ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: TRANSPORT z. 61 Nr kol. 1704

Paweł FABIŚ

WPŁYW KĄTA WYPRZEDZENIA ZAPŁONU NA PRZESUNIĘCIE FAZOWE ODPOWIEDZI WIBROAKUSTYCZNEJ BLOKU SILNIKA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu na przebieg i charakter drgań bloku silnika ZI o pojemności 1,6 dm^3. Zmiany poziomu drgań bloku silnika spalinowego przedstawiono obliczając miary amplitudowe oraz współczynniki bezwymiarowe dla wybranego zakresu kątowego sygnału przyspieszeń drgań.

INFLUENCE TIMING IGNITION ON ENGINE BLOCK RESPONSE SHIFT PHASE

Summary. The paper present influence of timing ignition on engine block traces. Various of vibration acceleration was presented with the use of main values and factors accounted for chosen crank angle range of signal acceleration.

1. WPROWADZENIE

Gaz ziemny (CNG) i mieszanina propanu-butanu (LPG) są najpopularniejszymi paliwami alternatywnymi do zasilania silników spalinowych. Podstawowymi zaletami tych paliw są między innymi wysoka odporność na spalania stukowe, mniejsza emisja składników toksycznych oraz łatwiejsze tworzenie mieszanki jednorodnej.

Obecnie wiele jest prac opisujących zastosowanie paliw gazowych w silnikach spalinowych lecz problem drgań wywołanych procesem ich spalania nie został poddany szczególnej uwadze. Hałas pochodzący od procesu spalania występuje w dwóch formach: pośredniej i bezpośredniej. Obie formy hałasu są transmitowane przez blok silnika jako drgania o różnych częstotliwościach.

W artykule podjęto próbę określenia wpływu kąta wyprzedzenia zapłonu na charakterystyki drganiowe reprezentowane przez miary amplitudowe i współczynniki bezwymiarowe. Wartości tych miar zostały wyznaczone dla silnika zasilanego paliwem gazowym CNG.

Korelację pomiędzy przebiegiem ciśnienia w cylindrze a przyspieszeniami drgań bloku silnika spalinowego wykazano w wielu pracach badawczych [1, 2]. Ocena procesu spalania metodami wibroakustycznymi wymaga jednak dokładnego rozpoznania wpływu poszczególnych parametrów pracy silnika (prędkość obrotowa, kąt wyprzedzenia zapłonu, skład mieszanki paliwowo-powietrznej itd.) na aktywność wibroakustyczną silnika. Analiza procesu spalania przy użyciu metod wibroakustycznych jest skomplikowana szczególnie wtedy, gdy poddaje się ananlizie niestacjonarność i cyklostacjonarność sygnałów.

W niniejszym opracowaniu do oceny wpływu kąta wyprzedzenia zapłonu na zmiany poziomu drgań bloku silnika wykorzystano miary amplitudowe oraz współczynniki bezwymiarowe.

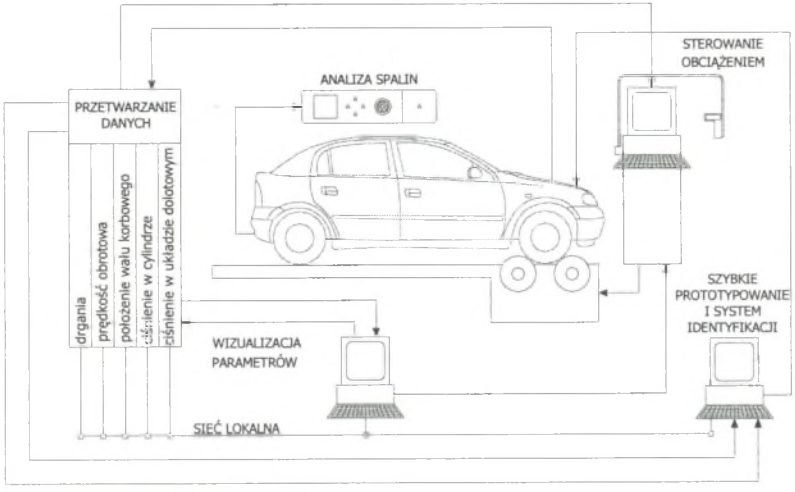
2. STANOWISKO BADAWCZE

Obiekt badań stanowił pojazd OPEL ASTRA wyposażony w silnik ZI o pojemności 1600 cm^3, przystosowany do zasilania alternatywnego paliwem gazowym CNG.

Stanowisko badawcze wyposażono w przetworniki i czujniki zapewniające identyfikację stanu pracy silnika. W skład podstawowych układów kontrolno-pomiarowych, zapewniających ciągłą rejestrację stanu pracy silnika, wchodzą między innymi urządzenia umożliwiające pomiar:

- ciśnień w komorze spalania,
- przyspieszeń drgań ścianki bloku silnika,
- kąta obrotu wału korbowego wraz z określeniem GMP tłoka,
- mocy i momentu obrotowego silnika,
- podciśnienia panującego w kolektorze dolotowym.

Sygnały wszystkich czujników i przetworników rejestrowane są za pomocą karty akwizycji danych. Schemat stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego [3]
Fig. 1. Chart of the measurement bench [3]

Ciśnienie indykowane mierzono wykorzystując piezoelektryczny czujnik ciśnienia typu 6121 oraz wzmacniacz ładunku typu 5011 firmy KISTLER. Położenie wału korbowego oraz jego prędkość obrotową określano za pomocą znacznika położenia wału korbowego typu 2613B firmy KISTLER.

Drgania kadłuba silnika mierzono przetwornikami drgań typu ICP firmy PCB w dwóch kierunkach, wzdłuż osi cylindra (oś y) oraz prostopadle do osi cylindra (oś x). Przetworniki przyspieszeń wraz ze wzmacniaczem sygnałów typu PA3000 firmy Roga Instruments tworzyły układ pomiarowy przyspieszeń drgań ścianki kadłuba silnika. Przetworniki te zamocowano na kadłubie silnika za pomocą magnesów, których zdolność do przenoszenia drgań była ograniczona do 20 kHz.

Dodatkowo mierzonym parametrem był sygnał z przetwornika ciśnienia absolutnego w kolektorze dolotowym. Przetwornik ten był integralną częścią układu zarządzania dawką wtryskiwanego paliwa w badanym pojazdzie.

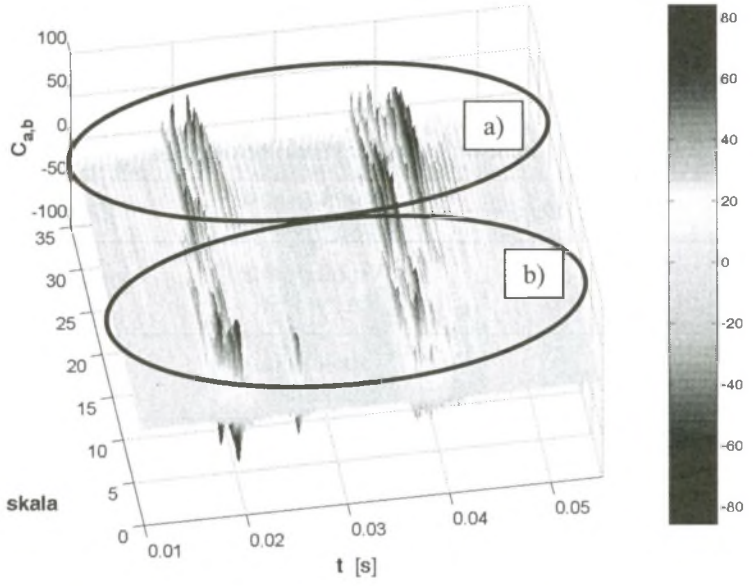
Wszystkie mierzone parametry rejestrowano i wizualizowano za pomocą karty akwizycji danych NI PCI-6143 i programu opracowanego w środowisku LabView 7.1 [3].

Do regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu wykorzystano elektroniczny korektor korygujący kąt wyprzedzenia zapłonu w zakresie od 0 do 15° OWK w stosunku do wartości ustalonej przez ECU.

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Proces spalania jest jednym z głównych czynników determinujących drgania bloku silnika. Różnorodność tych wymuszeń utrudnia analizę procesu spalania i pociąga za sobą wykorzystanie metod przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu i kąta OWK.

W wyniku przeprowadzonych analiz przy użyciu ciągłej transformaty falkowej otrzymano rozkład współczynników falkowych na płaszczyźnie czas – skala (rys. 2). Na płaszczyźnie tej wyróżniono dwa charakterystyczne obszary odpowiadające wysokim (niskie wartości skali) i niskim (wysokie wartości skali) częstotliwościom.

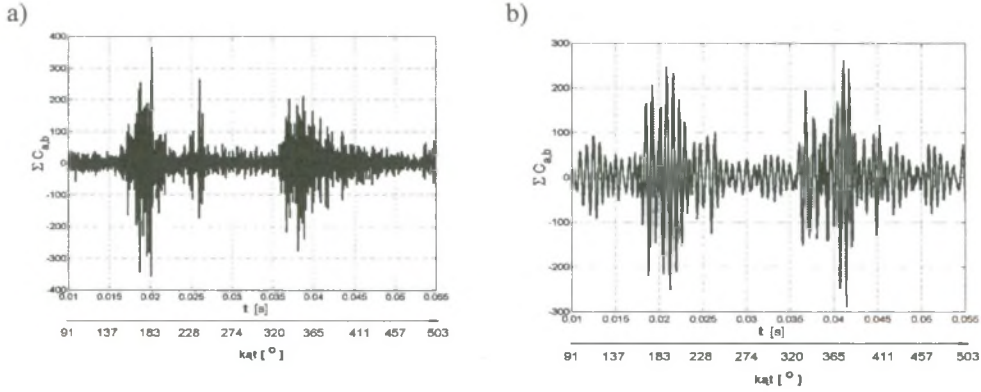


Rys. 2. Rozkład współczynników falkowych C_{ab} na płaszczyźnie czas – skala
Fig. 2. Decomposition of wavelet coefficient C_{ab} on time – scale plane

Złożony sygnał poddano dekompozycji sumując współczynniki falkowe w wybranych zakresach górnej i dolnej skali. Wyniki tak przeprowadzonej analizy przedstawiono na rysunku 3, przy czym obszar *a* odpowiada niskim, a obszar *b* wysokim częstotliwościom.

Po zsumowaniu współczynników transformaty falkowej C_{ab} wyodrębniono dwie częstotliwości identyfikujące zjawiska mechaniczne (uderzenie tłoka o ściankę cylindra) oraz zjawiska związane z przebiegiem procesu spalania.

Uwzględniając wyniki tej analiz możliwy był wybór zakresu kątowego obrotu wału korbowego, który odpowiadał procesowi spalania. Dla wyselekcjonowanego w ten sposób zakresu kątowego, obejmującego przedział 300 - 420° OWK, określono wartości miar amplitudowych dla różnych kątów wyprzedzenia zapłonu, korygując go o 0°, 6°, 9°, 12° i 15°.



Rys. 3. Suma współczynników falkowych C_{ab} w zakresie skali: a) od 1 do 9, b) od 28 do 32
Fig. 3. Wavelet coefficient sum with the scale range: a) from 1 to 9, b) from 28 to 32

Dalsze analizy wyznaczyły wpływ zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu na poziom drgań bloku silnika.

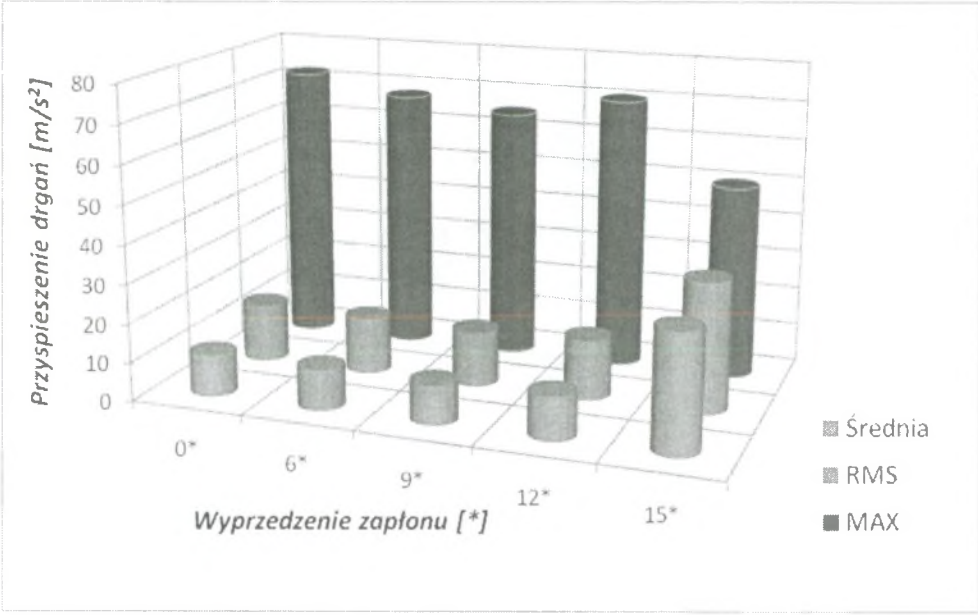
Ocenę poziomu drgań silnika przeprowadzono dla wybranych miar amplitudowych oraz współczynników bezwymiarowych przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1

Miary amplitudowe i współczynniki bezwymiarowe

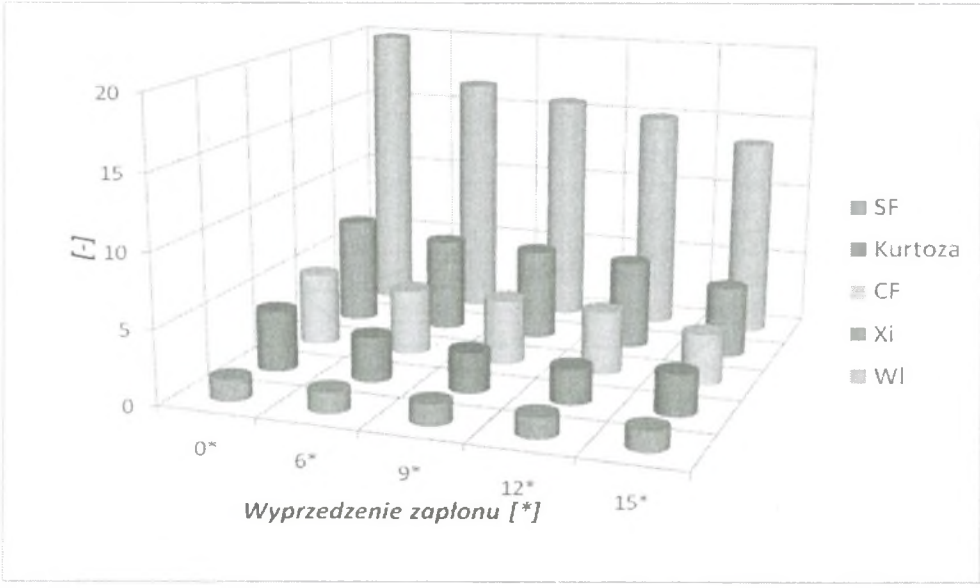
Miary amplitudowe	*Definicja*	*Współczynniki bezwymiarowe*	*Definicja*
Wartość maksymalna y_{max}	$y_p = \max\limits_{0\langle t\langle T} \lvert y(t)\rvert$	Współczynnik Szczytu CF	$CF = \dfrac{y_p}{y_{RMS}}$
Wartość skuteczna RMS	$y_{RMS} = \left[\dfrac{1}{T}\int\limits_0^T y^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$	Współczynnik Kształtu SF	$SF = \dfrac{y_{RMS}}{\bar{y}_{abs}}$
		Współczynnik Impulsowości Xi	$X_i = CF \cdot SF = \dfrac{y_{RMS}}{\bar{y}_{abs}}$
Wartość średnia y_{abs}	$\bar{y}_{abs} = \dfrac{1}{T}\int\limits_0^T \lvert y(t)\rvert dt$	Kurtoza K	$K = \dfrac{\frac{1}{T}\int\limits_0^T (y(t)-\bar{y})^4 dt}{\left(\sqrt{\frac{1}{T}\int\limits_0^T (y(t)-\bar{y})^2 dt}\right)^4}$
		Współczynnik Luzu Wl	$L_l = \dfrac{y_{P-P}}{\left(\frac{1}{T}\int\limits_0^T \sqrt{\lvert y(t)\rvert}dt\right)^2}$

Wybrane wyniki obliczeń miar i współczynników przedstawiono na rysunkach 4-6.



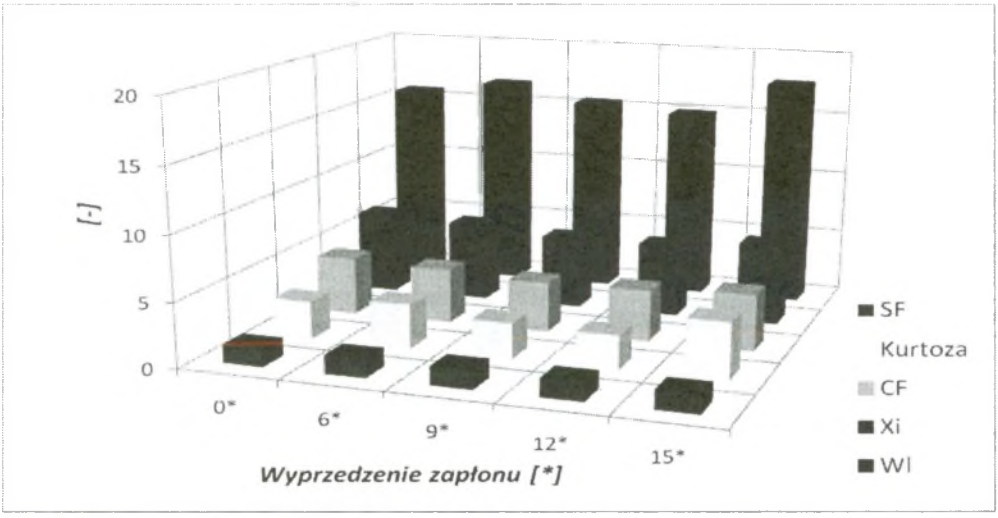
Rys. 4. Miary amplitudowe sygnału drgań silnika mierzonego w płaszczyźnie *y*, n = 1500 min^{-1}, obciążenie 100%

Fig. 4. Pointers traces account for *x* direction vs. timing ignition, n = 1500 min^{-1}, full load



Rys. 5. Wybrane współczynniki bezwymiarowe wyznaczone dla sygnału drgań silnika mierzonego w płaszczyźnie *x*, n = 1500 min^{-1}, obciążenie 100%

Fig. 5. Factors traces account for *x* direction vs. timing ignition, n = 1500 min^{-1}, full load

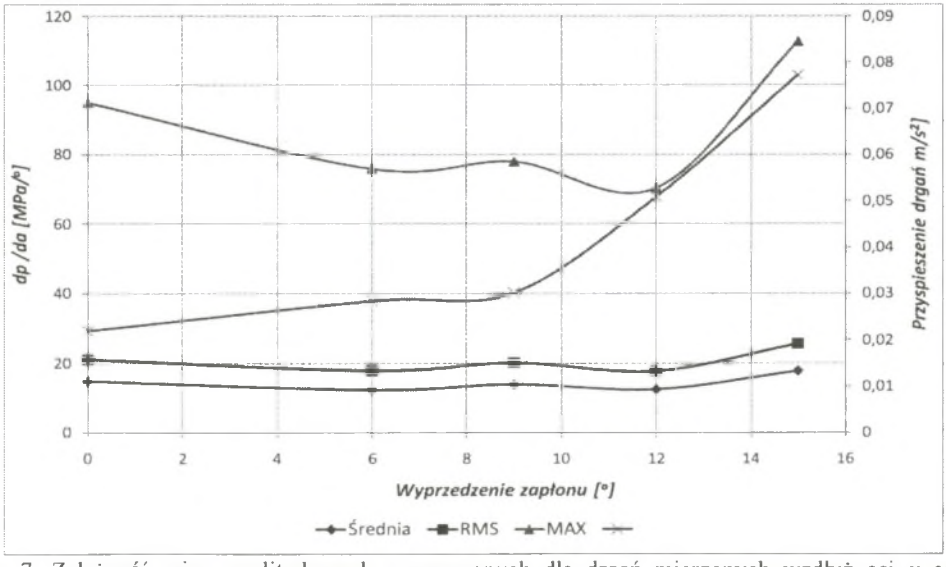


Rys. 6. Wybrane współczynniki bezwymiarowe wyznaczone dla sygnału drgań silnika mierzonego w płaszczyźnie x, n = 2000 min^{-1}, obciążenie 100%

Fig. 6. Factors traces account for x direction vs. timing ignition, n = 2000 min^{-1}, full load

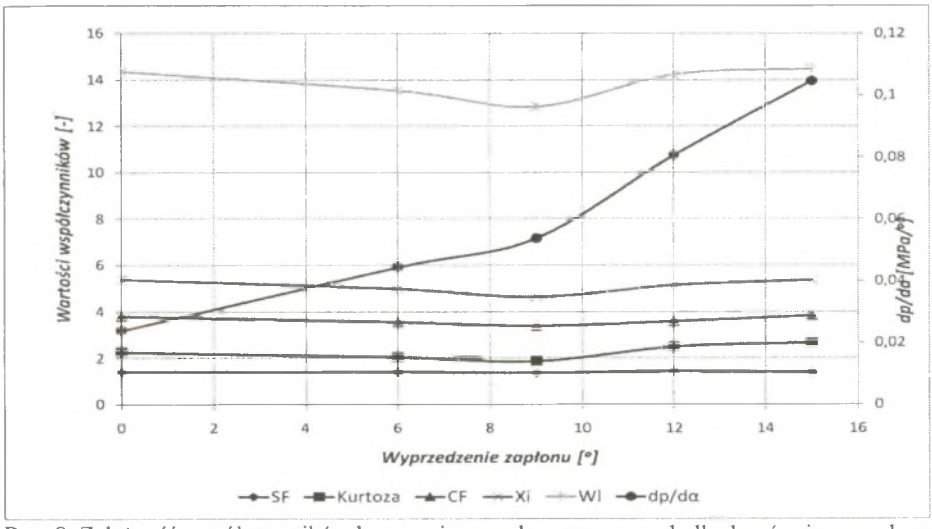
Ponieważ głównym wymuszeniem pobudzającym drgania struktury bloku silnika jest proces spalania zmiany ciśnienia w cylindrze, charakteryzujący przebieg procesu spalania, określono twardość biegu silnika. Jej wyznaczenie pozwoliło na porównanie wpływu zmian kąta wyprzedzenia zapłonu na współczynniki bezwymiarowe i wymiarowe.

Twardość jest definiowana jako przyrost ciśnienia przypadający na 1° kąta OWK (***dp/dα***) lub jednostkę czasu (***dp/dt***).



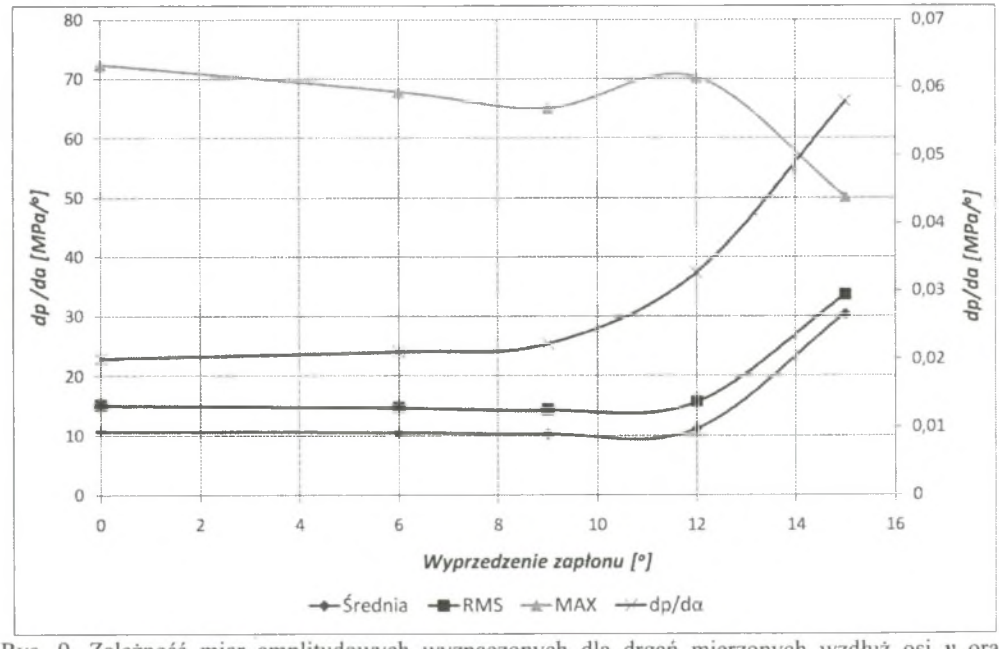
Rys. 7. Zależność miar amplitudowych wyznaczonych dla drgań mierzonych wzdłuż osi x oraz twardości biegu silnika ***dp/dα*** w funkcji kąta wyprzedzenia zapłonu, n = 2000 min^{-1}, obciążenie 100%

Fig. 7. Pointers, account for x direction and ***dp/dα*** parameters traces vs. timing ignition, n = 2000 min^{-1}, full load



Rys. 8. Zależność współczynników bezwymiarowych wyznaczonych dla drgań mierzonych wzdłuż osi ***x*** oraz twardości biegu silnika ***dp/dα*** w funkcji kąta wyprzedzenia zapłonu, n = 2500 min^{-1}, obciążenie 100%

Fig. 8. Factors, account for ***x*** direction and ***dp/dα*** parameters traces vs. timing ignition, n = 2500 min^{-1}, full load



Rys. 9. Zależność miar amplitudowych wyznaczonych dla drgań mierzonych wzdłuż osi ***y*** oraz twardości biegu silnika ***dp/dα*** w funkcji kąta wyprzedzenia zapłonu, n = 1500 min^{-1}, obciążenie 100%

Fig. 9. Pointers, account for ***y*** direction and ***dp/dα*** parameters traces vs. timing ignition, n = 1500 min^{-1}, full load

Rysunki 7, 8 i 9 przedstawiają zmianę wybranych współczynników bezwymiarowych, miar amplitudowych i parametru ***dp/dα*** w zależności od kąta wyprzedzenia zapłonu. Wielkość ***dp/dα*** została wyznaczona podobnie jak wartości współczynników bezwymiarowych oraz miary amplitudowe w zakresie 300 - 420° OWK.

Miary amplitudowe oraz współczynniki bezwymiarowe przedstawione na wykresach to wartości średnie dla danej serii pomiarowej charakteryzującej się taką samą prędkością obrotową.

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie wpływu zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu na wartości miar amplitudowych oraz wybranych współczynników bezwymiarowych. Wykazały również, że korekcja kąta wyprzedzenia zapłonu przy zasilaniu paliwem gazowym CNG wpłynęła na zmianę poziomu drgań bloku silnika. Szczególnie wrażliwe na te zmiany są wartości średnie i skuteczna, a spośród współczynników bezwymiarowych - kurtoza i współczynnik impulsowości. Wielkości te wykazują, dla wszystkich wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, tendencje zbieżne z krzywą reprezentującą przyrost ciśnienia ***dp/dα***.

Otrzymane wyniki obliczeń pozwalają na opracowanie algorytmu oceny jakości procesu spalania jako systemu kontrolnego, pracującego w czasie rzeczywistym. Wyniki te mogą być pomocne w tworzeniu nieinwazyjnego systemy kontroli procesu spalania oraz innych zjawisk (np. zjawisk mechanicznych, takich jak uderzenie tłoka ściankę cylindra czy też uderzenia grzybka zaworu w jego gniazdo itd.) [5].

Literatura

1. Gao Y., Randall R. B.: Reconstruction of Diesel Cylinder Pressure Using a Time Domain Smoothing Technique. Mechanical System and Signal Processing, Vol. 13(5), 1999.
2. Flekiewicz M., Madej H.: Estimation of IC engine combustion process using vibroacoustic techniques. Zeszyty Naukowe POlitechniki Śląskiej, s. Transport, z. 48, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
3. Fabiś P.: Pomiar ciśnienia indykowanego oraz drgań kadłuba silnika - koncepcja stanowiska badawczego. XXXII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2005.
4. Flekiewicz M., Flekiewicz B., Fabiś P.: Engine block vibration level as a tool for fuel recognition. SAE Paper 2007-01-2162, 2007.
5. Flekiewicz M., Flekiewicz B., Madej H., Fabiś P., Wojnar G.: Influence of piston slap on engine block vibration. SAE Paper 2007-01-2163, 2007.
6. Leonhardt S., Müller N., Isermann R.: Methods for engine supervision and control based on cylinder pressure information. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. 3, 1999.
7. Ozawa H., Nakada T.: Pseudo cylinder pressure excitation for analyzing the noise characteristics of the engine structure. JSAE Review 20, 1999, p. 67-72,
8. PCB Piezotronics Vibration Division – Product Catalog, USA, New York 2003.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Sławomir Luft