

Knocking detection using autocorrelation of the wide-band optical radiation intensity

The paper presents an evaluation of usability of the autocorrelation function which was calculated from the optical radiation signal and used for the detection of knocking combustion in a spark-ignition engine. The main source of experimental data was the resultant wide-band intensity of optical radiation which was acquired using optical combustion sensor having direct access to the combustion chamber. The gathered light was transmitted by a waveguide bundle to the set of photodetectors and after conversion – recorded using analog-digital card. The scope of the analysis which is described in this paper includes an estimation of the autocorrelation function and its evaluation for the purpose of knocking detection. Results have shown that occurrence of knocking combustion is accompanied by a high increase of energy transmitted by the optical signal expressed by its root mean square (rms). Moreover, knocking combustion results in a slower drop of autocorrelation function and appearance of some periodic components.

Key words: knock, combustion, fiber-optic sensor, optical radiation, autocorrelation function

Funkcja autokorelacji szerokopasmowej emisji optycznej w detekcji spalania stukowego

W artykule przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania funkcji autokorelacji obliczonej dla sygnału promieniowania optycznego do detekcji spalania stukowego w silnikach o ZI. Głównym źródłem danych eksperymentalnych była wypadkowa, szerokopasmowa emisja optyczna zmierzona za pomocą czujnika z bezpośrednim dostępem optycznym do komory spalania silnika. Sygnał optyczny był transmitowany pękiem światłowodów do zestawu fotodetektorów i rejestrowany po konwersji analogowo-cyfrowej. Analiza opisana w artykule obejmuje estymację funkcji autokorelacji i jej ocenę pod kątem detekcji spalania stukowego. Analiza wyników pozwala na stwierdzenie, że wystąpieniu spalania stukowego towarzyszy znaczący wzrost energii transmitowanej przez sygnał optyczny, wyrażonej przez jej wartość średniokwadratową (rms). Ponadto spalanie stukowe powoduje wolniejszy zanik funkcji autokorelacji i wystąpienie składowych okresowych.

Słowa kluczowe: spalanie stukowe, czujnik światłowodowy, promieniowanie optyczne, funkcja autokorelacji

1. Introduction

Knocking is one of the most frequently investigated and yet not completely understood phenomena accompanying combustion in spark-ignition gasoline engines. Although a huge effort was made to understand knocking combustion, still many unexplained problems or problems that are explained ambiguously exist.

Knocking should be avoided, as uncontrolled self-ignition in the combustion chamber can lead to a serious engine damage. Knocking and other phenomena of abnormal combustion are also the main barriers in the improvement of thermal efficiency and unit performance indicators of spark ignition engines, and therefore they should be consistently eliminated. Detection and control of knocking combustion have become essential components of control systems in modern engines. Nowadays all contemporary SI engines are controlled on the verge of knocking limit in the case of full load or higher part load operation, which allows reaching maximum fuel efficiency. In this context, precise recognition of knocking occurrence and definition of its intensity are of great importance.

Knocking detection is based mainly on the analysis of time or frequency representations of the accompanying processes, however available specifications of signal properties recorded during knocking combustion are of low

1. Wprowadzenie

Spalanie stukowe należy do jednych z najczęściej badanych zjawisk towarzyszących spalaniu w silnikach o zapłonie iskrowym, a mimo to nie jest jeszcze w pełni poznane. Mimo że w zakresie zrozumienia zjawiska stuku uczyniono wiele, to wciąż istnieje wiele zagadnień niewyjaśnionych lub wyjaśnionych w sposób niejednoznaczny,

Spalanie stukowe jest zjawiskiem, którego należy unikać, ponieważ niekontrolowany samozapłon paliwa w komorze spalania może prowadzić do istotnych uszkodzeń silnika. Stuk oraz inne zjawiska nieprawidłowego spalania są również głównymi barierami w zwiększaniu sprawności cieplnej i jednostkowych osiągnięć silników o ZI, dlatego muszą być skutecznie eliminowane. Detekcja i kontrola spalania stukowego stały się zasadniczymi składnikami systemów sterowania współczesnych silników. Wszystkie produkowane obecnie silniki o ZI są sterowane na granicy spalania stukowego w przypadku pracy w warunkach pełnego obciążenia lub wyższych obciążeń częściowych, co pozwala na uzyskanie maksymalnej sprawności w zakresie wykorzystania paliwa. W tym kontekście precyzyjne rozpoznanie wystąpienia spalania stukowego i określenie jego intensywności mają olbrzymie znaczenie.

Detekcja stuku oparta jest głównie na analizie reprezentacji czasowych lub częstotliwościowych procesów towa-

coherence. In the mass produced engines the most commonly used method is based on the application of vibration sensors (accelerometers), which transmit vibration of engine components (cylinder head, engine block) [1, 2]. The most significant weakness of this method is very low signal-to-noise ratio, especially at higher engine speeds, resulting from high background noise level. As a consequence, close-loop engine control is either impossible or retarded ignition is used as countermeasure which decreases the engine efficiency and power [3].

Knocking identification using pressure transducers inherits most of the weaknesses mentioned above. However, in extreme situations a pressure sensor cannot record any oscillations, as it can be located directly in the vibration's node of the combustion chamber. Moreover, misinterpretations of the self-ignition phenomena on the basis of the pressure signal can arise from the fact, that self-ignition has cyclic variability, even with the same pressures existing in the combustion chamber.

Having revised the most important issues regarding knocking combustion and its detection, it is possible to draw some conclusions. The main problem of knocking detection is related to the exact separation of the knocking signal, according to the engine operating conditions. Frequency analysis of the engine block vibrations permits only rough estimation of the knocking intensity. An objective evaluation of the knocking intensity is possible, but it requires a precise separation of the knocking signal from the primary signal of engine operation using band-pass filtering.

2. Knocking detection using optical methods

The development of sensors and methods of knocking detection creates many significant challenges related to the measurement error and complexity of calculations. Therefore, direct methods of measurement are desired, as they allow a detailed observation of combustion phenomena, and thus, detection of knocking and estimation of its intensity. Optical and opto-electronic methods enable a realization of new measurements (in terms of quality) of combustion cycle and have become a commonly used tool in the combustion research, which is confirmed by many publications [e.g. 4–9].

The application of optical combustion sensors has some advantages in comparison to vibration knocking sensors or pressure measurements: their operation is not influenced by any mechanical or electrical disturbances, and they offer high speed of data processing with minimum invasiveness. Optical combustion sensors can even meet performance requirements needed for mass application in automotive engines. In case of wide-band optical radiation intensity, identification of knocking combustion can be done using some numerical or functional features of the signal, like peak values of the radiation intensity, mean value of total optical radiation or changes in radiation intensity during combustion. The intensity of optical radiation varies with crankshaft position and engine load, there is also randomness of the signal resulting from the variability of consecutive combustion cycles. The

rzyszających, jednakże dostępne charakterystyki określające właściwości zarejestrowanych sygnałów są zazwyczaj mało spójne. W silnikach produkowanych seryjnie najczęściej stosowaną metodą jest wykorzystanie czujników mierzących drgania (akcelerometrów) komponentów silnika (głowicy, bloku) [1, 2]. Największą słabością tej metody jest bardzo niski stosunek sygnału do szumu, zwłaszcza przy dużych prędkościach obrotowych silnika, wynikający z wysokiego poziomu szumu. W rezultacie sterowanie kątem wyprzedzenia zapłonu w pętli zamkniętej jest albo niemożliwe, albo jako środek zapobiegawczy wykorzystuje się przyjęte z góry opóźnione wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, co z kolei obniża sprawność i moc silnika [3].

Identyfikacja spalania stukowego w oparciu o sygnał uzyskany z czujników ciśnienia nie jest również pozbawiona wad wspomnianych wyżej. W skrajnych przypadkach czujniki te nie są w stanie zarejestrować jakichkolwiek oscylacji ciśnienia, ponieważ mogą znajdować się bezpośrednio w węzle drganiowym komory spalania. Co więcej, błędna interpretacja zjawiska samozapłonu na podstawie przebiegu ciśnienia może wynikać z faktu, że samozapłon charakteryzuje się zmiennością cykliczną, nawet przy tej samej wartości ciśnienia panującego w komorze spalania.

Dokonawszy nawet tak pobieżnej analizy problemów związanych ze spalaniem stukowym i jego detekcją, można sformułować kilka zasadniczych wniosków. Główny problem detekcji stuku jest związany z dokładnym wyizolowaniem sygnału spalania stukowego, w zależności od aktualnych warunków pracy silnika. Analiza częstotliwościowa drgań bloku silnika pozwala na jedynie przybliżoną ocenę intensywności spalania stukowego. Obiektywna ocena intensywności stuku jest możliwa, ale wymaga dokładnego wyodrębnienia tego sygnału z sygnału podstawowego, najczęściej dzięki zastosowaniu filtracji pasmowej.

2. Detekcja spalania stukowego metodami optycznymi

Rozwój czujników i metod służących do detekcji spalania stukowego stwarza wiele wyzwań związanych z błędami pomiaru i złożonością niezbędnych obliczeń. Stąd też pożądane są bezpośrednie metody pomiaru, pozwalające na dokładną obserwację zjawiska spalania, a więc także na detekcję stuku i ocenę jego intensywności. Metody optyczne i optoelektroniczne umożliwiają realizację jakościowo nowych pomiarów cyklu spalania i stały się powszechnie stosowanym narzędziem w badaniach silników; potwierdzają to liczne publikacje [np. 4–9].

Zastosowanie czujników optycznych ma kilka zalet w porównaniu do czujników drganiowych lub pomiarów ciśnienia: ich działanie nie podlega zakłóceniom mechanicznym ani elektrycznym, oferują dużą prędkość przetwarzania danych przy minimalnej inwazyjności w przebiegu obserwowanego procesu. Optyczne czujniki spalania są w stanie spełnić wymagania w zakresie osiągnięć, związane z zastosowaniem ich w seryjnie produkowanych silnikach samochodowych. W przypadku czujników rejestrujących szerokopasmowy sygnał natężenia promieniowania optycznego,

occurrence of knocking creates significant changes in the measured intensity of optical radiation – either in certain spectral bands or as a resultant wide-band signal.

3. Experimental research

Aim of the research. The scope of experimental research included an introductory qualitative and quantitative analysis of combustion on the basis of optical radiation signal, aimed at more comprehensive understanding of unwanted phenomena such as knocking occurrence. Research should also settle the question, whether it is possible to use the same signal processing procedures which are used in knocking detection algorithms based on the pressure analysis in relation to the signal of optical radiation. Results shown in this paper illustrate the usage of autocorrelation function of the wide-band optical radiation intensity signal for the detection of knocking and estimation of its intensity.

Research engine and measurement system. Research was done using modified Honda GX390 one-cylinder, air-cooled SI engine. Engine was retrofitted with specially designed electronic ignition and fuel injection systems controlled by a dedicated PC software. Table 1 shows the main technical parameters of the modified Honda GX390 engine.

Table 1. Modified Honda GX390 test engine – main technical characteristics

Tabela 1. Zmodyfikowany silnik badawczy Honda GX390 – podstawowe dane techniczne

Engine displacement/pojemność skokowa	$V_s = 0.390 \text{ dm}^3$
Cylinder bore \times piston stroke/ średnica cylindra \times skok tłoka	$D \times S = 88 \times 64 \text{ mm}$
Compression ratio/stopień sprężania	$\epsilon = 8.0$
Maximum power/moc znamionowa	$N_e = 8.7 \text{ kW (11.8 KM)}$ at 3600 rpm
Maximum torque/maksymalny moment obrotowy	$M_o = 26 \text{ N}\cdot\text{m}$ at 2500 rpm

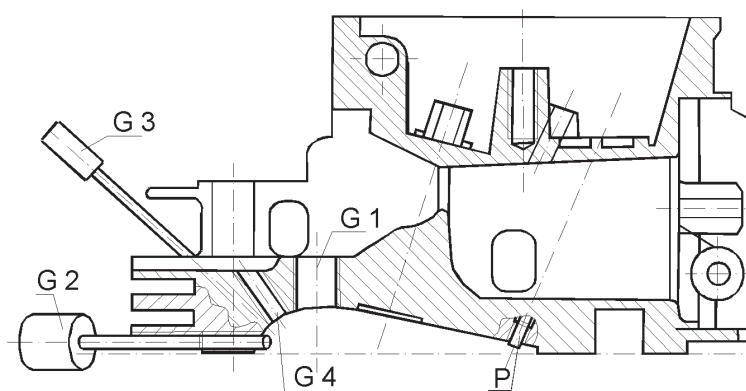


Fig. 1. Cylinder head of the GX390 test engine with marked locations of the combustion sensors: G1 – sensor integrated with the spark-plug, G2, G3, G4 – sensors mounted directly in the cylinder head, P – pressure sensor

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

identyfikacja spalania stukowego może być zrealizowana na podstawie analizy niektórych liczbowych lub funkcyjnych cech sygnału, takich jak wartość szczytowa natężenia promieniowania, wartość średnia czy zmiany intensywności świecenia w trakcie spalania. Natężenie promieniowania optycznego zmienia się wraz z położeniem wału korbowego i obciążeniem silnika, obecna jest także niepowtarzalność sygnału wynikająca ze zmienności poszczególnych cykli spalania. Pojawienie się spalania stukowego powoduje istotne zmiany w przebiegu sygnału optycznego – zarówno w poszczególnych pasmach widma promieniowania, jak i w natężeniu wynikowego sygnału szerokopasmowego.

3. Badania eksperymentalne

Cel badań. Zakres badań eksperymentalnych obejmował wstępną analizę jakościową i ilościową spalania na podstawie sygnału promieniowania optycznego, ukierunkowaną na lepsze zrozumienie niepożądanych zjawisk, takich jak występowanie spalania stukowego. Badania powinny także rozstrzygnąć, czy możliwe jest wykorzystanie wobec sygnału natężenia promieniowania optycznego tych samych procedur przetwarzania sygnału, które stosowane są w algorytmach detekcji stuku bazujących na sygnale ciśnienia. Wyniki zaprezentowane w niniejszym artykule ilustrują wykorzystanie funkcji autokorelacji szerokopasmowego sygnału natężenia promieniowania optycznego do detekcji spalania stukowego i oceny jego intensywności.

Silnik badawczy i układ pomiarowy. Badania wykonano na zmodyfikowanym jednocylindrowym, chłodzonym powietrzem silniku Honda GX390 o zapłonie iskrowym. Silnik został wyposażony w specjalnie zaprojektowane układy zapłonowy i wtryskowy, sterowane elektronicznie z poziomu komputera osobistego PC. W tabeli 1 przedstawiono najważniejsze parametry techniczne silnika Honda GX390.

System pomiarowy składał się z zestawu optycznych czujników spalania rejestrujących natężenie promieniowania optycznego emitowanego podczas procesu spalania. Czujniki zostały zamontowane w różnych punktach głowicy silnika, różniły się średnicą okna optycznego. Zaprezentowane wyniki pochodzą wyłącznie z jednego czujnika oznaczonego G4. Rysunek 1 przedstawia przekrój przez głowicę silnika z zaznaczonymi położeniami poszczególnych czujników. Czujnik G4 wykorzystany do badań przedstawiono na rys. 2. Ma on rdzeń kwarcowy o średnicy 8 mm oraz płaskie zwierciadło optyczne.

Kalibracja czujnika obejmowała ocenę kąta akceptacji – wynosi ona ok. 33 stopnie przy założeniu 5-procentowego poziomu sygnału (rys. 3) – oraz pomiar apertury numerycznej i charakterystyki tłumienia w zależności od kąta padania światła. Sporządzono również charakterystykę tłumienia czujnika w funkcji jego czasu pracy: straty transmisji powodowane są przez zanieczyszczenia osadzające się na zwierciadle czujnika. Na rysunku 4 przedstawiono względny poziom sygnału odniesiony do

The measurement system was based on the set of optical combustion sensors recording the intensity of optical radiation emitted from the combustion chamber. The sensors were mounted in different locations of the cylinder head, and varied with the diameter of their optical window. Results presented in this paper were obtained using only one of the sensors – G4. Figure 1 shows the cross-section of the cylinder head with positions of the sensors marked. The combustion sensor used in the presented experiments (G4 – Fig. 1) is shown in Fig. 2. It has a quartz core diameter of 8 mm and plane mirror surface.

Preliminary calibration of the sensor included the estimation of the acceptance angle – it was approx. 33° with an assumption of 5% signal level (Fig. 3) and numerical aperture and attenuation characteristics in relation to the incidence angle. Sensor calibration also included the attenuation characteristics in a function of its operating time: significant transmission losses were created by deposits on its mirror surface. Fig. 4 presents relative transmission of the combustion sensor for the maximum level of panchromatic optical radiation (η_z) as a function of operating time (no. of engine cycles – N) in steady state conditions (engine was run stoichiometric at 2000 rpm, throttle position was set at 60%). An interesting feature was observed: at the beginning the attenuation characteristic is exponential, in accordance with a Lambert-Beer’s law. After approx. 7 thousand cycles (approx. 420 s) the attenuation characteristics becomes linear. Therefore it can be assumed, that at the beginning of the operation the thickness of the contamination layer increases steadily, then the growth is inhibited. Signal-to-noise ratio remains on a satisfactory level even with the increasing contamination of sensor’s tip.

The optical signal was transmitted to the filtering and detecting components using an elastic bundle of waveguides. The resultant panchromatic optical radiation was recorded using a transducer with a transmission band from 200 to 800 nm and peak sensitivity 750 nm, then amplified. The triggering and sampling signals were supplied by the crankshaft position sensor, and instantaneous optical signal was recorded with the resolution of 0.1 CA (crankshaft angle). Signals were digitized using a 12-bit a-d card with a maximum sampling rate of 1.25 MS/s. Figure 5 presents the general set-up of the optical measurement system.

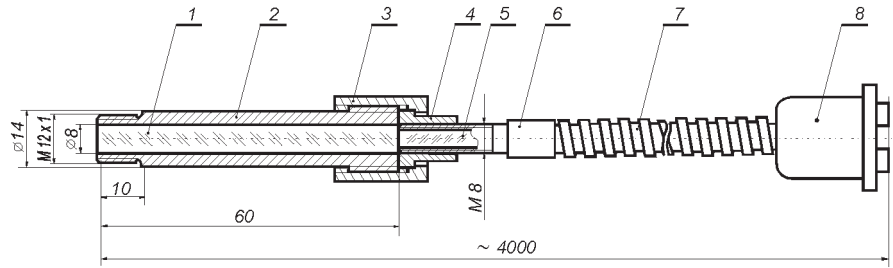


Fig. 2. Design of the basic optical combustion sensor (G4): 1 – quartz-glass, 2 – steel sleeve, 3 – nut, 4 – sleeve, 5 – waveguide bundle, 6 – waveguide terminal, 7 – steel protection coat, 8 – bifurcated terminal

Rys. 2. Przekrój głowicowego czujnika optycznego G4: 1 – pręt ze szkła kwarcowego, 2 – tuleja stalowa, 3 – nakrętka, 4 – tuleja, 5 – pęk światłowodów, 6 – zakończenie światłowodu, 7 – płaszcz stalowy, 8 – zakończenie rozwidlone

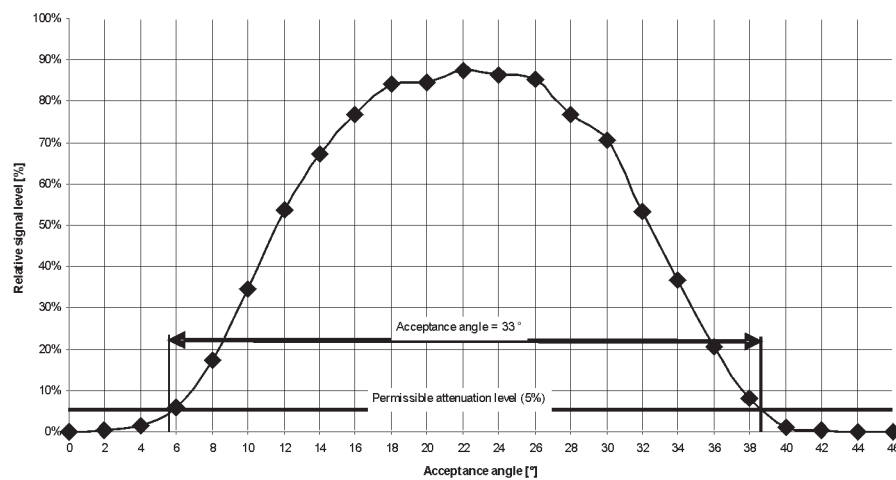


Fig. 3. Relative signal level of combustion sensor (G4) as a function of acceptance angle

Rys. 3. Względny poziom sygnału z czujnika spalania G4 w funkcji kąta akceptacji

maksymalnej wartości promieniowania panchromatycznego (η_z) w funkcji czasu pracy (liczba cykli pracy silnika – N) w warunkach ustalonych (silnik pracował z prędkością 2000 obr/min, położenie przepustnicy ustalono na 60%). Zaobserwowaną interesującą zależność: początkowo charakterystyka tłumienia ma przebieg wykładniczy, zgodny z prawem Lamberta-Beera. Po około 7 tys. cykli (dla 2000 obr/min jest to ok. 420 s pracy) przechodzi w zależność liniową. Stąd przyjęto założenie, że na początku badań grubość osadów wzrasta stopniowo, a następnie proces ten zostaje zahamowany. Stosunek sygnału do szumu pozostaje na zadowalającym poziomie, nawet przy rosnącym zanieczyszczeniu końcówki czujnika.

Sygnal optyczny był transmitowany do układów filtracyjnych i detektorów pękiem światłowodów. Wypadkowe panchromatyczne promieniowanie optyczne rejestrowano przetwornikiem o paśmie przenoszonym w zakresie od 200 do 800 nm i maksymalnej czułości przy 750 nm, przetworzony sygnał był następnie wzmacniany. Wyzwalanie i próbkowanie sygnału realizowano w oparciu o sygnał z czujnika położenia wału korbowego, chwilowe wartości sygnału optycznego rejestrowano z rozdzielczością 0,1° OWK (kąt obrotu wału korbowego). Sygnały analogowe przekształcane były do postaci cyfrowej przy użyciu 12-bit-

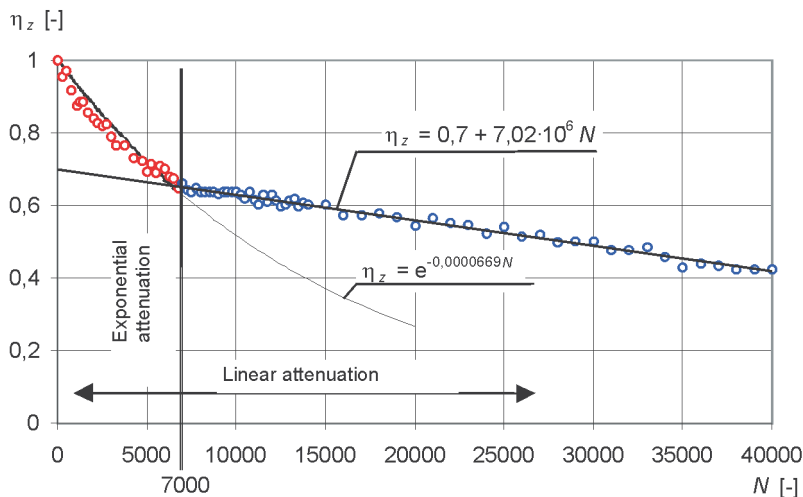


Fig. 4. Relative attenuation of the combustion sensor (G4) as a function of engine cycles (N)
Rys. 4. Względne osłabienie sygnału czujnika spalania (G4) w funkcji liczby cykli pracy silnika (N)

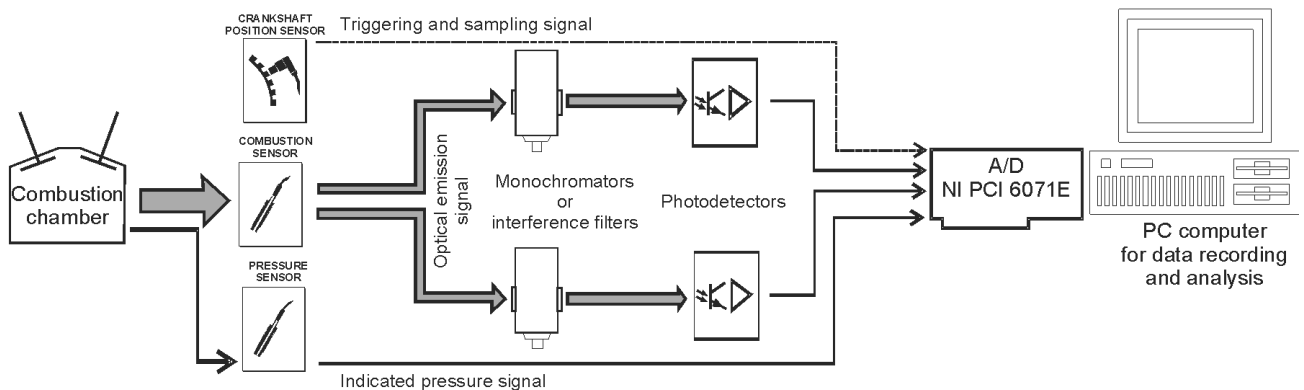


Fig. 5. General schematics of the measurement system used for the recording of the optical radiation from the combustion chamber
Rys. 5. Schemat ogólny toru pomiarowego do rejestracji promieniowania optycznego z komory spalania silnika

Research was done for different engine operating conditions: engine speed (n): 1600, 2500, 3500 rpm; throttle positions (ap): 30, 60, 90%, ignition advance: 25–65 CA BTDC (crankshaft angle before top dead center). The mixture composition was always set manually by the operator to stoichiometric on the basis of the readouts from the wide-band oxygen sensor and exhaust gas analyzer. For comparative analysis a pressure signal was simultaneously recorded using miniature piezoelectric pressure transducer mounted in the spark-plug (AVL GU13Z-24).

4. Data processing

The radiation spectrum of the flames in the combustion chamber of the gasoline engine is dominated by the temperature of combustion (thermal emission) and chemical reactions (chemoluminescence). Its intensity and spectral properties are modified by abnormal combustion such as knock. Research methods utilize different emissive properties of the flames: from the thermal radiation to linear spectra of radicals. In the described experiments the acquired optical

towej karty przetworników o maksymalnej częstotliwości próbkowania 1,2 MS/s. Na rysunku 5 przedstawiono schemat optycznego układu pomiarowego.

Badania eksperymentalne wykonano dla różnych warunków pracy silnika: prędkości obrotowej (n) 1600, 2500 oraz 3500 obr/min, położenia przepustnicy (ap) 30, 60, 90% i kątów wyprzedzenia zapłonu (kwz) 25–65° OWK przed GMP. Dawkę wtryskiwanego paliwa dobierano manualnie, tak aby skład mieszanki odpowiadał stechiometrycznemu, posługiwano się przy tym odczytami z szerokopasmowej sondy lambda oraz analizatora spalin. W celu analizy porównawczej równocześnie rejestrowano sygnał ciśnienia indykowanego generowany przez miniaturowy czujnik piezokwarcowy zintegrowany ze świecą zapłonową (AVL GU13Z-24).

4. Przetwarzanie danych

Widmo promieniowania płomieni w komorze spalania silnika benzynowego jest zdominowane przez temperaturę spalania (emisja termiczna) oraz reakcje chemiczne (chemoluminescencja). Jego intensywność i właściwości widmowe modyfikowane są przez zjawiska spalania nienormalnego, takie jak spalanie stukowe. Metody badawcze wykorzystują różne właściwości emisyjne płomieni, począwszy od promieniowania cieplnego po liniowe widma rodników. W opisywanych eksperymentach zarejestrowany sygnał optyczny miał najprostszą postać: było to uśrednione natężenie (moc optyczna) szerokopasmowego promieniowania optycznego zmierzonego w polu widzenia czujnika. Analiza sygnału przebiegała w odniesieniu do położenia kąтового wału korbowego.

Aby wyeliminować niepożądane składowe stałe oraz zakłócenia wysokoczęstotliwościowe, zarejestrowane sygnały poddano filtracji cyfrowej. W pierwszym rzędzie było konieczne określenie teoretycznych częstotliwości drgań towarzyszących spalaniu stukowemu w komorze spalania

signal had the simplest form: it was an averaged wide-band intensity (optical power) of optical radiation gathered from the sensors's field of view. Further signal analysis was done in the function of angular crankshaft position.

So as to eliminate the unwanted constant components and high-frequency noise, the recorded signals were digitally filtered. First, it was necessary to determine the theoretical frequencies of vibrations accompanying the knocking combustion in the combustion chamber of the GX390 engine. It was done using equation (1) describing the vibration frequency of acoustic pressure wave in the disc-shaped combustion chamber [10]:

$$f_{m,n} = (C \cdot \rho_{m,n}) / \pi \cdot B \quad (1)$$

where: $f_{m,n}$ – vibration frequencies for the modes m, n , [Hz]; C – speed of sound at knocking conditions, [m/s]; $C = 950$ m/s; $\rho_{m,n}$ – coefficient of vibration modes; B – cylinder bore, [m]; $B = 0.088$ m; m – mode index of circumferential oscillations; n – mode index of radial oscillations.

The above equation ignores the axial vibrations, as height of the combustion chamber at TDC of the piston is relatively small in comparison to the piston diameter. Table 2 presents the calculated frequencies for the consecutive circumferential and radial vibration modes. The most important is the first circumferential mode, according to the considerations presented in [10]. The applied digital filter consisted of low-pass and high-pass Chebyshev's filters with infinite impulse response IIR. In such a way it was possible to directly separate the intensity of the optical radiation during knocking combustion.

The sampling frequency also had to be considered. The required minimum was imposed by the Nyquist criterion, however the introduction of digital filters and/or FFT algorithms imposed a use of even higher sampling frequencies. As the knocking frequencies for different vibration modes were approximated on the theoretical basis, it was possible to check the Nyquist criterion for the sampling frequencies used during the experimental research. The comparison of frequencies is presented in Table 3. The minimum sampling frequency (96 kHz) was 3.32 times higher than the maximum limiting sampling frequency determined for the analyzed vibration modes (28.88 kHz). Therefore, it can be assumed, that the recorded signals were free from frequency masking and resonance and high-frequency noise was eliminated.

5. Data analysis

The onset of knocking results in a rapid increase in the intensity of optical radiation $I_{op,t}$, it then changes in accordance with indicated pressure p_i – (see e.g. [11–13]). The changes of intensity of optical radiation can be associated with high frequency pressure waves which reinitialize the luminescence of burned gases as a result of adiabatic heating. In case of boundary conditions – i.e. at knocking limit – the pressure traces would not indicate the occurrence of knock, whereas optical signal shows a rapid growth in the value resulting from the presence of auto-ignition centers. This phenomenon was confirmed by other researchers [8, 10, 14].

silnika GX390. Obliczono je, wykorzystując równanie (1), opisujące częstotliwości drgań fali ciśnienia akustycznego w komorze spalania o kształcie zbliżonym do dysku [10], gdzie: $f_{m,n}$ – częstotliwości drgań dla postaci m, n , [Hz]; C – prędkość dźwięku w warunkach spalania stukowego, [m/s], $C = 950$ m/s; $\rho_{m,n}$ – współczynnik postaci drgań; B – średnica cylindra, [m], $B = 0,088$ m; m – indeks postaci drgań obwodowych; n – indeks postaci drgań promieniowych.

W równaniu (1) pominięto drgania osiowe, ponieważ wysokość komory spalania w GMP tłoka jest względnie mała w porównaniu ze średnicą tłoka. W tabeli 2 przedstawiono obliczone częstotliwości dla, odpowiednio, obwodowych i promieniowych postaci drgań. Najważniejsza jest pierwsza postać drgań obwodowych, zgodnie z rozważaniami zaprezentowanymi w pracy [10].

Table 2. Frequencies of acoustic oscillations of the pressure wave during knocking combustion in the combustion chamber of the GX390 engine

Tabela 2. Częstotliwości drgań akustycznych fali ciśnienia w warunkach spalania stukowego w komorze spalania silnika GX390

m – n	1 – 0	2 – 0	0 – 1	3 – 0	1 – 1
$\rho_{m,n}$	1.841	3.054	3.832	4.201	5.332
$f_{m,n}$ [kHz]	6.36	10.56	–	14.44	–

Zastosowane filtry cyfrowe składały się z dolno- i górnoprzepustowych filtrów Czebyszewa o nieskończonej odpowiedzi impulsowej IIR. W ten sposób możliwe było bezpośrednie wyodrębnienie intensywności promieniowania optycznego w warunkach stuku.

Należało również rozważyć częstotliwość próbkowania sygnału. Jej minimalną wartość narzuca kryterium Nyquista, jednakże wprowadzenie filtrów cyfrowych i/lub transformacji FFT wymusza zastosowanie jeszcze wyższych częstotliwości próbkowania. Po teoretycznym wyznaczeniu częstotliwości związanych ze spalaniem stukowym, możliwe było sprawdzenie kryterium Nyquista dla częstotliwości próbkowania zastosowanych podczas realizacji pomiarów. Porównanie częstotliwości przedstawia tab. 3. Minimalna częstotliwość próbkowania (96 kHz) była 3,32 razy wyższa niż maksymalna częstotliwość graniczna wyznaczona dla analizowanych postaci drgań (28,88 kHz). Stąd można

Table 3. Comparison of sampling frequencies used during the experiments with theoretical values

Tabela 3. Porównanie częstotliwości próbkowania sygnału stosowanych w badaniach z wartościami teoretycznymi

Engine speed/ prędkość obrotowa [rpm]	Sampling frequency/ często- tliwość próbkowa- nia [kHz]	Theoretical frequency of the pressure wave for the consecutive vibration modes/ teoret. częstotliwość fali ciśnienia dla ko- lejnych modów drgań [kHz]	Minimum sam- pling frequency acc. to Nyquist criterion/minimal- na częstotliwość próbkowania wg kryterium Nyquista [kHz]
1600	1600*60 = 96	1 – 0: 6.36 2 – 0: 10.56 3 – 0: 14.44	1 – 0: 12,72 2 – 0: 21,12 3 – 0: 28.88
2500	2500*60 = 150		
3500	3500*60 = 210		

The analysis of the autocorrelation function of the wide-band optical radiation intensity signal was based on the evaluation of the estimator of the autocorrelation function of the random process, meeting the conditions of stationarity (eq. 2).

$$\hat{R}_{xx}(\tau) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-\tau-1} x_{n+\tau} x_n^* & \text{for } \tau \geq 0 \\ \hat{R}_{xx}^*(-\tau) & \text{for } \tau < 0 \end{cases} \quad (2)$$

where N is the length (no. of samples) of the recorded signal vector $x = I_{opt}$, and τ denotes the shift.

In order to minimize the bias error of the estimator and obtain an unbiased estimator of the autocorrelation function, the results were normalized using scaling quantity (eq. 3):

$$\hat{R}_{xx}(\tau)_{unbiased} = \frac{1}{N-|\tau|} \hat{R}_{xx}(\tau) \quad (3)$$

The autocorrelation analysis of the wide-band optical radiation intensity I_{opt} signal obtained from the combustion chamber in different engine operating conditions (engine speed – load – ignition timing) was aimed at a general assessment of the dependence of the signal value on its values at the preceding moments. Some typical features of the autocorrelation function can be used for the detection of knocking, periodic components, noise or for the evaluation and comparison of the change velocity of the optical radiation signal. In some of the cases comparisons with the recorded indicated pressure p_i were made, so as to emphasize the existing differences or similarities.

Figure 6 show the courses of the autocorrelation function for intensity of optical radiation I_{opt} and indicated pressure p_i calculated for 10 consecutive engine cycles. The analysis shows unfiltered signals, therefore a dominant slow-changing periodic component is clearly visible. This component is closely related to the occurrence of combustion. It is noteworthy that the autocorrelation function calculated for the intensity of optical radiation has much higher dynamics of changes resulting from different engine operating conditions. Assuming, in Fig. 6 as a reference level, the courses obtained for $n = 1600$ rpm, $a_p = 30\%$, $kwz = 40$ CA BTDC, in case of the indicated pressure the dynamics of span changes of the autocorrelation $|R_{xx}^{max} - R_{xx}^{min}|$ for the presented engine operating conditions ($n = 2500$ rpm, $a_p = 60\%$, $kwz = 50$ CA BTDC and 3500 rpm, 90% , 60 CA BTDC) amounts to 3.0 dB and 4.0 dB, whereas in the case of the intensity of optical radiation these values are correspondingly 7.9 dB and 14.2 dB. This confirms previous [12] observations regarding a higher influence of engine operating conditions on the changes of the optical signal in comparison to the indicated pressure.

Similar dependences can be observed on the charts shown in Fig. 7, where the calculated autocorrelation functions for one engine cycle were averaged from 100 consecutive cycles – again for different engine operating conditions. Also, in this case a higher dynamics of span changes of the autocorrelation function calculated for the intensity of optical

przyjąć, że w zarejestrowanych sygnałach nie wystąpiło zjawisko maskowania częstotliwości i rezonansu, a szum wysokoczęstotliwościowy został wyeliminowany.

5. Analiza wyników

Pojawienie się spalania stukowego powoduje gwałtowny wzrost natężenia promieniowania optycznego I_{opt} , które następnie zmienia się w korelacji ze zmianami przebiegu ciśnienia indykowanego p_i – (np. [11–13]). Zmiany natężenia promieniowania optycznego mogą być powiązane z wysokoczęstotliwościowymi falami ciśnienia, które reinicjują świecenie spalonych gazów w wyniku ich adiabatycznego ogrzewania. W przypadku warunków granicznych, tj. pracy silnika na granicy stuku, sygnał ciśnienia nie wskaże pojawienia się stuku, natomiast sygnał optyczny wykazuje już gwałtowny wzrost amplitudy, będący wynikiem pojawienia się ośrodków samozapłonu mieszanki. Zjawisko to potwierdzają wyniki badań dostępne w literaturze [8, 10, 14].

Analiza funkcji autokorelacji natężenia szerokopasmowego promieniowania optycznego została przeprowadzona w oparciu o ocenę estymatora funkcji autokorelacji procesu stochastycznego, spełniającego założenia stacjonarności – równanie (2), gdzie N jest długością (liczba próbek) zarejestrowanego sygnału $x = I_{opt}$ oraz τ oznacza przesunięcie.

Aby zminimalizować błąd obciążenia estymatora i uzyskać nieobciążony (unbiased) estymator funkcji autokorelacji, wyniki zostały znormalizowane wielkością skalującą – równanie (3).

Analiza autokorelacji sygnału intensywności szerokopasmowego promieniowania optycznego I_{opt} uzyskanego z komory spalania w różnych warunkach pracy silnika (prędkość obrotowa – obciążenie – kąt wyprzedzenia zapłonu) ukierunkowana była na ogólną ocenę zależności wartości sygnału od jego wartości w chwilach poprzedzających. Pewne typowe cechy funkcji autokorelacji mogą być wykorzystane do detekcji spalania stukowego, składowych okresowych, szumu lub zmian w prędkości zmian sygnału promieniowania optycznego. W niektórych przypadkach dokonywano porównania z odpowiadającym sygnałem ciśnienia indykowanego p_i , aby lepiej uwidocznić istniejące różnice lub podobieństwa.

Rysunek 6 przedstawia przebiegi funkcji autokorelacji sygnału intensywności szerokopasmowego promieniowania optycznego I_{opt} i ciśnienia indykowanego p_i obliczone dla 10 kolejnych cykli pracy silnika. Przedstawiono sygnały niefiltrowane, stąd też wyraźnie dominuje w nich wolnozmienna składowa okresowa. Składowa ta jest bardzo związana z występowaniem spalania. Warto zauważyć, że funkcja autokorelacji obliczona dla sygnału intensywności promieniowania optycznego charakteryzuje się znacznie wyższą dynamiką zmian w zależności od warunków pracy silnika. Przyjmując (rys. 6) za poziom odniesienia przebiegi uzyskane dla $n = 1600$ obr/min, $a_p = 30\%$, $kwz = 40^\circ$ OWK przed GMP, w przypadku ciśnienia indykowanego zakres zmian funkcji autokorelacji $|R_{xx}^{max} - R_{xx}^{min}|$ dla zaprezentowanych warunków pracy silnika ($n = 2500$ obr/min, $a_p = 60\%$, $kwz = 50^\circ$ OWK oraz 3500 obr/min, 90% , 60° OWK) wynosi odpowiednio 3,0 dB i 4,0 dB. W przypadku sygnału

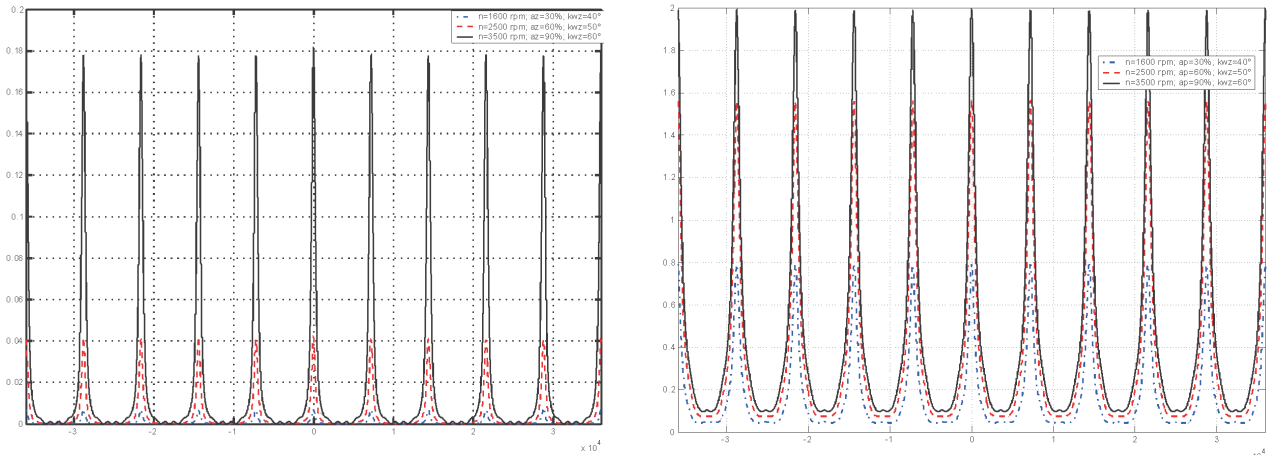


Fig. 6. The autocorrelation function of I_{opt} signal (upper) and p_i signal (lower) calculated for 10 consecutive engine cycles in different engine operating conditions

Rys. 6 Funkcja autokorelacji sygnału I_{opt} (wykres górny) oraz p_i (wykres dolny) obliczona dla 10 kolejnych cykli w różnych warunkach pracy silnika

radiation can be observed: 11.3 dB and 18.0 dB for $R_{xx}(I_{opt})$ whereas for $R_{xx}(p_i)$ correspondingly it is only 4.6 dB and 5.5 dB. The autocorrelation function of indicated pressure p_i approaches zero significantly slower than it is in the case of I_{opt} . It can point to the fact, that the optical signal can be characterized by higher speed of changes and the presence of quick-changing components in the analyzed courses, particularly since the graphs presented in Fig. 7 were averaged from 100 consecutive runs.

For the shift $\tau = 0$ the autocorrelation function equals to the root mean square (rms) Ψ_x^2 which is a common measure of signal energy. Figure 8 shows the rms values of I_{opt} signal for all the investigated engine operating conditions. So as to make comparisons easier, individual values are represented in relative values, referred to the minimum value of $\Psi_{x\ min}^2$.

The onset of knocking combustion is accompanied by the increase of transmitted energy, which is visible as an increase of its root mean square value. This phenomena can be clearly observed for the engine speed $n = 3500$ rpm, throttle position

optycznego wartości te wynoszą odpowiednio 7,9 dB i 14,2 dB. Potwierdza to wcześniejsze spostrzeżenia autora [12] dotyczące większego wpływu warunków pracy silnika na zmiany intensywności promieniowania optycznego w porównaniu z ciśnieniem indykowanym.

Podobne zależności można zaobserwować na rys. 7, gdzie funkcję autokorelacji dla jednego cyklu pracy silnika obliczono, uśredniając ją ze 100 kolejnych cykli. Ponownie przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych warunków pracy silnika. Także i w tym przypadku widoczna jest większa dynamika zmian funkcji autokorelacji obliczonej dla sygnału natężenia promieniowania optycznego: 11,3 dB oraz 18,0 dB dla $R_{xx}(I_{opt})$, gdy dla ciśnienia indykowanego $R_{xx}(p_i)$ wartości te wynoszą 4,6 dB oraz 5,5 dB. Funkcja korelacji dla p_i maleje do zera znacznie wolniej niż w przypadku I_{opt} . Wskazuje to na fakt, że sygnał optyczny charakteryzuje się większą prędkością zmian i w analizowanych przebiegach występują składowe szybkozmienne, zwłaszcza że wykresy na rys. 7 zostały uśrednione ze 100 kolejnych cykli.

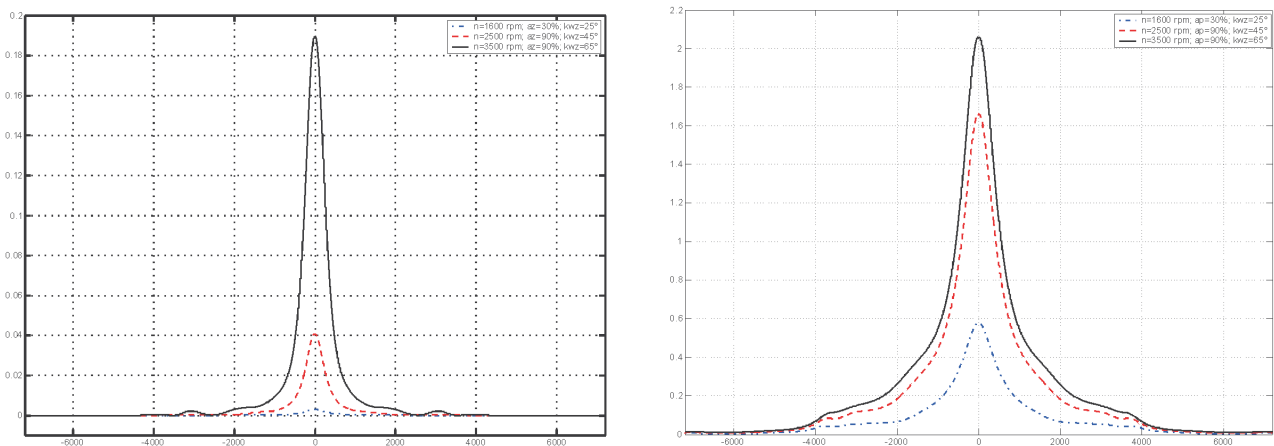


Fig. 7. The autocorrelation function of I_{opt} (upper) and p_i (lower) signals obtained for single engine cycle averaged from 100 consecutive runs, at different engine operating conditions

Rys. 7. Funkcje korelacji sygnału I_{opt} (wykres górny) oraz p_i (wykres dolny) uzyskane dla pojedynczego cyklu pracy silnika uśrednionego ze 100 kolejnych przebiegów dla różnych warunków pracy silnika

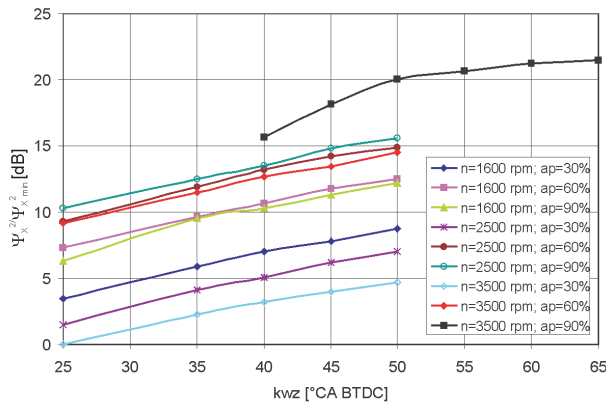


Fig. 8. Relative root mean square rms ($\Psi_x^2/\Psi_{x_{\min}}^2$) of the I_{opt} signal for different engine operating conditions (averaged from 100 consecutive cycles)

Rys. 8 Względna wartość skuteczna rms ($\Psi_x^2/\Psi_{x_{\min}}^2$) sygnału I_{opt} wyznaczona dla różnych warunków pracy silnika (uśrednienie ze 100 kolejnych cykli)

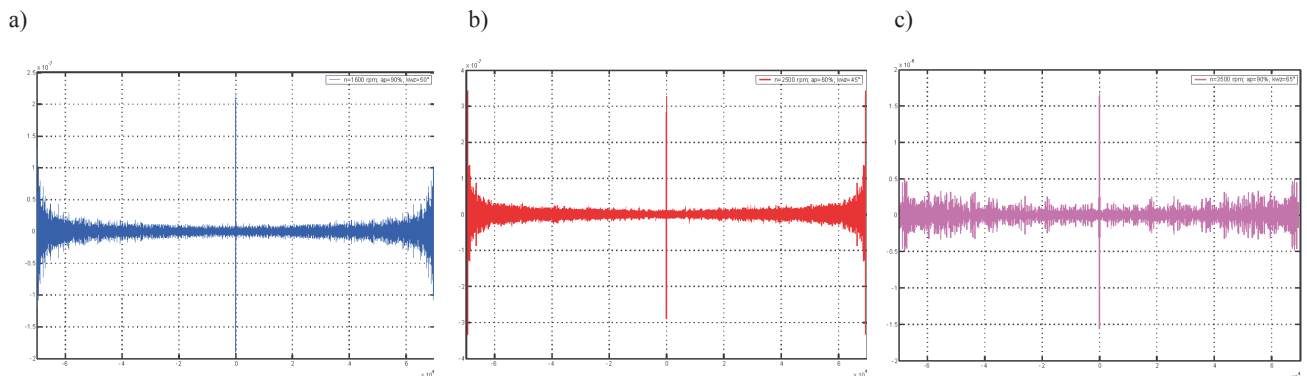


Fig. 9. The autocorrelation of the filtered I_{opt} signal calculated for 100 consecutive engine cycles: a) $n = 1600$ rpm, $a_p = 90\%$, kwz = 50 CA; b) $n = 2500$ rpm, $a_p = 60\%$, kwz = 45 CA; c) $n = 3500$ rpm, $a_p = 90\%$, kwz = 65 CA

Rys. 9. Funkcja autokorelacji filtrowanego sygnału I_{opt} obliczona dla 100 kolejnych cykli: a) $n = 1600$ obr/min, $a_p = 90\%$, kwz = 50° OWK; b) $n = 2500$ obr/min, $a_p = 60\%$, kwz = 45° OWK; c) $n = 3500$ obr/min, $a_p = 90\%$, kwz = 65° OWK

$a_p = 90\%$ and ignition timing kwz equal to 50, 55, 60 and 65 CA BTDC. Relative changes of the signal rms values ($\Psi_x^2/\Psi_{x_{\min}}^2$) calculated for the combustion without knocking, independent from the engine operating conditions were contained in the range $\langle 1-20 \rangle$. The increase of the engine load and ignition advance leading to knocking resulted in the increase of the relative Ψ_x^2 values – the maximum value calculated during the research was 141.77.

So as to more accurately describe the characteristic features of the autocorrelation function resulting from the presence of knocking combustion, it was necessary to analyze the filtered combustion courses. The slow changing component related to cyclic combustion was removed as it was described in the “Data processing” chapter of this paper.

Figure 9 presents some examples of the autocorrelation function calculated for the signal of intensity of optical radiation I_{opt} at different engine operating conditions within the range including 100 consecutive engine cycles. The source signal was earlier filtered using a band-pass filter

Dla przesunięcia $\tau = 0$ funkcja korelacji równa się wartości skutecznej Ψ_x^2 (rms), będącej powszechnie stosowaną miarą energii sygnału. Rysunek 8 przedstawia wartości skuteczne sygnału I_{opt} dla wszystkich przebadanych warunków pracy silnika. Aby ułatwić porównania, indywidualne wartości zostały przedstawione w jednostkach względnych, odniesionych do minimalnej wartości $\Psi_{x_{\min}}^2$.

Wystąpieniu spalania stukowego towarzyszy wzrost ilości transmitowanej energii, co jest widoczne we wzroście wartości średniokwadratowej. Zjawisko to jest wyraźnie widoczne w przypadku przebiegów zarejestrowanych dla $n = 3500$ obr/min, położenia przepustnicy $a_p = 90\%$ i kąta wyprzedzenia zapłonu kwz wynoszącego 50, 55, 60 i 65° OWK przed GMP. Względne zmiany wartości skutecznej ($\Psi_x^2/\Psi_{x_{\min}}^2$) obliczone dla sygnału optycznego zarejestrowanego podczas spalania bezstukowego; niezależnie od warunków pracy silnika zawierały się w przedziale $\langle 1-20 \rangle$. Wzrost obciążenia silnika i kąta wyprzedzenia zapłonu prowadzące do wystąpienia spalania stukowego powodują zwiększenie wartości względnych Ψ_x^2 – maksymalna wartość wyznaczona w obliczeniach wyniosła 141,77.

Aby dokładniej opisać charakterystyczne cechy funkcji autokorelacji związane z występowaniem spalania stukowego, przeanalizowano cykle poddane filtracji. Składowa wolnozmenna związana z cyklicznym występowaniem spalania została wyeliminowana, co dokładniej opisano w tym artykule, w rozdz. 4.

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe funkcje autokorelacji obliczone dla sygnału natężenia promieniowania optycznego I_{opt} dla różnych warunków pracy silnika w przedziale obejmującym 100 kolejnych cykli. Sygnał źródłowy został wcześniej odfiltrowany za pomocą filtrów pasmowo-przepustowych. Dla uproszczenia obliczeń został również zawężony do przedziału kąтового od 330 do 440° OWK (szerokość okna 120° OWK), obejmującego okres spalania mieszanki.

We wszystkich przypadkach pokazanych na rys. 9 (9a–c) funkcja autokorelacji maleje szybko i dla większych wartości przesunięcia τ pojawia się szum gaussowski. Warto jednak

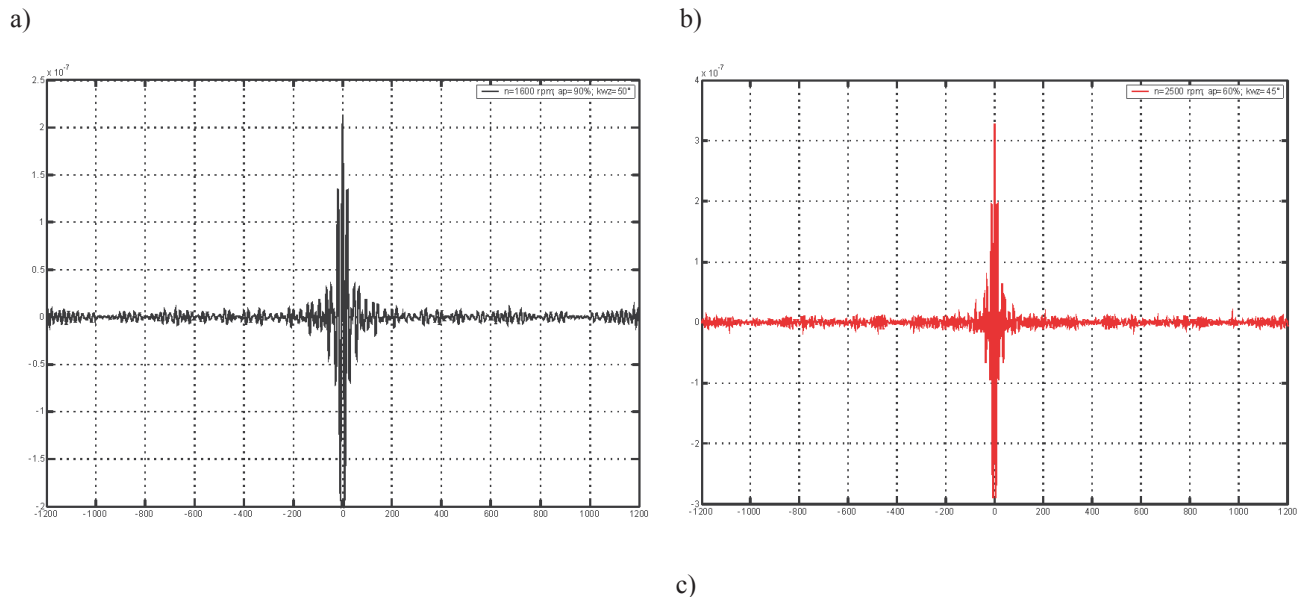


Fig. 10. The autocorrelation function of filtered signal I_{opt} calculated for 100 consecutive cycles, window 120 CA: a) $n = 1600$ rpm, $a_p = 90\%$, $kwz = 50$ CA; b) $n = 2500$ rpm, $a_p = 60\%$, $kwz = 45$ CA; c) $n = 3500$ rpm, $a_p = 90\%$, $kwz = 65$ CA

Rys. 10. Funkcja autokorelacji filtrowanego sygnału I_{opt} obliczona dla 100 kolejnych cykli, okno 120° OWK: a) $n = 1600$ obr/min, $a_p = 90\%$, $kwz = 50^\circ$ OWK; b) $n = 2500$ obr/min, $a_p = 60\%$, $kwz = 45^\circ$ OWK; c) $n = 3500$ obr/min, $a_p = 90\%$, $kwz = 65^\circ$ OWK

and for the simplification of the calculations, narrowed to the angular window from 330 to 440 CA (length 120 CA), which included the combustion period.

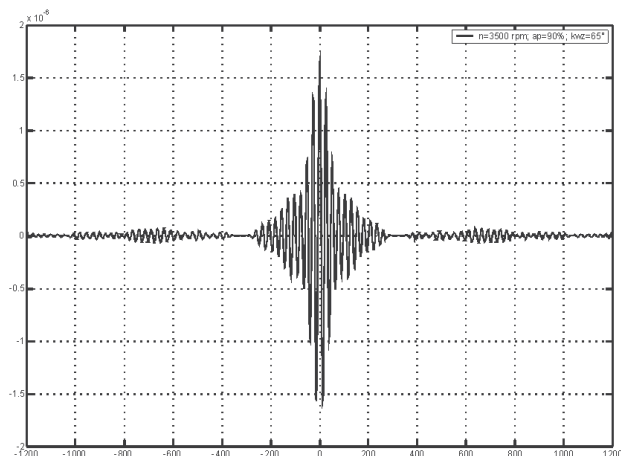
In all cases shown in Fig. 9 (9a–9c) the autocorrelation function decreases relatively quickly, and for higher values of shift τ , a Gaussian noise can be observed. However it is worth while to observe the periodic components which are clearly visible in Fig. 9c. This chart corresponds to the engine operation with knocking combustion. As the analyzed signal was previously filtered, the presence of these components should therefore be related to the knocking phenomena. So as to verify the above observations, an analysis of the autocorrelation was made for limited values of shift τ – the results of which are presented in Fig. 10.

The onset of knocking results in a much slower decrease of the autocorrelation function, moreover its values in the case of knocking are higher even by one order of magnitude. The observed dependence can result from a simultaneous existence of many superimposing combustion spots, which increase the intensity of the recorded optical radiation signal.

6. Conclusions

The described preliminary phase of work was mostly oriented towards the evaluation of usability of the designed optical combustion sensors and signal processing methods for combustion diagnostics. A statistical analysis of the optical radiation signal and its comparison with the reference pressure signal permits to draw some conclusions.

c)



zauważyć składowe okresowe, które są wyraźnie widoczne na rys. 9c. Wykres ten odpowiada pracy silnika w warunkach spalania stukowego. Ponieważ analizowany sygnał był wcześniej odfiltrowany, obecność tych składowych powinna być bezpośrednio skojarzona z obecnością stuku. Aby zweryfikować powyższe obserwacje, funkcję autokorelacji wyznaczono dla ograniczonych wartości przesunięcia τ – wyniki zaprezentowano na rys. 10.

Pojawieniu się spalania stukowego towarzyszy znacznie powolniejszy spadek wartości funkcji autokorelacji, ponadto jej wartości w przypadku stuku są wyższe – nawet o rząd wielkości. Zaobserwowana zależność może wynikać z równoczesnej obecności wielu, wzajemnie nakładających się ognisk spalania, które zwiększają natężenie rejestrowanego sygnału promieniowania optycznego.

6. Wnioski

Opisany fragment prac badawczych dotyczył oceny możliwości wykorzystania zaprojektowanych optycznych czujników spalania i metod przetwarzania sygnału w diagnostyce spalania. Analiza statystyczna sygnału natężenia promieniowania optycznego i porównanie go z referen-

1. The existence of strong correlation between the intensity of optical radiation from the combustion chamber and the indicated pressure which was confirmed in the previous stages of the data analysis as well as by other researchers, allows to form the assumption that wide-band optical radiation can be reliably used as a basis for knocking detection. It should also be possible to use the same signal processing procedures which are used in the knocking detection algorithms based on the pressure analysis in relation to the signal of optical radiation.
 2. The analysis of the results shows, that the resultant wide-band optical radiation is more sensitive to the changing engine operating conditions in a wide-band region and less susceptible to external interferences in comparison to the indicated pressure. A higher dynamics of span changes of the autocorrelation function calculated for the intensity of optical radiation can also be observed. A detailed analysis of the results presented in this paper shows that the autocorrelation function calculated for the intensity of optical radiation during knocking combustion shows periodic components.
 3. The onset of knocking results in a much slower decrease of the autocorrelation function, moreover its values in the case of knocking are higher even by one order of magnitude. Knocking also results in a significant increase of the root mean square calculated for the signal. This can result from the simultaneous existence of many superimposing combustion spots. A violent increase of energy transmitted by the signal directly influences the intensity of the recorded optical radiation signal.
 4. The presented results do not yet permit to draw detailed conclusions regarding the flame properties or knocking characteristics. This requires further signal processing including the filtration of frequencies corresponding to the resonant frequency of the combustion chamber and an analysis in the frequency domain. There is also an unexploited potential related to the spectral measurements of the optical radiation emitted during the combustion process.
- Artykuł recenzowany

cyjnym sygnałem ciśnienia indykowanego pozwalają na wyciągnięcie kilku wniosków.

1. Istnienie silnej korelacji pomiędzy natężeniem promieniowania optycznego z komory spalania a ciśnieniem indykowanym, które zostało potwierdzone przez autora we wcześniejszych etapach analizy wyników [12, 13] oraz przez innych badaczy [10, 14], pozwala na przyjęcie założenia, że szerokopasmowy sygnał promieniowania optycznego może być w sposób wiarygodny wykorzystany do detekcji spalania stukowego. Powinno być również możliwe wykorzystanie tych samych metod przetwarzania sygnału, które są stosowane w analizie sygnałów ciśnienia.
2. Analiza wyników wskazuje na to, że wypadkowy sygnał natężenia szerokopasmowego promieniowania optycznego bardziej zależy od zmiennych warunków pracy silnika i jest mniej podatny na zakłócenia zewnętrzne niż jest to w przypadku ciśnienia indykowanego. Widoczna jest również większa dynamika zmian rozpiętości funkcji autokorelacji obliczonej dla sygnału optycznego. Szczegółowa analiza wyników zaprezentowanych w tym artykule wykazała, że funkcja autokorelacji obliczona dla natężenia promieniowania optycznego w warunkach spalania stukowego ma składowe okresowe.
3. Pojawienie się spalania stukowego powoduje znacznie wolniejszy spadek wartości funkcji autokorelacji, ponadto jej wartości w przypadku stuku są wyższe nawet o rząd wielkości. Stuk powoduje również znaczący wzrost wartości średniokwadratowej obliczonej dla sygnału. Wynika to z obecności wielu nakładających się ognisk spalania. Gwałtowny wzrost ilości energii transmitowanej przez sygnał bezpośrednio wpływa na natężenie rejestrowanego sygnału optycznego.
4. Zaprezentowane wyniki nie pozwalają jednak na wyciągnięcie szczegółowych wniosków dotyczących właściwości płomienia lub charakterystyki stuku. Wymaga to dalszego przetwarzania sygnału, obejmującego m.in. wyodrębnienie częstotliwości odpowiadających częstotliwości rezonansowej komory spalania i sygnału w dziedzinie częstotliwości. Istnieje także dotychczas niewykorzystany potencjał związany z widmowymi pomiarami promieniowania optycznego towarzyszącego spalaniu.

Bibliography/Literatura

- [1] Decker H., Gruber H.: SAE Pap. 850298, 1985.
- [2] Leppard W.R.: SAE Pap. 820074, 1982.
- [3] Saminy B., Rizzoni G.: SAE Pap. 960618, 1996.
- [4] Sasayma T., Oho S., Kuroiwa H., Suzuki S.: SPIE Vol. 840, (1987).
- [5] Shoji H., Shimizu T., Nishizawa T. et al.: SAE Pap. 962104 (1996).
- [6] Smith G., Luque G., Park C. et al.: Combustion and Flame, 131 (2002).
- [7] Sohma K., Yukitake Y., Azuhata Y., Takaku Y.: SAE Pap. 910499 (1991).
- [8] Sun Z., Blackshear P.L., Kittelson D.B.: SAE Pap. 962103 (1996).
- [9] Yang J., Plee S., Remboski D.: SAE Pap. 930216 (1993).
- [10] Brunt M., Pond C., Biundo J.: SAE Pap. 980896 (1998).
- [11] Piernikarski D.: Lightguides and their Applications II, Proc. of SPIE, vol. 5576 (2004).
- [12] Hunicz J., Piernikarski D.: SAE Pap. 2004-01-0516 (2004).
- [13] Piernikarski D.: Archivum Combustionis, vol. 26, no. 3-4 (2006).
- [14] Ohya Y., Ohsuga M., Kuroiwa H.: SAE Pap. 901712 (1990).

Mr Piernikarski Dariusz, DEng. – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Lublin University of Technology.

Dr inż. Dariusz Piernikarski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

e-mail: d.piernikarski@pollub.pl

