

Jerzy CISEK

WIZUALIZACJA WTRYSKU I SPALANIA PALIWA W SILNIKU WYSOKOPRĘŻNYM

Visualisation of fuel injection and combustion in diesel engine

Wstęp

Możliwości poprawy parametrów energetycznych oraz zmniejszenia emisji toksycznych składników spalin silników spalinowych wymagają coraz precyzyjniejszej organizacji przebiegu procesu wtrysku i spalania paliwa. W celu optymalizacji procesów zachodzących wewnątrz cylindra silnika przestaje zatem wystarczać wyłącznie analiza zmian podstawowych parametrów wyjściowych silnika. Do bezpośredniej oceny przebiegu wtrysku paliwa, sposobu tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej oraz jej spalania coraz bardziej niezbędna staje się możliwość wizualnej oceny tych zjawisk. Istnieje szereg istotnych problemów związanych z rejestracją obrazów wewnątrz cylindra silnika spalinowego. Do najistotniejszych należą: wysoka temperatura i ciśnienie czynnika roboczego oddziałującego na element optyczny aparatury pomiarowej, brak wystarczającej ilości miejsca w głowicach nowoczesnych silników do optycznego dostępu do wnętrza cylindra oraz bardzo duża szybkozmienność rejestrowanych zjawisk. W artykule podano przykłady rozwiązania tego typu trudności. Ponadto porównano systemy wizualizacyjne różnych firm pod kątem szybkości rejestracji i częstotliwości próbkowania obrazu, rozdzielczości i czułości optycznej, możliwości archiwizacji obrazów i kosztów zakupu. Z punktu widzenia przydatności w badaniach silnikowych analizie poddano 2 metody wizualizacji spalania. Metoda pierwsza polega na stosowaniu szybkiej kamery i filmowaniu części jednego cyklu pracy silnika z małą rozdzielczością próbkowania. Metoda druga wykorzystuje cyfrową kamerę do rejestracji obrazów pochodzących z różnych cykli pracy silnika i przesuniętych o wymagany, niewielki interwał kąta obrotu wału korbowego (częstotliwość rejestracji obrazów maks. co 0,1 °OWK).

Dr inż. **Jerzy Cisek**, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

Porównanie różnych systemów wizualizacyjnych

Warunki pomiarów wizualizacji przebiegu procesów wtrysku i spalania paliwa w cylindrze silnika wysokoprężnego odróżnia nieco aparaturę pomiarową tego typu od systemów szybkiego filmowania stosowanych w innych dziedzinach nauki. Do specyfiki pomiarów silnikowych należy zaliczyć konieczność zabezpieczenia elementów optycznych przed wysoką temperaturą, minimalizację gabarytów sondy (endoskopu), zapewniającej optyczny dostęp do komory spalania oraz pomiary wykonywane w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika (a nie w funkcji czasu).

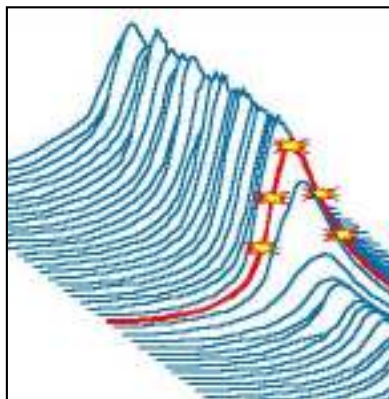
Klasyczne systemy szybkiego filmowania pozwalają, jak wynika z danych zamieszczonych w tab. 1, na filmowanie z maksymalną prędkością do 4500 klatek/s. Przy prędkości obrotowej silnika 4500 obr./min daje to możliwość rejestracji obserwowanych zjawisk co 6 °OWK (odległość pomiędzy kolejnymi ekspozycjami).

Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów różnych systemów wizualizacyjnych

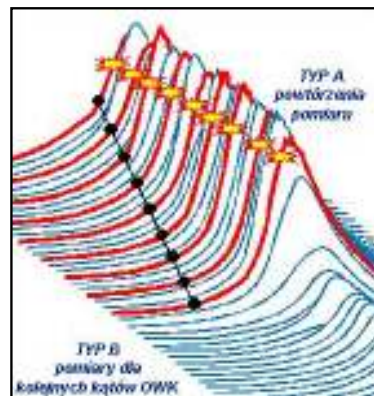
Nazwa systemu	prędkość filmowania	Czułość optyczna	Rozdzielczość	Akwizycja danych	Cena odniesiona do ceny AVL 513D
	klatek/s	ASA	pixel	klatek	%
High Speed Video <i>Kodak 4540</i>	4500	45	256 x 256	1000	200
Med. Speed Video <i>Kodak MotionCorder</i>	600	800	640 x 60	215	50
Med. Speed Video Colour <i>Kodak RO Imager</i>	1000	400	512 x 384	500 opcja: 2000	80
CCD-Sysem <i>SMETEC Imaging System</i>	30	b.d.	494 x 659	b.d.	50
ICCD-Sysem <i>SMETEC Imaging System</i>	30	b.d.	494 x 659	b.d.	100
PMT-UV Sysem <i>SMETEC Imaging System</i>	200	b.d.	1920	b.d.	600
VideoScope <i>513 D AVL</i>	12	1000	786 x 484	4000	100

Z doświadczenia wiadomo, że analiza zjawisk związanych z przebiegiem wtrysku, rozpylenia paliwa, przygotowania mieszaniny palnej i spalania z rozdzielczością mniejszą niż 0,5 OWK nie daje wystarczającej ilości informacji do interpretacji przyczynowo-skutkowej badanych zjawisk.

Ponadto, jak obrazuje rys. 1, ujemną cechą rejestracji procesów w cylindrze silnika konwencjonalnym systemem szybkiego filmowania jest przypadkowość wyboru cyklu pracy silnika poddawanego analizie. W tego typu systemach pomiarowych nie ma możliwości wyboru reprezentatywnego cyklu do rejestracji i dalszej analizy. Ze względu na naturalne fluktuacje kolejnych obiegów silnika uzyskiwane wyniki oparte mogą być na przypadkowo bardzo dobrych lub przypadkowo bardzo złych cyklach pracy silnika, co z kolei może prowadzić do formułowania fałszywych wniosków.



Rys. 1. Schemat rejestracji procesów w cylindrze silnika konwencjonalnym systemem szybkiego filmowania [4]



Rys. 2. Schemat rejestracji procesów w cylindrze silnika systemem AVL Engine VideoScope 513D

Należy mieć na uwadze również fakt, że pomiary wykonywane w funkcji czasu nie są adekwatne do pomiarów wykonywanych w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika. Wynika to oczywiście z zasady pracy tłokowego silnika spalinyowego, dla którego prędkość kątowa jest funkcją kąta obrotu wału korbowego również w warunkach ustalonych pracy silnika. Zatem w różnych etapach realizacji obiegu termodynamicznego tym samym interwałem czasu będą odpowiadały inne interwały kąta obrotu wału korbowego. Gdyby założyć, że prędkość obrotowa silnika wynosi 4500 obr./min, a stopień nierównomierności biegu silnika samochodowego $\delta = 1/200$, to w czasie 1 ms w końcowym okresie suwu sprężania (tuż przed samym samozapłonem) wał korbowy obróciłby się o $27,5^\circ\text{OWK}$, natomiast w suwie rozprężania w ciągu 1 ms wał korbowy zdążyłby wykonać obrót o 28°OWK . Stopień nierównomierności biegu silnika zależy nie tylko od prędkości obrotowej i od obciążenia silnika, ale również od zastosowania tego silnika i tak np. dla silników ciągnikowych mieści się w zakresie $\delta = 1/60\text{--}1/65$.

Z przedstawionych powodów korzystniejsze wydaje się stosowanie do wizualizacji przebiegu wtrysku i spalania paliwa w silniku wysokoprężnym cyfrowych systemów pomiarowych, archiwizujących obrazy w funkcji kąta obrotu wału korbowego nie z jednego, ale z wielu cykli pracy silnika, tak jak przedstawiono schematycznie na rys. 2. Taki sposób postępowania pozwala na filmowanie i analizę według dwóch metod:

- typ A – rejestracja obrazów z różnych cykli pracy silnika dla tego samego kąta obrotu wału korbowego
- typ B – rejestracja obrazów z różnych cykli pracy silnika dla kolejnych kątów obrotu wału korbowego przesuniętych o deklarowany interwał (maksymalna „rozdzielczość” próbkowania wynosi $0,1^\circ\text{OWK}$).

Przy analizie obrazów odpowiadających temu samemu kątowi wału korbowego (pochodzących z różnych cykli pracy silnika) możliwa jest obróbka statystyczna

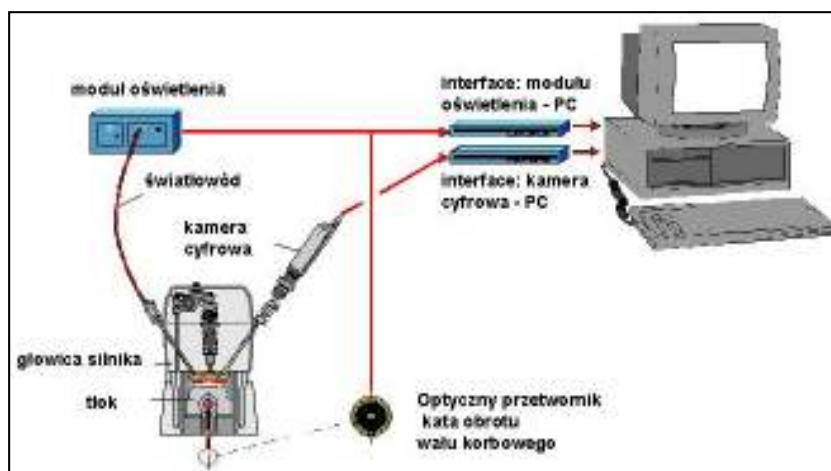
wyników badań, dająca pogląd na niepowtarzalność badanych zjawisk oraz możliwość określenia uśrednionego lub reprezentatywnego cyklu pracy silnika.

Po pomiarze dla kolejnych kątów obrotu wału korbowego silnika można stworzyć swoisty film pozwalający na wizualną analizę przebiegu procesu wtrysku i spalania paliwa w cylindrze silnika wysokoprężnego.

Dla obu opcji (pomiar według metody A i B) możliwe jest dodatkowo określenie rozkładu temperatur w cylindrze silnika podczas spalania paliwa. Izotermmy obliczane są w oparciu o metodę dwóch kolorów.

Stanowisko pomiarowe AVL Engine VideoScope 513D

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 3. Optyczny dostęp do komory spalania (lub innego miejsca rejestracji obrazów) zapewnia endoskop. Element ten połączony jest bezpośrednio z obiektywem kamery cyfrowej. Zastosowano cyfrową kamerę CCD firmy Pulnix o wysokiej rozdzielczości 768×484 punktów. Czas otwarcia obiektywu dla rejestracji procesu spalania wynosi $60 \mu\text{s}$ ($1/16000 \text{ s}$). Oczywiście można stosować dłuższe ekspozycje np. dla zjawisk nie będących źródłem światła. Maksymalna częstotliwość wyzwalania pomiaru wynosi 12 Hz. Ponieważ kolejne obrazy pobierane są z różnych cykli pracy silnika, to częstotliwość rejestracji nie ogranicza bezpośrednio odległości kątowej kolejnych, rejestrowanych ekspozycji. Dzięki temu system pomiarowy dokonuje archiwizacji obrazów zjawisk w cylindrze silnika przesuniętych względem siebie o $0,1^\circ \text{OWK}$.

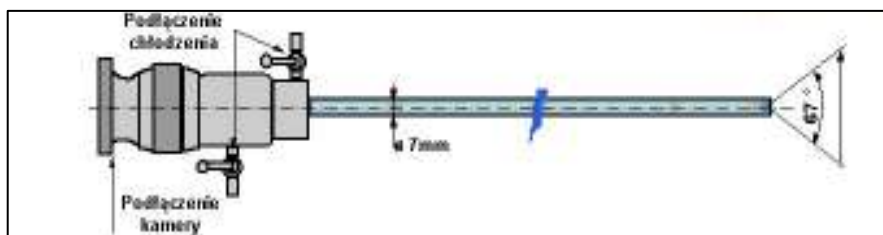


Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego do wizualizacji wtrysku i spalania paliwa w silniku wysokoprężnym AVL Engine Videoscope 513D [1]

Kolejne ekspozycje wyzwalane są sygnałem pochodzącym z optycznego przetwornika kąta obrotu wału korbowego silnika AVL Angle Encoder 364. Przy 720 znacznikach umieszczonych na obwodzie tarczy przetwornika oraz współpracy z

urządzeniem AVL Puls Multiplier zapewnia on maksymalną częstotliwość próbkowania do 0,05°OWK. Ten sam sygnał wyzwała jednocześnie impuls światła generowany w module oświetlenia i przekazywany światłowodem do komory spalania w celu umożliwienia rejestracji wtrysku paliwa. Cenną, dodatkową zaletą tego układu pomiarowego jest możliwość stosowania tego samego przetwornika kąta obrotu wału korbowego do wyzwalania innego rodzaju pomiarów w sposób całkowicie zsynchronizowany z filmowaniem. Najczęstszym pomiarem towarzyszącym wizualizacji przebiegu wtrysku i spalania w cylindrze silnika jest oczywiście pomiar przebiegu ciśnienia w cylindrze, ciśnienia paliwa w instalacji wtryskowej oraz przemieszczenia iglicy wtryskiwacza w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika.

Optyczny dostęp do komory spalania umożliwia endoskop sprzężony z obiektywem kamery. Chłodzenie endoskopu zapewnione jest przez wymuszony przepływ powietrza pomiędzy tzw. soczewkami prętowymi. Firma AVL proponuje endoskop o średnicy 7 mm (rys. 4), charakteryzujący się kątem widzenia 67°, oraz endoskop 4 mm o kącie widzenia 80°.



Rys. 4. Endoskop urządzenia AVL Engine Videoscope 513D [1]

Każdy z rozmiarów endoskopów dostępny jest w 3 odmianach, różniących się kątem pomiędzy osią optyczną i osią geometryczną. Dostępne są endoskopy o „kierunkiem widzenia”: 0, 30 i 70°.

W nowoczesnych silnikach wysokoprężnych, w głowicy których są: 4 zawory, wtryskiwacz, świeca żarowa, kanały z płynem chłodzącym, kanały recyrkulacji spalin etc., coraz trudniej o miejsce na tuleję z endoskopem i tuleję ze światłowodowym źródłem światła. Z tego punktu widzenia endoskopy o mniejszej średnicy są wygodniejsze w aplikacji. Należy jednak mieć na uwadze, że endoskopy o większej średnicy i mniejszym kącie widzenia wymagają mniej światła do uzyskania poprawnie zarejestrowanego obrazu. Jednak największą zaletą endoskopii przy filmowaniu procesu wtrysku i spalania jest prostota przystosowania seryjnego silnika do pomiarów. Zasadniczo proces ten nie różni się (z punktu widzenia trudności technicznej) od przystosowania głowicy silnika do indykowania. Niemniej jednak tak jak przygotowanie głowicy do indykowania wymaga znajomości pewnych prawideł, tak i endoskopia cylindra silnika rządzi się swoimi regułami, które zapewniają zarówno poprawność wykonania rejestracji obrazów wewnątrz cylindra silnika, jak i ich dalszą fizykalną analizę.

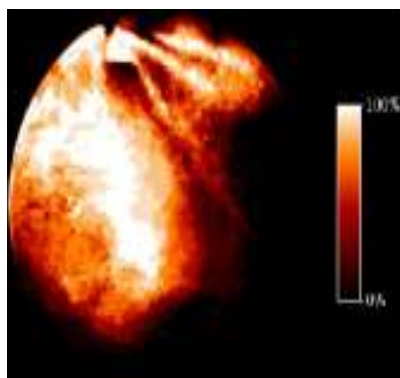
Obróbka i analiza obrazów rejestrowanych zjawisk

Użycie endoskopii przy cyfrowym filmowaniu procesów wtrysku i spalania w cylindrze silnika wysokoprężnego za pomocą urządzenia AVL Engine Videoscope 513D pozwala na uzyskanie obrazów o 32-bitowym kolorze rzeczywistym, rozdzielczości 786 x 484 punktów i ekspozycji przesuniętej o 0,1 kąta obrotu wału korbowego silnika. Przykład takich obrazów, z powodów edytorskich niniejszej publikacji czarno-biały, przedstawia rys. 7.

Analiza tego typu obrazów pozwala na określenie szeregu parametrów przydatnych do analizy przyczynowo-skutkowej obserwowanych zjawisk, m.in. początku wtrysku paliwa, początku samozapłonu, kąta wierzchołkowego rozpylonej strugi paliwa, zasięgu strugi paliwa, obszaru objętego strugą rozpylonego paliwa czy strefy objętej płomieniem.

Proces wielokrotnej rejestracji obrazów w cylindrze silnika dla tych samych położenia wału korbowego wzg. GMP tłoka pozwala na wiele zabiegów ułatwiających dalszą analizę obserwowanych zjawisk. Do obróbki post-procesowej, należy określania prawdopodobieństwa występowania płomienia dla danej strefy, uśrednianie zarejestrowanych obrazów, wybór reprezentatywnego cyklu oraz obliczenia rozkładu temperatur wewnątrz cylindra silnika.

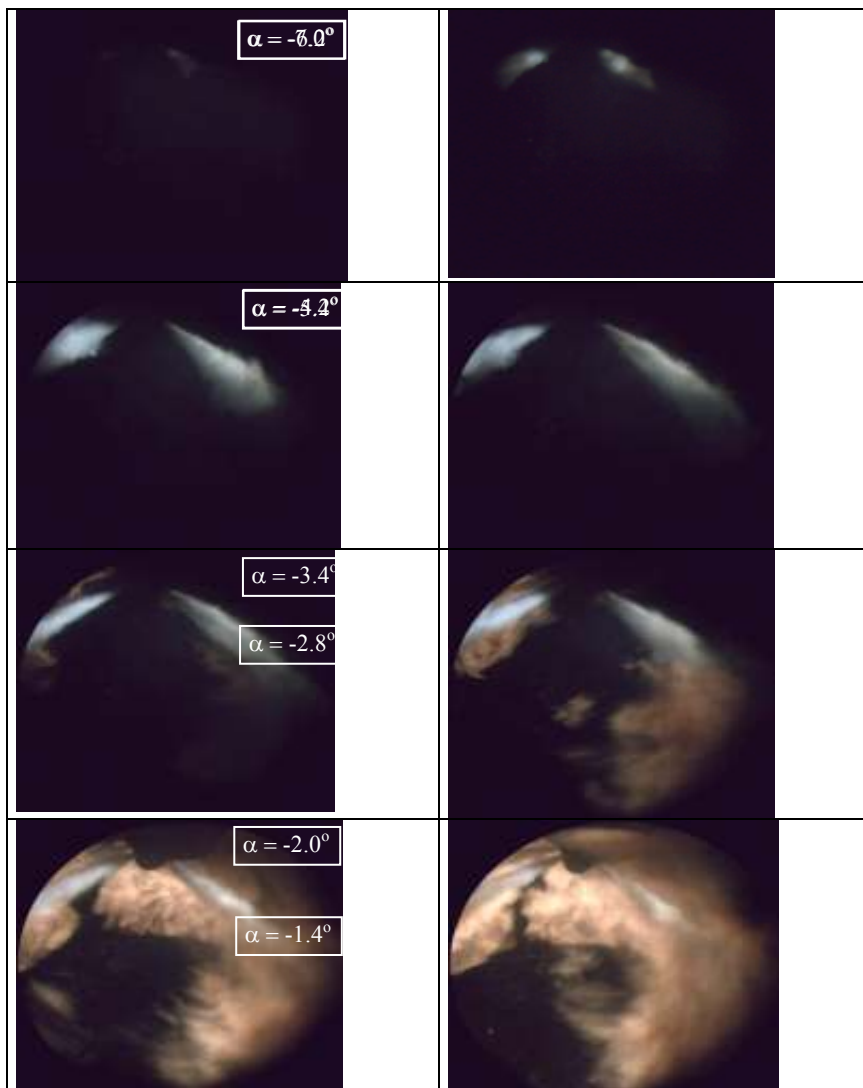
Poprzez ekstrakcję obszarów odpowiadających strefie płomienia na obrazach odpowiadających powtórzeniom pomiarów dla tego samego kąta obrotu wału korbowego możliwe jest określenie prawdopodobieństwa występowania płomienia w danym miejscu komory spalania. Dla jednego, określonego kąta obrotu wału korbowego przedstawia to przykładowo rys. 5.



Rys. 5. Przykład rozkładu prawdopodobieństwa występowania płomienia dla określonego kąta obrotu wału korbowego silnika [1]

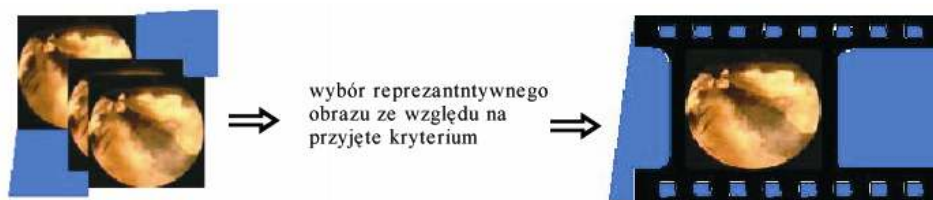
Powtarzanie rejestracji obrazów w cylindrze silnika dla tych samych położenia wału korbowego pozwala również na wyłonienie reprezentacyjnego cyklu pracy silnika lub utworzenie (wyliczenie) uśrednionego obrazu. Jest to niezwykle ważne ze względu na naturalne fluktuacje zjawisk wewnątrz cylindra silnika. Podobnie zresztą w innych metodach pomiarowych niepowtarzalnych procesów cyklicznie

powtarzanych dokonuje się analogicznych zabiegów statystycznych pozwalających na analizę najbardziej reprezentatywnej lub uśrednionej próbki pomiarowej. Przykładowo, indykowanie cylindra silnika dokonane dla kolejnych obiegów stwarza możliwość uzyskania do analizy uśrednionego bądź reprezentatywnego przebiegu ciśnienia czynnika roboczego. Uśredniony przebieg ciśnienia powstaje poprzez wyliczenie średniej arytmetycznej z kolejnych powtórzeń pomiaru ciśnienia. Uśredniony obraz tworzony jest przez uśrednienie intensywności 3 podstawowych kolorów każdego punktu pobieranego z kolejnych powtórzeń pomiaru – czerwonego, zielonego i niebieskiego (RGB model – Red, Green, Blue). W efekcie powstaje uśredniony obraz, który nigdy nie był rejestrowany.



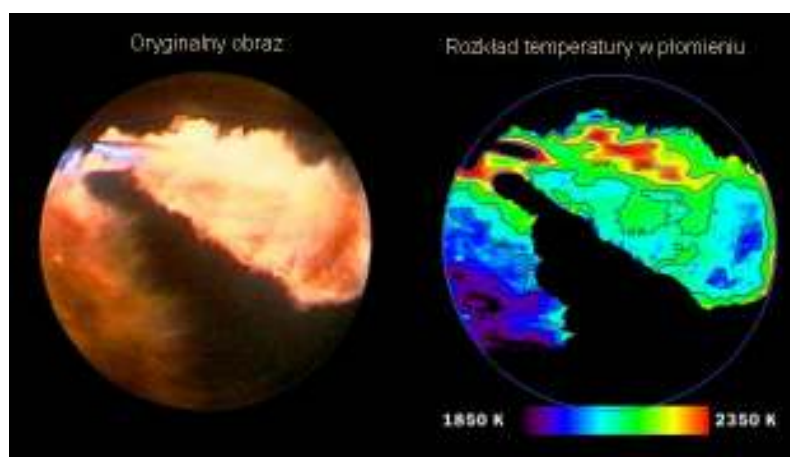
Rys. 6. Przykład rejestracji przebiegu wtrysku i spalania w cylindrze silnika wysokoprężnego dla wybranych kątów obrotu wału korbowego (oryginał kolorowy, rejestracja co 0,1°OWK) [1]

Analiza tak spreparowanych danych (szczególnie przy małej ilości powtórzeń i dużej niepowtarzalności procesów) może prowadzić do fałszywych wniosków. Dlatego istnieje możliwość wyboru reprezentatywnego obrazu (według określonego kryterium) spośród zarejestrowanych dla tego samego kąta obrotu wału korbowego. W przypadku indykowania, kryterium jest najczęściej maksymalne ciśnienie spalania lub maksymalna prędkość narastania ciśnienia spalania $(dp/d\alpha)_{\max}$. Do analizy przebiegu wtrysku i spalania jako reprezentatywny przyjmuje się ten obraz, na którym obszar występowania płomienia jest najbardziej zbliżony do obszaru, gdzie ze 100% prawdopodobieństwem powinien być obecny przy danym kącie obrotu wału korbowego. Takie postępowanie dla kolejnych kątów obrotu wału korbowego pozwala na stworzenie sekwencji reprezentatywnych obrazów, które dają podstawę analizy przebiegu procesów wewnątrz cylindra silnika. Schemat tej procedury przedstawia rys. 7.

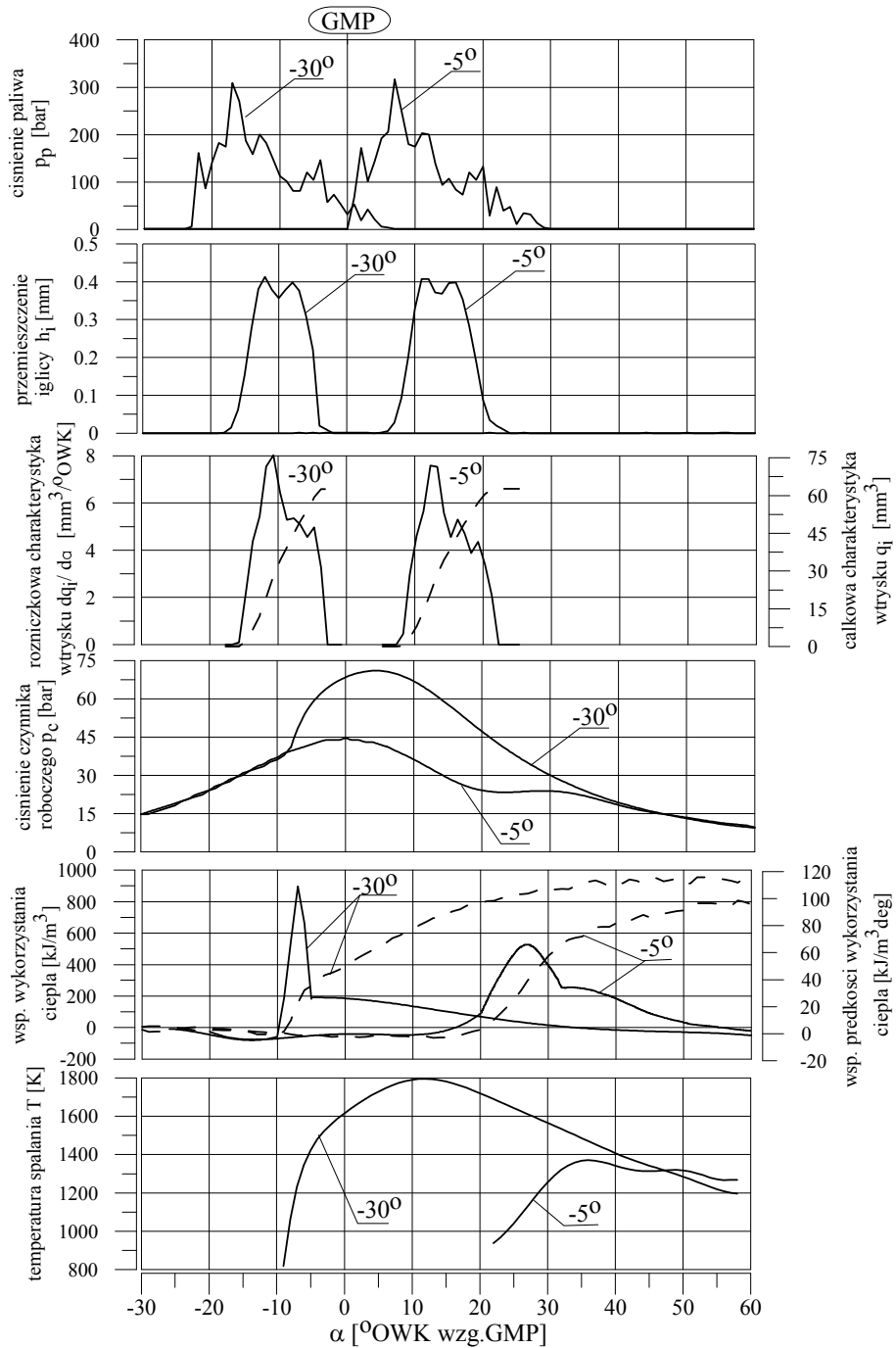


Rys. 7. Schemat tworzenia sekwencji reprezentatywnych obrazów [4]

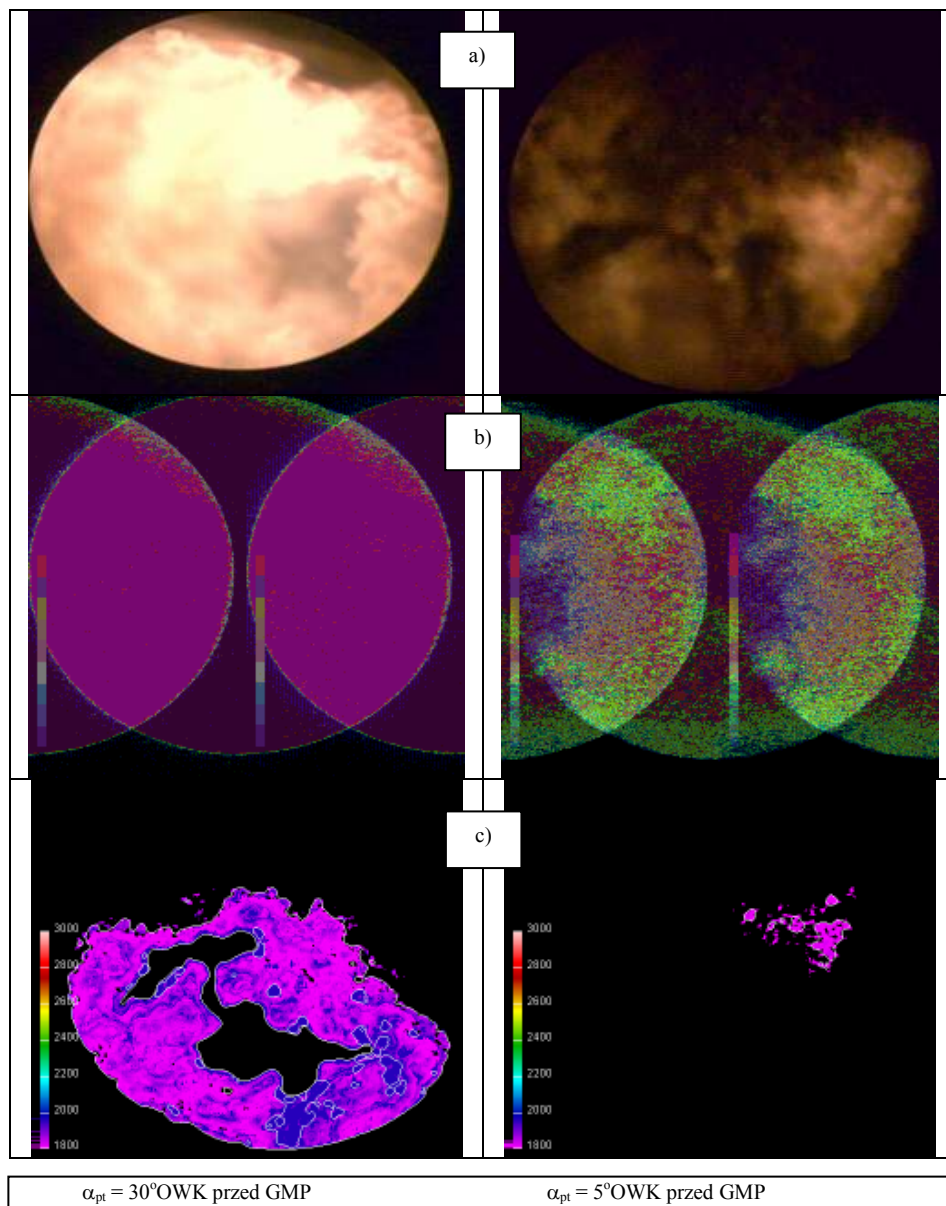
Optyczne rejestrowanie spalania paliwa w silniku wysokoprężnym pozwala również na wyliczenie rozkładu temperatur w cylindrze silnika. Przykład izo-term obliczonych metodą dwóch kolorów [2, 3] przedstawiono na rys. 8 [4].



Rys. 8. Rozkład temperatur w cylindrze silnika obliczony metodą dwóch kolorów [4]



Rys. 9. Parametry robocze silnika SB 3.1. w funkcji kąta OWK dla dwóch początków tłoczenia paliwa: $\alpha_{pt} = 30^\circ$ OWK przed GMP i $\alpha_{pt} = 5^\circ$ OWK przed GMP



Rys. 10. Przykład analizy wizualizacji procesu spalania w silniku SB 3.1. dla dwóch początków tłoczenia paliwa: $\alpha_{pt} = 30^\circ\text{OWK}$ przed GMP i $\alpha_{pt} = 5^\circ\text{OWK}$ przed GMP; – kąt obrotu wału korbowego w obu przypadkach odpowiada występowaniu maksymalnej prędkości spalania dyfuzyjnego; a) wizualizacja spalania, b) prawdopodobieństwo występowania płomienia, c) termowizja

Na rys. 9 przedstawiono przykład wybranych parametrów mierzonych i przeliczanych w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika. Zmierzony wykres indykatorowy, ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczem, przemieszczenie iglicy wtryskiwa-

cza, przeliczona charakterystyka wtrysku paliwa, prędkość wykorzystania ciepła oraz średnia temperatura spalania pozwalają na szczegółową analizę obiegu pracy silnika. W połączeniu ze sfilmowanym obrazem przebiegu wtrysku i spalania, prawdopodobieństwem występowania płomienia oraz rozkładem izoterm w płomieniu w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika pozwala to na pełną analizę przy czynowo-skutkową zjawisk zachodzących w cylindrze silnika. Na rys. 10 zamieszczono przykład wizualizacji spalania dla dwóch różnych początków tłoczenia paliwa, dla kąta obrotu wału korbowego odpowiadającego maksymalnej prędkości spalania dyfuzyjnego. Dzięki połączeniu analizy wielu parametrów opisujących przebieg wtrysku i spalania paliwa łatwiejsze i pełniejsze staje się skorelowanie zmiany cech konstrukcyjnych lub regulacyjnych silnika z uzyskanymi w ten sposób parametrami energetycznymi czy emisją szkodliwych składników spalin silnika.

Podsumowanie

Przedstawiony materiał upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

1. Ograniczeniem stosowania szybkich kamer do rejestrowania wtrysku i spalania paliwa jest zbyt mała częstotliwość kolejnych ekspozycji oraz trudność w utworzeniu reprezentatywnych cykli do dalszej analizy
2. Zaletą stosowania endoskopii w połączeniu z cyfrowym filmowaniem szybkozmiennych zjawisk w cylindrze silnika jest m.in. łatwość aplikacji seryjnego silnika do pomiaru oraz możliwość analizy reprezentatywnych obiegów silnika, w których kolejne obrazy, pochodzące z różnych cykli pracy silnika, przesunięte są o bardzo mały interwał kąta obrotu wału korbowego.

Piśmiennictwo

1. 513D Engine Videoscope. System description and examples. AVL LIST. Graz 2000.
2. Matsui Y. i in.: A study on the application of the Two-Colour Method to the Measurement of the Flame Temperature and Soot Concentration in Diesel Engine. SAE 910736. 1991
3. Spectral Flame Temperature Measurement Using the two Colour Method. AVL List GmbH, Graz, 2000.
4. Wagner H.: AVL List GmbH. Birmingham 1999.

Summary

This paper presents comparison of visualisation techniques and systems. High-speed video system and a stroboscopic video system for recording of engine processes with engine related post processing were described. Probability of flame location, picture averaging, simulation of a representative combustion cycle and temperature distribution of diesel flame as option of software was showed. As a conclusion the main benefits and limits of visualisation of diesel engine fuel injection and combustion.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Krasowski