

Henryk MADEJ

SELEKCJA WIDMOWA SYGNAŁÓW DRGAŃ W DIAGNOSTYCE SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę związaną z wykrywaniem uszkodzeń mechanicznych silnika spalinowego metodami drganiowymi. Jednym z podstawowych źródeł wymuszeń w silniku spalinowym jest uderzenie tłoka o ściankę cylindra. Przedstawiono wyniki analizy widmowej sygnałów drgań zarejestrowanych dla trzech różnych wartości luzu w układzie tłok-cylinder.

IC ENGINE DIAGNOSIS BY SPECTRAL SELECTION OF VIBRATION SIGNALS

Summary. The paper presents problems related to faults detecting of combustion engines using vibration methods. One of the major sources of noise and vibration in an internal combustion engine is the impact between piston and cylinder inner wall. Vibration signal of engine block surface for 3 various clearances in frequency domain was presented.

1. WPROWADZENIE

Rosnące wymagania co do trwałości i niezawodności silników spalinowych oraz minimalizacji kosztów i niekorzystnego oddziaływania na otoczenie powodują, że istnieje konieczność pozyskiwania informacji o ich stanie podczas eksploatacji. Wprowadzenie obowiązku produkowania pojazdów samochodowych z wymogami normy OBDII spowodowało, że istnieją możliwości dostępu do danych przechowywanych w sterownikach poszczególnych układów.

W przypadku silnika największą efektywność pokładowego systemu diagnostycznego zapewniono w zakresie kontroli emisji związków toksycznych, jednakże niektóre uszkodzenia obejmujące między innymi: narastające zużycie gniazd zaworowych i przylgni zaworów, przesunięcie faz rozrządu, zużycie gładzi cylindrowej nawet ponad wymiary dopuszczalne dla danego silnika, w wielu przypadkach potwierdzonych w praktyce nie stanowią podstawy do reakcji systemu diagnostycznego. Najczęstszą przyczyną tego stanu są stosowane algorytmy adaptacyjnego sterowania silników spalinowych. Sterowanie adaptacyjne silnika może prowadzić do tego, że pojawiające się błędy zostaną ukryte albo zaadaptowane. Usterki mechaniczne oraz zużycie eksploatacyjne, szczególnie we wczesnych fazach rozwoju, są kompensowane przez adaptacyjne systemy regulacji wskutek przyjętych, dopuszczalnych zakresów regulacji. Zmiany stanu technicznego silnika wywołane wczesnymi fazami jego zużycia są trudne do wykrycia przy wykorzystaniu stosowanych obecnie metod diagnostyki.

2. DIAGNOZOWANIE SILNIKÓW SPALINOWYCH METODAMI WIBROAKUSTYCZNYMI

Jednym ze sposobów pozyskiwania informacji diagnostycznej jest monitorowanie poziomu drgań generowanych przez podzespoły silnika. Określając symptomy wibroakustyczne uszkodzeń mechanicznych silnika spalinowego należy uwzględnić fakt generowania dużego poziomu drgań znamionowych, wynikający z realizacji funkcji celu. 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.

Jednym z istotnych wymuszeń występujących w trakcie pracy układu tłokowo-korbowego są uderzenia tłoka przy zmianie jego kierunku ruchu. Wartość wymuszenia zależy w istotny sposób od luzu pomiędzy tłokiem a ścianką cylindra [3, 4], spowodowanego zużyciem eksploatacyjnym silnika. Wartość siły jest funkcją ciśnienia spalania oraz prędkości obrotowej silnika. Należy przede wszystkim zidentyfikować, w jakich pasmach częstotliwości znajdują się maksima mocy generowanej przez uszkodzenie. Ze względu na konstrukcję najczęściej wybieranym miejscem pomiaru drgań jest głowica lub korpus silnika.

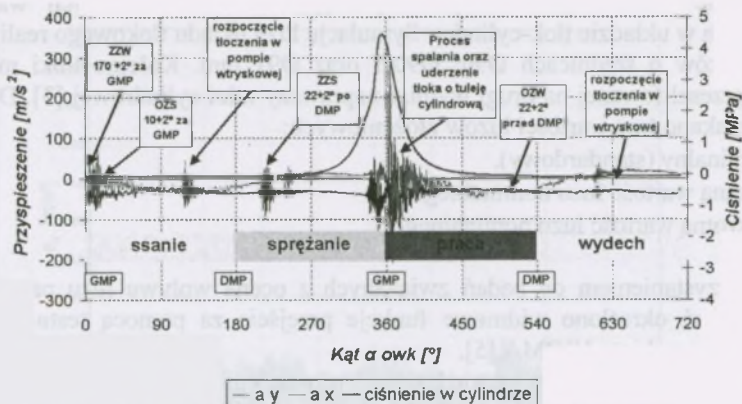
Odbierany sygnał jest silnie zakłócony przez różne źródła drgań, dlatego istnieje konieczność stosowania zaawansowanych metod selekcji sygnałów. Ze względu na impulsowy charakter wymuszeń, diagnostyczne pasma widmowe leżą w obszarze wysokich częstotliwości. Wynika stąd konieczność stosowania czujników przyspieszeń o szerokim zakresie przenoszenia oraz ich odpowiedniego mocowania na korpusie lub głowicy silnika.

Korpus silnika charakteryzuje się małym współczynnikiem tłumienia i dlatego drgania o częstotliwościach niskich i średnich do kilku kHz ulegają niewielkiemu tłumieniu na drodze propagacji. Silniejsze efekty tłumienia występują dopiero dla częstotliwości rzędu 10 kHz [1]. Energia dyssypowana w czasie jednego cyklu drgań dla danego materiału jest w przybliżeniu stała. Dla wyższych częstotliwości w tym samym okresie czasu występuje większa liczba cykli i stąd wynika większa energia dyssypowana. Należy także uwzględnić fakt, że amplituda fal sprężystych maleje w miarę oddalania się od źródła wymuszeń. Przy wysokich częstotliwościach drgań w bloku silnika istnieją możliwości tworzenia się biegnących fal sprężystych. Ich amplitudy maleją odwrotnie proporcjonalnie od odległości punktu odbioru od źródła [1] i dlatego wybór miejsca mocowania przetwornika przyspieszeń odgrywa tym większą rolę, im wyższe częstotliwości generuje uszkodzenie.

Selekcja widmowa sygnałów jest skutecznym narzędziem diagnostycznym, zwłaszcza w przypadku, gdy rozwój uszkodzenia pobudza do drgań badany układ w jego częstotliwości własnej.

Ocena stanu silnika na podstawie zarejestrowanych sygnałów drgań wymaga identyfikacji częstotliwości rezonansowych korpusu silnika za pomocą analizy modalnej [2, 5].

W silniku spalinowym pojedyncze zdarzenia występują w sekwencji cyklu, a ich powtarzalność w każdym następnym cyklu jest symptomem działania silnika. Kolejność następujących po sobie zdarzeń w badanym silniku jednocylindrowym ZS przedstawiono na rysunku 1.

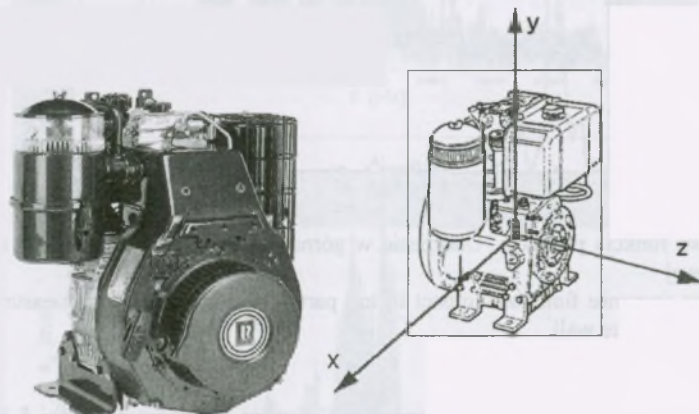


Rys. 1. Kolejność zjawisk zachodzących w jednocylindrowym silniku spalinowym
 Fig. 1. Orders of one cylinder diesel engine cycle components

W diagnostyce wibroakustycznej /WA/ silników spalinowych stosuje się między innymi filtrację grzebieniową, uśrednianie synchroniczne oraz selekcję w dziedzinie czasu i kąta obrotu wału korbowego. Ze względu na to, że przetworniki przyspieszeń cechują się dużą selektywnością kierunkową, odpowiednie usytuowanie czujników umożliwi selekcję przestrzenną sygnału diagnostycznego.

3. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

Obiektem badań był silnik o zapłonie samoczynnym Rugerrini RF 90 (rys. 2).



Rys. 2. Silnik o zapłonie samoczynnym Rugerrini RF 90
 Fig. 2. Diesel engine Rugerrini RF 90

Badany silnik wysokoprężny Ruggerini RF90 umieszczono na hamowni silnikowej umożliwiającej zmianę obciążenia. Zastosowany podczas badań układ pomiarowy umożliwił pomiar i rejestrację między innymi:

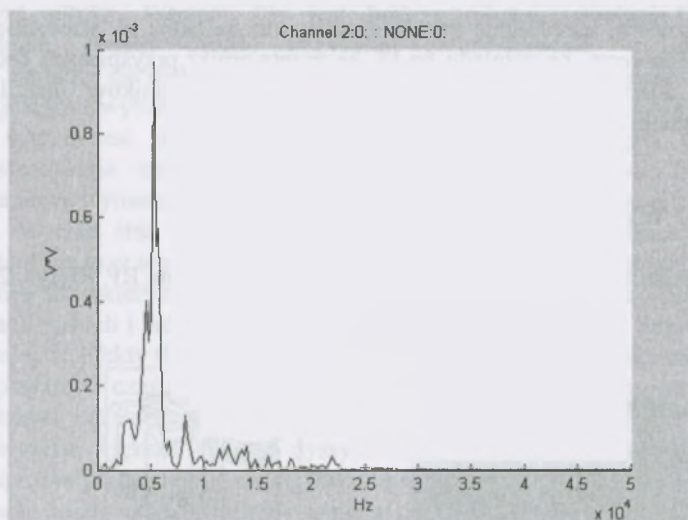
- przyspieszenia drgań kadłuba silnika w kierunku x i y,
- prędkości obrotowej silnika,
- położenia wału korbowego silnika oraz ciśnienia spalania w cylindrze.

W trakcie badań wykonano pomiary drgań dla trzech różnych wartości luzów występujących w układzie tłok-cylinder. Symulację luzu układu tłokowego realizowano przez wymianę tłoków o średnicach $\varnothing 90$; $\varnothing 90,5$ oraz $\varnothing 91$ mm. Kolejne tłoki montowano do uprzednio przeszlifowanej na drugi wymiar naprawczy tulei cylindrowej [3]. Dzięki takiemu złożeniu uzyskano trzy wartości luzów złożeniowych:

- luz nominalny (standardowy),
- dwukrotną wartość luzu nominalnego,
- czterokrotną wartość luzu nominalnego.

Przed przystąpieniem do badań związanych z oceną wpływu luzu na charakterystyki widmowe drgań określono widmowe funkcje przejścia za pomocą testu impulsowego z wykorzystaniem pakietu VIOMA [5].

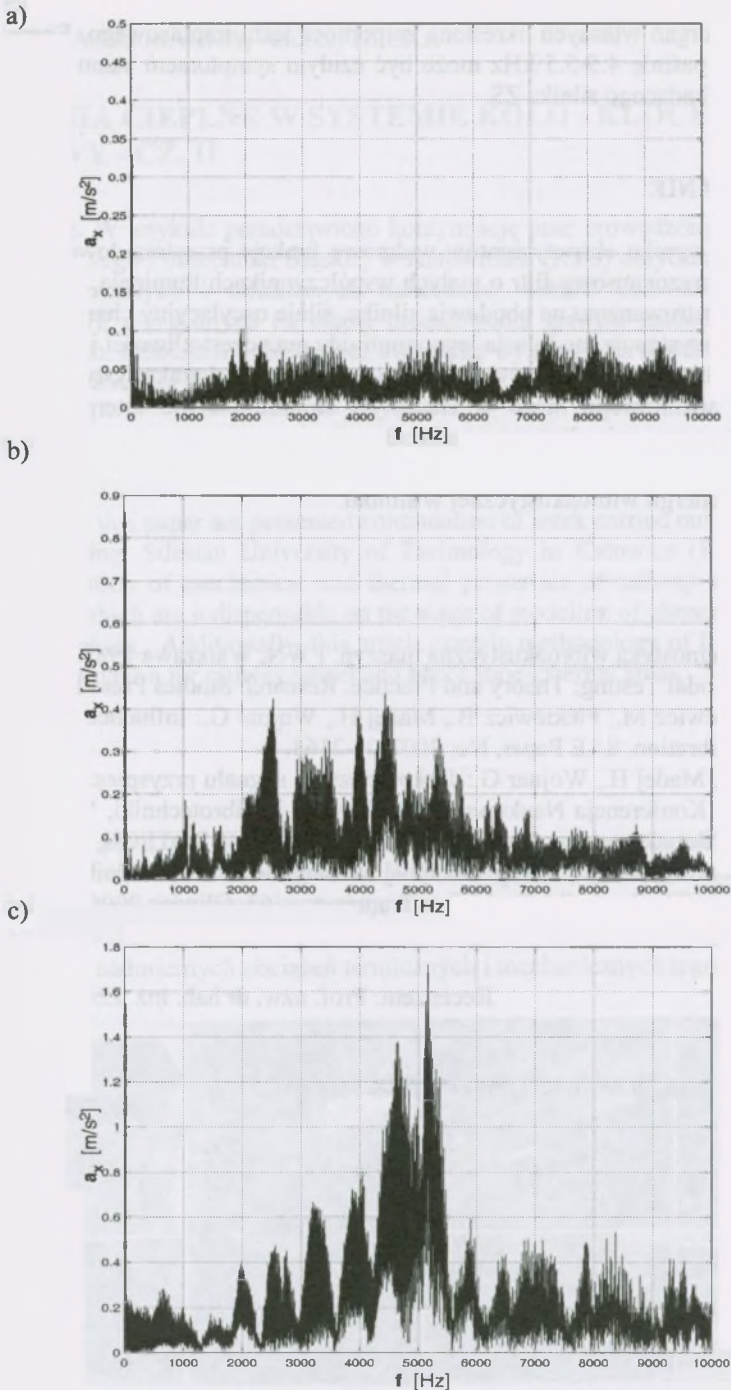
Przykładowy przebieg odpowiedzi na wymuszenie impulsowe zadane młotkiem modalnym przedstawiono na rysunku 3. Odpowiedź układu na to wymuszenie zarejestrowano przez przetwornik umieszczony na kadłubie zorientowanym w kierunku prostopadłym do osi cylindra.



Rys. 3. Widmowa funkcja przejścia. Uderzenie w górną część cylindra, odpowiedź na ścianie tulei cylindrowej

Fig. 3. Frequency response function. Impact in top part of cylinder, response measured at the upper part of the cylinder wall.

Określona transmitancja posiada wyraźne maksimum dla częstotliwości 5.1 kHz. Wyniki analizy częstotliwościowej drgań zarejestrowanych w kierunku prostopadłym do osi cylindra dla 3 różnych wartości luzu przedstawiono na rysunku 4. Impulsowe wymuszenia procesem roboczym oraz zjawiskiem uderzenia tłoka wywołanym nadmiernym luzem w układzie tłok - cylinder pobudziły korpus silnika do drgań w szerokim zakresie częstotliwości. Korpus silnika działa jak wielorezonansowy filtr o małych współczynnikach tłumienia.



Rys. 4. Widmo przyspieszeń drgań korpusu silnika dla luzu nominalnego (a), dwukrotnie zwiększonego luzu (b) oraz czterokrotnie zwiększonego luzu (c)

Fig. 4. Spectrum of engine block vibration for nominal clearance (a), for two times increased skirt piston clearance (b), for four times increased clearance (c)

Dominująca częstotliwość w widmie przedstawionym na rysunku 4c jest zgodna z częstotliwością drgań własnych określoną za pomocą testu impulsowego. Energia sygnału drganiowego w paśmie 4.5-5.5 kHz może być czułym symptomem stanu złożenia układu tłok - cylinder dla badanego silnika ZS.

4. PODSUMOWANIE

Otrzymane w wyniku eksperymentów widmowe funkcje przejścia dowodzą, że kadłub, działając jak wielorezonansowy filtr o małych współczynnikach tłumienia, nadaje sygnałowi drganiowemu, rejestrowanemu na obudowie silnika, silnie oscylacyjny charakter. W procesie generacji sygnału występuje modulacja jego amplitudy oraz częstotliwości i fazy.

Z przeprowadzonych badań wynika, że identyfikacja charakterystyk dynamicznych kadłuba silnika spalinowego może w znacznym stopniu ułatwić interpretację wyników pomiarów drgań w procesie diagnozowania. Określenie struktury rezonansowej silnika ma istotne znaczenie w rozwiązywaniu zagadnień identyfikacji źródeł drgań oraz dróg rozchodzenia się energii wibroakustycznej w silniku.

Literatura

1. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
2. Ewins D. J.: Modal Testing: Theory and Practice. Research Studies Press Ltd., UK 2001.
3. Fabis P., Flekiewicz M., Flekiewicz B., Madej H., Wojnar G.: Influence of piston slap on engine block vibration. SAE Paper, No. 2007-01-2163.
4. Flekiewicz M., Madej H., Wojnar G.: Dekompozycja sygnału przyspieszeń drgań korpusu silnika ZI. XII Konferencja Naukowa Wibroakustyki i Wibrotechniki, VII Ogólnopolskie Seminarium Wibroakustyka w Systemach Technicznych WIBROTECH, Kraków 2006.
5. Madej H.: Wykorzystanie analizy modalnej w diagnostyce WA silników spalinowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 63, Gliwice 2006, s. 61-68.

Recenzent: Prof. nzw. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Praca powstała w wyniku realizacji projektu BK-285/RT2/2007.