

OPTICAL KNOCK COMBUSTION DETECTION IN SI ENGINE

Dariusz Piernikarski

Lublin University of Technology
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland
tel: +48 81 5381284, fax: +48 81 5250808
e-mail: d.piernikarski@pollub.pl

Abstract

Optical combustion sensor was used as a signal source to detect knocking combustion in a single cylinder SI engine. Intensity of optical emission from the combustion chamber was compared with reference signal of indicated pressure. It was found, that good correlations exist between the optical signal and the cylinder pressure in terms of crank angle and maximum values of both signals, especially during normal combustion. Higher ignition advance leading to knocking resulted in weaker strength of correlation. Described preliminary research confirmed, that optical emission signal can be used to detect and evaluate knock intensity in the similar way as it is done on the basis of the cylinder pressure signal.

Measurements were realized on the Honda GX390 one-cylinder air-cooled engine of spark-ignition of the 9.5 kW maximum power with properly prepared for testing. Pressure measurements and optical emission intensity from combustion were released basing on the signal TDC generated by the sensor of crankshaft angle.

Keywords: combustion engine, knock combustions, detection sensors of knock combustion, optical sensor

OPTYCZNA DETEKCJA SPALANIA STUKOWEGO W SILNIKU O ZI

Streszczenie

Artykuł dotyczy optycznego czujnika zapłonu, który był używany jak źródło sygnału do wykrywania spalania stukowego jednocylindrowego silnika z zapłonem iskrowym. Intensywność optycznej emisji z komory spalania była porównana w odniesieniu do urządzenia sygnalizacyjnego wskazania ciśnienia. Ustalono, że występują dobre korelacje między wskazaniami sygnalizacyjnymi z urządzenia optycznego a ciśnieniem w cylindrze, jeżeli chodzi o kąt położenia wału korbowego, jak również w odniesieniu do maksymalnych wartości obu sygnałów, zwłaszcza podczas prawidłowego zapłonu. Wyższe przyspieszenie zapłonu prowadzące do spalania stukowego charakteryzowało się słabszą korelacją. Opisanie badania wstępne potwierdziły, że urządzenie optyczne może być używane dla detekcji i oceny intensywności spalania stukowego w podobny sposób jak jest to realizowane bazie urządzenia pomiarowego ciśnienia w cylindrze.

Pomiary zrealizowano na jednocylindrowym, chłodzonym powietrzem silniku o zapłonie iskrowym Honda GX390 o mocy maksymalnej 9,5 kW, który został odpowiednio przygotowany do badań. Pomiary ciśnienia i natężenia emisji optycznej z komory spalania wyzwalano w oparciu o sygnał GMP generowany przez czujnik położenia wału kątownego.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, spalania stukowe, czujniki detekcji spalania stukowego, czujnik optyczny

1. Wprowadzenie

Zjawisko spalania stukowego w silnikach o zapłonie iskrowym łączone jest ze spontanicznym samozapłonem w przyściennych rejonach niespalonej mieszanki jeszcze przed dotarciem tam normalnego frontu płomienia. Powoduje to gwałtowne i przestrzennie

niejednolite uwalnianie energii i wzrost ciśnienia. Czynniki te w rezultacie generują fale ciśnienia lub fale uderzeniowe, które rozchodzą się po komorze spalania, wielokrotnie odbijając się od jej ścianek i wzbudzają akustyczne częstotliwości rezonansowe komory. Spalanie stukowe jest zatem jedną z głównych barier ograniczających osiągnięcie wyższych sprawności cieplnych silnika, limitując jego stopień sprężania, ogranicza także maksymalne wartości średniego ciśnienia indykowanego. Podnoszenie sprawności cieplnej oraz zastosowanie systemów sterowania monitorujących występowanie spalania stukowego powodują, że konieczna staje się kalibracja silników zbliżająca się do granic dopuszczalnej granicy stuku i konsekwentnie – zmniejszająca margines bezpieczeństwa. Z tych to powodów należy eliminować spalanie stukowe lub kontrolować je w całym zakresie pracy silnika. To z kolei rodzi potrzebę podnoszenia dokładności i powtarzalności gromadzonych danych o spalaniu stukowym.

W literaturze znaleźć można wiele prac poświęconych zagadnieniu spalania stukowego, opisujących zagadnienia takie jak: pomiar i analiza sygnału spalania stukowego, zastosowanie różnych algorytmów detekcji spalania stukowego, klasyfikacja efektów związanych z chemią spalania, komputerowa symulacja stuku, czy analiza fal ciśnienia towarzyszących temu zjawisku [1].

Nowoczesne silniki o zapłonie iskrowym, zwłaszcza te, w których zastosowano systemy spalania mieszanek uwarstwionych pozwalające na znaczące obniżenie zużycia paliwa, charakteryzują się podwyższonym stopniem sprężania ($\varepsilon > 11$). Duże gradienty ciśnienia występujące po zapłonie mieszanki wiążą się z koniecznością niezawodnego rozpoznawania spalania stukowego.

Obecnie najpowszechniej stosowane metody zapobiegania spalaniu stukowemu to: poprawa jakości paliwa, optymalizacja konstrukcji silnika i jego parametrów roboczych oraz opóźnianie kąta wyprzedzenia zapłonu po detekcji stuku przez akcelerometry. Akcelerometry montowane na bloku silnika są wykorzystywane w wielu silnikach produkowanych seryjnie i doskonale sprawdzają się przy niewielkich prędkościach obrotowych. Jednakże jakość uzyskiwanego sygnału pogarsza się gwałtownie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej ze względu na zakłócenia mechaniczne nakładające się na sygnał przyspieszenia. W wyniku tego układ sterujący ignoruje ten sygnał sprężenia zwrotnego i stosowany jest zapłon opóźniony, co powoduje obniżenie sprawności i mocy silnika.

Przyszłość czujników spalania stukowego wiąże się z koniecznością obniżenia ich błędów pomiarowych i uproszczenia konstrukcji tak więc, metody pomiaru w cylindrze są niezwykle pożądane, ponieważ bezpośrednio mierzą zjawiska spalania odpowiadające stukowi. Najczęściej stosowane są w tym celu poniższe metody [5]:

- ocena przebiegu ciśnienia w komorze spalania,
- ocena przebiegu emisji świetlnej w komorze spalania,
- ocena przebiegu prądu jonizacji w komorze spalania.

Ocena przebiegu ciśnienia w komorze spalania jest jak dotąd najdokładniejszą metodą wykrywania i oceny zjawiska stuku. Wysokie nakłady związane z montażem czujników ciśnienia na silniku oraz ich wysoki koszt powodują ograniczenia w powszechnym zastosowaniu w silnikach seryjnych. Sygnał ciśnienia jest jednak najczęściej wykorzystywany jako źródło referencyjne do oceny jakości wykrywania stuku przy pomocy innych metod.

W przypadku detekcji spalania stukowego na podstawie przebiegu emisji świetlnej z komory spalania praktyczne zastosowanie znajdują dwa podejścia badawcze: pomiar natężenia emisji optycznej z komory spalania przy pomocy czujników optycznych i włókien światłowodowych oraz rejestracja metodami wideo i metodami tomografii optycznej. Zastosowanie optycznych czujników spalania zlokalizowanych w cylindrze do detekcji spalania stukowego zostało już zaproponowane przez kilku badaczy [2, 3, 4]. Czujniki te nie są wrażliwe na zakłócenia mechaniczne i elektryczne, co stanowi istotną przewagę w zakresie

dokładności detekcji w porównaniu do najczęściej wykorzystywanych czujników opartych o akcelerometrię.

2. Badania eksperymentalne

W niniejszej pracy wykorzystano praktyczny i tani system do optycznego badania spalania pod kątem detekcji spalania stukowego. Termin „optyczne badanie spalania” oznacza w tym przypadku pomiar światła emitowanego w trakcie reakcji spalania i przetwarzanie tego sygnału ze względu na intensywność świecenia, kolor i charakterystykę czasową. Prezentowane wyniki badań dotyczą fazy wstępnej pomiarów polegającej na ocenie możliwości wykorzystania sygnału natężenia emisji optycznej do detekcji i oceny intensywności spalania stukowego poprzez porównanie go z referencyjnym sygnałem ciśnienia indykowanego. Pomiarzy zrealizowano w obszarze widzialnym ale rejestrowany sygnał w kolejnych fazach badań był poddany analizie widmowej dzięki wykorzystaniu monochromatorów i filtrów optycznych.

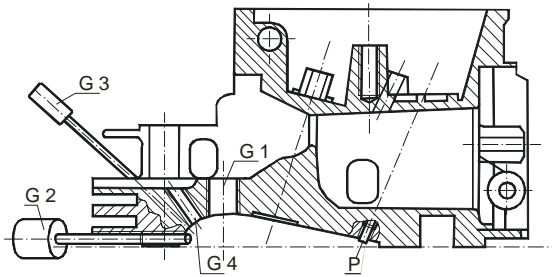
Pomiary zrealizowano na jednocylindrowym, chłodzonym powietrzem silniku Honda GX390 o zapłonie iskrowym (tabela 1). Silnik został poddany modyfikacjom polegającym na zastosowaniu elektronicznego układu wtryskowego oraz układu zapłonowego. Zaprojektowano system sterowania zapłonem i wtryskiem, działający w pętli otwartej, pozwalający na precyzyjne sterowanie kątem wyprzedzenia zapłonu i ilością wtryskiwanego paliwa. Silnik został wyposażony w optyczne czujniki spalania oraz czujniki ciśnienia indykowanego. Dokładny opis silnika badawczego znajduje się w pracy [6].

Tab. 1. Podstawowe dane silnika Honda GX390
Tab. 1. Basic technical data of Honda GX390 engine

Pojemność skokowa	$V_s = 390 \text{ cm}^3$
Średnica cylindra x skok tłoka	$D \times S = 88 \times 64 \text{ mm}$
Stopień sprężania	$\varepsilon = 8$
Maksymalna moc	$N_e = 9,5 \text{ kW (12,9 KM)} / 3600 \text{ obr/min}$
Maksymalny moment obrotowy	$M_o = 26,5 \text{ Nm} / 2500 \text{ obr/min}$

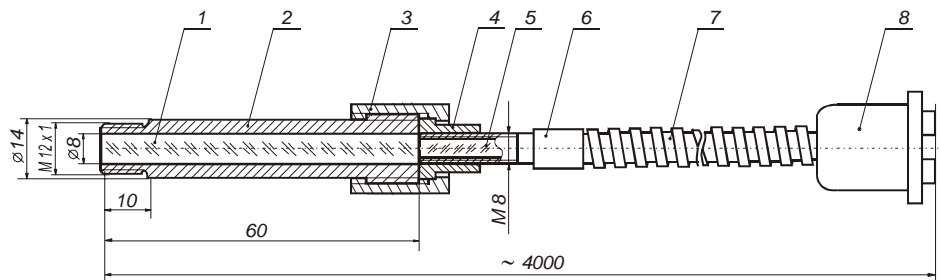
Zadaniem systemu optycznego jest transmisja promieniowania elektromagnetycznego z komory spalania silnika, filtrowanie i przetwarzanie na sygnał elektryczny. System do optycznych badań procesu spalania oparto o zespół czujników spalania rejestrujących natężenie promieniowania emitowanego w komorze spalania. Możliwe jest wykorzystanie czujnika umieszczonego w świecy zapłonowej silnika lub czujników zamontowanych bezpośrednio w głowicy. Pozwala to na obserwację różnych obszarów komory spalania (rys. 1). W opisywanych badaniach, do detekcji spalania stukowego wykorzystano sygnały pochodzące z czujników G2, G4.

Wykorzystano czujniki jednopunktowe różniące się średnicami rdzenia. Przykładowy optyczny czujnik spalania do montażu w głowicy (G4) przedstawia rysunek 2. Sygnał optyczny z czujnika transmitowany jest za pomocą elastycznego światłowodu do elementów filtrujących i fotodetektorów. System pomiarowy posiada dwa kanały pozwalające na jednoczesną rejestrację sygnału w dwóch długościach fali. Sygnał optyczny może być filtrowany za pośrednictwem filtrów interferencyjnych lub zamiennie monochromatorów, a następnie jest przekształcany przez fotodetektory w sygnał napięciowy i za pośrednictwem karty pomiarowej, rejestrowany przez system akwizycji danych. Schemat systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3 [7, 8].



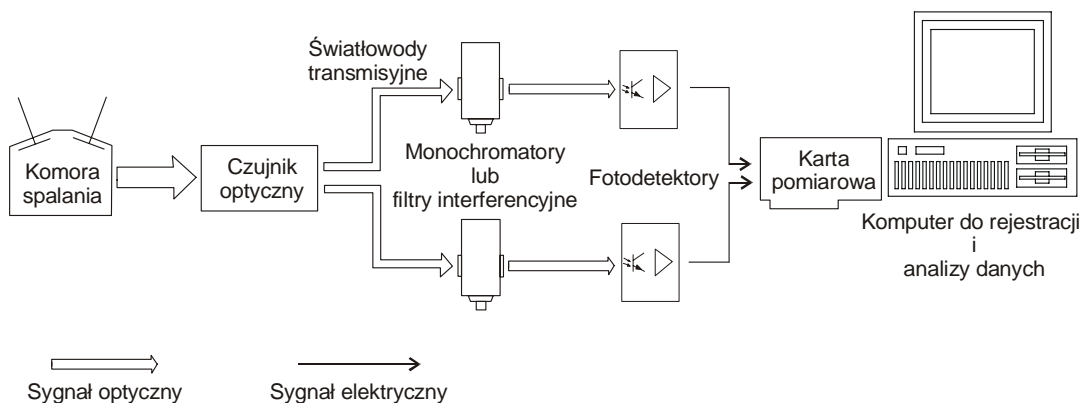
Rys. 1. Głowica silnika GX390 z zaznaczonymi miejscami montażu czujników spalania: G1 – czujnik zintegrowany ze świecą zapłonową, G2, G3, G4 – czujniki głowicowe, P – czujnik ciśnienia indykowanego

Fig. 1. Cylinder head of the GX390 engine with mounting positions of optical combustion sensors: G1 – sensor integrated with the spark plug; G2, G3, G4 – sensors located directly in the engine head, P – pressure sensor



Rys. 2. Przekrój głowicowego czujnika optycznego: 1 – pręt ze szkła kwarcowego, 2 – tuleja stalowa, 3 – nakrętka, 4 – tuleja mocująca, 5 – pęk światłowodów, 6 – zakończenie światłowodu, 7 – płaszcz stalowy, 8 – zakończenie rozwidlone

Fig. 2. Section view of the optical sensor: 1 – quartz rod, 2 – steel sleeve, 3 – nut, 4 – jointing sleeve, 5 – transmission lightguide, 6 – lightguide mounting, 7 – steel coat, 8 – beam splitter

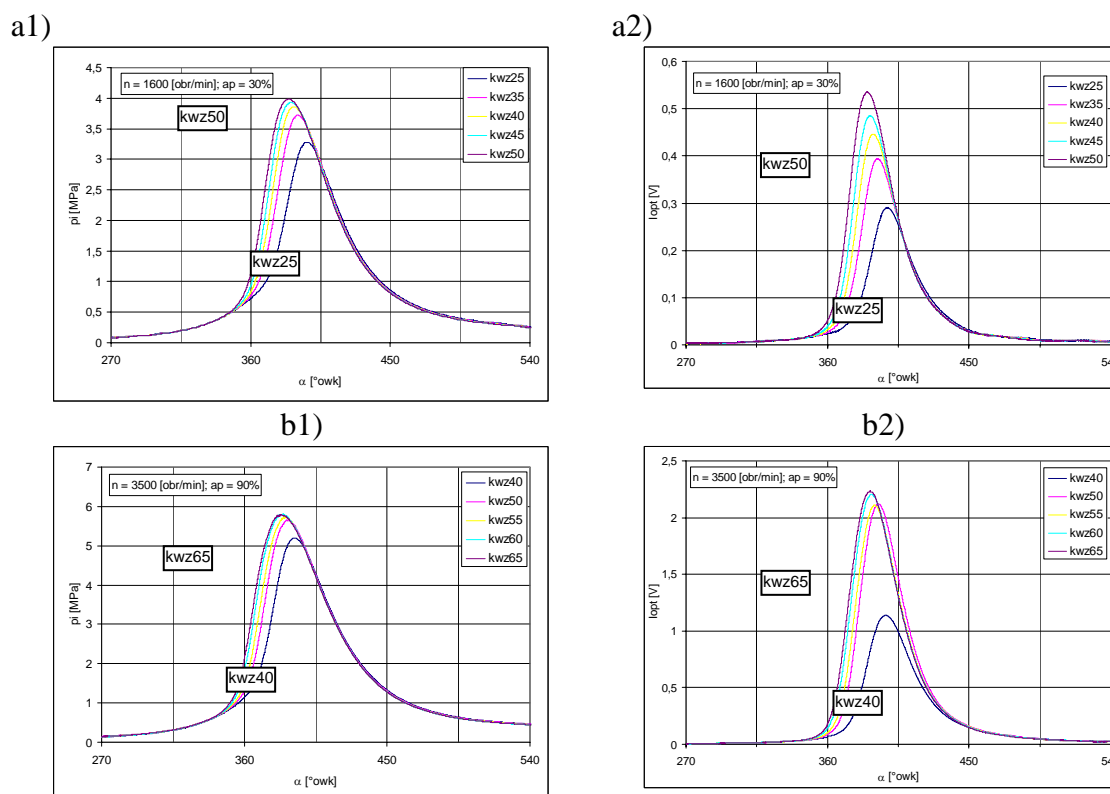


Rys. 3. Schemat systemu pomiarowego emisji optycznej z komory spalania silnika [8]
Fig. 3. Layout of the measurement system of optical emission from the combustion chamber [8]

Pomiary ciśnienia i natężenia emisji optycznej z komory spalania wyzwalano w oparciu o sygnał GMP generowany przez czujnik położenia wału kątownego i próbkowano z dokładnością 0,1 °owk. Badania zrealizowano dla trzech prędkości obrotowych silnika (1600, 2500 i 3500 obr/min) i różnych obciążeń określanych przez położenie przepustnicy (30%, 60% i 90%). W zależności od aktualnej prędkości obrotowej kąt wyprzedzenia zapłonu zmieniano w zakresie od 25 do 65 °owk przed GMP. Dla każdego z punktów pomiarowych wielkość dawki wtryskiwanego paliwa dobierano tak, aby spalana mieszanka miała skład stechiometryczny ($\lambda = 1,0$).

3. Wyniki i dyskusja

Aby dokonać ogólnej oceny przebiegów ciśnienia indykowanego p_i oraz natężenia emisji optycznej I_{opt} , dla każdego z punktów pomiarowych dokonano uśrednienia zarejestrowanych danych, otrzymując przebiegi będące średnią ze 100 kolejnych cykli pracy silnika. Na rysunku 4 zaprezentowano średnie przebiegi ciśnienia oraz średnie przebiegi natężenia emisji optycznej dla przykładowych punktów pracy silnika.



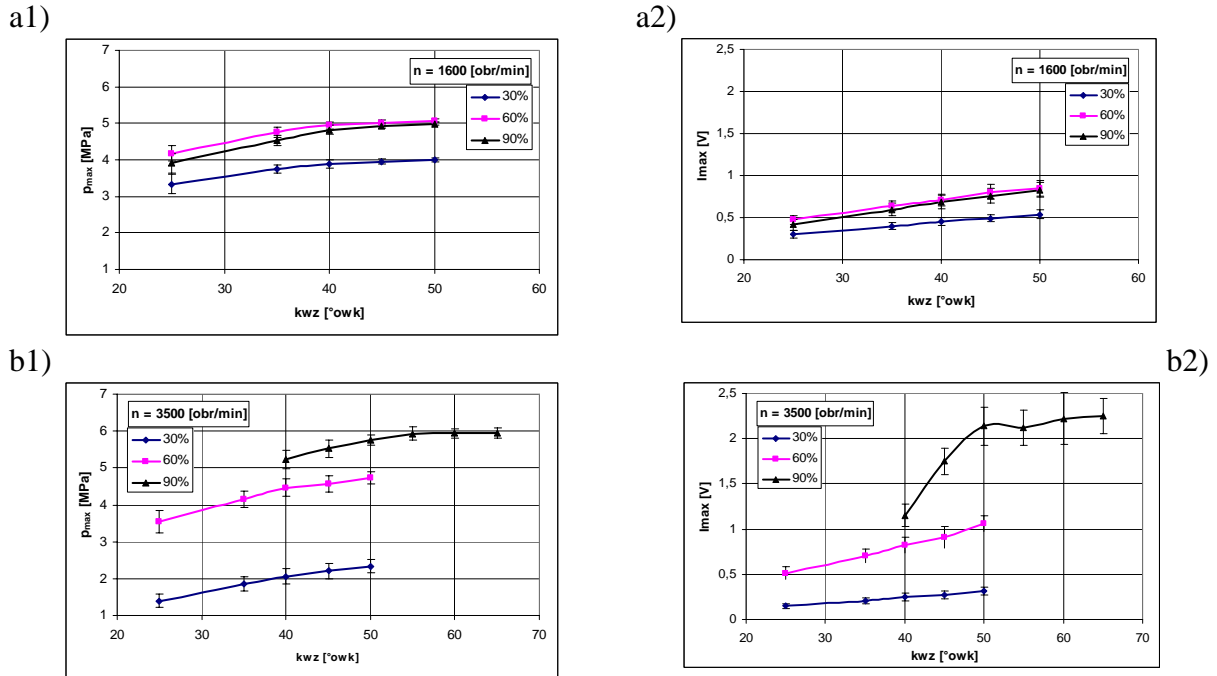
Rys. 4. Uśrednione ciśnienie indykowane p_i (a1, b1) oraz natężenie emisji optycznej I_{opt} (a2, b2) dla różnych warunków pracy silnika; ap – położenie przepustnicy, kwz – kąt wyprzedzenia zapłonu
 Fig. 4. Averaged courses of indicated pressure p_i (index 1) and intensity of optical emission I_{opt} (index 2) for different conditions of engine operation; ap – throttle position; kwz – ignition advance

Przebiegi ciśnienia i natężenia emisji optycznej zmieniają się w podobny sposób wraz ze zmianą warunków pracy silnika określonych przez prędkość obrotową, położenie przepustnicy oraz kąt wyprzedzenia zapłonu. Należy przy tym zauważyć, iż sygnał emisji optycznej charakteryzuje się większą wrażliwością na zmianę warunków pracy w porównaniu do sygnału ciśnienia, zwłaszcza w przypadku większych obciążeń i zmian kąta wyprzedzenia zapłonu. Na rys. 4b1 oraz rys. 4b2, odpowiadających warunkom pracy silnika sprzyjającym pojawieniu się spalania stukowego, widoczny jest gwałtowny wzrost poziomu sygnału optycznego towarzyszący większym kątom wyprzedzenia zapłonu.

Aby potwierdzić powyższe spostrzeżenia i w pełniejszy sposób porównać przebiegi ciśnienia indykowanego i natężenia emisji optycznej sporządzono także charakterystyki regulacyjne wartości maksymalnych p_{max} oraz I_{max} (rys. 5). Na wykresach naniesiono także średnie odchylenia standardowe.

Zauważamy, że wraz ze zmianą kąta wyprzedzenia zapłonu zmiany ciśnienia maksymalnego i maksymalnego natężenia emisji optycznej mają podobny przebieg.

Wystąpienie spalania stukowego (np. dla 3500 obr/min, $ap = 90\%$, kwz = 65 °owk – rys. 5b1, rys. 5b2) wiąże się ze wzrostem wartości maksymalnych oraz niepewtarzalności procesu (wzrost odchylenia standardowego) – zjawisko to jest szczególnie zauważalne dla sygnału optycznego (rys. 5b2).

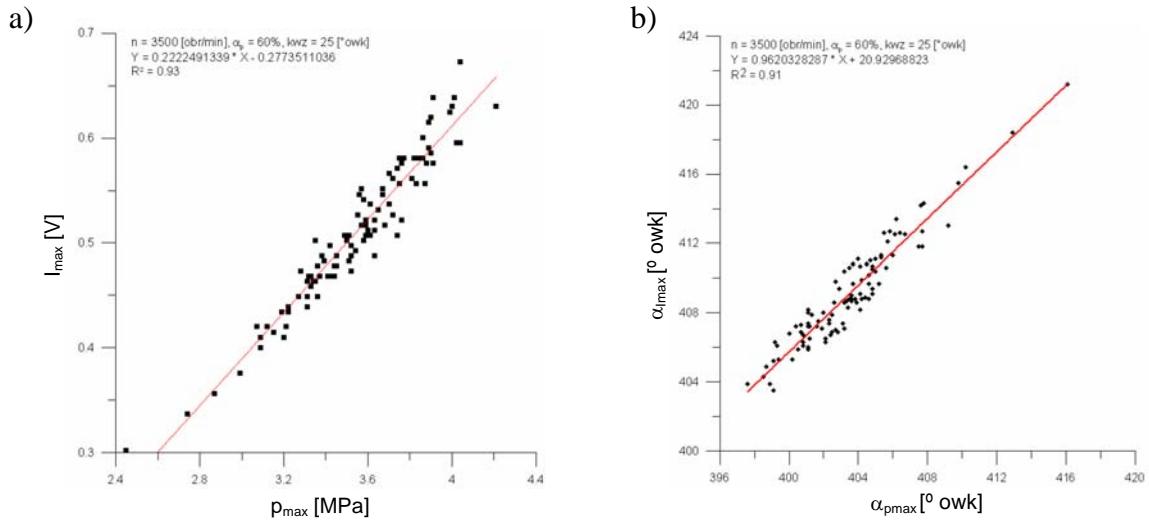


Rys. 5. Charakterystyki regulacyjne wartości maksymalnych p_{max} (a1, b1) oraz I_{max} (a2, b2)
Fig. 5. Control characteristics of maximum values of p_{max} (a1, b1) and I_{max} (a2, b2)

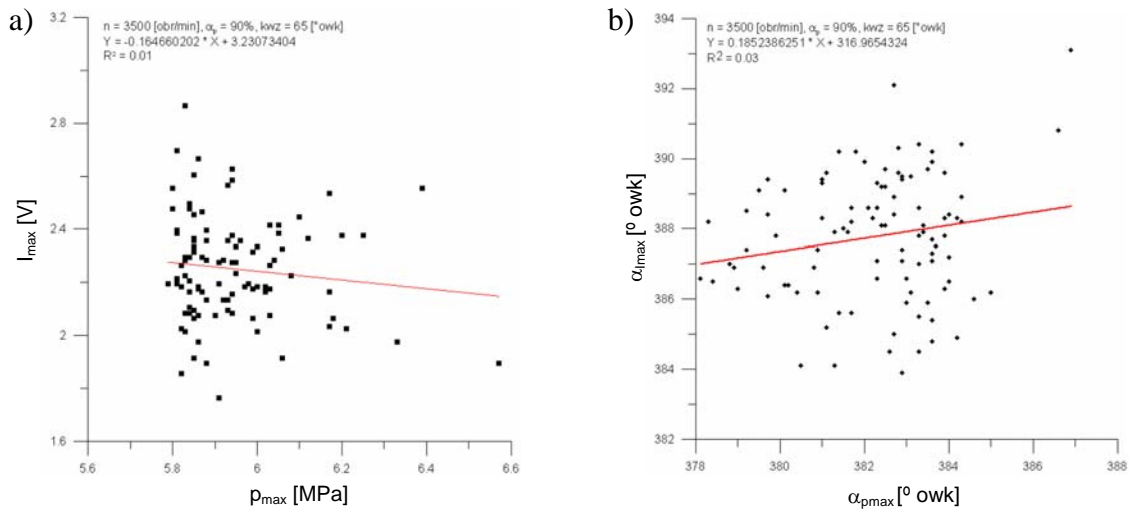
Kolejnym etapem analizy wyników była ocena korelacji pomiędzy ciśnieniem maksymalnym w każdym z zarejestrowanych cykli oraz maksymalną wartością natężenia emisji optycznej ($p_{max}-I_{max}$) oraz między odpowiadającymi im kątami położenia wału korbowego ($ap_{max}-aI_{max}$). w warunkach spalania prawidłowego, jak i przy występowaniu spalania stukowego. Przed przystąpieniem do analizy korelacji potwierdzono zgodność rozkładu zarejestrowanych sygnałów z rozkładem normalnym. W analizie korelacji przeprowadzonej dla uzyskanych wyników badań posługiwano się zarówno liniowymi, jak i nieliniowymi modelami regresji. O wyborze modelu decydowała większa wartość uzyskanego współczynnika korelacji.

Na rys. 6 oraz 7 przedstawiono przykładowe wykresy ilustrujące otrzymane zależności korelacyjne. Należy zauważyć, że wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia zapłonu malała siła wzajemnej korelacji określana przez współczynnik determinacji r^2 , zwłaszcza dla wartości maksymalnych ciśnienia indykowanego p_i i odpowiadających im wartości maksymalnego natężenia emisji optycznej I_{max} (rys. 8, rys. 9), a przy silnym spalaniu stukowym korelacje stawały się nieistotne statystycznie.

W wypadku poszukiwania zależności korelacyjnych pomiędzy maksymalnymi wartościami ciśnienia indykowanego p_{max} i odpowiadających im wartości maksymalnego natężenia emisji optycznej I_{max} , mimo istotnych statystycznie korelacji liniowych zdecydowano się na poszukiwanie modelu, który pozwoliłby na lepsze skorelowanie tych dwóch wielkości, niż liniowy model regresji. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że najlepsze dopasowanie uzyskuje się wykorzystując linearyzowaną regresję nieliniową i dopasowanie modelem wykładniczym (rys. 10).

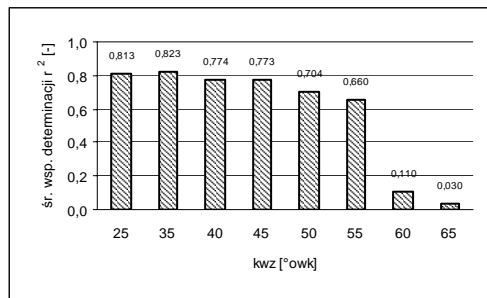


Rys. 6. Spalanie normalne: a) wartości maksymalne ciśnienia i natężenia emisji optycznej ($p_{max}-I_{max}$) b) odpowiadające położenia wału korbowego ($\alpha_{p_{max}}-\alpha_{I_{max}}$); $n = 3500$ obr/min, $\alpha_p = 60\%$, $kwz = 25^\circ$ owk
 Fig. 6. Normal combustion: a) maximum values of indicated pressure and intensity of optical emission ($p_{max}-I_{max}$); b) adequate crankshaft positions ($\alpha_{p_{max}}-\alpha_{I_{max}}$); $n = 3500$ rpm, $\alpha_p = 60\%$, $kwz = 25^\circ$ ca

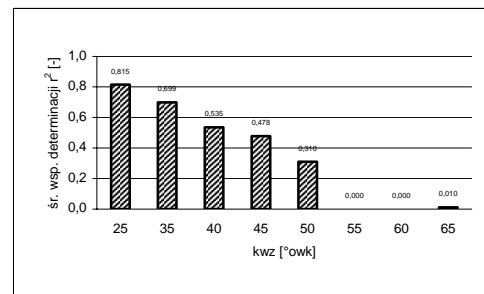


Rys. 7. Spalanie stukowe: a) wartości maksymalne ciśnienia i natężenia emisji optycznej ($p_{max}-I_{max}$) b) odpowiadające położenia wału korbowego ($\alpha_{p_{max}}-\alpha_{I_{max}}$); $n = 3500$ obr/min, $\alpha_p = 90\%$, $kwz = 65^\circ$ owk

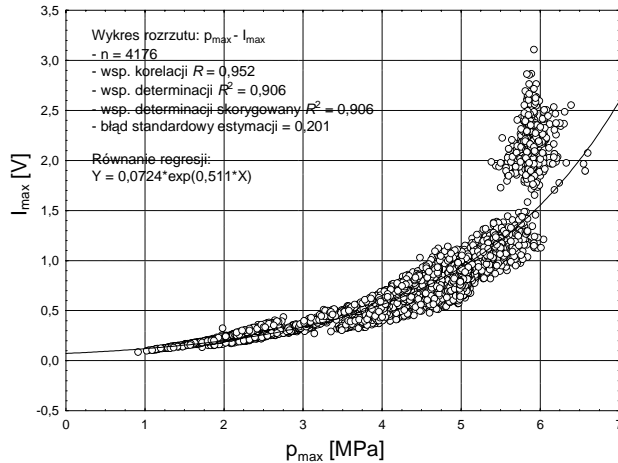
Fig. 7. Knocking combustion: a) maximum values of indicated pressure and intensity of optical emission ($p_{max}-I_{max}$); b) adequate crankshaft positions ($\alpha_{p_{max}}-\alpha_{I_{max}}$); $n = 3500$ rpm, $\alpha_p = 90\%$, $kwz = 65^\circ$ ca



Rys. 8. Średnie współczynniki determinacji dla kątów $\alpha_{p_{max}} - \alpha_{I_{max}}$
 Fig. 8 Mean coefficients of determination for angles $\alpha_{p_{max}} - \alpha_{I_{max}}$



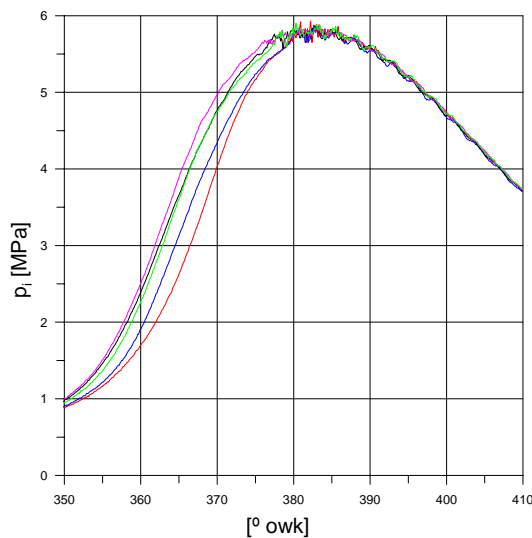
Rys. 9. Średnie współczynniki determinacji dla wartości maksymalnych $p_{max} - I_{max}$
 Fig. 9. Mean coefficients of determination for maximum values $p_{max} - I_{max}$



Rys. 10. Dopasowanie korelacji ciśnienia maksymalnego oraz maksymalnego natężenia emisji optycznej (p_{max} – I_{max}) wykładniczym modelem regresji

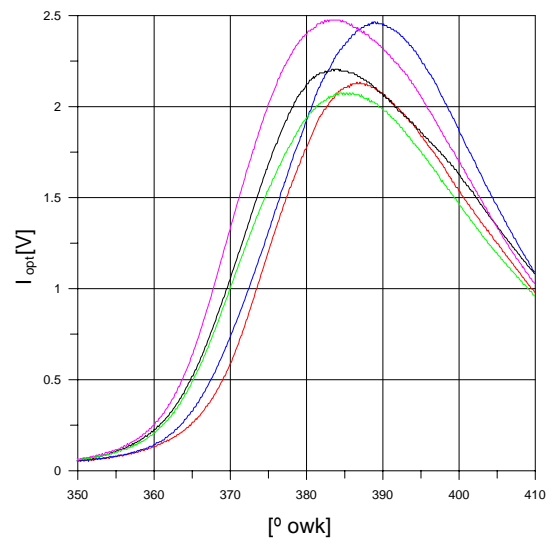
Fig. 10. Matching correlation of maximum pressure and optical emission (p_{max} – I_{max}) with exponential regression model

Ponieważ czujnik ciśnienia indykowanego jest najbardziej wiarygodnym detektorem stuku, przebiegi ciśnienia zarejestrowane dla spalania stukowego zostały wykorzystane w dalszej części analizy wyników jako źródło referencyjne do identyfikacji spalania stukowego. Wraz z pojawieniem się spalania stukowego (rys. 11, rys. 12) widoczny jest gwałtowny wzrost intensywności świecenia, po którym natężenia emisji optycznej zmienia się zgodnie z ciśnieniem w cylindrze. Zmiany w poziomie emisji optycznej przypisać można fali ciśnienia odbijającej się wewnątrz komory spalania – fale ciśnienia o wysokiej częstotliwości występujące podczas spalania stukowego powodują ponowne wymuszenie świecenia spalonych gazów wskutek adiabatycznego ogrzewania. Obserwowane zjawisko zostało potwierdzone także przez innych badaczy [1, 2, 3].



Rys. 11. Ciśnienie indykowane w warunkach spalania stukowego dla 5 kolejnych cykli
 $n = 3500$ obr/min, $a_p = 90\%$, $kwz = 65$ °owk

Fig. 12. Indicated pressure during knocking combustion for 5 consecutive engine cycles
 $n = 3500$ rpm, $a_p = 90\%$, $kwz = 65$ °ca



Rys. 12. Natężenie emisji optycznej w warunkach spalania stukowego dla 5 kolejnych cykli
 $n = 3500$ obr/min, $a_p = 90\%$, $kwz = 65$ °owk

Fig 12. Intensity of optical emission during knocking combustion for 5 consecutive engine cycles
 $n = 3500$ rpm, $a_p = 90\%$, $kwz = 65$ °ca

Przebiegi ciśnienia i natężenia emisji optycznej w 5 kolejnych cyklach pracy silnika zarejestrowane w warunkach spalania stukowego przedstawiono na rys. 11 oraz rys. 12. Widoczna jest znacznie większa nierównomierność przebiegów sygnału optycznego w

porównaniu do sygnału ciśnienia, zarówno pod względem amplitudy, jak i położenia kąтового wartości maksymalnej. Świadczy to o większej czułości sygnału optycznego na zjawiska nieprawidłowego spalania.

4. Spostrzeżenia i wnioski

1. Stwierdzono istnienie wysokich, istotnych statystycznie korelacji między maksymalnymi wartościami natężenia emisji optycznej mierzonymi w paśmie widzialnym i maksymalnymi wartościami ciśnienia w komorze spalania dla cykli ze spalaniem normalnym. Najlepsze dopasowanie uzyskano wykorzystując wykładniczy model regresji.

2. Podobnie dobrą korelację uzyskano między kątami położenia wału korbowego odpowiadającymi położeniu wartości maksymalnych. W tym przypadku najlepsze dopasowanie dał model liniowy.

3. Wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia zapłonu siła tych korelacji malała. W warunkach intensywnego spalania stukowego korelacje stawały się nieistotne statystycznie.

4. Większy zakres zmian intensywności świecenia zarejestrowanego w warunkach spalania stukowego w porównaniu do sygnału ciśnienia wskazuje na większą czułość sygnału optycznego na zjawiska nieprawidłowego spalania.

5. Badania wstępne potwierdziły, że sygnały optyczne mogą zostać wykorzystane do wykrywania spalania stukowego w podobny sposób, jak sygnał ciśnienia.

Literatura

- [1] Brunt, M., Pond, C., Biundo, J., *Gasoline Engine Knock Analysis Using Cylinder Pressure Data*. SAE Pap. 980896, 1998.
- [2] Ohya, Y., Ohsuga, M., Kuroiwa, H., *Study on Mixture Formation and Ignition Process in Spark Ignition Engine Using Optical Combustion Sensor*. SAE Pap. 901712, 1990.
- [3] Nutton, D., Pinnock, R., A., *Closed Loop Ignition and Fueling Control Using Optical Combustion Sensor*, SAE Pap 900486, 1990.
- [4] Sun, Z., Blackshear, P., L., Kittelson, D., *Spark Ignition Engine Knock Detection Using In-Cylinder Optical Probes*. SAE Pap. 962103, 1996.
- [5] Fischer, M., Günther, M., Röpke, K., Lindemann, M., Placzek, R., *Klopferkennung im Ottomotoren. Neue Tools und Methoden in der Serienentwicklung*. MTZ 3/2003, 2003.
- [6] Piernikarski, D., Hunicz, J., Kordos, P., Jakliński, P., *Silnikowe stanowisko badawcze do optycznej diagnostyki procesu spalania*. Materiały konferencyjne Kongresu PTNSS, Szczyrk 2005. PTNSS P05-C055.
- [7] Hunicz, J., Piernikarski, D., *Transient In-Cylinder AFR Management Based on Optical Emission Signals*. SAE Technical Paper 2004-01-0516, 2004.
- [8] Piernikarski, D., *Integrated optical system for investigation and diagnostics of abnormal combustion in an automotive engine. Lightguides and their Applications II*. Proc. of SPIE, vol. 5576, 2004, pp. 284-289.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego PB 1419/T12/2003/25

