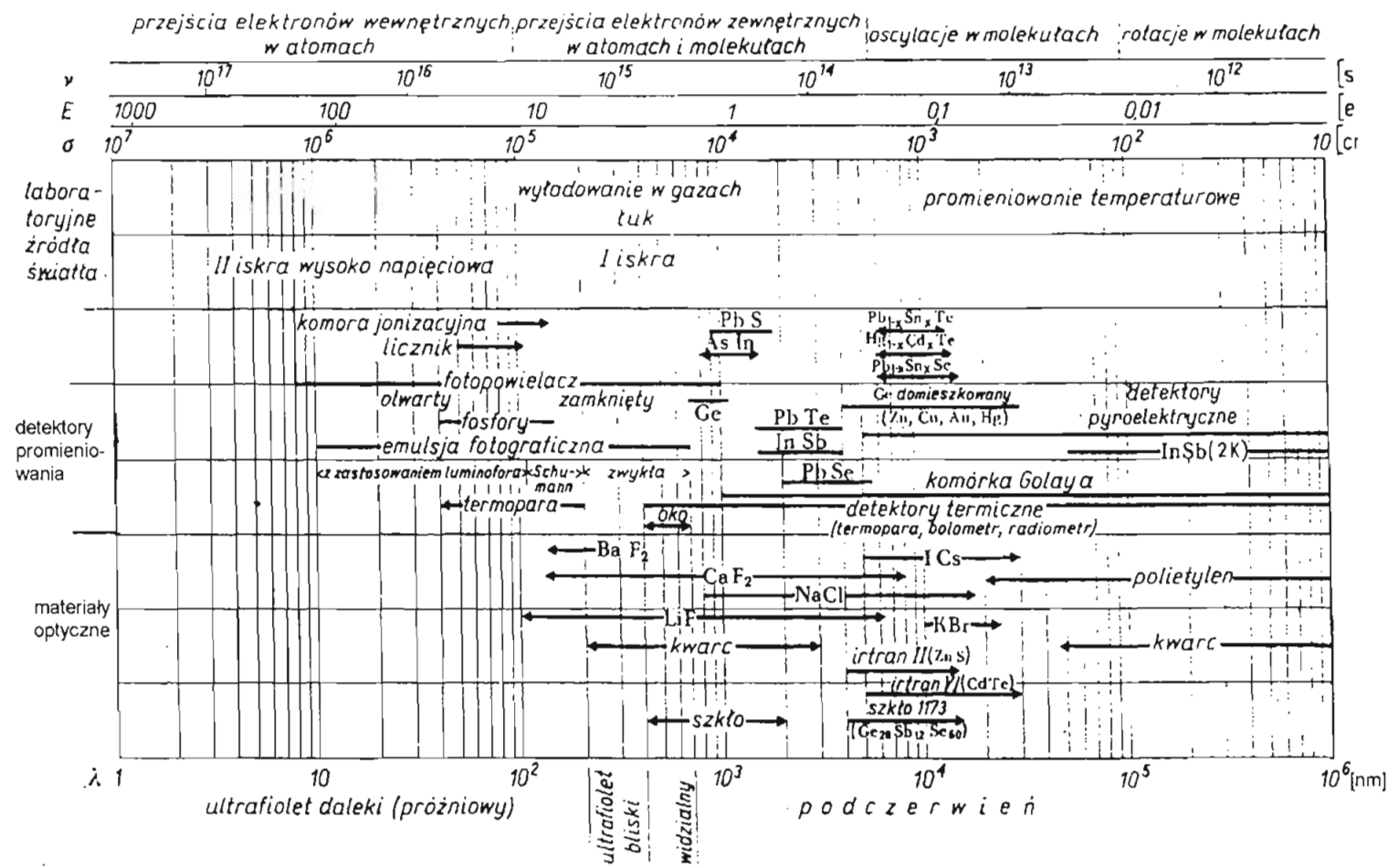
h – stała Plancka, $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Js,

σ – liczba falowa, $\sigma = \nu/c_0 = 1/n\lambda$,

n – współczynnik załamania światła dla danego ośrodka.

Spektroskopia optyczna zajmuje się badaniem fal elektromagnetycznych o długościach w granicach $10 \div 10^6$ nm, w tym obszar widma widzialnego odpowiada długościom fal $400 \div 700$ nm. Na rysunku. 2.28 przedstawiono spektroskopowy obszar fal elektromagnetycznych. Oznaczono na nim rodzaj zjawiska atomowego lub molekularnego odpowiedzialnego za emisję promieniowania w określonym przedziale widmowym. Zaznaczono również informacje na

temat widmowych zakresów stosowalności różnych materiałów optycznych, lamp spektralnych i detektorów promieniowania.



Rysunek 2.28. Spektroskopowy obszar fal elektromagnetycznych [30]

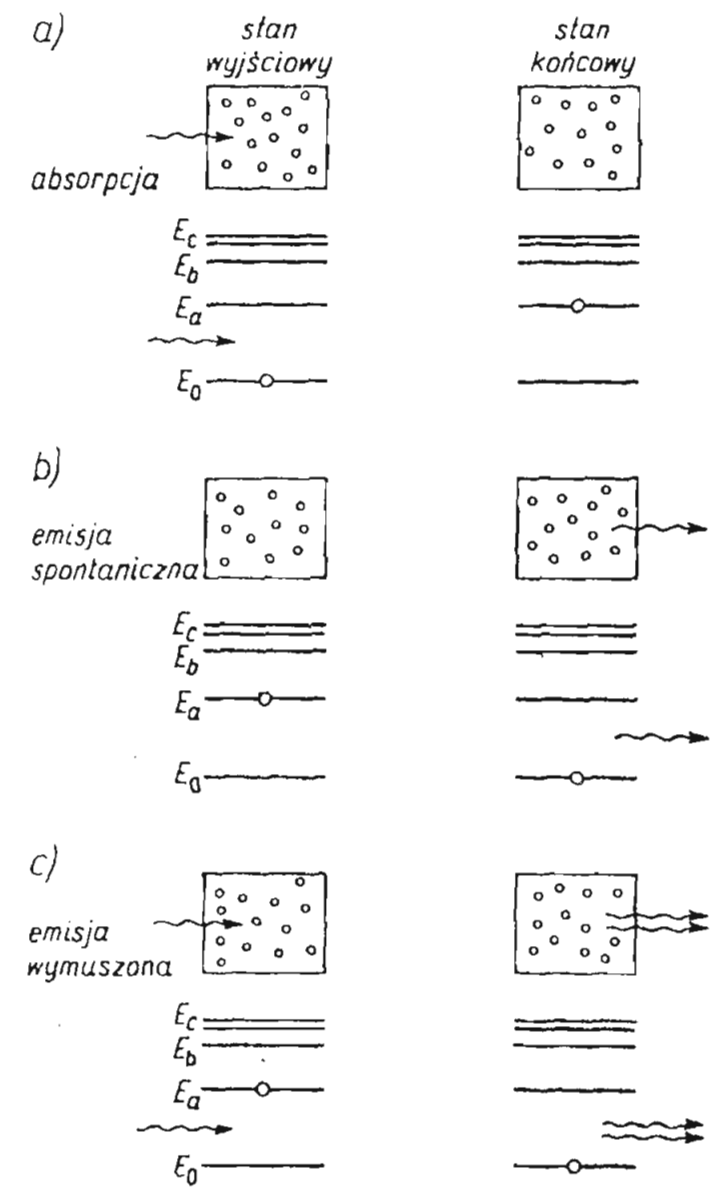
Zmiany energii elektronów walencyjnych spowodowane są przede wszystkim przez procesy reakcji chemicznych i procesy cieplne, związane z dostarczaniem ciepła do układu. Zmiany budowy substancji podczas reakcji chemicznych wiążą się ze zmianami energii wewnętrznej, które mogą być przekazywane do otoczenia jako wykonana praca, wymienione ciepło lub promieniowanie. Świecenie par i gazów polega na emisji fotonów. Atom emituje światło kosztem zmniejszenia swojej energii wewnętrznej.

Spalanie mieszanki w komorze spalania silnika powoduje wydzielanie dużych ilości energii. Efektem tego jest wzrost ilości promieniowania, zwłaszcza w zakresie podczerwieni. Analiza widma promieniowania pozwala na ocenę przebiegu reakcji chemicznych – wykorzystuje się do tego spektroskopowe metody badawcze.

Zjawiska emisji i absorpcji. Podstawowy stan energetyczny atomu odpowiada konfiguracji elektronowej, w której wszystkie elektrony zajmują możliwie najniższe poziomy energetyczne. Atom przechodzi do wyższego stanu energetycznego – zostaje wzbudzony – przy doprowadzeniu energii z zewnątrz. Może to mieć miejsce na drodze absorpcji promieniowania, polegającej na tym, że atom, będący w stanie podstawowym lub wzbudzonym pochłaniając kwant promieniowania, przechodzi do wyższego stanu energetycznego.

W stanie wzbudzonym atom jest układem nietrwałym. Ulega on samorzutnemu rozpadowi na atom o niższym stanie energetycznym i na kwant promieniowania. Zjawisko to określa się jako emisję spontaniczną promieniowania, w odróżnieniu od emisji wymuszonej, która za-

chodzi na skutek wymuszenia przez zewnętrzne pole promieniowania. W zakresie temperatur 2000÷3000 K (charakterystycznych dla temperatur podczas spalania), w zakresie światła widzialnego, przeważa zjawisko emisji spontanicznej [30]. Schematyczne zestawienie zjawisk absorpcji, emisji spontanicznej i emisji wymuszonej przedstawiono na rysunku 2.29.



Rysunek 2.29. Schematyczne przedstawienie zjawisk absorpcji, emisji spontanicznej i emisji wymuszonej [30]

Praktyczne opracowanie wyników analizy widmowej. W praktyce eksperymentalnej badanie widm sprowadza się do wyznaczenia dwóch podstawowych wielkości spektralnych: natężenia światła i długości fali. Wybór związku wiążącego te dwie wielkości zależy od warunków prowadzonej pracy eksperymentalnej, badanego obszaru widmowego oraz celu badania widma. Ilościową analizę spektralną można przeprowadzić dwiema metodami: bezpośrednią – przez wyznaczenie bezwzględnych wartości natężenia linii widmowych i pośrednią (względną) – poprzez porównanie stosunków natężeń linii widmowych.

U podstaw metody bezpośredniej leży pomiar bezwzględnej wartości natężenia linii widmowych – energii promieniowania odpowiadającego linii wyemitowanej w jednostce czasu. Metoda pośrednia analizy spektralnej polega na wykorzystaniu wzorców. Poprzez analizę stosunku natężeń linii widmowych z danej próbki i krzywej wzorcowej określa się zawartości pierwiastka w próbce.

OPTYCZNE METODY POMIAROWE W BADANIACH PROCESU SPALANIA W SILNIKU O ZAPŁONIE ISKROWYM

Stałe obniżanie poziomu dopuszczalnych emisji gazów spalinowych przez akty prawne na wszystkich liczących się motoryzacyjnych rynkach świata powoduje, że konstruktorzy samochodowi zmuszeni są poszukiwać wciąż nowych sposobów doskonalenia procesu spalania i uzyskania zmniejszenia emisji i zużycia paliwa.

Jak dotąd, najbardziej powszechnym sposobem spełnienia norm emisji jest zastosowanie katalizatora. W wielu krajach zostało to już ujęte w sposób normatywny – katalizator stał się obowiązkowym wyposażeniem silnika. Zapewnienie maksymalnej sprawności procesu oczyszczania spalin wymaga między innymi utrzymania stechiometrycznego składu mieszanki paliwowo-powietrznej oraz wstępnego obniżenia poziomu emisji na wejściu do katalizatora. Jeżeli połączymy to z coraz większym zainteresowaniem dotyczącym poziomu emisji CO₂, wymóg doskonalszej organizacji procesu spalania staje się oczywisty.

Prace teoretyczne zmierzające do poznania procesu spalania w silniku spalinowym oparte są na modelowaniu matematycznym badanych zjawisk. Weryfikacja opracowanych modeli i modelowanie bardziej złożonych przypadków spalania wymaga dokładnych wyników pomiarów parametrów procesu. Dlatego też rozwojowi modeli teoretycznych musi towarzyszyć rozwój nowoczesnych technik pomiarowo-diagnostycznych.

Wielkości sterujące silnikiem (w szczególności dawka paliwa, ilość mieszanki i kąt zapłonu) wraz z aktualnymi warunkami pracy silnika (prędkość obrotowa, stan cieplny, parametry powietrza) wywołują powstanie efektów pracy silnika. Współczesne systemy sterowania silników dokonują pomiaru efektów działania silnika w sposób pośredni (np. wyznaczenie wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ , czy pomiar spalania stukowego), co jest związane z takimi niekorzystnymi cechami pomiaru, jak zwłoka czasowa, bezwładność, uśrednianie wyników, skomplikowanie konstrukcji czujników pomiarowych.

Rozwiązaniem pozbawionym tych niekorzystnych cech jest bezpośrednia obserwacja procesu spalania, umożliwiająca prawidłowe i szybkie wpływanie na zmienne sterujące tak, aby zapewnić pożądane działanie silnika. Równolegle z technikami pomiarowymi zajmującymi się bezpośrednim badaniem procesu spalania, rozwijane są intensywnie metody pozwalające mierzyć, bardzo istotne z punktu widzenia sterowania silnikiem, efekty spalania – tj. skład gazów spalinowych. Wzrastające wymagania w tej dziedzinie, prowadzące do kontroli dynamicznych stanów pracy silnika, wymusiły opracowanie dokładnych metod pomiaru toksyczności, przy stałych czasowych umożliwiających praktycznie pracę w trybie *on-line* [25].

Rozwój systemów sterowania bazujących na pomiarach efektów pracy silnika realizowanych z cyklu na cykl narzuca, przed zastosowaniem jakiejkolwiek z metod stosowanych w badaniach procesu roboczego i toksyczności spalin, rozwiązanie poniższych problemów:

- wyznaczenia wystarczającego dla danych celów minimalnego czasu przetwarzania metody i urządzenia pomiarowego,
- sprawdzenia, czy inne techniki pomiaru (np. pomiar ciśnienia indykowanego) są w stanie dostarczyć żadaną informację z tą samą lub lepszą dokładnością.

W przypadku realizacji konkretnego celu badań, niezbędne jest określenie minimalnego czasu przetwarzania (maksymalnej częstości dokonywania pomiarów) aparatury pomiarowej. Klingenberg i Staab w swojej pracy [25] zaproponowali 4 kategorie pomiarowe:

1. Badania silników na stanowiskach hamownianych i badania pojazdów na hamowniach podwoziowych według określonych cykli jezdnych (ECE, US-FTP itp.). Pożądana częstość pomiarów: 1 Hz.
2. Badania silników przy zmianach składu mieszanki (uboga/bogata – regulacja składu λ), zmianach obciążenia, przy rozruchu. Częstość pomiarów: 10 Hz.
3. Badanie przez układ sterujący wpływu wielkości sterujących na dynamiczne reakcje silnika (np. pracę katalizatora). Częstość pomiarów 25 Hz.
4. Pomiary dokonywane z cyklu na cykl, wykorzystanie pomiaru do sterowania jako sygnału sprzężenia zwrotnego. Częstość pomiarów: 300 Hz.

Wybór odpowiedniej metody pomiarowej powinien zależeć od celu jej zastosowania. O wyborze metody i urządzenia pomiarowego decydują także poniższe czynniki:

- ilość mierzonych wielkości,
- sposób pomiaru: równoległy lub sekwencyjny,
- selektywność i czułość urządzenia pomiarowego,
- dynamiczny zakres pomiarów.

Tradycyjne (klasyczne) techniki pomiarowe zapewniały wyznaczenie własności termodynamicznych i stężenia niektórych związków chemicznych poprzez zastosowanie metod inwazyjnych badania procesu spalania. Inwazyjność metod polegała na pozyskiwaniu do badań próbek z wnętrza komory spalania, co wiązało się z zaburzeniem procesu roboczego. Techniki nowoczesne skupiają się na ilościowych, bezinwazyjnych pomiarach w czasie i przestrzeni, przy zapewnieniu dokładności pomiaru wielkości mierzonych technikami klasycznymi. Pomiary, obejmujące przestrzenno-czasowe przebiegi zmienności parametrów, stały się niezbędne w przypadku badań obejmujących spalanie turbulentne.

Do klasycznych technik badania procesu spalania zaliczyć można chromatografię gazową (CG) i spektrometrię masową (MS) [27, 45]. Techniki te sprawdzają się w przypadku związków stabilnych (CO_2 , H_2O , węglowodory). Metody te dostarczają danych o wielkości mierzonej, są jednak metodami inwazyjnymi i powodują często chemiczne, aerodynamiczne i termiczne zakłócenia płomienia. W pomiarach wysokotemperaturowych istotną staje się odporność termiczna czujników pomiarowych [23].

Większość metod bezinwazyjnych wykorzystywanych do badań procesu spalania to metody optyczne. Jako klasyczne można wymienić interferometrię, fotografię „schlieren”, metody zaciemniania błon i metody odbiciowe (deflekcyjne). Wszystkie te metody badają w różny sposób pole rozkładu współczynnika załamania światła (wiązeki) w płomieniu. W interferometrii i deflektometrii sygnał zależy bezpośrednio od współczynnika załamania i jego gradientu, co umożliwia pomiary jakościowe. Ponieważ współczynnik załamania zależy głównie od temperatury i składu płomienia, można określić dzięki temu ważne cechy makroskopowe. Techniki zdjęciowe używane są głównie do wizualizacji przepływów.

Inne klasyczne metody pomiarów optycznych oparte są na spektroskopii płomienia. Pomiary absorpcji i emisji umożliwiają ocenę jakościową związków w stanach podstawowych i wzbudzonych.

Rozwój laserów dużej mocy dał w efekcie kilka nowych, bezinwazyjnych metod pomiarowych. Do najważniejszych można zaliczyć metody oparte na zjawiskach spójnego rozproszenia Ramana (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering – CARS), rozpraszania samoistnego Ramana, rozpraszania Rayleigh'a i rozpraszania Mie i fluorescencji wzbudzonej laserowo (Laser Induced Fluorescence – LIF). Nieliniowa metoda CARS pozwala na określenie temperatur punktowych i zawartości związków chemicznych (o zawartości $> 1\%$). Zjawisko rozpraszania samoistnego Ramana wykorzystywane jest do punktowych pomiarów temperatury i składu chemicznego w płomieniach nie tworzących sadzy. Rozpraszanie Rayleigh'a umożliwia przestrzenne pomiary gęstości. Metoda LIF – jako najbardziej czuła – pozwala mierzyć temperaturę, ciśnienie, prędkość oraz wyznaczać skład chemiczny nawet z nanosekundową rozdzielczością [23]. Wykorzystanie laserowej anemometrii dopplerowskiej (LDV – Laser Doppler Velocimetry) pozwala na pomiary prędkości przepływu gazów w badanym ośrodku.

Jednym z aspektów spalania jest zapłon mieszaniny palnej. Do badań zapłonu iskrowego i spalania w silnikach spalinowych wykorzystuje się opisane wyżej metody, wymagane są jednak dodatkowe pomiary, charakteryzujące wyładowanie iskry i początek zapłonu. Do tych celów metody bezinwazyjne są bezsprzecznie najlepsze, nie tylko ze względów wcześniej wymienionych, lecz także dzięki temu, że pomiar tymi metodami nie podlega zakłóceniom elektrycznym, pochodzącym od świecy zapłonowej.

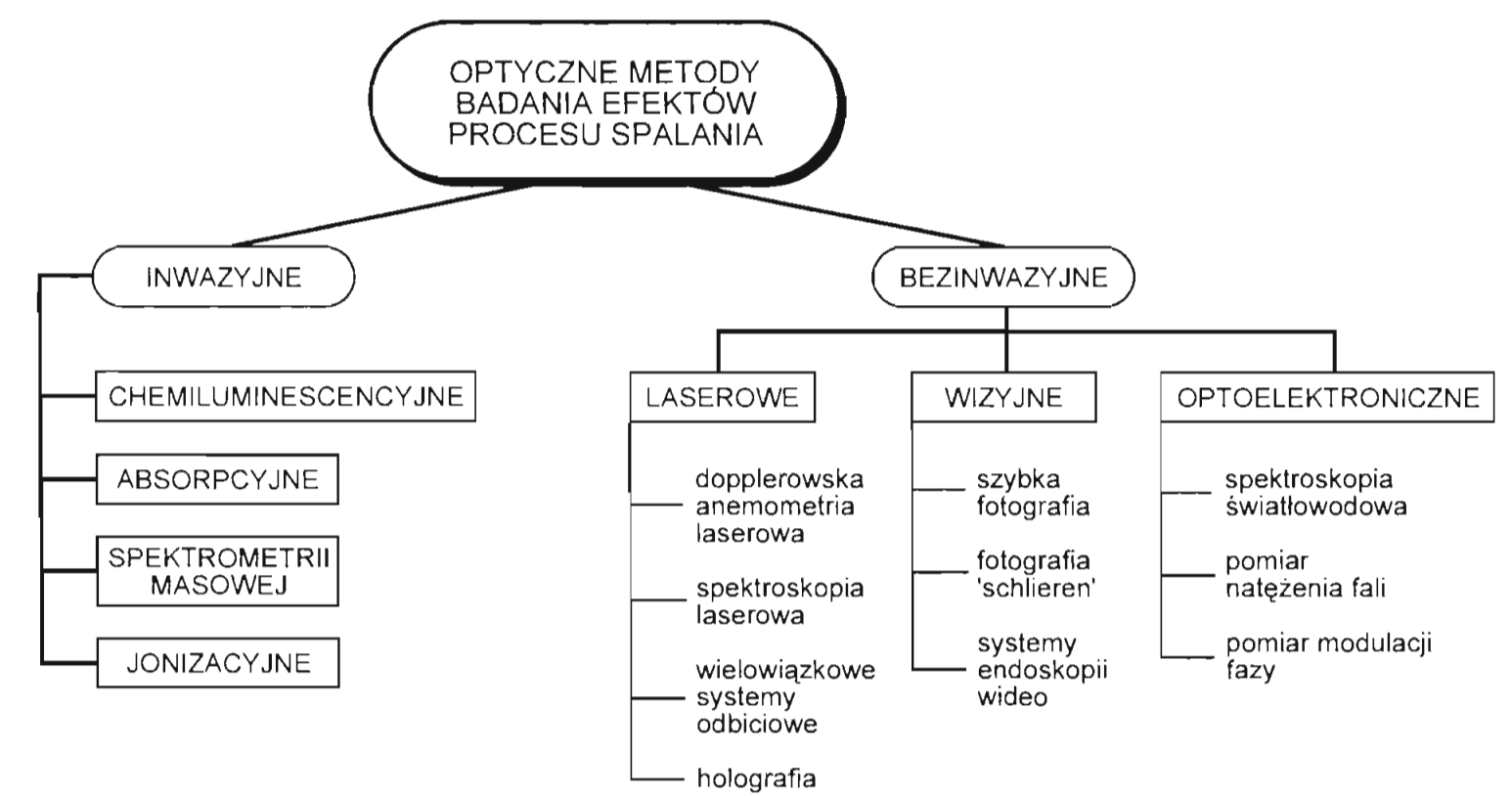
Pomiary składu gazów spalinowych stanowią jeden z najbardziej skutecznych sposobów oceny efektów prac nad optymalizacją procesu roboczego silnika, minimalizacją zużycia paliwa i redukcją emisji substancji toksycznych. Istnieje wiele różnorodnych metod pozwalających na uzyskanie dynamicznych (szybkozmiennych) informacji o składzie gazów spalinowych. Do najskuteczniejszych należą metody oparte na bezpośrednim próbkowaniu gazów z komory spalania. Nie pozwalają one jednak na ciągły pomiar stężeń. Stosowane są także bezpośrednie pomiary absorpcji w podczerwieni przez okna wykonane w cylindrze – wymaga to jednak specjalnego przystosowania silnika.

Z kolei pomiar składu gazów pozyskiwanych z kolektora wylotowego jest bardzo wygodnym sposobem śledzenia procesu spalania, ponieważ wymaga on jedynie prostych zmian konstrukcyjnych. Stosowane są różnego rodzaju „szybkie” analizatory:

- analizatory chemiluminescencyjne (CLA) mierzące NO_x,
- detektory jonizacyjno-płomieniowe (FID) mierzące HC,
- spektrometry absorpcyjne w podczerwieni, mierzące CO i CO₂:
 - niedyspersyjne (NDIR),
 - oparte o transformację fourierowską (FTIR),
 - wykorzystujące laserowe elementy półprzewodnikowe (diody),
- czujniki cyrkonowe wykrywające zawartość tlenu (sonda λ),
- spektrometry masowe.

Czasy próbkowania tych analizatorów nie pozwalają na pomiary zmienności cyklicznej. Istnieją szybkie metody FID, lecz umożliwiają pomiary jedynie HC, a konieczność zastosowania filtrów eliminuje je z pomiarów długookresowych.

Na tym tle bardzo korzystnie prezentują się metody optoelektroniczne wykorzystujące światłowody jako czujniki pomiarowe i elementy transmisyjne. Pozwalają one na obserwację przebiegu procesu spalania, przy czym uzyskiwany sygnał jest wrażliwy na zmiany składu gazów roboczych. Duże możliwości metrologiczne metod optoelektronicznych a jednocześnie niewrażliwość na zakłócenia oraz prostota konstrukcji, pozwalają przypuszczać, że w najbliższym okresie będą one szerzej rozwijane, doskonalone i zastosowane w sposób powszechny jako elementy elektroniki pojazdowej.



Rysunek 3.1. Podział optycznych metod badania efektów procesu spalania

Niniejszy rozdział jest próbą zestawienia współcześnie stosowanych wybranych optycznych metod pomiarowych służących do badania i diagnozowania procesu spalania w silniku oraz oceny składu gazów spalinowych w stanach dynamicznych, pozwalających na wykorzystanie wyników pomiarów przez układy sterowania silnikiem do identyfikacji i weryfikacji modeli spalania oraz we wszystkich tych zastosowaniach, gdzie niezbędny jest dokładny i szybki pomiar przebiegu procesu spalania i składu gazów spalinowych.

Zaproponowany podział metod przedstawiono na rysunku 3.1. W grupie optycznych metod inwazyjnych umieszczono przede wszystkim sposoby pomiaru toksyczności umożliwiające dokonywanie pomiarów dynamicznych. Większość z nich można uznać za pokrewne metod spektroskopowych.

Bezinwazyjne metody pomiarowe pogrupowano ze względu na główną zasadę pomiaru. W przypadku metod laserowych jest to przejście wiązki światła spójnego przez badany ośrodek; w metodach wizyjnych wykorzystywany jest zarejestrowany obraz obserwowanego procesu. Metody optoelektroniczne cechuje jednocześnie wykorzystanie światłowodu jako czujnika i elementu transmisyjnego. Taki podział oznacza, że w jednej grupie mogą się znaleźć metody mierzące bardzo różne wielkości, np. pomiary prędkości przepływu i składu gazów z wykorzystaniem techniki laserowej, czy pomiar ciśnienia i emisji świetlnej płomienia za pomocą czujników światłowodowych.

Tabela 3.1. Zestawienie możliwości pomiarowych optycznych metod badań procesu spalania

Wielkość mierzona	Grupa metod	Sposób pomiaru
ciśnienie	met. optoelektroniczne	• światłowód side-hole • pomiar modulacji fazy
temperatura	met. klasyczne	• met. dwubarwna • pirometria
	met. laserowe	• rozpraszanie Ramana (CARS) • rozpraszanie Mie
	met. optoelektroniczne	• pomiar natężenia emisji
strumień ciepła i masy	met. laserowe	• holografia
droga,	met. wizyjne	• zdjęcia • wideoendoskopia
położenie katowe	met. optoelektroniczne	• pomiar zmian natężenia • pomiar modulacji fazy
wizualizacja przepływów, prędkość ośrodka	met. laserowe	• anemometria LDV • holografia
	met. wizyjne	• endoskopia wideo
skład chemiczny	klasyczne metody inwazyjne	• chemiluminescencja • jonizacja płomieniowa FID • absorpcja w podczerwieni NDIR i metody pokrewne • spektroskopia masowa
	met. laserowe	• fluorescencja (LIF) • pomiar absorpcji sygnału diody laserowej
	met. optoelektroniczne	• pomiar natężenia emisji
mikrostruktura strugi	met. laserowe	• anemometria LDV • holografia

W tabeli 3.1 zgrupowano optyczne metody badania procesu spalania i składu gazów spalinyowych ze względu na rodzaj mierzonej wielkości. Istnienie wielu metod, opartych na różnych zasadach pomiaru, umożliwia wybór najbardziej odpowiedniej dla realizowanego celu badań, zarówno pod względem jakości wyników pomiarów, jak i kosztów ich uzyskania.

3.1. KLASYCZNE METODY OPTYCZNE

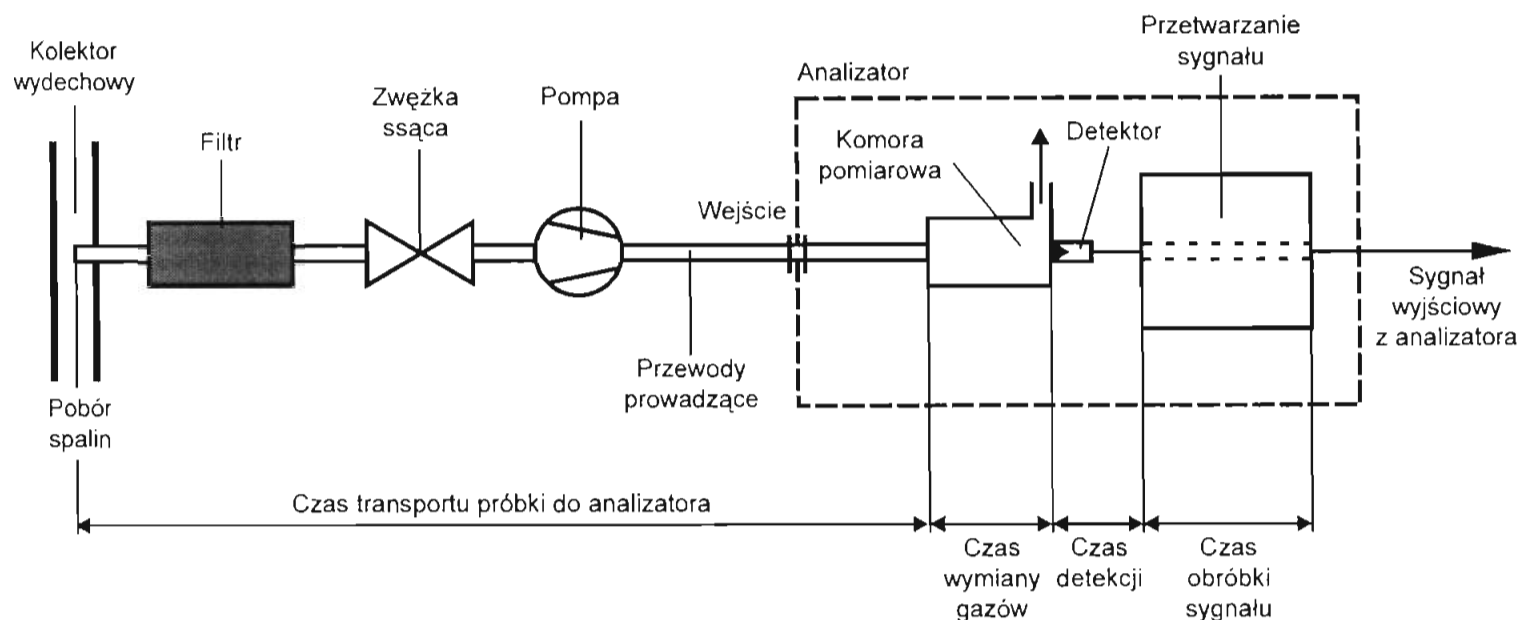
Optyczne metody badań efektów procesu spalania, których krótka charakterystyka zostanie zawarta w tym rozdziale, określone zostały mianem metod tradycyjnych – klasycznych. Skoncentrowano się na inwazyjnych metodach określania składu spalin silnika spalinowego, wykorzystujących w czasie realizacji pomiaru zjawiska optyczne (np. absorpcję). Szersza charakterystyka dostępna jest w bogatej literaturze, np. [6, 7, 27, 32, 44]. O zaszeregowaniu tych metod do grupy klasycznych technik pomiarowych zdecydowały poniższe elementy charakterystyczne:

- pomiar polega na określeniu dobrze znanych wielkości fizycznych,
- metody te są stosowane od dawna,
- technika wykonywania pomiarów została dobrze opanowana,
- urządzenia pomiarowe zbliżyły się do granic możliwości technologicznych,
- posiadają korzystne cechy metrologiczne (duża dokładność, powtarzalność wyników, czułość),
- metody posiadają ustaloną pozycję na rynku,
- relatywnie niski koszt aparatury pomiarowej (w porównaniu np. z metodami laserowymi) predysponuje je do zastosowania w badaniach podstawowych i diagnostyce warsztatowej.

Obecnie silnie zaznacza się dążenie do ciągłej obserwacji przebiegu procesu roboczego (w czasie rzeczywistym – *on-line*) i połączonego z tym sterowania silnikiem w dynamicznych stanach pracy – stanowi to o istocie rozwoju silników spalinowych. Jest z tym związana konieczność dysponowania aparatem pomiarowym o maksymalnych częstościach dokonywania pomiarów przekraczającym nawet 300 Hz [25]. Klasyczne metody pomiarowe wykorzystujące zjawiska optyczne (np. analizatory spalin FID, NDIR, chemoluminescencyjne CLA) pełnią istotną rolę w badaniach i diagnostyce, mimo że tylko niektóre z nich są w stanie spełnić tak wysokie wymagania.

Klasyczne sposoby fizycznej i chemicznej oceny gazów spalinowych wykorzystywane w analizatorach spalin związane są z koniecznością pozyskania próbki z kolektora wylotowego lub bezpośrednio z komory spalania. Inwazyjność zasady pomiaru narzuca ograniczenia związane z czasem wykonywania pomiaru, limitującym zakresy zastosowania analizatorów.

Na rys. 3.2 przedstawiono schematycznie elementy określające czas reakcji typowego analizatora spalin. Czas transportu próbki gazów do analizatora jest czasem „martwym” układu pomiarowego. Jego optymalizacja polega na tym, że gaz od punktu pobrania do komórki pomiarowej powinien zostać przekazany jak najszybciej, przy profilu koncentracji możliwie nie zmienionym. Obecnie uzyskiwane są częstości od 1 do 2 Hz. Rozwiązaniem niezależnym od rodzaju analizatora może być zastosowanie podciśnieniowego układu poboru gazów lub dokonywanie pomiarów bezinwazyjnie, tj. bezpośrednio w komorze spalania lub kolektorze wylotowym [25] przez odpowiednie okna.



Rysunek 3.2. Schematyczne przedstawienie elementów determinujących czas reakcji analizatora spalin [25]

Możliwości pomiarowe zależą także od rodzaju zastosowanego analizatora. W tabeli 3.2 zestawiono możliwości pomiarowe tradycyjnych metod optycznych analizy składu spalin. Dla porównania dołączono także metodę spektroskopową, wykorzystującą jako źródło podczerwieni diodę laserową (wykorzystanie tej metody opisano razem z pozostałymi metodami laserowymi w dalszej części pracy).

Tabela 3.2. Porównanie możliwości pomiarowych klasycznych metod analizy składu spalin [25]

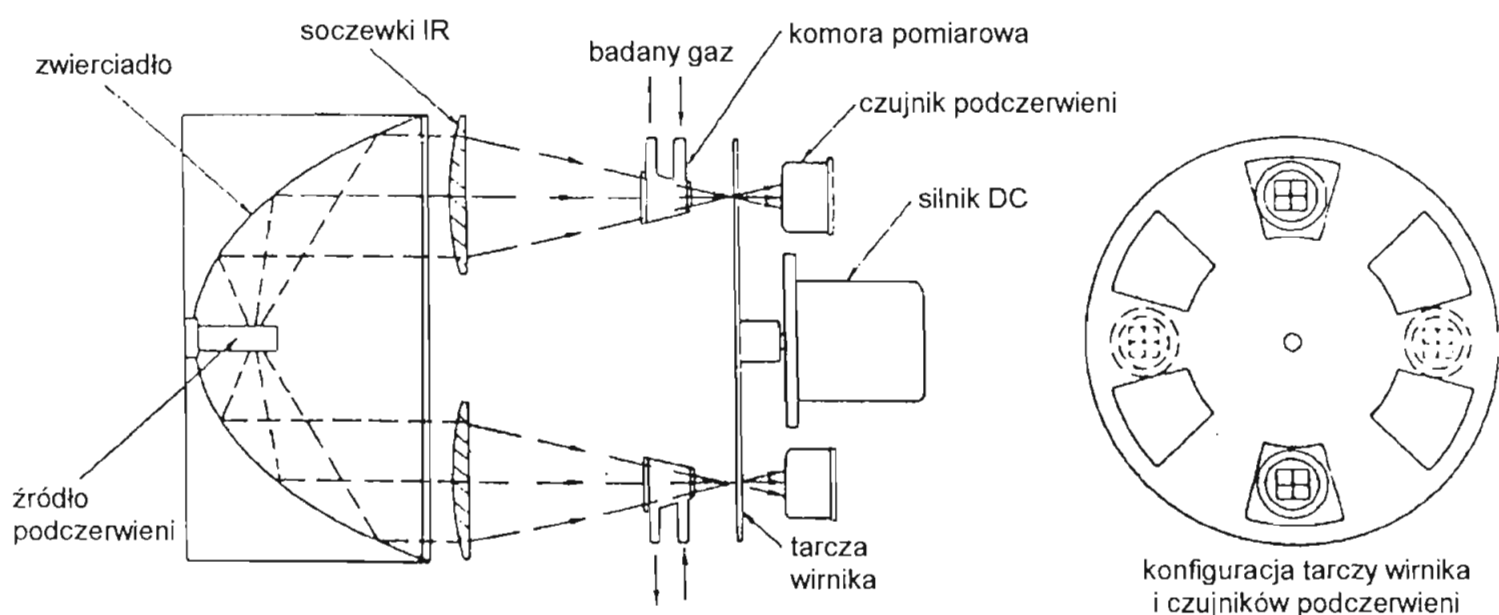
Analizator	Oznaczone składniki	Częstość pomiarów	Rozdzielczość	Wstępna ocena
chemoluminescencyjny CLA	NO	10 Hz	1 ppm	dobra
płomieniowo-jonizacyjny FID	Σ HC	10 Hz	1 ppm	dobra
niedyspersyjny NDIR	CO, CO ₂	10 Hz	kilka ppm	dobra
absorpcyjny z wyk. transf. Fouriera FTIR	do 20 różnych składników	ok. 1 Hz	kilka ppm	dobra w fazie prototypu
spektrometr masowy Quadrupol-MS	do 20 różnych składników	1 składnik – 100 Hz wiele składników > 10 Hz	1–100 ppm	zadowalająca
spektrometr masowy TOF-MS	do 20 różnych składników	> 100 Hz	nie określona	w stadium badań laboratoryjnych
absorpcyjny z laserowym źródłem podczerwieni	do 6 składników	1 składnik – 1 kHz wiele składników > 100 Hz	kilka ppm	dobra

Mając na uwadze zaproponowany w pracy [25] podział na grupy pomiarów, dokonany ze względu na minimalny czas przetwarzania, wydaje się, że obecnie stosowane klasyczne techniki pomiarowe posiadają silną pozycję w grupie badań wymagających częstości pomiaru rzędu 1 Hz (badania toksyczności w cyklach jezdnych) oraz w grupie badań regulacyjnych (skład mieszanki, zmiany obciążenia, rozruch) o częstości pomiarów do 10 Hz. Natomiast dynamiczny rozwój nowych metod, opartych na technice laserowej czy światłowodowej, zmierza do opanowania pomiarów szybkich, o częstości od 25 do 300 Hz, związanych z zastosowaniami do sterowania silnikiem.

Oczywiście, uznanie metody za klasyczną nie oznacza, że nie doskonalili się jej i nie przystosowuje do realizacji pomiarów dynamicznych.

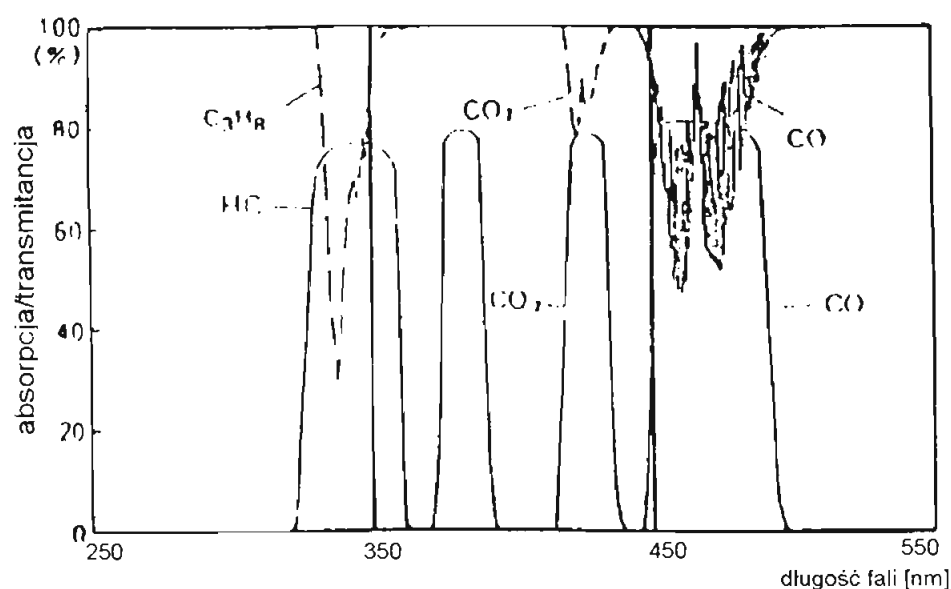
Przykładem optymalizacji konstrukcji klasycznego analizatora spalin mogą być prace Miyatake i wsp. opisane w [33]. Autorzy opracowali analizator typu NDIR umożliwiający ocenę składu spalin podczas pracy silnika w warunkach nieustalonych. Czas odpowiedzi analizatora wynosi 30 ms (częstość pomiarów rzędu 33 Hz), umożliwia on równoczesne pomiary koncentracji CO, CO₂ i HC.

Wprowadzone modyfikacje obejmowały głównie układ poboru gazów oraz czujnik podczerwieni. Autorzy skonstruowali układ wyposażony w 4 niezależne czujniki podczerwieni zespolone z filtrami do oznaczania CO, CO₂, HC i poziomu odniesienia. Długości fal i szerokości pasma przepuszczalności filtrów zostały dobrane tak, aby otrzymać maksymalną czułość i minimalne wzajemne nakładanie pasm. Połączenie pojedynczej komory pomiarowej i wieloelementowego czujnika podczerwieni pozwoliło na jednoczesny pomiar CO, CO₂ i HC oraz obliczanie współczynnika nadmiaru powietrza w czasie rzeczywistym. Tarcza czujnika obraca się z częstotliwością 1000 Hz, komora pomiarowa ma objętość tylko 0,2 cm³, co umożliwia wymianę gazów w ciągu 6 ms. Ogólny schemat budowy układu optycznego analizatora przedstawiono na rysunku 3.3. Uzyskany sygnał poddawany jest obróbce elektronicznej (filtracja zakłóceń, wzmacnienie, porównanie z sygnałem wzorcowym).

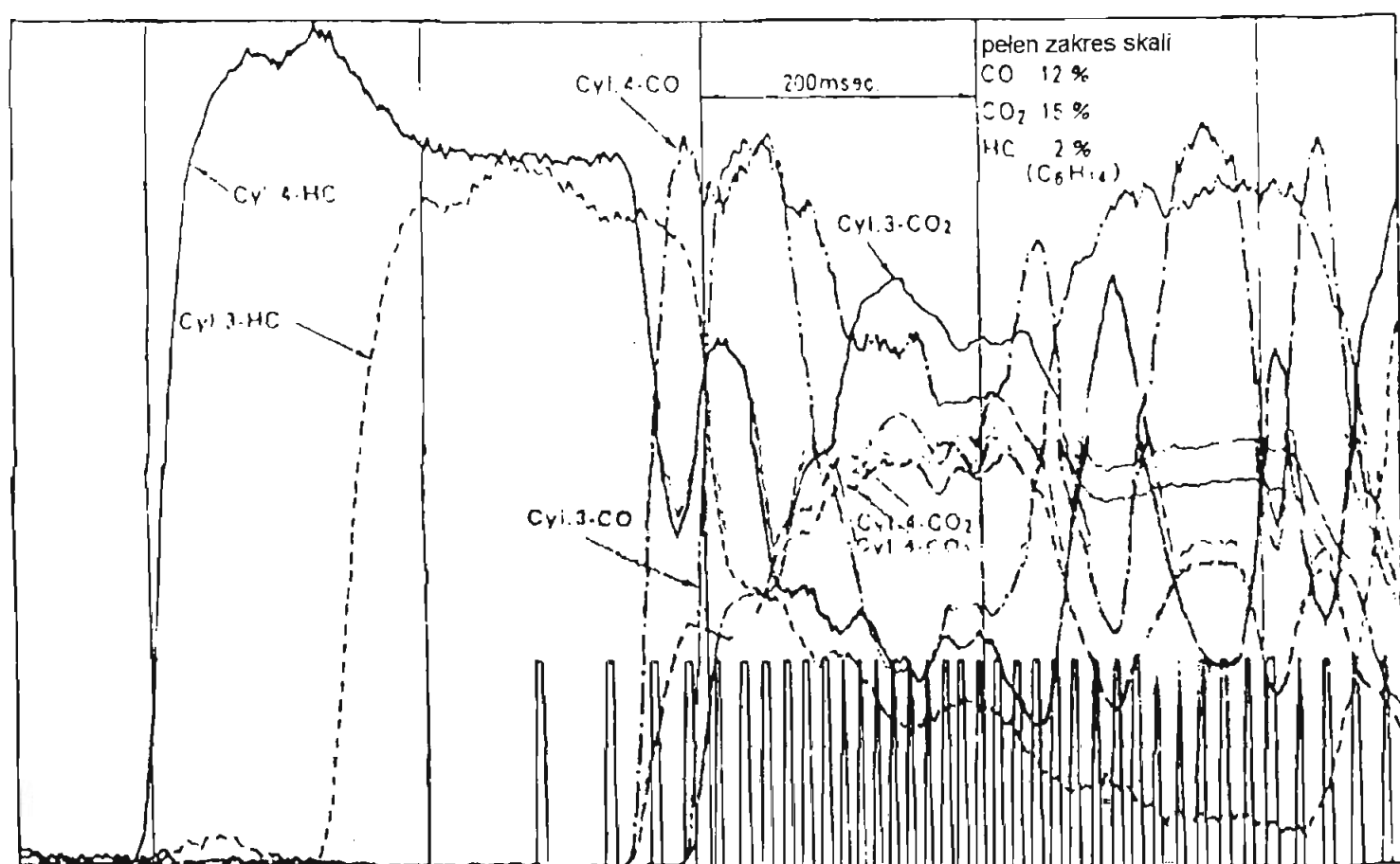


Rysunek 3.3. Schemat budowy szybkiego analizatora NDIR [33]

Chcąc określić możliwości pomiarowe analizatora, autorzy poddali badaniom 4 cylindrowy silnik motocyklowy o pojemności skokowej 400 cm³, wyposażony w oddzielne kolektory wylotowe dla każdego z cylindrów. Spaliny do analizy próbkowano bezpośrednio za zaworem wylotowym. Spektrum absorpcyjne CO, CO₂ i C₃H₈ oraz transmitancja zastosowanego układu filtrów przedstawiono na rys. 3.4. Zmierzone zmiany koncentracji gazów w dwóch sąsiednich cylindrach zarejestrowane podczas rozruchu silnika przedstawiono na rysunku 3.5. Widoczny jest, charakterystyczny dla rozruchu, wzrost stężenia węglowodorów wyprzedzający CO i CO₂.



Rysunek 3.4. Widmo absorpcji CO, CO₂ i C₃H₈ oraz transmitancja zastosowanego układu filtrów [33]



Rysunek 3.5. Zmierzone koncentracje CO, CO₂ i HC w dwóch cylindrach podczas rozruchu silnika [33]

Uzyskany czas transportu próbki gazów rzędu 100 ms oraz czas reakcji układu pomiarowego rzędu 30 ms pozwalają na zastosowanie analizatora do pomiarów zmian toksyczności w obrębie jednego cyklu pracy silnika wielocylindrowego. Dodatkową zaletą prezentowanego analizatora jest możliwość jednoczesnego pomiaru do czterech różnych składników oraz równoczesnej i niezależnej rejestracji zmian składu spalin zachodzących w poszczególnych cylindrach.

Zaprezentowane rozwiązanie – szybki analizator NDIR – mimo swych zalet, potwierdza wcześniejsze wnioski, dotyczące ograniczonych możliwości rozwojowych klasycznych urządzeń pomiarowych ze względu na minimalny czas przetwarzania sygnału i dokładność uzyskiwanych wyników. Szansą są prezentowane w dalszej części metody wykorzystujące technikę laserową oraz optoelektronikę.

3.2. METODY LASEROWE

W ostatnich latach można zaobserwować szybką ekspansję laserowych metod pomiarowych w badaniach i diagnostyce silników spalinowych. Dotyczy to zwłaszcza badań procesów tworzenia i spalania mieszanki, przepływów gazów oraz analizy pól temperatur i składu chemicznego. Metody oparte na wykorzystaniu koherentnego światła lasera posiadają wiele zalet. Są to przede wszystkim: bezinwazyjność, wysoka czułość i selektywność, możliwość wykonywania pomiarów w czasie rzeczywistym z dobrą rozdzielczością czasową. Informacje przekazywane przez wiązkę laserową są zakodowane w modulacji fazy, amplitudzie, częstotliwości i rozproszeniu. Przeważnie nie dochodzi do oddziaływań termicznych z badanym ośrodkiem. Większość stosowanych metod laserowych pozwala na jedno- lub dwuwymiarowe skorelowanie danych z pojedynczego pomiaru. Jest to szczególnie ważne w tak złożonych systemach, jak silniki spalinowe, gdzie występują duże wahania cykliczne.

Obecnie, zastosowanie metod laserowych do badań silników spalinowych jest jeszcze ograniczone i stosunkowo nowe. W pomiarach należy pokonać liczne problemy, takie jak np. uzyskanie optycznego dostępu do komory spalania, eliminacja szumów tła, osadzanie zanieczyszczeń, zmiana właściwości optycznych badanego ośrodka wskutek zmian temperatury i składu chemicznego w wyniku spalania, czy też właściwa wibroizolacja elementów optycznych od silnika. Warto zwrócić uwagę na fakt, że w tym ostatnim przypadku perspektywnym rozwiązaniem może być wykorzystanie techniki światłowodowej. Silnik i optyczne układy pomiarowe łączy się światłowodami, co umożliwia dostateczne oddalenie elementów optycznych od silnika i skuteczną eliminację zakłóceń.

Zastosowanie metod laserowych do badań na pracującym silniku spalinowym związane jest z wysokimi kosztami aparatury i prowadzenia eksperymentu. Ponadto konieczna jest specjalizacja badaczy, którzy powinni doskonale znać zarówno zagadnienia silnikowe i przepływowe oraz problematykę techniki laserowej i optyki.

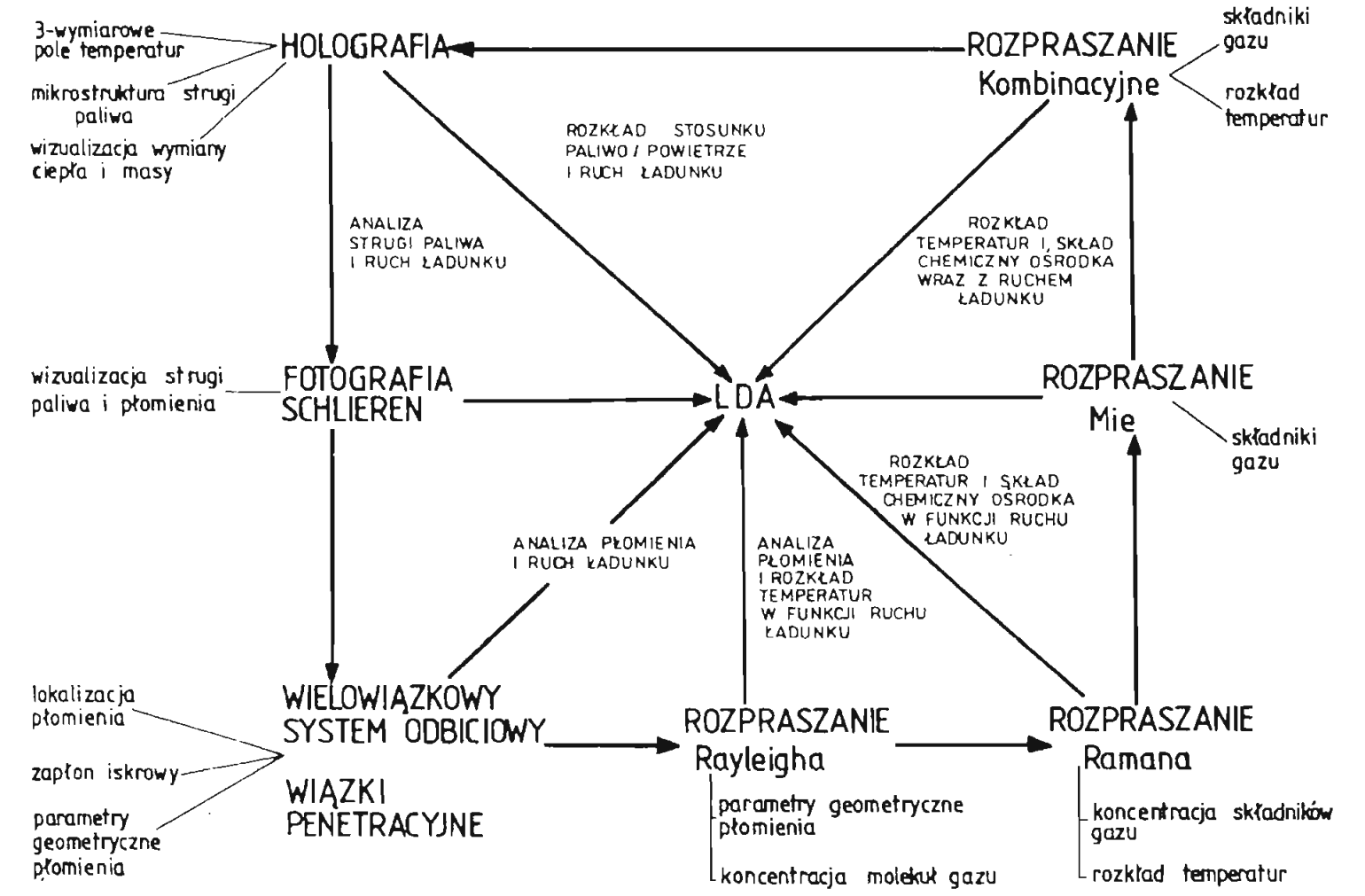
Z punktu widzenia techniki eksperymentu, za najlepiej opanowane w badaniach silników spalinowych należy uznać metody [71]:

- dopplerowskiej anemometrii laserowej (LDV – Laser Doppler Velocimetry),
- fotografii schlieren,
- holografii laserowej,
- laserowe metody spektroskopowe oparte o zjawiska rozpraszania (Ramana, Rayleigha, Mie, kombinacyjne) i fluorescencji (LIF – Laser Induced Fluorescence),
- wielowiązkowe systemy odbiciowe i wiązki penetracyjne.

Dokładne opisy poszczególnych metod znaleźć można w bogatej literaturze specjalistycznej, szczególnie warta polecenia jest przeglądowa praca [71].

Zastosowanie metod laserowych w badaniach procesu przygotowania mieszanki i spalania pozwala na pomiar szeregu zjawisk i wielkości: przepływowych, termodynamicznych i fizy-

- kochemicznych (niestety, w większości tylko w badaniach laboratoryjnych). Do najważniejszych można zaliczyć [71]:
- składowe ortogonalne wektora prędkości przepływu ładunku,
 - chwilowe i średnie wartości prędkości przepływu,
 - intensywność turbulencji,
 - zawirowanie ładunku,
 - rozwój i penetrację strugi,
 - mikrostrukturę strugi i dynamikę kropeł,
 - wystąpienie zapłonu i samozapłonu,
 - inicjację, rozwój i penetrację płomienia,
 - parametry geometryczne płomienia,
 - rozkład pól temperatur,
 - skład chemiczny gazów w komorze spalania.



Rysunek 3.6. Możliwości pomiarowe laserowych metod połączonych [71]

Tworzenie mieszanki i jej spalanie określone jest przez wiele wzajemnie na siebie wpływających zjawisk i procesów. Ich badanie metodami laserowymi nie pozwala jednak na określenie wzajemnego oddziaływania i wpływu efektu wypadkowego na proces spalania w ogólności. Stąd też istotna staje się możliwość łączenia poszczególnych metod laserowych i ich jednoczesne stosowanie na pracującym silniku. W pracach [70, 71] łączenie laserowych metod pomiarowych określono jako laserowe metody połączone. Ich tworzenie daje możliwość podjęcia problemów badawczych, niemożliwych do rozwiązania za pomocą metod konwen-

cjonalnych, zwłaszcza w zakresie złożonych procesów i ich wzajemnych oddziaływań. Podstawą metod połączonych jest anemometria laserowa, uzupełniana innymi metodami. Możliwości pomiarowe laserowych metod połączonych przedstawiono na rysunku 3.6.

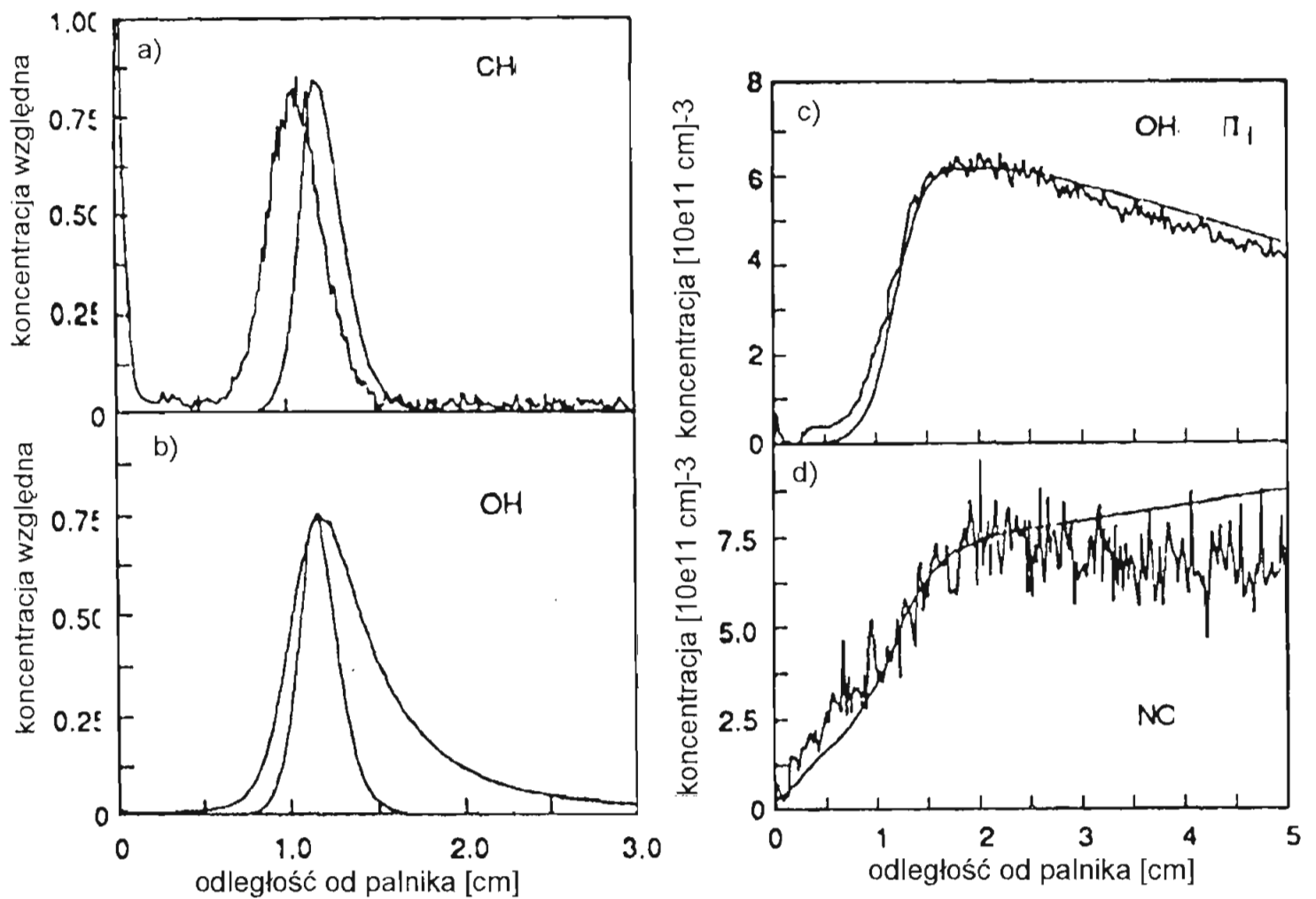
Pozycja centralna anemometrii jest uzasadniona tym, że przebieg podstawowych zjawisk charakteryzujących warunki tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej i spalania bezpośrednio zależy od ruchu ładunku wewnątrz cylindra. Na schemacie z rys. 3.6 uwzględniono jedynie niektóre zagadnienia kompleksowe: rozpylenie paliwa, płomień, skład chemiczny i temperaturę ośrodka. Oczywiście nie można uważać metod laserowych za uniwersalny sposób na rozwiązanie wszystkich problemów badawczych.

Poniżej zaprezentowane zostaną wybrane przykłady zastosowania laserowych metod pomiarowych w badaniach procesu spalania, uzupełnione krótkimi komentarzami dotyczącymi interpretacji uzyskanych wyników.

Wykorzystanie wyników optycznych badań spalania dla pełniejszego zrozumienia kinetyki reakcji chemicznych zachodzących w trakcie procesu zostało przedstawione przez Smitha i Crosleya w pracy [54]. Autorzy wyróżnili kilka obszarów zastosowań, w których diagnostyka laserowa może pomóc w realizacji złożonych obliczeń chemicznych. Pierwszy i najważniejszy to możliwość wykonania pomiarów weryfikujących mechanizmy kinetyczne i model procesu. Jako procedura interaktywna – diagnostyka laserowa może służyć do wykrywania istniejących tendencji. Niektóre pomiary (np. temperatury) mogą być danymi wejściowymi do obliczeń. Ponieważ często trudno jest określić bezpośrednio wielkość strat ciepła, porównanie wyników eksperymentu i modelu może mieć kolosalne znaczenie. Jakkolwiek realizacja obliczeń kinetyki chemicznej wymaga już na wstępie uproszczeń modelu. Wykonanie obliczeń i porównanie ich z rezultatami pomiarów metodami laserowymi daje pewność o słuszności przyjętych założeń.

W omawianym artykule zrelacjonowano powiązania między metodą laserowo wywoływanej fluorescencji (LIF) i modelowaniem chemicznym na przykładzie badań nad powstawaniem NO podczas spalania niskociśnieniowego. Dokonano także kinetycznej interpretacji pomiarów chemiluminescencyjnych.

Mierzono przestrzenne rozkłady H, OH, HC i NO w płomieniu powietrza i metanu. Celem było zbadanie chemicznych aspektów zapłonu oraz chemii powstawania pierwotnego NO (ang. prompt NO). Ponieważ przy niskociśnieniowym spalaniu zarówno długości fal wzbudzenia i fluorescencji są spektroskopowo charakterystyczne dla określonych związków, metoda LIF oferowała w tym przypadku doskonałą rozdzielczość. Przeprowadzono analizę czułości, obejmującą określenie względnych zmian w koncentracji badanego składnika, przy zróżnicowanej odległości palnika i uwzględnieniu zmian współczynnika prędkości reakcji. Ograniczone pomiary laserowe w komorze spalania wykazały duże wahania przestrzenne i cykliczne.

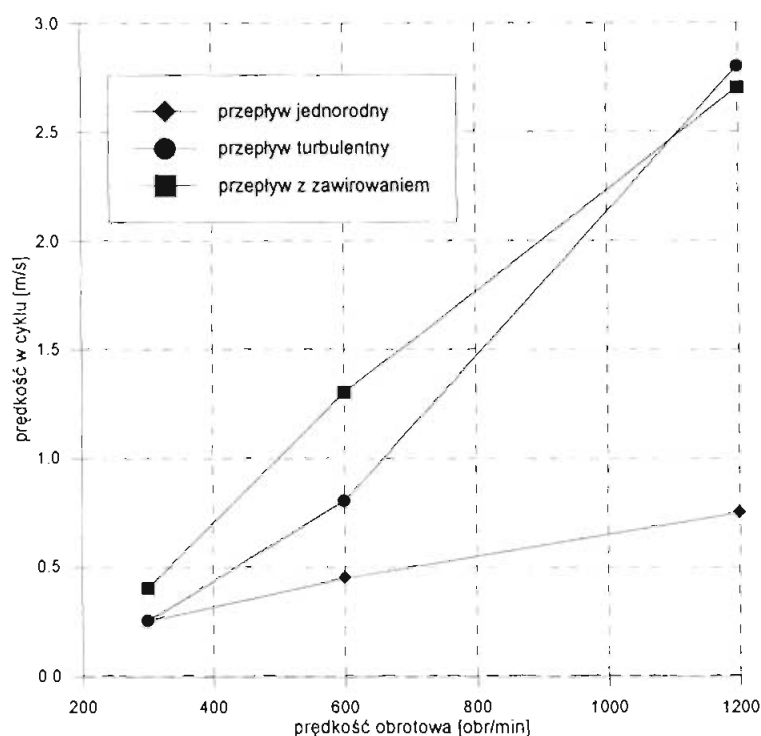


Rysunek 3.7. Zmierzone i obliczone koncentracje HC (a), OH (b), OH(A) (c) i NO (d) dla niskociśnieniowego spalania metanu w powietrzu [54]

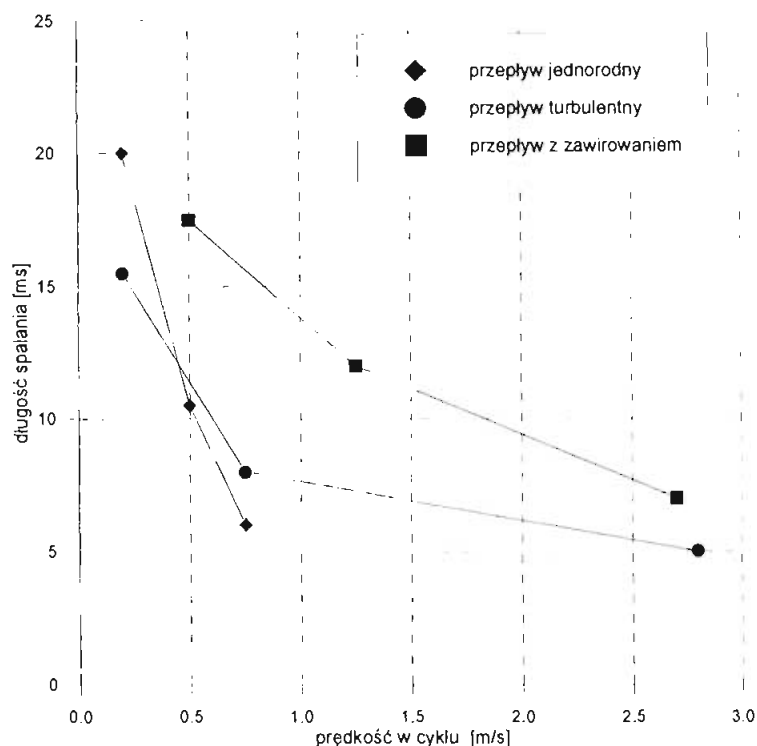
Określono profile koncentracji dla OH, NO i HC w zależności od odległości od powierzchni palnika, wyznaczono także profil temperatury (rys. 3.7). Dla porównania naniesiono także odpowiednie wyniki obliczeń modelu spalania. Widać dużą zgodność pomiarów i obliczeń dla OH – chemia utleniania została zamodelowana poprawnie. Natomiast obliczony przebieg koncentracji HC wykazuje istotne przesunięcie w stosunku do wyników eksperymentu, co świadczy o niedoskonałości założeń modelu, dotyczących powstawania i rozpadu cząstek HC. Ponieważ HC jest mniej ważnym związkiem powstającym w konwersji chemicznej HC_4 do CO_2 i H_2O , prędkość utleniania i wywiązywanie ciepła mogą być wyznaczone bez dokładnej znajomości stężeń HC. Profil NO został określony poprawnie.

Witze i in. [72] w trakcie badań nad rozwojem jądra płomienia, wykonywanych za pomocą światłowodowego czujnika spalania (badania te opisane zostaną szerzej w rozdziale omawiającym metody światłowodowe badań procesu spalania), równolegle dokonywali pomiarów prędkości gazów w szczelinie świecy zapłonowej za pomocą dopplerowskiej anemometrii laserowej (LDV). Pomiary wykonywano na jednocylindrowym silniku badawczym, wyposażonym w dwa okna umożliwiające optyczny dostęp do komory spalania.

Wyniki pomiarów średniej prędkości gazów w obrębie jednego cyklu w zależności od prędkości obrotowej silnika przedstawiono na rys. 3.8. Wyraźna jest liniowa zależność z niewielkimi odchyleniami w przypadku przepływu o silnym zawirowaniu.



Rysunek 3.8. Zmiany średniej prędkości gazów w obrębie jednego cyklu w zależności od prędkości obrotowej silnika [72]



Rysunek 3.9. Zmiany długości spalania w zależności od średniej prędkości gazów w cyklu [72]

Wpływ średniej prędkości gazów w cyklu na długość spalania ilustruje z kolei rys. 3.9. W tym przypadku dość zaskakujący ma przebieg krzywej dla spalania ładunku z zawirowaniem. Ogólnie bowiem przyjmuje się, że ruch wirowy mieszanki skraca, a nie wydłuża czas spalania w określonym zakresie prędkości obrotowych silnika. Uzasadnieniem tych rozbieżności może być niereprezentatywność zmierzonej prędkości gazów w szczelinie świecy wobec całej masy ładunku.

Metody pomiarowe wykorzystujące monochromatyczną wiązkę światła znajdują także zastosowanie w badaniach składu chemicznego gazów wylotowych. Jest to wynik stale wzrastających wymagań dotyczących badania chwilowych stanów pracy silnika a więc i możliwości dokonywania pomiarów w trybie *on-line* lub z minimalną rozdzielczością czasową – czego w przypadku pomiaru toksycznych składników spalin klasyczne analizatory nie są w stanie zapewnić.

Nitzschke i Wolf w pracy [35] opisali metodę pomiaru toksycznych składników spalin, pozwalającą na dokonywanie pomiarów koncentracji gazów z rozdzielczością czasową rzędu 3 ms, a więc wielokrotnie w czasie jednego cyklu pracy silnika. Metoda ta wykorzystuje spójny sygnał świetlny emitowany przez diodę laserową i jest szczególnie przydatna w badaniach nad optymalizacją pracy silnika w stanach nieustalonych.

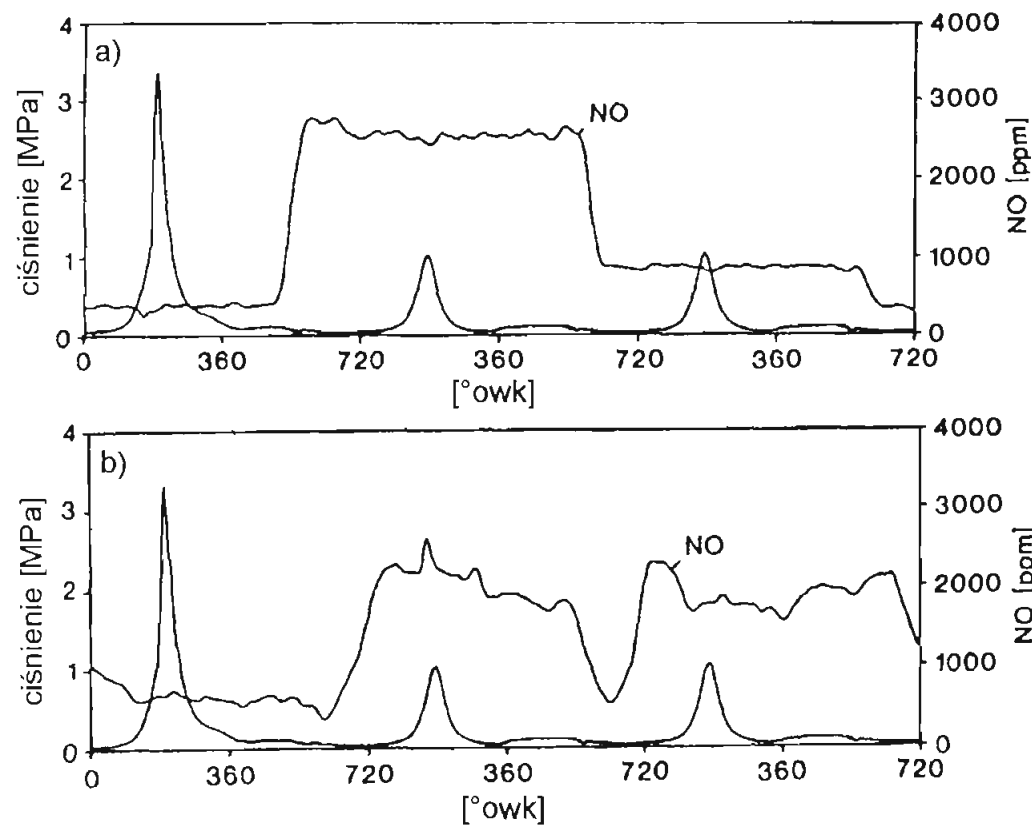
Pomiar koncentracji cząstek w tej metodzie opiera się na spektroskopii w obszarze bliskiej podczerwieni. W zakresie długości fal od 300 nm do 2000 nm wszystkie ważniejsze składniki gazów wydechowych posiadają silne linie absorpcyjne. W przeciwieństwie do konwencjonalnych metod spektroskopowych o szerokim oknie pomiarowym, zastosowanie diody laserowej o emisji światła w wąskim paśmie, daje możliwość dokonania pomiarów selektywnych, o dużej czułości i niewielkiej stałej czasowej.

Podstawą pomiaru, analogicznie jak w konwencjonalnych analizatorach absorpcyjnych, jest osłabienie sygnału promieniowania podczerwonego przez charakterystyczną absorpcję cząstek badanego gazu. Układ pomiarowy składa się z czterech podstawowych modułów: lasera, zespołu filtrów, modułu pomiarowego i modułu odniesienia (z gazem wzorcowym). Moduł lasera wyposażony jest w cztery diody laserowe, dające promieniowanie o długości fali charakterystycznej dla mierzonego składnika. Zmiana rodzaju mierzonego gazu wymaga wymiany zestawu diód. Zastosowany monochromator umożliwia poszukiwanie właściwych linii absorpcyjnych i filtrację w trakcie pomiarów. Układ pomiarowy jest niewrażliwy na zmiany ciśnienia i temperatury w punkcie pomiaru – kolektorze wylotowym. Możliwości pomiarowe analizatora laserowego ilustruje tabela 3.3.

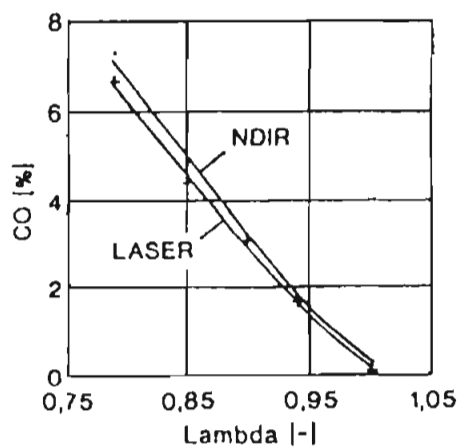
Tabela 3.3. Dane techniczne analizatora spalin z diodą laserową [35]

Gaz	Zakres pomiarów	Czułość
NO	0÷10%	200 ppm
CO	0÷50%	500 ppm
	0÷1%	30 ppm
CO ₂	0÷16%	300 ppm
Czas przetwarzania T ₁₀ /T ₉₀ : 3 ms		Czas próbkowania (1,2 m): 18 ms

Aby sprawdzić przydatność urządzenia do oceny toksyczności, autorzy wykonali pomiary na jednocyldrowym silniku badawczym o zapłonie iskrowym. Na rysunku 3.10 przedstawiono zmierzoną koncentrację NO oraz przebieg ciśnienia w komorze spalania. Porównanie obu wykresów wykazuje duże różnice w poziomie i przebiegu koncentracji NO. Widoczna niejednorodność struktury emisji NO w obrębie jednego cyklu spowodowana jest zmianami temperatur w czasie spalania, natomiast widoczną zależność jakości uzyskanych pomiarów od odległości od zaworu wylotowego należy uznać za niedoskonałość metody.



Rysunek 3.10. Pomiary stężenia NO przy chwilowym przerwaniu zapłonu: (a) pobór próbki 11 cm za zaworem wylotowym, (b) 70 cm; prędkość obrotowa silnika 1500 obr/min [35]

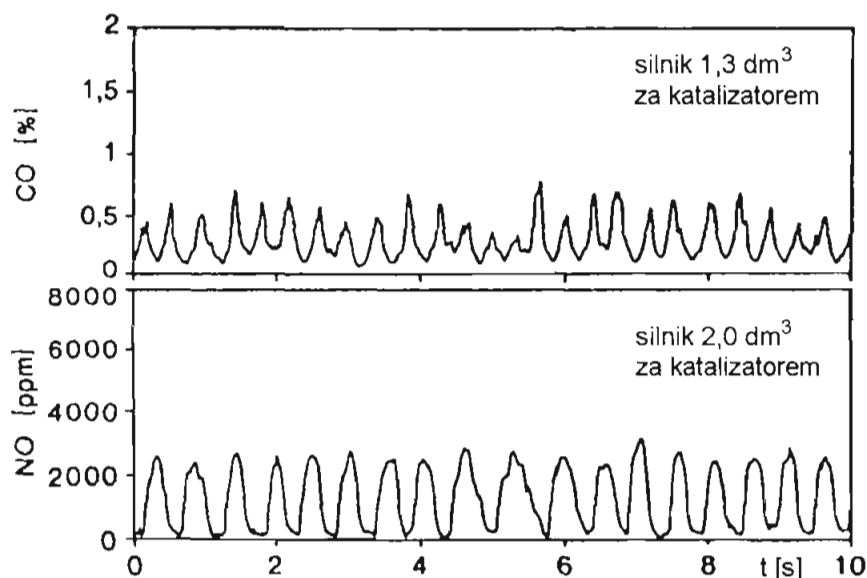


Rysunek 3.11. Porównanie pomiarów CO analizatorem typowym NDIR i analizatorem z diodą laserową [35]

Autorzy porównali także stężenia CO zmierzone za pomocą konwencjonalnego analizatora NDIR oraz analizatora z diodą laserową (LED). Ze względu na długi czas pomiaru analizatora NDIR, porównanie zostało wykonane dla 4-cylindrowego silnika pracującego w stanie ustalonym, przy zmieniającym się współczynniku składu mieszanki λ (rys. 3.11).

Duża prędkość przetwarzania analizatora laserowego umożliwia obserwację wpływu regulacji składu mieszanki w silnikach wyposażonych we wtrysk elektroniczny i katalizator na poziom emisji za katalizatorem.

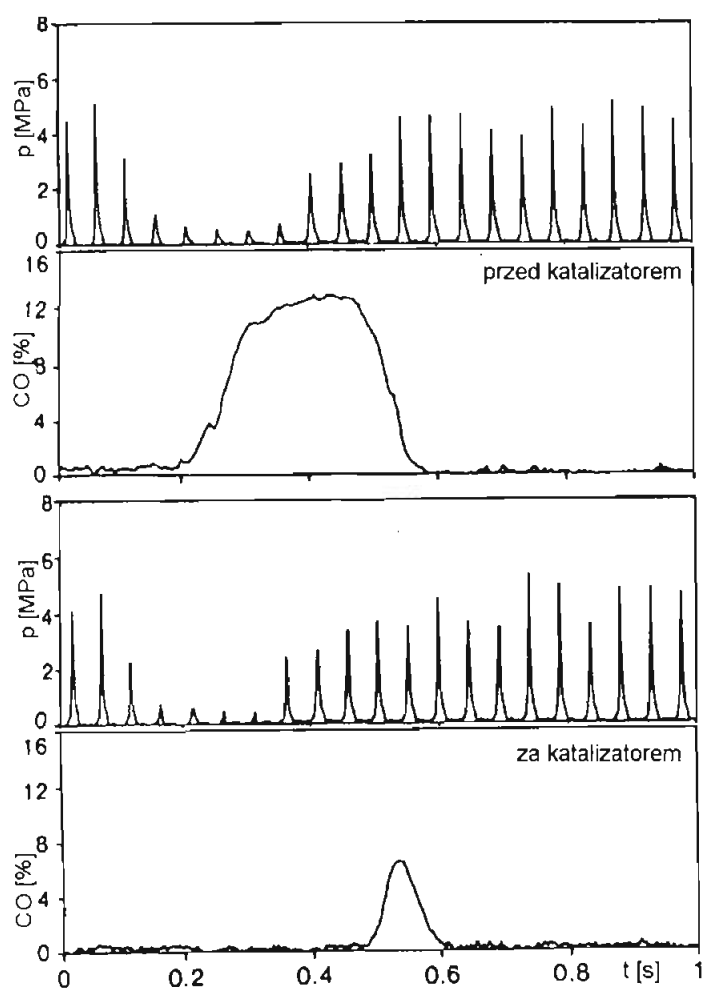
Wyniki badań dwóch silników przedstawiono na rys. 3.12, na którym widoczne są regularne wahania poziomu CO i NO – wynik działania układu sterowania. W przypadku silnika o $V_{ss} = 1,3 \text{ dm}^3$, poziom NO był niewykrywalny, regulacja λ odbywała się w obszarze mieszanek bogatych, z kolei w przypadku silnika o $V_{ss} = 2,0 \text{ dm}^3$ nie stwierdzono obecności CO – w wyniku regulacji λ w zakresie mieszanek ubogich.



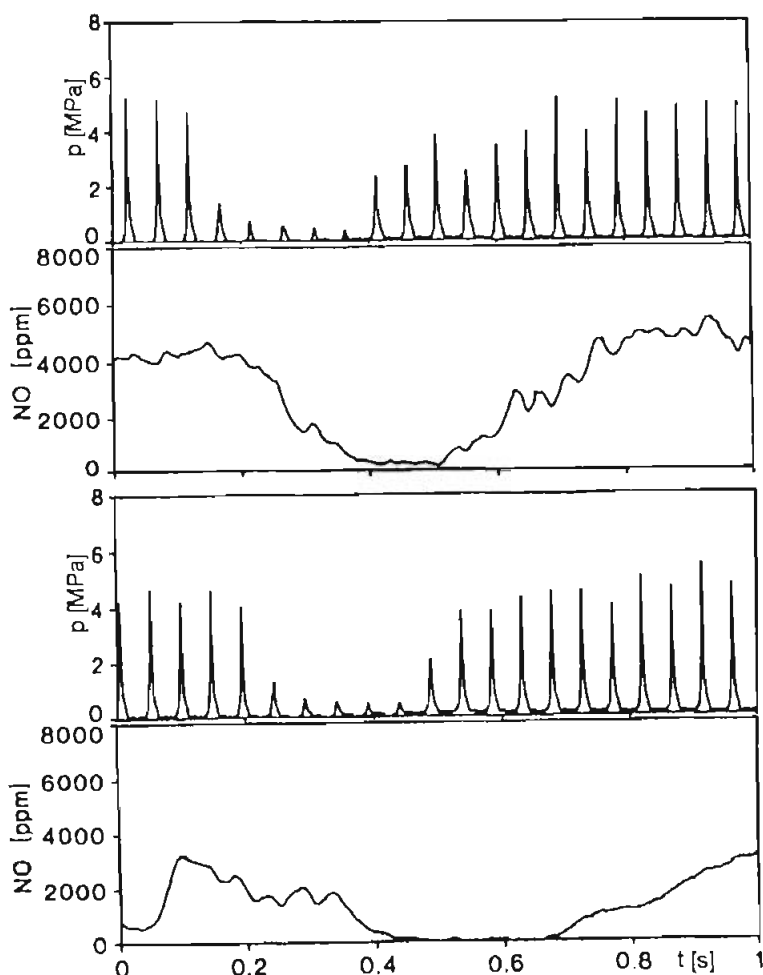
Rysunek 3.12. Szybkie pomiary emisji CO i NO za katalizatorem dla dwóch silników ($1,3$ i $2,0 \text{ dm}^3$), pracujących z prędkością obrotową 2500 obr/min [35]

Możliwość wykonywania badań w stanach dynamicznych potwierdza wysoką klasę urządzenia. Autorzy dokonali porównania koncentracji CO i NO zmierzonych przed i za katalizatorem, przy gwałtownej zmianie obciążenia silnika polegającej na gwałtownym przymknięciu i otwarciu przepustnicy (rys. 3.13 i 3.14).

W przypadku CO widoczny jest wzrost koncentracji aż do 12% wskutek chwilowego spadku współczynnika λ do wartości 0,67. Przesunięcie fazowe maksymalnych zawartości CO przed i za katalizatorem jest wynikiem akumulacyjnego działania katalizatora. Nagłe wzbogacenie mieszanki spowodowało natomiast obniżenie poziomu NO, za katalizatorem stężenie NO było niemierzalne.



Rysunek 3.13. Pomiar emisji CO przed (a) i za katalizatorem (b) w trakcie dynamicznych zmian obciążenia silnika [35]



Rysunek 3.14. Pomiar emisji NO przed (a) i za katalizatorem (b) w trakcie dynamicznych zmian obciążenia silnika [35]

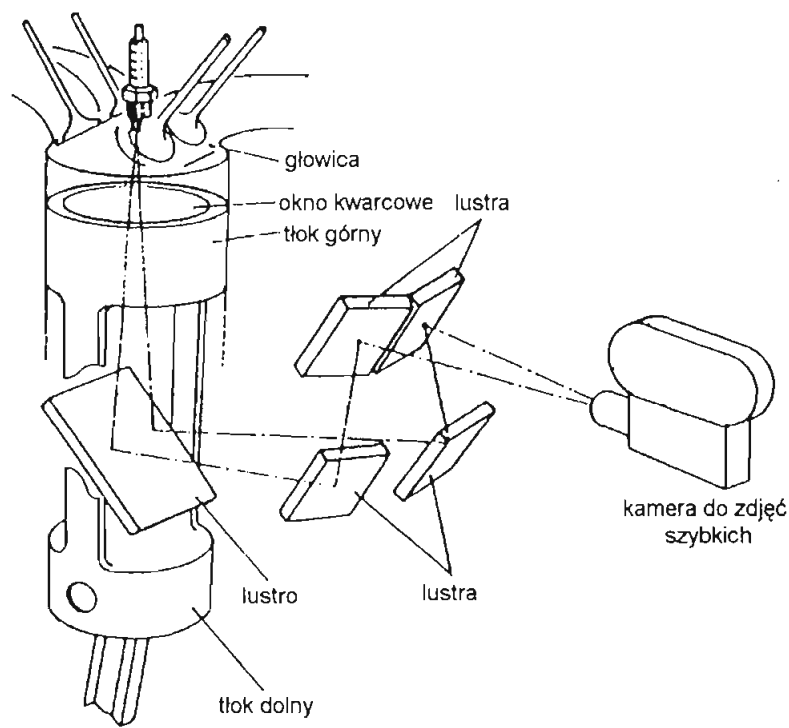
Optymalizacja procesu spalania i przebiegu sterowania silnikiem wymaga przeprowadzania badań z rozdzielczością jednego cyklu pracy. Niezbędna jest przy tym możliwość szybkiej oceny toksyczności, jako efektu działania silnika. Zaprezentowany analizator spalin wykorzystujący diodę laserową jako źródło sygnału jest, jak to wykazały pomiary, szczególnie przydatny do tego typu badań, zwłaszcza, że możliwa jest także ocena toksyczności spalin silnika wysokoprężnego.

3.3. METODY WIZYJNE

W badaniach cyklu roboczego silnika spalinowego, zwłaszcza dotyczących procesu tworzenia mieszanki i przebiegu spalania, wykorzystanie obrazowania wizyjnego umożliwia uzyskanie cennych informacji, niedostępnych lub też bardzo trudnych do uzyskania innymi metodami. Pod określeniem „obrazowania wizyjnego” rozumiana jest grupa optycznych metod badawczych, polegających na rejestrowaniu obserwowanych zjawisk za pomocą fotografii lub zapisu obrazu na taśmie video. Obrazowanie wizyjne znalazło zastosowanie do bezpośredniej obserwacji takich zjawisk zachodzących w silnikach, jak np. przebieg procesu tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej (przebieg wtrysku paliwa, mieszanie z powietrzem, odparowanie), ruch ładunku wewnątrz komory spalania, przebieg spalania (wyładowanie iskry, zapłon – samozapłon w silnikach wysokoprężnych, rozwój płomienia) itp. [44].

Obecnie, do metod wizyjnych najczęściej wykorzystywanych i dających najbardziej interesujące wyniki należy stereografia (fotografia stereoskopowa) i endoskopia video. Zwłaszcza video-endoskopia – metoda stosunkowo nowa – stwarza bardzo szerokie możliwości badawcze.

Przykładem wykorzystania fotografii stereoskopowej do badań przepływu gazów w silniku o zapłonie iskrowym, jest praca [50]. Znajomość pola przepływu strumienia mieszanki paliwowo-powietrznej wewnątrz cylindra stanowi cenne źródło danych, które mogą zostać wykorzystane w doskonaleniu i optymalizacji przebiegu spalania.



Aby uzyskać dane dotyczące ruchu gazów w przestrzeni cylindra silnika spalinowego, autorzy [50] opracowali układ pomiarowy wyposażony w aparat do zdjęć szybkich, współpracujący z układem pięciu luster. Fotografowano ślady (jaśniejsze punkty) pozostawione podczas spalania przez cząsteczki sodu, dodanego do paliwa. Obiektem badań był jednocylindrowy silnik, wyposażony w tłok o denku z kwarcowym oknem (rys. 3.15).

Rysunek 3.15. Schemat układu pomiarowego do fotografii stereoskopowej [50]

Stereofotografia pozwoliła na wyciągnięcie wniosków dotyczących badanych procesów. Mimo że nie dotyczą one bezpośrednio analizy teoretycznej spalania, to są potwierdzeniem jakości zastosowanej metody pomiarowej. Zdaniem autorów [50], metoda okazała się bardzo przydatna w badaniach przepływu gazów w cylindrze. Ze względu na rodzaj zastosowanej domieszki (sód), obserwowano jedynie przepływ przed i w trakcie spalania. Dobór odpowiedniego rodzaju domieszek może umożliwić pełniejsze badania, obejmujące także wizualizację przepływów w suwach dolotu i sprężania.

Wprowadzenie metod endoskopowych do badań silników umożliwiło pełną i ciągłą wizualizację zjawisk zachodzących wewnątrz silnika. Połączenie endoskopii z techniką video dało w rezultacie nową metodę pomiarową – video-endoskopię, pozwalającą na obserwację i rejestrację procesów cyklicznych (wtrysk paliwa, spalanie, zjawiska mechaniczne) w czasie rzeczywistym – co stanowi zupełnie nową jakość w badaniach silników.

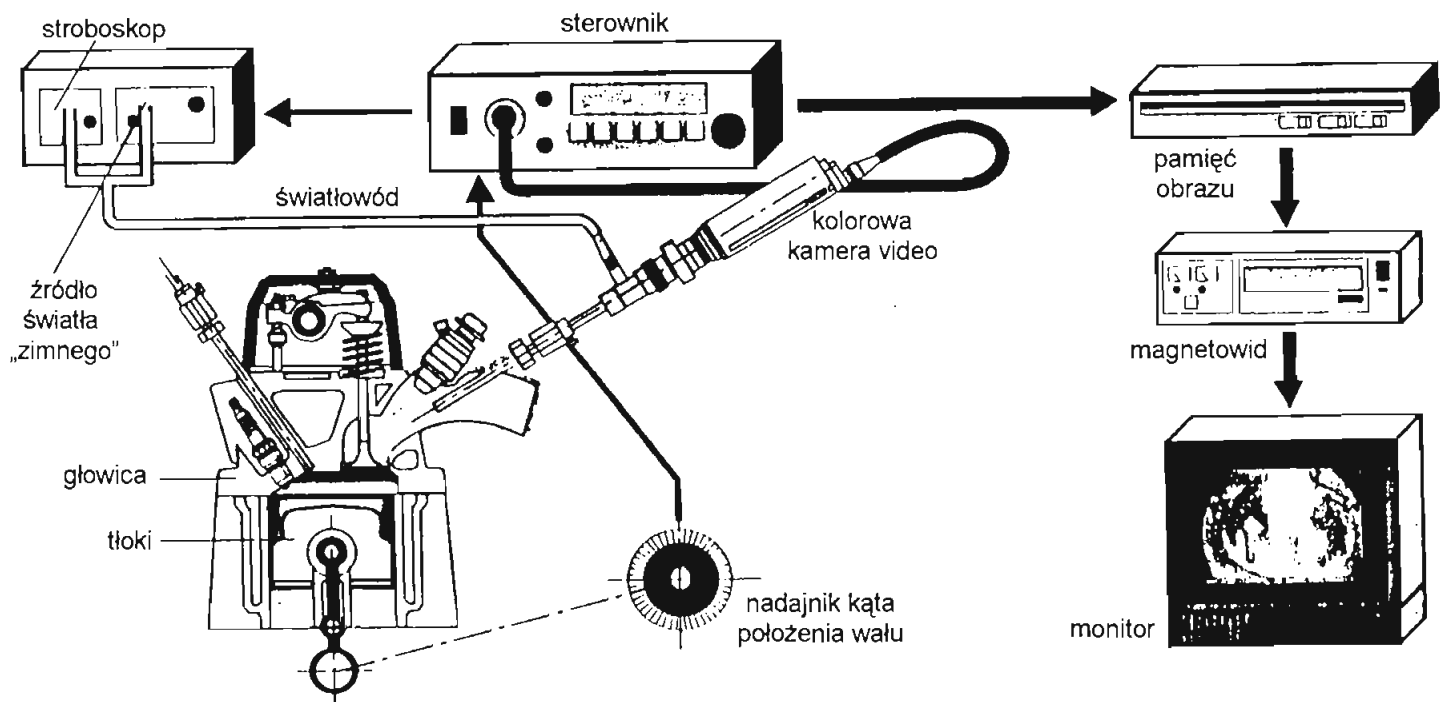
Videoendoskopowy system pomiarowy skonstruowany został przez firmę AVL [2, 13, 69]. Porównanie systemu videoendoskopii z podobnymi metodami pomiarowymi przedstawiono w tabeli 3.4 [13].

Układ pomiarowy (rys. 3.16) składa się ze znacznika kąтового położenia wału korbowego, jednostki nadzorującej, oświetlającej i magnetowidu. Jednostka nadzorująca synchronizuje początek nagrywania ze znacznikiem położenia wału, kontroluje oświetlenie i pracę kamery

video. Możliwe jest dokonywanie rejestracji z rozdzielczością 0,1 °owk. Badania mogą być realizowane zarówno w silnikach wysokoprężnych, jak i iskrowych. Instalacja układu wymaga wykonania 1 lub 2 okien w głowicy silnika, służących do oświetlania pola obserwacji i nagrywania obrazu.

Tabela 3.4. Porównanie metod rejestracji obrazu stosowanych w badaniach silników [13]

Metoda rejestracji	Szybkość fotografii (klatek/sekundę)	Czułość względna (ASA)	Pojemność (liczba klatek)
Szybka fotografia	20 000	1 000	10 000
Szybkie video	2 000	45	420 000
Konwerter obrazu	20 000 000	13 400	24
Standardowe video	10	4 000	140 000



Rysunek 3.16. AVL videosystem 513 – schemat układu [2]

Stroboskop współpracujący z magnetowidem wykorzystuje ciągłą pracę silnika spalinowego w celu analizy określonego zjawiska w określonej chwili (położeniu wału) w cyklu pracy lub w ciągu kilku cykli. Należy dokonać rozdzielenia pomiędzy zjawiskami dającymi w efekcie emisję światła (płomień palącej się mieszanki) i jej pozbawionymi (wtrysk paliwa). W przypadku zjawisk bezemisyjnych wykorzystuje się dodatkowo lampę błyskową do chwilowego oświetlenia filmowanego procesu (w endoskopie znajduje się źródło światła).

Obserwacja stroboskopowa pozwala na przeprowadzenie analizy wyników pod kątem zmienności cyklicznej, ponieważ możliwa jest ciągła rejestracja w tych samych momentach czasowych (przy tych samych położeniach wału korbowego). Ponadto można symulować przebieg zjawisk w ruchu zwolnionym.

Podsumowując należy stwierdzić, że główną zaletą videoendoskopii jako metody badawczej jest rejestrowanie obrazu dokonywane podczas pracy silnika w normalnych warunkach. Dotyczy to także stanu cieplnego ładunku zamkniętego w cylindrze. Badane zjawiska są zakłócanie w sposób minimalny, realistyczny obraz pozwala na pełniejszą interpretację procesu spalania obserwowanego jedynie we fragmentach za pomocą innych metod pomiarowych.

3.4. BADANIE SPALANIA Z WYKORZYSTANIEM SENSORÓW ŚWIATŁOWODOWYCH

Pierwsze doniesienia o próbach wykorzystania technik światłowodowych w motoryzacji pojawiły się w prasie fachowej w drugiej połowie lat osiemdziesiątych, tak więc jest to jeszcze temat stosunkowo nowy i pozostaje nadal w sferze intensywnych badań.

Oczekiwano, że czujniki światłowodowe pozwolą na udoskonalenie systemów elektronicznych działających w pojazdach, zwłaszcza że we wszystkich tych systemach czujniki i metody pomiarowe decydują o ich jakości. Techniki pomiarowe oparte na sensorach światłowodowych umożliwiają większą dokładność pomiaru w porównaniu z metodami konwencjonalnymi. Innym powodem zastosowania jest jednoczesne połączenie czujników i transmisji światłowodowej [46, 56, 73].

Sasayama i in. w pracy [51] dokonali zestawienia zasad pomiaru sygnału i możliwych obszarów zastosowania czujników światłowodowych w motoryzacji (tabela 3.5).

Tabela 3.5. Możliwości zastosowania czujników światłowodowych w motoryzacji

Zastosowanie	Zasada pomiaru		
	natężenie	długość fali	faza
Sterowanie silnika • spalanie • ciśnienie • przepływ	intensywność płomienia	spektroskopia płomieniowa Doppler	Interferomerty: Michelsona i Mach-Zendera
Sterowanie zawieszenia • położenie • poziom • drgania	zmiana współczynnika załamania światła		Interferometry: Ring i Mach-Zendera
Sterowanie jazdą • nawigacja • prędkość pojazdu		Doppler filtracja przestrzenna	Interferometry: Ring i Mach-Zendera

Pomiar natężenia jest najłatwiejszym sposobem uzyskania analogowego sygnału elektrycznego, jednakże może on być zakłócony przez zmiany temperatury i zanieczyszczenia. Z kolei pomiar zmiany długości fali świetlnej (częstotliwości) jest skomplikowany i wymaga wyposażenia toru pomiarowego w dodatkowe elementy optyczne. Pomiar częstotliwości zapewnia bardzo dokładny i stabilny sygnał, gdyż posiada zazwyczaj niezmienny poziom odniesienia.

Nacisk położony na obniżanie poziomu emisji toksycznych składników spalin doprowadził do rozwoju alternatywnych technologii (w stosunku do oczyszczania spalin w katalizatorach), prowadzących do jej obniżenia w obrębie komory spalania. Do tych technologii można zaliczyć spalanie ubogich mieszanek i recyrkulację spalin. W przypadku mieszanek ubogich ładunek jest mieszany z powietrzem, przy recyrkulacji – ze spalinami. W obu przypadkach powoduje to obniżenie temperatury spalania i poprzez to obniżenie emisji NOx. Jedną z konsekwencji wprowadzenia zubożonej mieszanki jest wzrost niestabilności procesu spalania. Zwiększa się także skłonność silnika do spalania stukowego, zwłaszcza w stanach przejścio-

wych. Wpływ rozrzedzenia ładunku może być obserwowany także w zmianach w opóźnieniu zapłonu i długości spalania. Większość dotychczasowych prac skierowana była na zrozumienie procesu spalania i tego, w jaki sposób rejestrowana emisja optyczna jest powiązana z obserwowanymi zjawiskami. Dotyczyło to zwłaszcza poniższych zjawisk:

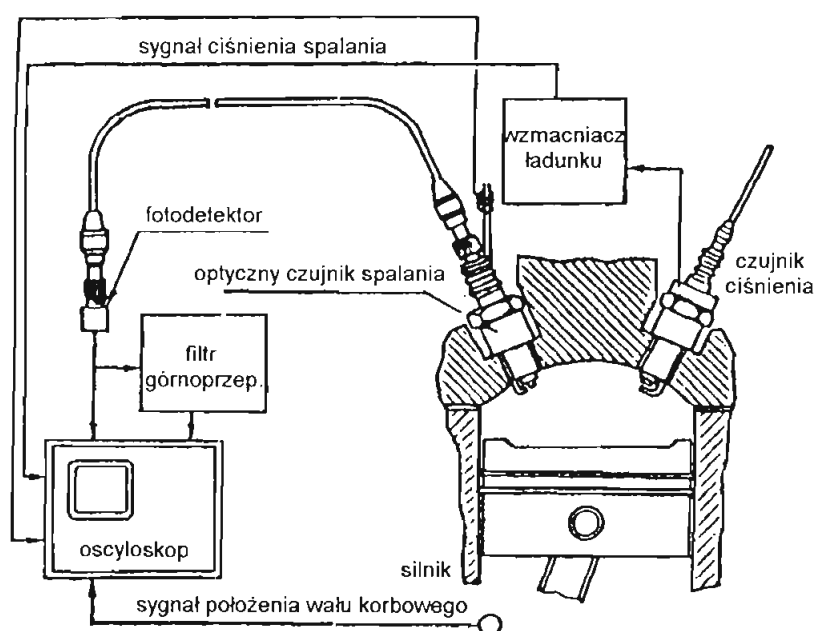
- niestabilności cyklicznej,
- spalania stukowego,
- wystąpienia zapłonu,
- temperatury w cylindrze / emisji NOx.

Dzięki odpowiednim właściwościom włókien światłowodowych, możliwe także jest ich zastosowanie do pomiaru ciśnienia indykowanego. Wykorzystuje się w tym celu zmiany natężenia światła odbitego, transmitowanego światłowodami lub bezpośrednią modulację fazy sygnału wewnątrz włókna poddanego działaniu ciśnienia.

Wykorzystanie efektu Dopplera lub interferometrii Mach-Zendera umożliwia zastosowanie technik światłowodowych do pomiaru przepływu paliwa i powietrza – co jest niezbędne w przypadku stosowania elektronicznych układów sterowania silnikiem.

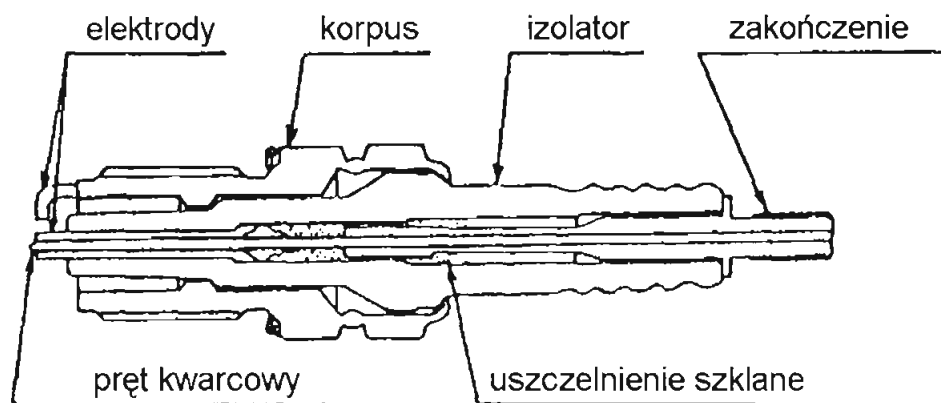
Do unikalnych własności sensora optycznego należy to, że możliwe jest jednoczesne badanie tak szerokiej i jednocześnie różnorodnej grupy sygnałów.

Termin „optyczne badanie spalania” oznacza pomiar promieniowania w widzialnym zakresie widma (światła) emitowanego w trakcie reakcji spalania i przetwarzanie tego sygnału ze względu na kolor (długość fali), intensywność świecenia (amplituda sygnału) i charakterystykę czasową, celem otrzymania danych o pracy silnika.



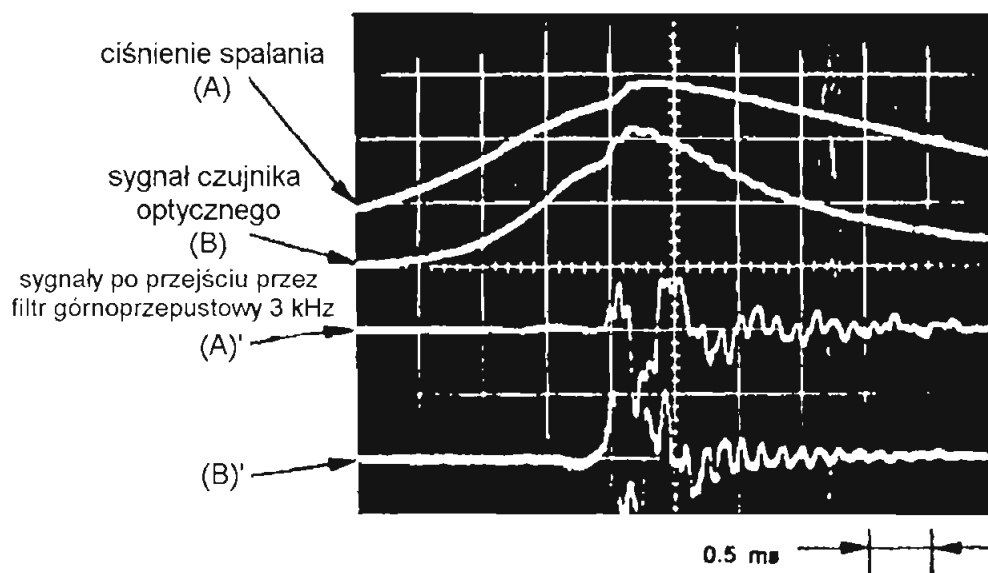
Rysunek 3.17. Schemat toru pomiarowego służącego do optycznej obserwacji spalania [51]

Celem prac prowadzonych przez autorów pracy [51] było zastosowanie sensora światłowodowego do obserwacji procesu spalania i ewentualne wykorzystanie go w układzie elektronicznego sterowania silnikiem. W tym celu zaprojektowano tor pomiarowy przedstawiony na rys. 3.17. Rys. 3.18 przedstawia schemat czujnika wykonanego na podstawie zmodyfikowanej świecy zapłonowej.



Rysunek 3.18. Optyczny czujnik spalania [51]

Uzyskano sygnał emisji płomienia skorelowany z sygnałem ciśnienia (krzywe A i B na rys. 3.19). Krzywe A' i B' reprezentują odpowiednio przebiegi A i B po ich wzmocnieniu i przejściu przez filtr górnoprzepustowy 3 kHz. Widoczna jest gwałtowna zmiana przebiegu krzywych A' i B' po przekroczeniu maksymalnej wartości ciśnienia. Jest to skutek detonacji towarzyszącej powstaniu wielu ognisk zapłonu i propagacji fal uderzeniowych. Zmiany intensywności świecenia są więc wynikiem powstania nowych źródeł zapłonu, w przeciwieństwie do zmian ciśnienia wynikających z rozprzestrzeniania się fal uderzeniowych w komorze spalania. Porównanie obu sygnałów pozwala na stwierdzenie wyższej czułości metody optycznej na wystąpienie spalania stukowego w porównaniu z klasycznym pomiarem ciśnienia. Wczesniejsze wykrycie stuku ma duże znaczenie dla optymalizacji kąta wyprzedzenia zapłonu.

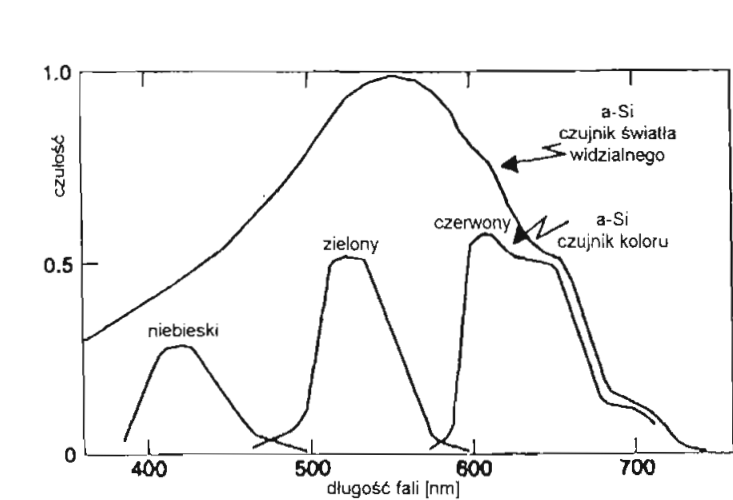


Rysunek 3.19. Spalanie stukowe – porównanie sygnałów ciśnienia i sygnału optycznego ($n = 1500$ obr/min, $\alpha_z = 25^\circ$ owk) [51]

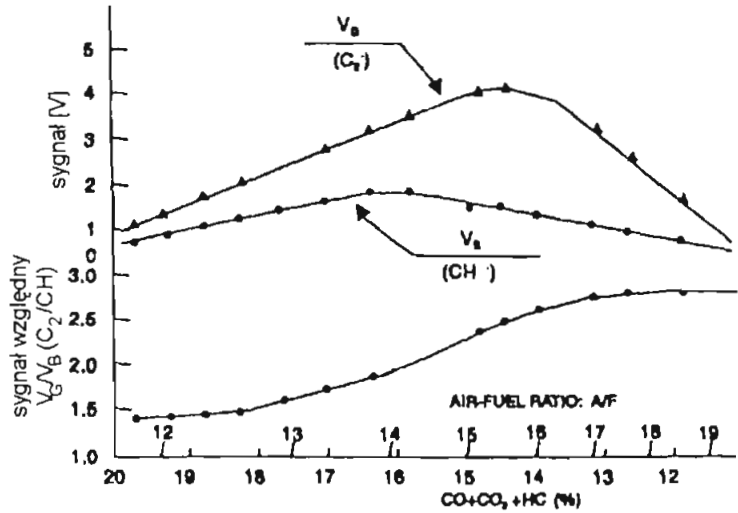
Dokonano także próby oceny składu mieszanki. W tym celu wykorzystano znaną zależność koncentracji cząsteczek w komorze spalania od przebiegu spalania. Ponieważ widma emisyjne poszczególnych substancji różnią się między sobą, ich stężenia mogły być wyznaczone spektroskopowo. Zastosowano amorficzny krzemowy czujnik koloru, dający niezależne sygnały w trzech kolorach: niebieskim, czerwonym i zielonym. Jego charakterystykę przedstawiono na rysunku 3.20.

Na rys. 3.21 zamieszczono zmierzoną zależność pomiędzy współczynnikiem nadmiaru powietrza (A/F), wyrażonym jako całkowita ilość składników gazów wylotowych (CO , CO_2 i HC), a przebiegiem sygnału w kolorze zielonym i niebieskim. Ponieważ emisji cząsteczek HC i C_2 odpowiadają kolory niebieski i zielony, natężenie sygnału zmierzone w tych kolorach

odpowiada ich koncentracji. Przebiegi tych sygnałów nie są monotoniczne, stąd też wartość A/F nie mogła być określana bezpośrednio w oparciu o ich przebieg (rys. 3.21). Natomiast stosunek względny sygnałów V_g/V_b (zielonego do niebieskiego) daje zależność monotoniczną. Przebieg sygnału względnego może zostać wykorzystany jako informacja o składzie mieszanki w układzie sterowania silnikiem.

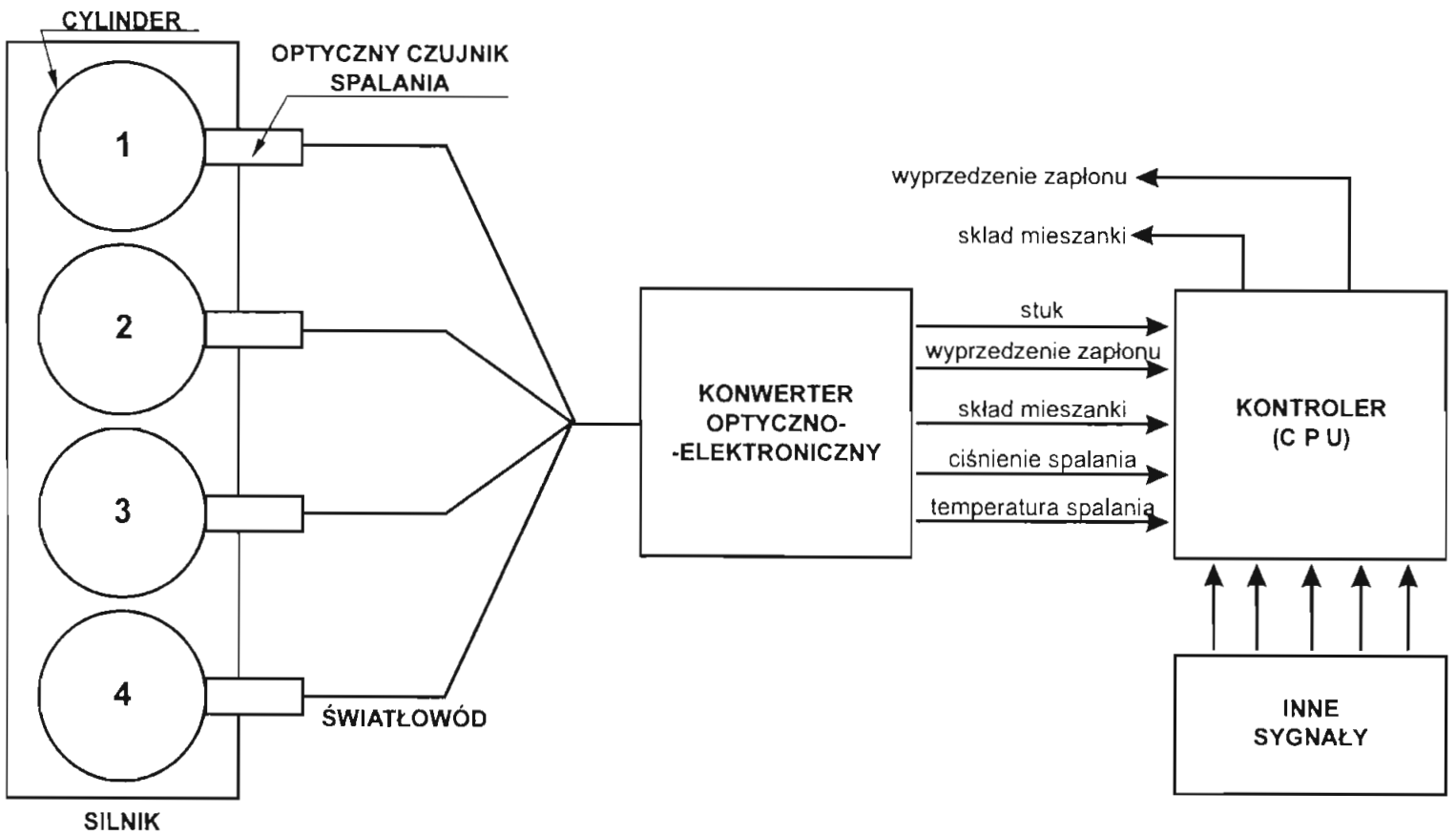


Rysunek 3.20. Charakterystyka amorficznego czujnika krzemowego [51a]



Rysunek 3.21. Przebieg sygnału w zależności od składu mieszanki (A/F) [51]

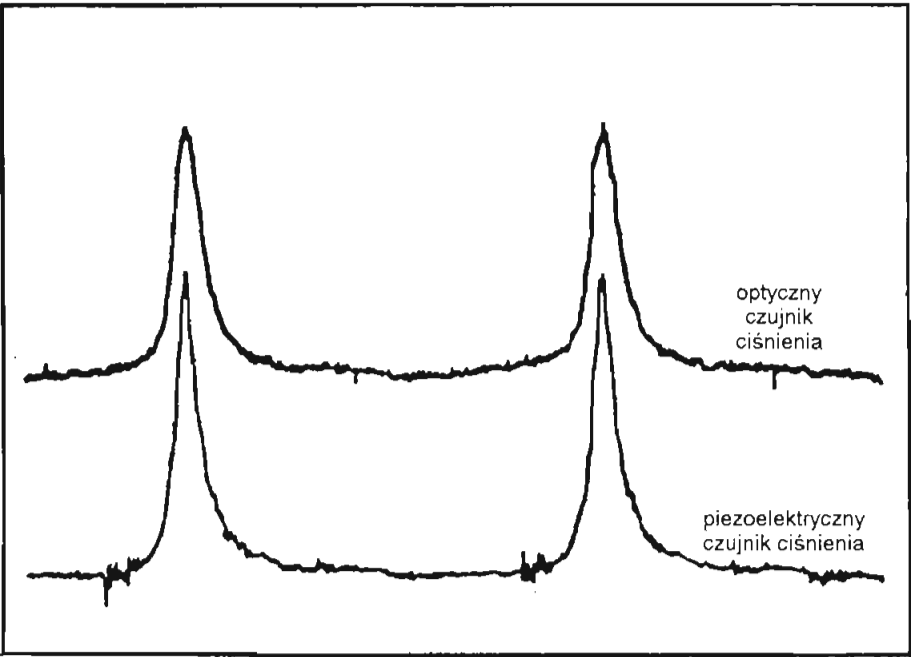
Zaproponowany przez autorów [51] schemat układu sterowania silnikiem, wykorzystującego światłowodowe czujniki pomiarowe, przedstawiono na rysunku 3.22. Na uwagę zasługuje fakt, że optyczny czujnik spalania dostarcza tak wielu różnorodnych sygnałów: o spalaniu stukowym, kącie wyprzedzenia zapłonu, składzie mieszanki, temperaturze spalania i ciśnieniu wewnątrz komory spalania.



Rysunek 3.22. Koncepcja układu sterowania silnikiem wykorzystującego optyczny czujnik spalania [51]

Wiele ośrodków badawczych prowadziło prace nad optycznymi czujnikami ciśnienia w cylindrze. W laboratoriach badawczych firmy Lucas skoncentrowano się nad możliwością wykorzystania sygnału pochodzącego z czujnika optycznego w sprzężeniu zwrotnym z systemem sterowania silnikiem [57]. Umieszczenie takiego czujnika w głowicy ograniczają względy konstrukcyjne, dodatkowo chciano zastosować mocowanie uniwersalne na tyle, aby móc używać sensory optyczne wymiennie z piezoelektrycznymi czujnikami ciśnienia. Umożliwiłoby to porównawcze pomiary intensywności promieniowania i ciśnienia wewnątrz cylindra.

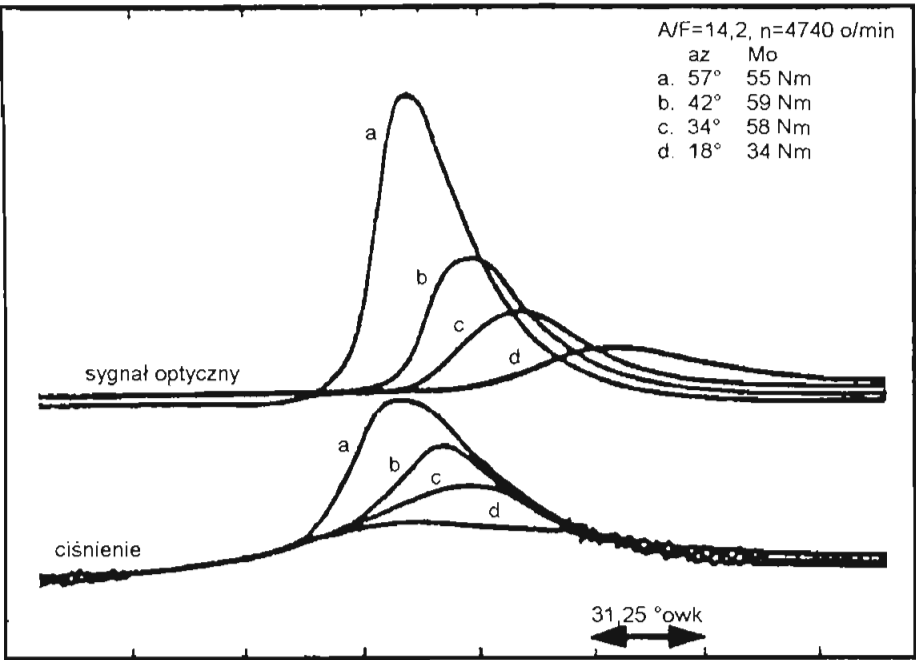
Piezoelektryczne czujniki ciśnienia wykorzystywane są głównie do celów badawczych, ich stosowanie w seryjnych silnikach jest zbyt kosztowne. Idea użycia metod optycznych do pomiaru ciśnienia polega na zastosowaniu sensora światłowodowego mierzącego przemieszczenia metalowej membrany poddawanej działaniu ciśnienia. Czujnik tego typu, ze względu na swą prostotę, mógłby być produkowany seryjnie.



Rysunek 3.33. Porównanie sygnałów ciśnienia uzyskanych przy pomocy optycznego czujnika ciśnienia i czujnika piezoelektrycznego [57]

Zasada pomiaru polegała na transmisji sygnału świetlnego z diody-nadajnika wiązką światłowodową; po odbiciu od membrany następowała zmiana intensywności sygnału, a sygnał powracał tą samą wiązką do odbiornika.

Na rysunku 3.33 porównano sygnały ciśnienia zmierzonego za pomocą czujnika optycznego i czujnika piezoelektrycznego w tej samej komorze spalania silnika o zapłonie iskrowym.

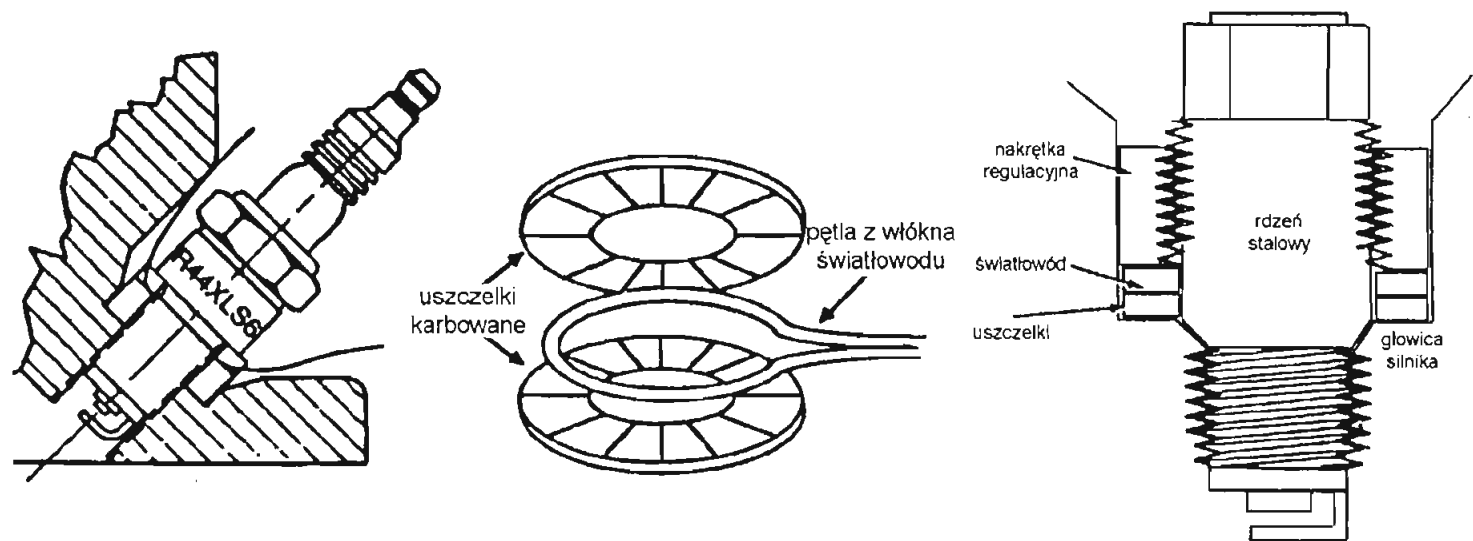


Rysunek 3.34. Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na przebiegi sygnału ciśnienia uzyskanych przy pomocy optycznego czujnika ciśnienia i czujnika piezoelektrycznego [57]

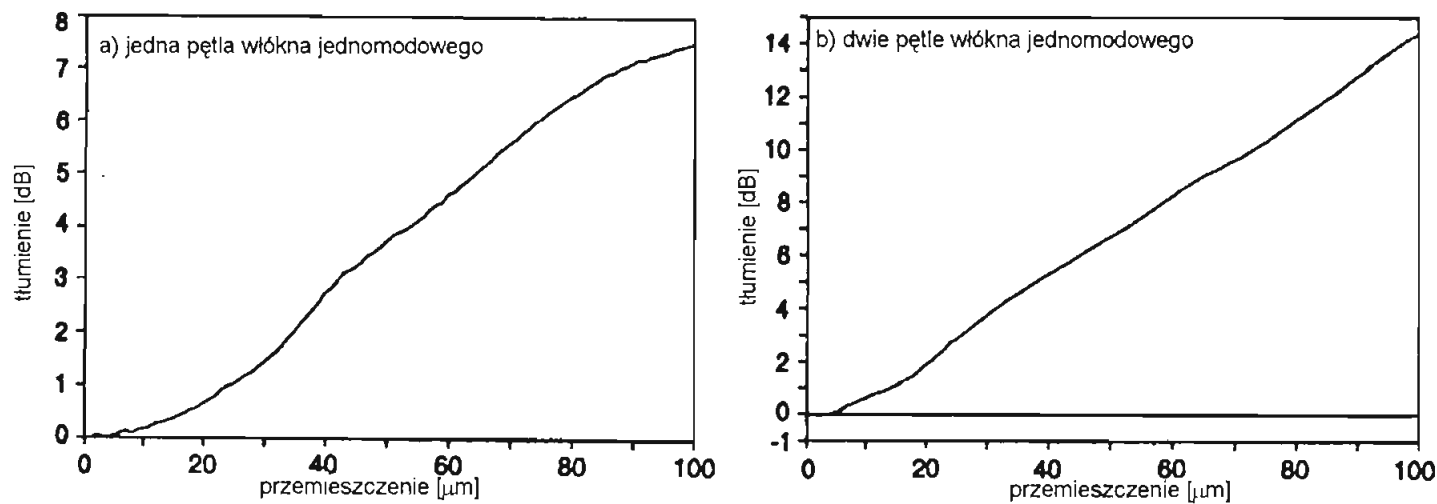
Zauważalny jest wpływ zakłóceń ze strony układu zapłonowego na przebieg sygnału z czujnika klasycznego. Na rysunku 3.34 przedstawiono wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na przebiegi obu sygnałów.

Optyczny czujnik ciśnienia opisano w pracy Vickersa i Włodarczyka [62]. Autorzy badali czujnik piezoelektryczny pracujący w układzie uszczelki świecy. Może on być wykorzystany jako źródło sygnału w układach sterowania silnikiem, zwłaszcza że takie umieszczenie czujnika eliminuje dodatkowe wyposażenie. Zastosowanie czujnika ogranicza utrata właściwości piezoelektrycznych w wysokich temperaturach i zakłócenia pochodzące od wyładowania iskry.

Równocześnie opracowano światłowodowy czujnik ciśnienia, reagujący na mikropremieszczenia świecy zapłonowej wywołane zmianami ciśnienia w komorze spalania. Czujnik jest niewrażliwy na zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od świecy. Zastosowanie światłowodu odpowiedniego rodzaju pozwoliło na przedłużone stosowanie czujnika w wysokich temperaturach. Zamontowanie w uszczelce świecy utrzymało zalety typowe dla wspomnianego czujnika piezoelektrycznego. Wywoływane przez działające ciśnienie mikrozgięcia pętli włókna światłowodowego, umieszczonej pomiędzy dwiema częściami uszczelki świecy, powodowało modulację sygnału optycznego. Sposób umieszczenia włókna w gnieździe świecy przedstawia rysunek 3.35.



Rysunek 3.35. Czujnik światłowodowy w konfiguracji uszczelki świecy [62]

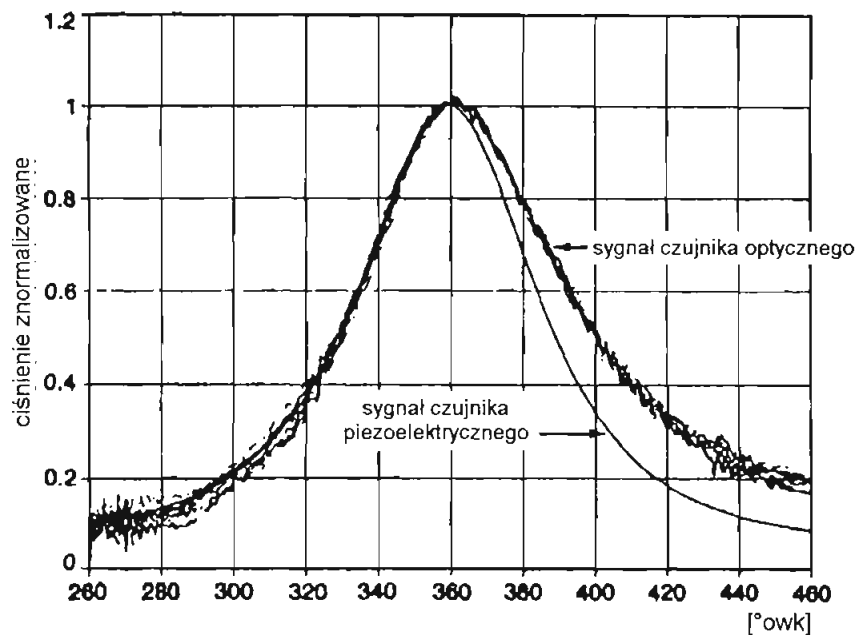


Rysunek 3.36. Charakterystyka amplitudowa czujnika światłowodowego; (a) 1 pętla włókna jednomodowego, (b) 2 pętle włókna [62]

Statyczne badania laboratoryjne dotyczyły wyznaczenia warunków maksymalnej czułości, badania po zamontowaniu w silniku obejmowały określenie trwałości czujnika i porównanie jego wskazań ze wskazaniami analogicznego czujnika piezokwarcowego.

Na rysunku 3.36 przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych – statyczną charakterystykę amplitudową czujnika zbudowanego z 2 pętli włókna jednomodowego w funkcji przemieszczenia. Natomiast na rysunku 3.37 pokazano porównanie zmierzonych jednocześnie w tym samym cylindrze (dwie świece) sygnałów z czujnika optycznego i czujnika piezokwarcowego.

Przebieg ciśnienia zmierzony za pomocą obu czujników wykazuje dużą korelację w suwie sprężania i niewielką histerezę w suwie wydechu. Histereza jest spowodowana dynamiką przemieszczeń świecey w głowicy silnika. Zakłócenia sygnału optycznego są wynikiem oddziaływania drgań silnika. Czujnik piezokwarcowy wyposażony był w elementy filtrujące, a optyczny ich nie posiadał.



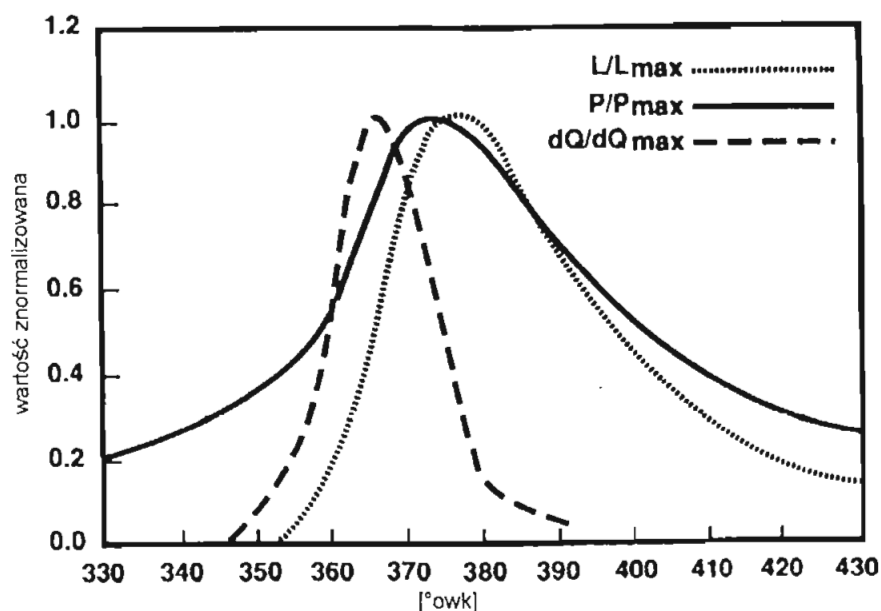
Rysunek 3.37. Porównanie sygnałów uzyskanych z czujnika piezokwarcowego i światłowodowego pracujących w konfiguracji uszczelki świecey [62]

Remboski i in. w pracy [46] poszukiwali korelacji sygnału natężenia emisji świetlnej z komory spalania z przebiegiem ciśnienia indykowanego. Mierzac dodatkowo prędkość obrotową silnika, ciśnienie w kolektorze dolotowym i kąt wyprzedzenia zapłonu, autorzy podjęli próbę wyznaczenia współczynnika nadmiaru powietrza (A/F), opierając się na analizie sygnału optycznego.

Badania wykazały, że w przypadku spalania mieszanki o składzie stechiometrycznym sygnał optyczny osiąga wartość maksymalną i to niezależnie od rodzaju zastosowanego w badaniach paliwa. Ogólny poziom sygnału wzrastał wraz z kątem wyprzedzenia zapłonu. Stwierdzono występowania zjawiska „poświaty” (*afterglow*) – przedłużonego świecenia gazu po przejściu frontu płomienia.

Opisane badania skoncentrowane były na określeniu zależności istniejących między poziomem emisji świetlnej mierzonej za pomocą czujnika optycznego a ciśnieniem w cylindrze, prędkością wydzielania ciepła i składem mieszanki. Zamiarem autorów było wykorzystanie wyników pomiarów do analizy procesu spalania i sterowania jego przebiegiem. Wykorzystano w tym celu pomiary emisji pary wodnej w zakresie bliskiej podczerwieni, ponieważ odpowiadało to maksymalnej czułości zastosowanego fotodetektora. Eksperymenty przeprowadzono na jednocylindrowym silniku ZI, dodatkowo mierząc prędkość i moment obrotowy, zużycie paliwa, natężenie przepływu powietrza w kolektorze dolotowym i koncentracje składników spalin (CO , HC , NO , CO_2 i O_2).

Przed wejściem na fotodetektor sygnał optyczny przepuszczano przez filtr 927,7 nm o oknie 20 nm. Stwierdzono niewielkie (<5%) zmniejszenie natężenia mierzonego sygnału wskutek osadzania się zanieczyszczeń na powierzchni czujnika (produkty spalania, nagar z oleju). Początkowe nastawy silnika przyjęto jako bazowe.



Rysunek 3.38. Porównanie względnych zmian ciśnienia (P), prędkości wywiązywania ciepła (dQ) i emisji świetlnej (L); A/F = 14,6, n = 2400 obr/min. $\alpha_z = 0^\circ$ owk [46]

Na rysunku 3.38 przedstawiono zmiany natężenia sygnału optycznego, ciśnienia indykowanego i prędkości wywiązywania ciepła w funkcji kąta obrotu wału dla pomiarów bazowych. Maksymalna wartość prędkości wywiązywania ciepła odpowiada maksymalnej prędkości przyrostu ciśnienia $dp/d\alpha$, podczas gdy maksymalna wartość natężenia sygnału optycznego przypada 10° owk później. Zależność tę, zdaniem autorów, tłumaczy fakt, że emisja optyczna jest pochodną cieplnej emisji pary wodnej – produktu spalania – osiągającej wartość maksymalną w późniejszej fazie spalania. Istnienie sygnału optycznego po zakończeniu wydzielania ciepła można wytłumaczyć przedłużoną emisją gorącej pary wodnej w strefie gazów spalonych. W przeciwieństwie do sygnału ciśnienia, sygnał optyczny ma wartość zerową w czasie sprężania ładunku.

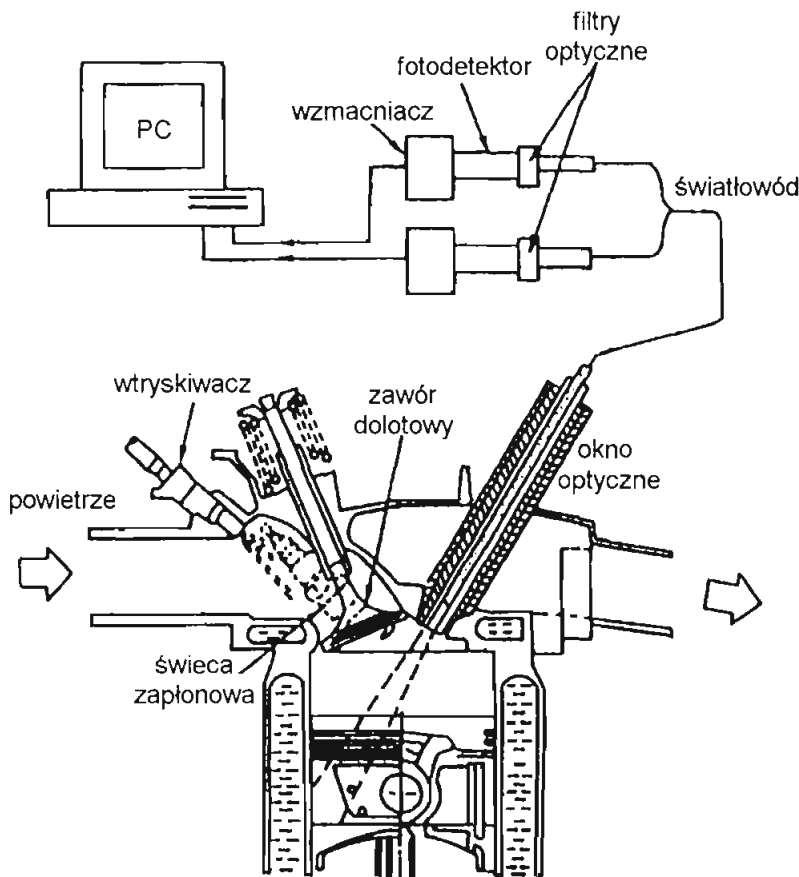
W przypadku zastosowania sygnału optycznego do sterowania silnikiem należy wykazać jego korelację z innymi parametrami (ciśnienie w cylindrze, prędkość wydzielania ciepła) dla różnych stanów pracy silnika. Autorzy uzyskali korelację rzędu 0,99 dla wartości względnych ciśnienia P/P_{max} i natężenia sygnału optycznego L/L_{max} dla różnych nastaw regulacyjnych silnika. Podobnie dla prędkości wywiązywania ciepła dQ/dQ_{max} i L/L_{max} otrzymano współczynniki korelacji w zakresie $0,97 \div 0,99$. Istnienie tak wysokiej korelacji pozwala na wykorzystanie sygnału optycznego do określania położenia i wielkości ciśnienia maksymalnego w cylindrze, prędkości wywiązywania ciepła, średniego ciśnienia indykowanego i współczynnika nadmiaru powietrza.

Skład mieszanki paliwowo-powietrznej i temperatura wewnątrz komory spalania w silniku ZI mają znaczący wpływ na osiągi silnika i poziom emisji tlenków azotu i węglowodorów. Ponieważ spalanie charakteryzuje cykliczna zmienność, zastosowanie szybkich metod pomiarowych pozwala na otrzymanie dokładnych informacji dotyczących jego przebiegu. Autorzy

pracy [55] zaprezentowali optyczną technikę pomiarową umożliwiającą określanie składu mieszanki i temperatury w 4-cylindrowym silniku samochodowym.

Badania autorów wykazały, że sygnał optyczny z komory spalania dostarcza informacji o opóźnieniu zapłonu, wypadaniu zapłonów i występowaniu spalania stukowego. Ponadto natężenie emisji C_2 i HC okazało się dobrze skorelowane z ilością powietrza przy spalaniu mieszanin propanu i powietrza oraz butanu i powietrza.

Obok pomiarów współczynnika nadmiaru powietrza mierzono wahania temperatury płomienia (za pomocą metod pirometrii dwubarwnej) w obrębie jednego cyklu pracy. Spalanie stukowe wykrywano porównując temperatury zmierzone podczas normalnej pracy i w warunkach występowania stuku. Wyniki badań autorzy uzupełnili analizą przyczynowo-skutkową obserwowanych zjawisk.



Schemat układu zastosowanego do pomiaru sygnału emisji optycznej z cylindra przedstawiono na rysunku 3.39. Zainstalowano pręt kwarcowy o średnicy 3 mm w głowicy silnika. Światłowód połączony z prętem rozdzielał i transmitował sygnał optyczny do dwóch zestawów filtrów. Promieniowanie płomienia z odseparowanymi długościami fal przekształcane było na sygnał analogowy przez wzmacniacze optyczne.

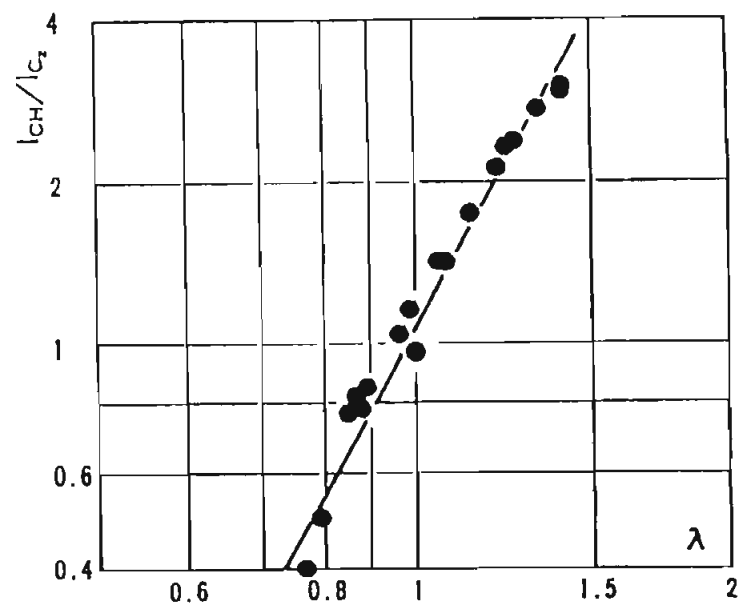
Rysunek 3.39. Schemat układu pomiarowego do optycznej obserwacji spalania [55]

Miarą współczynnika nadmiaru powietrza był stosunek intensywności emisji dla dwóch różnych długości fali: 431 nm (HC) i 517 nm (C_2). Rys. 3.40 ilustruje uzyskaną korelację współczynnika nadmiaru powietrza i względnej emisji I_{HC}/I_{C_2} .

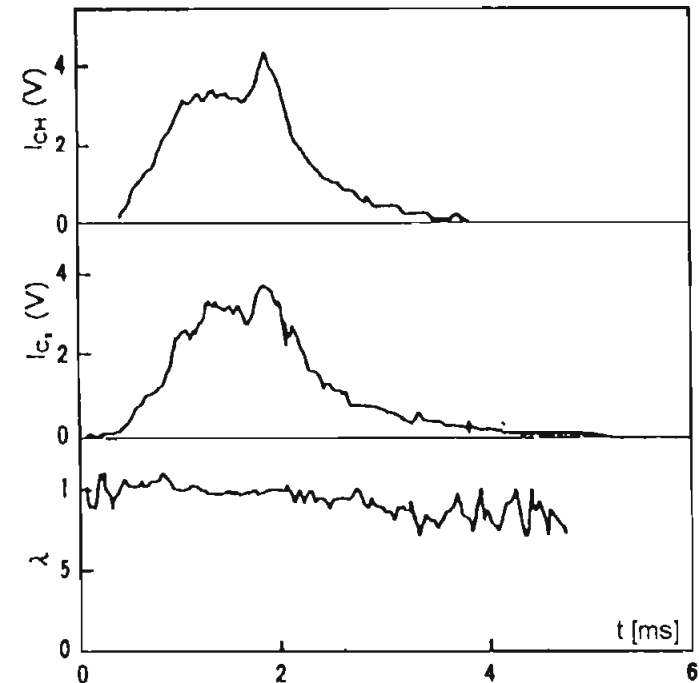
Stosunek intensywności promieniowania dla długości fal 502 i 797 nm zastosowano do oceny temperatury spalania wyznaczonej metodą pirometrii dwubarwnej. Kalibracji dokonano dla promieniowania ciała doskonale czarnego w zakresie 970-1370 K. Uzyskaną korelację sygnału optycznego i temperatury zamieszczono na rysunku 3.41.

Typowe przebiegi natężenia emisji odpowiadającej cząsteczkom HC i C_2 oraz współczynnika nadmiaru powietrza λ pokazano na rysunku 3.42. Spalanie przebiegało najintensywniej 2 ms po zapłonie, przy maksymalnych wartościach emisji HC i C_2 . Mimo że natężenie emisji HC i C_2 ulegało znacznym zmianom w trakcie przebiegu spalania, wahania współczynnika nadmiaru powietrza były niewielkie. Wyniki wskazują także, że współczynnik nadmiaru powietrza na początku spalania był wyższy niż w jego końcowej fazie. Duże wahania λ w fazie

końcowej dają się wytłumaczyć późniejszym zapłonem dużych kropli paliwa wtrysniętych do cylindra lub kropli przyklejonych do ścianek komory spalania.



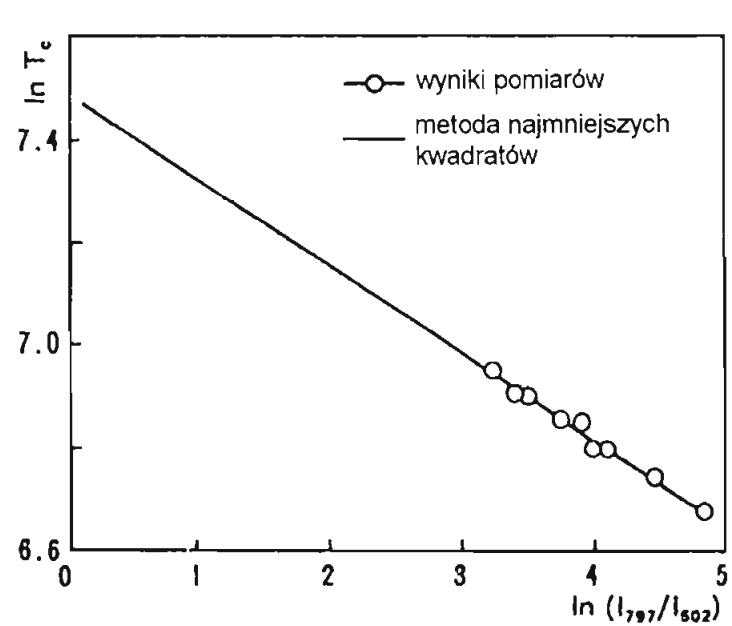
Rysunek 3.40. Korelacja pomiędzy współczynnikiem nadmiaru powietrza a emisją względną I_{HC}/I_{C2} [55]



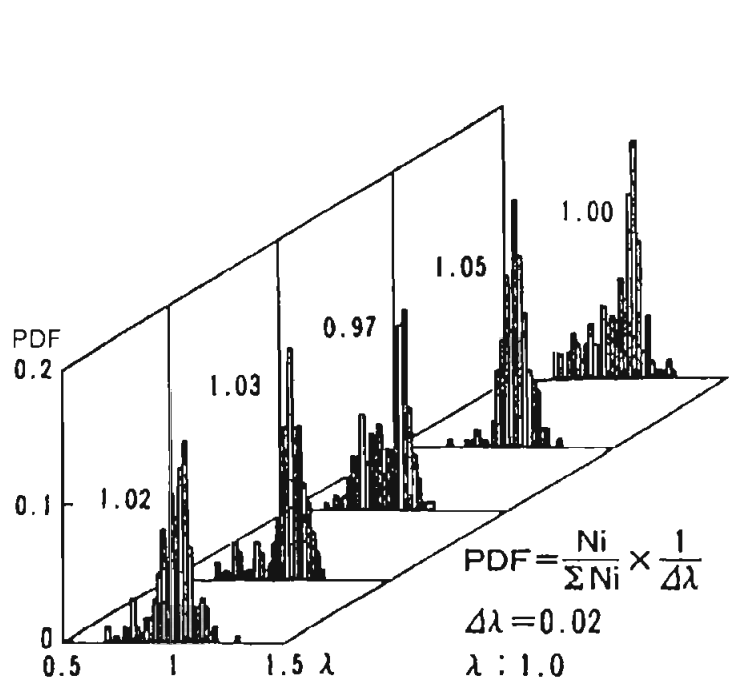
Rysunek 3.42. Typowe przebiegi czasowe natężenia emisji HC i C₂ oraz współczynnika nadmiaru powietrza dla jednego cyklu [55]

Aby wyodrębnić zmiany cykliczne, autorzy poddali wyniki pomiarów obróbce statystycznej. Na rys. 3.43 porównano funkcje gęstości prawdopodobieństwa, otrzymane dla 5 cykli spalania. Różnice w ich przebiegu wskazują na zróżnicowany przebieg spalania, który opisywano za pomocą średniego współczynnika nadmiaru powietrza dla jednego cyklu. Zmierzone różnice zawierały się w granicach 5%.

Rysunek 3.44 zawiera przebiegi intensywności sygnału optycznego i temperatury otrzymane dla spalania prawidłowego i przy spalaniu stukowym. Kąt wyprzedzenia zapłonu ustawiono na 30 °owk przed GMP dla normalnej pracy i na 55 °owk w celu wywołania stuku.

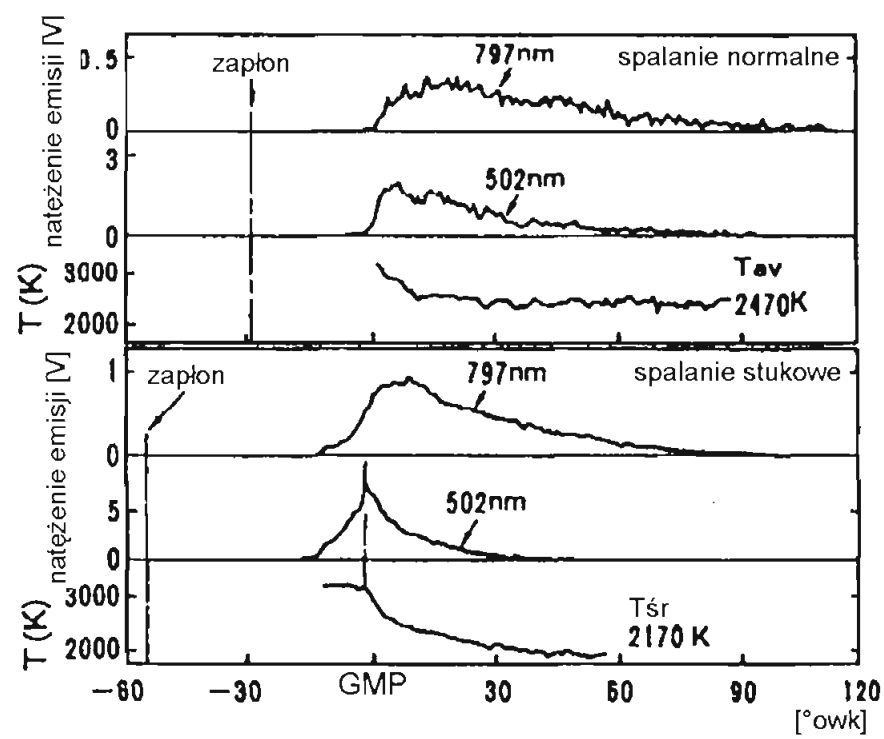


Rysunek 3.41. Korelacja temperatury i emisji względnej dla długości fal 502 i 797 nm [55]



Rysunek 3.43. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa (PDF) uzyskane dla 5 cykli spalania [55]

Wystąpienie stuku potwierdzał sygnał wysokiej częstotliwości z piezoelektrycznego czujnika ciśnienia, sygnały podlegały filtracji w zakresie pasma 5÷15 kHz.



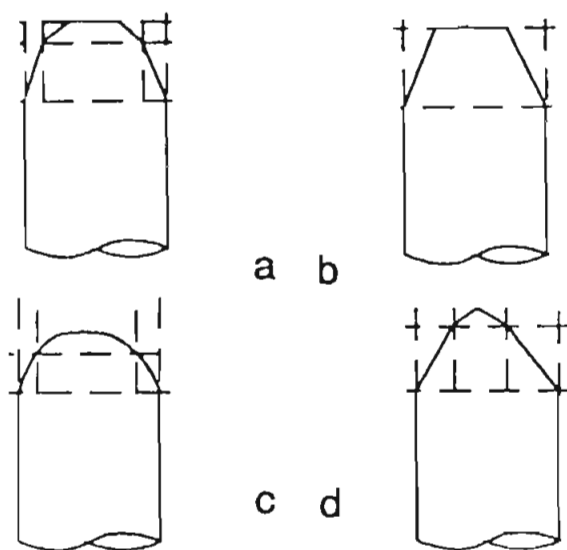
Rysunek 3.44. Typowe przebiegi czasowe natężenia emisji oraz temperatury płomienia wyznaczone dla spalania prawidłowego i stukowego [55]

Analiza przebiegów czasowych sygnału emisji wskazuje na to, że zjawisko stuku przyspieszyło przebieg spalania. Jest to jedna z typowych cech charakterystycznych spalania stukowego. Przyjmuje się, że przyspieszenie spalania wywołane zostało przez samozapłon w całej objętości komory. Temperatura pozostawała w granicach 3270 K przed wystąpieniem stuku, następnie gwałtownie obniżyła się do około 1770 K. Ten gwałtowny spadek temperatury autorzy przypisali zwiększeniu prędkości wymiany ciepła przez tłok i cylinder, wskutek zmniejszenia się grubości warstwy przyściennej. Spowodowane to zostało działaniem fali uderzeniowej wywołanej przez powstanie stuku.

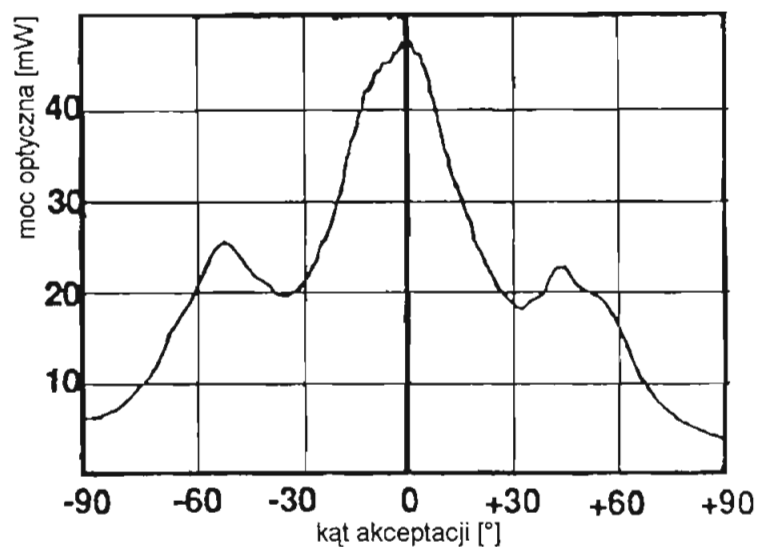
Problematyką zastosowania optycznych czujników spalania w układach sterowania zapłonem i dawkowaniem paliwa pracujących w pętli zamkniętej zajmowali się Nutton i Pinnock [36].

Do badań zastosowano jednocześnie dwa rodzaje czujników spalania. Pierwszy, zainstalowany w gnieździe wykonanym w ścianie komory spalania, posiadał w środku wprasowany pręt krzemowy. Końcówkę czujnika połączono ze światłowodem, przenoszącym sygnał optyczny do elementów elektronicznych. Drugi typ czujnika zbudowano na bazie typowej świecy zapłonowej wyposażonej w nową elektrodę środkową z wprasowanym prętem krzemowym i zmodyfikowaną końcówką wysokiego napięcia, pozwalającą na równoczesne doprowadzenie napięcia i przekazanie sygnału optycznego za pomocą światłowodu.

Kształt zbierającej sygnał optyczny końcówki czujnika stanowi krytyczny element całej konstrukcji. Zwierciadło czujnika jest narażone na pracę w trudnych warunkach komory spalania i musi pozostać jak najdłużej nie zanieczyszczone, aby przekazywać promieniowanie spalania bez znacznego osłabienia sygnału. Ponadto, pożądana jest jak największa apertura numeryczna, aby zbierać sygnał z jak najszerszego obszaru komory spalania.



Rysunek 3.45. Badane kształty końcówki czujnika optycznego [36]



Rysunek 3.46. Moc optyczna rejestrowana przez czujnik w zależności od kąta akceptacji sygnału – końcówka typu (d) [36]

Autorzy analizowali wpływ różnych kształtów zwierciadła na takie parametry czujnika, jak apertura numeryczna, zanieczyszczalność i trwałość (rys. 3.45). W każdym z przypadków końcówka czujnika znajdowała się bezpośrednio w przestrzeni komory spalania. Dało to zmniejszenie ilości zanieczyszczeń gromadzących się na powierzchni końcówki. Zastosowanie końcówki z kilkoma płaszczyznami załamania, powodującymi rozbięcie zanieczyszczeń, pozwoliło uniknąć ich trwałego osadzania się na powierzchni, zwłaszcza przy dobrze wypolerowanym zwierciadle. Przykładowy przebieg akceptacji sygnału dla końcówki czujnika typu (d) (rys. 3.45) przedstawiono na rysunku 3.46.

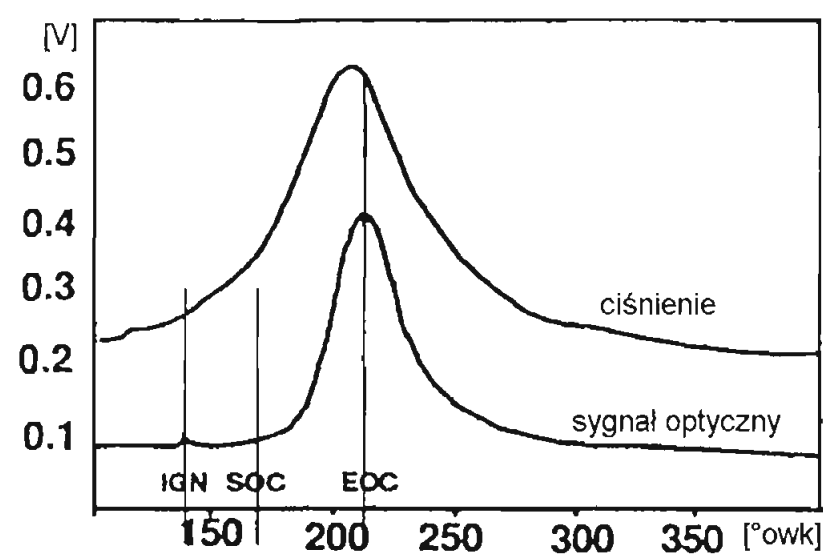
Najlepszym rozwiązaniem, dającym szeroki kąt widzenia i regularną krzywą sygnału, okazała się końcówka o kształcie sferycznym. Jednakże nie posiada ona własności samooczyszczających, charakterystycznych dla końcówek o załamanych krawędziach – cechy pożądanej przy produkcji masowej.

Sygnały transmitowano do fotodetektora. Zastosowano jako fotodetektor półprzewodnikowy czujnik koloru, składający się z dwóch sprzężonych fotodiod o różnych czułościach widmowych (600 i 900 nm). Oba sygnały mogły być nałożone na siebie, aby uzyskać pomiar „średniej” długości fali docierającej do detektora. Nie izolowano żadnych szczególnych pasm, lecz przeglądano szerokie pasmo widma, aby zaobserwować ogólne zmiany w intensywności i charakterystyce spektralnej sygnału, które z kolei można by powiązać z ogólnymi zmianami w innych parametrach spalania, takich jak temperatura i tworzenie związków toksycznych.

Zaprezentowane wyniki badań dotyczyły trzech 4-cylindrowych silników z wielopunktowym wtryskiem benzyny o różnych stopniach zawirowania ładunku i zubożenia mieszanki. Mierzono maksymalne wartości sygnału optycznego Pd1 (600 nm) i Pd2 (900 nm), stosunek sygnałów Pd1/Pd2 oraz typowe wielkości charakteryzujące pracę silnika.

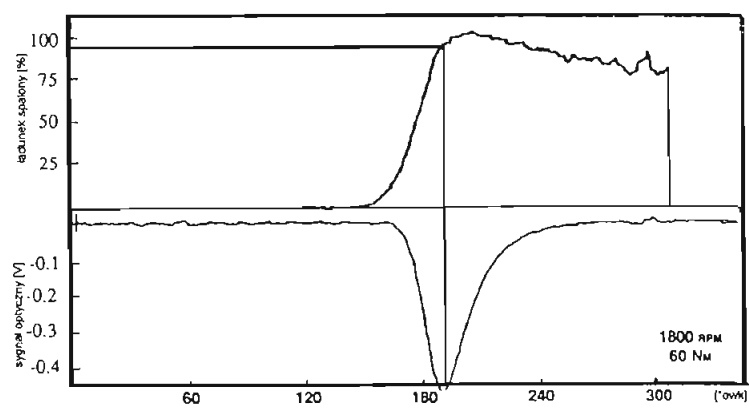
Aby wesprzeć interpretację sygnału optycznego, opracowano jednostrefowy model spalania, wykorzystujący zarejestrowany sygnał ciśnienia, pozwalający na obliczenie udziałów masowych substancji biorących udział w procesie spalania, niezbędnych do otrzymania zmierzonego przyrostu ciśnienia.

Zastosowano rozpoznawanie zdarzenia za pomocą krzywych intensywności dla wystąpienia zapłonu i spalania stukowego, statystyczną analizę parametrów sygnału dla pomiarów cyklicznej nierównomierności pracy oraz filtrację barwną dla oznaczenia emisji, co pozwoliło na otrzymanie różnych charakterystyk.

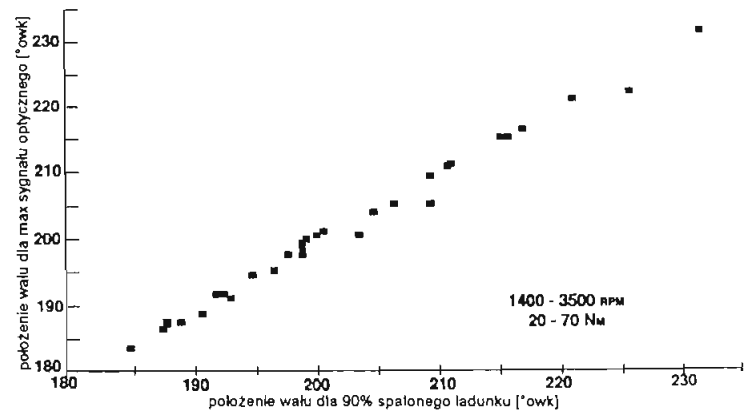


Rysunek 3.47. Porównanie uzyskanego sygnału optycznego i sygnału ciśnienia; IGN – zapłon, SOC – początek spalania, EOC – koniec spalania [36]

Na rysunku 3.47 porównano ciśnienie w cylindrze i intensywność promieniowania (wartości maksymalne sygnału 900 nm) dla tego samego cyklu spalania. Jak widać, oba przebiegi są podobne, jednak zauważalne są istotne różnice. W okresie pomiędzy wystąpieniem iskry a początkiem spalania (SOC – Start Of Combustion) następuje dalszy wzrost ciśnienia, natomiast sygnał optyczny pozostaje na tym samym poziomie. Rozpoznanie początku spalania jest więc znacznie łatwiejsze poprzez zlokalizowanie początku narastania sygnału optycznego. Koniec spalania (EOC – End Of Combustion) na wykresie ciśnienia występuje nieco za wartością maksymalną ciśnienia. Ustala się to poprzez porównanie sygnału ciśnienia z modelem wywiązywania ciepła i określenie kąta odpowiadającego np. 90% spalonego ładunku. Z rysunku 3.47 wynika, że maksymalna wartość sygnału optycznego jest opóźniona w stosunku do maksimum ciśnienia.



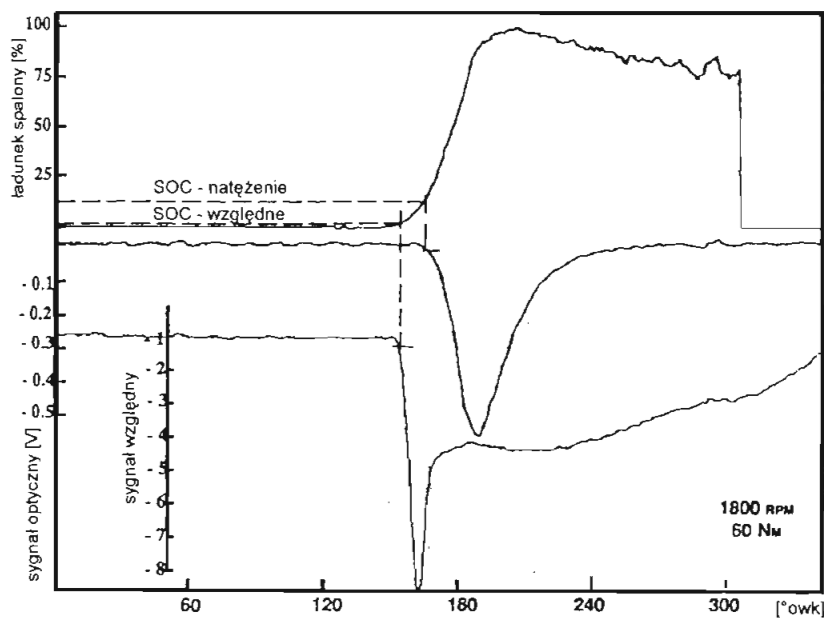
Rysunek 3.48. Porównanie udziałów masowych spalonego ładunku i natężenia sygnału optycznego [36]



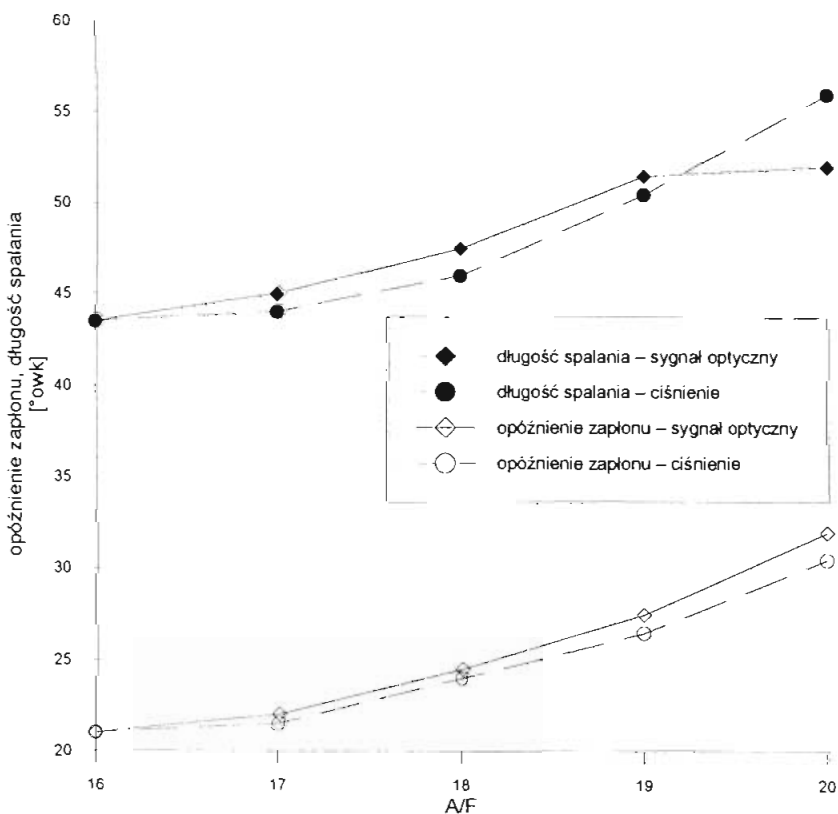
Rysunek 3.49. Korelacja kąta wystąpienia maksymalnej wartości sygnału optycznego i kąta odpowiadającego 90% spalonego ładunku [36]

Na rysunku 3.48 porównano udziały masowe spalonego ładunku obliczone za pomocą jednostrefowego modelu spalania i przebieg sygnału optycznego (wartości maksymalne dla sygnału 900 nm) dla tego samego cyklu spalania. Jak widać, wartość szczytowa sygnału

optycznego odpowiada 90% masowego udziału spalonego ładunku. Rys. 3.49 przedstawia korelację kątów wystąpienia wartości maksymalnych sygnału optycznego i 90% udziału masowego spalonego ładunku. Badania różnych silników wykazały, że udział masowy ładunku spalonego, odpowiadający wartości maksymalnej sygnału optycznego, zależy od kąta widzenia czujnika i geometrii komory spalania, lecz jak to wynika z rysunku 3.49, w przypadku konkretnego silnika i zastosowania czujnika o określonym kącie widzenia, udziały masowe mogą być skorelowane z pozycją maksimum sygnału optycznego.



Rysunek 3.50. Porównanie sygnału względnego, sygnału optycznego i udziału masowego ładunku spalonego [36]



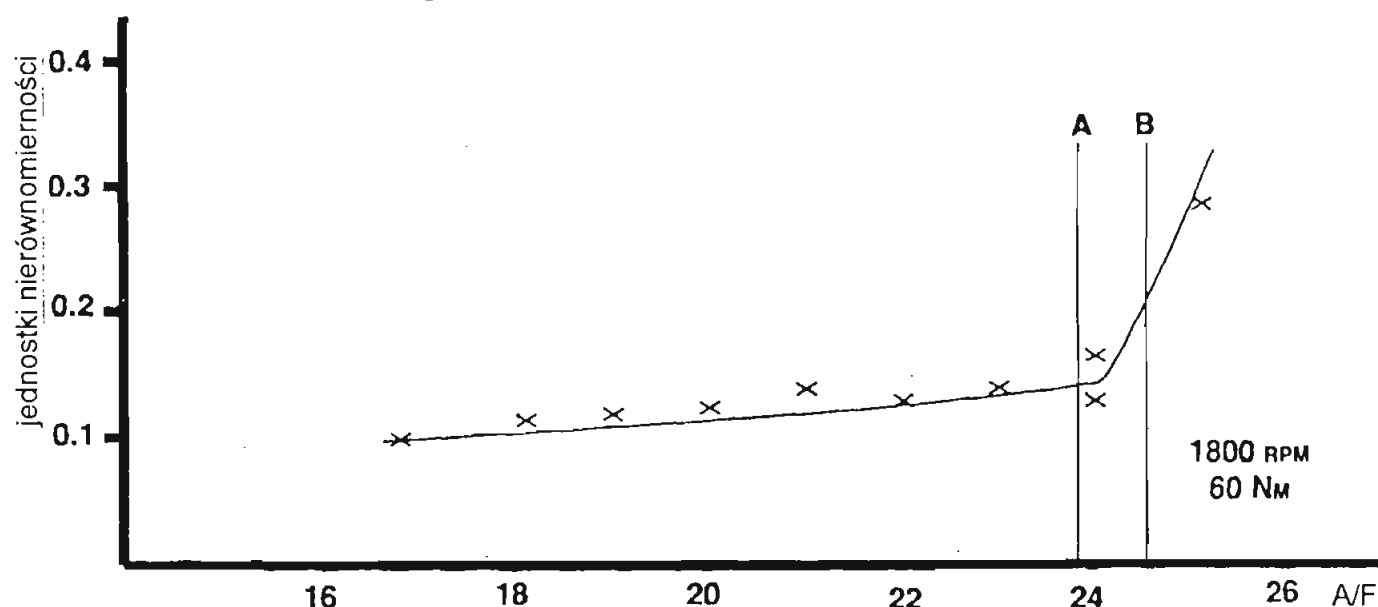
Rysunek 3.51. Porównanie opóźnienia zapłonu i długości spalania uzyskanych poprzez pomiar ciśnienia i sygnału optycznego [36]

Wykorzystanie sygnału względnego z obu fotodiod o różnych charakterystykach widmowych, pozwoliło na wcześniejsze wykrycie początku spalania, niż w oparciu o pomiar tylko intensywności świecenia. Rys. 3.50 przedstawia przebieg sygnału względnego, sygnał intensywności świecenia (900 nm) i udział masowy ładunku spalonego obliczony na podstawie sygnału ciśnienia. Analiza względnego sygnału umożliwia lokalizację początku spalania przy 2% udziału masowego ładunku spalonego, w przypadku pomiaru intensywności świecenia

wartość ta wynosi 10%. Porównano także (rys. 3.51) opóźnienie zapłonu i długość spalania, otrzymane w oparciu o sygnał optyczny i sygnał ciśnienia.

Aby obniżyć poziom NO_x wytwarzanych przez silnik spalinowy i utrzymać stosunkowo niskie zużycie paliwa, mieszanka paliwowo-powietrzna może zostać rozrzedzona zarówno powietrzem (dla spalania ubogiego) jak i spalinami (EGR – recyrkulacja). Wraz ze wzrostem rozrzedzenia ładunku rośnie cykliczna niestabilność przebiegu spalania. Prowadzi to do wzrostu w wahaniach momentu obrotowego, które mogą w efekcie końcowym zostać odebrane przez kierowcę jako nierównomierność pracy silnika.

Istnieją algorytmy sterowania [36, 47, 48], w których poziom rozrzedzenia ładunku (zubożenia mieszanki) jest utrzymywany na poziomie ustalonym w oparciu o analizę sygnału otrzymywanego z czujnika ciśnienia lub z pomiarów zmian prędkości obrotowej wału korbowego. Wybrany poziom cyklicznej stabilności ogólnie przedstawia maksymalne zubożenie mieszanki możliwe do uzyskania, zanim kierowca odczuje nierównomierność pracy silnika. Wykorzystanie sygnału ciśnienia związane jest z dużymi kosztami przetwornika ciśnienia, sygnał prędkości ma niski stosunek sygnału do szumu z powodu zakłóceń pochodzących od drogi – co wymusza niskie częstotliwości próbkowania.



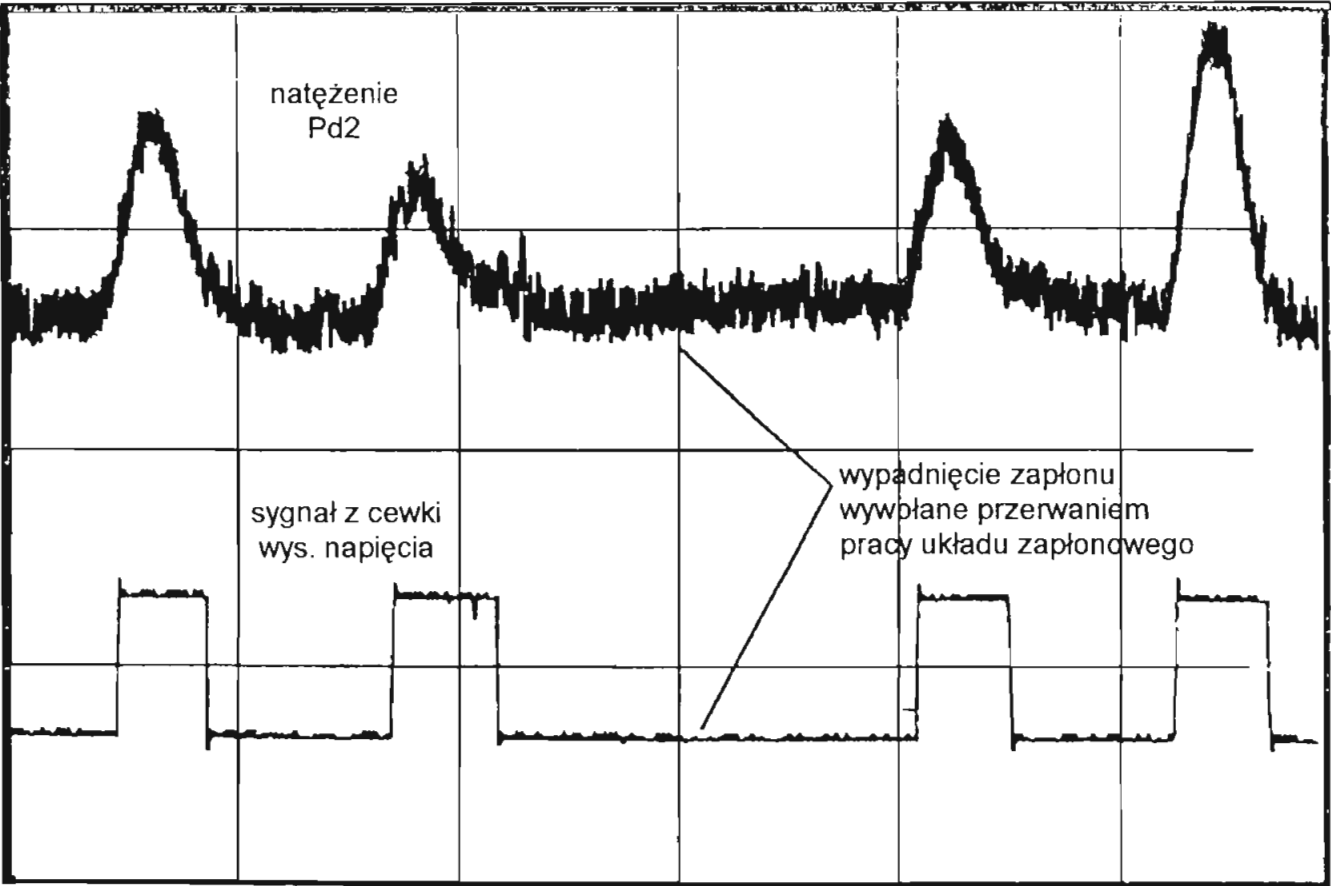
Rysunek 3.52. Krzywa nierównomierności pracy silnika o silnym zawirowaniu ładunku [36]

Na rysunku 3.52 przedstawiono krzywą nierównomierności pracy silnika przy stopniowym zubażaniu mieszanki. Widoczny jest stopniowy wzrost nierównomierności pracy, dla $A/F = 24$ następuje silny wzrost prędkości narastania krzywej. Wiąże się to z pojawieniem się zjawiska wypadania zapłonów. Aby spełnić normy toksyczności, silnik musi pracować w punkcie (A) (rys. 3.52), błąd określenia składu mieszanki rzędu 0,5 spowoduje przeniesienie pracy silnika do punktu (B) leżącego na odcinku krzywej o nieakceptowalnej nierównomierności pracy. Układy pomiarowe o niskich częstotliwościach próbkowania nie gwarantują szybkiej reakcji układu sterującego.

Zastosowanie czujników optycznych pozwoli na rozwiązanie problemów związanych z kontrolą stabilności cyklicznej. Przykładem są wyniki badań zamieszczone w cytowanej już pracy Nuttona i Pinnocka [36]. Wskaźnik stabilności pracy wyznaczono za pomocą obróbki staty-

stycznej danych dotyczących występowania spalania, otrzymanych za pomocą czujnika optycznego analogicznie, jak dla czujnika ciśnienia. Wykorzystano kowariancję (moment korelacyjny) czasu trwania spalania.

Czujnik optyczny zapewnia wyższą jakość techniczną nad czujnikiem ciśnienia, jeśli chodzi o pomiary stabilności pracy. Wykorzystanie czujnika ciśnienia do wykrywania wypadania zapłonów wymaga określenia warunków napędzania silnika (braku spalania). Dla całkowitej poprawności algorytmu wykrywania wypadania zapłonów za pomocą pomiaru ciśnienia, niezbędne jest także utrzymanie dokładności czujników przy intensywnej eksploatacji. W systemie opartym na czujniku optycznym wymagana jest jedynie obecność lub brak sygnału świetlnego, co wystarcza do zidentyfikowania wypadnięcia zapłonu.

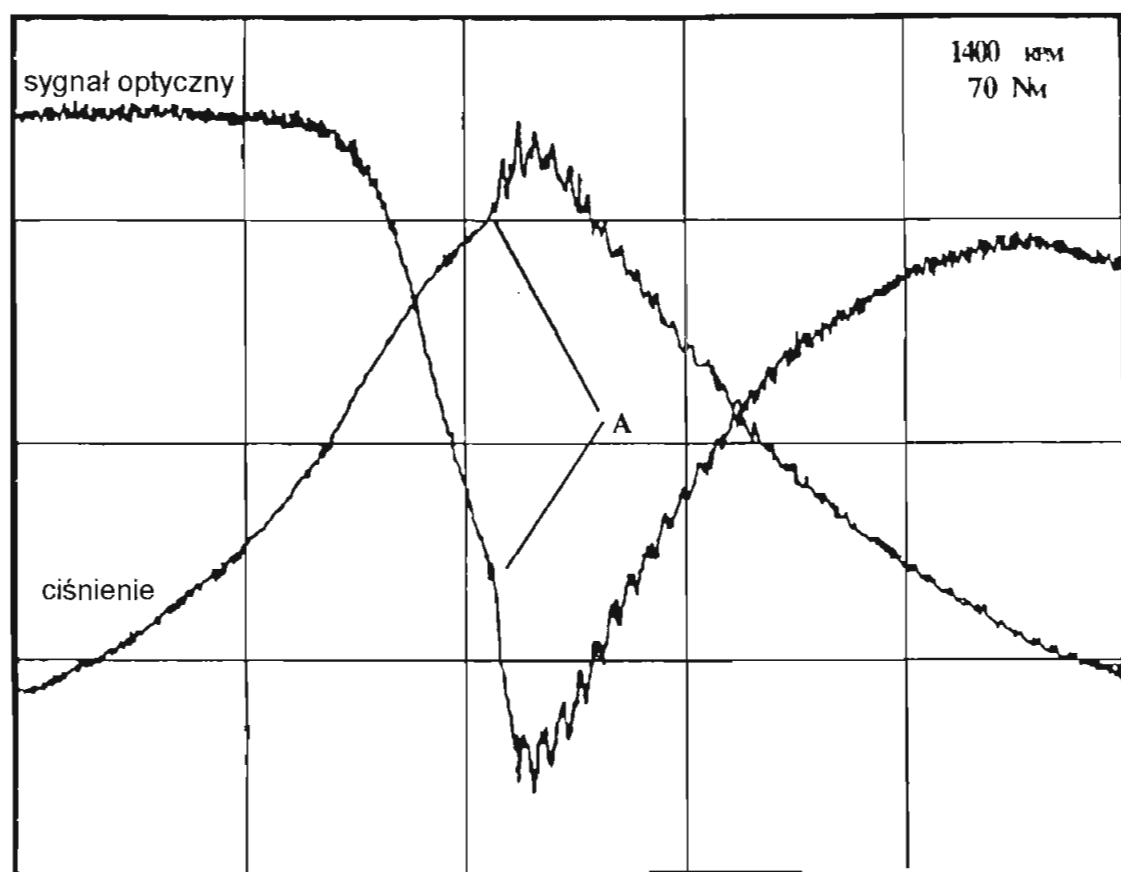


Rysunek 3.53. Przebieg sygnału optycznego w przypadku wypadania zapłonu, dla porównania naniesiono także sygnał z cewki zapłonowej [36]

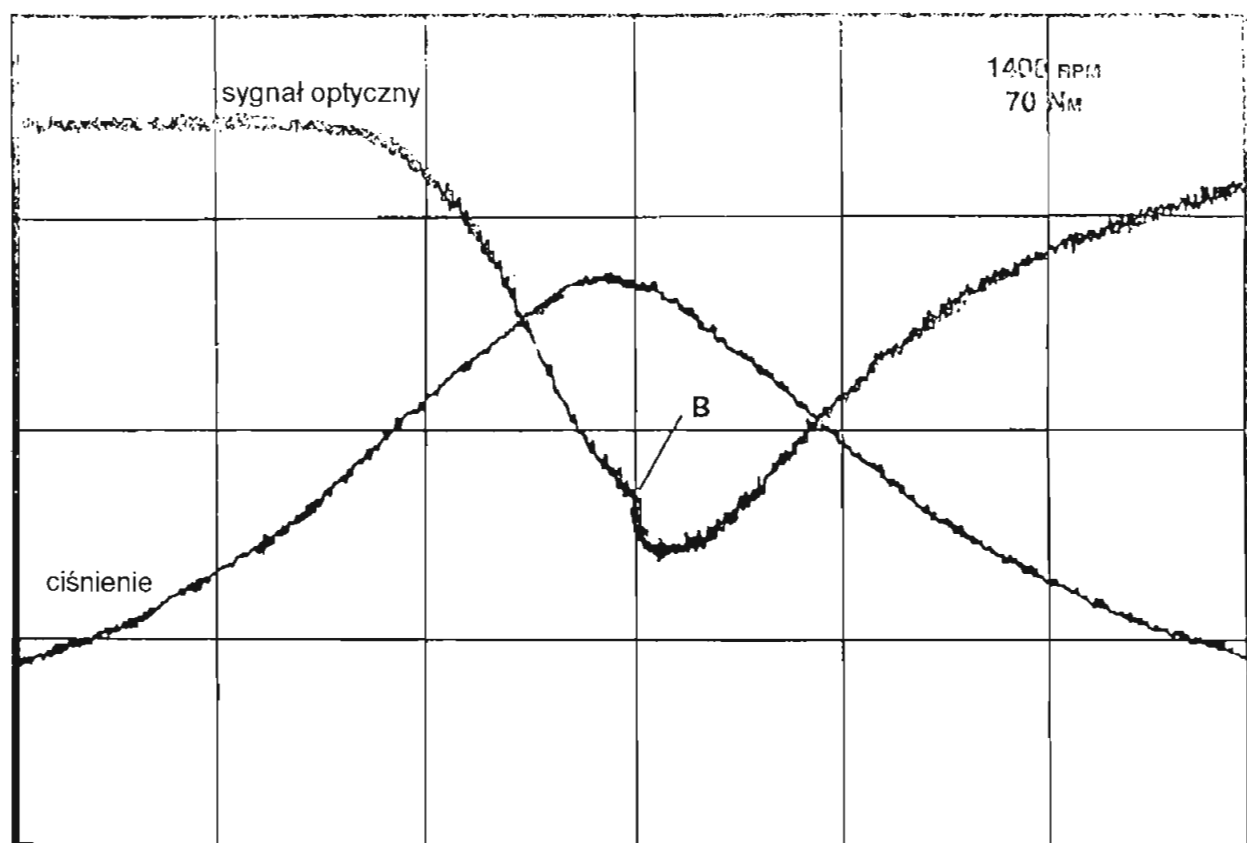
Na rysunku 3.53 przedstawiono wypadnięcie zapłonu zarejestrowane za pomocą czujnika optycznego, przy wymuszeniu polegającym na zakłóceniu pracy cewki zapłonowej. Wypadający zapłon jest wyraźnie widoczny i wykrywalny za pomocą prostej obróbki sygnału. Wynika z tego, że można wykorzystywać czujnik optyczny zarówno do dostarczania danych statystycznych dla kontroli nierównomierności pracy, jak i do szybkiego próbkowania koniecznego dla wykrywania wypadania zapłonów.

Spalanie stukowe jest istotnym problemem zarówno dla silników spalających mieszankę ubogą jak i dla silników o bardzo wysokich osiąгах. Większość systemów wykrywania stuku stosuje obecnie czujniki piezoelektryczne montowane na bloku cylindra. Czujniki takie zazwyczaj cechują się niską wartością stosunku sygnału do szumu, zwłaszcza przy dużych pręd-

kościach. Jednakże za najlepszą metodę wykrywania stuku uznaje się pomiar ciśnienia wewnątrz komory spalania.



Rysunek 3.54. Porównanie sygnału optycznego i sygnału ciśnienia dla spalania stukowego [36]



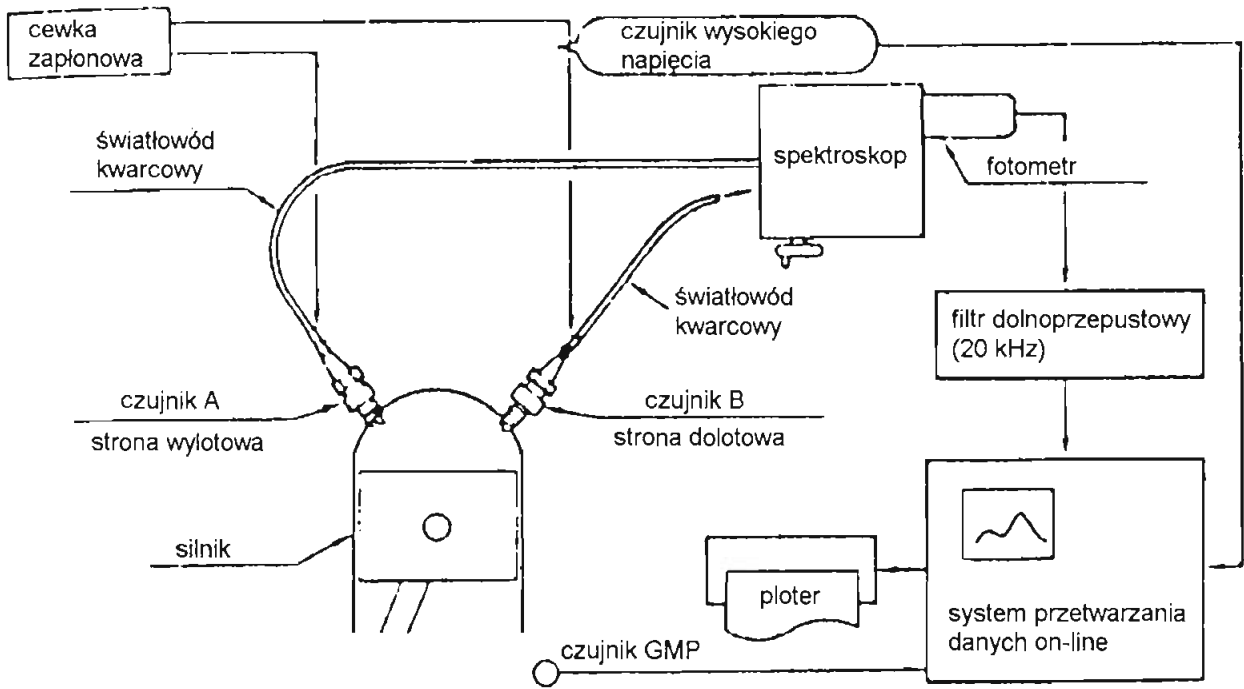
Rysunek 3.55. Sygnał optyczny i sygnał ciśnienia dla spalania na granicy stuku [36]

Na rysunku 3.54 porównano sygnał ciśnienia i sygnał optyczny dla typowego cyklu ze spalaniem stukowym. Wyraźnie widoczne są oscylacje na zboczach zstępujących każdej z krzywych. Wykrycie tych oscylacji poprzez zastosowanie filtra dostrojonego do częstotliwości stuku może być wykonane w ten sam sposób jak badanie ciśnienia. Opóźnianie kąta wyprzedzenia

zapłonu powoduje stopniowy zanik oscylacji. Wadą tej metody jest to, że silnik musi spalać stukowo, aby móc podjąć działania korygujące. W pewnych okolicznościach, zwłaszcza w silnikach o zwiększonym stopniu sprężania, nawet krótkie okresy spalania stukowego mogą mieć negatywne następstwa. Ponadto, w chwili rozpoczęcia spalania stukowego (punkt A) następuje gwałtowny wzrost zarówno prędkości narastania ciśnienia, jak i intensywności świecenia.

Rysunek 3.55 przedstawia sygnał ciśnienia i sygnał optyczny otrzymane przy pracy silnika na granicy spalania stukowego. Brak jest oscylacji na zboczach zstępujących, przebieg ciśnienia nie wykazuje żadnych punktów charakterystycznych. Biorąc pod uwagę tylko sygnał ciśnienia, stuk jest niewykrywalny. Jednakże sygnał optyczny wykazuje nagłą zmianę przebiegu krzywej na zboczu wstępującym (punkt B), także przy braku oscylacji. Efekt ten wskazuje na to, że w warunkach pracy na granicy spalania stukowego powstają warunki powodujące wzrost intensywności promieniowania widzialnego, pomimo braku typowych, związanych ze stukiem, zmian przebiegu ciśnienia. Czujnik optyczny umożliwia więc rozpoznawanie granicy spalania stukowego, zanim ono faktycznie wystąpi. Daje to duże korzyści, zwłaszcza w przypadku zastosowania go w silnikach o wysokich osiąгах.

Badanie procesu spalania i rozprzestrzeniania się płomienia pod kątem optymalizacji kształtu komory spalania, było tematem prac opisanych w [56]. Przy odpowiednich zmianach kształtu komory spalania granica spalania stukowego może być przeniesiona w kierunku wcześniejszych kątów zapłonu, co daje w rezultacie wyższą sprawność. Dotyczy to zwłaszcza pracy silnika przy obciążeniach częściowych. Dalszy wzrost sprawności może być uzyskany poprzez zwiększenie stopnia sprężania, mimo że obniża to dozwolone wyprzedzenie zapłonu. Przeprowadzenie opisanych modyfikacji wymaga dokładnej znajomości procesu spalania.

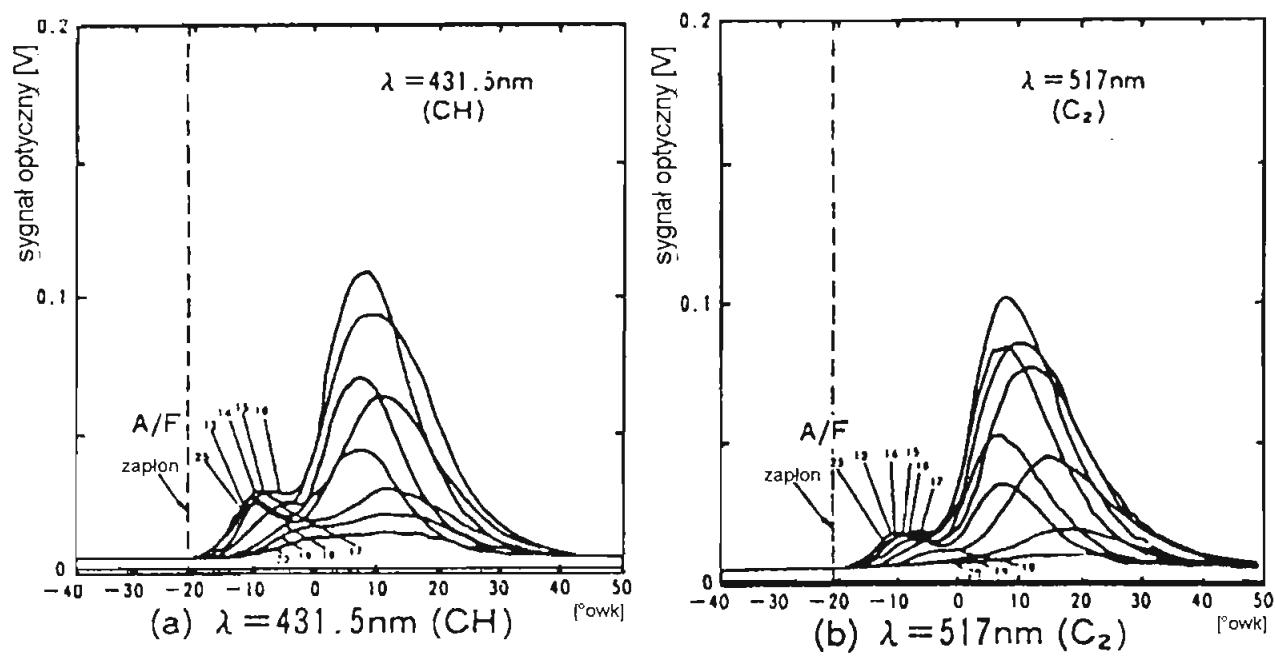


Rysunek 3.56. Optoelektroniczny tor pomiarowy do obserwacji procesu spalania [56]

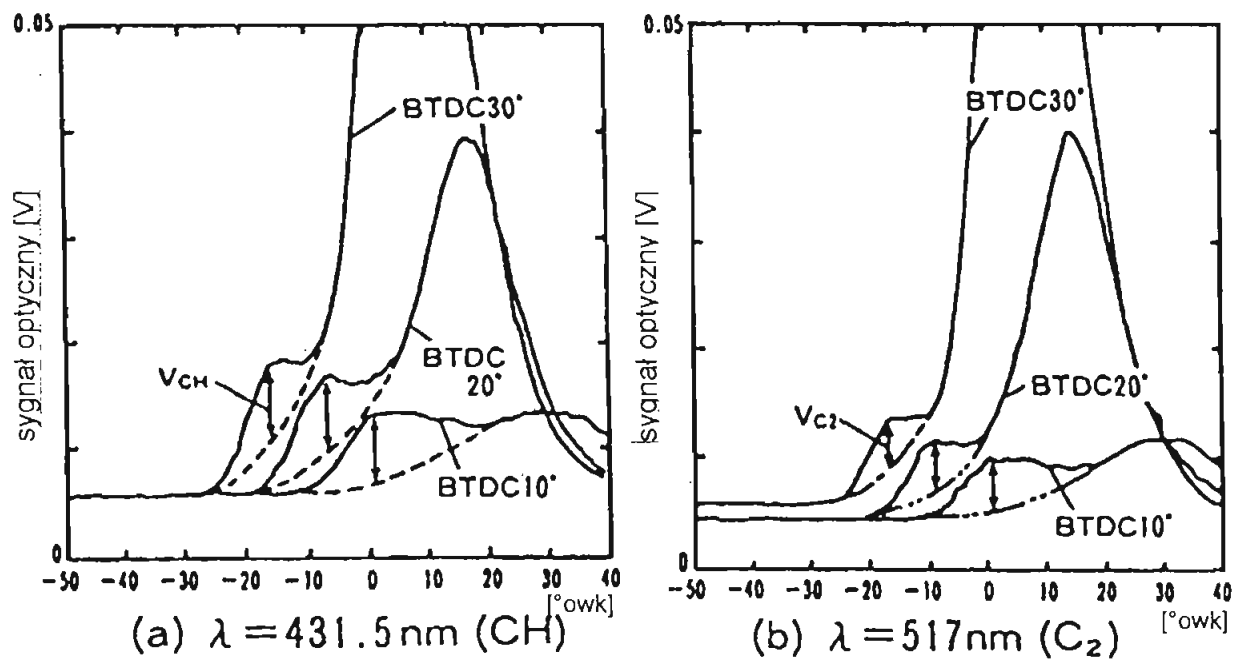
Spicher i Krebs wykorzystali do badań przebiegu spalania tor pomiarowy (rys. 3.56), wyposażony w sensory światłowodowe [56].

Zamontowano dwa optyczne czujniki spalania, jeden po stronie dolotowej, drugi po stronie wylotowej komory spalania. Sygnał optyczny po przejściu przez pręt kwarcowy czujnika transmitowany był światłowodem do spektroskopu połączonego z fotometrem. W trakcie badań zauważono zmiany położenia zera sygnału wyjściowego, spowodowane zanieczyszczeniem zwierciadeł czujników. Sprawność transmisji przywracano za pomocą ultradźwiękowego oczyszczania końcówek.

Badano wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza na poziom sygnału optycznego. Pomiarów dokonywano dla dwóch długości fal: 431,5 nm (odpowiada to emisji HC) i 517 nm (emisja C₂). Widoczna jest silna zależność poziomu sygnału od składu mieszanki oraz zróżnicowanie poziomu sygnału ze względu na długość fali (rys. 3.57).



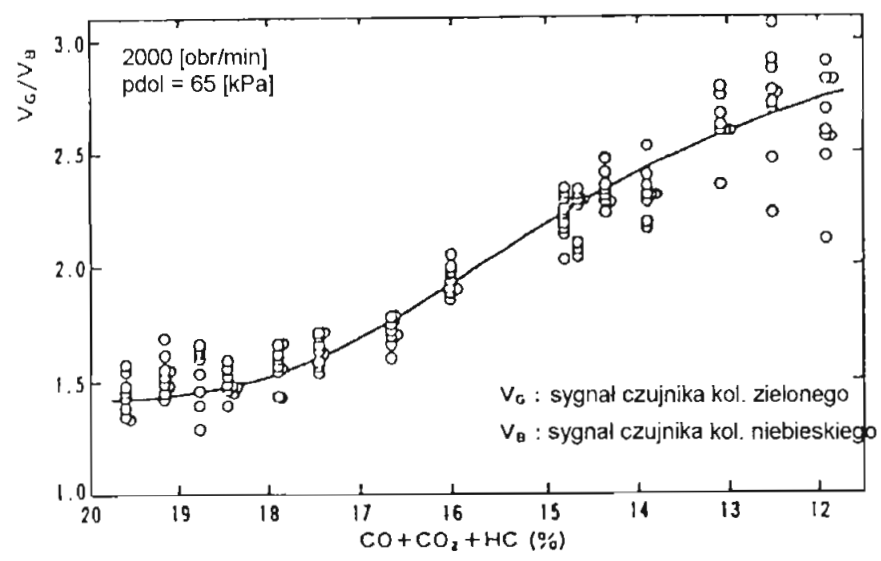
Rysunek 3.57. Przebieg sygnału optycznego w zależności od składu mieszanki [56]



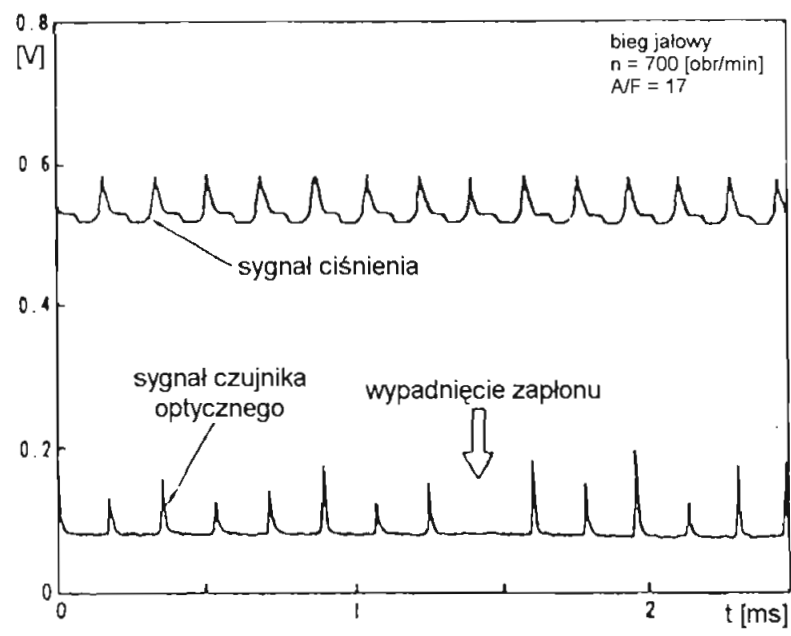
Rysunek 3.58. Przebieg sygnału optycznego w zależności od kąta wyprzedzenia zapłonu; BTDC – (Before Top Dead Center) przed GMP [56]

Zauważalny był wzrost poziomu sygnału wraz ze wzrostem kąta wyprzedzania zapłonu (rys. 3.58), stwierdzono także, że sygnał odpowiadający długości fali 431,5 nm ma przebieg bardziej stromy w porównaniu do długości 517 nm.

Współczynnik składu mieszanki w pobliżu końcówki czujnika autorzy określali mierząc względny przebieg emisji HC/C₂. Na rys. 3.59 zamieszczono przebieg sygnału względnego dla kolorów zielonego (C₂) i niebieskiego (HC) w zależności od składu mieszanki, wyrażonego jako suma CO+CO₂+HC.

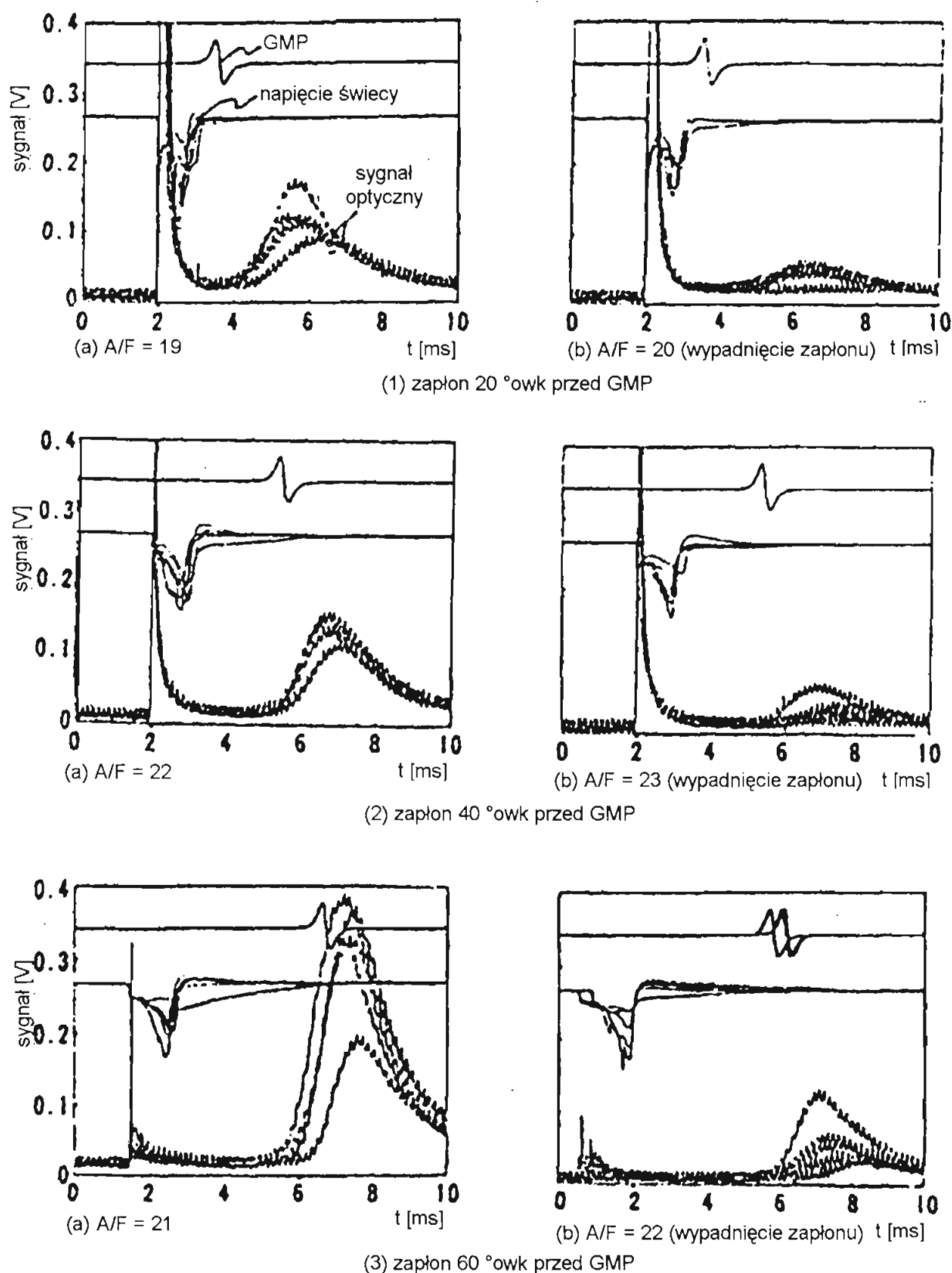


Rysunek 3.59. Określanie składu mieszanki przy pomocy sygnału względnego (V_G/V_B) [56]



Rysunek 3.60. Detekcja wypadania zapłonu na podstawie sygnału optycznego i sygnału ciśnienia [56]

Zauważono także, że sygnał optyczny nie występuje w chwili wypadnięcia zapłonu (rys. 3.60 i 3.61). Zmieniano w szerokim zakresie skład mieszanki (A/F 19÷23) oraz kąt wyprzedzenia zapłonu (20÷60 °owk przed GMP). Przy kącie wyprzedzenia zapłonu wynoszącym 20° sygnał pochodzący od świecy jest silny, natomiast wskutek wypadnięcia zapłonu zanika emisja termiczna. Dla kąta 60° zanika także sygnał świecy. Pozwala to na określenie dla danego silnika strefy wypadania zapłonów.



Rysunek 3.61. Wykrywanie wypadania zapłonów na podstawie przebiegów sygnału optycznego dla zmiennych współczynników składu mieszanki i kątów wyprzedzenia zapłonu [56]

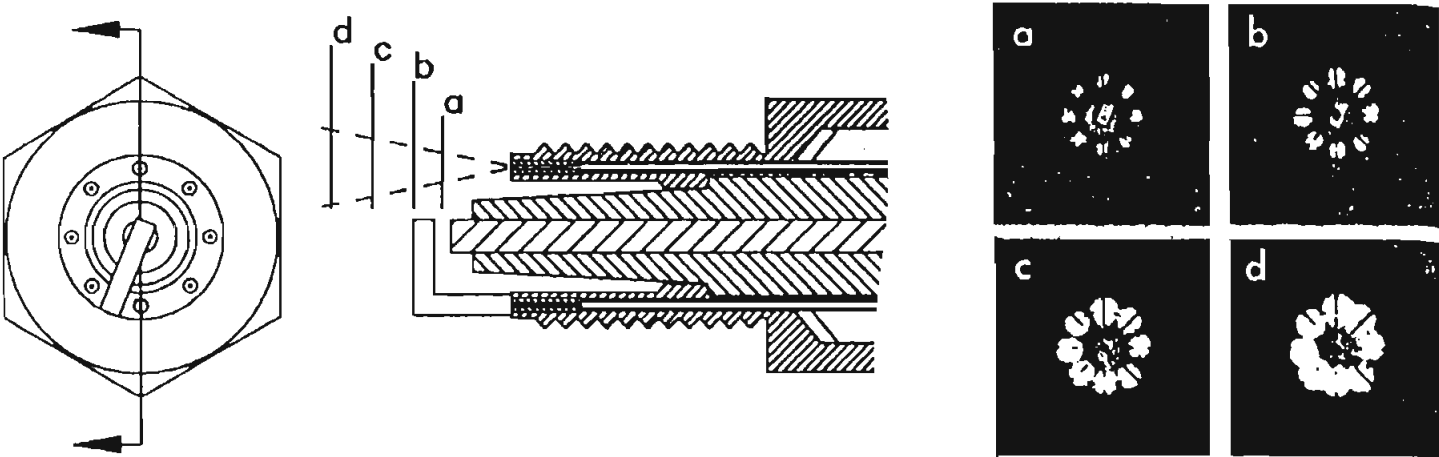
Wspomniane osadzanie zanieczyszczeń na końcówkach czujników powodowało osłabienie sygnału rzędu 10-20% przy pracy w czasie 30-60 h. Wymuszało to konieczność okresowej kalibracji torów pomiarowych. Możliwe było zastosowanie jednego z poniższych sposobów kalibracji:

- usuwanie zanieczyszczeń poprzez wyładowanie iskry,
- zastosowanie układu kompensacyjnego, określającego osłabienie sygnału w ustalonych warunkach pracy,
- wykrywanie poziomu osłabienia sygnału za pomocą źródła światła o znanej charakterystyce,
- zastosowanie osłoniętej końcówki czujnika,
- kompensacja poprzez pomiar w dwóch długościach fali,
- porównanie sygnału z czujnika optycznego z sygnałem czujnika ciśnienia.

Rezultaty uzyskane przez autorów pracy [56] ponownie potwierdziły przydatność metod optycznych do badań przebiegu procesu spalania. Natężenie mierzonego sygnału zmieniało się wraz ze zmianami współczynnika składu mieszanki i kąta wyprzedzenia zapłonu. Zastosowane sposoby kalibracji torów pomiarowych i oczyszczania czujników umożliwiły bezawaryjną pracę układu w okresie 60 h, przy zachowaniu transmisji na poziomie 92% sygnału początkowego.

Czujnik światłowodowy o nieco innej konstrukcji niż przedstawione dotąd rozwiązania został opracowany i wykorzystany w badaniach autorów pracy [72]. Celem badań były pomiary ruchu i prędkości wzrostu jądra płomienia w silniku o zapłonie iskrowym.

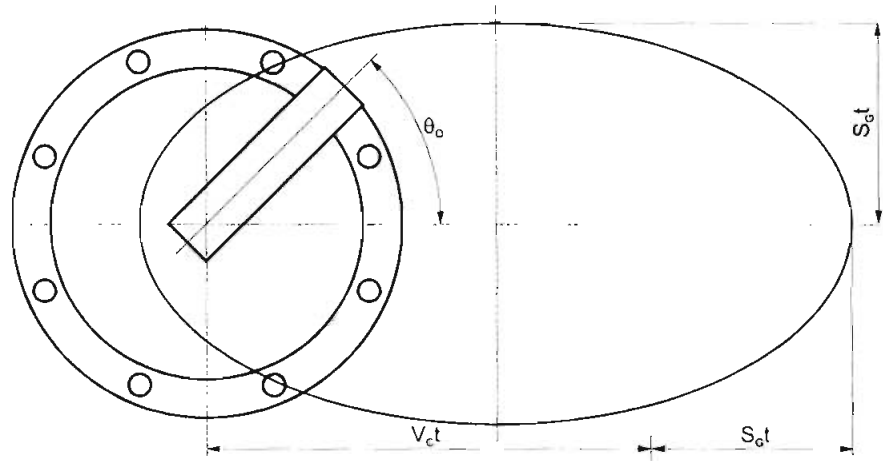
Obecnie w literaturze przyjmuje się, że rozwój płomienia w jego wczesnej fazie odpowiada za występowanie cyklicznej zmienności w przebiegu procesu spalania. Wnioski takie zostały wyprowadzone w opraciu o materiał uzyskany za pomocą szybkiej fotografii procesu spalania w silnikach laboratoryjnych. Autorzy cytowanej pracy [72] zamierzali potwierdzić i uzupełnić dotychczasowy stan badań w przypadku silnika seryjnej produkcji, gdzie dostęp optyczny nie jest możliwy bez naruszenia geometrii komory spalania. W tym celu wyposażono standardową świecę zapłonową w osiem włókien światłowodowych, pełniących rolę detektorów płomienia (rys. 3.62).



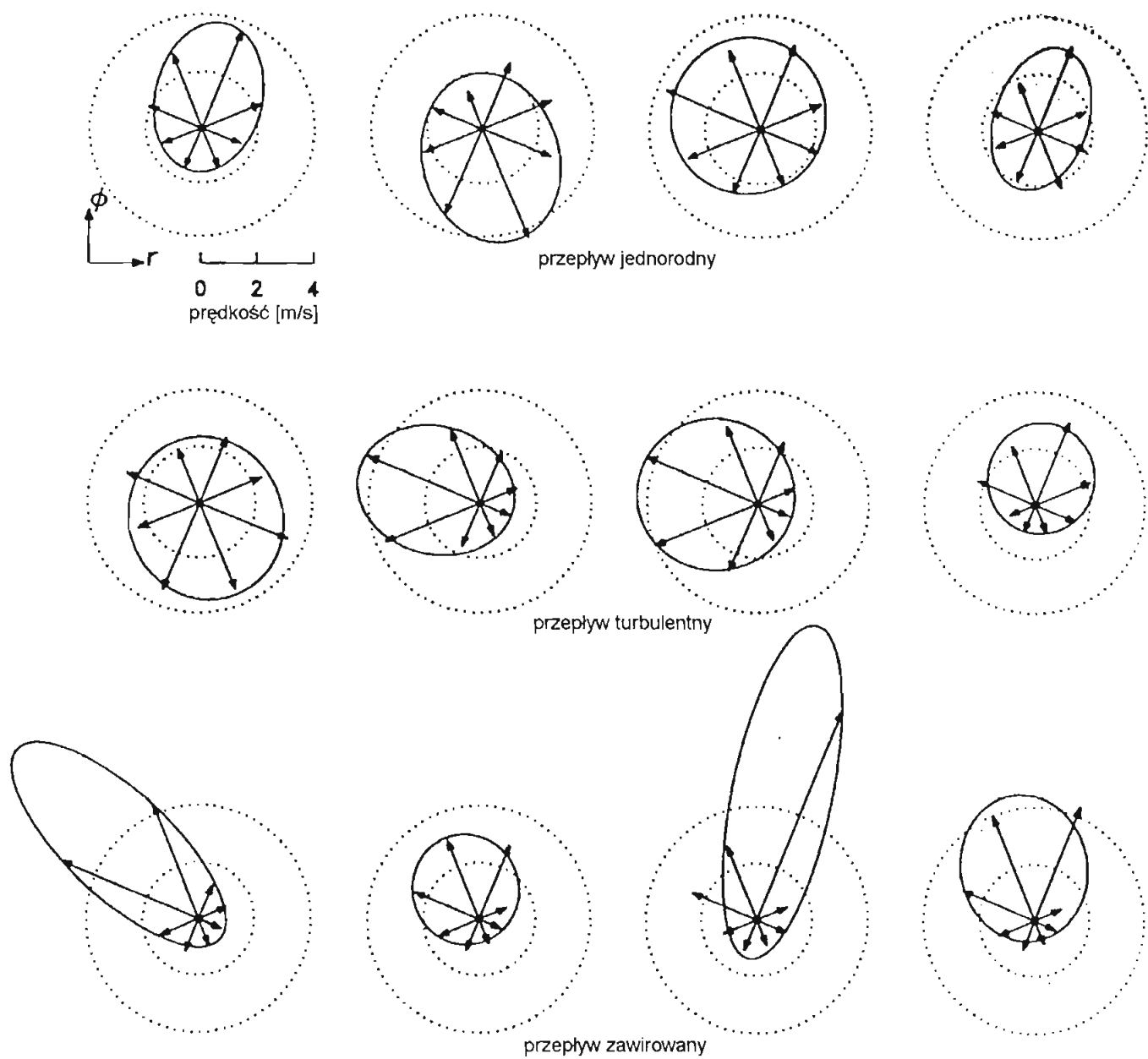
Rysunek 3.62. Schemat światłowodowego czujnika płomienia; linia przerywana określa kąt akceptacji włókna, litery oznaczają cztery płaszczyzny (w odległości 0, 2, 5 i 8 mm od środka szczeliny świecy), w których wykonano fotografie [72]

Średnica światłowodów wynosiła 200 μm , kąt akceptacji sygnału wynosił 23° . Zdjęcia na rys. 3.62 przedstawiają pole widzenia ośmiu włókien w czterech różnych płaszczyznach znajdujących się w rosnącej odległości od szczeliny elektrody świecy. Pole widzenia czujnika określono przesyłając wiązkę światła laserowego w kierunku odwrotnym niż normalny kierunek transmisji sygnału. Sygnał optyczny transmitowany był do fotodetektorów oddzielnie dla każdego włókna i po przetworzeniu na sygnał elektryczny wyzwał elektroniczne liczniki czasu.

W wyniku pomiarów uzyskano czas od chwili zapłonu do chwili rozpoznania płomienia przez każde z włókien. Dzięki temu można było określić średnią prędkość płomienia w określonym kierunku na bazie przemieszczenia od szczeliny elektrody do i-tego włókna. Aby wyeliminować promieniowanie świetlne pochodzące od iskry świecy, stosowano po wystąpieniu zapłonu zwłokę czasową (150 μ s), po upływie której uruchamiane były układy elektronicznej detekcji płomienia.



Rysunek 3.63. Schemat położenia eliptycznego jądra płomienia w chwili t względem poszczególnych włókien [72]



Rysunek 3.64. Porównanie obliczeń modelu z wynikami pomiarów dla pojedynczego cyklu ($n = 300$ obr/min) [72]

Ze względów praktycznych konieczna była redukcja danych otrzymanych z ośmiu pomiarów do kilku parametrów, charakteryzujących ogólne zachowanie się jądra płomienia w czasie jednego cyklu. Przyjęto eliptyczny model jądra płomienia (rys. 3.63). Krótka oś elipsy określa prędkość wzrostu S_G , natomiast prędkość unoszenia V_C obliczana jest z odległości od szczeliny świecy do najdalszego punktu elipsy. Kierunek unoszenia θ_0 definiowany jest względem elektrody.

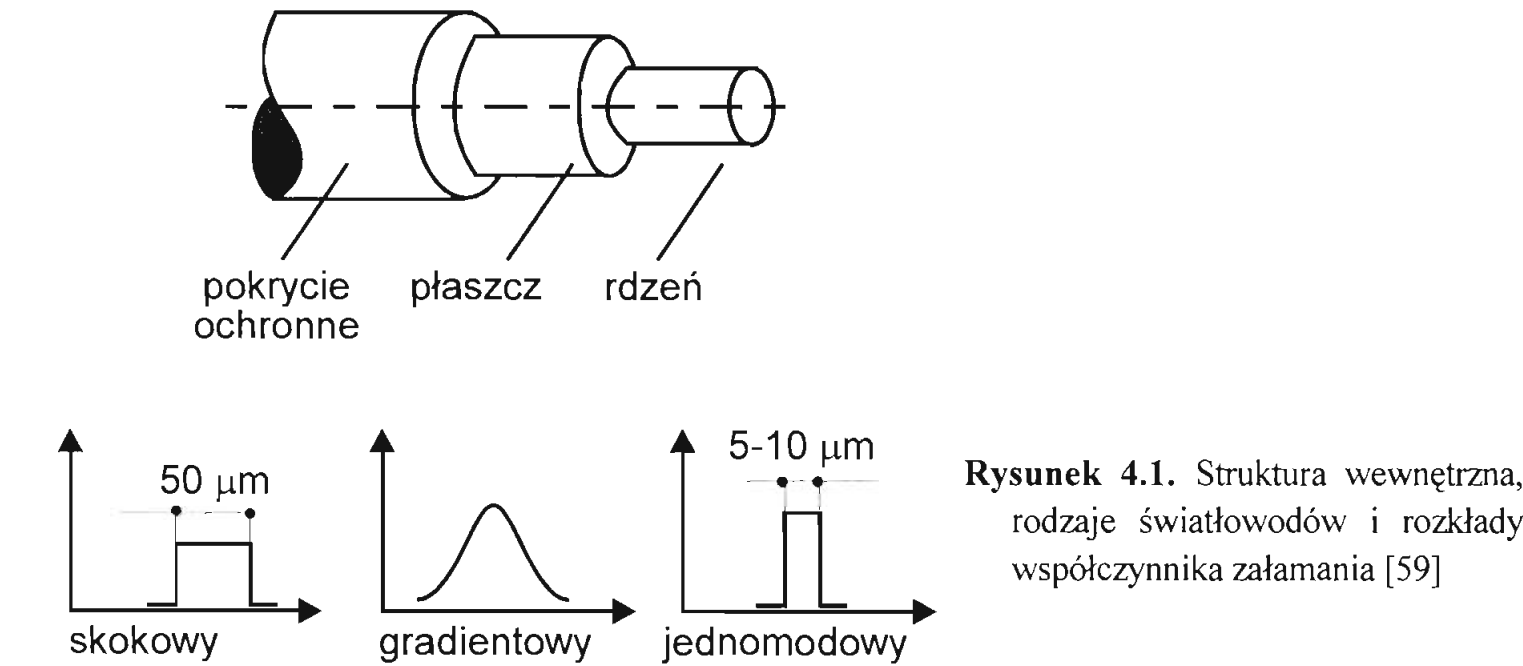
Porównanie pomiarów i wyników obliczeń modelu dla czterech kolejnych cykli pracy silnika, przy zastosowaniu różnych stopni zawirowania ładunku, przedstawiono na rys. 3.64. Biorąc pod uwagę fakt, że wczesny rozwój płomienia jest zjawiskiem wysoce niestabilnym, otrzymane rezultaty należy uznać za zadowalające.

Autorzy dokonali także próby korelacji wyników otrzymanych za pomocą czujnika światłowodowego z wynikami pomiarów prowadzonych równocześnie innymi metodami (indykowanie, pomiar prędkości przepływu metodą LDV). Uzyskano korelację prędkości wzrostu płomienia z całkowitą długością spalania, malejącą wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Prędkość unoszenia jądra płomienia nie była skorelowana z długością spalania. Zauważono jednak fakt, że brak istotnych korelacji nie eliminuje hipotezy o wpływie początkowego stadium rozwoju płomienia na zmienność cykliczną procesu spalania. Zastosowanie czujnika płomienia o większej rozdzielczości przestrzennej i szerszym polu widzenia pozwoliłoby autorom na bardziej wnikliwą analizę zagadnienia. Kontynuacja badań w tym zakresie powinna być prowadzona, ponieważ optyczny czujnik spalania może być zastosowany w silnikach seryjnych, podczas gdy w pracy [72] wykorzystano do badań silnik laboratoryjny o bocznym ułożeniu zaworów.

4.1. BUDOWA I PODSTAWOWE RODZAJE ŚWIATŁOWODÓW

Podstawowym elementem konstrukcyjnym czujników światłowodowych są dielektryczne falowody optyczne. Światłowód stanowi linię transmisyjną monitorowanej informacji. Transmisja fali świetlnej w falowodzie optycznym polega na utrzymaniu strumienia światła w rdzeniu falowodu. Rdzeń falowodu stanowi ośrodek optycznie przezroczysty o większym współczynniku załamania niż otoczenie rdzenia zwane płaszczem. Całkowite odbicie światła, padającego pod kątem mniejszym od granicznego na powierzchnię rozdziału rdzenia i płaszcza, jest podstawową zasadą optycznej transmisji falowodowej [17].

W konstrukcji głowic pomiarowych czujników światłowodowych używa się falowodów włóknistych o przekroju kołowym rdzenia i płaszcza, zwanych światłowodami. Podstawowym materiałem stosowanym do wytwarzania światłowodów jest szkło kwarcowe SiO₂ (rys. 4.1). Światłowody krzemowe stosuje się głównie w telekomunikacji. Na potrzeby budowy czujników, zwłaszcza w zastosowaniach motoryzacyjnych, wytwarzane są na bazie SiO₂ z domieszkami ziem rzadkich.



Wiązka światła wprowadzona do światłowodu propaguje się w postaci modów. Mod jest szczególnym rozkładem pola elektromagnetycznego, przenosi część wiązki światła i rozprzestrzenia się własnym torem z własną prędkością grupową. Ilość modów w światłowodzie zależy od jego wymiarów geometrycznych i różnicy współczynników załamania rdzenia i płaszcza. W przybliżeniu miarą ilości modów jest liczba falowodowa [59]:

$$V = \frac{2\Pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \frac{2\Pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{\Delta n}$$

(4.1)

gdzie:

λ – długość fali,

a – promień rdzenia,

$n_1; n_2$ – współczynniki załamania rdzenia i płaszcza, $\Delta n = (n_1 - n_2)/n_1$

W granicach wartości $0 < V < 2,405$ występuje pojedynczy mod podstawowy HE_{11} . Jego energia pozostaje zamknięta wewnątrz rdzenia światłowodu, bez względu na jego długość. Transmisję jednomodową osiąga się przez odpowiednie zmniejszenie promienia rdzenia światłowodu a lub różnicy współczynników załamania Δn , a najczęściej optymalizuje się wartości a i Δn dla danej długości fali. Światłowody jednomodowe dla długości fali $\lambda = 0,85; 1,3; 1,55$ nm mają średnicę rdzenia odpowiednio 7; 9; 11 μm . Standardowa średnica rdzenia światłowodów wielomodowych wynosi 50 μm , zaś płaszcza 125 μm (standard telekomunikacyjny). Wśród światłowodów wielomodowych wyróżnia się dwie grupy:

- światłowody skokowe: o skokowej zmianie współczynnika załamania rdzenia względem płaszcza,
- światłowody gradientowe: współczynnik załamania światła zmienia się gradientowo.

Światłowody wielomodowe skokowe budowane są jako grubordzeniowe o średnicach 200, 400, 600 i 1000 μm .

4.2. WŁAŚCIWOŚCI ŚWIATŁOWODÓW

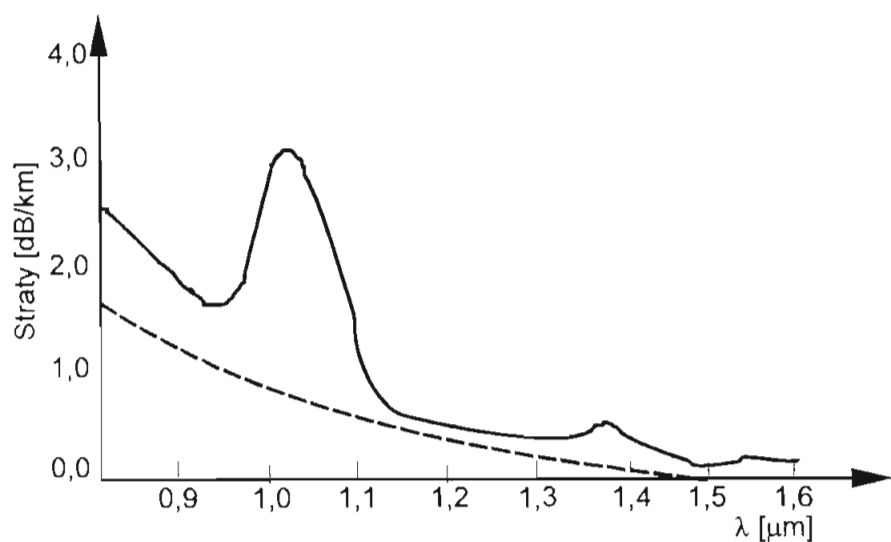
Zasadniczym kryterium oceny światłowodów są ich własności przenoszenia sygnałów optycznych. Własności te charakteryzują się wielkością wnoszonych strat transmisji (tłumienie sygnałów) i dyspersją (czasowe poszerzenie sygnałów).

Tłumienie, któremu podlega promieniowanie rozchodzące się w światłowodzie, jest konsekwencją zarówno absorpcji energii w materiale, z którego jest on wykonany, jak i z jej rozpraszania spowodowanego zmianami gęstości ośrodka, w którym następuje propagacja, oraz zmianami składu materiału, zarówno na poziomie mikroskopowym, jak i atomowym.

Straty spowodowane absorpcją (rozpraszaniem) energii pola wynikają z następujących przyczyn: absorpcji wewnątrz materiału rdzenia, absorpcji spowodowanej przez zanieczyszczenia obecne w materiale oraz absorpcji wynikającej z defektów budowy na poziomie atomowym.

Dla światłowodów kwarcowych ograniczenie transmisji występuje od strony fal krótkich w granicach 400÷600 nm i od strony fal długich powyżej 1600 nm. W przedziale widmowym 600÷1600 nm występują okna transmisji z minimum tłumienia dla długości fali $\lambda=850$ nm – tłumienie rzędu 2÷3 dB/km; dla $\lambda=1300$ nm – tłumienie rzędu 0,5 dB/km; dla $\lambda=1550$ nm – tłumienie rzędu 0,2 dB/km.

Na rysunku 4.2 przedstawiono typowy przebieg tłumienia w funkcji długości fali (charakterystyka spektralna tłumienia). Warto zauważyć, jak ważny jest wybór odpowiedniej długości fali stosowanej do transmisji, ze względu na występujące maksima tłumienia [16].



Rysunek 4.2. Typowy przebieg tłumienia w funkcji długości fali dla jednomodowego światłowodu ze szkła kwarcowego; linią przerywaną naniesiono straty pochodzące z rozpraszania Rayleigha [16]

Dyspersja. W światłowodach występują dwa rodzaje dyspersji – międzymodowa i chromatyczna. W odniesieniu do światłowodów wielomodowych uwzględnia się głównie dyspersję międzymodową, której wartość wynosi kilka nanosekund na kilometr.

W światłowodach jednomodowych występuje tylko dyspersja chromatyczna, składająca się z kolei z dyspersji materiałowej (dodatniej) i faliwodowej (ujemnej) dla długości fali $\lambda > 1270$ nm. Dzięki różnicy znaków dwóch składowych dyspersji chromatycznej można konstruować światłowody o zerowej dyspersji dla określonej długości fali z przedziału $1300 < \lambda < 1550$ nm.

Tabela 4.1. Podstawowe charakterystyki światłowodów jedno- i wielomodowych [59]

Parametr	Światłowody wielomodowe		Światłowody jednomodowe
	grubordzeniowe	gradientowe	
długość fali λ	0,82 – 0,85 μm	0,85; 1,3 μm	1,3; 1,55 μm
współ. załamania n	1,45 – 1,48	1,48	1,48
średnia geometr. współcz. załamania Δ	0,02	0,014	0,003
średnica rdzenia $2a$	100; 200; 400 μm	50 μm	7,5; 9 μm
liczba faliwodowa V	100	30	2,07; 2,405
liczba modów N	1000	30	1

- Ze względu na kryterium dyspersji światłowody dzielimy na:
- skokowe (o skokowej zmianie współczynnika załamania rdzenia) o dużej dyspersji – pasmo przenoszenia rzędu $20 \div 50$ MHz/km; liczba modów $N \approx V^2/2$,
 - gradientowe (o gradientowej zmianie współczynnika załamania) o średniej dyspersji – pasmo przenoszenia $400 \div 800$ MHz/km; liczba modów $N \approx V^2/4$,
 - jednomodowe o małej dyspersji – pasmo przenoszenia $1 \div 100$ GHz/km.

W tabelach 4.1 i 4.2 przedstawiono typowe parametry i własności światłowodów używanych do budowy czujników i światłowodowych linii transmisyjnych.

Tabela 4.2. Typowe parametry światłowodów i kabli optycznych [59]

Typ światłowodu	Średnica rdzenia [μm]	Średnica płaszczka [μm]	Średnica kabla [mm]	Min. promień zgięcia [mm]	Straty transmisji [dB/km]	Temperatura pracy [°C]
Plastikowy o skokowym wsp. załamania; wielomodowy	300÷1500	500÷2000	1÷4	50	350÷600	-40÷85
Krzemowy o płaszczu plastikowym; wielomodowy	200÷1500	300÷2000	2÷4	25	10÷30	-20÷70
Szklany o skokowym wsp. załamania; wielomodowy	50÷300	125÷400	2,5÷4	25	10÷40	-20÷ 70
Gradientowy wielomodowy, krzemowy	50	125	2,5	25	3 + 0,2	-20÷70
Jednomodowy	3÷10	125	różne	25	0,5 + 0,2	-20÷70

4.3. ŚWIATŁOWÓD JAKO ELEMENT TORU POMIAROWEGO

- Wyróżnia się następujące rodzaje oddziaływań ośrodka na falę optyczną:
- *fizykomechaniczne*: siła, ciężar, ciśnienie, różnica ciśnień, drgania, energia słoneczna, prędkość, przyspieszenie, przepływ, poziom, twardość, grubość, lepkość, gęstość, mętność itp.,
 - *elektryczne*: napięcie, prąd, częstotliwość, indukcyjność, pojemność, oporność,
 - *magnetyczne*: natężenie pola, histereza, indukcja magnetyczna,
 - *termiczne*: temperatura, przewodność termiczna, przepływ ciepła, emisja,
 - *radiacyjne*: częstotliwości radiowe, podczerwień, widzialne, ultrafioletowe, promienie X, promieniowanie jądrowe (neutrony, promienie γ, cząstki α),
 - *chemiczne*: koncentracja, stan skupienia, rodzaje cząstek, aktywność biologiczna.

Efektom oddziaływań jest zmiana określonego parametru fali optycznej. Wielkość zmian parametru, np. natężenia (amplitudy), fazy, polaryzacji, długości fali (widma), czasu przejścia (częstotliwość modulacji) jest proporcjonalna do intensywności oddziaływania, określanego jako modulacja. Ośrodek zewnętrzny może oddziaływać na falę optyczną bezpośrednio poprzez strukturę światłowodu – modulacja wewnętrzna, lub na falę świetlną wyprowadzaną ze światłowodu – modulacja zewnętrzna. Typowe sposoby modulacji przedstawione są na rysunku 4.3.

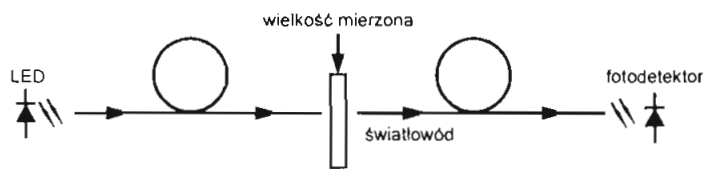
- Zastosowanie światłowodów w systemach pomiarowych może być dwojakiego rodzaju:
- światłowod pełni rolę linii transmisyjnej dla przesyłania danych z klasycznych czujników elektronicznych do układu pomiarowego,
 - światłowod stanowi część czujnika pomiarowego, a ponadto służy do transmisji sygnałów.

W czujnikach z modulacją zewnętrzną, światłowod spełnia jedynie funkcję toru transmisji optycznej, dostarczając sygnał optyczny do punktu pomiarowego i odprowadzając go po dokonaniu optycznej penetracji badanego obiektu i zarejestrowaniu zmian jego parametrów np.:

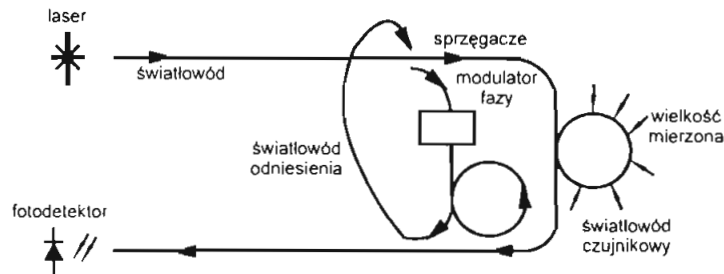
- doplerowskiej zmiany predkości fali optycznej w wyniku jej rozpraszania na cząsteczkach poruszających się z prędkością V,
- zmiany intensywności światła przez umieszczenie przesłony na drodze fali optycznej,

- detekcji zmian intensywności będącej z kolei funkcją polaryzacji światła,
- widmowego pochłaniania, emisji lub reemisji światła o zmiennym widmie przez badane związki chemiczne.

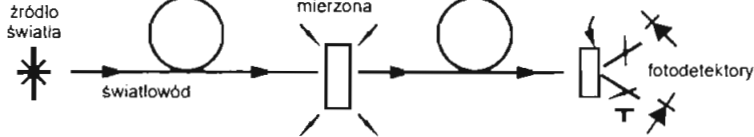
a) modulacja natężenia



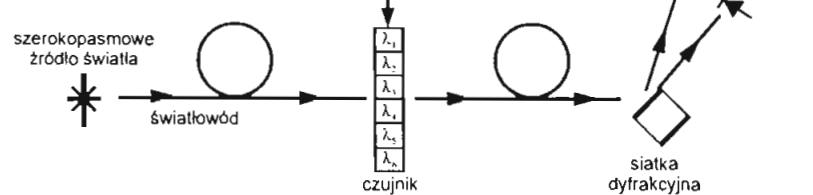
b) modulacja fazy



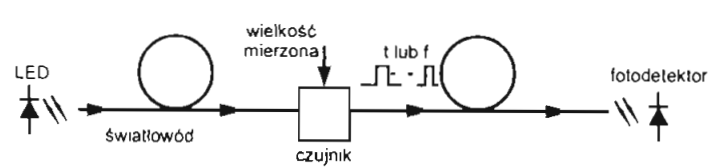
c) modulacja polaryzacji



d) modulacja długości fali



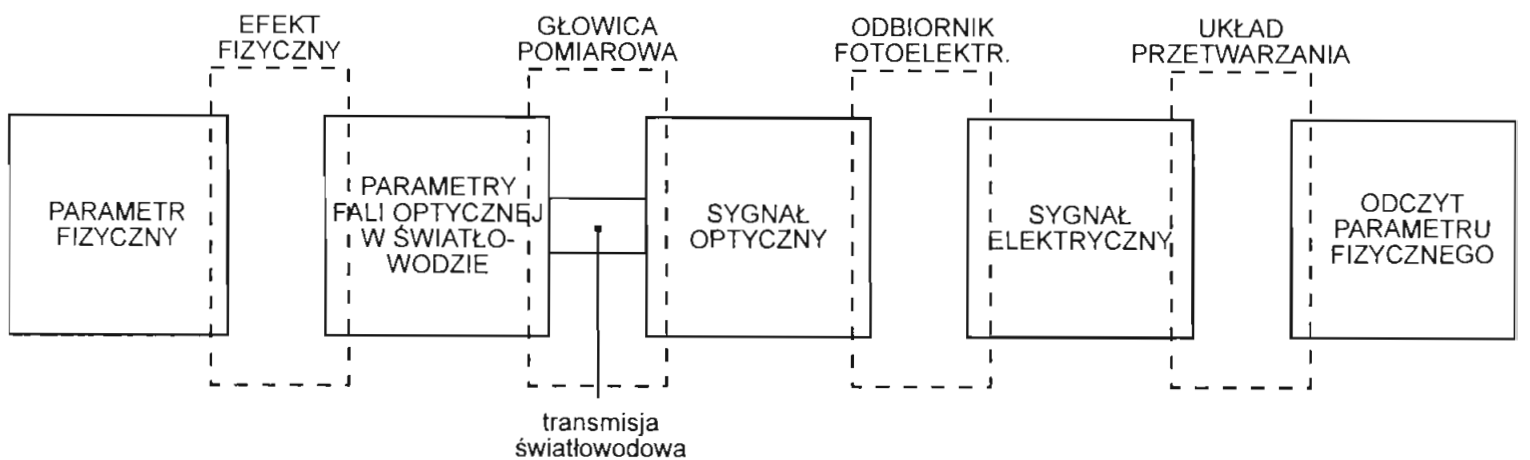
e) modulacja czasowa lub częstotliwościowa



Czujniki pomiarowe z reguły wykorzystują światłowody wielomodowe do transmisji mocy optycznej do i od głowicy pomiarowej czujnika. Czułość czujnika zależy tylko od głębokości modulacji intensywności światła bez uwzględniania jego fazy lub polaryzacji, które w światłowodach wielomodowych odnoszą się do każdego modu oddzielnie.

Elementem łączącym oddziaływanie ośrodka i umożliwiającym transmisję zarejestrowanej wielkości jest światłowód, natomiast głowica pomiarowa czujnika sprzęga zmiany parametrów monitorowanego ośrodka z falą optyczną transmitowaną światłowodem. Ogólna struktura czujnika światłowodowego przedstawiona jest na rys. 4.4.

Rysunek 4.3. Schemat ideowy metod modulacji fali optycznej stosowanych w konstrukcjach czujników światłowodowych [59]



Rysunek 4.4. Schemat blokowy ogólnej struktury czujnika światłowodowego [59]

Wyróżnić można trzy podstawowe elementy czujnika:

- głowicę pomiarową, w której następuje oddziaływanie mierzonej wielkości fizycznej na parametry fali optycznej, przy czym mierzona wielkość może oddziaływać bezpośrednio na światłowód,
- odbiornik fotoelektryczny rejestrujący zmiany parametrów fali świetlnej i przetwarzający sygnał optyczny na elektryczny,
- układ przetwarzania sygnału, przekształcający sygnał elektryczny w wartość liczbową wielkości mierzonej.

W czujnikach z wewnętrzną modulacją pewna długość światłowodu pracuje jako głowica czujnika, zachowując nadal funkcję transmisji optycznej w torze pomiarowym. Parametry fizyczne fali, które mogą ulegać modulacji w trakcie rejestracji zmian parametrów środowiska działającego bezpośrednio na światłowód to:

- zmiana natężenia fali optycznej wywołana np. mikropełnięciami światłowodu,
- indukowanie zmian fazy,
- indukowanie zmian polaryzacji fali świetlnej na odcinku światłowodu pracującego jako głowica pomiarowa.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

5.1. CELE BADAŃ

Należało przeprowadzić weryfikację przydatności opracowanego i zastosowanego optoelektronicznego toru pomiarowego do badań procesu spalania w silniku spalinowym. W szczególności weryfikacji doświadczalnej podlegały następujące elementy:

- czujnik pomiarowy (świeca wyposażona w pręt kwarcowy i element połączeniowy świecy i światłowodu transmisyjnego): jego trwałość, odporność na zanieczyszczenia, przebieg zużycia, zmiany tłumienia sygnału;
- tor transmisji sygnału optycznego: dobór światłowodu transmisyjnego, tłumienie sygnału, wpływ zakłóceń;
- układ fotodetektora i wzmacniaczy: czułość i rozdzielczość, dobór wzmacnienia, przeniesienie zakłóceń wewnętrznych (toru pomiarowego) i zewnętrznych (obce pola elektromagnetyczne).

Ponadto należało wykazać korelację pomiędzy zarejestrowanym sygnałem emisji optycznej z komory spalania a wybranymi wielkościami charakteryzującymi działanie silnika:

- ciśnieniem indykowanym p_i ,
- momentem obrotowym silnika M_o ,
- temperaturą spalin T_s ,
- zawartością toksycznych składników spalin (CO i HC),

obejmuje to także wpływ parametrów regulacyjnych silnika (zmian składu mieszanki paliwo-powietrznej i kąta wyprzedzenia zapłonu) na mierzone wielkości.

Należało także przedstawić ocenę możliwości wykorzystania optoelektronicznego toru pomiarowego w celach diagnostyki przebiegu procesu spalania (prędkości wydzielania ciepła dQ/dt) i jako elementu umożliwiającego zastosowanie sygnału emisji optycznej jako sygnału sprzężenia zwrotnego w algorytmach sterowania, zwłaszcza w zakresie wykrywania wypadania zapłonów i wynikającej z tego nierównomierności pracy silnika oraz sygnalizacji występowania spalania stukowego.

5.2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań był umieszczony na stanowisku hamownianym seryjny silnik samochodu Polonez 1.5 GLI o następujących danych techniczno-eksploatacyjnych:

- rok produkcji: 1992
- poj. skokowa silnika: 1481 cm^3

– układ i liczba cylindrów:	rzędowy, czterocylindrowy
– średnica / skok tłoka:	77 / 79,5 mm
– stopień sprężania:	9,2
– liczba zaworów na cylinder:	2
– moc maksymalna:	57 kW przy 5300 obr/min
– maksymalny moment obrotowy:	115 Nm przy 2800 obr/min
– układ zasilania:	wtrysk jednopunktowy benzyny MULTEC ACG TBI 700 firmy AC Rochester
– układ zapłonowy:	bezrozdzielaczowy, mikroprocesorowy, świece zapłonowe ISKRA FE 65 PS, odstęp elektrod 0,8 mm

Silnik współpracował z 5-biegową skrzynią biegów przeznaczoną do samochodów Polonez. Przełożenia: 3,788/1,994/1,307/1,000/0,803/W3,526.

Zastosowanie skrzyni biegów umożliwiło realizację pomiarów w całym zakresie prędkości obrotowych silnika przy pracy hamulca z prędkością nie przekraczającą prędkości dopuszczalnej. Ponadto skrzynia biegów usztywniała układ napędowy i przybliżała warunki pracy silnika. Niedogodnością użycia skrzyni biegów była konieczność wzorcowania pomiaru momentu obrotowego z uwzględnieniem jej oporów mechanicznych.

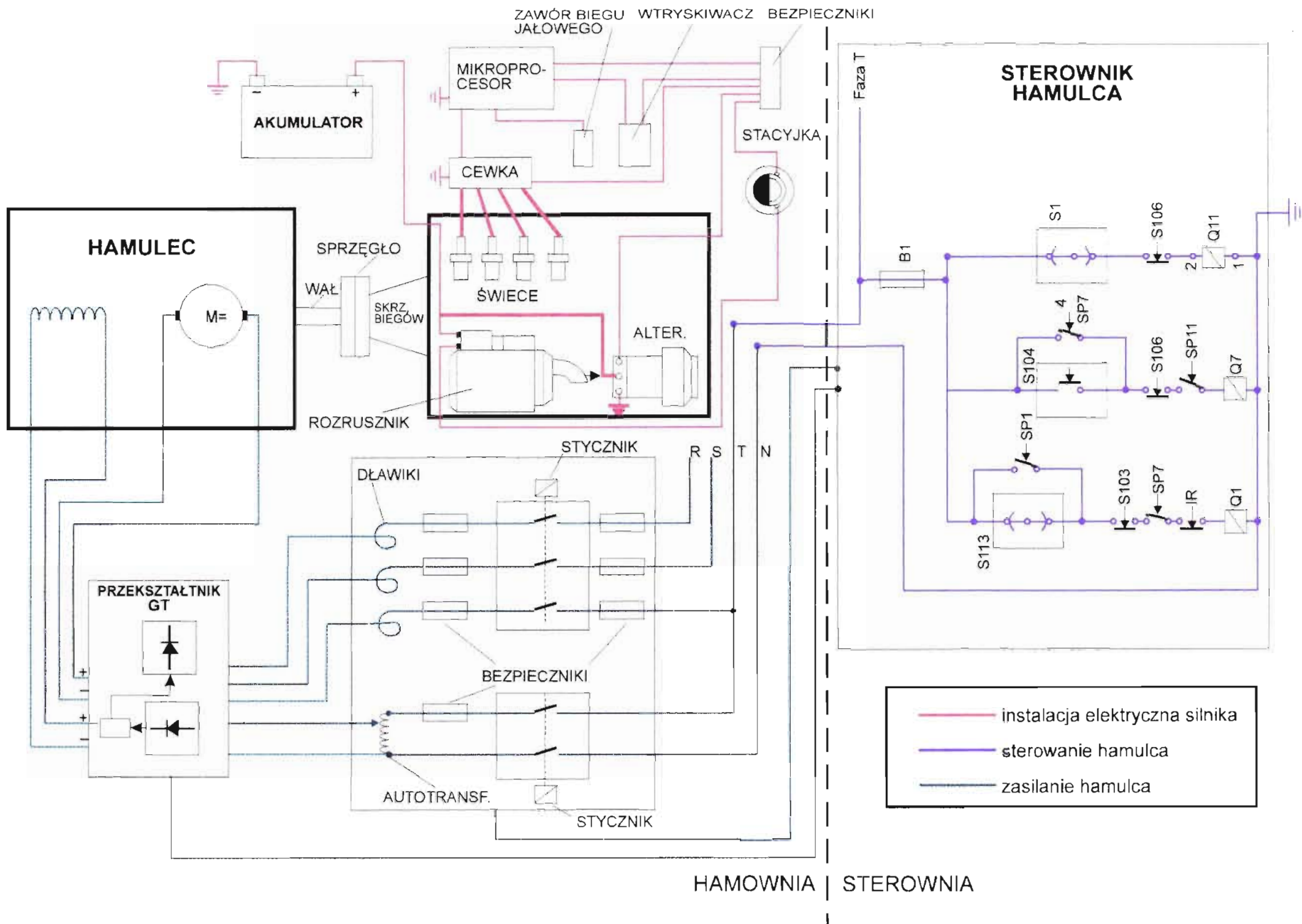
Silnik zasilano benzyną bezołowiową Eurosuper 95 o kontrolowanych właściwościach (Orzeczenie nr 44/95 Zakładu Badań i Usług Laboratoryjnych CPN w Lublinie). Zastosowane paliwo odpowiadało jakościowo wymaganiom technicznym normy PN 92/C–96025–06.

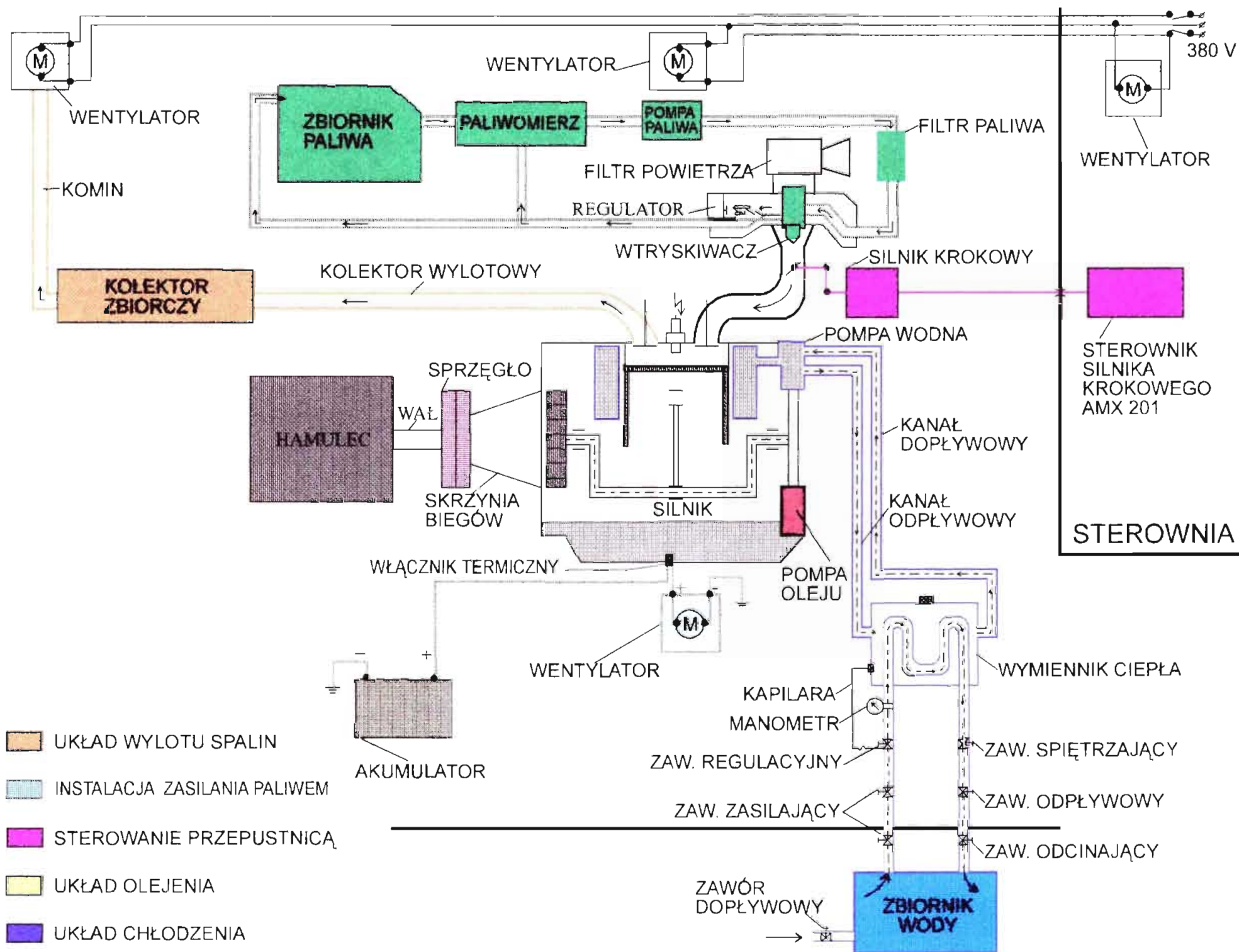
5.3. HAMOWNIA SILNIKOWA

Badania zrealizowano w hamowni silnikowej Katedry Silników Spalinowych Politechniki Lubelskiej przystosowanej do badań silników o mocy do 80 kW i maksymalnej prędkości obrotowej do 6500 obr/min. Stanowisko hamowniane wyposażone jest w zmodernizowany hamulec elektryczny – prądnicę prądu stałego firmy VEB ELBTALWERK (d. NRD) typu SAK N-670.

Do sterowania hamulca służy sterownik (prod. APATOR, Toruń) o tyrystorowym zespole napędowym typu DML/MN. Współpracuje on z silnikami prądu stałego DC i służy do regulacji i stabilizacji prędkości obrotowej silników asynchronicznych i bocznikowych, przy zachowaniu wysokich parametrów użytkowych. Układy zasilania i sterowania hamulca oraz instalację elektryczną silnika spalinowego przedstawiono na rysunku 5.1 [66].

Napięcie zasilania ~380 V przekształcane jest na napięcie prądu stałego regulowane do sterowania silników o mocy 5,5 do 166 kW. Hamulec jest zasilany z sieci trójfazowej poprzez czteroćwiartkowy prostownik sterowany DML, umożliwiający pracę silnikową i hamulcową, z jednoczesną regulacją mocy (dostarczanej i odbieranej). Obwód wzbudzenia prądnicy-hamulca zasilany jest również z sieci prądu przemiennego poprzez prostownik wbudowany w moduł DML. Obwód prądu wzbudzenia hamulca zabezpieczony jest przed awaryjnymi stanami zasilania (zanikiem prądu).



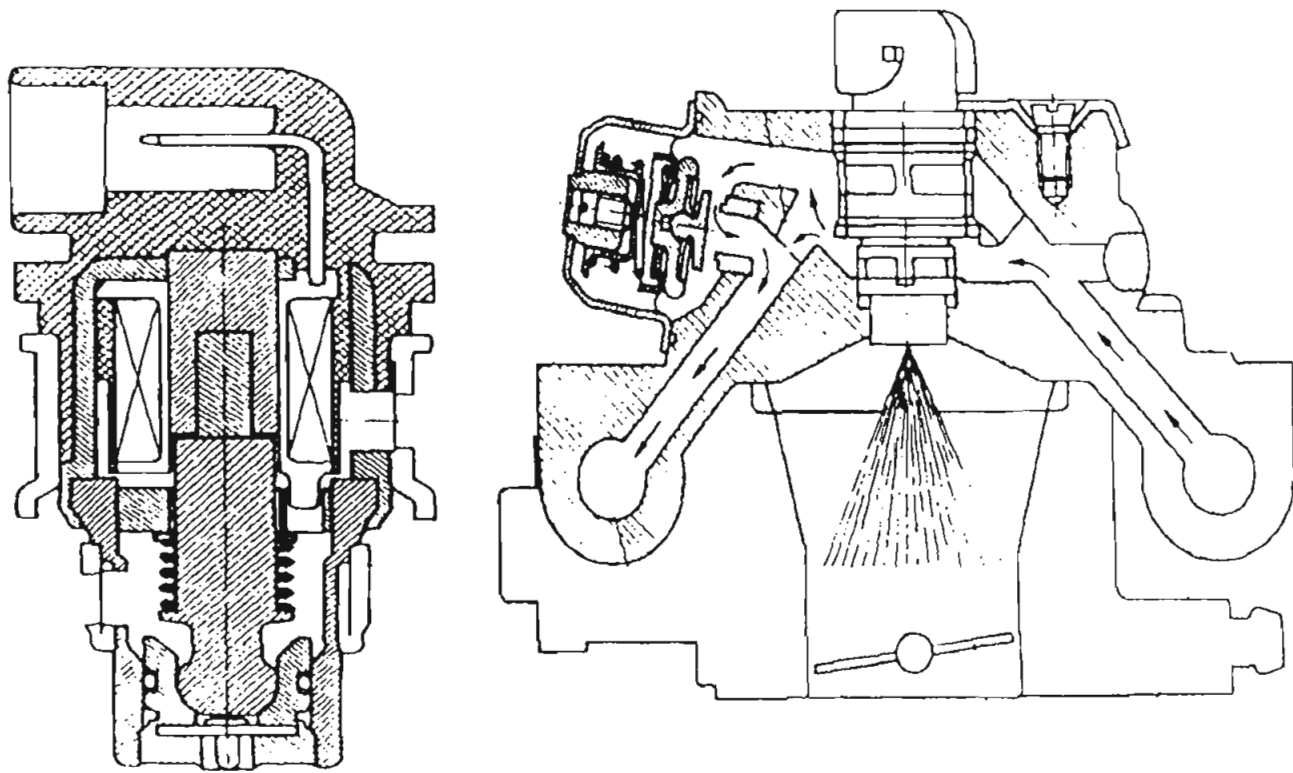


Rysunek 5.2. Podstawowe układy i instalacje hamowni silnikowej SAK N-670

Jako najistotniejsze z punktu widzenia prowadzonych badań, omówiono znajdujące się w hamowni układy zasilania w paliwo, chłodzenia i smarowania (rys. 5.2).

Układ zasilania paliwem

- elektryczna pompa paliwa AC ROCHESTER z przeznaczeniem do samochodów Polonez 1.5, umieszczona w specjalnej obudowie pomiędzy zbiornikiem paliwa a filtrem,
- filtr paliwa: nierozbieralny, montowany seryjnie w samochodach Polonez, firmy AC ROCHESTER, umieszczony między pompą paliwa a wtryskiwaczem,
- wtryskiwacz paliwa: centralny wtryskiwacz elektromagnetyczny, umieszczony w kolektorze dolotowym, przed przepustnicą (rys. 5.3),
- przewody paliwowe: wzmocnione mechanicznie, odporne na chemiczne oddziaływanie paliwa przewody z tworzywa sztucznego; sposób ich połączenia zapewnia poprawny pomiar zużycia paliwa (powrót paliwa następuje po stronie tłocznej pompy).



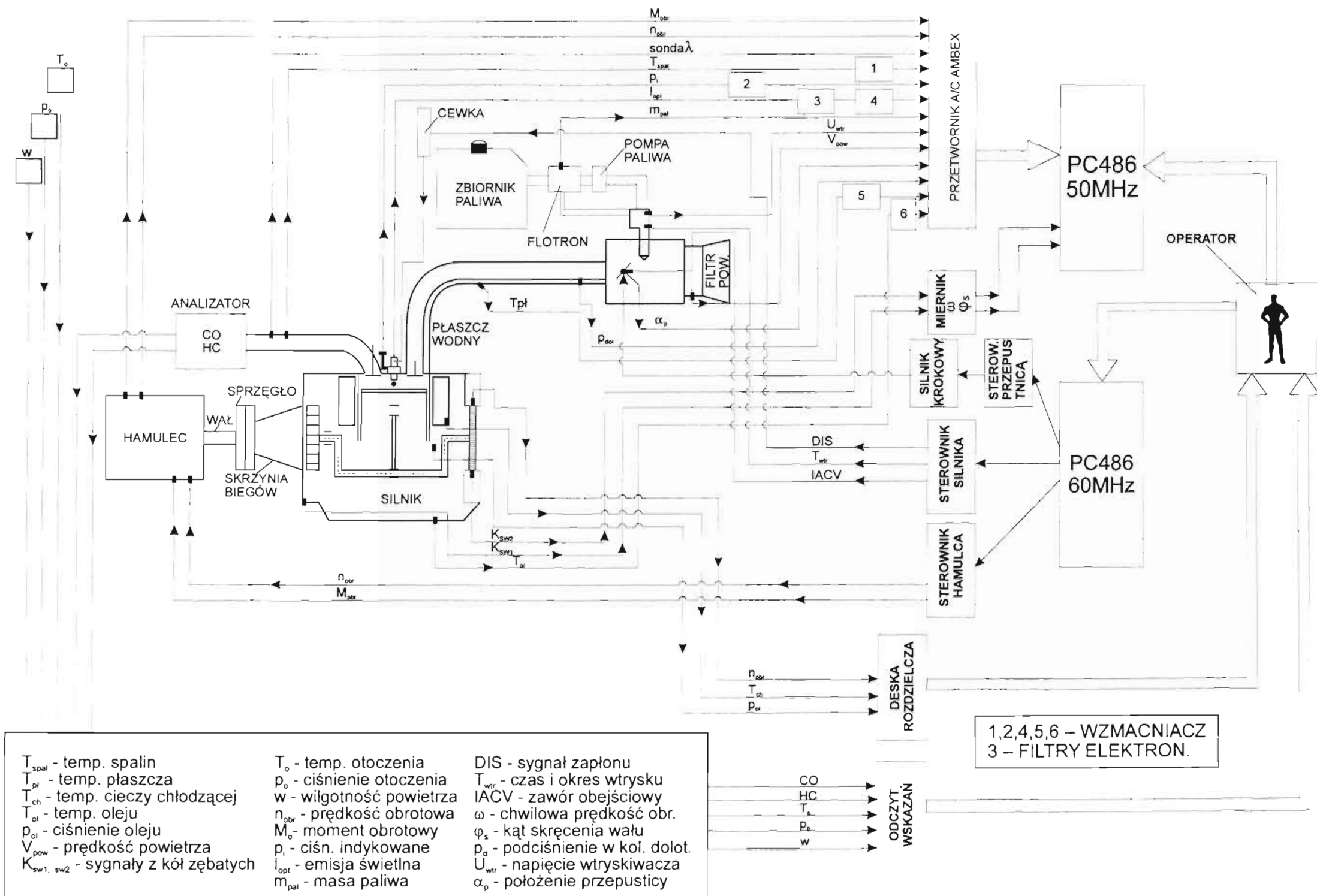
Rysunek 5.3. Schemat przepływu powietrza i paliwa w zespole wtryskiwacza

Układ smarowania. Typowy układ silnika Polonez 1.5 (pompa oleju, filtr, miska olejowa) wzbogacony o czujnik temperatury oleju (termopara PT 100). Dodatkowo, dzięki umieszczeniu w misce olejowej przełącznika termicznego, po przekroczeniu przez olej ustawionej potencjometrem temperatury, następowało samoczynne załączenie wentylatora schładzającego miskę olejową.

Układ chłodzenia. Układ dwuobiegowy. Obieg wewnętrzny – układ chłodzenia silnika z wymontowanym termostatem. Obieg zewnętrzny – instalacja wodna hamowni. Wymiana ciepła odbywa się poprzez wymiennik typ 59100012 (prod. Zakłady Mechaniczne, Warszawa). Ciśnienie zasilania płaszcza zewnętrznego 0,2 MPa, wewnętrznego 0,7 MPa.

Wymiennik wyposażony był w wodny, termostacyjny zawór regulacyjny Danfoss AVTB, połączony z kapilarą umieszczoną w zewnętrznym płaszczu wymiennika. Charakterystyka techniczna zaworu:

Rysunek 5.4. Układy sterująco-rejestrujące oraz toru pomiarowe stanowiska badawczego w hamowni silnikowej SAK N-670



- zakres regulacji temperatury: 30÷100 °C
- maksymalne ciśnienie regulacyjne: 1,6 MPa
- maksymalna różnica ciśnień: 0,7 MPa
- maksymalne dopuszczalne ciśnienie na czujniku: 2,5 MPa
- maksymalna temperatura cieczy roboczej: 130 °C.

Zawór umożliwiał utrzymanie zadanej temperatury cieczy chłodzącej silnika z dokładnością do $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

5.4. WYPOSAŻENIE KONTROLNO-POMIAROWE HAMOWNI

Rozmieszczenie układów kontrolno-pomiarowych hamowni silnikowej i stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 5.4.

Sterownik hamulca – elektroniczny regulator AMX 211 (prod. Automex, Gdańsk), umożliwiający sterowanie obciążeniem silnika. Regulator ma możliwość pracy w trybie ze stabilizacją prędkości ($n = \text{const}$) lub momentu obrotowego ($M_o = \text{const}$). Ponadto możliwa jest realizacja liniowej ($M_o = kn$) i kwadratowej ($M_o = k_1 n^2$) charakterystyki obciążenia.

Sterownik położenia przepustnicy AMX 201 – wychyłowy, elektryczny serwomechanizm służący do precyzyjnego ustawiania położenia przepustnicy. Silnik tarczowy (moc 1 kW) pozwala na realizację zmian położenia przepustnicy z dużą dynamiką. Wbudowany w pulpit sterownika wskaźnik cyfrowy rzeczywistego położenia organu sterującego wskazuje położenie przepustnicy w % ustawianego elektrycznie zakresu. Sterowanie może odbywać się ręcznie (potencjometr), lub za pomocą sygnałów zewnętrznych poprzez złącze portu szeregowego.

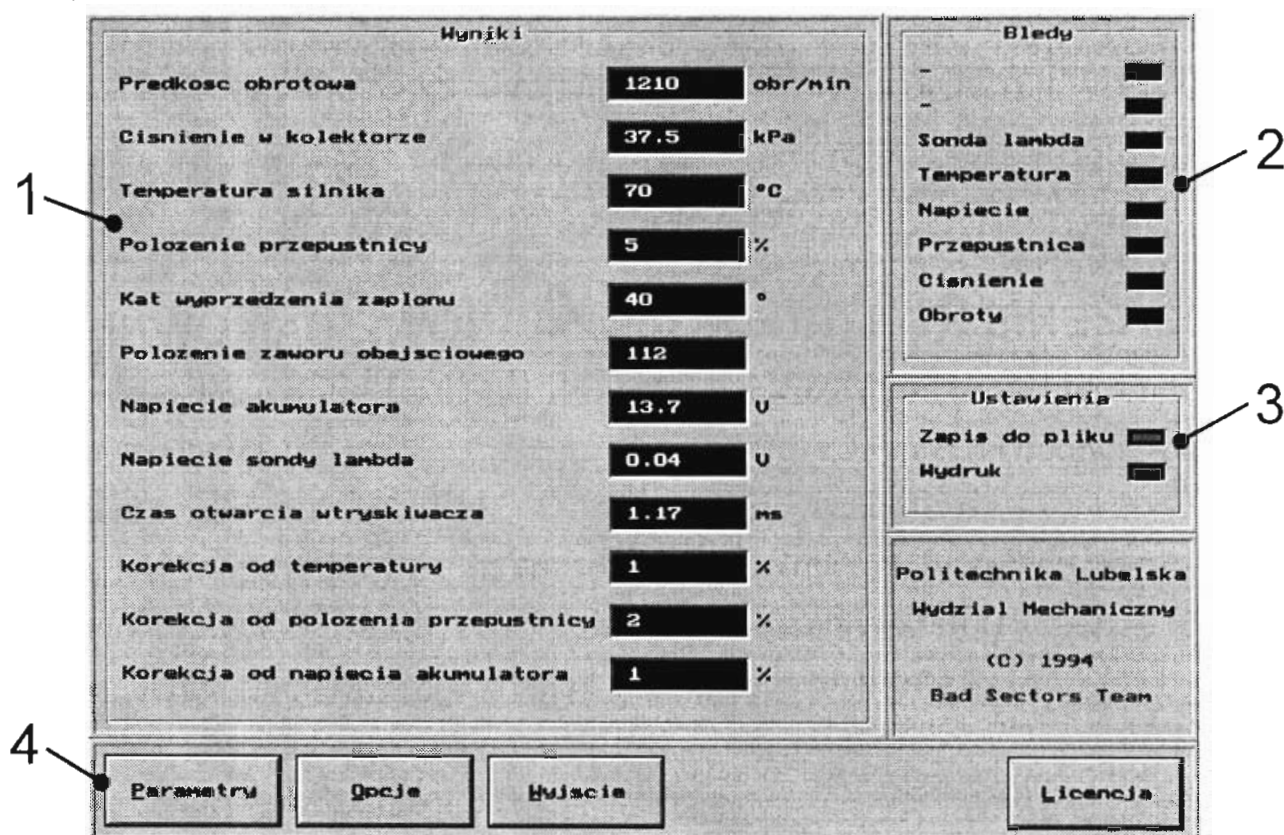
Sterownik silnika – sterownik AMX 260 (prod. Automex, Gdańsk) do systemu zapłonowego i wtryskowego. Zastąpiono nim standardowy sterownik MULTEC montowany w samochodach Polonez 1.5 GLI. Sterownik AMX 260 jest zintegrowanym układem mikroprocesorowym, łączącym w sobie funkcje sterownika wyposażonego we wszystkie funkcje wspomagające i posiadającym specjalizowane układy peryferyjne, gwarantujące właściwą współpracę z wszelkimi elementami wykonawczymi i czujnikami, niezbędnymi do sterowania systemem zapłonowym i wtryskowym silnika [31].

Sterownik AMX 260 umożliwia:

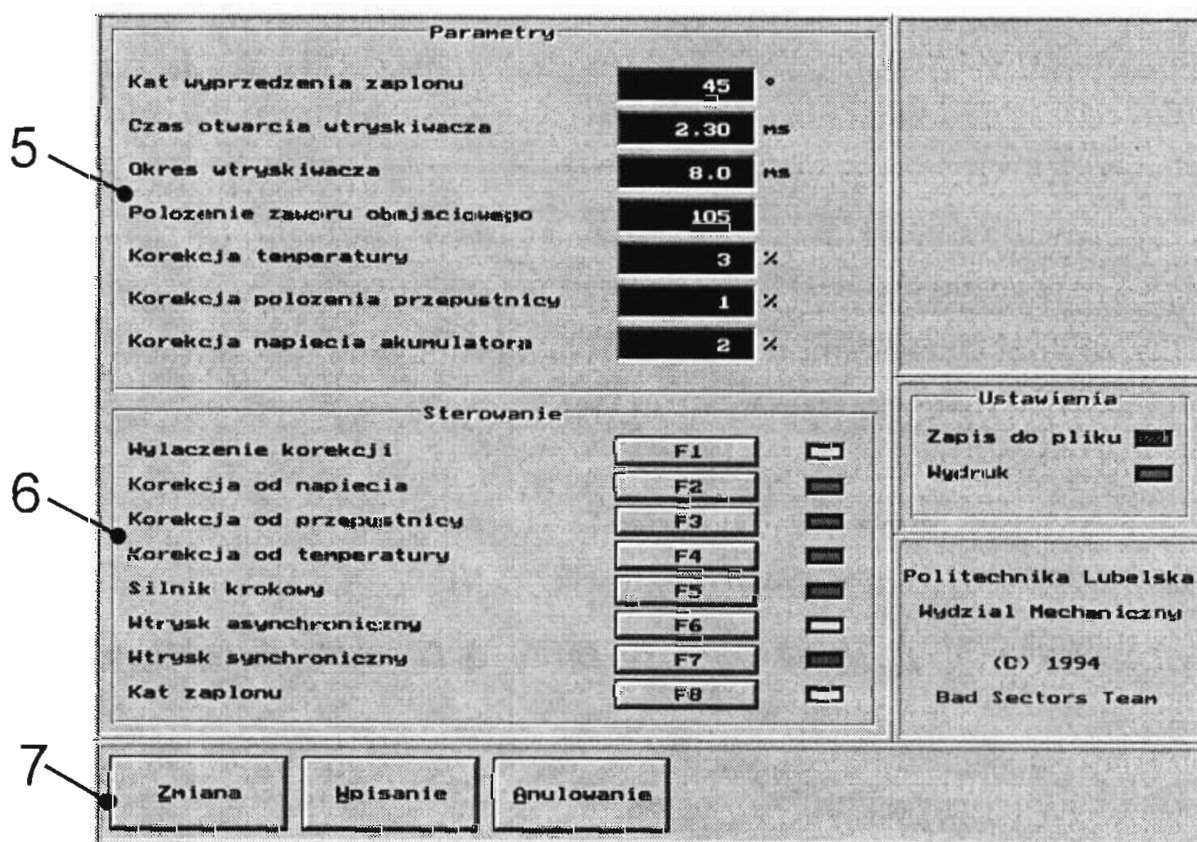
- realizację opracowanych algorytmów sterowania w warunkach ustalonych i przejściowych,
- przeprowadzanie przez użytkownika testów stanowiskowych, podczas których wielkości sterujące są funkcją czasu lub też są stałe w czasie. Możliwe jest sterowanie silnika trzema sposobami:
 - kiedy o wartości sygnałów sterujących decyduje jedynie algorytm sterowania, np. na podstawie zapisanych *map sterowania*,
 - kiedy sygnały sterujące powinny być niezmiennie w czasie (aby wykluczyć wpływ algorytmu sterowania na te wielkości, np. skutek wahań prędkości obrotowej); takie badanie zapewnia stałość sygnałów sterujących bez względu na okoliczności – stany nieustalone silnika,

- kiedy przebieg czasowy sygnałów sterujących jest zdeterminowany przez prowadzącego badania np. w celu poznania charakterystyki dynamicznej silnika (charakterystyki częstotliwościowe, wymuszenie skokowe, rozruch itp.).

Dokładny opis budowy i możliwości sterownika zawarto w pracy [31].



Rysunek 5.6. Program SILNIK 2G – widok ekranu kontrolnego: 1 – wielkości odczytywane ze sterownika silnika AMX 260; 2 – kontrolki sygnalizacji błędów; 3 – kontrolki trybu rejestracji wyników; 4 – klawisze przełączania trybów pracy programu [64].



Rysunek 5.7. Program SILNIK 2G – wprowadzanie wielkości sterujących: 5 – panel parametrów sterujących; 6 – przełączniki sposobów sterowania; 7 – klawisze przełączania trybów pracy programu [64]

Sterownik współpracował z mikrokomputerem za pomocą złącza komunikacji szeregowej RS 485. Do komunikacji ze sterownikiem służył program SILNIK2G (rys. 5.6, 5.7), zapewniający m.in.:

- diagnostykę czujników oraz układów wykonawczych,
- przesyłanie sygnałów pomiarowych oraz wartości obliczanych w programie wewnętrznym sterownika (okres otwarcia wtryskiwacza, kąt wyprzedzenia zapłonu, położenie zaworu obejściowego, współczynniki korekcyjne),
- zadawanie wartości sterujących wraz z dowolnym wyborem aktywnych opcji,
- zapis wielkości zmierzonych i sterujących,
- wybór trybu zadawania wielkości sterujących do sterownika (np. realizacja dowolnych scenariuszy czasowych przebiegu dawki paliwa w czasie, przejście procedury obliczania wielkości sterujących przez algorytm zapisany w pamięci mikrokomputera – szybkość transmisji łączem RS-484 pozwala na pracę w trybie *on-line*) [64].

Komputery stanowiskowe. Stanowisko współpracuje z trzema komputerami typu PC:

- komputerem 486/50 wyposażonym w kartę przetworników analogowo-cyfrowych AMBEX LC 012-1612 z 16 wejściami, współpracującą z programem MULT służącym do rejestracji i wizualizacji wyników pomiarów szybkozmiennych,
- komputerem 486/50 wyposażonym w złącze RS 485 oraz program SILNIK2G obsługujący sterownik AMX 260,
- komputerem 286/12 spełniającym pomocnicze funkcje pomiarowe.

5.5. APARATURA POMIAROWA

W trakcie realizacji badań śledzono i rejestrowano większość wielkości określających bieżący stan pracy silnika. Program SILNIK2G, pełniący funkcje kontrolne wobec sterownika wtryskowo-zapłonowego AMX 260, pozwalał na zapis następujących wielkości [64]:

- prędkości obrotowej wału korbowego,
- ciśnienia w kolektorze dolotowym,
- temperatury cieczy chłodzącej silnika,
- położenia przepustnicy,
- kąta wyprzedzenia zapłonu,
- położenia zaworu obejściowego,
- napięcia akumulatora,
- napięcia sondy λ ,
- czasu otwarcia wtryskiwacza,
- okresu wtryskiwacza,
- współczynników korekcji temperatury, położenia przepustnicy, napięcia akumulatora.

Za pomocą karty przetworników analogowo-cyfrowych AMBEX LC012-1612 rejestrowano następujące wielkości szybkozmienne:

- znacznik kąтового położenia wału korbowego – GMP pierwszego cylindra,
- przebieg napięcia na wtryskiwaczu – okres otwarcia wtryskiwacza,
- przebieg ciśnienia indykowanego w pierwszym cylindrze,
- napięciowy przebieg sygnału emisji optycznej w drugim cylindrze,
- napięcie sondy λ ,
- sygnał tensometru mierzącego moment obrotowy silnika.

Moduł AMBEX LC-012-1612 przeznaczony jest do pomiarów i sterowania za pomocą układów wejść i wyjść analogowych oraz układów do cyfrowych pomiarów i sterowań dwustanowych. Układy wejść i wyjść analogowych pracują w trybie automatycznym za pomocą transmisji DMA, co zapewnia dużą szybkość i stabilność pomiarów. Układ sterujący toru wejść analogowych dokonuje testu szybkości modułu w komputerze, co gwarantuje jego optymalne wykorzystanie.

Dane techniczne modułu:

- praca na magistrali 8-bitowej ISA
- 16 kanałów analogowych wejściowych 12 bitowych
- 2 kanały wyjściowe 12-bitowe
- 20 wejść i 20 wyjść dwustanowych TTL
- 1 szesnastobitowy kanał licznika / zegara 82C54

Wejścia analogowe:

- rozdzielczość: 12 bitów
- nieliniowość całkowita przetwornika: 0,012% (FS)

- poziom zakłóceń cyfrowych: 0,012% (FS)
- zakresy napięć wejściowych: $\pm 10, \pm 5, 0 \div 10$ lub $\pm 5, \pm 2,5, 0 \div 5$ V
- minimalny czas/maksymalna częstotliwość próbkowania: 10 μ s / 100 kHz.

Mierzone wielkości wolnozmiennie (odczytywane ze wskazań na tablicach przyrządów) to:

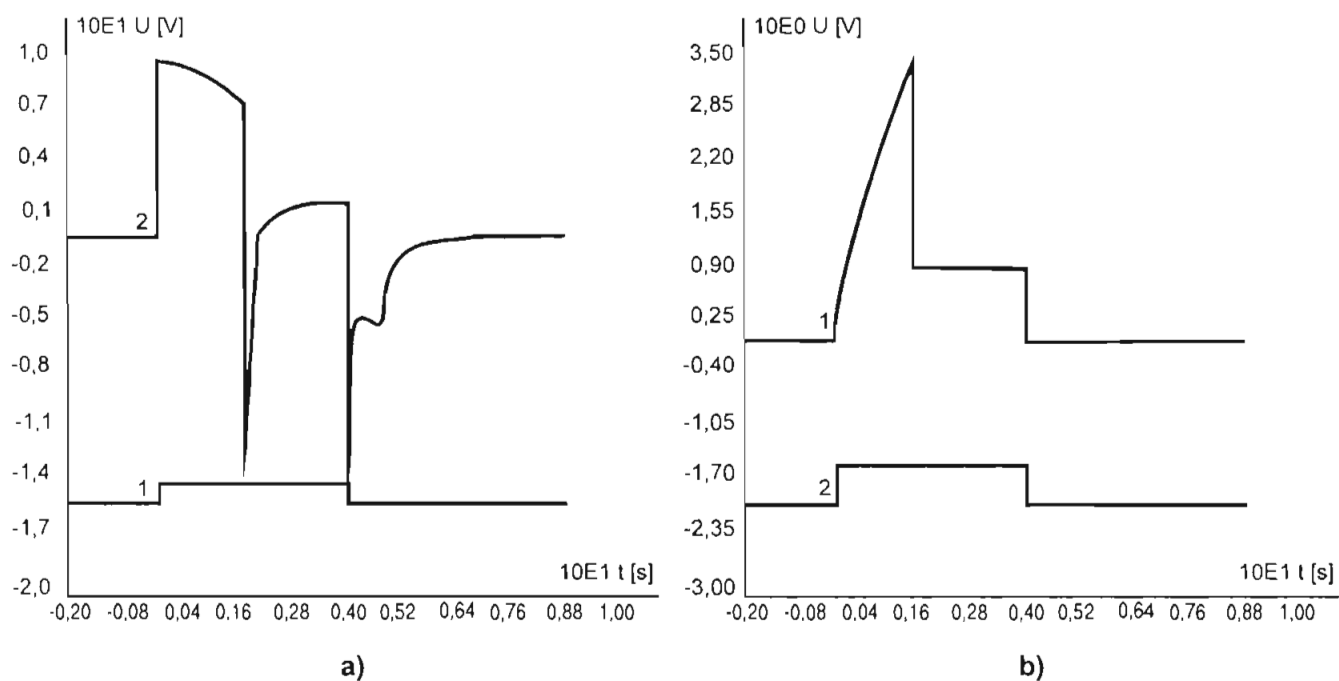
- zawartość CO w spalinach,
- zawartość HC w spalinach,
- stopień otwarcia przepustnicy,
- temperatura spalin w kolektorze wydechowym,
- temperatura oleju,
- temperatura cieczy chłodzącej,
- moment obrotowy silnika,
- prędkość obrotowa silnika,
- zużycie paliwa – mierzone metodą objętościową celem porównania ze zużyciem paliwa wynikającym z pomiarem czasu otwarcia wtryskiwacza,
- wilgotność, temperatura, ciśnienie otoczenia.

Pomiar prędkości obrotowej realizowano za pomocą prądnicy tachometrycznej. Sygnał doprowadzony był z układu DIS jako sygnał prostokątny TTL o okresie 2-krotnie mniejszym od okresu obrotu wału korbowego: 2 impulsy na 1 obrót wału. Prędkość obrotową odczytywano ze wskazań obrotomierza analogowego.

Pomiar momentu obrotowego dokonywany był tensometrycznym przetwornikiem siły, skompensowanym termicznie:

- klasa przetwornika: 0,2
- działka elementarna: $\pm 0,1$ Nm dla AMX 211.

Pomiar zużycia paliwa realizowano poprzez pomiar sygnału czasu otwarcia wtryskiwacza za pomocą przetwornika AC. Przebiegi napięcia i prądu na wtryskiwaczu dla przykładowego wtrysku przedstawiono na rysunku 5.7.



Rysunek 5.7. Sygnały prądowe i napięciowe wtryskiwacza – przebieg wtrysku

Pomiar temperatury cieczy chłodzącej odbywał się za pomocą czujnika CTS umieszczonego w płaszczu wodnym w pobliżu kolektora dolotowego. Sygnał z tego czujnika, będącego standardowym wyposażeniem instalacji samochodu oraz sygnał z czujnika podciśnienia, służą do ustalania przez sterownik ilości niezbędnego powietrza.

Pomiar temperatury spalin realizowano w kolektorze wylotowym, w odległości ok. 0,8 m od zaworu wydechowego. Ten sam punkt był jednocześnie punktem poboru spalin do analizatora. Temperaturę mierzono za pomocą miernika temperatury typu EMT-07 (prod. S.R.E. „Elmech” w Warszawie).

Dane techniczne miernika:

- zakres pomiarowy: $-80 \div 1200$ °C
- rozdzielczość: 1 °C,
- dokładność pomiaru: $\pm 0,1\%$ zakresu ± 1 cyfra
- zasilanie: zasilacz ZNS-03 17 V DC.

Dane techniczne czujnika temperatury typu TP-01a-W3:

- termopara: Cu-Ni-Cr
- zakres pomiaru: $-100 \div 1200$ °C
- stała czasowa: 1 s.

Pomiar temperatury oleju odbywał się za pomocą termopary PT 100 umieszczonej w dnie miski olejowej. Termopara współpracowała z miernikiem AMX 231 (prod. Automex, Gdańsk) służącym do pomiaru parametrów statycznych i wolnozmiennych silnika (temperatur niskich i wysokich, ciśnienia oleju).

Pomiar stężenia HC i CO. Do pomiarów wykorzystano analizator ISC Oliver K-20 firmy Industrial Service Corporation, działający na zasadzie przeświatłania spalin wiązką podczerwieni (NDIR). Spaliny zasysano sondą z rury wydechowej w odległości ok. 0,8 m od zaworów wylotowych.

Dane techniczna analizatora:

- zasilanie: ~ 220 V (-10% , $+15\%$), 50 Hz
- pobór mocy: max 270 W
- temp. pracy: $5 \div 40$ °C przy wilgotności względnej do 90%.

Parametry układu pomiarowego:

- pomiar HC oznaczany poprzez pomiar n-heksanu,
- zakres pomiarów: CO: $0 \div 10\%$, z rozdzielczością 0,01%
HC: $0 \div 2000$ ppm, z rozdzielczością 1 ppm
- czułość: CO: 0,01%, HC: 2 ppm
- dokładność: CO $\pm 0,15\%$ lub $\pm 5\%$ względny (większy)
HC ± 20 ppm lub $\pm 5\%$ (większy),
- stała czasowa: ok. 10 s (długość sondy 7 m) do uzyskania 95% odczytu końcowego
- zerowanie i kalibracja na żądanie operatora lub automatycznie co 30 min
- szybkość przepływu gazu przez układ pomiarowy: $5 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Pomiar ciśnienia czynnika roboczego realizowano za pomocą czujnika piezoelektrycznego KISTLER, typ 7055, nr 87933, umieszczonego w adapterze w świecy zapłonowej 1-go cylindra. Sygnał przekazywany był na wzmacniacz ładunku KISTLER, typ 5001, nr 28477.

Dane techniczne czujnika:

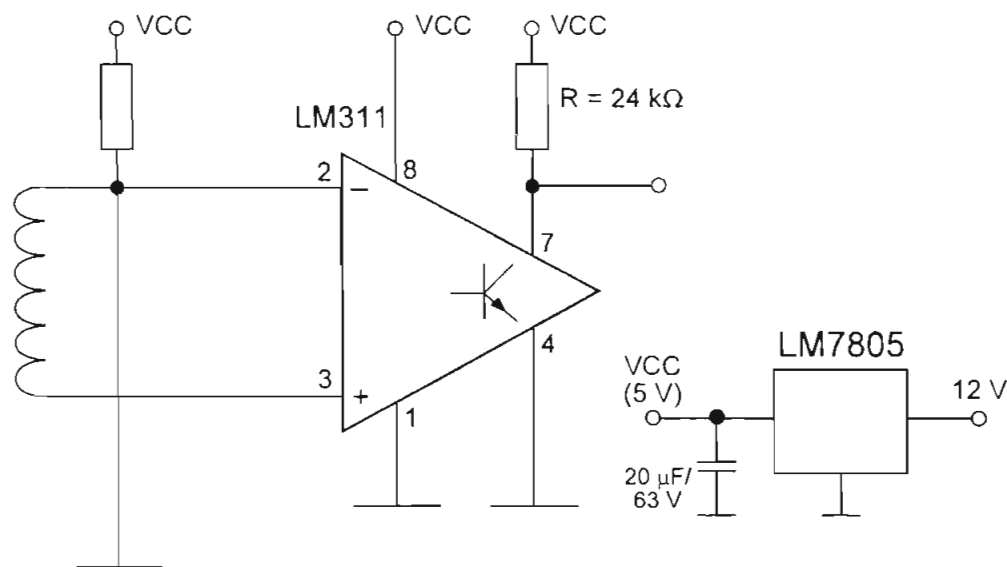
- czułość: 54,4 pC/bar
- nieliniowość: $\pm 1,0\%$
- histereza: 0,5%
- wrażliwość na przyspieszenia: 0,005 bar/g

Dane techniczne wzmacniacza:

- napięcie wyjściowe $\pm 10\text{ V}$
- nieliniowość: $\pm 0,05\%$
- czułość: 1 pC/mV.

W trakcie pomiarów ustawiono czułość 54,4 pC/bar, dekadę czułości 10÷110, wzmacnienie dostosowywano do aktualnego stanu pracy silnika tak, aby mierzone ciśnienie nie przekraczało zakresu pomiarowego przetwornika AC ($\pm 10\text{ V}$).

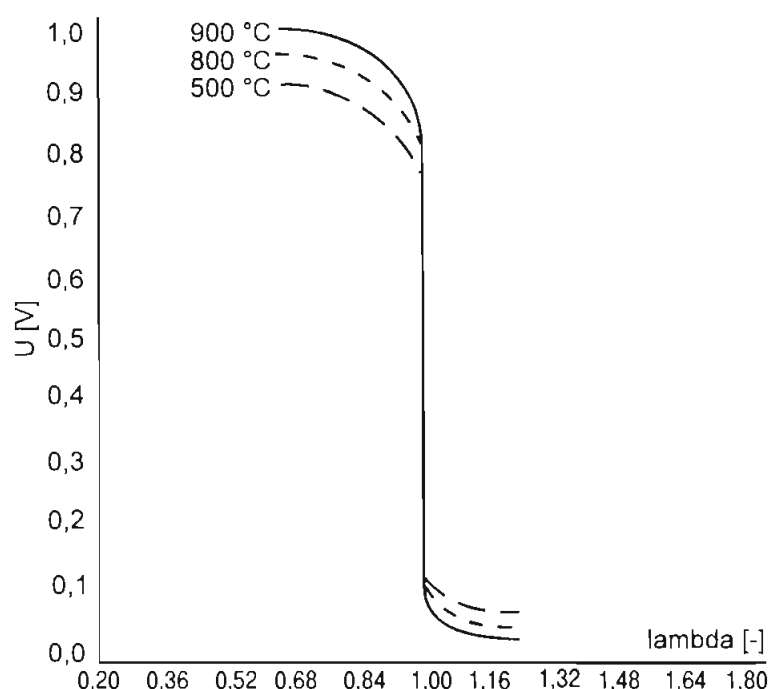
Położenie GMP. Położenie pierwszego cylindra w GMP rejestrowano za pomocą zmodyfikowanego aparatu zapłonowego. Cewka aparatu generowała sygnał jedynie dla pierwszego cylindra (pozostałe 3 zęby usunięto), który następnie kierowany był na wejście układu przedstawionego na rys. 5.8. Jest to dyskryminator przejścia przez zero, zapewniający wzmacnienie i uformowanie sygnału z cewki aparatu.



Rysunek 5.8. Układ formujący sygnału GMP

Sygnał sondy lambda. Wykorzystano seryjną sondę stosowaną w silnikach 1.5 GLI z katalizatorem (silnik na stanowisku pracował bez katalizatora). Sonda zbudowana była jako ogniwo Nernsta na bazie tlenku cyrkonu ZrO_2 . Napięcie na wyjściu sondy zmieniało się od 0 do 900 mV.

Sygnał sondy służył do ustalania położenia przepustnicy tak, aby uzyskiwać stechiometryczny skład mieszanki, co odpowiada pionowemu fragmentowi charakterystyki sondy (rys. 5.9).



Rysunek 5.9. Sygnał sondy λ w funkcji składu mieszanki

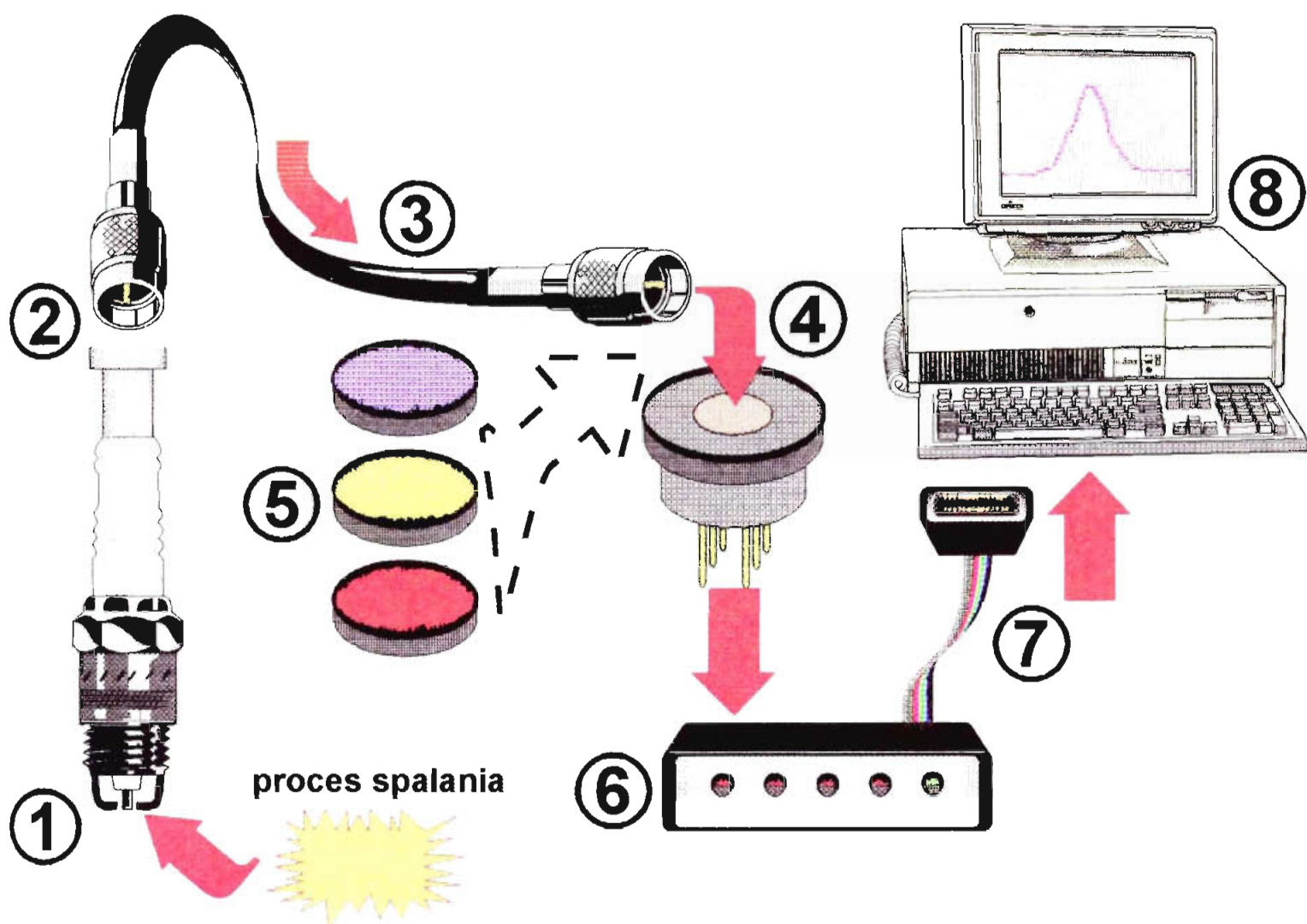
Pomiar ciśnienia otoczenia dokonywany był meteorologicznym barometrem rtęciowym typu PS, o skali 685÷825 mm Hg, co 1 mm Hg. Dokładność odczytu $\pm 0,1$ mm Hg. **Temperatura otoczenia** mierzona była termometrem rtęciowym o skali $-30\div 50$ °C, o działce 1 °C. **Wilgotność powietrza** mierzono psychometrem aspiracyjnym według Assmana, typ TB-19. Po odczytaniu temperatur z obu termometrów, ustalano wilgotność powietrza na podstawie tablic psychometrycznych.

5.6. OPTOELEKTRONICZNY TOR POMIAROWY

Optoelektroniczny tor pomiarowy ma za zadanie przekazanie poprzez włókno światłowodowe sygnału emisji optycznej z komory spalania silnika do odbiornika optoelektronicznego. Następnie następuje zamiana sygnału optycznego na sygnał napięciowy, wzmacnienie go i przesłanie do karty przetwornika A/C AMBEX celem rejestracji.

Projektując tor pomiarowy przyjęto następujące założenia [65]:

- czujnik optyczny ma umożliwiać wgląd bezpośrednio do komory spalania silnika,
- zarówno czujnik, jak i pozostałe elementy toru pomiarowego powinny być odporne na trudne warunki pracy (temperatura, zakłócenia elektromagnetyczne, drgania, zanieczyszczenia itp.),
- układ pomiarowy powinien rejestrować sygnał we wszystkich stanach pracy silnika (warunki ustalone i nieustalone, spalanie normalne i nienormalne, itp.),
- uzyskany na wyjściu sygnał elektryczny powinien być łatwy do zarejestrowania za pomocą karty przetworników A/C,
- całość powinna być łatwa w montażu i demontażu,
- koszt wykonania toru pomiarowego powinien być względnie niski.



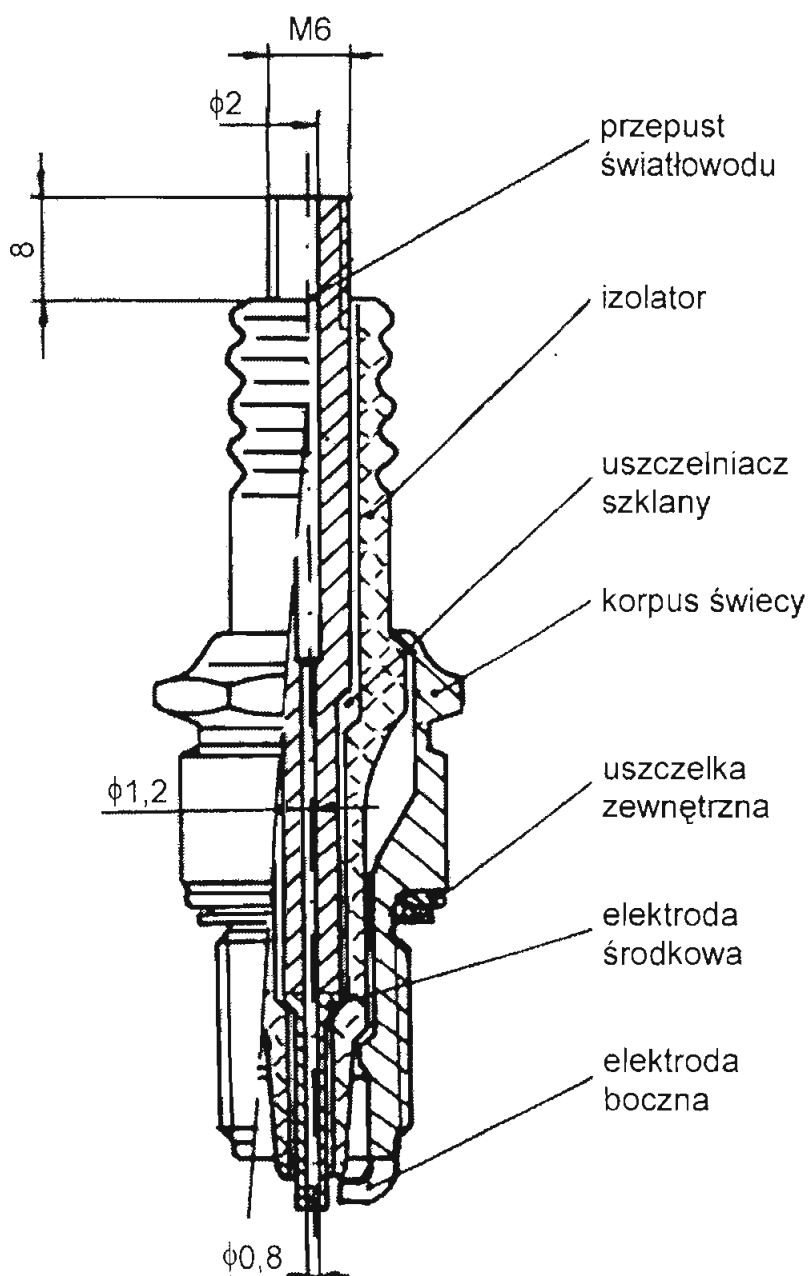
Rysunek 5.10. Schemat optoelektronicznego toru pomiarowego

W torze pomiarowym (rys. 5.10) wyodrębnić można tor optyczny, składający się ze specjalnie wykonanej świecy zapłonowej z prętem kwarcowym transmitującej sygnał optyczny bezpośrednio z komory spalania (1), złączek i półzłączek światłowodowych (2) kabla światłowodowego (3) i odbiornika optoelektronicznego (4), oraz tor elektroniczny zawierający zespół wzmacniaczy (6). Opcjonalnie możliwe jest wykorzystanie filtrów optycznych (5) lub transmisja sygnału z dwóch głowic pomiarowych. Sygnał przesyłany jest złączem (7) na kartę przetworników A/C (8), umieszczoną w mikrokomputerze.

5.6.1. Głowica pomiarowa

Głowicę pomiarową optycznego czujnika spalania zaprojektowano i wykonano w sposób analogiczny do rozwiązań dostępnych w literaturze (rys. 5.11). Wykorzystano w tym celu trójelektrodową świecę zapłonową (prod. FŁT „Iskra”, Kielce).

Modyfikacje świecy polegały na wykonaniu otworu w elektrodzie środkowej oraz wzmocnieniu właściwości wytrzymałościowych elektrody. W otwór wklejono pręt kwarcowy. Końcówki pręta zostały odpowiednio zeszlifowane, tak aby zapewnić jak najmniejsze tłumienie przekazywanego sygnału z możliwością samooczyszczania zwierciadła w fazie wydechu spalin oraz dostateczny kąt widzenia czujnika w komorze spalania.



Stwierdzono zanedbywalny wpływ wyładowania elektrycznego świecy na przebieg sygnału – wyładowanie iskry miało miejsce poza polem widzenia czujnika.

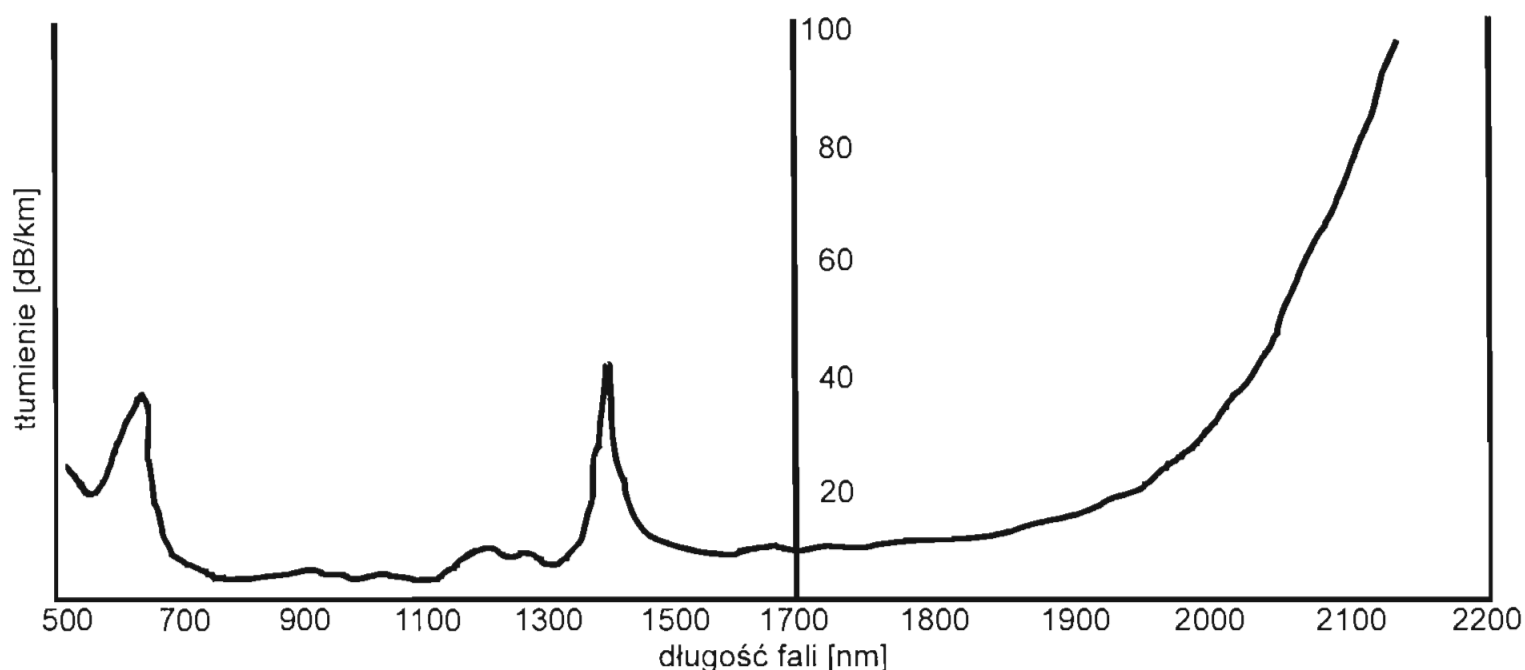
Rysunek 5.11. Głowica pomiarowa czujnika – zmodyfikowana świeca zapłonowa

5.6.2. Światłowody transmisyjne

Do transmisji sygnału optycznego z głowicy pomiarowej do fotodetektora zastosowano jedno-włókowy, polimerowy światłowód typu HFBR-PLS001 (prod. Hewlett Packard), z końcówkami typu 4501 i 4503. Jest to typowy światłowód wykorzystywany w sieciach informatycznych, telekomunikacji i medycynie (charakterystykę widmowa tłumienia – rys. 5.12).

Dane techniczne światłowodu HFBR:

- apertura numeryczna: 0,5
- średnica rdzenia: 1 mm
- średnica płaszczu: 2,2 mm
- tłumienie: min. 0,19; max 0,43; śred. 0,31 dB/m
- długość fali dla tłumienia maksymalnego: 660 nm
- prąd upływu: 12 nA (dla 50 kV; 0,3 m)
- zakres temperatur pracy: 0÷70 °C

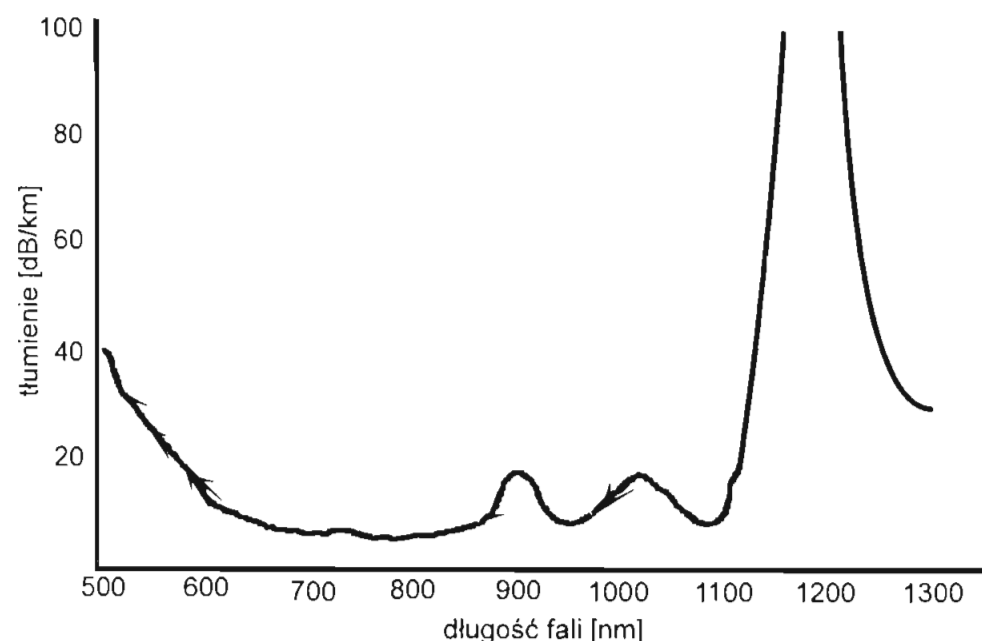


Rysunek 5.12. Widmowa charakterystyka tłumienia światłowodu HFBR

Po licznych próbach, ze względu na zbyt niskie natężenie sygnału optycznego docierającego z komory spalania do fotodetektora, zdecydowano się zastąpić polimerowy światłowód HFBR jednowłóknowym, kwarcowym światłowodem typu HCP-M0600T-08 (prod. Ensign-Bickford Optics Comp., USA). Charakterystykę widmową światłowodu HCP przedstawiono na rysunku 5.13.

Dane techniczne światłowodu HCP:

- średnica rdzenia: $600 \pm 10 \mu\text{m}$
- średnica płaszczka: $1040 \pm \mu\text{m}$
- zakres temperatur pracy: $-65 \div 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Rysunek 5.13. Widmowa charakterystyka tłumienia światłowodu HCP

5.6.3. Złączki światłowodowe

Na rynku dostępna jest szeroka gama różnorodnych złączy światłowodowych, niestety nie udało się znaleźć konektorów odpowiednich do zastosowania w projektowanym torze pomiarowym. Zaprojektowano i wykonano złącza umożliwiające właściwą współpracę czujnika, światłowodu transmisyjnego i fotodetektora.

Połączenie światłowodu z fotodetektorem wykonano z aluminium w 2 wariantach, jako pojedyncze i podwójne (rys. 5.15 a i b).

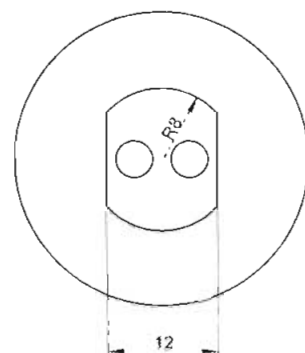
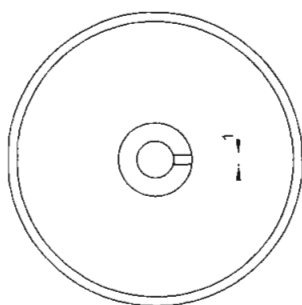
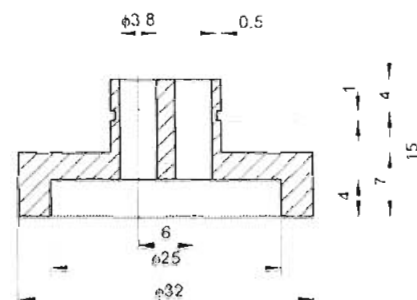
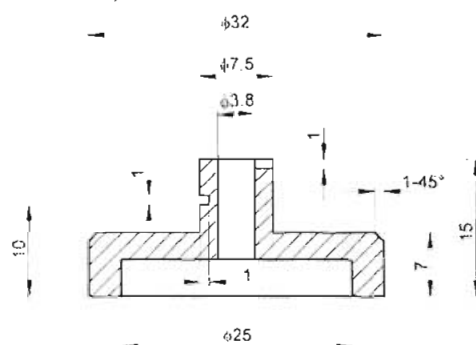
Technical drawing of a mechanical part showing a top view and a cross-section A-A.

Top View: A circle with two concentric circles inside. The section line A-A is indicated.

Cross-section A-A: A vertical profile showing the internal structure. Dimensions are given in millimeters.

Dimensions:

- Top horizontal dimension: 5.5
- Horizontal dimension between the two inner circles: 3.8
- Radius of the inner circle: $\phi 3$
- Vertical dimension from the top to the first step: 11
- Vertical dimension of the first step: 6
- Angle of the first step: 60°
- Radius of the bottom inner circle: $\phi 3$
- Vertical dimension from the bottom to the second step: 10
- Vertical dimension of the second step: 22
- Vertical dimension of the third step: 4
- Thread specification of the third step: M3
- Horizontal dimension of the bottom flange: M5
- Radius of the bottom flange: $\phi 12$
- Radius of the bottom flange: $\phi 15$



Rysunek 5.15. Łączniki światłowodu i fotodetektora w wersji pojedynczej i podwójnej

The graph illustrates the relationship between sound attenuation and axial distance for a 100 Hz tone. The y-axis represents attenuation in dB, ranging from 0 to 20. The x-axis represents axial distance in mm, ranging from 0 to 10. The curve shows a non-linear increase in attenuation with distance.

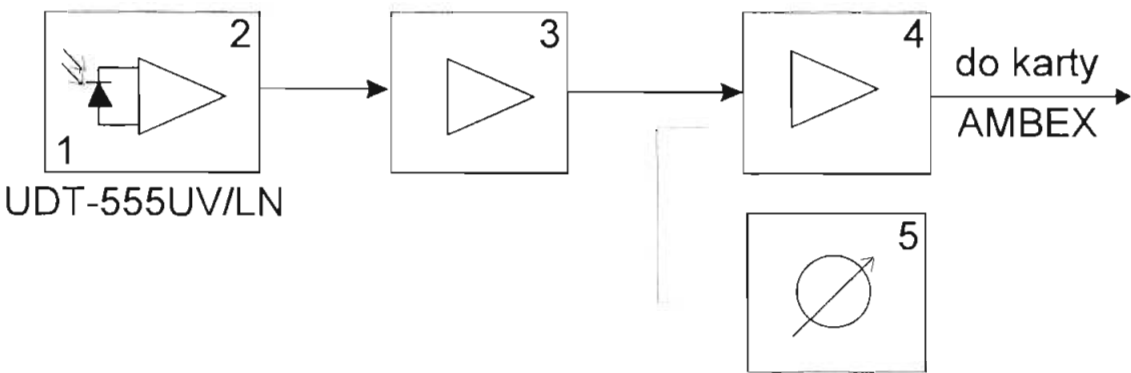
odległość osiowa [mm]	tłumienie [dB]
0	0
1	~1.5
2	~3.5
3	~6.0
4	~8.5
5	~10.5
6	~12.5
7	~14.0
8	~15.5
9	~16.5
10	~17.0

Rysunek 5.16. Wielkość strat transmisji w funkcji odległości osiowej

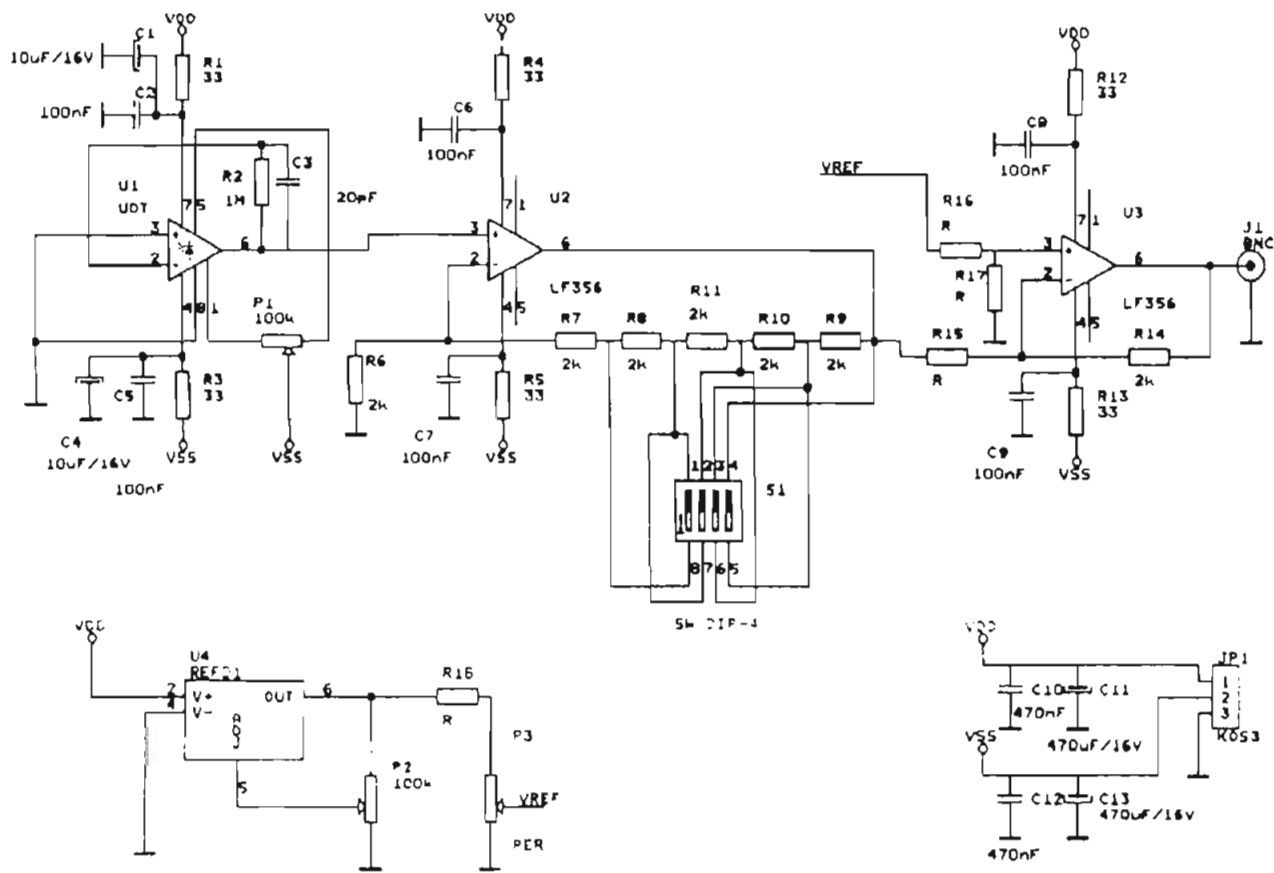
W przypadku omawianego toru pomiarowego występują łagodniejsze warunki sprzężenia, ze względu na mniejszą średnicę elementu nadawczego (średnica pręta kwarcowego w świecy 0,8 mm) w stosunku do elementu odbiorczego (średnica światłowodu transmisyjnego 1 mm). Wpływ błędów wynikających z odległości zwierciadeł i wzajemnego położenia uznać należy za mniejszy, niż zaprezentowany na rys. 5.16.

5.6.4. Układy elektronicznego przetwarzania sygnału

Układy elektronicznego przetwarzanie sygnału przedstawiono na rys. 5.17. Są to: fotodetektor zintegrowany ze wzmacniaczem transimpendacyjnym (1+2), wzmacniacz napięciowy o regulowanym skokowo wzmacnieniu (3), referencyjne źródło napięcia odniesienia (5) oraz układ różnicowy do przesuwania poziomu napięcia na wyjściu toru optoelektronicznego (4).



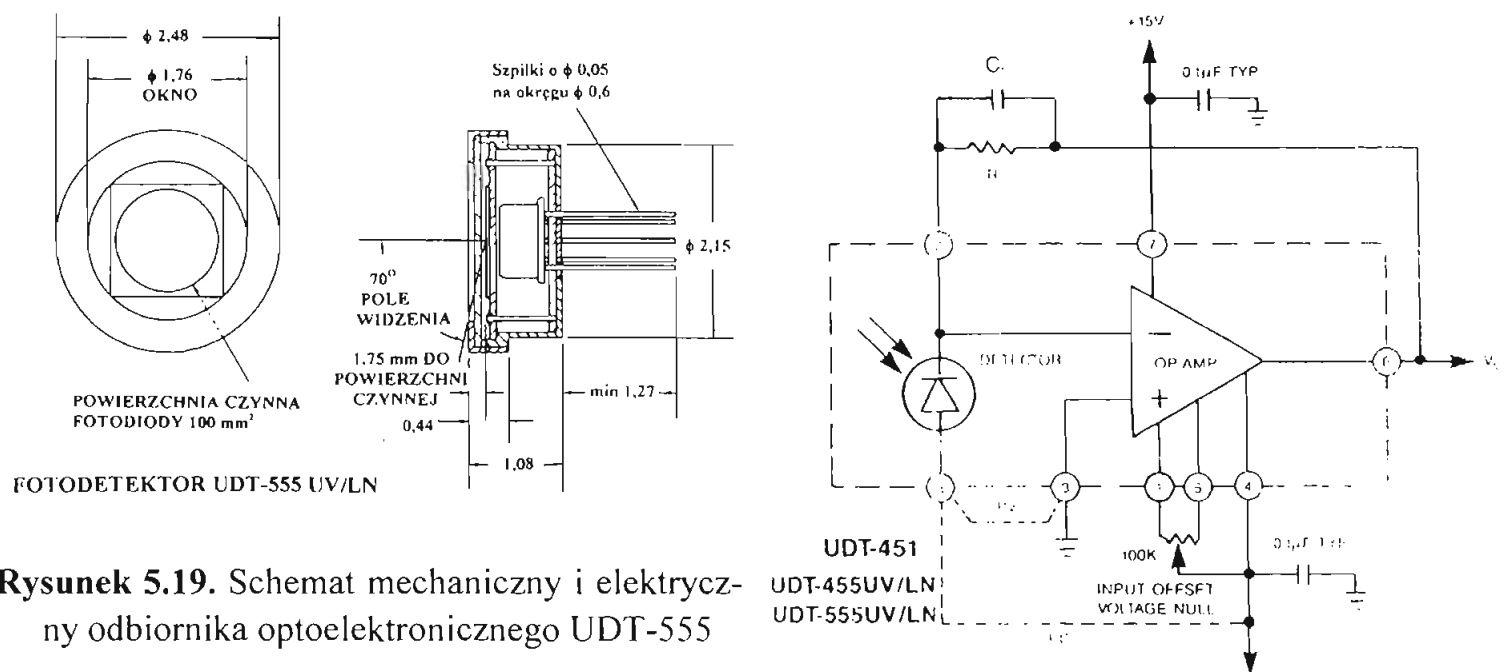
Rysunek 5.17. Schemat blokowy elektronicznej części toru przetwarzania sygnału



Rysunek 5.18. Toru przetwarzania sygnału – schemat elektroniczny

Sygnał optyczny transmitowany przez światłowód generuje w fotodiodzie proporcjonalny do padającej mocy promieniowania prąd wsteczny, który zamieniany jest na napięcie we wzmacniaczu wstępnym. Sygnał ten ma ograniczone pasmo do 12 kHz, co wynika z budowy i własności użytego elementu optoelektronicznego. Sygnał napięciowy następnie kierowany jest do wzmacniacza napięciowego, w którym istnieje możliwość skokowej zmiany wzmocnienia od 20 do 250 V/V. Wzmocniony sygnał następnie podawany jest na wyjściowy wzmacniacz różnicowy umożliwiający dopasowanie zakresu zmian sygnału pomiarowego do pola napięć karty AMBEX, w celu zapewnienia przetwarzania z pełną rozdzielczością przy różnych poziomach rejestrowanego sygnału. Napięcia odniesienia dostarcza referencyjne źródło napięcia odniesienia z dokładnością do 0,01% (a więc większą niż rozdzielczość karty przetworników).

Pełny schemat ideowy zespołu elektronicznego przetwarzania sygnału zawierający połączenia elektryczne przedstawiono na rys. 5.18.

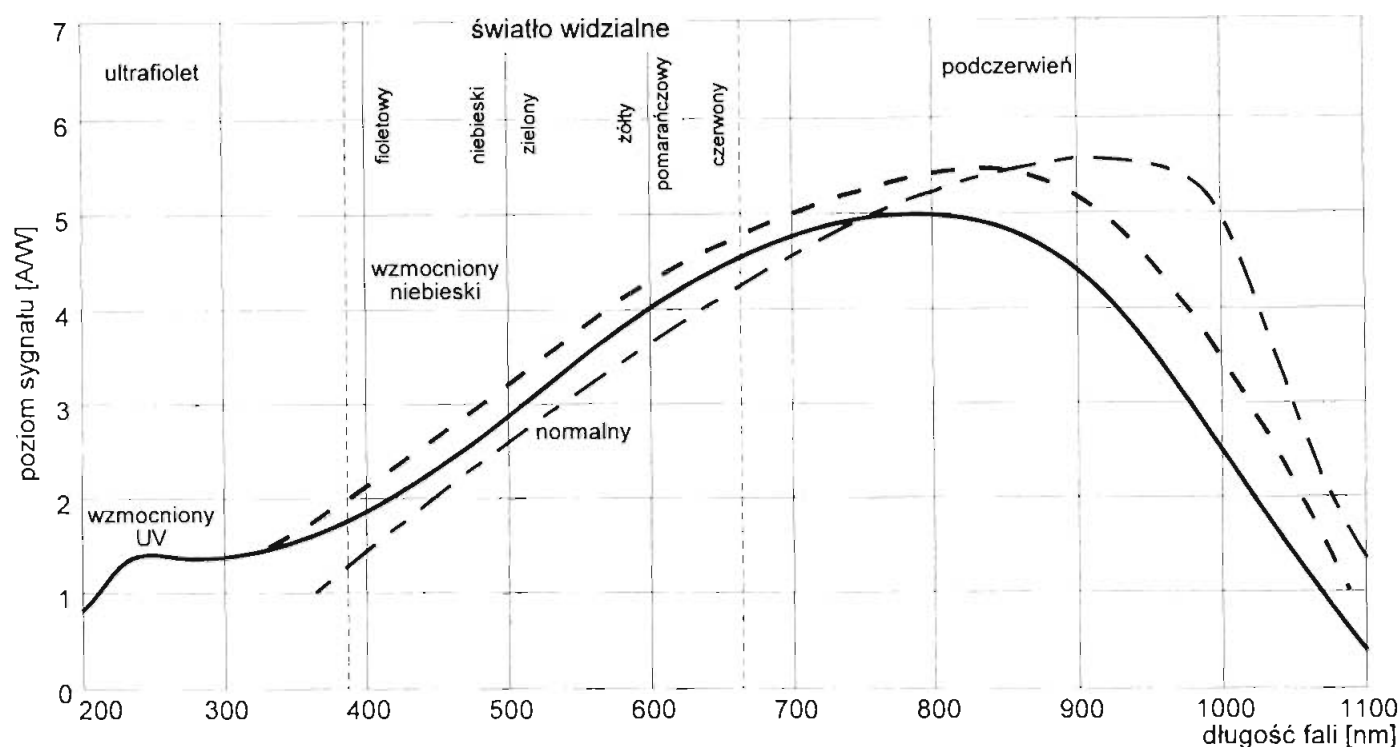


Rysunek 5.19. Schemat mechaniczny i elektryczny odbiornika optoelektronicznego UDT-555

Odbiornik optoelektroniczny UDT-555UV/LN (prod. UDT Inc., USA) jest niskoszumowym szerokopasmowym wzmacniaczem operacyjnym zintegrowanym z fotodiodą o szerokim spektrum czułości obejmującym zakres światła widzialnego, podczerwieni i nadfioletu (rys. 5.19).

Dane techniczne:

napięcie zasilania:	min. ± 5 V; typ. ± 15 V; max. ± 18 V
średni prąd zasilania:	typ. 2,5 mA; max. 3,5 mA
napięcie wejściowe:	typ. 0,1 mV; max. 0,5 V
współ. temp. napięcia wejściowego:	typ. $2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$; max. $5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
wejściowy prąd podkładu:	typ. 0,8 pA; max. 2 pA
szerokość pasma:	3,0 MHz
wzmocnienie w pętli otwartej:	min. 320 V/mV; typ. 1770 V/mV
szumy na WE:	$15 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (dla 100 Hz); $8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (dla 1 kHz)
wejściowy prąd szumu:	$5 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ (dla 100 Hz)



Rysunek 5.20. Charakterystyka czułości diody UDT-555UV/LN

Jak wynika z charakterystyki czułości fotoelementu (rys. 5.20), podstawowy zakres odbieranych fal zawiera się w paśmie światła widzialnego. Ponadto, dla nadfioletu fotoelement posiada zmodyfikowaną część charakterystyki, co umożliwia przetwarzanie promieniowania w zakresie od 200 do 400 nm.

5.7. PROGRAM BADAŃ

Realizacja eksperymentu miała za zadanie dostarczenie odpowiedniej ilości danych pomiarowych, pozwalających na zweryfikowanie przydatności optoelektronicznego toru pomiarowego w badaniach procesu spalania.

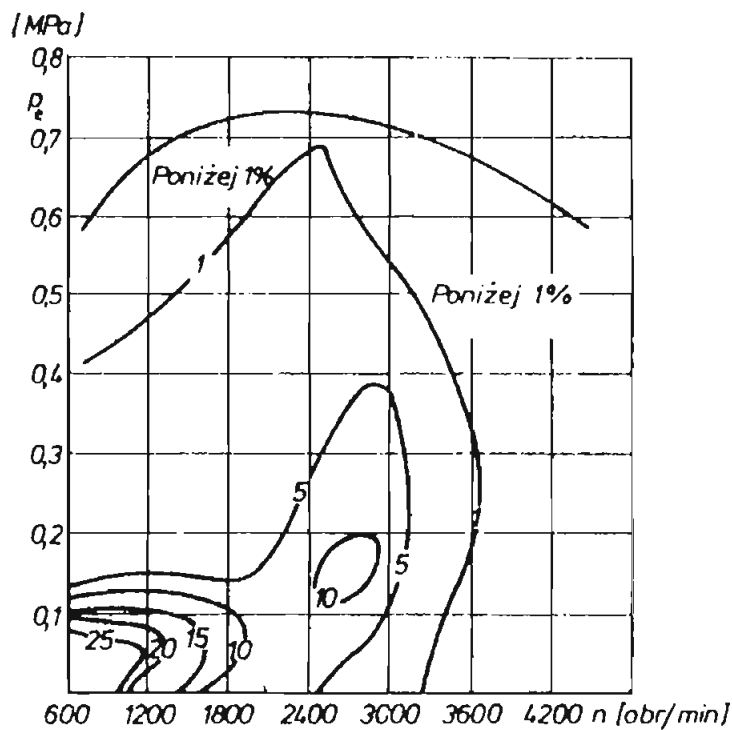
Program badań opracowano tak, aby odpowiadał warunkom pracy silnika eksploatowanego w jeździe miejskiej. Jazdę miejską charakteryzuje praca silnika z niewielkimi obciążeniami, przy niższych prędkościach obrotowych i dużych udziałach czasu pracy silnika na biegu jałowym: od 30% w przypadku „dynamicznego” sposobu jazdy do 60% dla jazdy „ekonomicznej” [67]. Dla samochodu eksploatowanego jako taksówka (rys. 5.21), praca silnika z obciążeniami do 25% obciążenia maksymalnego i w zakresie prędkości obrotowych nie przekraczających 50% prędkości maksymalnej, wynosi nawet do 70% całkowitego zarejestrowanego czasu pracy.

Aby wszechstronnie ocenić przydatność toru pomiarowego, należało wykonać pomiary dla wielu stanów pracy silnika, wyznaczonych przez różne prędkości obrotowe, obciążenia, skład mieszanki, kąt wyprzedzenia zapłonu, stan cieplny.

Wyznaczając punkty pomiarowe kierowano się następującymi założeniami [38, 40]:

1. Opierając się na dostępnych mapach gęstości czasowej pracy silnika w jeździe miejskiej (np. rys. 5.21), wyodrębniono trzy strefy pracy (rys. 5.22), charakteryzujące łączny czas

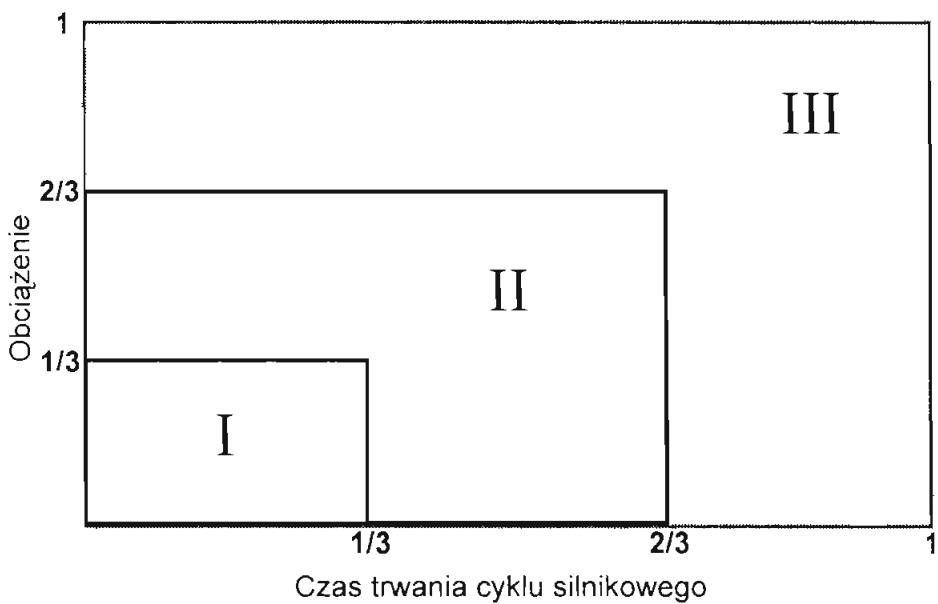
pracy w danym zakresie obciążeń i prędkości obrotowych, przy czym w strefie I silnik pracował najdłużej, a w strefie III – najkrócej.



Rysunek 5.21. Mapa czasu pracy silnika samochodu osobowego eksploatowanego jako taksówka [61]

2. Czas trwania cyklu pracy powinien wzrastać w skali geometrycznej: 1:2:4:8... Takie założenie spowodowało niejednakowe przyrosty prędkości obrotowej silnika (rys. 5.23).
3. Jako miarę obciążenia przyjęto, zgodnie z zasadą bilansu energetycznego, ilość mieszanki w cylindrze, czyli ilość energii zawartej w paliwie. Aby określić obciążenie silnika kierowano się dawką paliwa wtryskiwaną w przeliczeniu na 1 cykl. W oparciu o wykonane pomiary zależności czasu wtrysku i dawki paliwa przypadającej na 1 cykl (rys. 5.24), uzyskano zależność empiryczną:

$$q_c = 8,75807 T_{wtr} - 5,68078 \tag{5.1}$$

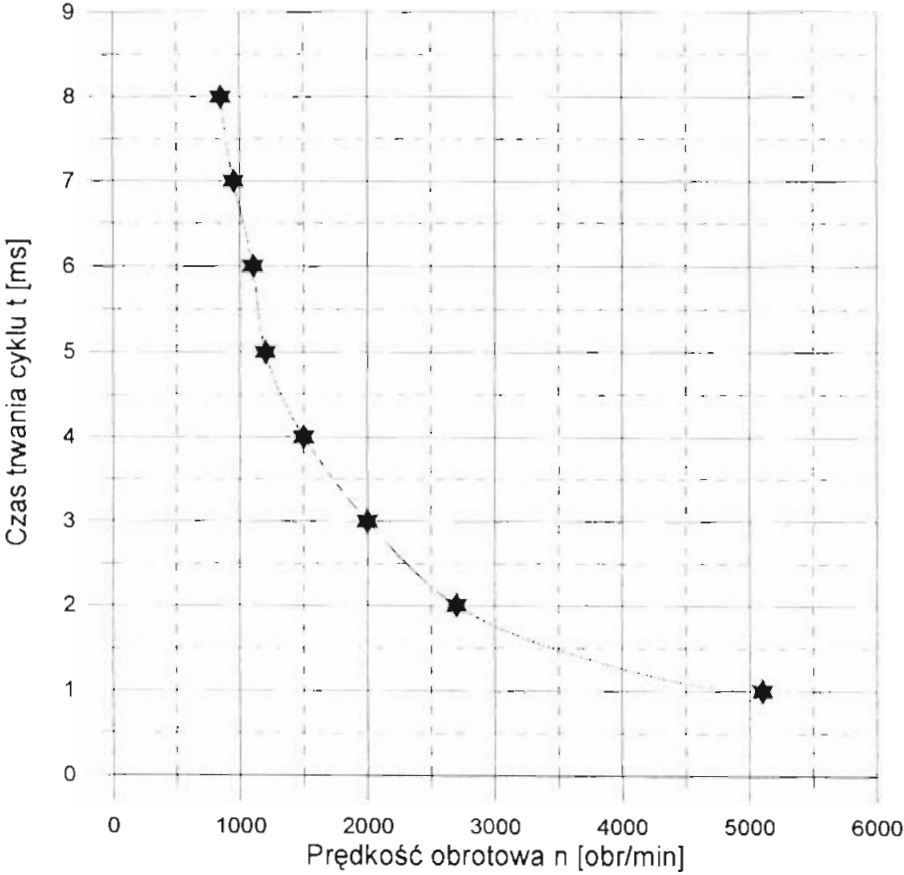


Rysunek 5.22. Strefowy podział zakresów pracy silnika.

4. Dobierając obciążenia przyjęto podział proporcjonalny na 12 poziomów (dawek paliwa) w stosunku do obciążenia maksymalnego, wyodrębniając do badań 7 poziomów (rys. 5.25).
5. Zadawane kąty wyprzedzenia zapłonu α_z oraz współczynniki składu mieszanki λ dobrano tak, aby przebadać czujnik w jak najbardziej różnorodnych warunkach spalania, tj. przy pracy silnika w zakresie mieszanek od ubogich do bogatych, przy kątach wyprzedzenia

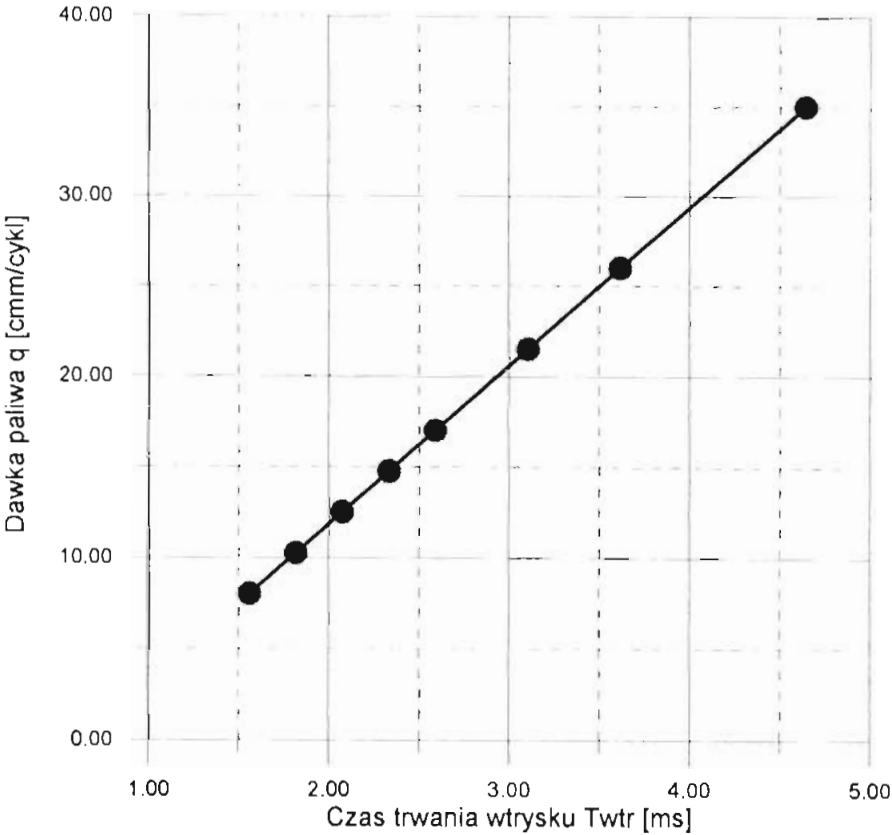
zapłonu zbyt późnych i zbyt wczesnych. Zarówno kąty wyprzedzenia zapłonu, jak i współczynniki składu mieszanki były jednakowe dla wszystkich obciążeń i prędkości i wynosiły:

- kąty wyprzedzenia zapłonu α_z : 5, 15, 25, 40, 55 ° owk przed GMP,
- współczynniki składu mieszanki λ : 0,7, 0,9, 1,0, 1,1, 1,3.

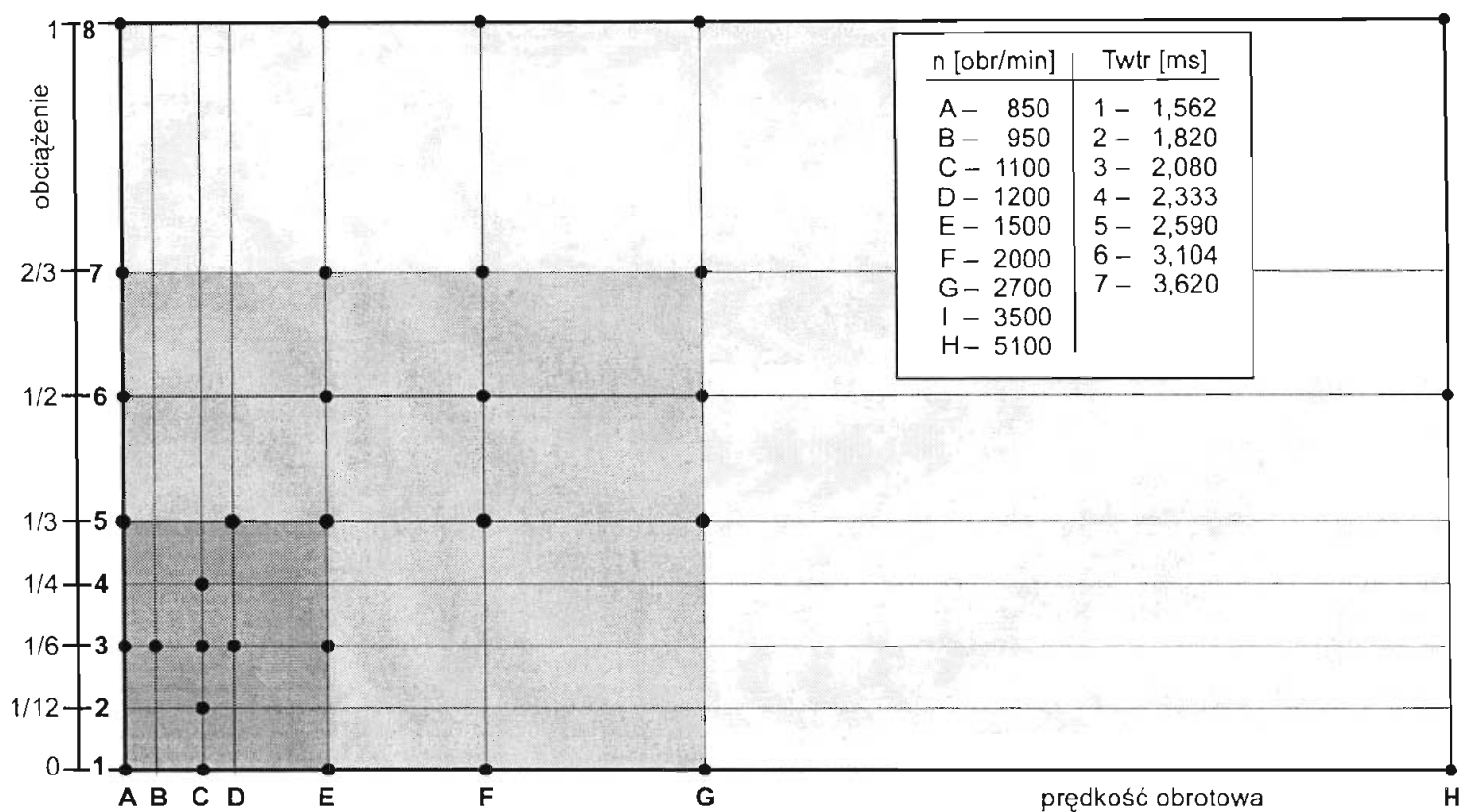


Rysunek 5.23. Czas trwania cyklu w funkcji prędkości obrotowej

Przyjęcie opisanych wyżej założeń (punkty 1 do 5) pozwoliło na odzwierciedlenie warunków pracy silnika w ruchu miejskim. Sporządzono rozkład punktów pomiarowych, uwzględniających wyodrębnione strefy pracy silnika, obciążenia (określane przez czas wtrysku) oraz prędkości obrotowe. Tak opracowany plan eksperymentu przedstawiono na rysunku 5.25.

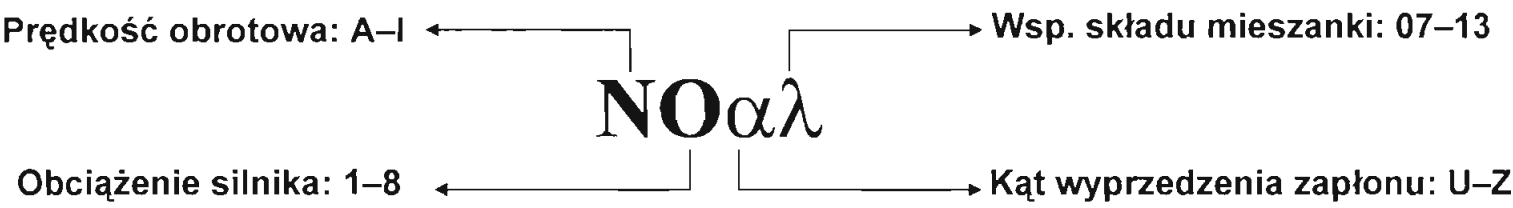


Rysunek 5.24. Dawka paliwa w funkcji czasu trwania wtrysku $q_c = f(T_{wtr})$



Rysunek 5.25. Rozkład punktów pomiarowych

Każdy z punktów pomiarowych oznaczono odpowiednim kodem (rys. 5.26).



- Prędkości obrotowe silnika **N**:

N	A	B	C	D	E	F	G	I	H
n[obr/min]	850	950	1100	1200	1500	2000	2700	3500	5100

- Stopień obciążenia silnika **O**:

O	1	2	3	4	5	6	7
[–]	0	1/12	1/6	1/4	1/3	1/2	2/3
T _{wtr} [ms]	1,562	1,820	2,080	2,333	2,590	3,104	3,620

- Kąty wyprzedzenia zapłonu **α**:

α	U	V	X	Y	Z
[° owk]	5	15	25	40	55

- Współczynniki składu mieszanki **λ**:

λ	07	09	10	11	13
[–]	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3

Rysunek 5.26. Przyjęty system kodowania punktów pomiarowych

Tak więc dowolny „duży” punkt pomiarowy wyznaczony przez prędkość obrotową i obciążenie (kod *NO*), realizowany był w 13 modyfikacjach („małych” punktach), polegających na zmianie kąta wyprzedzenia zapłonu α_z i współczynnika składu mieszanki λ . Siatkę „małych punktów” pomiarowych ilustruje rysunek 5.27.

Ogółem zrealizowano pomiary dla ponad 300 punktów pomiarowych. Rejestrowano 5 sygnałów szybkozmiennych: napięcie wtryskiwacza U_{wtr} , znacznik GMP, ciśnienie indykowane p_i , natężenie promieniowania świetlnego I_{opt} , chwilowy moment obrotowy M_{obr} . Okres próbkowania dobierano tak, aby przy 72 000 próbek mierzyć zawsze nie mniej niż 100 cykli roboczych silnika.

C3 /Twtr		13	11	10	09	07
		$\lambda=1,3$	$\lambda=1,1$	$\lambda=1,0$	$\lambda=0,9$	$\lambda=0,7$
U	$\alpha_z=5^\circ$					
V	$\alpha_z=15^\circ$					
X	$\alpha_z=25^\circ$	1,648	1,933	2,076	2,219	2,504
Y	$\alpha_z=40^\circ$					
Z	$\alpha_z=55^\circ$					

Rysunek 5.27. Siatka punktów pomiarowych – pola cieniowane oznaczają zrealizowane nastawy

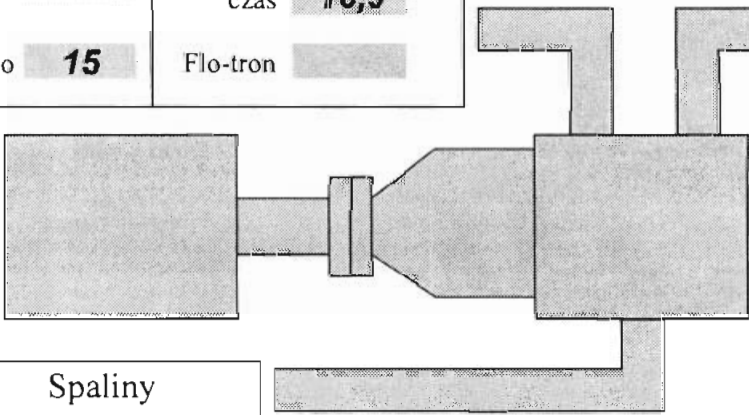
Rozdział 6

OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

6.1. ARCHIWIZACJA DANYCH POMIAROWYCH

Ze względu na konieczność dalszego przetwarzania, uzyskane wyniki pomiarów zostały podzielone na trzy grupy:

- 1. wielkości wolnozmiennie, odczytywane ze wskazań przyrządów pomiarowych i zapisywane w karcie badań (rys. 6.1),
- 2. wielkości szybkozmiennie, rejestrowane za pomocą karty przetworników A/C Ambex i zapisywane na dysku twardym za pomocą programu MULT,
- 3. wielkości odczytywane bezpośrednio ze sterownika silnika AMX 260 i zapisywane przez program nadzorujący Silnik2G na dysku twardym.

Data: 14.08.96		KARTA BADAŃ SILNIKA SAMOCHODU POLONEZ		Numer:	
Godzina:		Nazwa eksperymentu:		D5u07	
Prowadzący: D.P.		OTOCZENIE: T _a 21,3 p _a 984 w 50			
Hamulec		Paliwo		Zapłon	
n 1200		dawka 20		$\Delta\alpha_z$ 5	
Mo 15		czas 16,9			
Flo-tron					
					
				Powietrze	
				p _d	
				v _d	
				T _d	
				Przepustnica	
				nastawa 15	
				Multec	
				AMX 260 10	
				zawór obejściowy	
Spaliny		Stan cieplny		Wtrysk	
T _{sp} 386		T _{wody} 62 T _{oleju} 72		☒ synchroniczny	
CO 9,78				Δt_{wtr}	
CH 169		Uwagi: opt: 1+2+3+4		T _{wtr} 3,172	
λ		ciśn: 1*1			

Rysunek 6.1. Karta badań z przykładowymi wynikami pomiarów wielkości wolnozmiennych

Ogółem uzyskano około 350 MB wyników pomiarów zapisanych w postaci plików. Przetworzenie tak dużej ilości informacji, ze względu na ograniczoną pojemność dostępnych dysków twardych, wymagało zarchiwizowania ich na taśmach streamera.

Wyniki zapisane na kartach badań umieszczone zostały w arkuszu kalkulacyjnym (Excel), pozwalającym na ich dalsze, swobodne przetwarzanie.

6.2. MATEMATYCZNA OBRÓBKA WYNIKÓW

Zrealizowanie założonych celów badawczych wymagało przetworzenia zebranych na hamowni wyników. Wstępna obróbka matematyczna obejmowała między innymi:

- filtrację i wygładzanie przebiegów czasowych,
- przyporządkowanie przebiegów czasowych odpowiadającemu im położeniu wału korbowego,
- wizualizację uzyskanych zależności,
- analizę statystyczną,
- przeliczenie wielkości elektrycznych na wielkości mechaniczne.

Drugi etap przetwarzania wyników pomiarów obejmował:

- obliczenia wskaźników użytecznych pracy silnika,
- konstrukcję charakterystyk przebiegów czasowych (ciśnienia indykowanego, sygnału optycznego, prędkości wywiązywania ciepła itp.) w zakresie zmiennych prędkości, obciążeń i parametrów regulacyjnych (kąt wyprzedzenia zapłonu, współczynnik składu mieszanki),
- identyfikację modelu wywiązywania ciepła (parametry funkcji Wiebe),
- poszukiwanie korelacji przebiegu sygnału optycznego z innymi wielkościami charakteryzującymi pracę silnika (wolno- i szybkozmiennymi).

Opisane procedury wstępnej obróbki matematycznej wyników zrealizowane zostały numerycznie w postaci komputerowego systemu obsługi eksperymentu, opracowanego przez *dra inż. Mirosława Wendekera* – adiunkta w Katedrze Silników Spalinowych Politechniki Lubelskiej. Poniżej przedstawione zostaną krótkie charakterystyki wykorzystanych programów obliczeniowych.

6.2.1. Program Faza_1

Program Faza_1 służy do wstępnej obróbki plików typu *.MLT zawierających pomiary dla poszczególne punktów, zarejestrowane za pomocą programu akwizycji danych MULT. Są to przebiegi sygnałów:

- napięcia uzwojenia wtryskiwacza (czasu otwarcia wtryskiwacza),
- znacznika położenia wału korbowego (GMP pierwszego cylindra),
- ciśnienia indykowanego (mierzonego w 1 cylindrze),
- natężenia sygnału optycznego (mierzonego w 2 cylindrze),
- momentu obrotowego mierzonego przez układ tensometryczny hamulca,
- sygnału sondy lambda.

Przetworzone wyniki zapisywane są w postaci binarnej w plikach *.FZ2.

Głównym zadaniem programu jest filtracja danych oraz przyporządkowanie przebiegom ciśnienia, sygnału optycznego, czasu otwarcia wtryskiwacza i momentu odpowiedniego położenia wału korbowego. Identyfikacja sygnałów odbywa się automatycznie przez przeszukiwanie poszczególnych kanałów, po wstępnym zdefiniowaniu „wzorca kształtu” dla trzech różnych, nie następujących po sobie przebiegów: napięcia wtryskiwacza i znacznika położenia

GMP. Poprzez pomiar czasu pomiędzy poszczególnymi znacznikami następuje synchronizacja przebiegu sygnałów mierzonych w różnych cylindrach.

Filtracja i wygładzanie przebiegów realizowane są w sposób interaktywny. W zależności od charakteru wygładzanego przebiegu, możliwe jest dokonanie wyboru sposobu wygładzania spośród 4 różnych metod:

- metoda „tnij piki”,
- metoda „uśrednij sąsiednie”,
- metoda „ślizgającej średniej”,
- metoda funkcji sklepanych.

Ostateczny sposób wygładzania mógł być dowolną kombinacją wymienionych metod. Ponadto, dla każdej z metod istniała możliwość doboru współczynników wagowych określających intensywność procesu. Korekty doboru metod i współczynników dokonano poprzez porównanie przebiegów sygnału przed i po wygładzeniu (wykresy na ekranie monitora) dla trzech, nie następujących po sobie przebiegów.

Metoda „tnij piki”

W analizowanym zbiorze określone są wartości maksymalne i minimalne sygnału oraz obliczana jest jego wartość średnia: $y_{\max}$, $y_{\min}$, y_{sr} . Następnie obliczane są dopuszczalne odchyłki punktów pomiarowych:

$$\begin{aligned} y_{m1} &= y_{\text{sr}} (1 - \text{marg}) \\ y_{m2} &= y_{\text{sr}} (1 + \text{marg}), \end{aligned} \quad (6.1)$$

gdzie: $1 < \text{marg} < 100$ – wielkość zadeklarowana, określająca intensywność wygładzania.

W trakcie przeszukiwania zbioru danych sprawdzany jest warunek położenia punktu wewnątrz pola tolerancji:

$$y_k > y_{m2} \text{ lub } y_k < y_{m1} \quad (6.2)$$

Jeżeli analizowany punkt znajduje się wewnątrz pola tolerancji:

$$y_{m1} < y_k < y_{m2}$$

wtedy przyjmowane są nowe wartości:

$$\begin{aligned} y_{\text{sr}} &= y_k \\ y'_k &= y_{\text{sr}} \end{aligned} \quad (6.2)$$

i następuje bieżąca korekta szerokości pola tolerancji:

$$\begin{aligned} y_{m1} &= y_{\text{sr}} (1 - \text{marg}) \\ y_{m2} &= y_{\text{sr}} (1 + \text{marg}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Jeżeli analizowany punkt znajduje się poza polem tolerancji, to przybiera on wartość granicy przedziału:

$$\begin{aligned} y_k > y_{m2} &\Rightarrow y'_k = y_{m2}, \\ y_k < y_{m1} &\Rightarrow y'_k = y_{m1}. \end{aligned}$$

Procedura wykonywana jest jednocześnie dla 5 kolejnych punktów tak, aby wyeliminować przypadkowe korekty wynikające z rosnącego lub malejącego charakteru krzywej.

Metoda „uśrednij sąsiednie”

Wyglądanie tą metodą polega na obliczaniu wartości średniej z otoczenia o promieniu d kolejnych punktów:

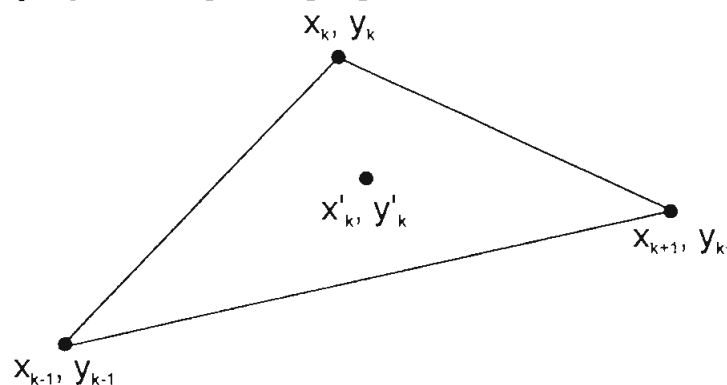
$$y_{\text{srk}} = \sum_{k-d}^{k+d} \frac{y_k}{2d+1} \quad (6.4)$$

Nowe, wygładzone punkty przyjmują wartość:

$$y'_k = y_{\text{srk}} \quad (6.5)$$

Metoda „ślizgającej średniej”

Wyglądanie odbywa się dla trzech kolejnych punktów, poszukiwany jest środek ciężkości trójkąta wyznaczonego na płaszczyźnie przez te punkty (rys. 6.2). Dokładny opis metody znajduje się w pracy [68].



Rysunek 6.2. Układ punktów w metodzie wygładzania „ślizgającej średniej”

Zależność opisuje wzór:

$$y'_k = ((d - 0,75)y_{k-1} + 0,25x_{k+1} + 0,5x_k)/d \quad (6.6)$$

gdzie:

$$d = 0,5 + \Delta x_{k+1}/(2\Delta x_k) \quad (6.7)$$

$$\Delta x_k = x_k - x_{k-1} \quad (6.8)$$

Metoda funkcji sklejanych

Zastosowanie metod funkcji sklejanych do wygładzania czasowych przebiegów ciśnienia zostało szczegółowo opisane w pracy [MW-Konmot]. Funkcja wygładzająca $f(x)$ konstruowana jest poprzez minimalizację całki:

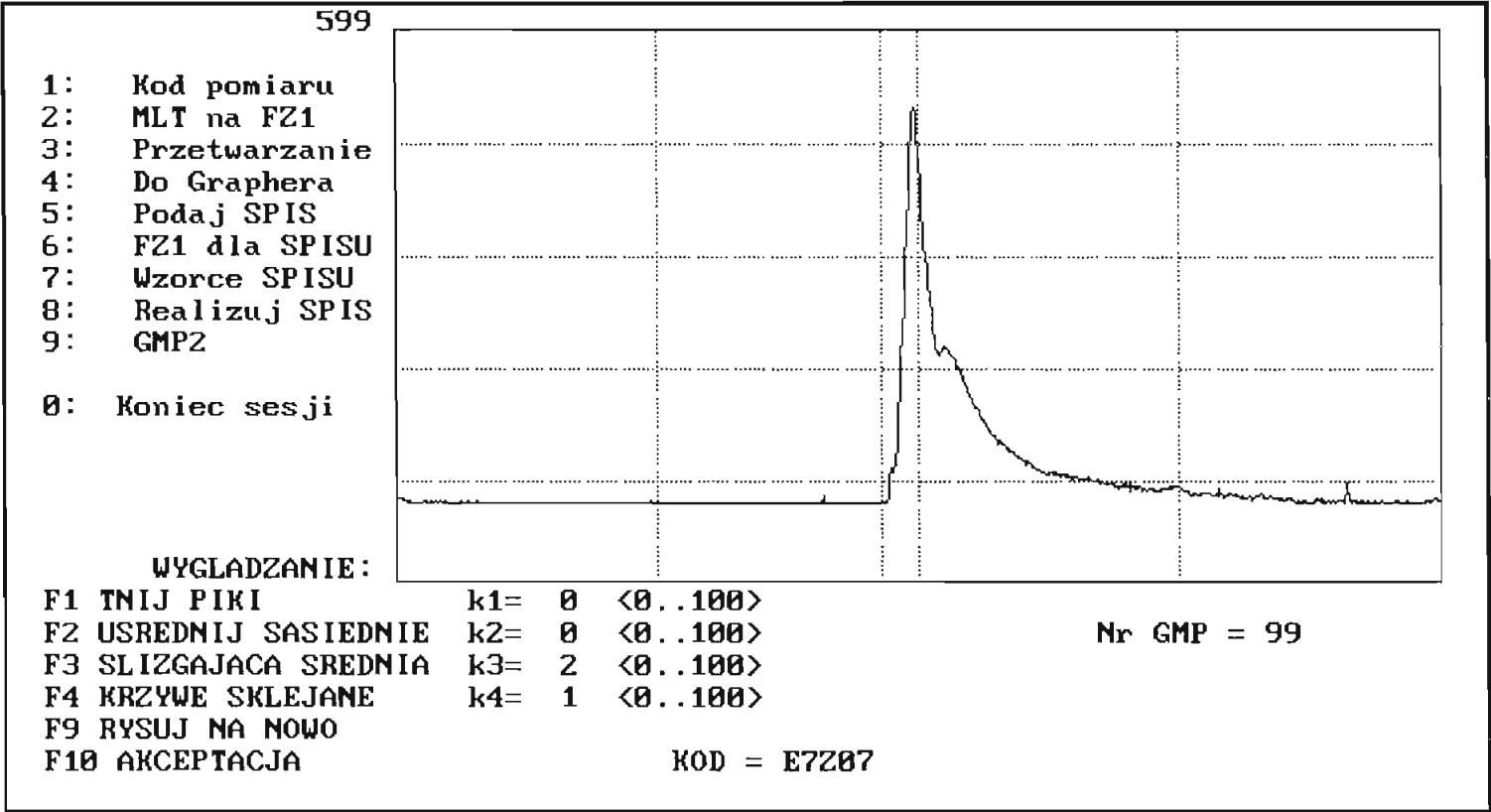
$$\int_{x_0}^{x_n} g''(x)^2 dx \quad (6.9)$$

wśród wszystkich funkcji $g(x)$ takich, że:

$$\sum_{k=0}^n \left(\frac{g(x_k) - y_k}{\delta y_k} \right)^2 \leq S \quad (6.10)$$

Stała S pozwala na przeskalowanie wartości odchyłek δy_k kontrolujących wielkości obszaru wygładzanego, S przybiera wartości zbliżone do odchylenia standardowego. W przypadku, gdy $S = 0$, problem wygładzania sprowadza się do interpolacji funkcjami sklejanymi.

Widok ekranu monitora w trakcie określania współczynników wagowych wygładzania przebiegów przedstawiono na rysunku 6.3, natomiast przykładowe wyniki wygładzania sygnału optycznego dla różnych współczynników wagowych na rysunku 6.4.



6.2.2 Program Faza_2

Program Faza_2 analizuje wygładzone przebiegi czasowe zapisane w plikach *.FZ1. Wyznaczone są wybrane wielkości charakteryzujące zarejestrowany proces roboczy. Zestawienie wielkości otrzymywanych w wyniku przetwarzania przebiegów czasowych zawarte jest w tabeli 6.1.

- W pliku wyjściowym zapisywane były także:
- prędkość obrotowa n ,
 - ciśnienie w kolektorze dolotowym p_d ,
 - położenie katowe przepustnicy α_p ,
 - czas otwarcia wtryskiwacza T_{wtr} ,
 - moment obrotowy M_o ,
 - średnie odchylenie standardowe momentu sM .

Tabela 6.1. Zestawienie wielkości wyznaczonych z przebiegów czasowych zarejestrowanych sygnałów

Lp	Nazwa wielkości	p	Iopt
1	przebieg w funkcji kąta obrotu w.k.	p(fi)	OPT(fi)
2	wartość maksymalna – średnia ze 100 cykli	p _{max}	OPT _{max}
3	kąt wystąpienia wartości maksymalnej	fi _{p_{max}}	fiOPT _{max}
4	średnie odchylenie standardowe maksimum	sp _{max}	sOPT _{max}
5	średnie odchylenie standardowe kąta maks.	sfi _{p_{max}}	sfiOPT _{max}
6	maksymalny gradient wielkości	dp _{max}	dOPT _{max}
7	kąt wystąpienia gradientu maksymalnego	fid _{p_{max}}	fidOPT _{max}
8	średnie odchylenie std gradientu maks.	sdp _{max}	sdOPT _{max}
9	średnie odchylenie std kąta gradientu maks.	sfid _{p_{max}}	sfidOPT _{max}
10	pole pod krzywą	Polep	PoleOPT
11	średnie odchylenie std pola pod krzywą	sPolep	sPoleOPT

W trakcie przetwarzania odbywała się konwersja zarejestrowanych napięć na wielkości fizyczne odpowiadające mierzonym wielkościom z uwzględnieniem bieżących nastaw wzmacniaczy (ciśnienie i optyka).

Podstawowe obliczenia statystyczne obejmują wyznaczenie następujących wielkości:

- wartości średniej x_{sr} obliczonej dla n punktów pomiarowych
- wartości minimalne x_{min} i maksymalne x_{max}
- odchylenie standardowe σ

$$x_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$$

(6.11)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - x_{sr})^2}{n}}$$

(6.12)

Program Tab_Rys

Program Tab_Rys pozwala na przygotowywanie dowolnych zestawów danych do dalszej analizy w postaci tabel lub rysunków w oparciu o przeszukiwanie zbiorów z wynikami pomiarów zapisanych przez program Faza_2. Możliwe jest określenie zakresu sporządzanych charakterystyk (regulacyjne, eksploatacyjne, dowolne, wszystkie) oraz sposobu przygotowania danych wyjściowych (tabele, wykresy słupkowe zbiorcze, wykresy porównawcze, wykresy katowe, korelacja, aproksymacja).

Dobór analizowanych zmiennych odbywa się poprzez podanie ich kodów porządkowych według opracowanego zestawienia. W przypadku realizacji wariantu o charakterze dowolnym, dokonuje się wyboru punktów „dużych” (np A1, C4, E7 itd.) oraz punktów „małych” (np. X10, Z10, U07 itd.).

Przykładowy widok ekranu monitora w trakcie przygotowywania zestawu danych przedstawiono na rysunku 6.5.

WYBIERZ WARIANT WYNIKOW: 3

1 - REGULACYJNE

2 - EKSPLOATACYJNE

3 - DOWOLNE

4 - WSZYSTKIE

CZEGO OCZEKujesz: 4

1 - Tabele

2 - Wykresy słupkowe zbiorcze

3 - Wykresy porównawcze

4 - Wykresy katowe

5 - Korelacja

6 - Aproksymacja

WYBRANE WARTOSCI

1-p 2-dQ 3-OPT

JAKI PRZEBIEG: 1

A7 D7 E7 G7 I7

A6 C6 D6 F6 G6

C5 E5 F5 G5 I5

C4 D4

A3 B3 C3 E3

C2

A1 C1 E1 F1 G1

WYBRANE PUNKTY

C2X13

C2X11

C2X10

C2X09

C2X07

C6X13

C6X11

U13 U10 U07

U10

X13 X11 X10 X09 X07

Y10

Z13 Z10 Z07

Rysunek 6.5. Program Tab_Rys – przygotowywanie zestawu danych

Zapis plików wynikowych odbywa się w formacie umożliwiającym późniejsze, łatwe konstruowanie wykresów i tabel za pomocą programów Grapher i Excel, pracujących w środowisku Windows.

6.3. ANALIZA KORELACJI I REGRESJI

Dalsza analiza wyników obejmowała poszukiwanie istotnych statystycznie korelacji pomiędzy parametrami sygnału optycznego a innymi wynikami pomiarów. Wyniki przedstawiono w 7 rozdziale pracy.

119

Analiza korelacji, czyli współzależności, pozwala na ilościowe określenie związku między zmienną zależną a jedną lub kilkoma zmiennymi niezależnymi. Z kolei analiza regresji jest efektywną metodą statystyczną służącą określeniu zależności ilościowych pomiędzy tymi zmiennymi. Wykorzystanie danych eksperymentalnych umożliwia wyznaczenie zależności matematycznej przedstawiającej wpływ zmiennych niezależnych na badaną wielkość.

W zastosowaniach inżynierskich, analiza regresji może być stosowana do korelowania danych w szerokim zakresie, począwszy od prostych zależności fizycznych do złożonych analiz systemów przemysłowych [9]. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że związki przyczynowo-skutkowe wynikające z analizy wyników korelacji, są jednostronne. Stwierdzenie silnego związku korelacyjnego między zmiennymi nie jest dowodem wzajemnej zależności zmiennych. Należy dokonać głębszej analizy merytorycznej zjawisk – jeżeli nastąpi dostateczne uzasadnienie zależności, np. w oparciu o prawa fizyczne – można postawić tezę o istnieniu zależności, pozytywny wynik analizy korelacyjnej stanowi jej dodatkowe uzasadnienie.

Jeżeli w oparciu o teorię nie daje się określić charakteru zależności pomiędzy zmiennymi, możliwe jest założenie funkcji i dopasowanie jej do danych eksperymentalnych. Najczęściej zakłada się istnienie zależności liniowej, można także stosować wielomiany lub funkcje eksponencjalne.

Zależność liniowa jest przypadkiem często stosowanym i najdokładniej poznanym z matematycznego punktu widzenia. Najczęściej jako miarę korelacji stosuje się liniowy współczynnik korelacji Pearsona (R). Modele nieliniowe regresji opisywane są m. in. w postaci funkcji eksponencjalnej typu:

$$y = b \cdot \exp(a \cdot x) \quad (6.13)$$

Rozwiązanie zagadnienia następuje przez zlogarytmowanie stron i linearyzację modelu:

$$\ln y = \ln b + a \cdot x \quad (6.14)$$

Po podstawieniach otrzymujemy model liniowy:

$$y' = b' + a' \cdot x \quad (6.15)$$

Przy dokonywaniu transformacji zakładany jest normalny rozkład zmiennych. Liniowe modele regresji rozwiązywane są za pomocą metody najmniejszych kwadratów:

$$U = \sum_{i=1}^n (y_i - y')^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (6.16)$$

Współczynnik korelacji liniowej definiuje wzór [19]:

$$R = \frac{c_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (6.17)$$

gdzie:

$$c_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{n} - \bar{x} \cdot \bar{y} \quad (6.18)$$

to tzw. kowariancja (współzmiennność),

s_x, s_y – błędy standardowe zmiennej niezależnej x i zmiennej zależnej y

n - liczba par wyników x_i, y_i .

Współczynnik korelacji R uzyskany z próby n -elementowej jest jedynie estymatorem współczynnika korelacji ρ , będącego parametrem dla całej badanej populacji. Stąd też wynika konieczność określenia przedziału ufności dla estymowanego parametru ρ .

Estymacji dokonuje się przy użyciu statystyki Z opisywanej rozkładem normalnym:

$$Z = 1,151 \log \frac{1+R}{1-R} \quad (6.19)$$

dla której odchylenie standardowe jest równe:

$$\sigma_Z = \frac{1}{\sqrt{n-3}} \quad (6.20)$$

Równie ważnym zagadnieniem jest sprawdzenie istotności korelacji. Badając korelacje dowolnych dwóch zmiennych zawsze istnieje szansa uzyskania różnej od zera wartości współczynnika korelacji R . Nie oznacza to, że parametr ρ nie jest równy zero.

Należy postawić hipotezę zerową H_0 ($\rho = 0$), której przyjęcie oznacza nieistotność korelacji, odrzucenie świadczy o tym, że uzyskana korelacja jest istotna statystycznie. Jak już wspomniano, istotność korelacji nie oznacza istnienia związków przyczynowo-skutkowych między badanymi zmiennymi, wskazuje jedynie na sensowność dalszych badań i analiz.

Badania istotności wykonuje się stosując statystykę t opisaną wzorem:

$$t = \frac{1}{\sqrt{1-R^2}} \cdot \sqrt{n-2} \quad (6.21)$$

Statystyka t jest opisywalna rozkładem t -Studenta dla ilości stopni swobody $k = n-2$. Jeżeli obliczona wartość t jest większa od wartości krytycznej $t(\alpha/2, k)$, to hipoteza H_0 ($\rho = 0$) zostaje odrzucona, co oznacza uznanie korelacji za istotną.

W literaturze [19] są dostępne tablice statystyczne, w których podane są wartości krytyczne $R(\alpha/2)$ w funkcji liczby pomiarów n . Jeżeli zachodzi relacja: $|R| > |R(\alpha/2, n)|$ to hipotezę zerową H_0 należy odrzucić – korelacja jest istotna.

W analizie korelacji przeprowadzonej dla uzyskanych wyników badań posługiwano się zarówno liniowymi, jak i nieliniowymi (przeważnie eksponencjalnymi) modelami regresji. O wyborze modelu decydowała większa wartość uzyskanego współczynnika korelacji. Badając istotność korelacji wykorzystano tablice, przyjmując poziom istotności $\alpha = 0,05$, dostateczny dla zastosowań technicznych. Obliczenia wykonywano, korzystając z pomocy programu Grapher, który jednocześnie umożliwiał przygotowanie graficzne wykresów.

7.1. UWAGI DOTYCZĄCE BUDOWY TORU POMIAROWEGO I REALIZACJI POMIARÓW

Budowa toru pomiarowego związana była z pokonaniem wielu problemów natury technicznej. W dużej mierze wiązało się to ze znalezieniem i skompletowaniem odpowiednich elementów (światłowody, fotodetektor). Niezwykle trudne było także opracowanie wzmacniacza o odpowiednim zakresie i dostrojenie go do pozostałych elementów toru. Sporo kłopotów nastręczyła także eliminacja szumów i zakłóceń wpływających na pracę wzmacniacza.

Wykonane czujniki optyczne wykazały dostateczną trwałość. Badania (łącznie ponad 100 h pracy silnika) zrealizowano praktycznie stosując wymiennie dwa czujniki. W trakcie badań wstępnych doszło do uszkodzenia czujnika, jednak stwierdzono, że przyczyną uszkodzenia była wada konstrukcyjna. Elektroda środkowa świecy z wklejonym prętem kwarcowym przegrzewała się i ulegała wypaleniu. Po zwiększeniu zewnętrznej średnicy elektrody, świece nie wykazywały nadmiernych skłonności do przegrzewania.

Przeprowadzone w laboratorium testy pozwoliły na stwierdzenie, że apertura końcówki czujnika wynosi ok. 30° . Ze względu na brak odpowiedniej aparatury pomiarowej nie określono wpływu osadzających się na końcówce zanieczyszczeń na tłumienie sygnału. W trakcie badań dokonywano czyszczenia czujnika co 2-3 godz., jednak nie stwierdzano znacznego zabrudzenia, co pozwala przypuszczać, że końcówka czujnika posiadała właściwości samooczyszczające.

W trakcie badań wstępnych okazało się, że oryginalna końcówka światłowodu połączona z czujnikiem spalania nie była przystosowana do pracy w temperaturach przekraczających 100°C . Nastąpił wyciek kleju i zasłonięcie zwierciadła światłowodu. Wykonano nowe połączenia z zastosowaniem kleju odpornego na działanie podwyższonych temperatur.

Dokonano także wymiany światłowodów transmisyjnych, gdyż pierwotnie zastosowane światłowody telekomunikacyjne posiadały charakterystykę widmową nieodpowiednią do transmisji sygnału w zakresie światła widzialnego.

Przygotowując się do badań, przetestowano kilka typów wzmacniaczy sygnału. Między innymi testowano układy o wzmacnieniu logarytmicznym. Jednakże rejestrowany sygnał optyczny był na tyle silny, że zdecydowano się zastosować układ o prostszej konstrukcji, opisany w rozdz. 5.6.

Metoda badawcza zaprezentowana w pracy opiera się na pomiarze całego widma promieniowania możliwego do zarejestrowania przez zastosowany fotodetektor. Powodowało to, że

wraz z sygnałem optycznym w zakresie widzialnym widma rejestrowany był sygnał w zakresie podczerwieni. Zjawisko to, sygnalizowane w literaturze, uniemożliwiło precyzyjną ocenę całkowitej długości spalania.

7.2. SYGNAŁ EMISJI OPTYCZNEJ JAKO ŹRÓDŁO INFORMACJI DIAGNOSTYCZNEJ

Tłokowy silnik spalinowy jest złożonym obiektem technicznym i ulega w trakcie eksploatacji zmianom wynikającym z fizycznego starzenia się poszczególnych podzespołów i części. Objawia się to poprzez niszczące działanie warunków eksploatacji na jego poszczególne elementy (zużycie), następują równocześnie zmiany własności wytrzymałościowych i wymiarów geometrycznych elementów. Ponadto, istnieje ciągłe zagrożenie awarią, czyli przekroczeniem wartości dopuszczalnych wielkości eksploatacyjnych, spowodowane gwałtownymi i trudnymi do przewidzenia oddziaływaniami otoczenia. Zarówno procesy starzenia, jak i występowanie awarii bezpośrednio wpływają na obniżenie niezawodności oraz osiągnięć silnika. Aby temu przeciwdziałać, konieczne jest badanie stanu technicznego, czyli diagnostyka silnika. Do zasadniczych zadań diagnostyki należy zaliczyć [22]:

- opracowanie metod i aparatury do mierzenia wartości parametrów diagnostycznych,
- ocenę stanu technicznego na podstawie pomiarów w oparciu o analizę aktualnych wartości sygnałów diagnostycznych i porównanie z wartościami wzorcowymi.

Opierając się na pracy [12] można przyjąć, że celem badań diagnostycznych jest określenie stanu obiektu lub procesu w danej chwili. Pozwala to na porównanie chwilowego stanu rzeczywistego ze stanem wzorcowym i podjęcie decyzji o zdatności lub niezdatności obiektu technicznego lub przebiegającego procesu. Realizacja badań diagnostycznych wymaga dokonania pomiaru wartości wybranych wielkości fizycznych, opisujących obiekt lub proces.

Aby móc przyjąć zmierzoną wielkość fizyczną jako źródło informacji diagnostycznej, musi ona opisywać przemianę zachodzącą w systemie lub właściwości systemu po przemianie, przede wszystkim w sposób powtarzalny i jednoznaczny. Jednocześnie pomiar rejestrujący chwilowy zakres przemiany, powinien być reprezentatywny. Wybór miejsca i sposobu pomiaru wielkości fizycznej decyduje więc o jej skuteczności informacyjnej.

Sygnałem diagnostycznym – zależnym od stanu obiektu – może być przebieg wielkości fizycznej, umożliwiający przenoszenie w przestrzeni i czasie informacji o stanie obserwowanego obiektu. Tylko niektóre cechy sygnału niosą informacje diagnostyczne. Są to tzw. czynne cechy sygnału – objawy (symptomy) stanu technicznego obiektu. Symptomy stanu nie są tożsame ze stanem fizycznym, gdyż symptomy nie są wyłącznie uwarunkowane przez stan obiektu. Opis sygnału diagnostycznego dokonywany jest za pomocą zbioru jego cech – liczb lub funkcji, otrzymanych w wyniku jego analizy.

Sygnały diagnostyczne można podzielić na zdeterminowane (jednoznacznie opisywalne za pomocą zależności matematycznych) i losowe (opisywane procesami stochastycznymi) [12]. Sygnały diagnostyczne, w zależności od ilości niezależnych parametrów, które można określić na podstawie ich przebiegu, rejestrowanego przez pojedynczy czujnik, mogą być jedno lub wielowymiarowe [11]. Sygnały wielowymiarowe charakteryzują się dużą pojemnością informacyjną (np. drgania akustyczne i mechaniczne).

O ile w klasie sygnałów zdeterminowanych wyróżnić można sygnały harmoniczne (opisywalne funkcją harmoniczną w dziedzinie czasu), poliharmoniczne (opisywalne za pomocą kombinacji składowych harmonicznymi) oraz zdeterminowane sygnały nieustalone (opisywalne przez ciągłe funkcje gęstości widmowej), to sygnały losowe określone są przez zbiór realizacji (np. pojedynczych wyników realizacji eksperymentu). Wartości cech sygnału losowego powinny być wyznaczone na podstawie analizy wszystkich jego realizacji, co w praktyce jest niewykonywalne. Z tego powodu wprowadza się pojęcie estymatora – oceny wartości cechy zmiennej losowej, dokonanej na podstawie analizy próby o ograniczonej liczności. Estymator taki powinien być w szczególności nie obciążony (wartość oczekiwana równa wartości ocenianej cechy) i zgodny (wraz ze wzrostem liczebności próby wartość estymatora dąży do wartości ocenianej cechy).

Sygnały losowe można podzielić na sygnały stacjonarne (ich uśrednione cechy nie są zmienne w czasie – nie zależą od wyboru realizacji sygnału obserwowanego) i niestacjonarne (cechy sygnału są funkcjami czasu, ich wartości w poszczególnych chwilach określają wartości oczekiwane).

Istotną cechą sygnałów diagnostycznych powinna być ich ergodyczność – cechy probabilistyczne sygnału mogą być wyznaczone przez uśrednianie w wyniku analizy jednej podrealizacji sygnału obserwowanego w dostatecznie długim czasie. Zagadnienie polega na wyznaczeniu analitycznych związków między charakterystykami procesu losowego, wyznaczonymi na podstawie jednej jego realizacji a rzeczywistymi charakterystykami tego procesu [11].

Diagnostując silnik można śledzić wpływ procesów starzenia oraz skutków awarii na jego działanie. Ocena stanu technicznego może być przeprowadzona na silniku jako całości, możliwe jest również diagnozowanie poszczególnych podzespołów i systemów funkcjonalnych silnika oraz przebiegających procesów. Jako parametry diagnostyczne wykorzystuje się średnie wartości parametrów charakteryzujących proces przetwarzania energii, np. moc efektywną N_e , moment obrotowy M_o , jednostkowe zużycie paliwa g_e , średnie ciśnienie indykowane p_i . Określają one eksploatacyjną przydatność silnika, nie niosą jednak zbyt wiele informacji o ewentualnych niesprawnościach podzespołów. Podobną wartość informacyjną mają inne mierzalne efekty pracy silnika, np. poziom toksycznych składników spalin.

Znacznie więcej informacji o stanie technicznym silnika dostarczają parametry wyznaczone w dziedzinie czasu (w funkcji kąta obrotu wału korbowego). Do najważniejszych parametrów diagnostycznych zaliczyć można ciśnienie indykowane, widmo akustyczne, poziom drgań, czy chwilową wartość współczynnika nadmiaru powietrza. Niedogodnością w przypadku pomiaru

tych wielkości jest konieczność stosowania skomplikowanej aparatury badawczej, co często ogranicza zastosowanie tych pomiarów jedynie do badań laboratoryjnych.

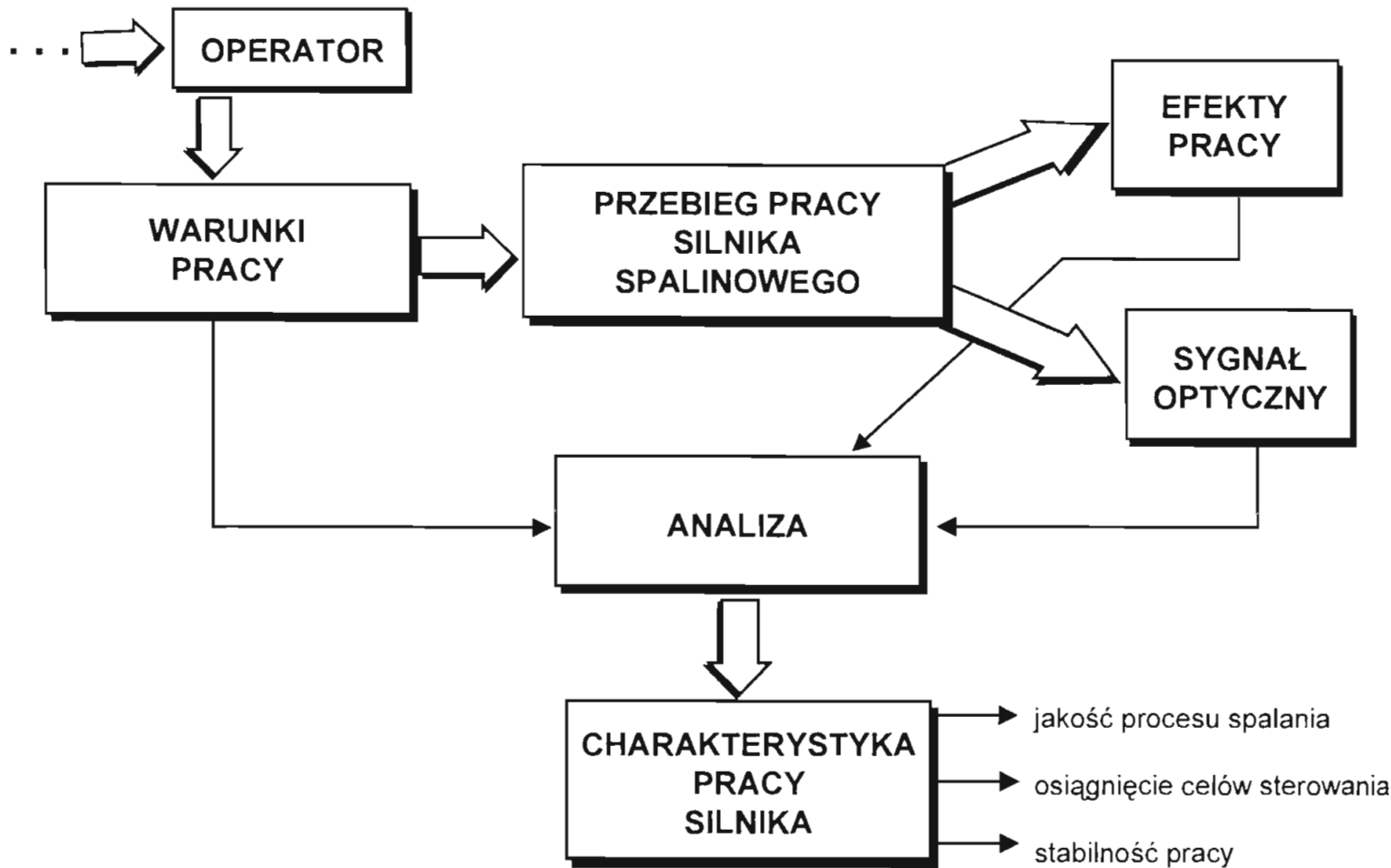
Prezentowany w niniejszej pracy pomiar promieniowania widzialnego, emitowanego w trakcie spalania paliwa, jest bezpośrednią metodą pozwalającą na scharakteryzowanie procesu roboczego, a stąd pracy silnika. Przystępując do analizy sygnału optycznego uzyskanego z komory spalania należy ustalić, czy sygnał ten może zostać uznany za sygnał diagnostyczny. W tym celu prześledzono wymagania stawiane sygnałom diagnostycznym i porównano je z cechami sygnału emisji świetlnej.

Biorąc pod uwagę wyżej przytoczone kryteria stwierdzono, że sygnał emisji optycznej z komory spalania spełnia warunki stawiane sygnałom diagnostycznym. Mierzona emisja jest wielowymiarowym sygnałem diagnostycznym o charakterze losowym, każda z realizacji (każdy z pomiarów) może być opisana za pomocą funkcji losowej. Analizując sygnał emisji świetlnej można wyznaczyć cechy charakterystyczne dla sygnałów ergodycznych:

- wartość średnią, wariancję i wartość średniokwadratową,
- funkcję autokorelacji,
- gęstość widmową i widmo mocy.

7.3. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Schemat postępowania pozwalający na scharakteryzowanie pracy silnika w oparciu o analizę sygnału optycznego oraz inne zmierzone efekty działania silnika ilustruje rysunek 7.1.



Rysunek 7.1. Schemat postępowania prowadzącego do uzyskania charakterystyki pracy silnika

Ogółem uzyskano wyniki pomiarów dla ok. 320 punktów (określenie punktów pomiarowych zawarto w rozdziale 5.7), przy czym dla każdego z nich rejestrowano 100 kolejnych cykli z rozdzielczością 1 °owk dla 5 wielkości szybkozmiennych (napięcie uzwojenia wtryskiwacza, znacznik położenia wału korbowego, ciśnienia indykowane, natężenia sygnału optycznego, moment obrotowego) – dało to ponad 110 mln punktów. W pracy zamieszczono wybrane wyniki badań dobrane tak, aby zaprezentować pełny zakres prędkości obrotowych i obciążeń silnika przy zmiennych wartościach wielkości sterujących: współczynnika nadmiaru powietrza i kąta wyprzedzenia zapłonu.

Wielkości charakteryzujące zarejestrowany sygnał optyczny wykorzystywane w dalszej części pracy ilustruje rys. 7.2. Na końcu pracy zamieszczono załącznik – dyskietkę, na której zestawiono ich wartości średnie uzyskane dla wszystkich zrealizowanych punktów według poniższego schematu:

KOD	OPTmax	fiOPT _{max}	dOPT /dfi _{max}	fidOPT /dfi _{max}	PoleOPT
-----	--------	----------------------	--------------------------	----------------------------	---------

Charakterystyki czasowe (w funkcji kąta obrotu wału korbowego) przebiegów sygnału optycznego zestawiono z odpowiadającymi im przebiegami ciśnienia w komorze spalania. Pomiar ciśnienia w cylindrze jest bowiem uznanym sposobem diagnozowania procesu roboczego, stosowanym w badaniach silników od dawna, pozwalającym na określenie wielu istotnych parametrów diagnostycznych, między innymi:

- ciśnienia maksymalnego p_{max} ,
- maksymalnego przyrostu ciśnienia $(dp/d\varphi)_{max}$,
- średniego ciśnienia indykowanego p_i ,
- czasu spalania,
- optymalnego kąta wyprzedzenia zapłonu,
- przebiegu procesu wydzielania ciepła,
- systematyczności zapłonów (wypadania zapłonów),
- występowania spalania stukowego.

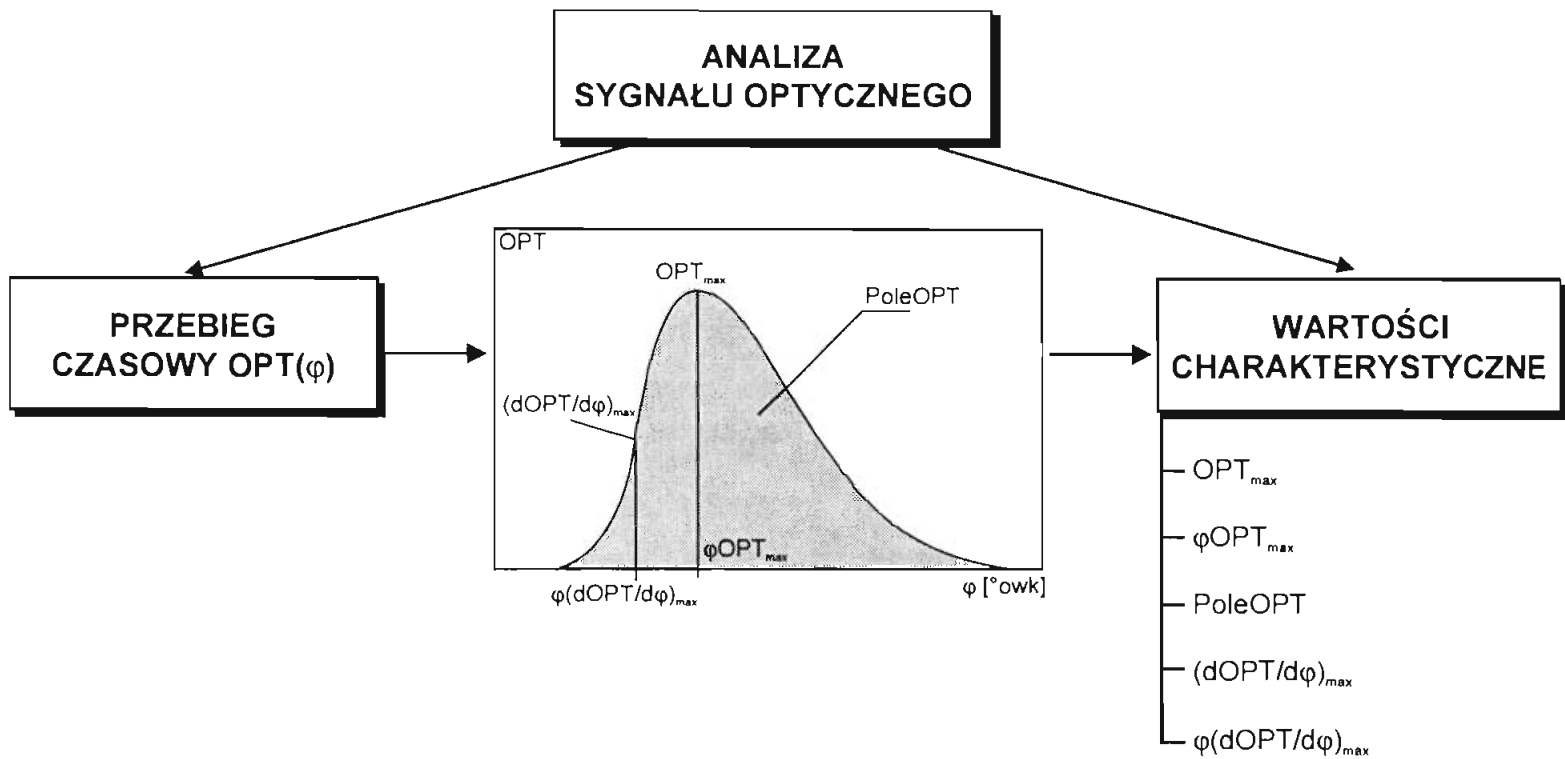
W wyniku porównania obu sygnałów i ich wybranych parametrów należy oczekiwać istotnych korelacji potwierdzających przydatność opracowanej metody do celów diagnostyki i obserwacji procesu spalania. Analiza wyników obejmowała także poszukiwanie istotnych statystycznie korelacji pomiędzy wybranymi parametrami sygnału optycznego a zarejestrowanymi wielkościami wolnozmiennymi w zakresie zmiennych obciążeń, prędkości i wartości parametrów regulacyjnych. Zakres poszukiwań ilustruje tabela 7.1, znakami „X” oznaczono te pary wielkości, dla których uzyskano w każdym ze zbadanych przypadków korelację istotną statystycznie (poziom istotności $\alpha = 0,05$).

- Prezentowane wyniki badań zostały pogrupowane w następujący sposób:
- I. Przebiegi czasowe: wykresy kątowe przebiegów sygnału emisji świetlnej i ciśnienia w komorze spalania.
 - II. Charakterystyki wartości średnich parametrów opisujących sygnał optyczny i sygnał ciśnienia.

- III. Zbiorcze charakterystyki regulacyjne (zależność od składu mieszanki i kąta wyprzedzenia zapłonu) i eksploatacyjne (charakterystyki prędkościowe i obciążeniowe).
- IV. Charakterystyki sygnału optycznego: wybrane wyniki poszukiwań korelacji między parametrami sygnału optycznego (rys. 7.2) a wybranymi wielkościami charakteryzującymi pracę silnika (tab. 7.1).
- V. Wyniki uzupełniające: zarejestrowane sygnały nie związane bezpośrednio z przebiegiem sygnału optycznego, będące parametrami diagnostycznymi.

Tabela 7.1. Zrealizowany zakres poszukiwań zależności korelacyjnych

	OPTmax	fiOPTmax	dOPTmax	fidOPTmax	PoleOPT
n	X	X			
t _{wtr}	X	X			
M ₀	X				X
p _{max}	X				
fi _p _{max}		X		X	
d _p _{max}			X		
fid _p _{max}					
Pole _p					X
α _z	X	X			X
λ	X	X			X
T _{spal}	X	X	X		X
HC	X	X	X		X
CO	X	X	X		X



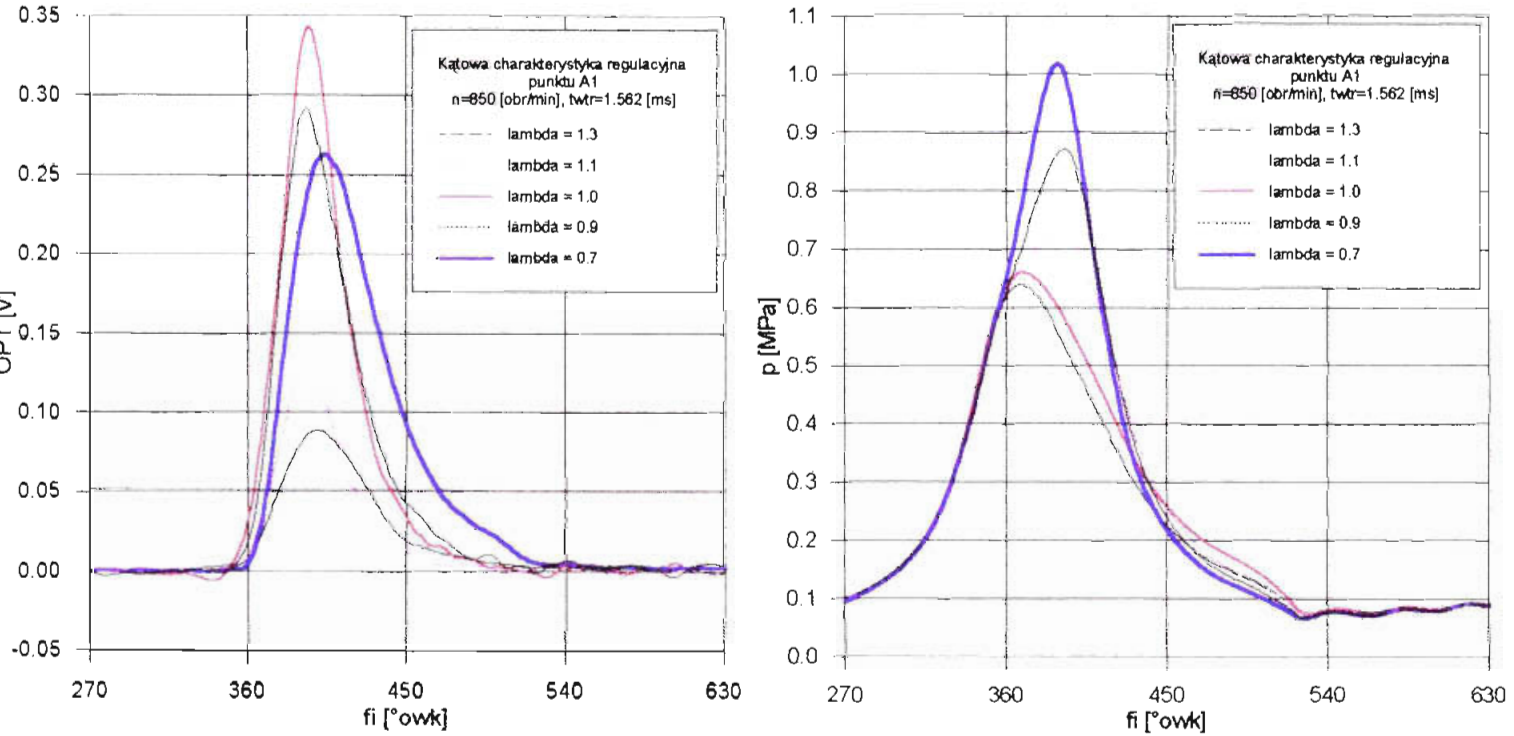
Rysunek 7.2. Analizowane parametry sygnału optycznego [38]

Prezentowane w tym rozdziale przebiegi sygnałów są wartościami średnimi, wyznaczone zostały ze 100 kolejnych cykli roboczych silnika i jako takie są estymatorami statystycznymi (nieobciążonymi i zgodnymi) badanych przebiegów.

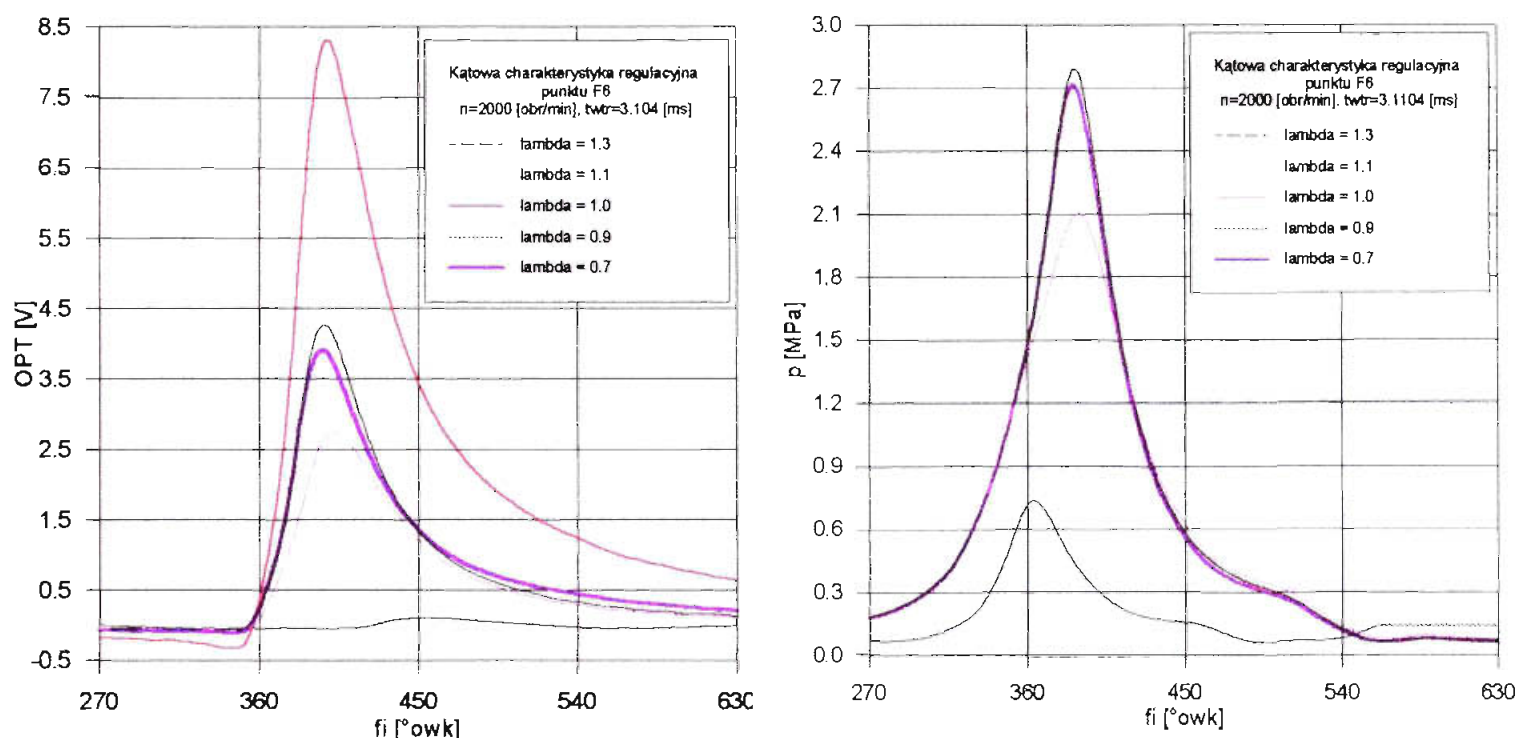
Rysunki 7.3÷7.6 przedstawiają przykładowe kątowe charakterystyki przebiegów sygnału emisji świetlnej z komory spalania i zarejestrowane równocześnie przebiegi ciśnienia. Wybrano dwa punkty: A1 i F6.

Na rysunkach 7.3 i 7.4 zilustrowano wpływ współczynnika składu mieszanki na przebiegi sygnałów. Widoczne jest podobieństwo kształtu krzywych opisujących przebiegi sygnału ciśnienia i sygnału optycznego. Sygnał optyczny wykazuje większą wrażliwość na zmianę warunków pracy niż sygnał ciśnienia. Stosunek wartości maksymalnych sygnałów uzyskanych dla punktu F6 i A1 wynosi dla sygnału optycznego ponad 24,2; dla sygnału ciśnienia 2,9. W przypadku rys. 7.5 i 7.6 sporządzonych dla zmiennych kątów wyprzedzenia zapłonu wartości te wynoszą odpowiednio 35,8 i 3,9.

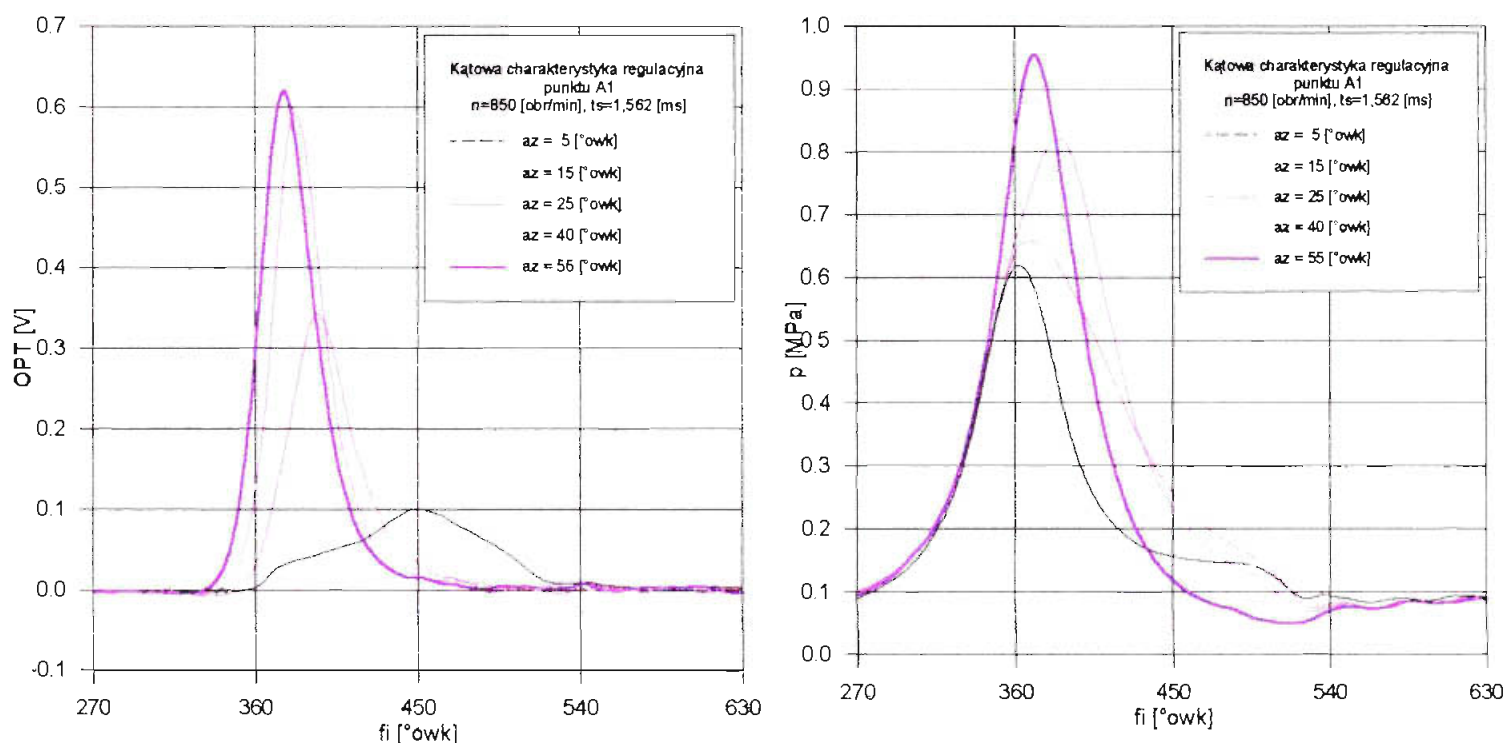
Podobnie widoczny jest większy wpływ parametrów regulacyjnych. Przykładowo, stosunek wartości maksymalnej do minimalnej sygnału optycznego (rys. 7.6) (zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu) wynosi 17,5, natomiast w przypadku sygnału ciśnienia wielkość ta wynosi 2,81.



Rysunek 7.3. Porównanie przebiegu sygnału optycznego i sygnału ciśnienia; punkt A1, zmienny współczynnik składu mieszanki λ

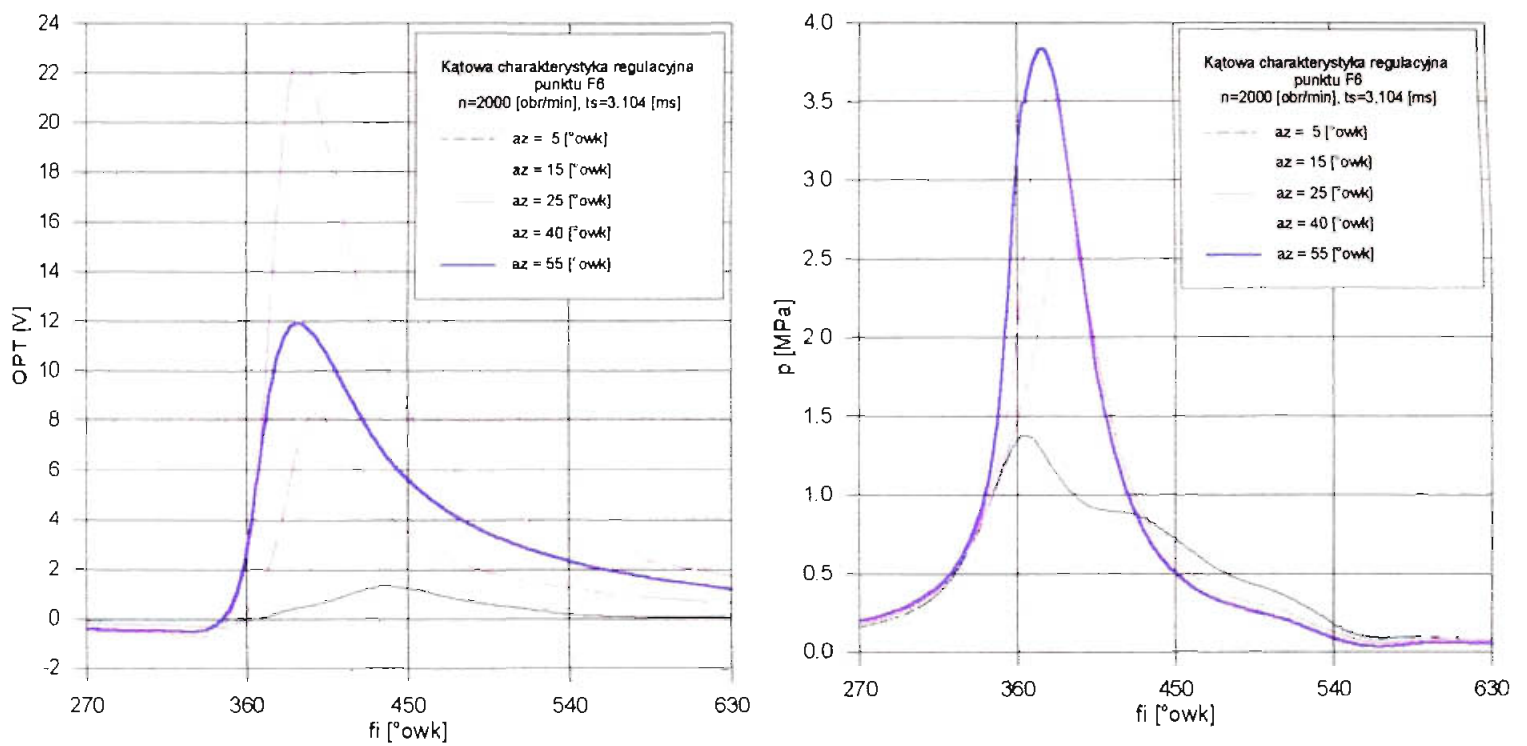


Rysunek 7.4. Porównanie przebiegu sygnału optycznego i sygnału ciśnienia; punkt F6, zmienny współczynnik składu mieszanki λ



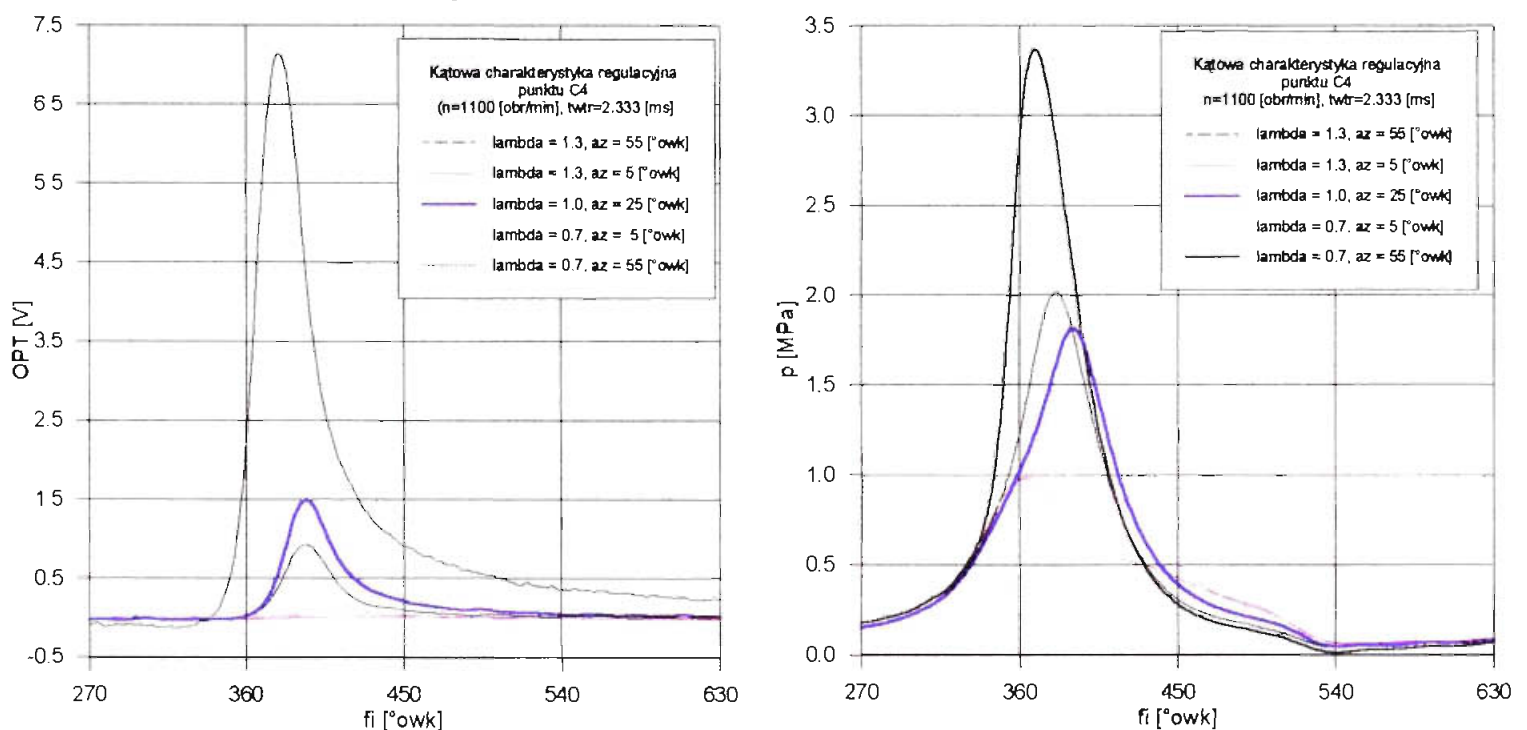
Rysunek 7.5. Porównanie przebiegu sygnału optycznego i sygnału ciśnienia; punkt A1, zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu α_z

Przebiegi obu sygnałów zarejestrowane dla krańcowych wartości parametrów regulacyjnych (punkty C4 i G6, współczynniki składu mieszanki $\lambda = 0,7$ i $1,3$; kąty wyprzedzenia zapłonu $\alpha_z = 5$ i 55 °owk) przedstawiają rysunki 7.7 i 7.8. Takie wymuszenie warunków pracy silnika umożliwia obserwację zjawiska wypadania zapłonów. Widoczne na rysunkach wykresy potwierdzają obserwacje dotyczące zmian przebiegu sygnałów wskutek zmian parametrów regulacyjnych. Widoczny na rys. 7.7 sygnał optyczny (punkt C4) zwiększa się 7-krotnie w stosunku do sygnału minimalnego, a odpowiadający mu sygnał ciśnienia – 3,4 razy. Dla punktu G6 (rys. 7.8) różnice są jeszcze większe: 6,3 – optyka, 1,7 – ciśnienie.

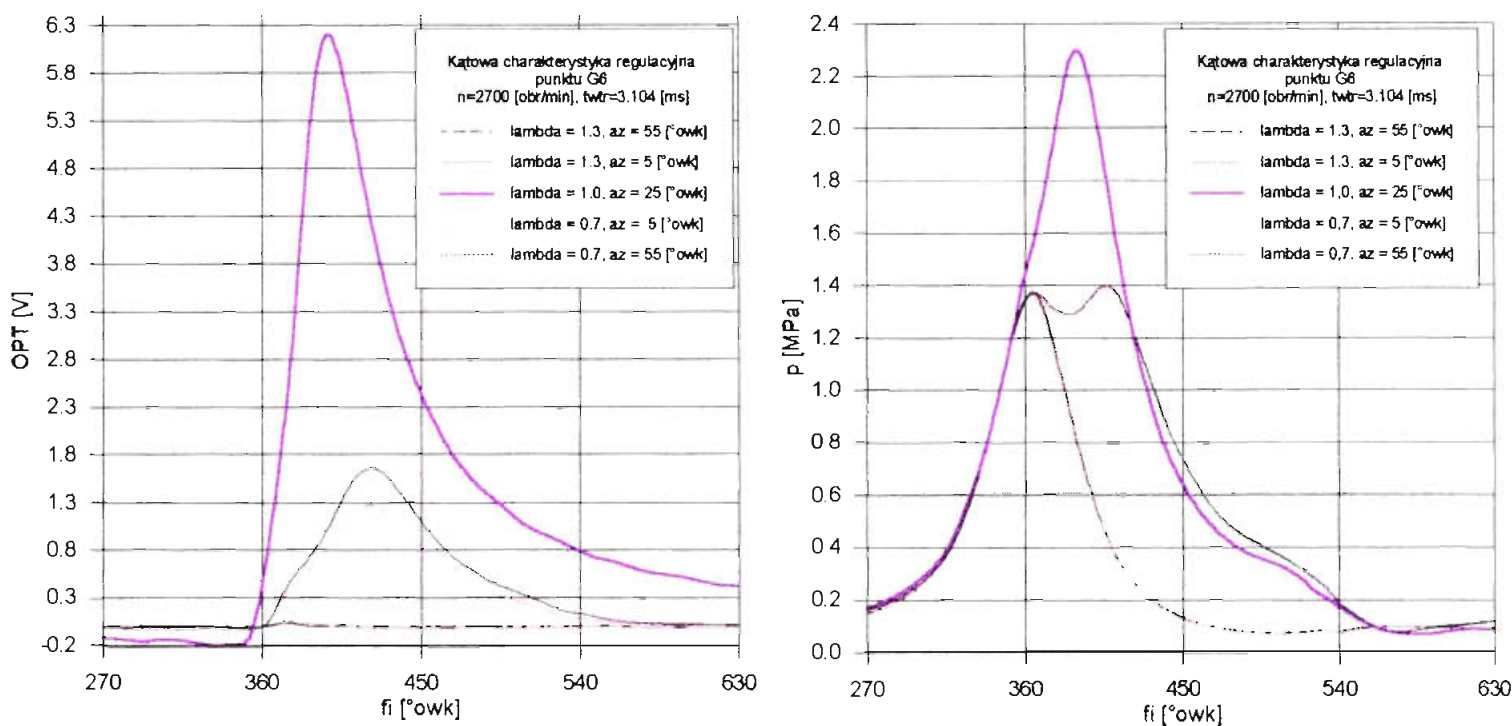


Rysunek 7.6. Porównanie przebiegu sygnału optycznego i sygnału ciśnienia; punkt F6, zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu α_z .

Na rysunkach 7.7 i 7.8 widoczne jest wypadnięcie zapłonu ($\lambda = 0,7$, $\alpha_z = 5$ °owk, $\lambda = 1,3$, $\alpha_z = 55$ °owk) jako krzywa sprężania na wykresie ciśnienia lub jako brak sygnału emisji optycznej. Z punktu widzenia metodyki przetwarzania sygnału, znacznie łatwiej jest zidentyfikować wypadnięcie zapłonu jako brak sygnału emisji optycznej. Sygnał rejestrowany jest na poziomie szumu i nie jest konieczne jego dalsze przetwarzanie. Wychwycenie wypadnięcia zapłonu w oparciu o interpretację sygnału ciśnienia wymaga porównania zarejestrowanego sygnału z wzorcowym sygnałem ciśnienia sprężania, co wiąże się z zaimplementowaniem dość złożonych algorytmów obliczeniowych w pamięci układu diagnostycznego i wykonaniem wcześniejszych pomiarów kalibrujących.



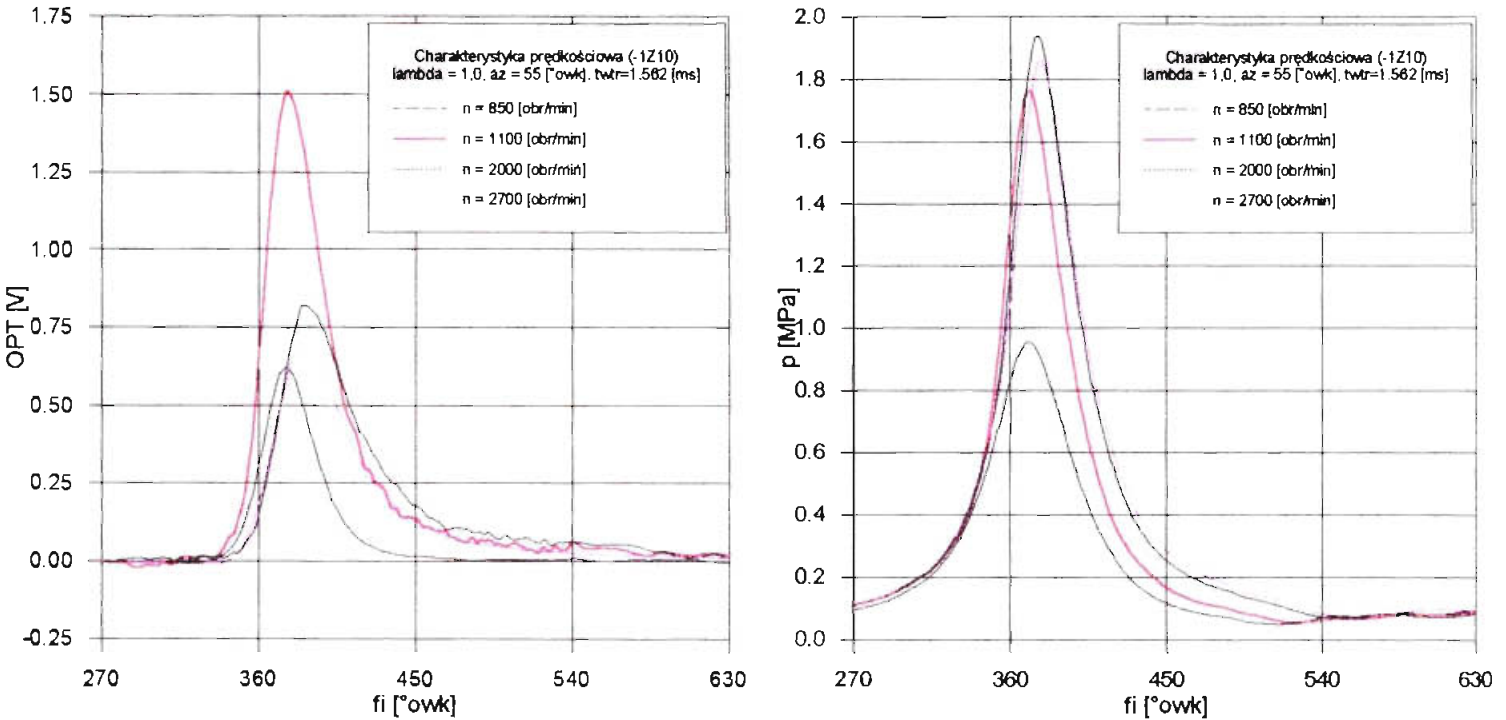
Rysunek 7.7. Przebiegi sygnału optycznego i sygnału ciśnienia; punkt C4, krańcowe wartości parametrów regulacyjnych λ i α_z



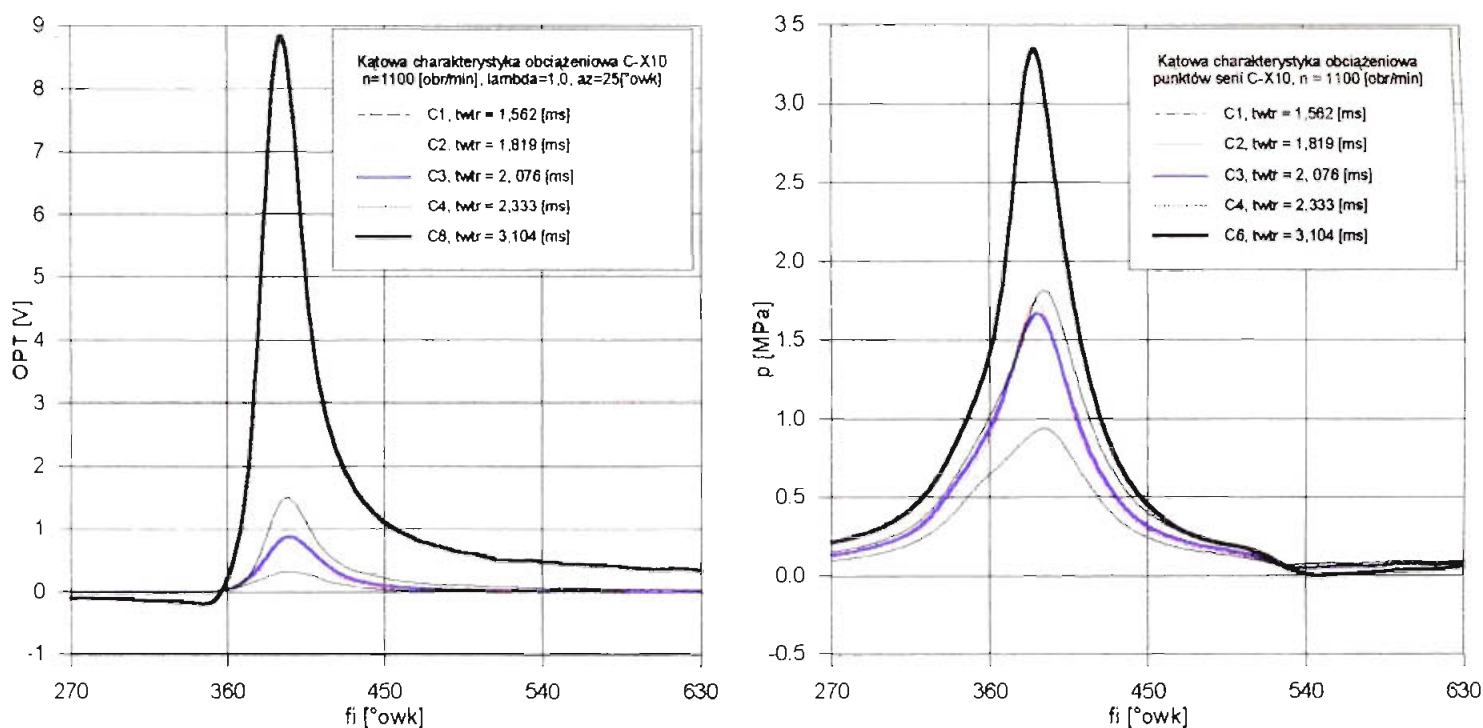
Rysunek 7.8. Przebiegi sygnału optycznego i sygnału ciśnienia; punkt G6, krańcowe wartości parametrów regulacyjnych λ i α_z

Z analizy dotychczas przedstawionych rysunków wynika, że możliwe jest wykorzystanie sygnału optycznego do wykrywania wypadania zapłonów, np. w pętli sprzężenia zwrotnego w algorytmach elektronicznego sterowania silnikiem. Badania innych autorów, zaprezentowane we wcześniejszej części pracy potwierdzają, że detekcja wypadania zapłonów jest jednym z częściej stosowanych zastosowań optoelektronicznych czujników spalania.

Wpływ prędkości obrotowej na przebiegi sygnałów ilustruje rys. 7.9 ($\lambda = 1,0$; $\alpha_z = 55^\circ$ owk), natomiast wpływ obciążenia (zrealizowany przez zwiększenie dawki wtryskiwanego paliwa – czasu otwarcia wtryskiwacza) widoczny jest na rys. 7.10 ($\lambda = 1,0$; $\alpha_z = 25^\circ$ owk).



Rysunek 7.9. Wpływ prędkości obrotowej na sygnał optyczny i sygnał ciśnienia; punkty serii -Z10



Rysunek 7.10. Wpływ obciążenia silnika na przebiegi sygnału optycznego i ciśnienia w komorze spalania; seria C-X10

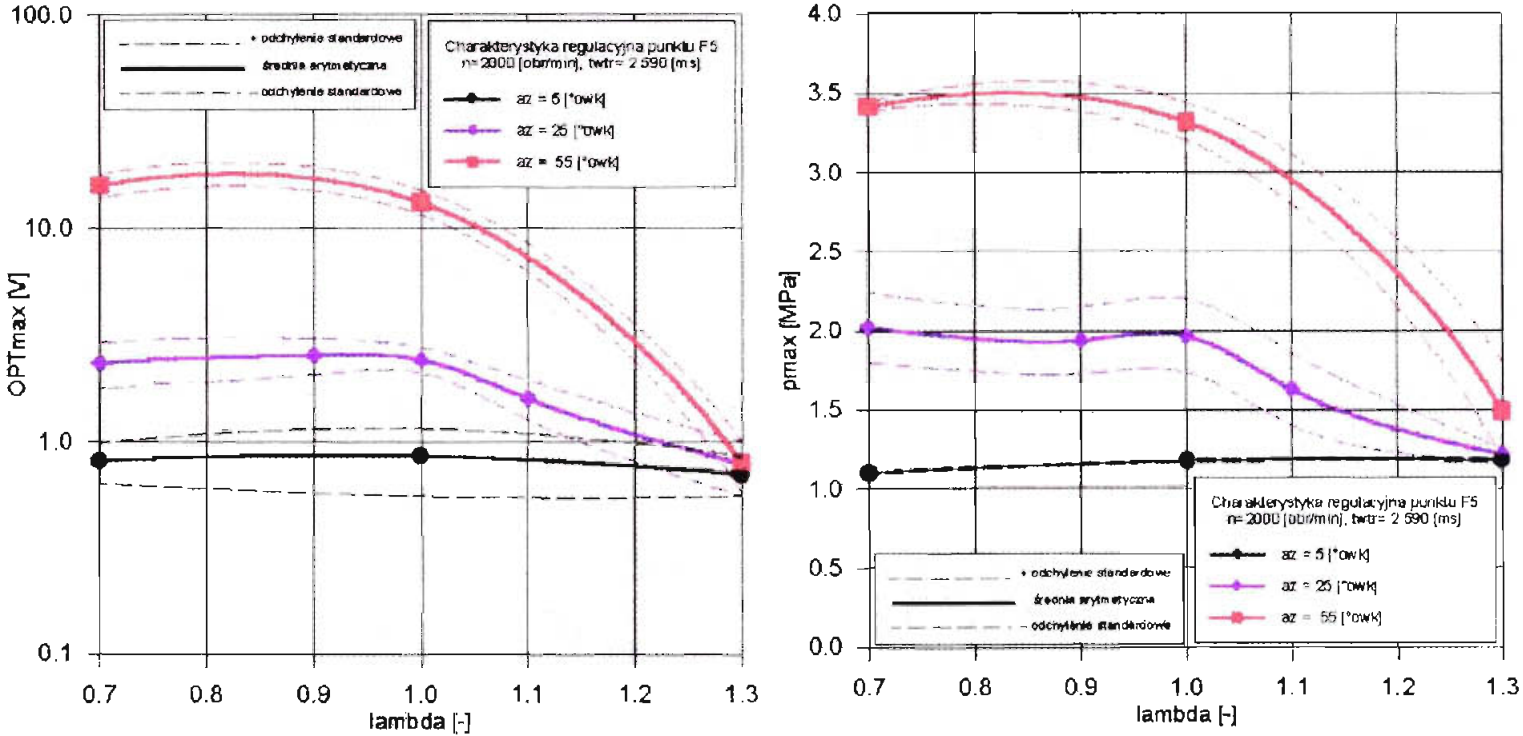
Widoczny na rys. 7.10 przebieg sygnału optycznego dla punktu C6 znacznie odbiega od pozostałych krzywych tej serii pomiarowej. Przyrostowi dawki paliwa o 25% towarzyszy prawie 6-krotny wzrost wartości sygnału optycznego, gdy w przypadku ciśnienia wielkość ta wynosi 1,9. Uzasadnieniem tego zjawiska może być silny wpływ emisji promieniowania w zakresie podczerwieni, pochodzącego z silnie nagranych ścianek komory spalania. W trakcie realizacji serii C silnik pracował pod dużym obciążeniem przez długi czas. Sygnał optyczny zarejestrowany w przypadku innych punktów o wysokich obciążeniach (np. punkt G6 na rys. 7.8) ma znacznie niższą wartość maksymalną (6,15 V dla G6, a więc prawie o 30% mniej).

7.3.2. Charakterystyki wartości średnich

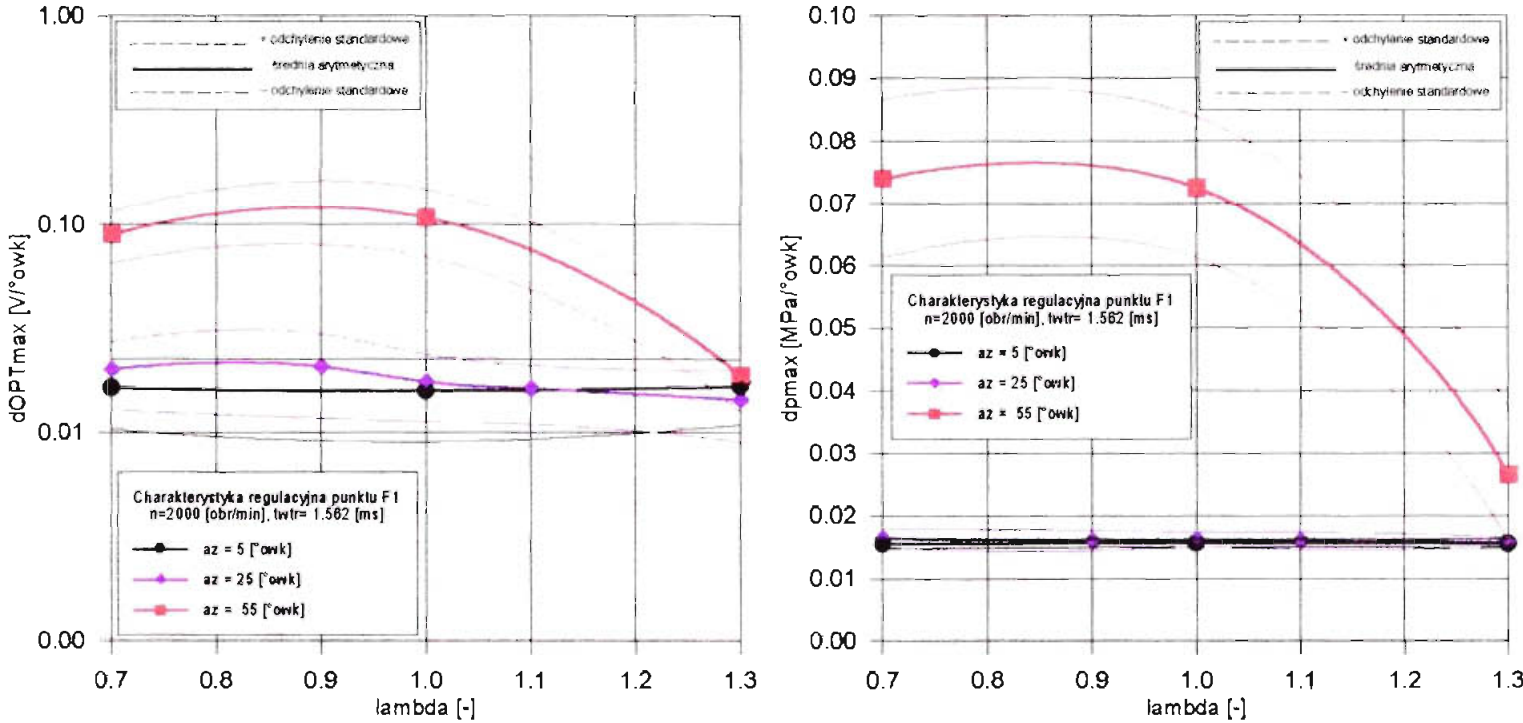
Na rysunkach 7.11 do 7.14 przedstawiono charakterystyki regulacyjne sporządzone dla średnich (średnia arytmetyczna ze 100 kolejnych cykli) wartości parametrów sygnału emisji świetlnej: OPTmax – maksymalnej wartości sygnału i dOPTmax – maksymalnego przyrostu sygnału. Porównano je z równocześnie zarejestrowanymi wielkościami z przebiegów ciśnień, odpowiednio: pmax – maksymalną wartością ciśnienia i dpmax – maksymalnym przyrostem ciśnienia. Dodatkowo na wykresach umieszczono wartości odchylenia standardowego σ wyznaczonego dla obu sygnałów.

Rysunek 7.11 ilustruje wpływ współczynnika nadmiaru powietrza λ na wartości maksymalne sygnałów OPTmax i pmax, a rysunek 7.12 na ich maksymalne przyrosty dOPTmax i dpmax. Wykresy sporządzono dla różnych kątów wyprzedzenia zapłonu. Zauważalne jest podobieństwo kształtu aproksymowanych krzywych dla sygnału ciśnienia i optyki (sygnał optyczny przedstawiono w skali logarytmicznej). Zarówno dla sygnału optycznego, jak i ciśnienia wartości maksymalne na poszczególnych krzywych odpowiadają współczynnikowi składu mieszanki o wartości w

pobliżu 0,9; natomiast kąt wyprzedzenia zapłonu $\alpha_z = 55^\circ$ owk odpowiadał najwyższym wartościom przebiegów ciśnienia i sygnału optycznego w pełnym zakresie składów mieszanki.



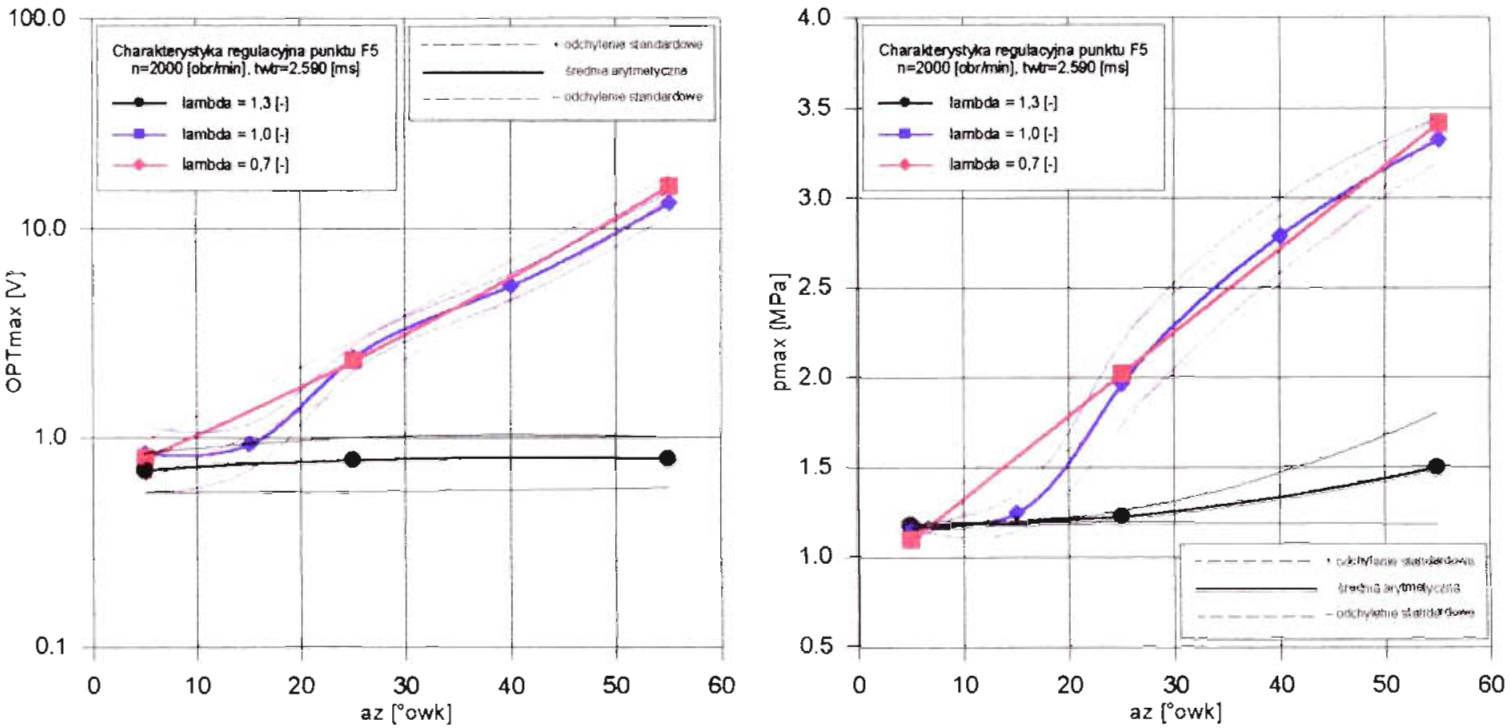
Rysunek 7.11. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na wartości maksymalne ciśnienia i sygnału optycznego; punkt F5



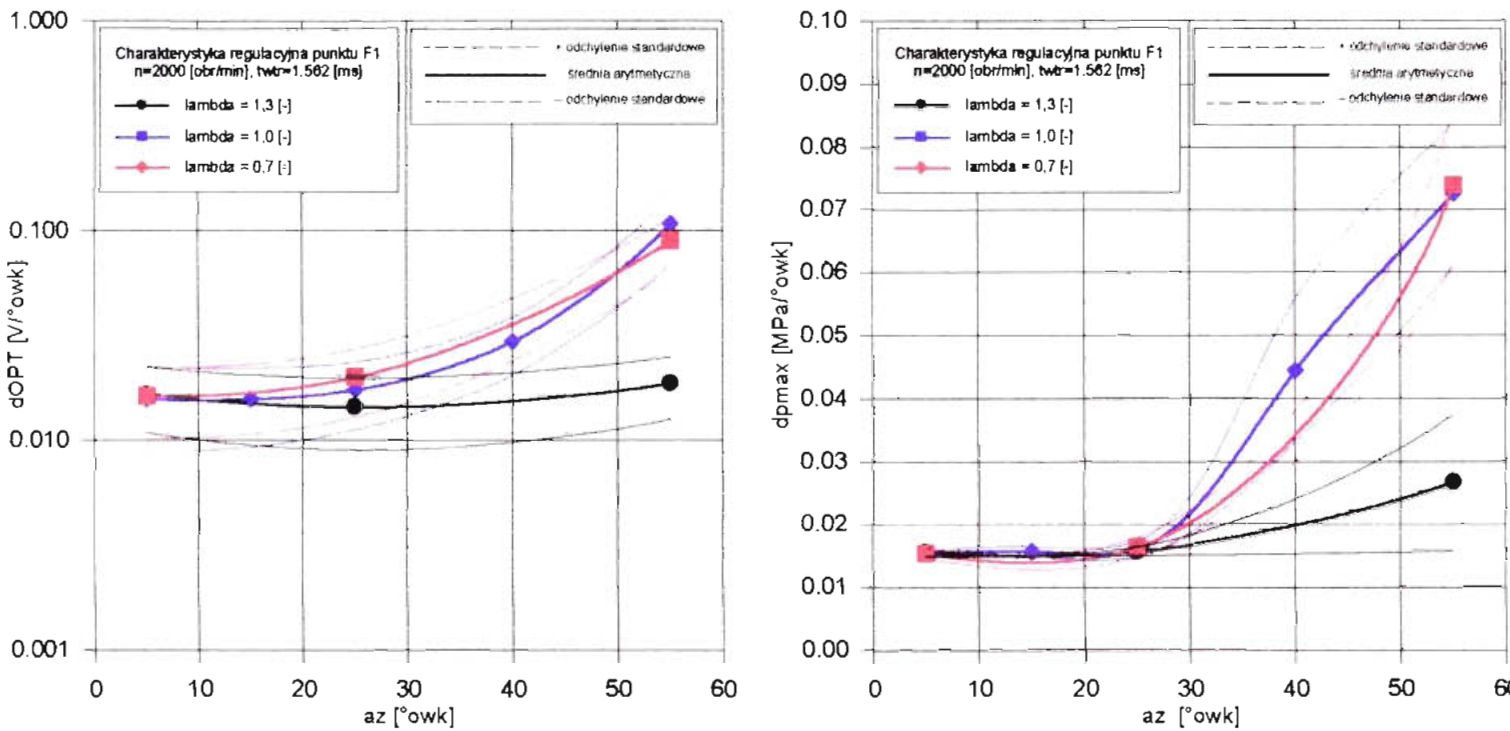
Rysunek 7.12. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na wartości maksymalnych przyrostów sygnałów; punkt F1

Na rysunkach 7.13 i 7.14 przedstawiono wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na wartości maksymalne i maksymalne przyrosty ciśnienia i sygnału optycznego, krzywe zestawiono dla kilku wartości współczynnika nadmiaru powietrza. Podobnie jak na rysunkach 7.11 i 7.12, zauważalne jest podobieństwo krzywych ciśnienia i optyki. Na przebiegach ciśnienia zaobserwować można wzrastający wraz z kątem wyprzedzenia zapłonu rozrzut wartości (wyrażające się wzrostem wartości σ). Zjawisko to jest szczególnie widoczne dla krzywych odpowiadają-

cych spalaniu mieszanki ubogiej o $\lambda = 1,3$. Może to świadczyć o rosnącej niepowtarzalności kolejnych cykli. Tendencja ta natomiast nie występuje w przypadku krzywych sygnału optycznego.

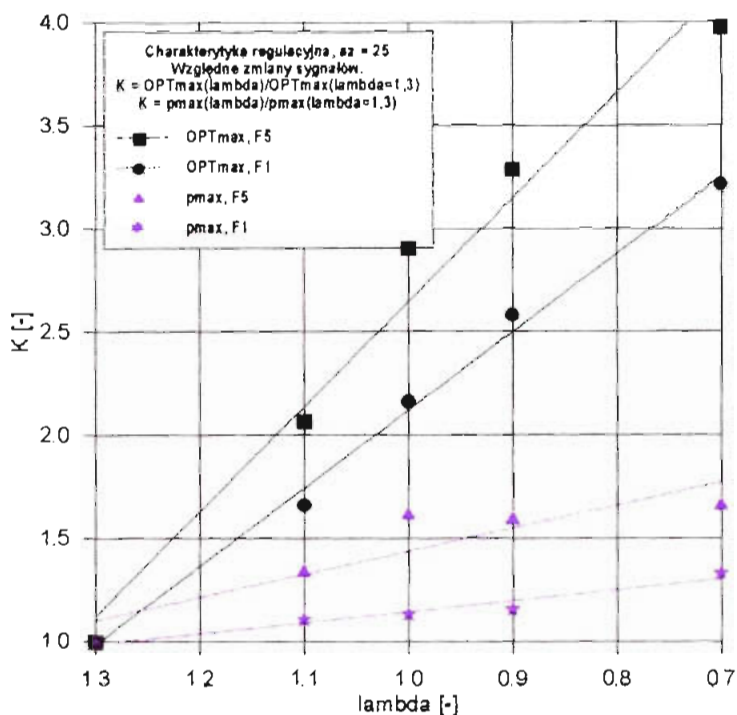


Rysunek 7.13. Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na wartości maksymalne ciśnienia i sygnału optycznego; punkt F5

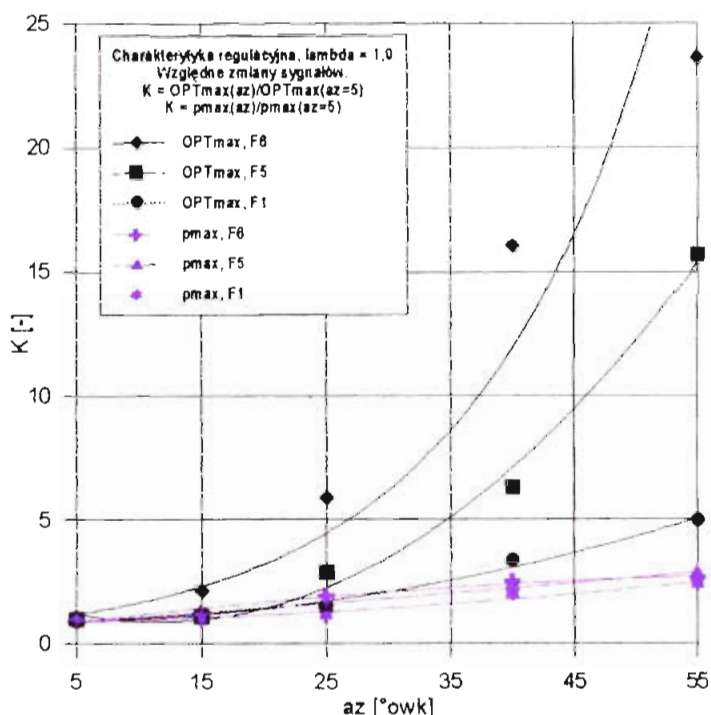


Rysunek 7.14. Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na wartości maksymalne przyrostów ciśnienia i sygnału optycznego; punkt F1

Aby ocenić wrażliwość obu sygnałów na zmianę wartości parametrów sterujących, wyznaczono względne zmiany maksymalnych wartości sygnału optycznego i ciśnienia. Ilustrują to rysunki 7.15 i 7.16, na których porównano względne zmiany sygnałów wyznaczone w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ (rys. 7.15) i kąta wyprzedzenia zapłonu α_z (rys. 7.16). Na rysunkach umieszczono wyniki obliczeń dla kilku wybranych punktów. Względne zmiany sygnałów wyznaczano według poniższego schematu:



Rysunek 7.15. Porównanie względnych zmian sygnału optycznego i sygnału ciśnienia w zależności od składu mieszanki; punkty F1, F5



Rysunek 7.16. Porównanie względnych zmian sygnału optycznego i sygnału ciśnienia w zależności od kąta wyprzedzenia zapłonu; punkty F6, F5, F1

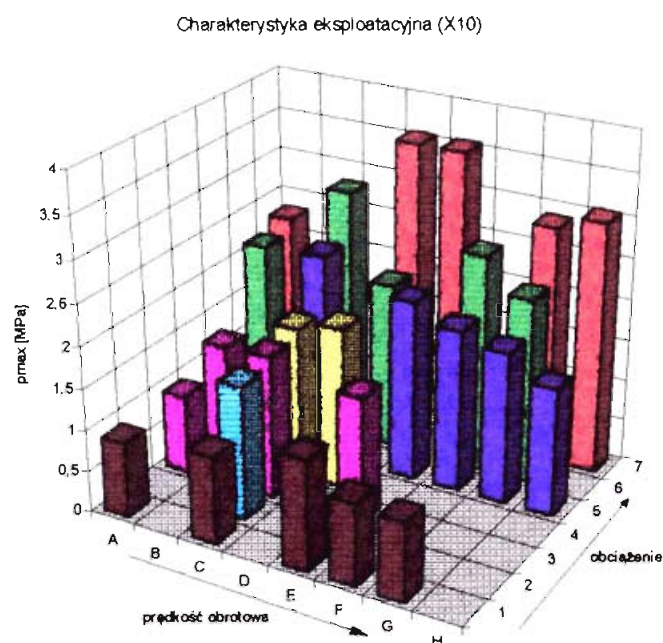
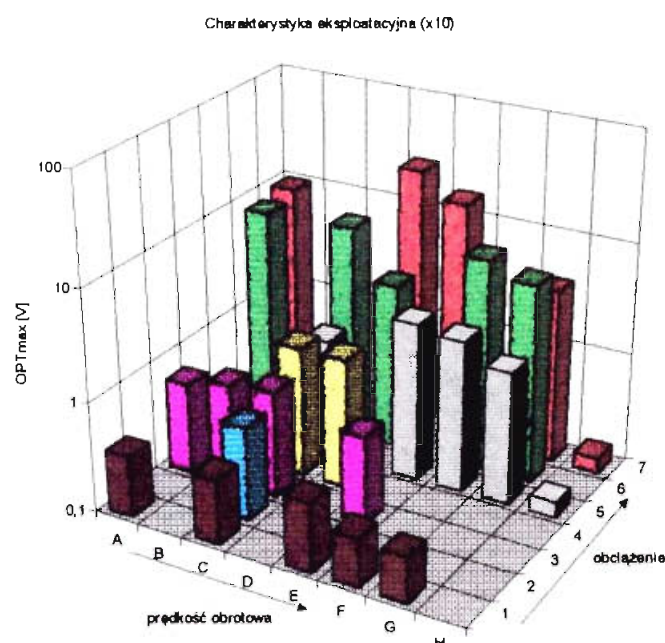
$$K = \frac{\text{OPTmax}(i)}{\text{OPTmax}(\min)} \text{ oraz } K = \frac{p \text{ max}(i)}{p \text{ max}(\min)} \quad (7.1)$$

gdzie: i – wartość współczynnika λ lub kąta zapłonu α_z
 $\min$ – najmniejsza wartość sygnału.

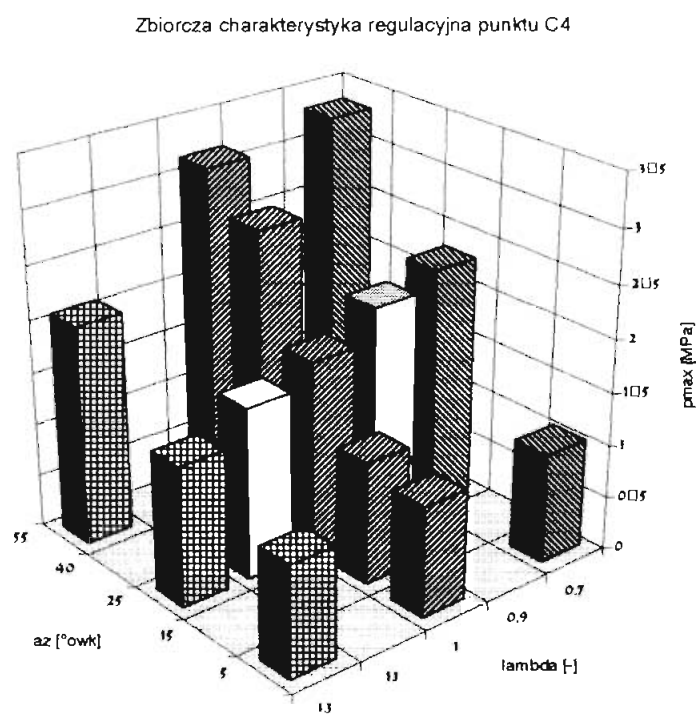
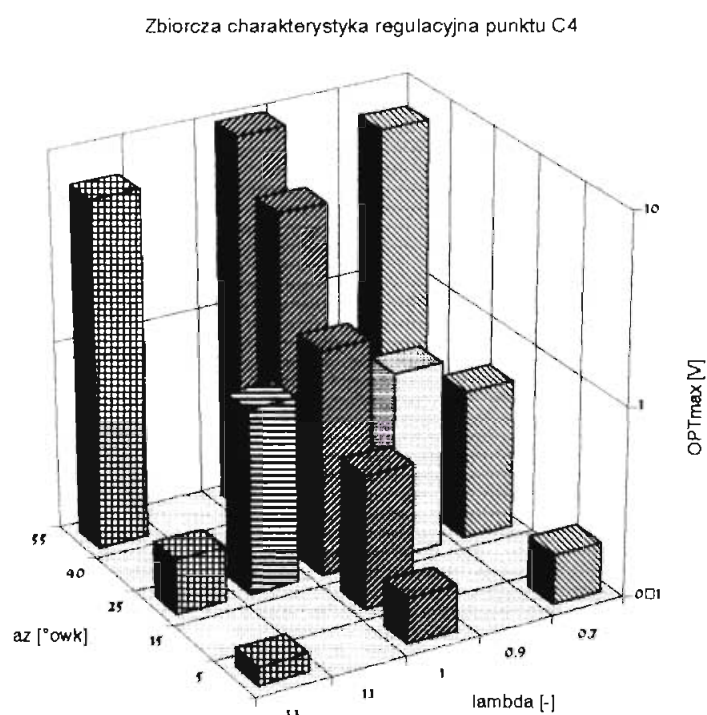
Wzbogacanie składu mieszanki powoduje nawet 4-krotny przyrost sygnału optycznego, natomiast sygnał ciśnienia wzrasta jedynie ok. 1,7 razy (rys. 7.15). Różnice przekraczają więc ponad 230% wartości względnych odpowiednich sygnałów. Zwiększanie kąta wyprzedzenia zapłonu powoduje nawet 25-krotny wzrost wartości sygnału optycznego, natomiast ciśnienia przyrasta jedynie ok. 2,7 razy (rys. 7.16). Tak więc jest to ponad 920% różnicy wartości względnych. Tak duże różnice pomiędzy sygnałem optycznym a sygnałem ciśnienia potwierdzają przydatność sygnału optycznego jako sygnału diagnostycznego, pozwalającego na obserwację przebiegu procesu spalania w silniku.

7.3.3. Charakterystyki zbiorcze

Wykresy słupkowe są przykładem zbiorczych charakterystyk regulacyjnych (rys. 7.17) i eksploatacyjnych (rys. 7.18) sporządzonych dla wartości maksymalnych sygnału optycznego i ciśnienia. Charakterystyki eksploatacyjne sporządzono dla wszystkich punktów serii X10, natomiast charakterystyki regulacyjne przedstawiono na przykładzie punktów serii C4. Oba rysunki potwierdzają wcześniej dokonane obserwacje o większym wpływie zmian obciążenia, prędkości pracy oraz wartości parametrów sterujących na przebieg sygnału optycznego w stosunku do sygnału ciśnienia.



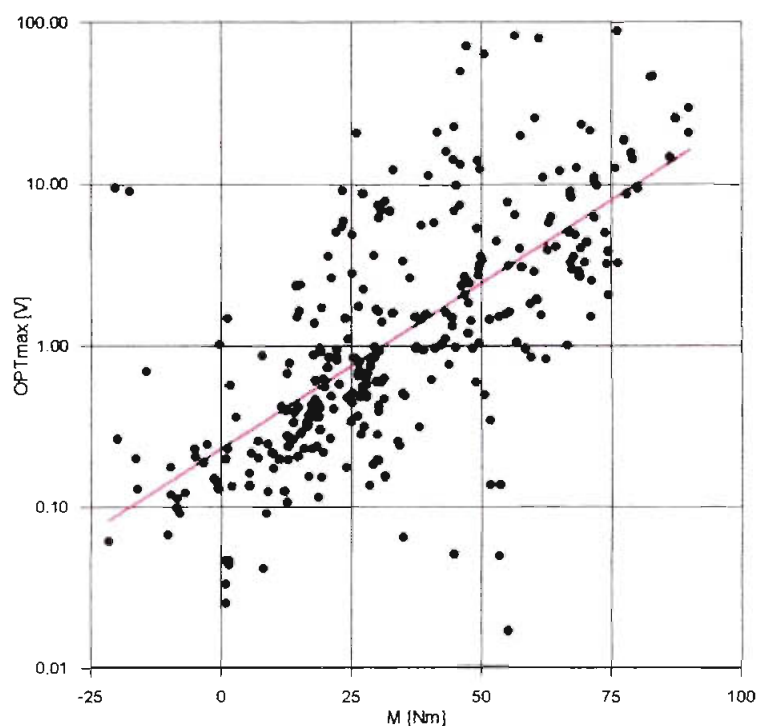
Rysunek 7.17. Zbiorcza charakterystyka eksploatacyjna ciśnienia i sygnału optycznego; seria X10



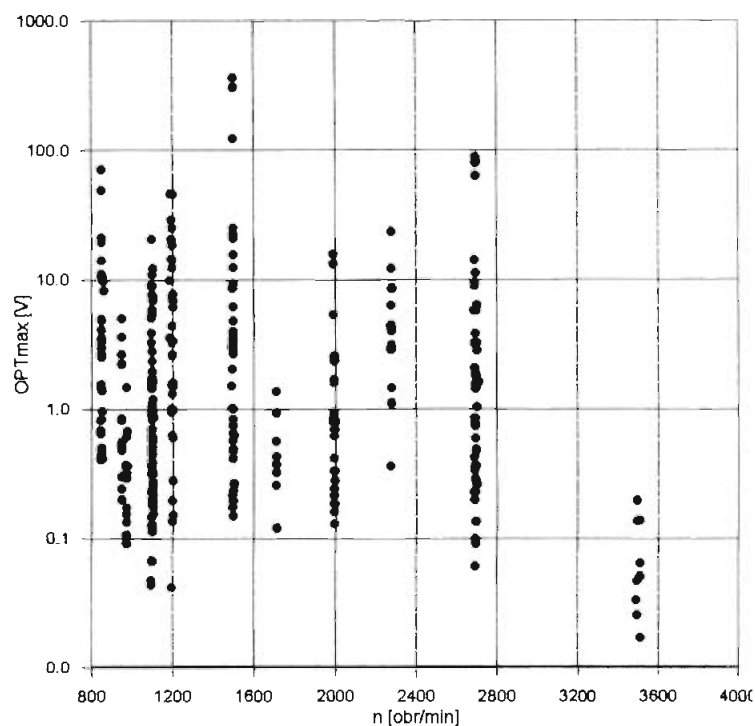
Rysunek 7.18. Zbiorcza charakterystyka regulacyjna ciśnienia i sygnału optycznego; punkt C4

7.3.4. Charakterystyka sygnału emisji świetlnej

Aby zbadać właściwości sygnału emisji świetlnej z komory spalania silnika oraz ocenić przydatność jego parametrów w badaniach procesu spalania, poszukiwano istotnych statystycznie korelacji. Zrealizowany zakres poszukiwań ilustruje tabela 7.1, poniżej zaprezentowane zostaną wybrane wyniki. Kryteria doboru wyników zostały przedstawione na wstępie rozdziału 7.2. Poszukiwanie korelacji dla wszystkich punktów jednocześnie, ze względu na różnorodność stanów pracy silnika, jest niezwykle trudne. Potwierdzają to rysunki 7.19 i 7.20, na których poszukiwano korelacji między maksymalną wartością sygnału optycznego a momentem i prędkością obrotową.



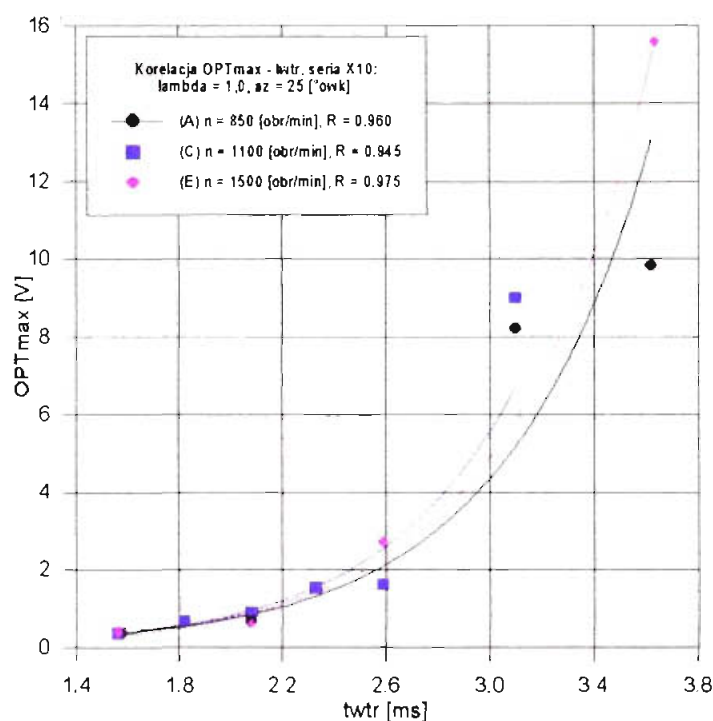
Rysunek 7.19. Korelacja maksymalnej wartości sygnału optycznego i momentu obrotowego silnika dla wszystkich punktów pomiarowych



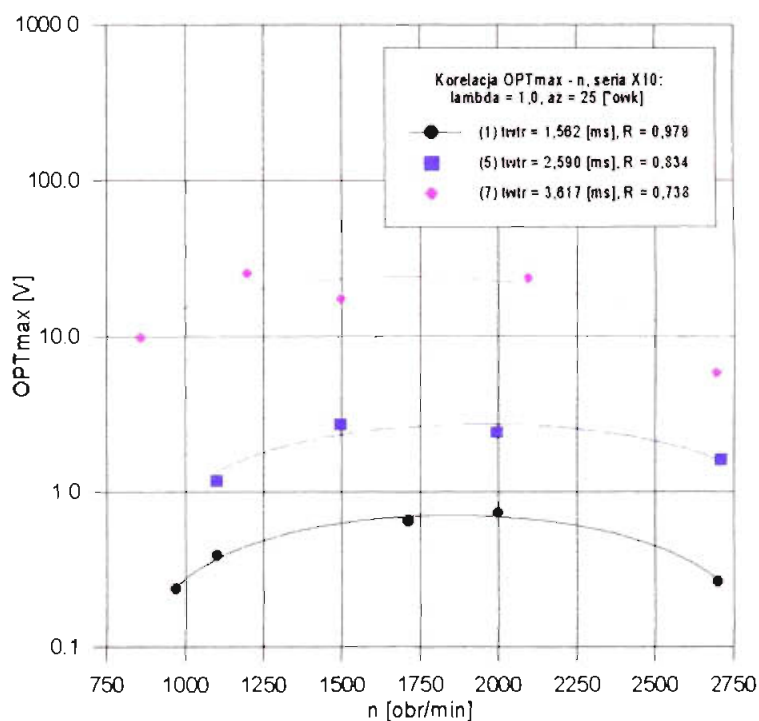
Rysunek 7.20. Korelacja maksymalnej wartości sygnału optycznego i prędkości obrotowej silnika dla wszystkich punktów pomiarowych

Należało poszukiwać korelacji dla określonych stanów pracy silnika. Aby ograniczyć ilość możliwych rozwiązań, poszukując korelacji wybranego parametru charakteryzującego sygnał optyczny, drugą zmienną dobierano kierując się istniejącymi analogiami wynikającymi z przebiegu sygnałów (ciśnienie) lub zakładano możliwość istnienia fizycznych związków przyczynowo-skutkowych wiążących obie zmienne. W każdym przypadku wykonywano test na istotność korelacji (rozdz. 7.3). W większości zbadanych przypadków korelacja była istotna statystycznie – uzyskany współczynnik korelacji R był większy od wartości granicznej dla danej ilości punktów pomiarowych i przyjętego poziomu istotności ($\alpha = 0,05$).

Zależność maksymalnej wartości sygnału optycznego od prędkości obrotowej silnika i czasu otwarcia wtryskiwacza (obrazującego obciążenie silnika) przedstawiają rysunki 7.21 i 7.22. Widoczna jest eksponencjalna zależność sygnału optycznego od czasu otwarcia wtryskiwacza, niewielkie różnice dla poszczególnych prędkości obrotowych mogą być wynikiem niedoskonałości toru pomiarowego. Natomiast krzywa charakterystyki prędkościowej maksimum sygnału optycznego jest swym kształtem zbliżona do przebiegu krzywej momentu obrotowego silnika. Zmniejszenie obciążenia powodowało jedynie przesunięcie krzywej w kierunku niższych wartości sygnału.

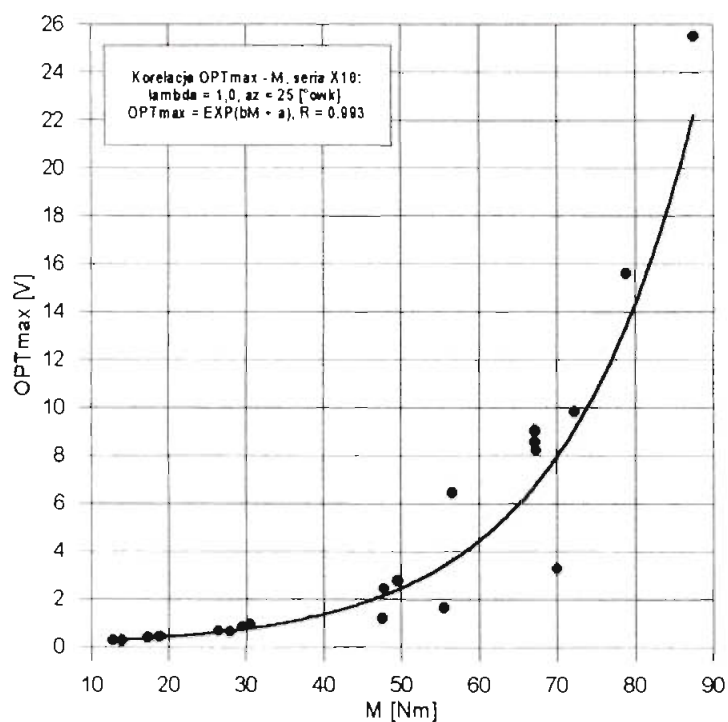


Rysunek 7.21. Korelacja maksymalnych wartości sygnału optycznego i czasu otwarcia wtryskiwacza; serie pomiarów A, C i E -X10

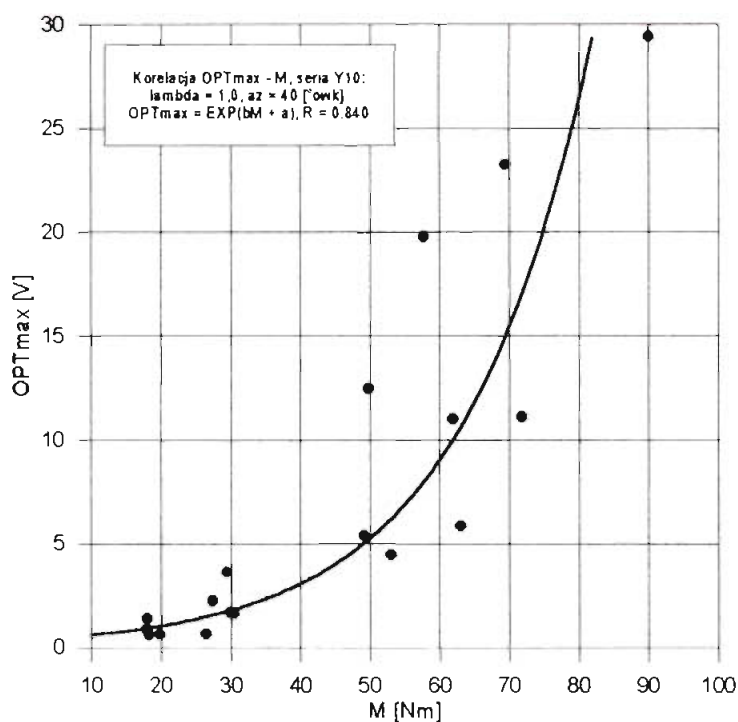


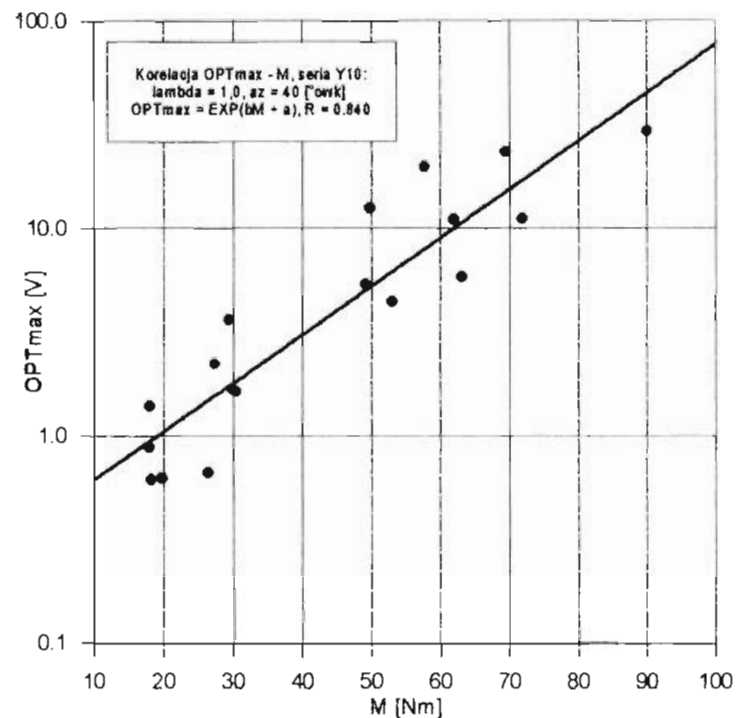
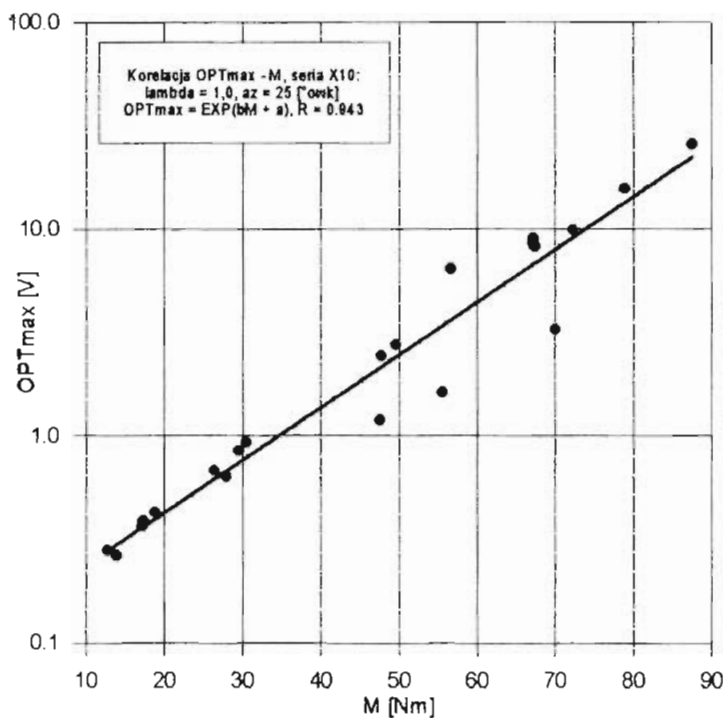
Rysunek 7.22. Korelacja maksymalnych wartości sygnału optycznego i prędkości obrotowej silnika; serie pomiarów 1, 5 i 7 -X10

Powyższy wniosek potwierdza silna zależność OPTmax od momentu obrotowego silnika (rys. 7.23). I w tym przypadku najwyższą wartość współczynnika korelacji uzyskano dla aproksymacji krzywą eksponencjalną. Po zlogarytmowaniu sygnału optycznego zależność przyjmuje charakter liniowy (rys. 7.24).



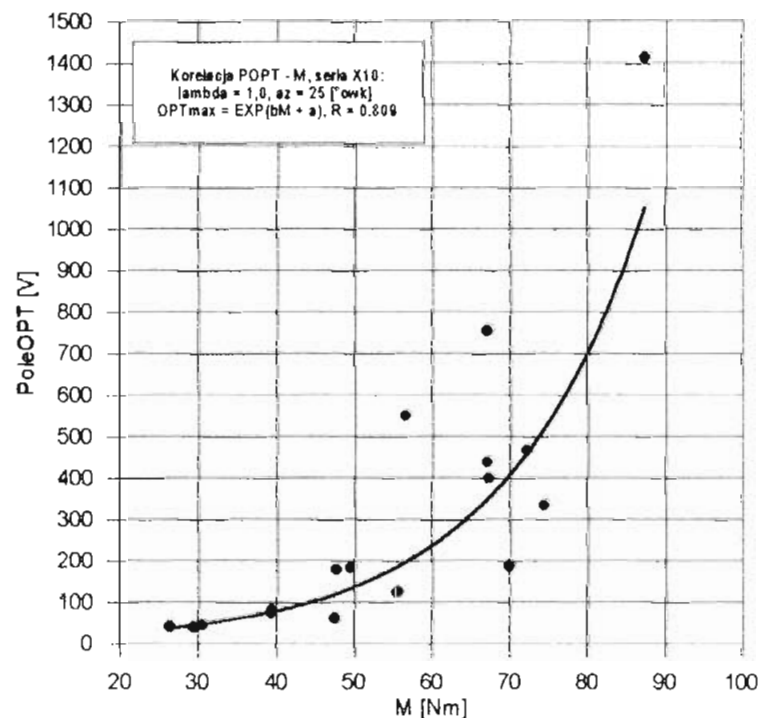
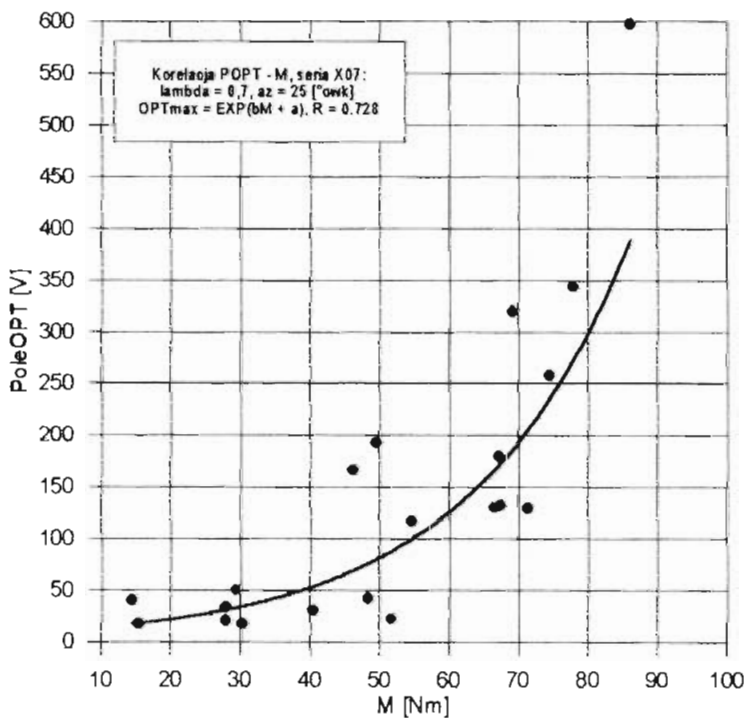
Rysunek 7.23. Korelacja maksymalnej wartości sygnału optycznego i momentu obrotowego; serie pomiarów -X10 i Y10





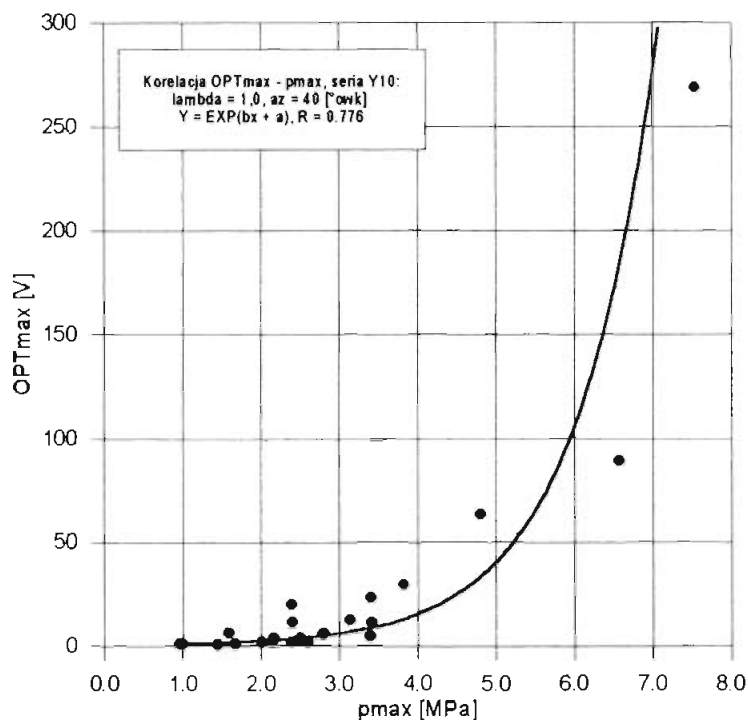
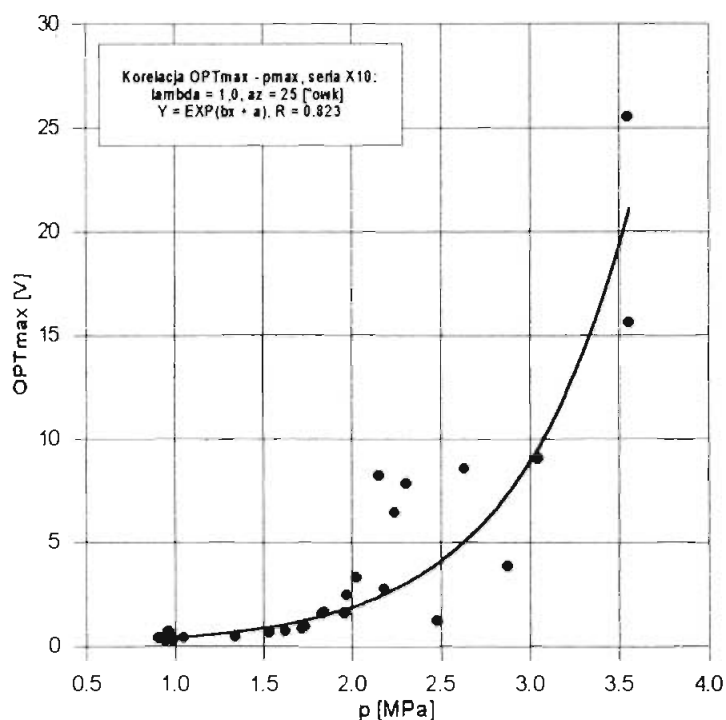
Rysunek 7.24. Korelacja maksymalnej wartości sygnału optycznego i momentu obrotowego; serie pomiarów -X10 i Y10 – wykresy po zlogarytmowaniu

Podobny charakter przebiegu krzywych uzyskano porównując z momentem obrotowym pole pod krzywą sygnału optycznego (rys. 7.25) oraz porównując maksymalne wartości sygnału optycznego i sygnału ciśnienia z komory spalania (rys. 7.26).

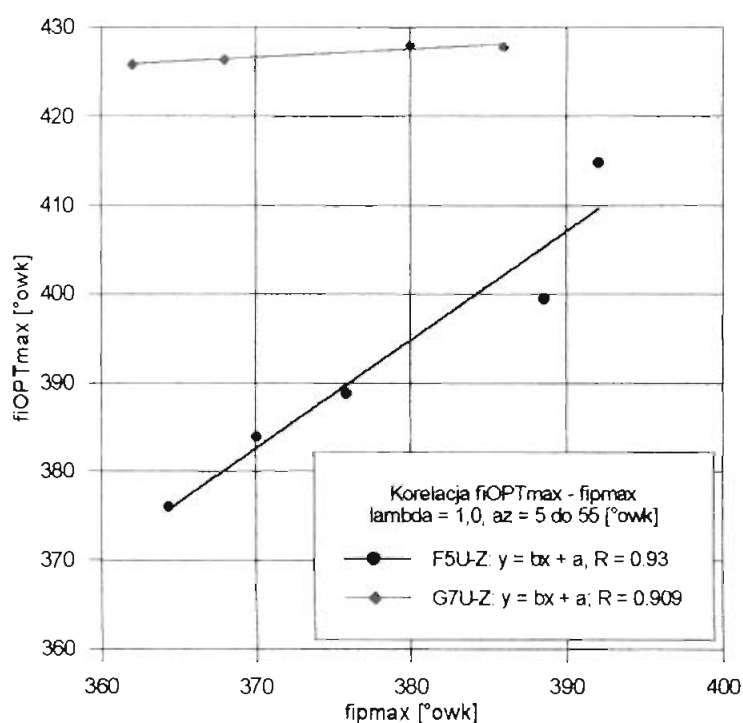


Rysunek 7.25. Korelacja pola pod krzywą sygnału optycznego i momentu obrotowego; serie X07 i X10

Liniową zależność uzyskuje się natomiast dla wzajemnej zależności kątów wystąpienia maksymalnej wartości sygnału optycznego (ϕ_{OPTmax}) i ciśnienia (ϕ_{pmax}). Ilustruje to rysunek 7.27 sporządzony dla dwóch punktów pomiarowych F5 i G7.

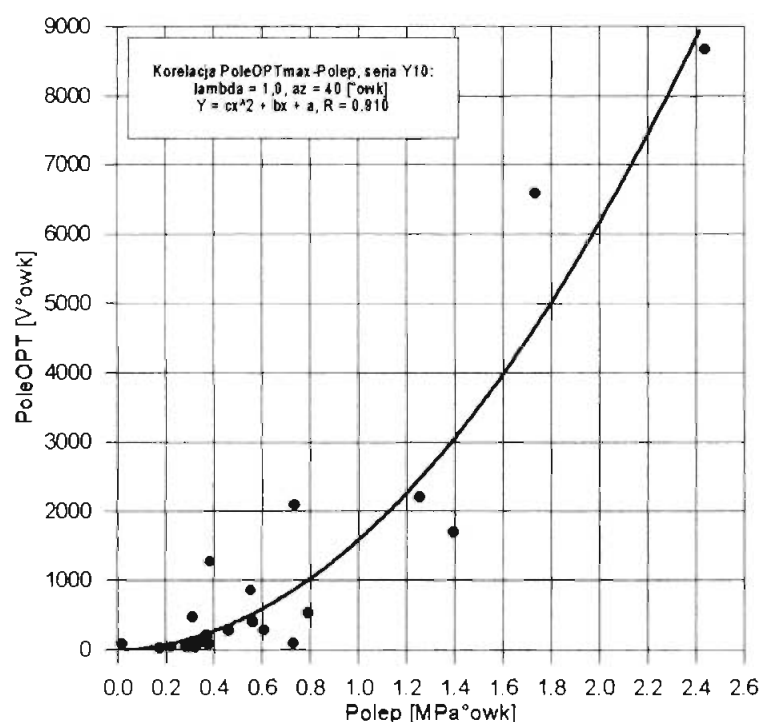
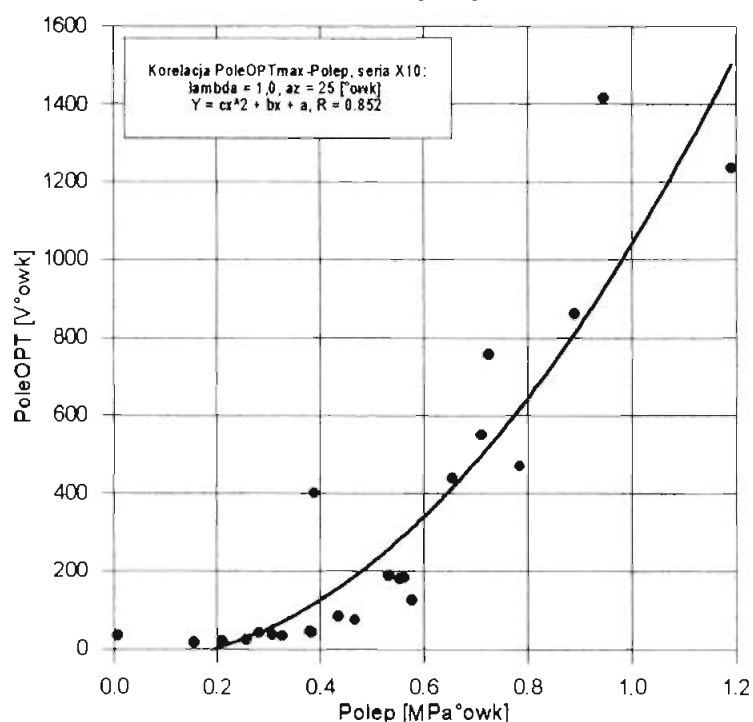


Rysunek 7.26. Korelacja maksymalnych wartości sygnału optycznego i ciśnienia; serie X10 i Y10

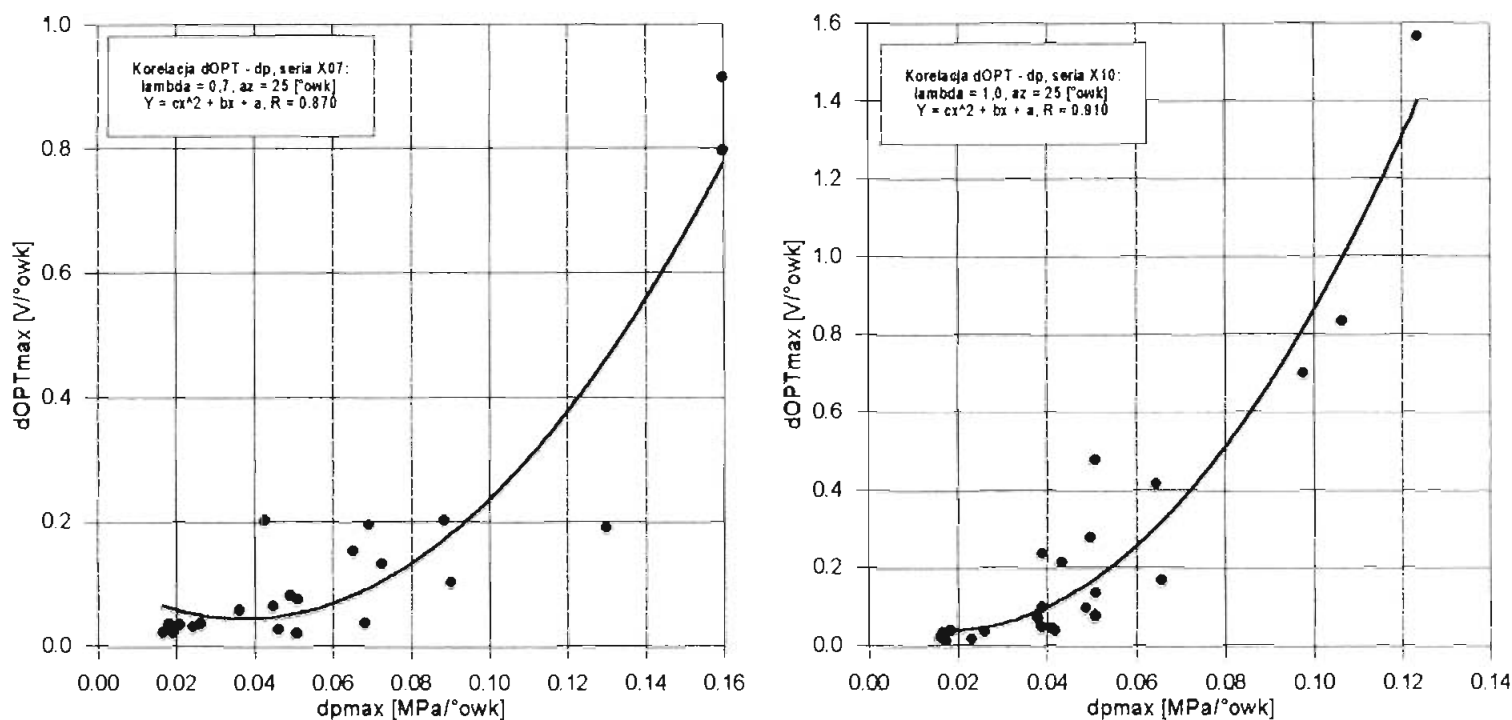


Wysoka korelacja występuje pomiędzy polami zawartymi pod krzywymi ciśnienia i sygnału optycznego (rys. 7.28). Najlepiej dopasowaną krzywą okazał się w tym przypadku wielomian kwadratowy. Podobny wynik uzyskano (rys. 7.29) korelując maksymalne przyrosty ciśnienia i sygnału optycznego (dpmax i dOPTmax),

Rysunek 7.27. Korelacja kątów wystąpienia maksymalnych wartości sygnałów; serie F5 i G7, zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu

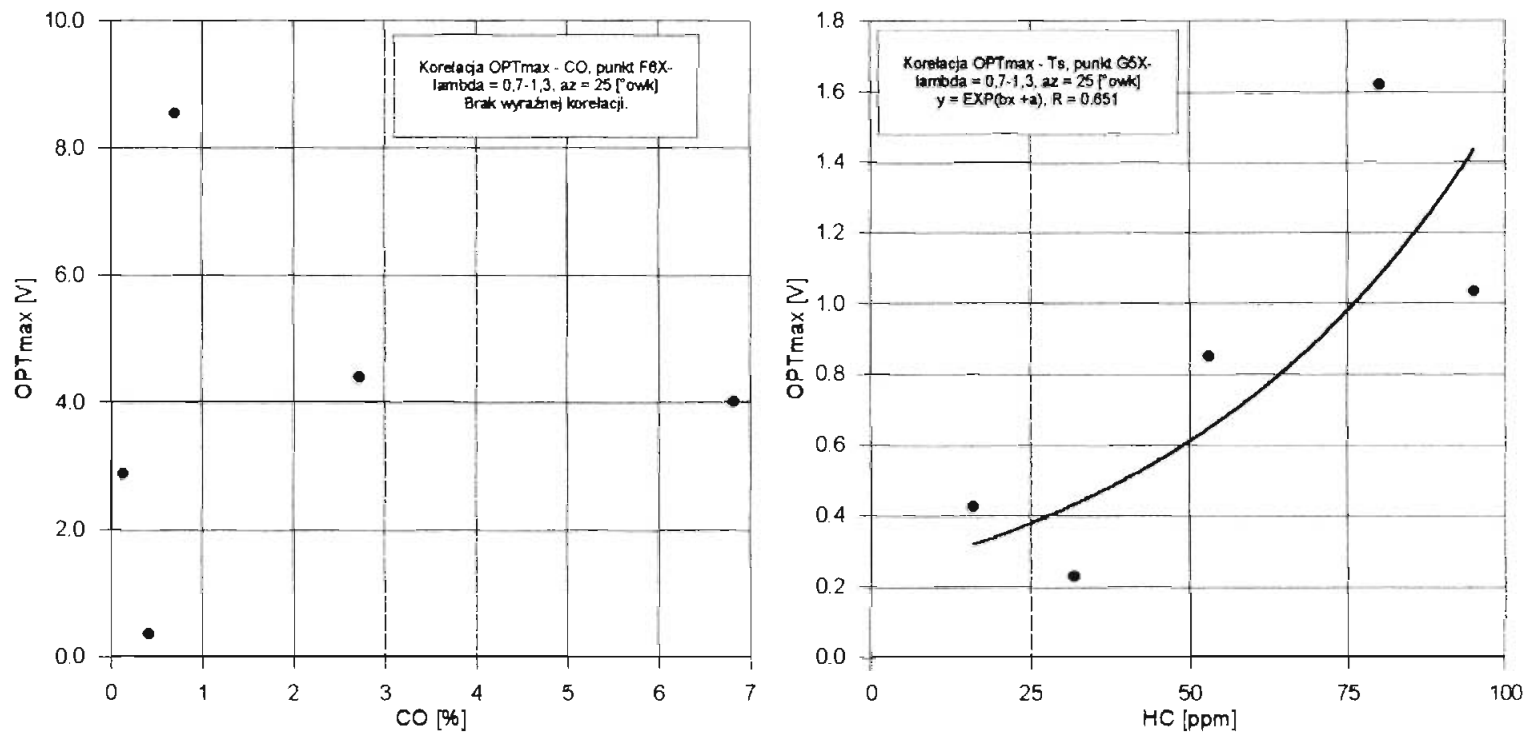


Rysunek 7.28. Korelacja pól pod krzywymi ciśnienia i sygnału optycznego; serie X10 i Y10

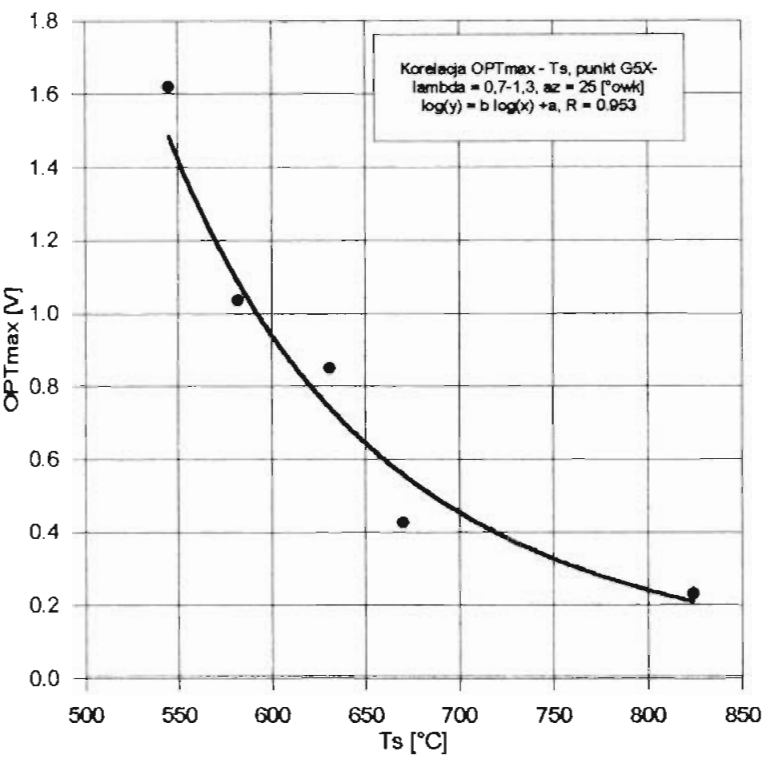


Rysunek 7.29. Korelacja maksymalnych przyrostów ciśnienia i sygnału optycznego, serie X07 i X10

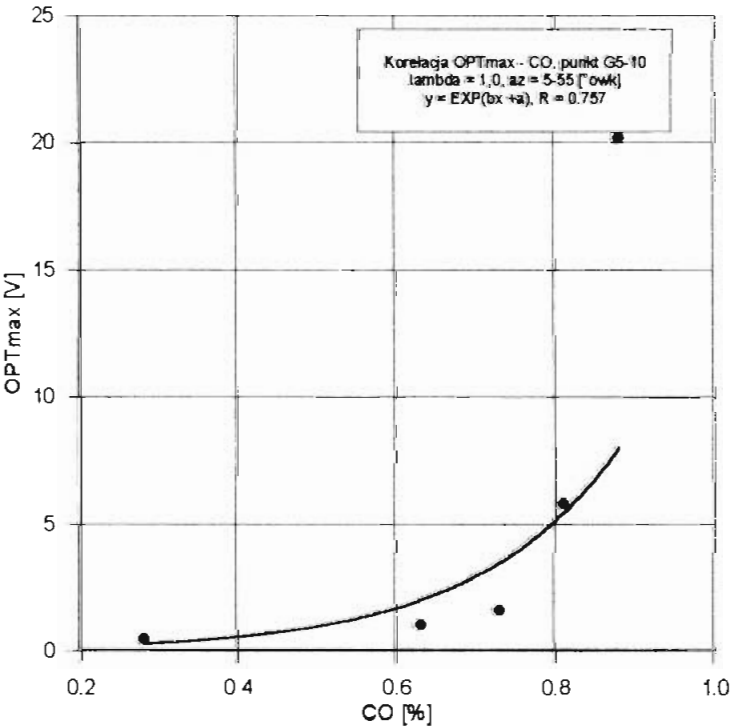
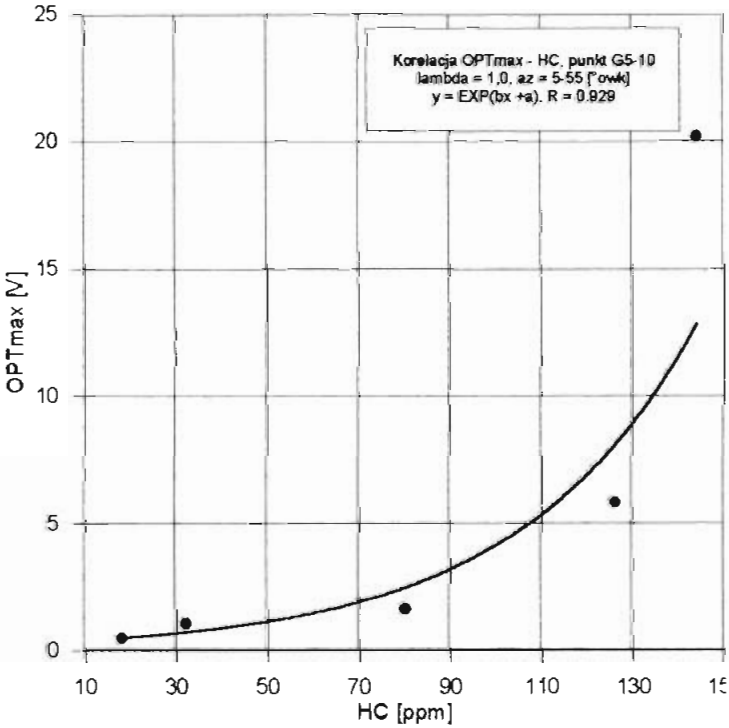
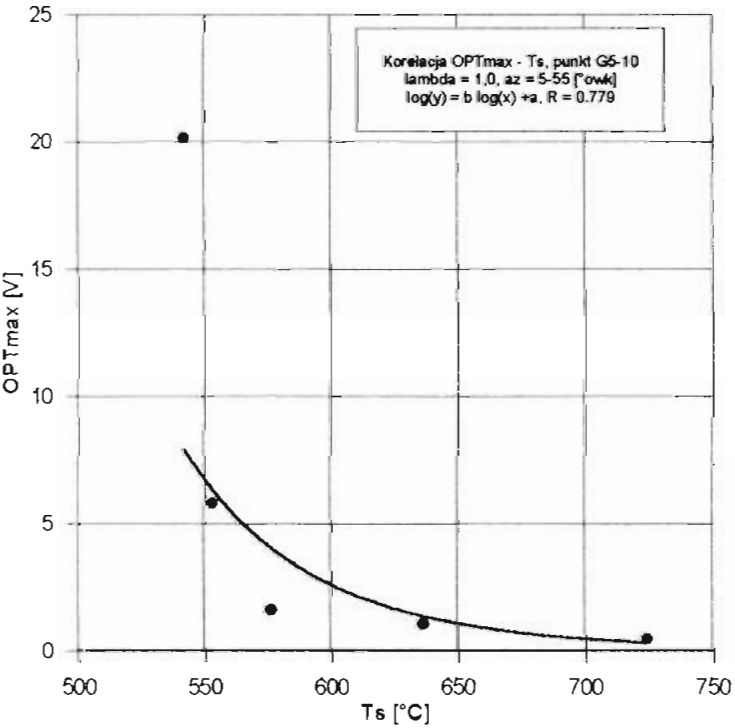
Dokonano także próby korelacji parametrów sygnału optycznego i zmierzonych efektów pracy silnika w postaci temperatury spalin T_s oraz koncentracji toksycznych składników spalin CO i HC. I tak, korelację pomiędzy maksymalnymi wartościami sygnału optycznego OPTmax a wartościami T_s , HC i CO dla zmieniającego się współczynnika składu mieszanki ilustrują rysunki 7.30a i 7.30b, natomiast wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu przedstawiono na rysunku 7.31. Stwierdzono, że przy zmiennym składzie mieszanki nie występuje istotna statystycznie korelacja pomiędzy OPTmax a CO i HC (rys. 7.30a).



Rysunek 7.30a. Korelacja maksymalnej wartości sygnału optycznego a CO i HC; serie G5 i F6, zmienny skład mieszanki

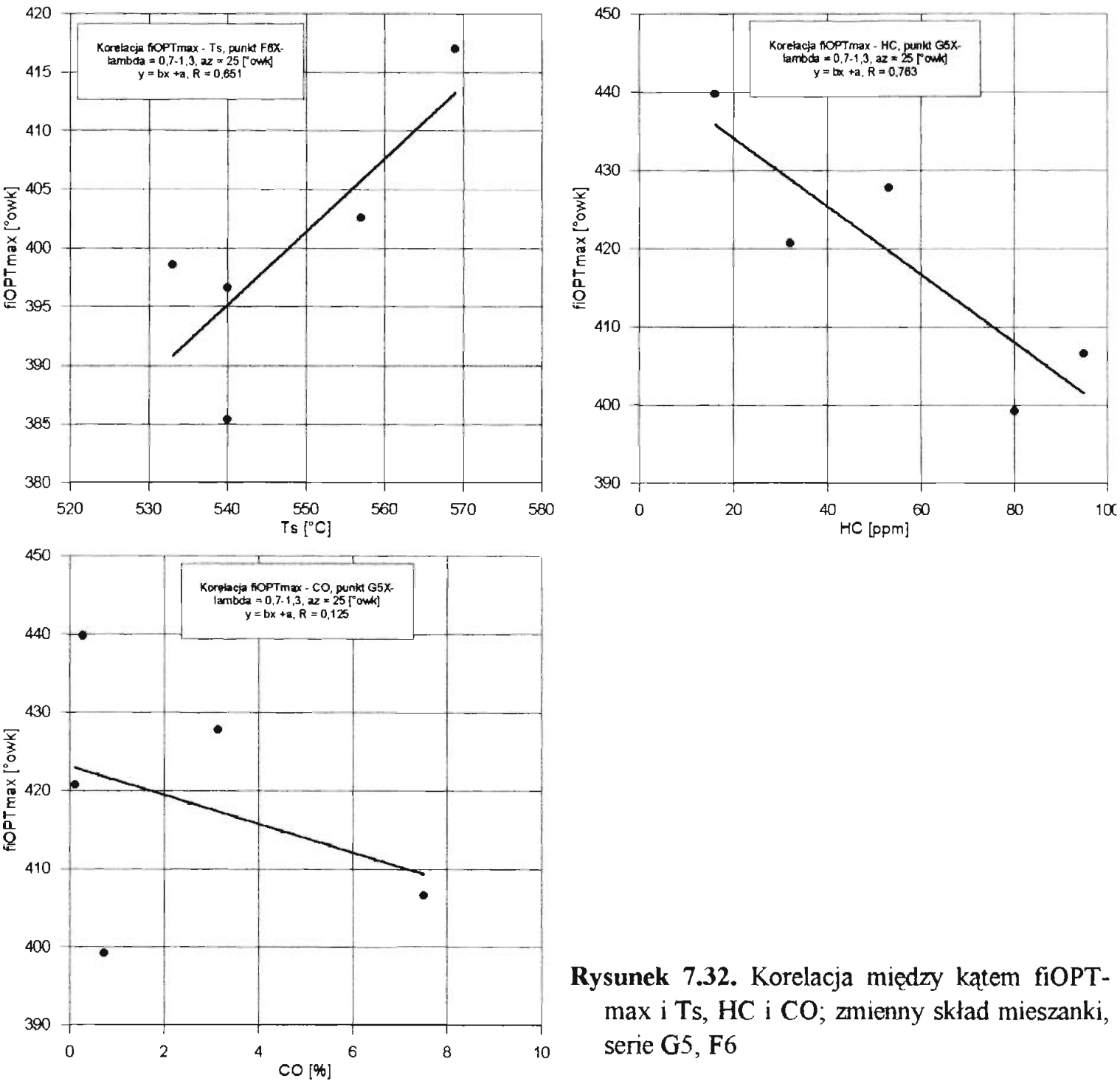


Rysunek 7.30b. Korelacja maksymalnej wartości sygnału optycznego a Ts; serie G5 i F6, zmienny skład mieszanki.

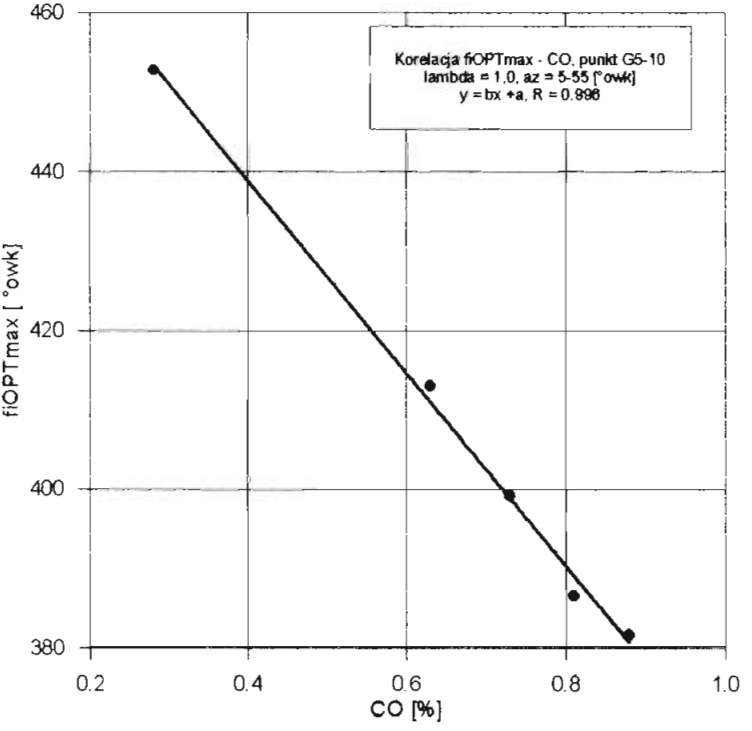
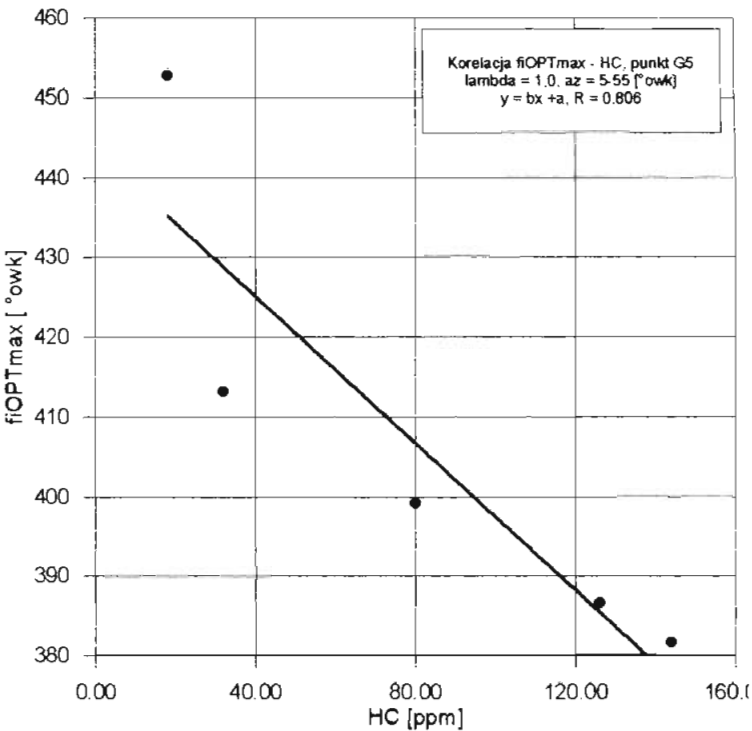
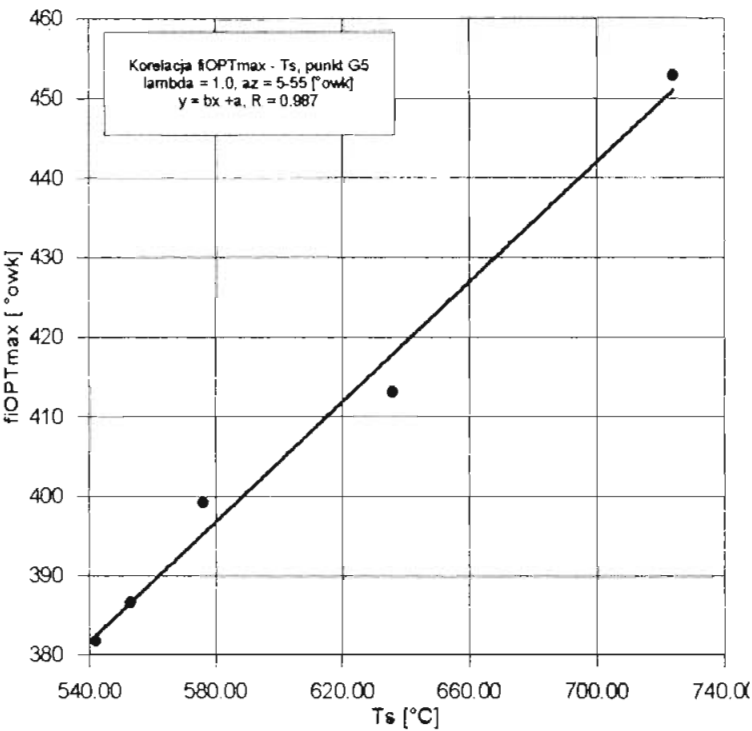


Rysunek 7.31. Korelacja maksymalnej wartości sygnału optycznego a Ts, HC i CO; seria G5, zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu

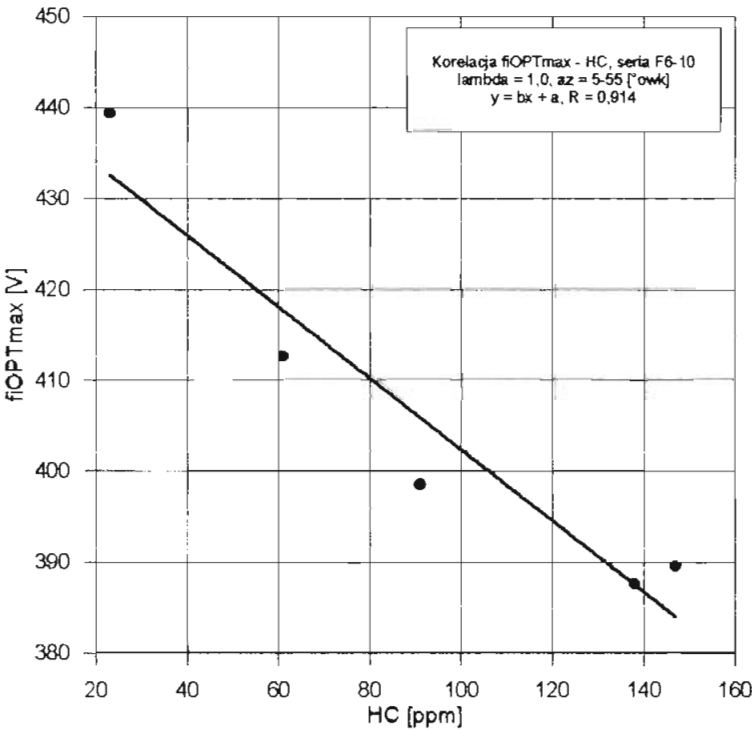
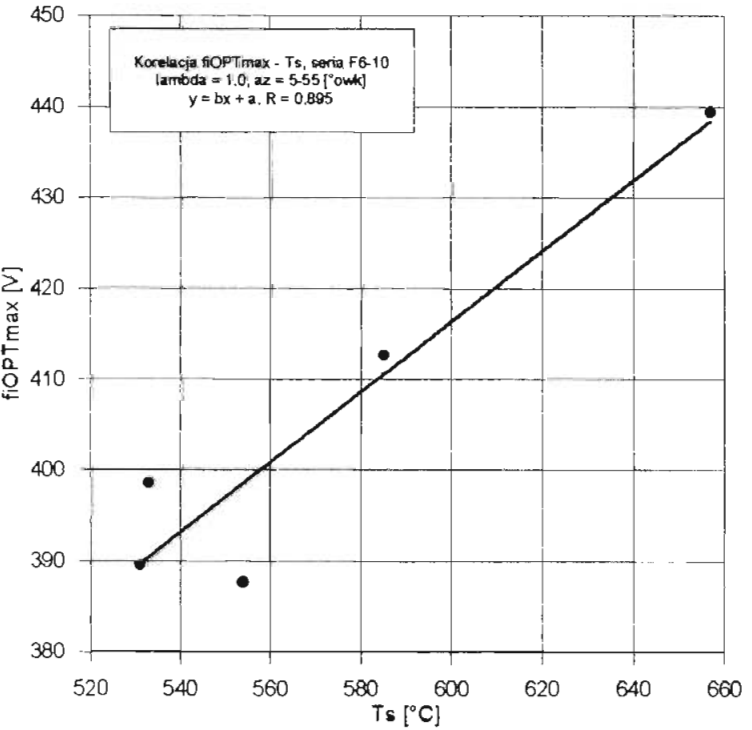
Zależność kąta położenia maksimum sygnału optycznego ($f_{iOPTmax}$) od wartości T_s , HC i CO dla różnych wartości λ i α_z przedstawiają odpowiednio rysunki 7.32 i 7.33a i 7.33b. W przypadku zmiennego kąta wyprzedzenia zapłonu (rys. 7.33a i 7.33b) uzyskano zależności liniowe o wysokich współczynnikach korelacji (R w granicach od 0,806 do 0,996, dla 5 punktów wartość graniczna wynosi 0,754). Warto zwrócić uwagę na to, że zmierzona wartość $f_{iOPTmax}$ nie zależy od tłumienia sygnału w układzie optycznym, wynikającego np. z zanieczyszczenia końcówki czujnika. Konstrukcja toru pomiarowego, (brak elementów ruchomych), wyklucza także przesunięcia fazowe. Stąd też duża przydatność diagnostyczna tego parametru.

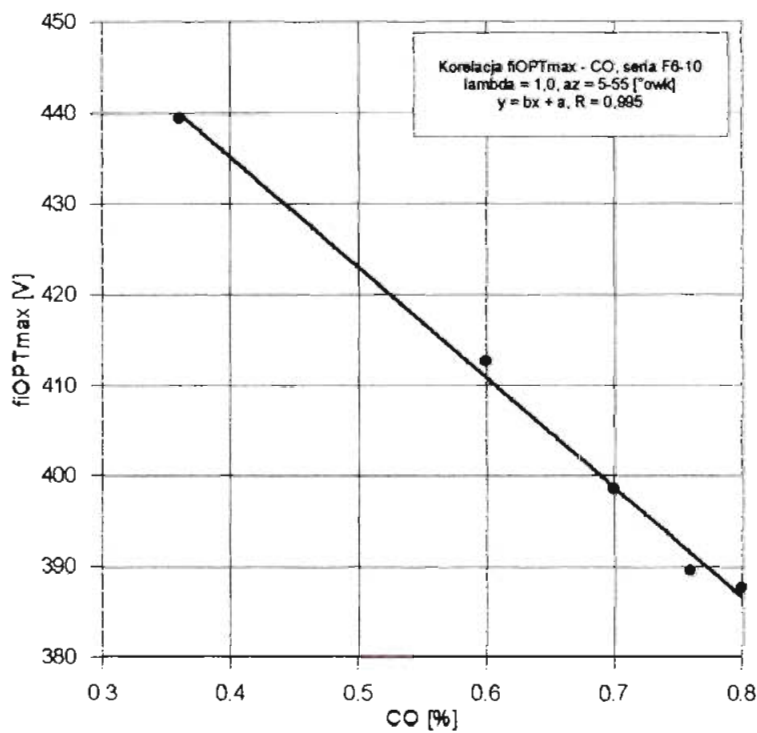


Rysunek 7.32. Korelacja między kątem $f_{iOPTmax}$ i T_s , HC i CO; zmienny skład mieszanki, serie G5, F6



Rysunek 7. 33a. Korelacja między kątem fiOPTmax i Ts, HC i CO; zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu, seria G5



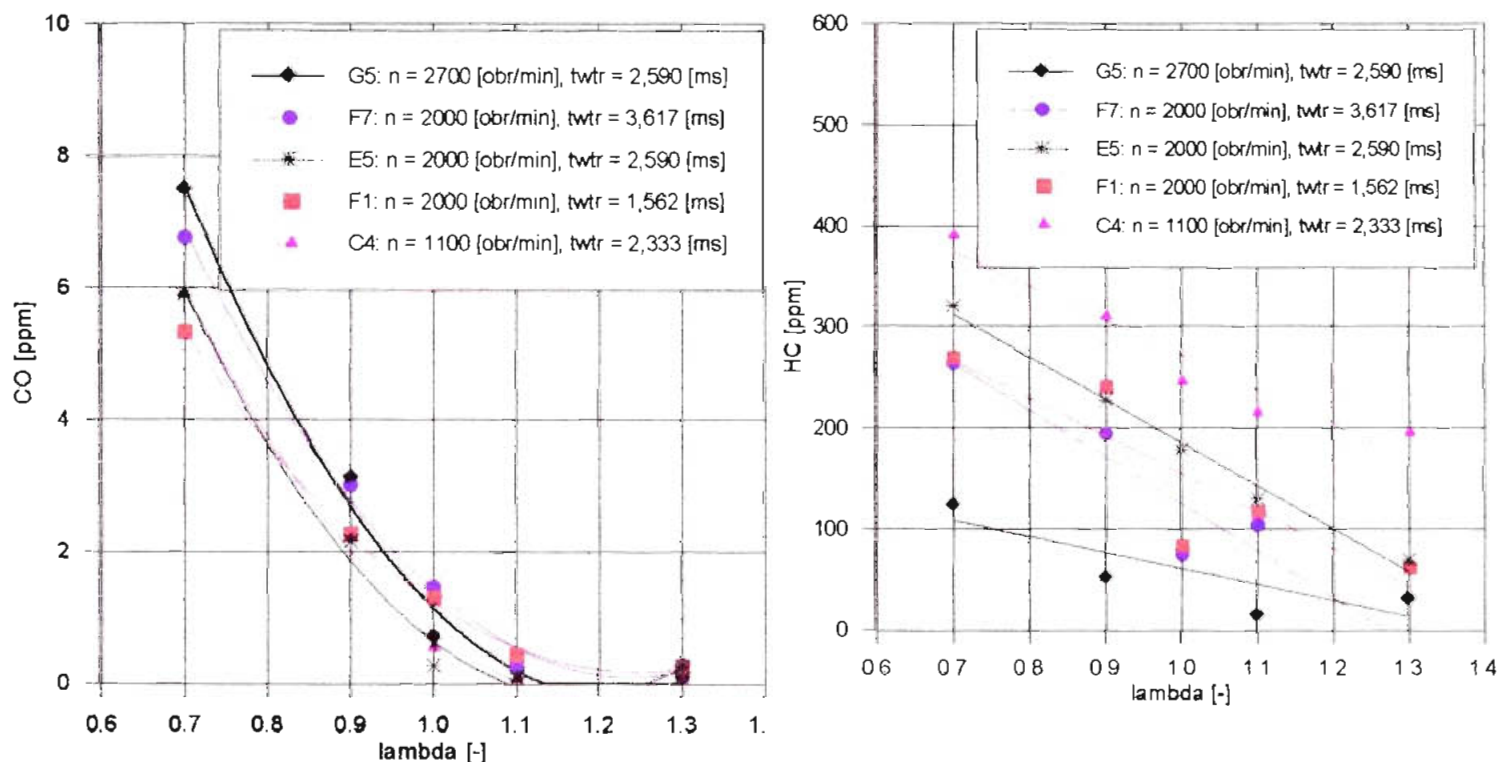


Rysunek 7. 33b. Korelacja między kątem fiOPTmax i Ts, HC i CO; zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu, seria F6

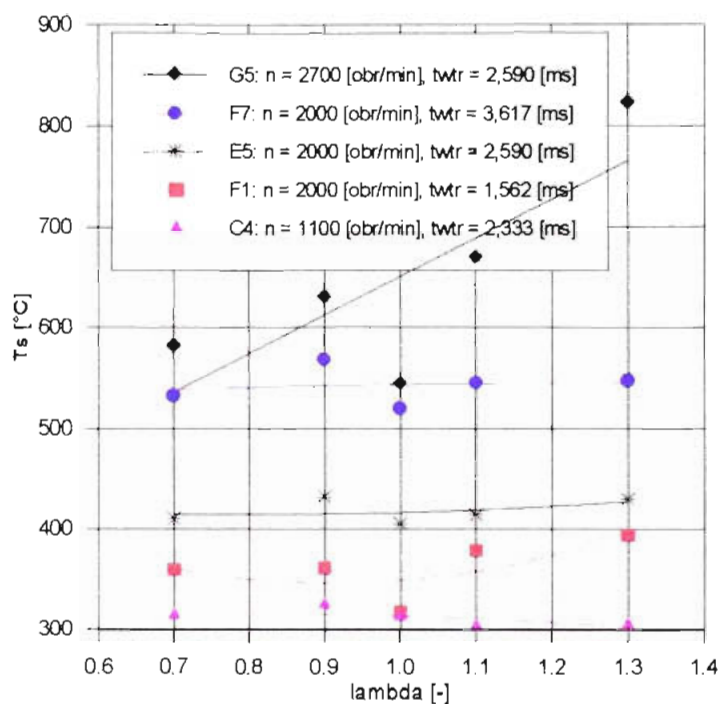
7.3.5. Wyniki uzupełniające

Zrealizowanie badań pozwoliło na sporządzenie dodatkowych charakterystyk, które, mimo że bezpośrednio nie określają właściwości sygnału optycznego, przedstawiają zmiany innych parametrów diagnostycznych.

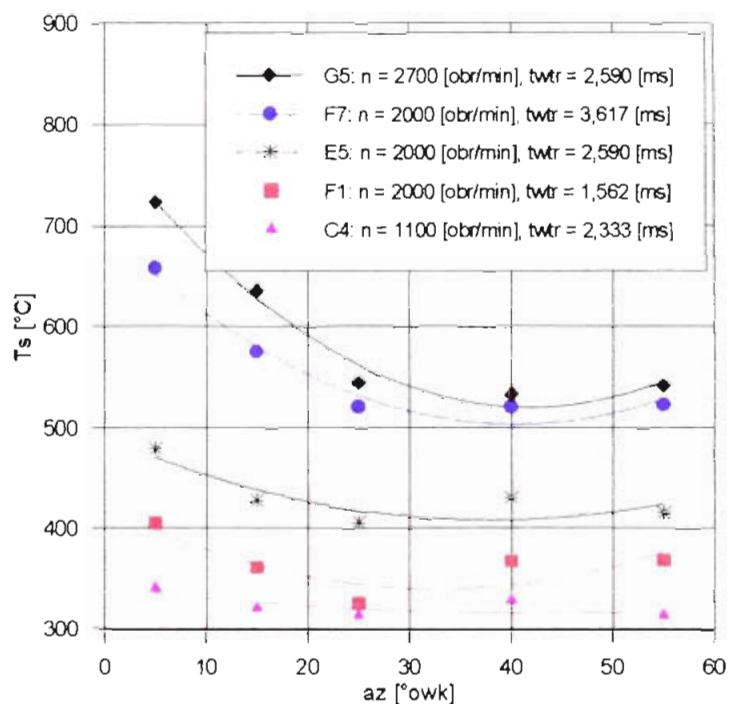
Wpływ regulacji silnika (współczynnika składu mieszanki i kąta wyprzedzenia zapłonu) na temperaturę spalin oraz koncentrację CO i HC ilustrują rysunki 7.34 do 8.37, sporządzone dla różnych obciążeń i prędkości obrotowych. Uzyskane zależności, co do przebiegów jakościowych, są zgodne z charakterystykami dostępnymi w literaturze.



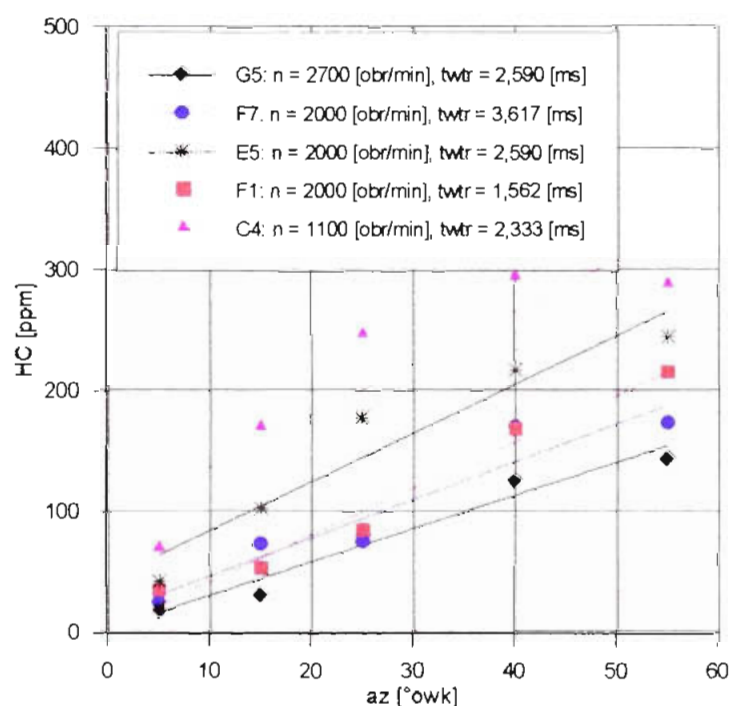
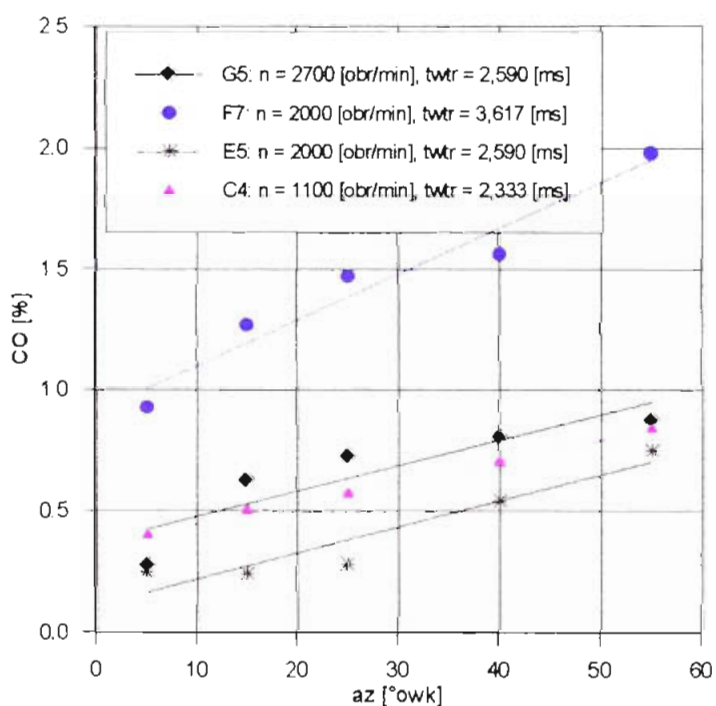
Rysunek 7.34. Zależność CO i HC od współczynnika składu mieszanki



Rysunek 7.35. Zależność T_s od współczynnika składu mieszanki



Rysunek 7.36. Zależność T_s od kąta wyprzedzenia zapłonu



Rysunek 7.35. Zależność CO, HC od kąta wyprzedzenia zapłonu

8.1. SPOSTRZEŻENIA WYNIKAJĄCE Z PRZEGLĄDU LITERATURY

W rozdziale 3.4 dokonano przeglądu dostępnych prac dotyczących wykorzystania metod optoelektronicznych w badaniach, sterowaniu i diagnostyce procesu spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. Podsumowując analizę literatury można zaproponować pewne wnioski ogólne.

1. Jednym z głównych kierunków rozwoju metod diagnostycznych stosowanych w badaniach silników spalinowych jest obserwacja i diagnostyka procesu spalania. Opracowuje się przy tym nowe czujniki, metody badawcze oraz procedury matematyczne pozwalające na analizę stanu technicznego silnika w trybie *on-line*, czyli bezpośrednio w trakcie jego eksploatacji.

Przebieg procesu roboczego, a przede wszystkim przebieg procesu spalania, jest w diagnostyce silnika procesem o znaczeniu kluczowym, gdyż zmiany stanu technicznego silnika (w szczególności układów: paliwowego, zapłonowego, wymiany ładunku oraz korbowo-tłokowego) silnie wpływają na wskaźniki jakościowe procesu.

2. Badania procesu roboczego za pomocą czujników optoelektronicznych znajdują się w fazie intensywnego rozwoju. Większość danych z literatury, to informacje stosunkowo nowe; pierwsze badania zapoczątkowane zostały dopiero w drugiej połowie lat osiemdziesiątych.

3. Podjęcie prac badawczych w tej dziedzinie uzasadniają liczne zalety czujników światłowodowych, między innymi:

- duża odporność na zanieczyszczenia mechaniczne, wysokie temperatury i ciśnienia,
- prawidłowa praca przy dużych poziomach zakłóceń elektromagnetycznych,
- duża czułość pomiarowa i praktycznie nieograniczony zakres pomiarowy,
- zintegrowanie w jednym czujniku elementu rejestrującego i transmitującego sygnał,
- małe wymiary gabarytowe i ciężar,
- znikomy pobór mocy,
- pomijalnie małe straty transmisji sygnału, co umożliwia umieszczenie układów przetwarzania sygnału poza przedziałem silnika, np. w kabinie kierowcy,
- prosta i zwarta konstrukcja czujnika i toru pomiarowego, zastosowanie czujnika nie wymaga istotnych zmian w obrębie silnika,
- łatwość montażu i demontażu,
- w przypadku podjęcia produkcji seryjnej – niski koszt wytworzenia (poniżej 5 USD) umożliwiający instalację w pojazdach.

4. Większość dotychczasowych prac skierowana była na zrozumienie procesu spalania i tego, w jaki sposób rejestrowana emisja optyczna z komory spalania jest powiązana z obserwowanymi zjawiskami. Przede wszystkim brano pod uwagę:

- niestabilność cyklową i wypadanie zapłonów,
- zmiany składu mieszanki,
- występowanie spalania stukowego,
- temperaturę w cylindrze jako czynnik determinujący proces powstawania NO_x.

5. W większości opracowanych aplikacji wykorzystywano sygnał uzyskany za pomocą czujników światłowodowych w układach elektronicznego sterowania silnikiem do budowy wskaźnika jakości wykorzystywanego następnie w pętli sprzężenia zwrotnego.

6. Wszyscy autorzy zgodnie podkreślali wszechstronność pomiarową optycznych czujników spalania. Pozwalały one bowiem mierzyć jednocześnie wiele różnorodnych sygnałów:

- o spalaniu stukowym,
- kącie wyprzedzenia zapłonu,
- składzie mieszanki,
- temperaturze spalania,
- ciśnieniu wewnątrz komory spalania,
- o wypadaniu zapłonów.

7. Opisane w literaturze badania korelacji sygnału emisji świetlnej z komory spalania z przebiegiem ciśnienia indykowanego wykazały duże podobieństwo przebiegu obu sygnałów. Ponadto, ogólny poziom promieniowania wzrastał wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia zapłonu, przy czym wartości maksymalne uzyskiwano dla mieszanek o składzie zbliżonym do stechiometrycznego. Stwierdzono także przedłużoną emisję po przejściu płomienia jako wynik promieniowania cieplnego gazów spalinowych w podczerwieni.

8. Wykorzystanie sygnału optycznego do oceny składu mieszanki paliwowo-powietrznej wymaga porównania sygnałów uzyskanych dla różnych długości fal. W tym celu stosuje się najczęściej filtry lub monochromatory. Przebieg tak uzyskanego sygnału względnego ma charakter monotoniczny, co umożliwia jego użycie jako informacji o składzie mieszanki (do sterowania).

9. Wielu autorów donosiło o algorytmach sterowania, w których stopień zubożenia mieszanki był ograniczany stabilnością pracy. Sygnały uzyskiwane z czujników optycznych wykazywały przewagę w zakresie dokładnej oceny stabilności nad sygnałami pochodzącymi z konwencjonalnych czujników ciśnienia czy prędkości obrotowej. Dotyczyło to zwłaszcza odporności sygnału optycznego na zakłócenia i wymaganego nieskomplikowanego procesu przetwarzania.

Wykorzystanie czujnika ciśnienia do wykrywania wypadania zapłonów wymagało wcześniejszego określenia warunków napędzania silnika (braku spalania), natomiast w systemach opartych na czujniku optycznym konieczna była jedynie obecność lub brak sygnału świetlnego, co wystarczało do precyzyjnego zidentyfikowania wypadania zapłonów.

10. Porównanie sygnału ciśnienia i sygnału optycznego, otrzymanych podczas pracy silnika na granicy spalania stukowego, wykazało, że sygnał optyczny reaguje wcześniej na pojawienie się początkowych oznak stuku. Następował wyraźny wzrost intensywności promieniowania, przy braku typowych, związanych ze stukiem, zmian ciśnienia. Tak więc czujnik optyczny stwarzał możliwość odpowiednio wczesnego rozpoznawania spalania stukowego i właściwą regulację kąta wyprzedzenia zapłonu.

11. Zastosowanie sygnału optycznego do wykrywania początku spalania okazało się znacznie łatwiejsze (ze względu na brak emisji w fazie sprężania ładunku poprzedzającej początek spalania) niż w przypadku sygnału ciśnienia. Pozwoliło to na zastosowanie algorytmu sterowania wykorzystującego sygnał początku i końca spalania uzyskany za pomocą czujnika optycznego.

12. Jednym z ważniejszych kierunków prac było opracowanie czujnika ciśnienia wykonanego na bazie transmisji światłowodowej poprzez wykorzystanie zmiany natężenia światła odbitego (czujniki membranowe), lub bezpośrednią modulację fazy sygnału wewnątrz włókna poddanego działaniu ciśnienia (czujniki mikrozgięciowe).

Dostępne wyniki badań potwierdziły przydatność czujników optycznych do pomiarów ciśnienia, wykazały także ich dużą odporność na zakłócenia. Stosunek sygnał/szum kilkakrotnie przewyższał analogiczną wielkość uzyskaną dla typowego czujnika kwarcowego. Przebiegi ciśnienia zmierzone przy pomocy konwencjonalnych czujników piezokwarcowych oraz optycznych czujników ciśnienia posiadały wysoką, istotną korelację (autorzy donosili o korelacji rzędu $0,97 \div 0,99$).

13. Najczęściej opisywane konstrukcje optycznych czujników spalania oparte były na modyfikacji konwencjonalnych świec zapłonowych lub zabudowywaniu w ściankach komory spalania. Średnice luster czujników były dość zróżnicowane i wynosiły od 0,2 mm do 3 mm. Do transmisji sygnału wykorzystywano tanie, wielomodowe światłowody telekomunikacyjne.

Przed wszystkim analizowano sygnały o określonej długości fali świetlnej, uzyskane na drodze filtracji lub dzięki użyciu monochromatorów. Typowe, najczęściej wykorzystywane w badaniach długości fal, odpowiadały pasmom emisji CO i C₂.

14. Sygnalizowany w analizowanych pracach wpływ zanieczyszczenia końcówki czujnika na poziom sygnału nie był znaczący i osłabienie poziomu zawierało się w przedziale $92 \div 95\%$ sygnału uznanego za wzorcowy. Przy czasie eksploatacji ponad 60 godzin wielkość ta nie przekraczała 80%. W większości przypadków końcówka czujnika podlegała samooczyszczaniu w wysokich temperaturach.

Badania różnych kształtów końcówek zbierających sygnał optyczny przeprowadzone pod kątem ich trwałości, odporności na zanieczyszczenia oraz jak największej akceptacji sygnału wykazały, że kształt sferyczny jest rozwiązaniem kompromisowym, wykazującym racjonalne spełnienie tych wymagań.

8.2. SPOSTRZEŻENIA WYNIKAJĄCE Z ANALIZY OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Opracowany i zastosowany tor pomiarowy, składający się z optycznego czujnika spalania, elementów transmisyjnych oraz układów elektronicznego przetwarzania sygnału jest urządzeniem prototypowym. Należy przy tym podkreślić, że jest to rozwiązanie pionierskie i jak dotąd jedyne w skali ogólnopolskiej.

Ogólna koncepcja toru pomiarowego została opracowana w oparciu o analizę zgromadzonej literatury, natomiast rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych elementów zostały opracowane i wykonane przez zespół badawczy Katedry Silników Spalinowych Politechniki Lubelskiej.

Badania doświadczalne przeprowadzono w celu oceny działania toru pomiarowego w szerokim zakresie pracy silnika. Zmieniano prędkość obrotową, obciążenie, kąt wyprzedzenia zapłonu i skład mieszanki zgodnie z przedstawionym w pracy planem badań (rozdz. 5.7). Analiza wyników pomiarów umożliwia wyprowadzenie wniosków dotyczących charakterystyki sygnału emisji świetlnej z komory spalania.

1. Mierzona emisja ma charakter wielowymiarowego, ergodycznego sygnału diagnostycznego o charakterze losowym. Przebieg sygnału dla danych warunków pracy silnika jest powtarzalny i jednoznaczny. Jego cechy można wyznaczyć poprzez uśrednianie kolejnych rejestrowanych przebiegów czasowych.

2. Chcąc scharakteryzować zarejestrowany sygnał optyczny, poszukiwano istotnych statystycznie korelacji pomiędzy ośmioma wyodrębnionymi parametrami sygnału a trzynastoma innymi wielkościami opisującymi obserwowany proces roboczy (por. rozdz. 7.2). Badano także wpływ parametrów regulacyjnych na przebieg sygnału. Poniżej zostaną przytoczone najważniejsze cechy i właściwości sygnału emisji świetlnej z komory spalania silnika o zapłonie iskrowym.

- Rejestrowany sygnał optyczny ma charakter sigmoidalny. Porównanie przebiegów czasowych emisji świetlnej z przebiegami ciśnienia indykowanego wykazało duże podobieństwo kształtu krzywych. Potwierdziły to badania, w wyniku których stwierdzono korelację istotną statystycznie dla zależności o charakterze eksponencjalnym (współczynnik korelacji rzędu $0,78 \div 0,91$) dla wartości maksymalnych sygnałów jak i pola powierzchni pod krzywymi.
- Zmiany warunków pracy silnika i wartości parametrów regulacyjnych silnie wpływały na sygnał optyczny – wykazywał on większą wrażliwość na zmianę warunków pracy niż odpowiadający mu sygnał ciśnienia (w przypadku zmian składu mieszanki różnica wartości sygnałów była 4-krotna, 9-krotna dla zmian kąta wyprzedzenia zapłonu). Wynika stąd duża przydatność diagnostyczna sygnału optycznego.
- Wpływ składu mieszanki na przebieg sygnału jest bardzo zauważalny. W przypadku wyższych obciążeń maksymalna wartość sygnału odpowiadała składowi stechiometrycznemu

- ($\lambda=1,0$), zmniejszenie obciążenia powodowało przesunięcie maksimum w stronę mieszanek bogatszych ($\lambda=0,7$).
- Wpływ początku spalania (kąta wyprzedzenia zapłonu) na wartość maksymalną sygnału ma charakter wykładniczy, przy czym wzrost wartości sygnału następuje wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia zapłonu.
 - Zaobserwowano wpływ obciążenia na wartość sygnału optycznego o charakterze wykładniczym, natomiast wpływ prędkości obrotowej był niejednoznaczny i zależał od obciążenia silnika.
 - Uzyskano wysoką ($0,89 \div 0,99$) korelację dla zależności liniowej kąta wystąpienia maksymalnej wartości sygnału optycznego i zawartości toksycznych składników spalin (CO, HC) oraz temperatury gazów wylotowych przy zmiennym kącie wyprzedzenia zapłonu. Kąt wystąpienia maksymalnej wartości sygnału nie jest zależny od stanu zanieczyszczenia końcówki czujnika, stąd wielkość ta mogłaby być dobrym parametrem diagnostycznym, nie wymagającym okresowego oczyszczania czujnika.

3. Badania dowiodły, że pojawienie się nienormalnych zjawisk spalania, takich jak wypadanie zapłonów, jest precyzyjnie rejestrowane przez układ pomiarowy i łatwe do określenia na podstawie analizy sygnału emisji świetlnej. W przypadku wystąpienia wypadnięcia zapłonu sygnał optyczny rejestrowano na poziomie szumu. Wyniki te potwierdziły wnioski wynikające z analizy literatury.

8.3. WNIOSKI KOŃCOWE

W części teoretycznej pracy dokonano przeglądu dotychczasowych zastosowań metod optoelektronicznych w badaniach procesu spalania. Prowadzone prace badawcze zmierzają do praktycznego i powszechnego zastosowania optycznych czujników spalania w elektronicznych systemach sterowania silnikami jako źródła sygnału do budowy wskaźnika jakości wykorzystywanego następnie w pętli sprzężenia zwrotnego. Najbardziej obiecujące obszary zastosowań to kontrola nierównomierności pracy silnika (wykrywanie wypadania zapłonów), ocena składu mieszanki (wyznaczanie współczynnika nadmiaru powietrza), wykrywanie spalania stukowego oraz zastosowanie włókien światłowodowych do pomiaru ciśnienia w cylindrze.

Przegląd dostępnych rozwiązań umożliwił opracowanie założeń konstrukcyjnych i budowę toru pomiarowego wykorzystującego optyczny czujnik spalania oraz transmisję światłowodową, co pozwoliło na uzyskanie sygnału emisji świetlnej z komory spalania silnika. Zrealizowane badania doświadczalne umożliwiły weryfikację przydatności zastosowanego toru pomiarowego i jego poszczególnych elementów składowych: czujnika, toru transmisji i układów przetwarzających. Dokonano także metrologicznej oceny uzyskanego sygnału.

Uzyskane wyniki pozwalają na pozytywną ocenę działania czujnika, toru transmisji światłowodowej oraz układów przetwarzania elektronicznego sygnału. Niezbędne są jednak prace zmierzają-

ce do poprawy trwałości i stałości parametrów czujnika, zwłaszcza zmniejszenia strat transmisji związanych z elementami połączeniowymi oraz wpływem zanieczyszczenia końcówki czujnika.

Rejestrowany w trakcie pomiarów sygnał emisji świetlnej z komory spalania spełnia wymagania stawiane wobec sygnałów diagnostycznych. Stwierdzono istnienie istotnych korelacji pomiędzy parametrami sygnału optycznego a innymi wielkościami charakteryzującymi działanie silnika i proces roboczy. Widoczny jest także wpływ warunków pracy na przebieg badanego sygnału.

Te pozytywne cechy umożliwiają opracowanie metody diagnostycznej wykorzystującej sygnał optyczny do oceny przebiegu procesu spalania.

Największe możliwości wykorzystania sygnału optycznego zarysowują się przede wszystkim w zakresie oceny nierównomierności pracy silnika i kontroli wypadania zapłonów. Potwierdzają to dostępne w literaturze wyniki badań i doniesienia o coraz częstszych zastosowaniach metod optoelektronicznych w badaniach procesu spalania wykraczających poza stadium laboratoryjne. Potwierdzona przez innych autorów duża wartość informacyjna sygnału emisji świetlnej umożliwia wykorzystanie go jako sygnału sprzężenia zwrotnego w algorytmach sterowania silnikiem.

Dalszy rozwój opracowanej metody badawczej i konstruowanego toru pomiarowego powinien postępować w kierunku izolowania z rejestrowanego sygnału charakterystycznych długości fal promieniowania, co umożliwiłoby wykorzystanie uzyskanego w ten sposób sygnału względnego do oceny składu mieszanki i jakościowo-ilościowej oceny obserwowanego przebiegu procesu roboczego. Wyniki badań innych autorów w tym zakresie są bardzo obiecujące.

Należy oczekiwać, że metody badawcze wykorzystujące elementy optoelektroniczne staną się równoprawnymi środkami służącymi do badań i diagnostyki współczesnych silników spalinowych, a w przyszłości można się spodziewać seryjnego zastosowania czujników optycznych w wyposażeniu silników.

BIBLIOGRAFIA

1. Aquino C.F.: *Transient A/F Control Characteristics of the 5-Liter Central Fuel Injection Engine*. SAE Techn. Pap. 810494.
2. *AVL Engine Video System 513. System Guide*. AVL LIST GmbH, Austria 1993.
3. Barrow G.H.: *Chemia fizyczna*. PWN, Warszawa 1973.
4. Benson R.S., Whitehouse N.D.: *Internal Combustion Engines*. Pergamon Press, 1979.
5. Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: *Silniki samochodowe*. WKiŁ, Warszawa 1988.
6. Bernhardt M., Michałowska J., Radzimirski St.: *Motoryzacyjne skażenia powietrza*. WKiŁ, Warszawa 1976.
7. Bernhardt M.: *Badania trakcyjnych silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 1988.
8. Bertling H.: *Untersuchung der Streuungen im Energieumsetzungsverlauf eines Ottomotors*. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, 1974.
9. Bethea R.M., Duran B.S., Boullion T.L.: *Statistical Methods for Engineers and Scientists*. Mercel Dekker Inc., NY 1985.
10. Bianchi V., Dell'Acqua R., Geslot F.: *The Role of Sensors in Future Automotive Applications*. SAE Pap. 901132
11. Brzóska G.: *Badania diagnostyczne silników spalinowych w oparciu o analizę hałasu i drgań za pomocą korelatora*. Rozprawa doktorska. Poznań 1972.
12. Cempel Cz., Tomaszewski F. (red.): *Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1992.
13. Chmela F.G., Werlberger P.: *Expierience with an Endoscopic Video System for Diesel Engine Combustion Observation*. IMechE AUTOTECH '93, C462-046.
14. Cichy M.: *Silniki o działaniu cyklicznym. Podstawy teorii i działania*. Politechnika Gdańska, 1989.
15. Cockshott C.P. et al.: *Applications of Optical Sensors in the Automobile Industry*. SPIE Vol. 1120 Fiber Optics '89.
16. Crosignani B., de Marchis G., Tadeusiak A.: *Światłowody w telekomunikacji*. WKiŁ, Warszawa 1987.
17. Davis C.M. i in.: *Fiberoptic Sensor Technology Handbook*. Optical Technologies. Dynamic Systems Inc., 1986
18. *Gemischbildung bei Ottomotoren. Bericht über ein Seminar zum Stand der Entwicklung und zukunfuge Anforderungen an der TU Wien*. MTZ, 50 (1989) 5.
19. Godziszewski J., Mania R., Pampuch R.: *Zasady Planowania doświadczeń i opracowywania wyników pomiarów*. Wydawnictwo AGH, Kraków 1987.

20. Hasson D.A., Flint W.L.: *An investigation of the liquid petrol wall film in the manifold of a carburetted spark ignition engine: effect of the carburettor and manifold geometry on wall film quantities, engine performance and emissions*. SAE Techn. Pap. 1989.
21. Hauffe D.: *Application of Modern Engine Indicating Technology*. Journal of KONES, Vol. 1, No 1, 1994.
22. Hebda H., Niziński S., Pelc.: *Podstawy diagnostyki pojazdów samochodowych*. WKiŁ, Warszawa 1980.
23. Hertz H.M.: *Optical Techniques for Nonintrusive Studies on Combustion and High Voltage Systems*. Lund Reports on Atomic Physics LRAP-88. Lund Institute of Technology, Sweden, 1988.
24. Hypszer R.: *Światłowodowe sensory temperatury*. III Konferencja Naukowa: Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne. COE'94, t. III, 1994.
25. Klinkenberg H., Staab J.: *Zeitaufgelöste Messung von Automobilabgasen – Notwendigkeit der Anwendung und Grenzen der Technologie*. ATZ 90 (1988) 10.
26. Konopiński M.: *Elektronika w technice motoryzacyjnej*. WKiŁ, Warszawa 1987.
27. Kowalczyk M.: *Promienne właściwości płomieni silników wysokoprężnych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1995.
28. Kowalewicz A.: *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 1980.
29. Kowalewicz A.: *Tworzenie mieszanki i spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym*. WKiŁ, Warszawa 1984.
30. Kunisz D.: *Fizyczne podstawy emisyjnej analizy widmowej*. PWN, Warszawa 1973.
31. Mazurek S., Wendeker M.: *Uniwersalny sterownik mikroprocesorowy do systemu zapłonowego i wtryskowego*. Journal of KONES. Internal Combustion Engines, Vol. 1, No 1, 1994.
32. Merkisz J.: *Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, nr 1715, Poznań 1993.
33. Miyatake K., Ishida K., Kohsaka H., Harvey N.: *Fast Response NDIR for Real-Time Exhaust Measurement*. SAE Techn. Pap. 900501.
34. Newhall H.K.: *Combustion Proces Fundamentals and Combustion Chamber Design for Low Emissions*. SAE Techn. Pap. 751001.
35. Nitzschke E., Wolf H.: *Dynamische Abgasmessung mit Diodenlasern*. MTZ 52 (1991), 7/8.
36. Nutton D., Pinnock R.: *Closed Loop Ignition and Fuelling Control Using Optical Combustion Sensors*. SAE Techn. Pap. 900486.
37. Orkisz M. (red.): *Wymiana ładunku w czterosuwowych silnikach tłokowych*. WKiŁ, Warszawa 1991.
38. Piernikarski D., Wendeker M., Niewczas A.: *Możliwości diagnozowania procesu spalania w silniku spalinowym za pomocą czujników światłowodowych*. Mat. Konferencji

- „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”, Wyd. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 1995.
39. Piernikarski D., Wendeker M.: *Modelowanie procesu spalania w silniku benzynowym*. Mat. Konferencji „Badania Symulacyjne w technice samochodowej”. Wyd. Politechniki Lubelskiej, 1995.
40. Piernikarski D., Wendeker M.: *Możliwości wykorzystania czujników światłowodowych do sterowania silnikiem benzynowym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, filia Bielsko-Biała, z. 22, 1995.
41. Piernikarski D., Wendeker M.: *Ocena jakości procesu spalania na podstawie sygnału optycznego z cylindra silnika ZI*. Mat. Sem. „Diagnostyka współczesnych silników spalinowych”. Wyd. Navigator, Wrocław 1996.
42. Piernikarski D., Wituszyński K.: *Symulacyjny model współpracy silnika spalinowego z odbiornikiem*. Silniki Spalinowe 1-2, 1992.
43. Piernikarski D.: *Możliwości modelowania matematycznego emisji składników toksycznych*. Mat. Konf. „Badania symulacyjne w technice samochodowej”, Wyd. Politechniki Lubelskiej, 1993.
44. Pischinger R., Kraßnig G., Taučar G., Sams Th.: *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Springer Verlag, Wien 1989.
45. Ragnarson P.: *Spectroscopic imaging of effluent gases*. Diploma Paper, Lund Institute of Technology, Sweden 1988.
46. Remboski D.J., Plee S.L., Martin J.K.: *Optical sensors for combustion analysis and control*. Automotive Engineering, Vol. 97, No 6, 1989.
47. Ribbens W.B., Rizzoni G.: *Onboard Diagnosis of Engine Misfires*. SAE Techn. Pap. 901768, 1990.
48. Rizzoni G.: *Diagnosis of Individual Cylinder Misfires by Signature Analysis of Crankshaft Speed Fluctuations*. SAE Techn. Pap. 890884.
49. Rychter T., Teodorczyk A.: *Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego*. PWN, Warszawa 1990.
50. Saneyoshi K., Hanawa K., Kaneko M., Kobayashi H.: *Gas Flow Investigation by Stereography in Spark Ignition Engine*. SAE Techn. Pap. 910476.
51. Sasayama T., Shigeru O., Kuroiwa H., Suzuki S.: *Recent Developments of Optical Fiber Sensors for Automotive Use*. SPIE Vol. 840. Fiber Optic Systems for Mobile Platforms, 1987.
52. Schindler K.P.: *Diesel Combustion. IRC IDEA Programme*. Ingeneria Automotoristica. Vol. 44, No 3, 1991.
53. Servati H.B., Herman E.W.: *Spray / Wall Interactions Simulation*. SAE Techn. Pap. 890566.
54. Smith G.P., Crosley D.R.: *Chemistry Implications from Optical Diagnostics in Engine Research*. SAE Techn. Pap. 911784.

55. Sohma K., Yukitake T., Azuhata S., Takakku Y.: *Application of Rapid Optical Measurement to Detect the Fluctuations of the Air-Fuel Ratio and Temperature of a Spark Ignition Engine*. SAE Techn. Pap. 910489.
56. Spicher U., Krebs R.: *Optical Fiber Technique as a Tool to Improve Combustion Efficiency*. SAE Techn. Pap. 902138.
57. Sporton M.: *Sensor/actuator development at Lucas*. Automotive Engineer, Aug.-Sept. 1988.
58. Sunesson A.: *Laser and Optical Techniques Employed in Environmental Monitoring*. LRAP-84, Lund Institute of Technology, Sweden 1988.
59. Szustakowski M.: *Czujniki światłowodowe*. IV Krajowa Szkoła Optoelektroniki. Czujniki elektroniczne i światłowodowe oraz ich zastosowania. Skrypt nr 1, 1990.
60. Tabaczynski R.J., Heywood J.B., Keck J.C.: *Time-Resolved Measurements of Hydrocarbon Mass Flowrate in the Exhaust of a Spark-Ignition Engine*. SAE Techn. Pap. Trans. Vol. 81 (1972), p. 720112.
61. Tanaka M., Durbin E.J.: *Transient Response of a Carburettor Engine*. SAE Techn. Pap. 770046.
62. Vickers D.J., Włodarczyk M.T.: *A fiber optic sensor for combustion pressure measurement in a washer configuration*. SPIE Vol. 840. Fiber Optic Systems for Mobile Platforms, 1987.
63. Walzer P., Altendorf J.P., Geiger J., Waschatz U.: *A New Exhaust Emission Concept*. SAE Techn. Pap. 881156.
64. Wendeker M., Latański J.: *Nadzorowany system sterowania silnikiem ZI*. Zeszyty Naukowe PŁ Filii w Bielsku Białej, Budowa i Eksploatacja Maszyn, Nr 27, zeszyt 22, 1995.
65. Wendeker M., Piernikarski D., Surtel W., Wójcik J.: *Pomiary parametrów procesu roboczego tłokowego silnika spalinowego metodami optoelektronicznymi*. Journal of KONES Vol. 1, No 1, Warszawa 1994.
66. Wendeker M., Wituszyński K., Piernikarski D., Jaworski R., Surtel W.: *Stanowisko harmonizowane do badań elektronicznie sterowanych silników spalinowych*. Journal of KONES Vol. 1, No 1, Warszawa 1994.
67. Wendeker M.: *Dynamiczny model silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim*. Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska 1991.
68. Wendeker M.: *Wyglądanie eksperymentalnych wykresów indykatorowych metodą funkcji sklepanych*. Materiały konferencji MOTORCOMPUT '89, Jadwisin k/Warszawy, 1989.
69. Werlberger P., Rokita R., Chmela F.: *Observation of fuel injection and combustion by use of an endoscopic video system*. AVL LIST GmbH, Austria.
70. Węclaś M.: *Badania przepływu powietrza przez głowicę i cylinder silnika z użyciem światłowodowego anemometru laserowego (FOLDA)*. Politechnika Poznańska. Seria Rozprawy nr 275. Poznań 1992.

71. Węclaś M.: *Diagnostyka procesów tworzenia mieszanki i spalania w silnikach spaliniowych metodami laserowymi. Problemy badawcze i perspektywy rozwoju*. Politechnika Poznańska. Seria Rozprawy nr 223. Poznań 1990.
72. Witze P.O., Hall M.J., Bennett M.J.: *Cycle Resolved Measurements of Flame Kernel Growth and Motion Correlated with Combustion Duration*. SAE Techn. Pap. 900023.
73. *Zastosowanie czujników światłowodowych w mechanice*. Mat. sympozjum. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 1995.

