ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK LII NR 1 (184) 2011

Dorota Górnicka
Politechnika Warszawska

BADANIE WRAŻLIWOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ SYMPTOMÓW MECHANICZNYCH USZKODZEŃ SILNIKÓW SPALINOWYCH

STRESZCZENIE

Artykuł zawiera wyniki analizy jakościowej sygnału wibroakustycznego generowanego przez silnik spalinowy w różnych stadiach uszkodzeń jego elementów mechanicznych. Celem opisywanej analizy było sprawdzenie podatności wibroakustycznej symptomów diagnostycznych na symulowane uszkodzenia mechaniczne. Badania przeprowadzono na znacząco różnych obiektach (przebieg, wiek, stan eksploatacyjny). Porównano wrażliwość i selektywność wybranych symptomów diagnostycznych w przypadku ewolucji uszkodzenia, jak również przy zmianie warunków pomiaru.

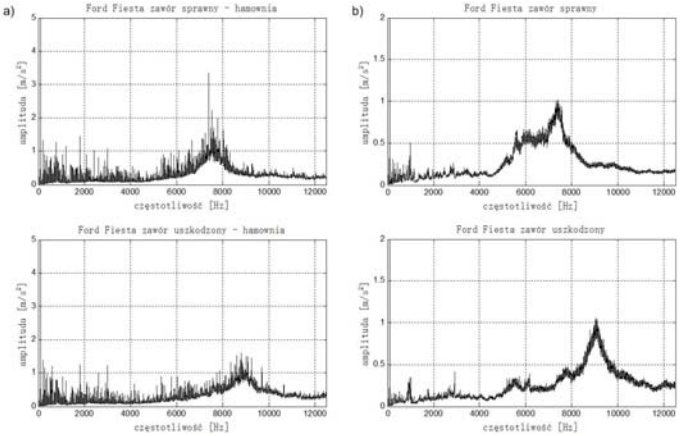
Słowa kluczowe:
wrażliwość wibroakustyczna, silnik spalinowy, diagnostyka uszkodzeń.

WSTĘP

Ciągle postępujący rozwój techniki, szczególnie dotyczący jednostek napędowych pojazdów, pociąga za sobą znaczny wzrost kosztów ewentualnej naprawy, stąd bardzo istotna staje się możliwość wykrycia usterki zaraz po jej powstaniu. Oczywiście istnieją systemy diagnostyczne, które na dzień dzisiejszy wydają się być na wysokim poziomie rozwoju, jednak wspomniana diagnostyka pokładowa podąża w stronę ochrony środowiska, a jej reakcja na stan niesprawności następuje dopiero po przekroczeniu dopuszczalnej emisji związków szkodliwych. Niestety, wykryta w ten sposób usterka mechaniczna często przyczynia się do znacznego uszkodzenia całej jednostki napędowej i wzrostu kosztów ewentualnej naprawy. Taki stan wymusza rozszerzenie możliwości istniejących systemów diagnostyki pokładowej i rozsądne wydaje się wykorzystanie do tego celu sygnałów drganiowych emitowanych przez silnik, co umożliwia wykrycie wczesnych faz uszkodzeń mechanicznych [1, 3].

OBIEKT FABRYCZNIE NOWY

Pierwszym obiektem badań był zamontowany w pojeździe fabrycznie nowy (2007 r.) 8-zaworowy silnik o pojemności 1297 centymetrów sześciennych z wielopunktowym wtryskiem paliwa do kolektora. Założeniem eksperymentu było porównanie dwóch stanów silnika (sprawny/uszkodzony) i próba odnalezienia symptomu uszkodzenia w mierzonym sygnale drganiowym. Niesprawność jednostki napędowej została sztucznie wymuszona przez nacięcie przylgni zaworu wylotowego pierwszego cylindra [4]. Pomiary przeprowadzono na hamowni podwoziowej i w warunkach rzeczywistej jazdy przy założonej prędkości jazdy, przełożeniu i możliwie stałym obciążeniu. Czujnik przyspieszeń drgań zamontowano na śrubie mocującej pokrywę głowicy w okolicy pierwszego cylindra od strony zaworu wylotowego. Z zarejestrowanych sygnałów drganiowych utworzono obrazy widmowe, wykorzystując aparat matematyczny w postaci transformaty Fouriera.



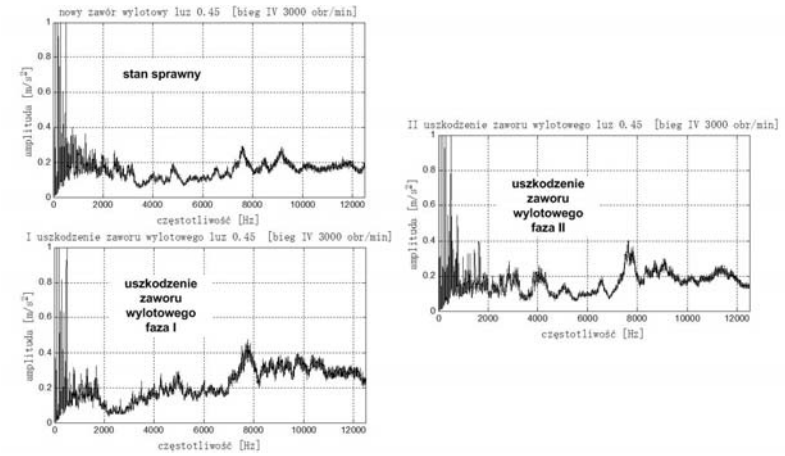
Rys. 1. Wpływ wprowadzonego uszkodzenia na obraz widmowy przyspieszeń drgań głowicy:
a) pomiar na hamowni;
b) pomiar w warunkach rzeczywistej jazdy

Na widmie sygnału (rys. 1a) widoczne jest przesunięcie częstotliwości rezonansowej uderzenia przylgni zaworu o gniazdo zaworowe [2]. Wprowadzone uszkodzenie powoduje wzrost częstotliwości. Powtórzony, w warunkach rzeczywistej jazdy, eksperyment potwierdza wyniki uzyskane na hamowni (rys. 1b).

STAN EKSPLOATACYJNY BADANEGO OBIEKTU

Drugi obiekt badań to również silnik 8-zaworowy o pojemności 1242 centymetrów sześciennych, z tą różnicą, że jednostka była już eksploatowana (blisko

400 000 km przebiegu). Obiekty nieznacznie różniły się również pod względem technologicznym (1991 r.). Pomiary wykonano w warunkach rzeczywistej jazdy, analogicznie jak w przypadku pierwszego obiektu. Również i w tym przypadku niesprawność jednostki napędowej wymuszono, nacinając przylgnię zaworu wylotowego pierwszego cylindra.



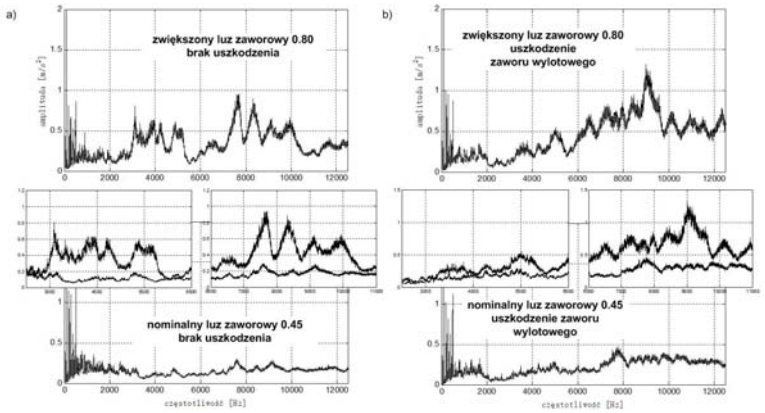
Rys. 2. Kolejne fazy uszkodzenia zaworu wylotowego

Analiza widma przyspieszeń drgań głowicy w przypadku pierwszej fazy uszkodzenia wykazała przesunięcie częstotliwości podobne jak w przypadku uszkodzenia zaworu silnika fabrycznie nowego i dodatkowo znaczny spadek energii w paśmie 2–3 kHz. Ewolucja uszkodzenia (wzrost nacięcia przylgni zaworu) spowodowała ogólne obniżenie energii sygnału, a od częstotliwości 9,5 kHz obraz widmowy jest zbliżony do widma przyspieszeń drgań głowicy dla silnika sprawnego.

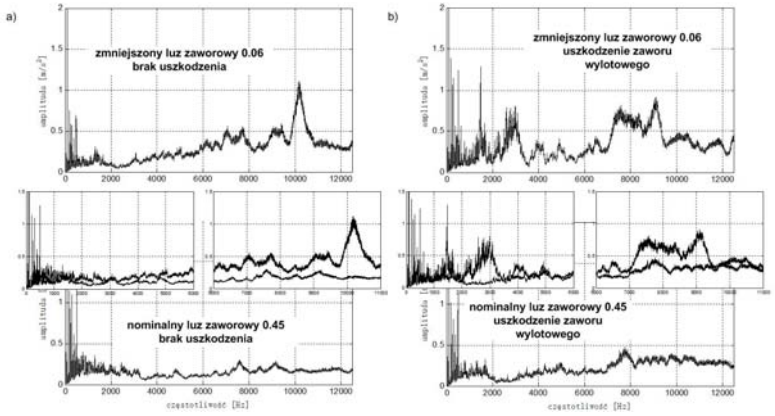
Wymienione badania stanu zużycia zaworu dotyczyły poprawnej regulacji luzu zaworowego. Niewłaściwie ustawiony luz zaworowy ma znaczący wpływ na pracę jednostki napędowej, powodując zaburzenie pracy układu rozrządu, prowadzi do szybszego zużycia elementów jednostki, zakłócenia wymiany ładunku, a w efekcie do uszkodzeń zaworów. Zachodzi oczywiste pytanie, w jakim stopniu błędy ustalenia luzu zaworowego wpływają na czytelność symptomów stanu zaworu. W tym celu zarejestrowano i poddano analizie sygnały drganiowe głowicy dla zmniejszonego (0,06 mm) i zwiększonego (0,80 mm) luzu zaworowego. Serię pomiarów powtórzono, łącząc dwa typy uszkodzeń: zmieniony luz zaworowy (zmniejszony/zwiększony) z uszkodzeniem zaworu wylotowego.

Na widmie sygnału przyspieszeń drgań głowicy w przypadku pomiaru ze zwiększonym luzem zaworowym (rys. 3a) widoczna jest wyraźna zmiana charakterystyki częstotliwościowej w przedziale 3–5,5 kHz oraz powyżej 9,5 kHz. W paśmie częstotliwości 6–9,5 kHz zauważalny jest znaczny przyrost amplitud przyspieszeń

drgań. Wprowadzenie dodatkowego uszkodzenia — wypalenie zaworu (rys. 3b) — w zakresie częstotliwości do 6 kHz w znacznym stopniu tłumi symptomy charakterystyczne dla struktury widmowej w przypadku, gdy w układzie zwiększony zostaje tylko luz zaworowy. Struktura widma powyżej 6 kHz zachowuje cechy charakterystyczne dla uszkodzenia w postaci zwiększonego luzu zaworowego, tracona jest natomiast wyraźna informacja o uszkodzeniu zaworu.



Rys. 3. Reakcja układu na wprowadzone uszkodzenie: a) zwiększony luz zaworowy; b) zwiększony luz zaworowy wraz z uszkodzeniem zaworu wylotowego

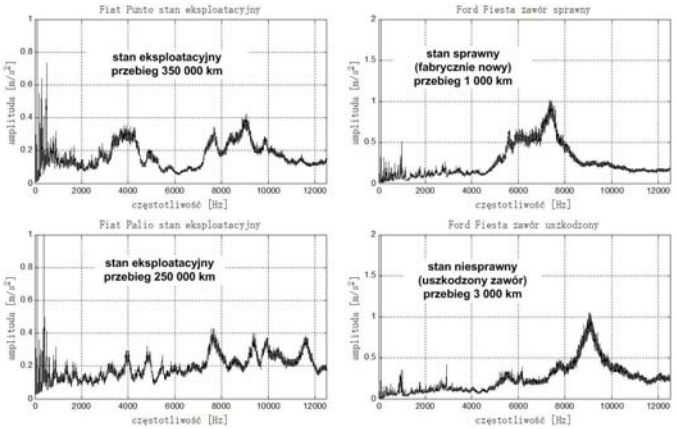


Rys. 4. Reakcja układu na wprowadzone uszkodzenie: a) zmniejszony luz zaworowy; b) zmniejszony luz zaworowy wraz z uszkodzeniem zaworu wylotowego

W przypadku zmniejszenia luzu zaworowego analiza widmowa przyspieszeń drgań głowicy pozwala wyodrębnić pasma częstotliwości charakterystyczne dla symulowanej niesprawności (rys. 4a). Wprowadzenie dodatkowego uszkodzenia (wypalenie zaworu) również pociąga za sobą zmianę obrazu widmowego (rys. 4b) w określonych pasmach częstotliwości.

„PRZENIESIENIE" SYMPTOMU USZKODZENIA NA INNE OBIEKTY

Powstaje pytanie, czy przedstawione symptomy uszkodzenia daje się przenieść na inne obiekty? Porównaniu poddano przetworzone sygnały drganiowe trzech znacząco różnych silników (pomiar analogiczny w trzech przypadkach): Forda Fiesty — stan fabrycznie nowy, Fiata Punto — stan eksploatacyjny, przebieg blisko 400 000 km, Fiata Palio Weekend — stan eksploatacyjny, przebieg 250 000 km (zasilany LPG).



Rys. 5. Porównanie różnych obiektów pod kątem wykorzystania tych samych symptomów uszkodzenia

Dokładniejsza analiza struktury częstotliwościowej sygnałów drganiowych generowanych przez obiekty w różnych stanach zużycia (rys. 5.) wykazała znaczne podobieństwa charakterystyk [5]. Porównanie jednego ze stanów eksploatacyjnych (przebieg 250 000 km) z zaproponowanymi symptomami uszkodzeń wskazuje na jedno z symulowanych uszkodzeń, a dokładnie na zwiększony luz zaworowy. Oczywiście w strukturze częstotliwościowej badanych obiektów w stanach eksploatacyjnych pojawiają się dodatkowe zakłócenia (zużycie elementów jednostki), które należałoby zidentyfikować, co znacznie ułatwiłoby proces porównania generowanych sygnałów. Na tym etapie nie można udzielić ostatecznej i jednoznacznej odpowiedzi, czy możliwe jest przeniesienie symptomu na inne jednostki, jednak otrzymane wyniki są dobrym punktem wyjścia do dalszych eksperymentów.

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza pozwala twierdzić, iż możliwa jest diagnostyka wczesnych faz uszkodzeń mechanicznych wykorzystująca sygnał drganiowy. Proponowane symptomy wykazują dużą wrażliwość na uszkodzenia mechaniczne, pozwalając wyodrębnić przedziały częstotliwości charakterystycznych dla wprowadzonego uszkodzenia i pozostając jednocześnie niewrażliwymi na zmianę prędkości obrotowej i przełożenia.

Po uprzednim wyskalowaniu możliwe wydaje się również przeniesie symptomów symulowanych uszkodzeń na „podobną" jednostką napędową.

Połączenie informacji o pasmach częstotliwości, w których zauważalna jest zmiana wywołana określonym uszkodzeniem z wiedzą dotyczącą częstotliwości drgań własnych poszczególnych elementów układu, pozwoliłoby na zaproponowanie miary ilościowej wyraźnie rozgraniczającej stan sprawny/niesprawny, jak również pokazującej stan ewolucji niesprawności.

BIBLIOGRAFIA

[1] Dąbrowski Z., Madej H., *O użyteczności symptomów wibroakustycznych w nowoczesnej diagnostyce silników spalinowych*, „Przegląd Mechaniczny", 2007, nr 1, s. 32–35.

[2] Deuszkiewicz P., Górnicka D., *Częstość Rice'a jako miara uszkodzenia zaworu silnika spalinowego*, „Przegląd Mechaniczny", 2009, nr 4, s. 41–47.

[3] Madej H., *Diagnozowanie uszkodzeń mechanicznych w silnikach spalinowych maskowanych przez elektroniczne urządzenia sterujące*, ITE, Katowice — Radom 2009.

[4] Szulborski A., Szulborski P., *Uszkodzenia zaworów silnikowych i ich przyczyny*, „Poradnik Serwisowy", 2007, nr 5.

[5] Yang W., *Establishment of the mathematical model of diagnosing the engine valve faults by genetic programming*, 'Journal of Sound and Vibration', 2006, No 293, pp. 213–226.

EXAMINATION OF VIBROACOUSTICS SENSITIVITY OF SYMPTOMS TO MECHANICAL DAMAGE IN COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT

The paper contains the results of qualitative analysis of vibroacoustic signal generated by a combustion engine in different stages of mechanical damage. The main goal of the analysis described was to examine the vibroacoustic sensitivity of diagnostic symptoms to simulated mechanical damage. The research was realized on significantly differing engines (mileage, operational state, year of production). Sensitivity and selectivity of diagnostic symptoms were compared for both the damage evolution and the changed measurement conditions.

Keywords:

vibroacoustics sensitivity, combustion engines, failure diagnosis.

Recenzent dr hab. inż. Henryk Madej, prof. PŚ