ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 48 Nr kol. 1604

Marek FLEKIEWICZ, Henryk MADEJ

OCENA PROCESU SPALANIA W SILNIKACH SPALINOWYCH METODAMI WIBROAKUSTYCZNYMI

Streszczenie. Niniejsze opracowanie dotyczy diagnozowania procesu spalania w silniku ZI metodami wibroakustycznymi. Przedstawiono w nim wyniki jednego z etapów badań związanych z rozpoznaniem obiektu, którym jest czterocylindrowy silnik spalinowy o pojemności 1,6 dcm^3. Eksperyment identyfikacyjny polegał na impulsowym wymuszeniu drgań kadłuba silnika przy jednoczesnym pomiarze siły wymuszającej i odpowiedzi układu. Na podstawie badań dokonano estymacji charakterystyk dynamicznych obiektu.

IC ENGINES COMBUSTION PROCESS ESTIMATION BY VIBROACUSTIC METHODS

Summary. This study refers to diagnostics of spark engine combustion process with use of vibroacustic methods. Results of the first stage of research programme concerning the recognition of the tested object 1,6 liter four cylinders spark engine were presented in this paper. The experiment was based on measurements of cylinder impulse and its response on engine body. As a result of tests the dynamic characteristic of object were obtained.

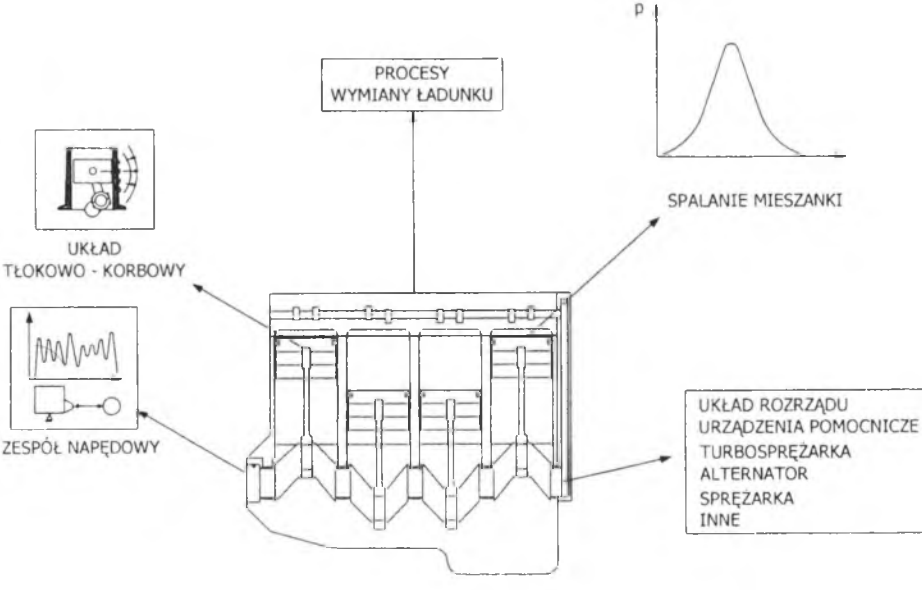
1. WPROWADZENIE

Z dotychczasowych badań wynika, że przebieg ciśnienia indykowanego jest głównym parametrem wykorzystywanym do oceny jakości procesu spalania w silnikach spalinowych. Kształt przebiegu ciśnienia pozwala wykrywać charakterystyczne nieprawidłowości w procesie spalania, takie jak wypadanie zapłonów, spalanie stukowe, zbyt wczesne lub zbyt późne rozpoczęcie procesu spalania, nieszczelności w komorze spalania i niecałkowite spalanie. Bardziej zaawansowane metody analizy ciśnienia umożliwiają nie tylko określenie wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem a ściankami komory w każdym z cylindrów, ale również pozwalają na wyznaczenie formujących się składników spalin. Bezpośredni pomiar w komorze spalania jest trudny i kosztowny, ponieważ związany jest z koniecznością demontażu lub nawiercania wybranych elementów silnika, szczególnie w przypadku silników wysokoprężnych. Dlatego w ostatnich latach wzrasta zainteresowanie pośrednimi metodami

pomiaru ciśnienia wewnątrz cylindra, które wykorzystują metody nieinwazyjne [4]. Wśród znanych metod szeroko opisanych w literaturze najmniej zaawansowane są metody pomiaru drgań struktury silnika i rekonstrukcji na ich podstawie przebiegu ciśnienia [1,3]. W artykule przedstawiono wyniki badań związanych z identyfikacją struktury rezonansowej kadłuba silnika. W ramach badań rozpoznawczych przeprowadzono eksperymentalną analizę modalną kadłuba badanego silnika w celu określenia funkcji transmitancji wybranych punktów pomiarowych. Silnik spalinowy jest obiektem podlegającym oddziaływaniu wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych. Należą do nich przede wszystkim:

- ciśnienie spalania,
- ruch układu tłokowo-korbowego,
- wymuszenia ze strony układu rozrządu,
- wymuszenia wynikające z pracy osprzętu silnika, tj. alternatora, sprężarki itp.,
- wymuszenia przenoszone z nadwozia oraz układu przeniesienia napędu.

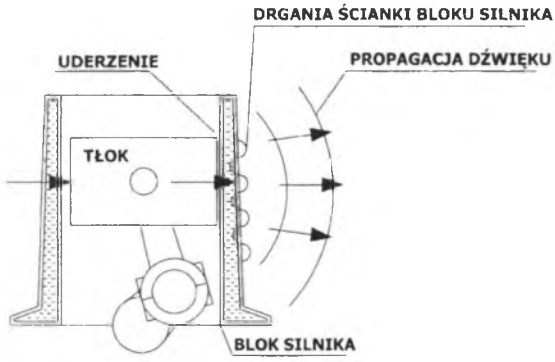
Zasadnicze źródła wymuszeń przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zasadnicze źródła wymuszeń w silniku spalinowym
Fig. 1. Main sources of vibration in ICE

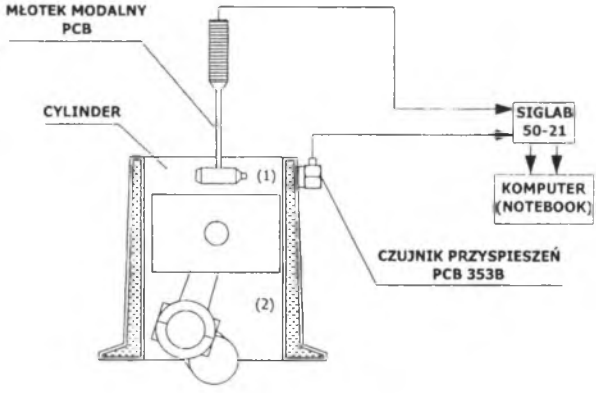
2. PRZEBIEG BADAŃ

Jednym z istotnych wymuszeń występujących w trakcie pracy układu tłokowo korbowego są uderzenia tłoka przy zmianie jego kierunku ruchu z DMP do GMP i na odwrót. Wartość wymuszenia zależy w istotny sposób od luzu pomiędzy tłokiem a ścianką cylindra [2]. Wartość siły jest funkcją ciśnienia spalania oraz prędkości obrotowej silnika. Siła ta stanowi jedno z głównych źródeł drgań kadłuba oraz generowanego hałasu.



Rys. 2. Wpływ uderzenia tłoka w ścianki cylindra na proces wibroakustyczny
Fig. 2. The impact of the phenomena of hitting cylinder wall by piston

Na podstawie powyższych rozważań przyjęto program badań polegający na identyfikacji obiektu, jakim jest korpus silnika, za pomocą wymuszenia impulsowego. W badaniach zastosowano metodę wymuszeń w wielu punktach. Do tego celu wykorzystano układ pomiarowy, przedstawiony na rysunku 3, składający się z młotka modalnego, czujnika przyśpieszeń, dwukanałowego analizatora sygnałów firmy DSPT Siglab 50-21.



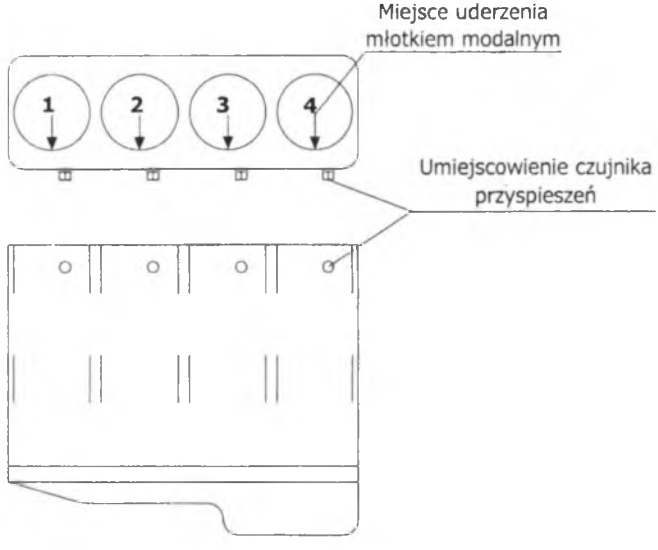
Rys. 3. Schemat układu pomiarowego
Fig. 3. Measurement instrumentation used for experiments

Analizator wyposażono w standardowe złącze SCSI-2 umożliwiające transmisję danych do komputera w celu dalszej analizy. Podstawową operacją wykonywaną przez analizator jest przetwarzanie analogowo-cyfrowe, które umożliwia wykorzystanie technik cyfrowego przetwarzania sygnałów w celu wyznaczenia estymatorów charakterystyk modalnych.

W badaniach wykorzystano wymuszenie impulsowe w szerokim zakresie częstotliwości. Do wymuszenia drgań wykorzystano młotek wyposażony w czujnik siły wymuszającej z dodatkową masą dla uzyskania wymaganego zakresu częstotliwości oraz wymienne

końcówki o różnej sztywności w celu zmiany warunków lokalnych wymuszenia. Należy podkreślić, że wymuszenie impulsowe uważa się za przydatne w badaniach, jeżeli wewnątrz pasma, w którym przeprowadza się identyfikację, widmo wymuszenia ma płaski przebieg [5]. Do badań wybrano młotek z końcówką zapewniającą identyfikację charakterystyk w paśmie od 0 do 8 kHz.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych oraz punktów, w które uderzano młotkiem modalnym w ściankę cylindra.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych
Fig. 4. Schemat asurement points localization

Uwzględniając konieczność estymacji charakterystyk modalnych wyniki pomiarów zarejestrowano w plikach danych w formacie VNA i zaimportowano do toolboxu VIOMA pracującego w środowisku Matlab.

3. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów wymuszeń i odpowiedzi przeprowadzono estymację charakterystyk dynamicznych obiektu. Analizę modalną wykonano w dziedzinie częstotliwości określając następujące funkcje:

- gęstość widmową mocy sygnału

$$G_{xx}(\omega) = X(\omega) \cdot X^{*}(\omega)$$

- gęstość widmową mocy wzajemnej sygnałów

$$G_{xx}(\omega) = X^{*}(\omega) \cdot Y(\omega)$$

- funkcję koherencji

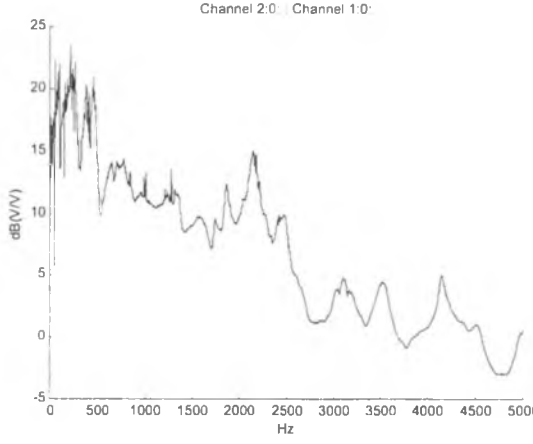
$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|G_{xy}(\omega)|^2}{G_{xx}(\omega) \cdot G_{yy}(\omega)}$$

- widmową funkcję przejścia (charakterystykę częstotliwościową)
  Przyjęto, że estymator charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej ma następującą postać:

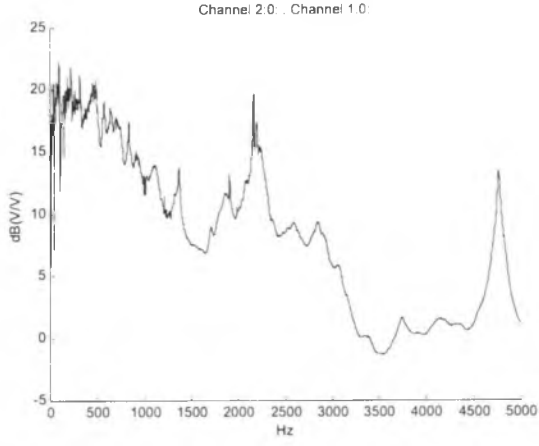
$$|H(j\omega)|^2 = \frac{G_{yy}(\omega)}{G_{xy}(\omega))}$$

gdzie:
$G_{yy}(\omega)$ – gęstość widmowa mocy sygnału odpowiedzi (przyspieszenia drgań),
$G_{xy}(\omega)$ – wzajemna gęstość widmowa mocy sygnału wymuszenia (siły) i odpowiedzi (przyspieszenia drgań).

Przykładowe charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane na podstawie przeprowadzonej analizy modalnej przedstawiono na rysunkach 5 ÷ 8.

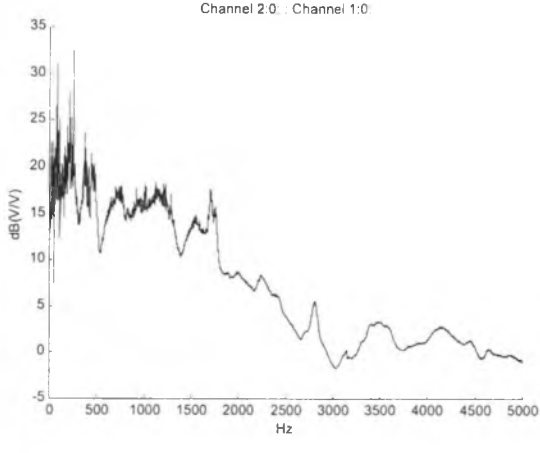


Rys. 5. Funkcja przejścia określona dla wymuszenia w górnej części drugiego cylindra i odpowiedzi kadłuba silnika przy pierwszym cylindrze
Fig. 5. The transient function defined for impact in upper part of cylinder 2 wall and response of engine body by cylinder 1



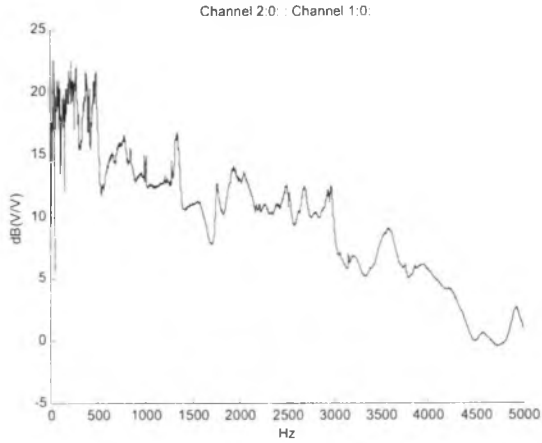
Rys. 6. Funkcja przejścia określona dla wymuszenia w górnej części trzeciego cylindra i odpowiedzi kadłuba silnika przy czwartym cylindrze

Fig. 6. The transient function defined for impact in upper part of cylinder 3 wall and response of engine body by cylinder 4



Rys. 7. Funkcja przejścia określona dla wymuszenia w dolnej części czwartego cylindra i odpowiedzi kadłuba silnika przy pierwszym cylindrze

Fig. 7. The transient function defined for impact in lower part of cylinder 4 wall and response of engine body by cylinder 1



Rys. 8. Funkcja przejścia określona dla wymuszenia w dolnej części drugiego cylindra i odpowiedzi kadłuba silnika przy pierwszym cylindrze

Fig. 8. The transient function defined for impact in lower part of cylinder 2 wall and response of engine body by cylinder 1

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki pomiarów oraz ich analiza w dziedzinie częstotliwości pozwalają na określenie zmian funkcji przejścia w zależności od:

- chwilowego położenia układu tłokowo-korbowego badanego silnika,
- wzajemnego położenia miejsca wymuszenia i pomiaru odpowiedzi,
- miejsca wymuszenia odpowiadającego górnemu lub dolnemu punktowi zwrotnemu tłoka,
- konstrukcji kadłuba.

Przeprowadzone badania pozwalają na wybór punktu pomiarowego, który jest najbardziej reprezentatywny w pomiarach drgań silnika wywołanych wymuszeniami wewnętrznymi. Dla prawidłowej interpretacji uzyskanych wyników konieczne jest przeprowadzenie badań symulacyjnych na modelu układu tłokowo-korbowego poddanego obciążeniom od sił gazowych.

Literatura

1. Antoni J., Daniere J., Guillet F.: Effective Vibration Analysis of IC Engines Using Cyclostationarity, Part II – New Results of the Reconstruction of the Cylinder Pressures. Journal of Sound and Vibration, Vol. 257(5), s. 839 – 856, 2002.
2. Cho S. H., Ahn S. T., Kim Y. H.: A Simple Model of Estimate the Impact Force Inducted by Piston Slap. Journal of Sound and Vibration, Vol. 255(2), s. 229 – 242, 2002.

3. Gao Y., Randall R. B.: Reconstruction of Diesel Cylinder Pressure Using a Time Domain Smoothing Technique. Mechanical System and Signal Processing, Vol. 13(5), s. 709-722, 1999.
4. Trzeciak K.: Diagnostyka samochodów osobowych. WKŁ, Warszawa 1999.
5. Uhl T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, Warszawa 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Abstract

This study refers to diagnostics of spark engine combustion process with use of vibroacustic methods. Results of the first stage of research programme concerning the recognition of the tested object 1,6 liter four cylinders spark engine were presented in this paper. The experiment was based on measurements of cylinder impulse and its response on engine body. As a result of tests the dynamic characteristic of object were obtained.

Publikacja powstała w wyniku realizacji pracy BW-453/RT2/2003