

Nowoczesne metody badań elementów aparatury wtryskowej silników ZS

Rozwój silników spalinowych zdeterminowany jest rozpoznaniem procesów w nich zachodzących. Wraz z ciągłym rozwojem konstrukcji silników spalinowych zmianie ulegają metody badawcze, które wymagają dostosowania technologicznego do obecnych i przyszłych wymagań stawianych elementom silników. W artykule przedstawiono nowoczesne metody badań elementów aparatury wtryskowej – badania wizualizacyjne i indykatorowe.

1. Wstęp

Badania silników spalinowych wymagają obecnie przeprowadzania ich w warunkach rzeczywistych, w których procesy zachodzą w sposób dynamiczny i szybkozmienny. Warunki panujące podczas badań są ograniczone ze względu na brak dostępu, wysoką temperaturę i ciśnienie. Tradycyjne metody badawcze okazują się niewystarczające i nie oddają w pełni przebiegu oraz istoty procesów. Za przykład może posłużyć analiza pracy elementów aparatury wtryskowej, ze szczególnym uwzględnieniem procesu wtrysku paliwa.

Możliwości uzupełnienia tradycyjnych metod badawczych stwarzają różne metody optyczne, których rozwój jest szczególnie widoczny w procesach wtrysku paliwa i spalania. Badania opierają się na metodzie bezinwazyjnej oraz bezstykowej, dzięki czemu zamontowanie układu pomiarowego nie zaburza procesu lub zaburza go w nieznacznym stopniu.

Celem badań optycznych jest określenie jednej lub kilku z niżej wymienionych wielkości [5]:

- składowych wektora prędkości przepływu czynnika,
- intensywności i kierunku zawirowania ładunku,
- geometrii i prędkości rozprzestrzeniania oraz głębokości penetracji strugi paliwa,
- struktury i widma rozpylenia oraz dynamiki ruchu kropeł,
- miejsca i chwili wystąpienia ognisk zapłonu,
- miejsca tworzenia się frontu płomienia, kierunku i prędkości jego rozchodzenia,
- turbulencji w płomieniu – tworzenia sadzy,
- wielkości, geometrii i względnej powierzchni obszaru objętego płomieniem,
- miejscowej temperatury i składu chemicznego.

Zwykle, za pomocą jednej z poniższych metod badań optycznych można określić zaledwie kilka wybranych wielkości.

2. Optoelektroniczne metody badawcze

Metody optoelektroniczne służą m.in. do obserwacji procesu wtrysku paliwa i spalania techniką video. Wykorzystanie sensorów światłowodowych możliwe jest obecnie dzięki zastosowaniu włókien szklanych i polimerowych, spełniających poniższe wymagania. Zainstalowane w silniku spalinywym elementy charakteryzować się odpornością na temperaturę (w zakresie od -40 do $+140^{\circ}\text{C}$), przyspieszenia wibracyjne (do 30 g), wysoki poziom zakłóceń elektromagnetycznych oraz odpornością na zanieczyszczenia [9].

Światłowody mogą być stosowane do transmisji sygnałów optycznych do i z głowic pomiarowych, umieszczonych w przedziale silnika, gdy niezbędne elementy elektroniczne przetwarzające sygnały znajdują się wewnątrz pojazdu. Minimalny jest również wpływ zakłóceń elektromagnetycznych na przebieg sygnału.

Metody optoelektroniczne wykorzystują ogół zjawisk zachodzących w torze optycznym, transmitującym sygnał świetlny podczas oddziaływania na nie wielkości zewnętrznych. Ze względu na rodzaj mierzonej wielkości, metody te są alternatywne do metod konwencjonalnych (pomiar przesunięcia lub ciśnienia za pomocą czujników magnetycznych lub piezoelektrycznych) lecz o większej dokładności (rozdzielczości) oraz większej odporności na zakłócenia elektromagnetyczne, pochodzące z obcych pól zewnętrznych. Sensory światłowodowe znalazły zastosowanie m. in. przy pomiarze ciśnienia w przewodach wtryskowych i cylindrze silnika. Wykorzystanie metod optoelektronicznych (w odniesieniu do procesów silnikowych) może pozwolić na:

- ocenę składu mieszanki bezpośrednio w cylindrze (w przeciwieństwie do czujników umieszczonych w kolektorze wylotowym, pomiar taki jest szybszy oraz nie uśrednia wyników dla wszystkich cylindrów),
- bardziej precyzyjne wykrywanie zjawiska spalania stukowego (dynamika sygnału optycznego jest wyższa w porównaniu z dynamiką sygnału czujnika wykorzystującego drgania głowicy czy korpusu silnika) [9].

Część metod umożliwia jakościowo nowe techniki pomiaru procesu roboczego silnika poprzez bezpośredni wgląd w komorę spalania i analizę optyczną procesu wtrysku paliwa i spalania. Obserwacje strugi paliwa i płomienia w komorze spalania, umożliwiają uzyskanie nowych możliwości analizy procesu spalania w czasie rzeczywistym. Przy użyciu tych metod uzyskuje się jakościowy i ilościowy wzrost dokładności pomiaru zjawisk zachodzących w silniku w czasie jego pracy.

Przykładem systemu umożliwiającego wykorzystanie wyżej opisanej metody jest komputerowy system wizualizacyjny.

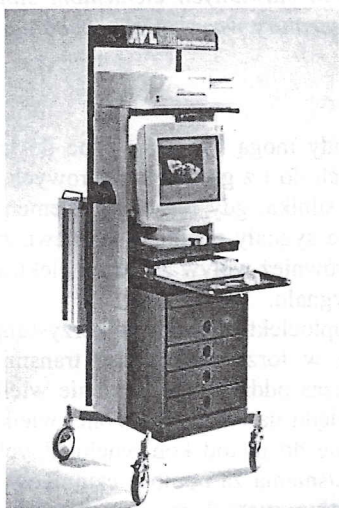
3. Badania wizualizacyjne wtrysku paliwa

Nowoczesnym systemem do badania procesu wtrysku i spalania metodami optycznymi jest EVS 513D (rys. 1). System ma zastosowanie do stroboskopowych obserwacji okre-

sowych zjawisk, zarówno na silniku, jak i na stanowisku pozasilnikowym. Tworzą go (rys. 2):

- cyfrowa kamera TMC-9700,
- układ generacji oświetlenia zawierający stroboskop i źródło światła,
- komputer z cyfrową kartą video.

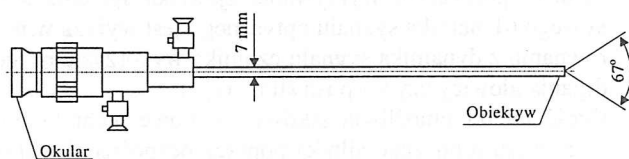
Ciągła obserwacja zmiennych zjawisk realizowana jest przez sprzężenie kamery video z endoskopem. Obraz z endoskopu, uzyskany za pomocą modułu stroboskopowego, transmitowany jest do modułu kontrolnego. Następnie prze-



Rys. 1. System do wizualizacji procesu spalania EVS 513D [4]

W systemie EVS 513D endoskopy (rys. 3) występują w dwóch wykonaniach:

- endoskop niechłodzony może być stosowany, gdy temperatura ośrodka, w którym pracuje, nie przekracza 100°C , a ciśnienie wynosi poniżej 2 bar;
- endoskop chłodzony jest stosowany, gdy temperatura ośrodka przekracza 100°C .

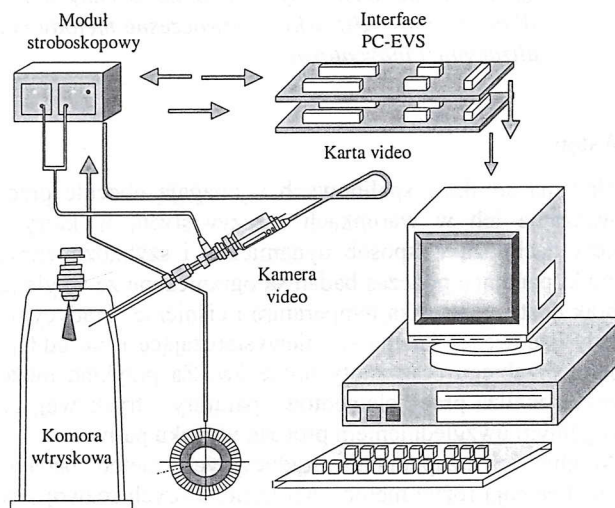


Rys. 3. Endoskop do badania procesów wtrysku i spalania [4]

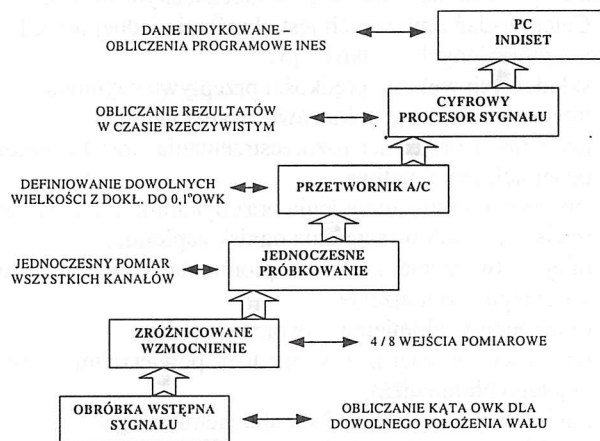
4. Badania procesów szybkozmiennych

Do badań indykatorowych wykorzystuje się obecnie skomputeryzowane stanowiska, czego przykładem może być system pomiarowy INDISET 620 (rys. 4) firmy AVL. Główny moduł systemu składa się z 8-kanalowego zespołu wzmacniaczy operacyjnych, dzięki którym możliwy jest pomiar 8 niezależnych wielkości. Wzmacniacze ładunku umożliwiają bezpośrednie przyłączenie czujników pomiarowych. Sygnały ze wzmacniaczy ładunku przesyłane są do urządzenia INDISET (rys. 5).

syłany zostaje do modułu pamięci obrazu, gdzie zostaje „zamrożony”, zapisany w pamięci i uwidoczniony na monitorze. Dzięki nagrywaniu możliwa jest późniejsza komputerowa obróbka obrazu. Aby rejestracja mogła być odniesiona do odpowiedniej chwili (położenia wału korbowego silnika lub wału krzywkowego pompy wtryskowej) konieczne jest zamontowanie znacznika kąta obrotu wału. Znacznik dostarcza 3600 sygnałów na 1 obrót oraz 1 sygnał sterujący. Pozwala to na rejestrację stroboskopową co $0,1^{\circ}\text{OWK}$.



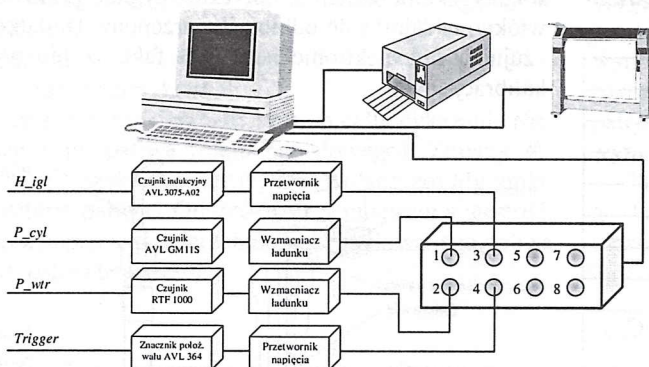
Rys. 2. Schemat cyfrowego systemu video EVS 513D do badań rozpylenia paliwa na stanowisku badawczym



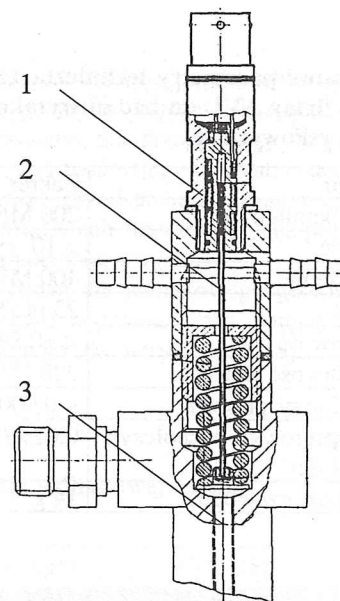
Rys. 4. Idea systemu pomiarowego INDISET 620 [3]

Do pomiaru wzniosu iglicy stosuje się czujnik indukcyjny (rys. 6), składający się z cewki indukcyjnej (1), rdzenia pomiarowego (2), który został przyklejony do talerzyka (3) drążka opierającego się o iglicę, ustalającego ciśnienie otwarcia wtryskiwacza przez napięcie wstępne sprężyny.

System współpracuje z komputerem typu PC. Komputer jest przystosowany do obsługi programu akwizycji danych – ISET, który umożliwia sprzetową i programową synchronizację GMP, posiada możliwość wprowadzenia wartości korygującej, jak również kalibrację tej wartości. Podstawowe dane techniczne wzmacniaczy ładunku oraz napięcia podano w tablicy 1.



Rys. 5. Schemat połączeń systemu pomiarowego INDISET 620



Rys. 6. Schemat czujnika wzniosu iglicy wtryskiwacza

Tablica 1

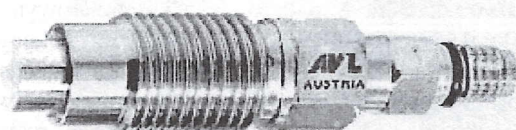
Dane techniczne wzmacniaczy ładunku i napięcia [3]

Lp.	Nazwa wielkości	Jednostka	Wzmacniacz napięcia 3066A01	Wzmacniacz ładunku 3057A01
1	Zakres regulacji czułości	[pC/bar]	–	1,0...99,99
2	Zakres pomiarowy	[mV/pC]	0,625...20	0,1...100
3	Zakres częstotliwości	[kHz]	0...200	0...200
5	Nieliniowość	[%]	< ±0,01	< ±0,01
6	Dryft (przy 25°C)	[pC/s]	±0,01	±0,01
7	Zakres temp. pracy	[°C]	0...+50	0...+50
8	Napięcie	wejściowe	[V/mA]	+15V/95 mA –15V/50 mA
		wyjściowe	[V/mA]	+15V/20 mA –15V/20 mA

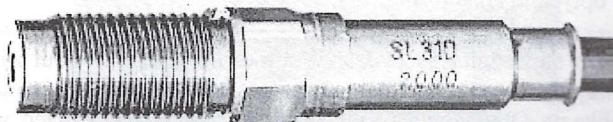
5. Czujniki do badań wysokociśnieniowych układów wtryskowych

Wzrost wymagań dotyczących ograniczenia emisji składników szkodliwych spalin wymaga zmian w układach wtrysku i spalania paliwa. Optymalizacji podlega przede wszystkim jakość rozpylenia i przebieg spalania. Wymusza to stosowanie wyższych ciśnień wtrysku paliwa. Ewolucyjny rozwój systemów wtryskowych od konwencjonalnych do common-rail i układów pompowtryskiwaczy, wymaga stosowa-

nia ciśnień wtrysku przekraczających 1800 bar. Możliwości badawcze na poziomie obecnej technologii są dostosowane do ciśnień panujących w nowoczesnych układach wtryskowych. Czujniki pomiarowe obecnie stosowane zapewniają pomiar do ciśnienia rzędu 2000 bar, w wykonaniu piezokwarcowym (rys. 8) oraz jako tensometryczne (rys. 9). Obecny poziom technologiczny zapewnia dużą trwałość produkowanych czujników (tabl. 2 i 3).



Rys. 8. Czujnik kwarcowy QL61D – AVL [1]



Rys. 9. Czujnik tensometryczny SL31D2000 – AVL [1]

Tablica 2
Podstawowe parametry techniczne czujnika kwarcowego QL16D firmy AVL do badań wysokociśnieniowych układów wtryskowych [1]

Parametr	Zakres
Zakres pomiarowy	200 MPa
Trwałość	$> 10^7$ cykli
Przeciążenie	400 MPa
Czułość	23 pC/MPa
Nieliniowość	$< \pm 0,8\%$
Częstotliwość własna	220 kHz
Czułość przyspieszeń	$< 0,0001$ MPa/g
Temperaturowy współczynnik czułości	0,02%/°C przy 20...80°C
Masa (bez przewodu)	14 g

Tablica 3
Podstawowe parametry techniczne czujnika tensometrycznego SL31D2000 firmy AVL do badań wysokociśnieniowych układów wtryskowych [1]

Parametr	Zakres
Zakres pomiarowy	200 MPa
Trwałość	$> 10^8$ cykli
Przeciążenie	400 MPa
Przeciążenie impulsowe	600 MPa
Czułość (przy 24°C)	$4,5 \times 10^{-3}$ mV / V x MPa
Nieliniowość	$\pm 0,5\%$
Częstotliwość własna	> 100 kHz
Temperatura pracy	20...120°C
Czułość temperaturowa	$< \pm 1$ % przy 20...120°C
Temperaturowy punkt przesunięcia zera	$< \pm 1$ % przy 20...120°C
Napięcie wzbudzenia	4 V
Masa (bez przewodu)	19 g

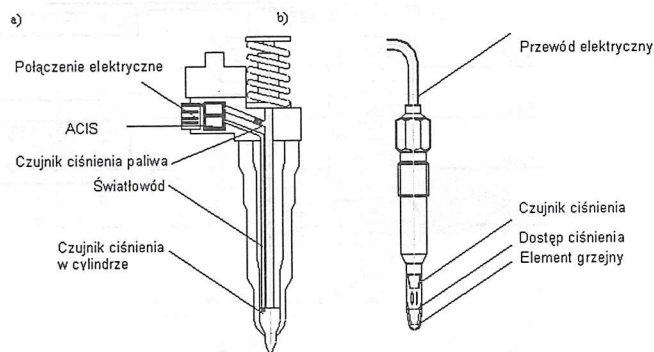
Czujniki optoelektroniczne znajdują szerokie zastosowanie w badaniach zarówno układów wtryskowych (rys. 10a) jak i procesu spalania (rys. 10b) ze względu na właściwości oraz cechy użytkowe (tabl. 4) [7] [8]. Miniaturyzacja czujnika oraz wysoka odporność na ciężkie warunki pracy sprawiają, że czujnik może być połączony z pracującymi elementami silnika, takimi jak wtryskiwacze czy świece żarowe. Nie wymaga również wprowadzania modyfikacji w stosowanych rozwiązaniach głowic silników.

Sensor optoelektroniczny składa się z trzech podstawowych elementów:

- czulej głowicy bezpośrednio wystawionej na ciśnienie;
- włókna optycznego,
- modułu optoelektronicznego zawierającego składniki optyczne i elektroniczne.

Do najważniejszych należy optoelektroniczny moduł zawierający: fotodiode, LED oraz tzw. Specyficzną Połączoną Aplikację Obwodową (ASIC). Dwa zaciski występujące w module służą do doprowadzenia zasilania oraz wyprowadzenia impulsu pomiarowego. Moduł także kontroluje intensywność światła, wzmacnia i filtruje sygnał fotodiody. Odpowiedzią sensora na zmianę ciśnienia jest przemieszczenie diafragmy, która zmienia optyczny sygnał przesyłany przez włókno nadajnika do odbiornika przepony. Dodatkową zaletą czujnika optoelektronicznego jest fakt, iż nie wymaga on kalibracji.

ność światła, wzmacnia i filtruje sygnał fotodiody. Odpowiedzią sensora na zmianę ciśnienia jest przemieszczenie diafragmy, która zmienia optyczny sygnał przesyłany przez włókno nadajnika do odbiornika przepony. Dodatkową zaletą czujnika optoelektronicznego jest fakt, iż nie wymaga on kalibracji.



Rys. 10. Sposoby rozmieszczenia czujników optoelektronicznych: a) we wtryskiwaczu, b) w świecy żarowej [2]

Tablica 4
Podstawowe parametry techniczne czujnika AutoPSI-S2000 firmy Optrand do badań wysokociśnieniowych układów wtryskowych [6]

Parametr	Zakres
Zakres ciśnienia	0-200 MPa
Przeciążenie	1,5 x zakres ciśnienia
Częstotliwość własna	> 150 kHz
Zakres częstotliwości	0,1 Hz to 15 kHz
Temperatury pracy czujnika	-40...300°C
Temperaturowy współczynnik czułości	$\pm 0,03\%$ /°C
Nieliniowość i histereza	$\pm 1,0\%$
Sygnał wyjściowy	0,5 – 5 V analogowe
Diagnostyczny sygnał wyjściowy	0 – 3,6 V analogowe
Impedancja wyjściowa	250 Ω
Zasilanie	9 – 18 V, 85 mA
Rodzaj ciśnienia mediów	gazowe lub cieczowe
Wzmacniacz	zintegrowany z czujnikiem
Trwałość	500 x 10 ⁶ cykli lub 3 lata

6. Badania rozpylenia paliwa

Wykorzystując system do wizualizacji procesów silnikowych możliwa jest ocena strugi rozpylonego paliwa. Paliwo wtryskiwane jest do komory, do której wprowadza się endoskop w celu oceny zmian strugi wtryskiwanej dawki paliwa wraz ze zmianą jego właściwości fizycznych.

Cyfrowa kamera w połączeniu z komputerowym systemem akwizycji obrazu, pozwala na rejestrację kolejnych faz wtrysku paliwa. Poszczególne fazy wtrysku (w odstępach 0,1° obrotu wału pompy wtryskowej) są zapisywane w komputerze, tworząc obrazy przebiegu procesu rozpylenia.

Ocenie podlegają m.in.:

- stopień rozpylenia paliwa (ewentualnie występowanie podciekania),
- zasięg strugi,
- występowanie dotrysków.

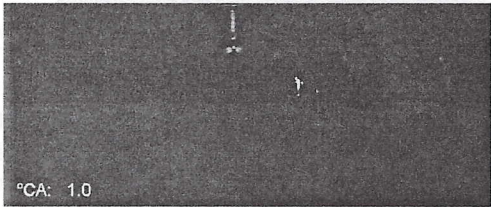
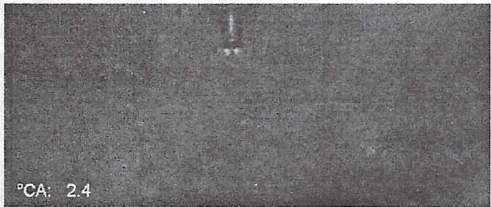
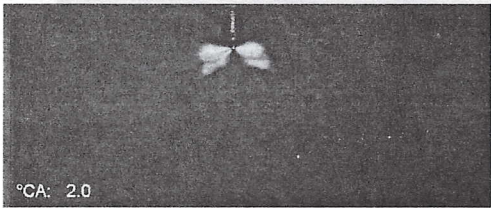
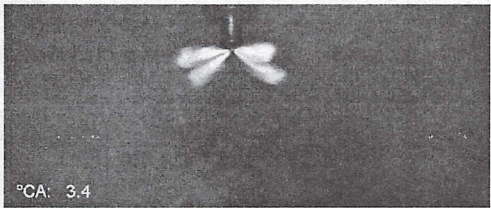
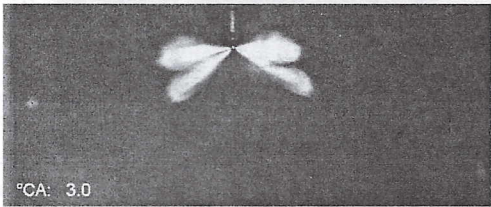
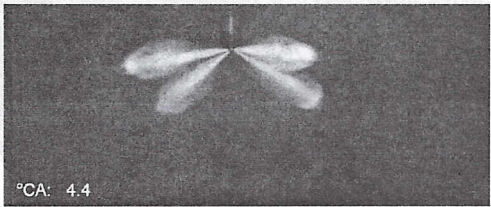
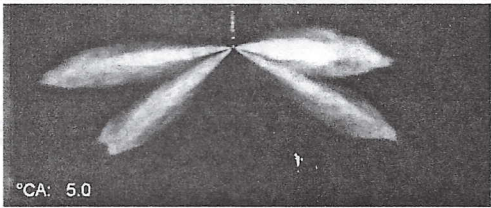
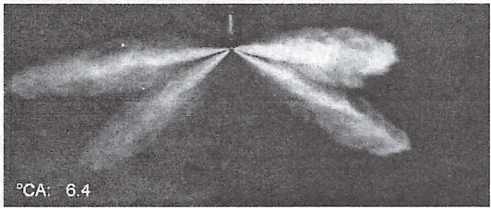
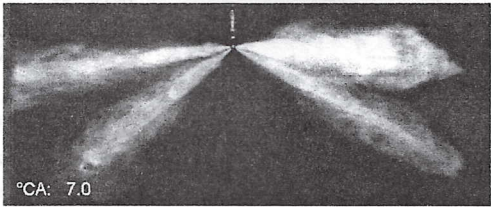
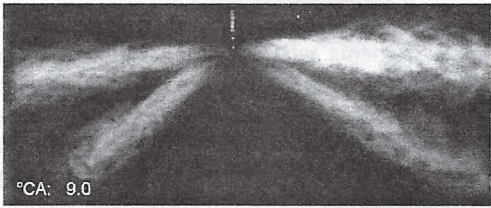
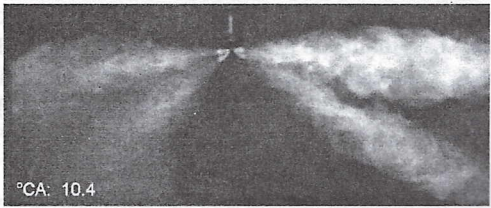
Przeprowadzanie takich badań ma na celu wykazanie różnic w rozpyleniu paliwa (oleju napędowego). Zmiany we właściwościach fizykochemicznych wywołane zostały zmianą temperatury paliwa. Odnotowano zmniejszoną gęstość, lepkość oraz napięcie powierzchniowe wtryskiwanego paliwa wraz ze wzrostem temperatury.

Układ ten pozwala na analizę powtarzalności procesu wtrysku (np. zmiany początku tłoczenia, kształtu i zasięgu strugi). Pomiary wykonano dla początkowej fazy wtrysku wynoszącej 10°OWP, co uznać należy za wystarczająco długi okres do oceny. Obrazy przedstawiają strugę rozpylonego paliwa o różnych właściwościach fizycznych, lecz po jednakowym czasie od chwili początku wtrysku.

Przeprowadzenie badań dla jednakowego geometrycznego kąta początku tłoczenia paliwa przez pompę, pozwala oszacować opóźnienie początku wtrysku (tabl. 5).

Tablica 5

Strugi rozpylonego paliwa o różnych właściwościach fizycznych dla jednakowej chwili, liczonej od początku wtrysku

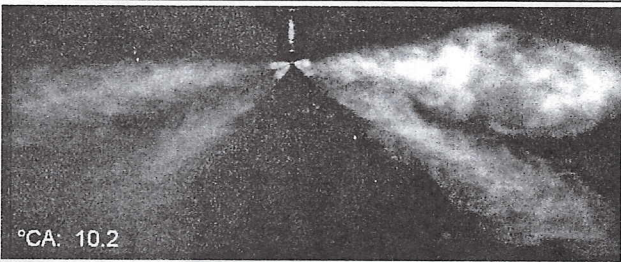
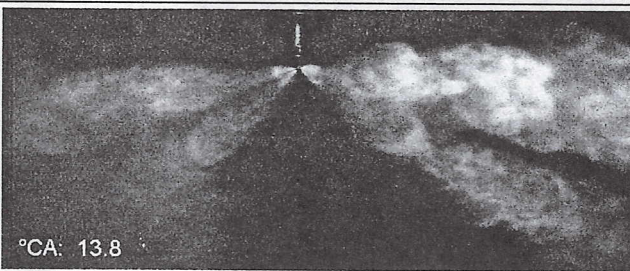
α_{wtr}	$\rho_{pal} = 820 \text{ kg/m}^3; \nu_{pal} = 1,822 \text{ cSt}$	$\rho_{pal} = 700 \text{ kg/m}^3; \nu_{pal} = 0,745 \text{ cSt}$
0		
1		
2		
4		
6		
8		

Obserwacja obrazów strug rozpylonego paliwa pozwala zauważyć wpływ zmian właściwości fizycznych na jakościowy charakter tych strug: ze spadkiem parametrów (gęstości, lepkości i napięcia powierzchniowego) zwiększa się objętość i zmniejsza „optyczna gęstość” poszczególnych

strug, co można łączyć ze zróżnicowaniem rozpylenia paliwa. Widoczne jest również zwiększenie zasięgu strugi. Badania wizualizacyjne pozwalają zaobserwować występowanie tzw. dotrysków (tabl. 6).

Tablica 6

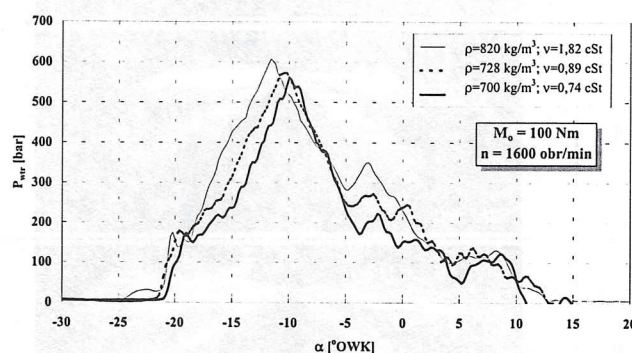
Parametry zjawiska dotrysku paliwa

Właściwości paliwa		$\rho_{\text{pal}} = 820 \text{ kg/m}^3$; $\nu_{\text{pal}} = 1,82 \text{ cSt}$	
$P_{0 \text{ wtr}}$		17,5 MPa	
Pierwszy dotrysk	10,2°OWP		
Rozpylenie paliwa w czasie dotrysku	10,6°OWP		
Drugi dotrysk paliwa	13,8°OWP		

Pojawiające się na obrazach wyraźne zwiększenie „gęstości optycznej” strugi przy wypływie paliwa z otworków rozpylacza pod koniec „wtrysku właściwego” potwierdza tę tezę. Zjawisko dotrysku może być przyczyną występowania nadmiernej emisji składników toksycznych (głównie PM) i zwiększonego zużycia paliwa.

7. Badania wielkości szybkozmiennych w układach wtryskowych

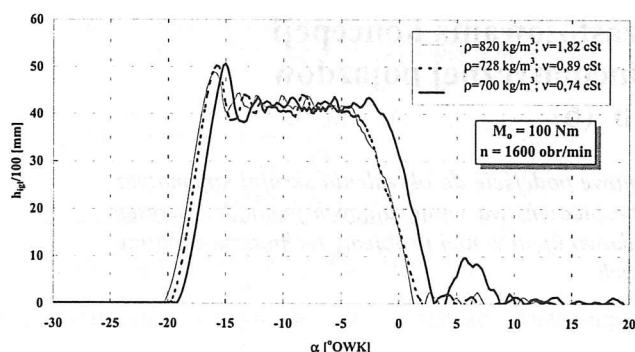
Badań procesów szybkozmiennych, do których zaliczyć można: przebieg ciśnienia gazów w cylindrze, ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym oraz wznios iglicy wtryskiwacza dostarczają wielu cennych informacji o przebiegu wtrysku i procesie spalania. Jeśli poparte są badaniami wizualizacyjnymi są cennym materiałem badawczym, służącym do dalszej optymalizacji procesów silnikowych. Badania indykatorowe pozwalają na rejestrację wpływu zmian właściwości paliwa na przebieg ciśnienia wtrysku (rys. 11).



Rys. 11. Przykładowy przebieg ciśnienia wtrysku przy zmianie właściwości paliwa

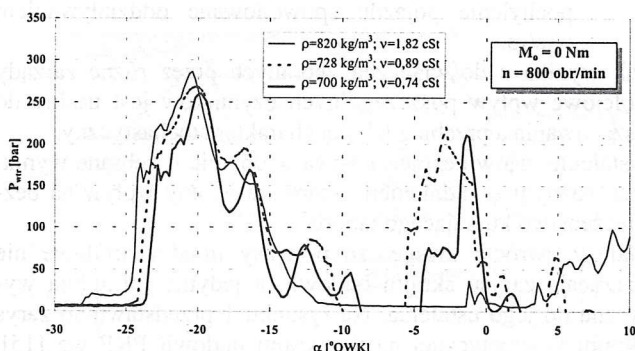
Zmiana właściwości paliwa wskazuje na spadek maksymalnego ciśnienia wtrysku. Zauważalne jest również opóźnienie narastania ciśnienia w początkowej fazie oraz znaczne różnice w przebiegu ciśnienia po otwarciu rozpylacza wtryskiwacza. Badania pozwalają również stwierdzić szybszy spadek ciśnienia po osiągnięciu maksimum w wyniku zmian właściwości paliwa.

Odnotowane obniżenie ciśnienia wtrysku P_{wtr} przy spadku m.in. gęstości oraz lepkości paliwa skutkuje zmianami w przebiegu wzniosu iglicy wtryskiwacza (rys. 12).

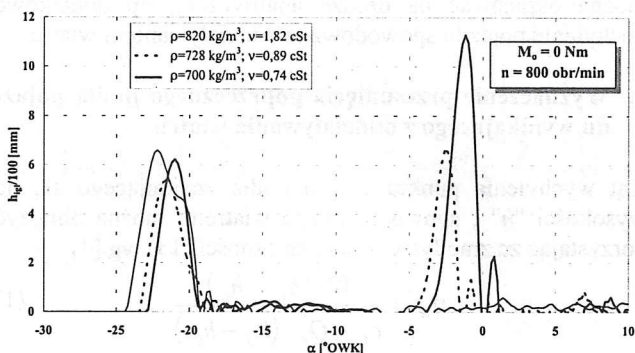


Rys. 12. Przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza dla różnych właściwości paliwa

Wśród wyników pomiarów uwagę zwracają te, które dotyczą biegu jałowego i bardzo małych obciążeń silnika (fazy: 1, 2, 7, 12 i 13 w teście ECE R49). W tych warunkach odnotowano niekorzystne oddziaływanie zmian własności paliwa na pracę układu wtryskowego: jest ona niestabilna – pojawiają się dotryski (rys. 13 i 14).



Rys. 13. Przebieg ciśnienia wtrysku paliwa w warunkach biegu jałowego



Rys. 14. Przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza podczas obrotów biegu jałowego

Badania sygnałów szybkozmiennych pozwalają na ocenę przebiegu ciśnienia wtrysku podczas otwarcia wtryskiwacza, a także co jest istotne, po zakończeniu wtrysku. Zaburzenia ciśnienia w przewodzie wtryskowym (rys. 13) przenoszą się na iglicę wtryskiwacza powodując również zaburzenia (dotryski). Standardowe

metody pomiarowe pozwalają jedynie odnotować zwiększone zużycie paliwa, nie charakteryzując całościowo tego zjawiska.

8. Podsumowanie

Nowoczesna technika badawcza i obliczeniowa stwarza szerokie możliwości w zakresie badań elementów aparatury wtryskowej. Coraz częściej obejmuje również procesy spalania paliwa. Zaawansowane rozwiązania technologiczne elementów silników spalinowych: wysokociśnieniowe systemy wtrysku (common-rail oraz pompowtryskiwacze) wymuszają rozwój techniki badawczej w postaci zwiększonych wartości pomiarowych ciśnień wtrysku, dokładności pomiarowych, miniaturyzacji oraz trwałości. Szerokie zastosowanie zyskują czujniki optoelektroniczne, które parametrami technicznymi są konkurencyjne w stosunku do czujników piezokwarcowych. Cyfrowa technika pomiarowa umożliwia szerokie zastosowanie badań endoskopowych i indykatorowych w odniesieniu do procesów wtrysku oraz spalania paliwa.

Niektóre z opisanych metod (np. czujniki optoelektroniczne) znajdują zastosowanie w systemach diagnostyki pokładowej OBD. System OBD będzie obowiązywał dla pojazdów wyposażonych w silniki wysokoprężne od 2005 roku [9]. Ciągłej kontroli przez układ podlegają m.in.:

- sygnał elektryczny z czujnika wzniosu iglicy (rzeczywisty początek wtrysku),
- temperatura paliwa,
- dawka paliwa (rzeczywista wielkość dawki),
- elektryczne funkcje elementów wykonawczych: zaworu początku wtrysku i nastawnika dawki.

W przypadku niezgodności rzeczywistego sygnału z wartością zadaną, świadczącej o wystąpieniu usterki, wtrysk paliwa jest realizowany na podstawie charakterystyk zapisanych w pamięci sterownika (jednocześnie aktywowany jest wskaźnik MIL).

Literatura

- [1] Materiały firmy AVL – List GmbH.
- [2] Materiały firmy Optrand Inc.
- [3] Operating Instructions INDISET 620, AVL, Graz 1995.
- [4] Operating Manual ENGINE VIDEOSCOPE 513D, AVL, Graz 1998.
- [5] Serdecki W.: Badania układów silników spalinowych – Laboratorium. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [6] Włodarczyk M.T., Poorman T., Xia L., Arnold J., Coleman T.: Embedded Fiber-Optic Combustion Pressure Sensor for Automotive Engine Controls. World Automotive Congress, FISITA, Paris 1998.
- [7] Włodarczyk M.: Long-Life Fiber-Optic Pressure Sensors for Harsh Environment Applications. 9th Trade Fair and Conference Sensor, Nuremberg 1999.
- [8] Włodarczyk M.: High Accuracy Low-Cost Cylinder Pressure Sensor for Advanced Engine Controls., SAE Technical Paper Series 2001-01-0991.
- [9] www.auto-online.pl