

Henryk MADEJ

WYKORZYSTANIE METOD WIBROAKUSTYCZNYCH W DIAGNOSTYCE SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie. Drgania i hałas silnika spalinowego są nośnikami informacji o stanie jego podzespołów mechanicznych. Energia sygnału drganiowego, generowanego w układzie tłokowo-korbowym, zależy od średniej prędkości obrotowej oraz położenia kąтового wału korbowego. Uszkodzenia mechaniczne mające wpływ na ciśnienie sprężania oraz zjawisko wypadania zapłonów wywołują chwilowe zmiany prędkości obrotowej wału korbowego i chwilowej gęstości widmowej energii sygnału drgań. W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu symulowanych uszkodzeń na zmianę charakterystyk sygnałów drgań.

APPLICATION OF VIBROACOUSTICS METHODS FOR IC ENGINE DIAGNOSTICS

Summary. Sound and vibration signal of IC engine often give much dynamic information of mechanical system condition. The energy state of the pistons and the connecting rods is determined by the mean angular speed and the angular positions of the crankshaft. Changes in the pressure in cylinder caused by compression faults or misfire will affect directly the instantaneous angular speed of the crankshaft and vibration energy. In this paper engine faults and its influence on vibration of engine block and head is presented.

1. WPROWADZENIE

W badaniach procesów wibroakustycznych (WA) generowanych przez silniki spalinowe powszechnie stosowane są metody analizy sygnałów jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości.

W diagnostyce WA są one szczególnie przydatne w procesach filtracji zakłóceń, detekcji składowych impulsowych wywołanych uszkodzeniami oraz poszukiwania istotnych cech sygnału diagnostycznego [1,2]. W badaniach wibroakustycznych ważnym zagadnieniem jest odpowiednia interpretacja złożonych sygnałów pomiarowych. Do głównych zadań w diagnozowaniu można zaliczyć: separację użytecznego sygnału wibroakustycznego oraz wybór charakterystycznych cech przetworzonego sygnału wrażliwych na uszkodzenia. Sygnały WA generowane przez poszczególne pary kinematyczne i osprzęt silnika

spalinowego są z reguły niestacjonarne ze względu na występowanie zjawisk nieliniowych, wywołanych m.in. występowaniem luzów i nieliniowości charakterystyk elementów sprężystych. Charakterystyki częstotliwościowe sygnałów w dużym stopniu zależą od zmiennej w czasie drogi propagacji sygnałów składowych od źródeł do punktu pomiaru. Sygnał mierzony jest zazwyczaj splotem i superpozycją wielu sygnałów i szumów.

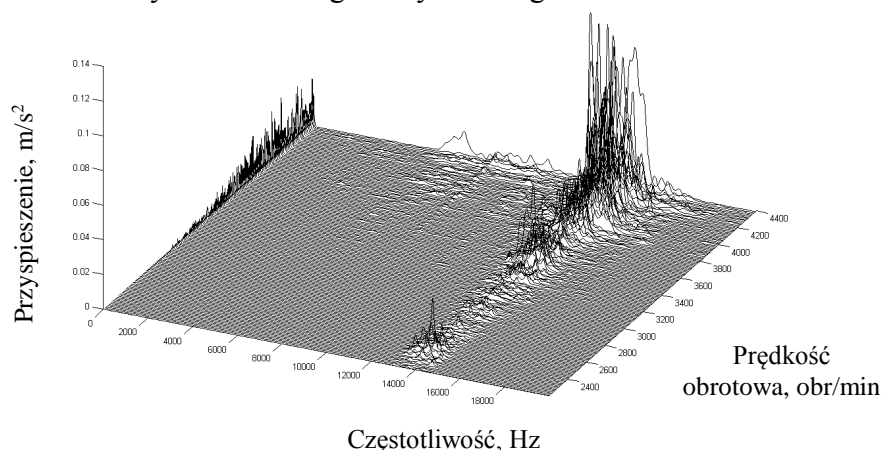
W pracy przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu nieszczelności w układzie dolotowym na rozkład energii drgań na płaszczyźnie czas-skala.

Z dotychczasowych badań wynika, że uszkodzenia mechaniczne, mające wpływ na ciśnienie w cylindrze, wywołują chwilowe zmiany prędkości obrotowej wału korbowego i gęstości widmowej energii sygnału drgań [3-5]. Potwierdzają to również przedstawione w artykule wyniki badań, podczas których symulowano nieszczelność w układzie wymiany ładunku silnika.

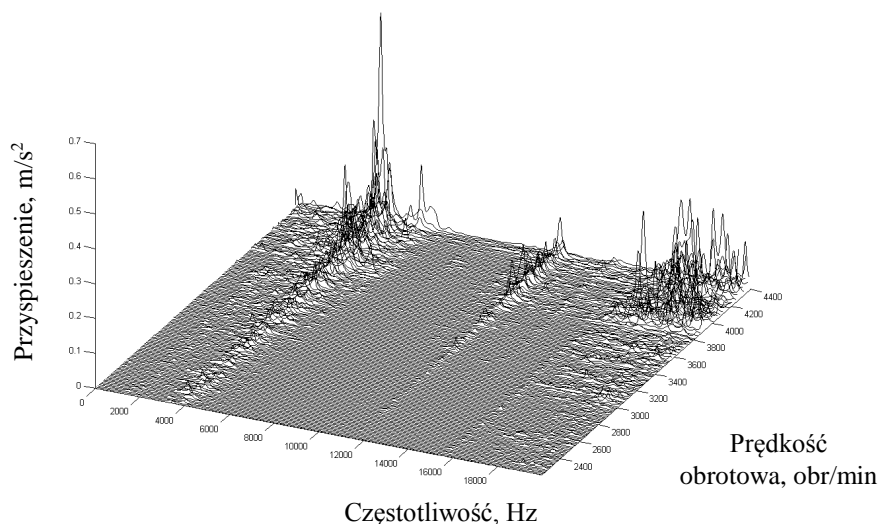
W trakcie badań rejestrowano przyspieszenia drgań głowicy i bloku silnika w kierunkach pionowym oraz poziomym, a także prędkość obrotową wału korbowego. Badania zrealizowane zostały na hamowni podwoziowej w warunkach ustalonej prędkości obrotowej oraz podczas rozbiegu.

2. DIAGNOZOWANIE SILNIKÓW SPALINOWYCH METODAMI WIBROAKUSTYCZNYMI

Silnik spalinowy jest obiektem diagnozowania, który podlega oddziaływaniu różnych wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych. Blok silnika oraz głowica charakteryzują się złożoną strukturą rezonansową. Charakter zarejestrowanego sygnału drganiowego zależy szczególnie od punktu odbioru. W celu identyfikacji częstotliwości rezonansowych bloku silnika wykonano badania w warunkach pracy nieustalonej (rozruchu). Badania w tych warunkach umożliwiają obserwację odpowiedzi układu na różne, często niestacjonarne, wymuszenia. W procesie wyznaczania częstotliwości rezonansowych silnika podczas rozbiegu na jego konstrukcję działają wymuszenia eksploatacyjne. W porównaniu z analizą modalną w tym eksperymencie można wyznaczyć częstotliwości rezonansowe w znacznie szerszym zakresie [6]. Zarejestrowane podczas rozruchu przyspieszenia drgań w kierunku prostopadłym (rys. 1) oraz równoległym (rys. 2) do osi cylindrów umożliwiły określenie częstotliwości rezonansowych kadłuba i głowicy badanego silnika.



Rys. 1. Charakterystyka rozruchowa silnika (czujnik drgań na bloku silnika)
Fig. 1. Run up characteristic of engine (vibration transducer on engine block)



Rys. 2. Charakterystyka rozruchowa silnika (czujnik drgań na głowicy silnika)
 Fig. 2. Run up characteristic of engine (vibration transducer on engine head)

Odbierany sygnał jest silnie zakłócony przez różne źródła drgań oraz złożoną strukturę rezonansową, skąd wynika konieczność stosowania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów. Ze względu na impulsowy charakter wymuszeń diagnostyczne pasma widmowe leżą w obszarze wysokich częstotliwości. W diagnozowaniu wykorzystuje się czujniki przyspieszeń o szerokim zakresie przenoszenia, odpowiednio mocowane na korpusie lub głowicy silnika.

3. ANALIZA SYGNAŁÓW W DZIEDZINIE CZAS - SKALA

Do analizy sygnałów przyspieszeń drgań silnika spalinowego wykorzystano ciągłą transformatę falkową (CWT). W diagnostyce silników spalinowych analiza czasowych i częstotliwościowych własności sygnałów za pomocą transformaty falkowej jest coraz częściej stosowana [3-5].

Ciągła transformata falkowa funkcji o skończonej energii $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ jest zdefiniowana następująco:

$$W_x(a, b) = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

$$a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$

Odwrotna transformata przekształcenia $W_x(a, b)$ ma postać:

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{dadb}{a^2} \quad (2)$$

Zgodnie z definicją funkcja $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ jest dopuszczalną falką podstawową, jeżeli:

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (3)$$

gdzie $\Psi(\omega)$ jest transformatą Fouriera funkcji $\psi(t)$.

Transformata falkowa jest przekształceniem, które zachowuje energię zgodnie z zależnością:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |W_x(a,b)|^2 \frac{dad b}{a^2} \quad (4)$$

Zgodnie z powyższą formułą $\frac{|W_x(a,b)|^2}{C_{\psi} a^2}$ może być traktowana jako gęstość mocy funkcji na płaszczyźnie a, b . Równanie (4) można zapisać następująco:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} a^{-2} E(a) db \quad (5)$$

$$E(a) = \int_R |W_x(a,b)|^2 db \quad (6)$$

$E(a)$ nazywana jest falkowym widmem mocy sygnału. W diagnostyce wykorzystuje się je do oceny wpływu uszkodzeń na rozkład energii sygnału WA w dziedzinie skali (częstotliwości).

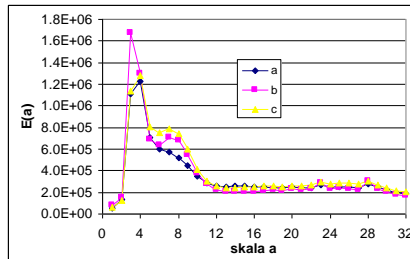
Współczynniki falkowe $W_x(a,b)$ są funkcją skali a i przesunięcia b . Zmiana skali oznacza kompresję lub rozciągnięcie falki $\psi_{a,b}$. Współczynniki $W_x(a,b)$ stanowią miarę korelacji sygnału $x(t)$ z falką $\psi_{a,b}(t)$: dla falek wąskich (małe a) reprezentują zawartość składowych wysokoczęstotliwościowych, a dla falek szerokich (duże a) – składowych niskoczęstotliwościowych. Powyższe właściwości powodują, że jest ona wykorzystywana w diagnostyce silników spalinowych, gdzie mamy do czynienia z przetwarzaniem sygnałów niestacjonarnych ze składowymi impulsowymi.

3. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

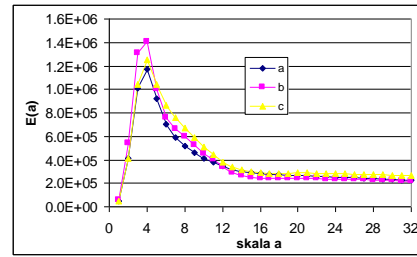
Obiektem badań mających na celu wykrywanie metodami WA nieszczelności w układzie dolotowym był silnik ZI o pojemności 2.0 dm³. Uszkodzenie układu wymiany ładunku, zakłócające pracę silnika, symulowano przez rozszczelnienie kolektora dolotowego. Uśrednione rozkłady współczynników falkowych dla jednego cyklu roboczego silnika pracującego na biegu jałowym, w przypadku silnika bez i z nieszczelnością w układzie dolotowym, przedstawiono na rys. 3. W badaniach symulowano różne stopnie nieszczelności.

W celu oceny wpływu nieszczelności na rozkłady energii sygnału wykonano (zgodnie z algorytmem przedstawionym w [5]) uśrednione falkowe widma mocy w dziedzinie skali (ASWPS). Wykorzystano cztery różne rodzaje falek. Na podstawie widm określono uśrednioną całkowitą energię E rozkładu CWT w zakresie kąta obrotu wału korbowego $0 \div 720^\circ$, który odpowiada cyklowi roboczemu badanego silnika. Niezależnie od zastosowanego rodzaju falki energia E rozkładu CWT rośnie wraz ze wzrostem stopnia rozszczelnienia układu dolotowego badanego silnika (rys. 4) i może być zastosowana jako miara diagnostyczna tego rodzaju uszkodzenia.

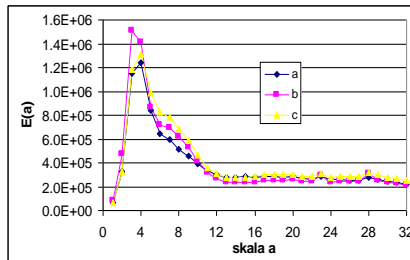
3.1)



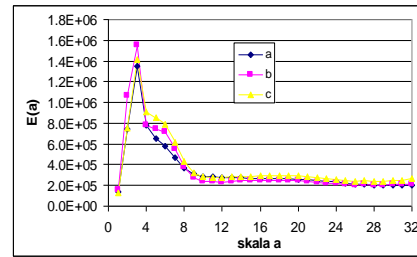
3.2)



3.3)



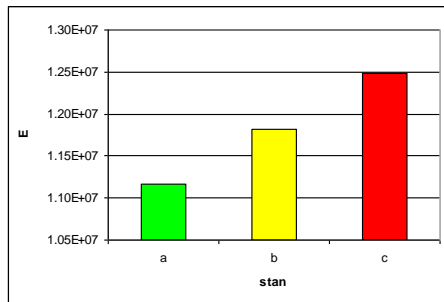
3.4)



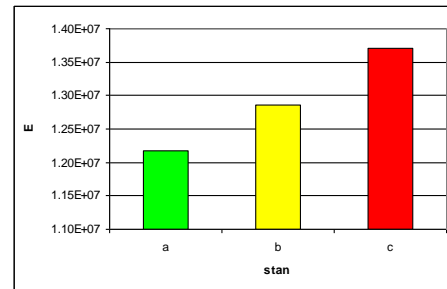
Rys. 3. Uśrednione falkowe widma mocy w dziedzinie skali (ASWPS) sygnału zarejestrowanego w kierunku prostopadłym do osi cylindra; silnik: a) bez uszkodzeń, b) nieszczelność stopnia 1, c) nieszczelność stopnia 2; 3.1 - falka Morlet, 3.2 - falka Db4, 3.3 - falka Meyer, 3.4 - falka Gauss 7

Fig. 3. Averaged scale-wavelet power spectrum (ASWPS) of signal registered in perpendicular direction to cylinder axle; a) without fault, b) small leakage, c) large leakage; 3.1 - Morlet wavelet, 3.2 - Db4 wavelet, 3.3 - Meyer wavelet, 3.4 - Gauss7 wavelet

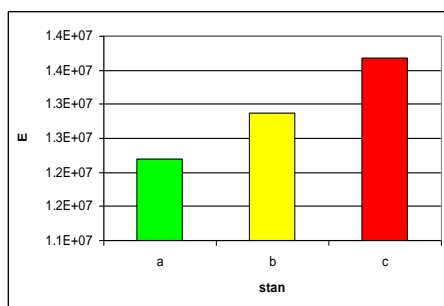
4.1)



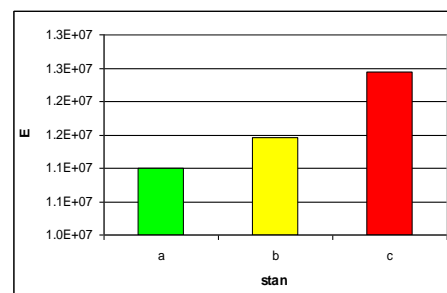
4.2)



4.3)



4.4)



Rys. 4. Całkowita energia sygnału uśredniona na podstawie kolejnych cykli roboczych silnika: 4.1 - falka Morlet, 4.2 - falka Db4, 4.3 - falka Meyer, 4.4 - falka Gauss 7

Fig. 4. Total averaged vibration energy obtained from consecutive working cycle of IC engine: 4.1 - Morlet wavelet, 4.2 - Db4 wavelet, 4.3 - Meyer wavelet, 4.4 - Gauss 7 wavelet

4. PODSUMOWANIE

W przypadku nieszczelności w układzie dolotowym użycie transformaty falkowej pozwoliło na obserwację na płaszczyźnie czas-skala zmian rozkładu energii spowodowanych tym uszkodzeniem. Zastosowanie uśredniania w procesie wyznaczania falkowego widma mocy pozwala na eliminowanie efektów wywołanych brakiem powtarzalności procesu spalania w różnych cylindrach i okresowo zmienną odległością źródła wymuszeń drgań od punktu pomiarowego. Energia E rozkładu CWT, wyznaczana na podstawie uśrednionego falkowego widma mocy, rośnie wraz ze wzrostem stopnia rozszczelnienia układu dolotowego badanego silnika i może stanowić miarę diagnostyczną tego rodzaju uszkodzenia silnika spalinowego.

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 rozchodzenia się energii wibroakustycznej w silniku.

Bibliografia

1. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
2. Dąbrowski Z., Madej H.: Masking mechanical damages in the modern control systems of combustion engines. Journal of KONES, Vol. 13, No. 3/2006.
3. Madej H., Flekiewicz M., Wojnar G.: Zastosowanie ciągłej transformaty falkowej (CWT) do analizy drgań silników spalinowych. Teza Komisji Motoryzacji PAN, zeszyt nr 33-34, Kraków 2008, s. 259-267.
4. Madej H., Łazarz B., Wojnar G.: Zastosowanie analizy falkowej w diagnozowaniu uszkodzeń układu wymiany ładunku silnika spalinowego XI. XIV Konferencja Naukowa Wibrotechniki i Wibroakustyki „WIBROTECH 2008”. Kraków 2008.
5. Wojnar G., Madej H.: Application of Averaged Scale-Wavelet Power Spectrum (ASWPS) for detection piston - skirt clearance of IC engines. 4th International Congress on Technical Diagnostics, Olsztyn 2008.
6. Madej H.: Wykorzystanie analizy modalnej w diagnostyce WA silników spalinowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., seria: Transport, z. 63, Gliwice 2006, s. 61-68.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Praca powstała w wyniku realizacji projektu BK-285/RT2/2008