

Henryk MADEJ

## **METODY PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH W DIAGNOZOWANIU SILNIKÓW SPALINOWYCH**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono przykłady zastosowania analizy falkowej sygnałów przyspieszeń drgań zarejestrowanych na kadłubie i głowicy silnika ZI w celu wykrycia symulowanych uszkodzeń. Analiza sygnałów drgań związanych z pracą silnika spalinowego jest utrudniona ze względu na złożony sygnał wywołany jednoczesnym działaniem wielu źródeł. Sygnał przyspieszeń drgań rejestrowany na kadłubie i głowicy silnika jest niestacjonarny i zawiera składowe impulsowe. Dlatego w diagnostyce drganiowej silników korzystne jest stosowanie metod czasowo-częstotliwościowych, takich jak analiza falkowa, które umożliwiają tworzenie użytecznych cech diagnostycznych. W artykule przedstawiono przykłady zastosowania pakietu analizy falkowej (WPT) do wykrywania symulowanych uszkodzeń silnika. Z badań wynika, że zastosowana metoda może być użyteczna do diagnozowania różnych uszkodzeń silnika spalinowego.

## **APPLICATION OF VIBROACOUSTICS SIGNAL PROCESSING METHODS FOR IC ENGINE DIAGNOSTICS**

**Summary.** In this paper, the wavelet transforms of vibration acceleration signals which were acquired from the cylinder head and engine block for various faulty and healthy conditions of IC engine was used to fault detection. The analysis of vibration signals associated with internal combustion engines is complicated due to the complexity of the engines and different sources of vibration. The engine vibration signal is inherently a transient one even in engine steady operation. The time-frequency localization features of the wavelet transforms make them suitable for IC engine fault diagnosis and monitoring. In the present investigation, a fault diagnosis technique based on wavelet packet transform (WPT) used to engine fault detection. The experimental results show that proposed method is useful for detection the faults in various engine working conditions

### **1. WPROWADZENIE**

Systemy diagnostyczne, wykorzystywane we współczesnych silnikach spalinowych, mają na celu lokalizację elementu lub układu, który wskutek naturalnego zużycia lub uszkodzenia nie może dalej pełnić swojej funkcji określonej przez producenta [10].

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 zgodnych z wymogami normy OBDII spowodowało, że istnieją obecnie możliwości dostępu do danych przechowywanych w sterownikach poszczególnych układów. Dzięki temu rozwiązaniu pojawiają się nowe możliwości diagnozowania stanu technicznego tych układów [7, 10].

Największą efektywność pokładowego systemu diagnostycznego zapewniono w zakresie kontroli emisji związków toksycznych. Jednakże niektóre uszkodzenia, takie jak: narastające zużycie gniazd zaworowych i przyłgni 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. Jest to sterowanie procesami o zmieniających się właściwościach dynamicznych oraz o zmieniających się własnościach zakłóceń stochastycznych, podczas którego przeprowadza się estymację parametrów modelu procesu i zakłóceń w celu uaktualnienia algorytmu sterowania. 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 [4]. Dopiero po wystąpieniu większej awarii przebieg procesu regulacji jest tak bardzo zakłócony, że znalezienie usterki będzie stosunkowo łatwe, ponieważ system przestawi się na pracę w trybie awaryjnym.

We współczesnych silnikach algorytmy detekcji spalania stukowego są częścią składową systemu sterownika silnika ZI. Realizowana zmiana kąta wyprzedzenia zapłonu ma istotny wpływ na charakter mierzonego sygnału drganiowego. Stwarza to niebezpieczeństwo maskowania usterek mechanicznych przez układy sterowania i może być powodem poważniejszych awarii.

Zmiany stanu technicznego silnika, wywołane wczesnymi fazami jego zużycia, są trudne do wykrycia. W badaniach wibroakustycznych silników ważnym zagadnieniem jest odpowiednia interpretacja złożonych sygnałów pomiarowych przez zastosowanie coraz doskonalszych metod ich przetwarzania [5, 6, 8, 9, 14, 15]. Do głównych zadań w diagnozowaniu można zaliczyć: separację użytecznego sygnału wibroakustycznego oraz wybór charakterystycznych cech przetworzonego sygnału wrażliwych na uszkodzenia.

## **2. DIAGNOZOWANIE SILNIKÓW SPALINOWYCH METODAMI WIBROAKUSTYCZNYMI**

Jednym ze sposobów pozyskiwania informacji diagnostycznej jest pomiar drgań generowanych przez silnik. Silnik spalinowy jest obiektem podlegającym oddziaływaniu wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych.

Jednym z istotnych wymuszeń występujących w trakcie pracy układu tłokowo-korbowego są siły bezwładności tłoka przy zmianie jego kierunku ruchu. Wartość wymuszenia zależy w istotny sposób od luzu pomiędzy tłokiem a ścianką cylindra [5, 6], spowodowanym zużyciem eksploatacyjnym silnika. Wartość siły jest funkcją ciśnienia spalania oraz prędkości obrotowej silnika.

Sygnał drganiowy, rejestrowany w dowolnym miejscu na korpusie silnika, jest ważoną sumą jej odpowiedzi na wszystkie zdarzenia elementarne, przy czym jako wagi występują tu sploty z impulsowymi funkcjami przejścia od miejsca generacji do odbioru sygnału diagnostycznego.

Wszystkie układy silnika spalinowego pracują w określonej kolejności. Uporządkowane są także zdarzenia elementarne zachodzące w parach kinematycznych. Wobec tego, według położenia impulsu uderzeniowego względem sygnału odniesienia, można określić parę kinematyczną silnika, która go wytworzyła.

Sygnał wibroakustyczny generowany przez silnik spalinowy można przedstawić w uproszczonej postaci:

$$x(t) = \sum A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) + \sum \sum B_{ij}(t) u(t - t_j) \cos(\omega_{ij} t + \varphi_{ij}), \quad (1)$$

gdzie:

$A_i$  i  $B_{ij}(t)$  – amplitudy składowych sygnału,

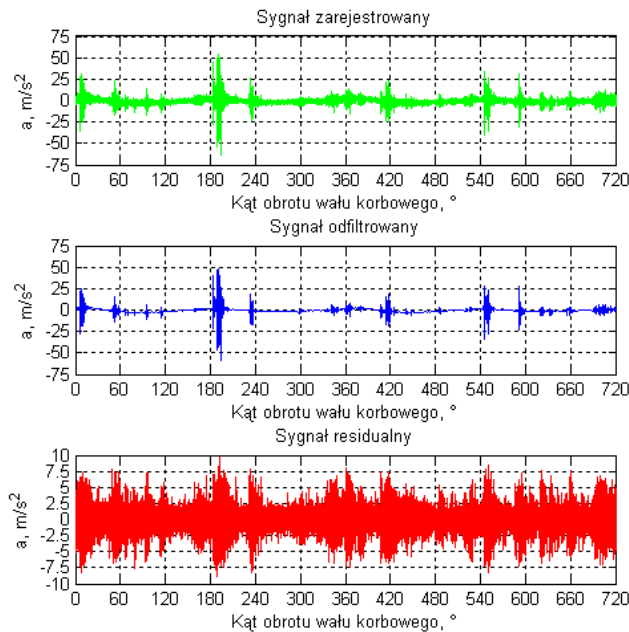
$\omega_i$  i  $\omega_{ij}$  – częstości drgań składowych,

$u(t)$  – funkcja impulsowa,

$t_j$  – czas określający wystąpienie zjawiska impulsowego,

$\varphi_i$  i  $\varphi_{ij}$  – fazy składowych sygnału.

Pierwszy składnik równania odzwierciedla główne składowe harmoniczne, które charakteryzują się zwykle dużymi wartościami amplitud. Po usunięciu składowych niskoczęstotliwościowych (rys. 1) otrzymuje się sygnał resztkowy, zawierający wysokoczęstotliwościowe składowe impulsowe.



Rys. 1. Sygnał przyspieszeń drgań silnika rozłożony na składowe nisko- i wysokoczęstotliwościowe  
Fig. 1. Vibration acceleration signal of IC engine decomposed on low and high frequency components

Powyższe przekształcenie sygnału ułatwia wydzielenie sygnału sumarycznego badanej pary kinematycznej silnika za pomocą selekcji czasowej lub kątowej. Sygnały wibroakustyczne generowane przez poszczególne pary kinematyczne i osprzęt silnika spalinowego, ze względu na występowanie zjawisk nieliniowych wywołanych m.in. występowaniem luzów, nieliniowości charakterystyk elementów sprężystych, są z reguły niestacjonarne. Charakterystyki częstotliwościowe sygnałów w istotny sposób zależą od transmitancji drogi propagacji sygnałów składowych od źródeł do punktu pomiaru. Drgania

mierzone na bloku mają złożony charakter ze względu na nakładanie się sygnałów pochodzących od różnych źródeł. Z powyższych względów diagnozowanie uszkodzeń silników jest procesem trudnym.

### 3. ANALIZA SYGNAŁÓW W DZIEDZINIE CZAS - SKALA

Dyskretna transformata falkowa znajduje coraz szersze zastosowanie w diagnostyce maszyn. Jej rozwinięciem są tzw. pakiety falkowe, umożliwiające wielorozdzielczą dekompozycję sygnału (WPT) [11–15]. Pakiety falkowe składają się z liniowej kombinacji rozwinięć funkcji falkowych:

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k), \quad (2)$$

gdzie:

$i = 1, 2, 3, \dots$ ,

$j$  – parametr skali,

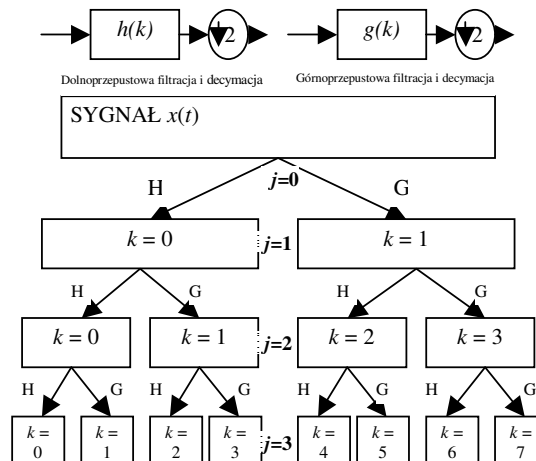
$k$  – parametr przesunięcia.

Funkcja  $\psi^i$  jest zdefiniowana poprzez następujące zależności:

$$\psi^{2^j}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2t - k), \quad (3)$$

$$\psi^{2^{j+1}}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t - k). \quad (4)$$

Dyskretne filtry  $h(k)$  i  $g(k)$  są filtrami lustrzanymi, związanymi z funkcjami skalującymi i funkcjami falkowymi [1, 13]. Algorytm wielorozdzielczej dekompozycji sygnału za pomocą pakietów falek (WPT) przedstawiono na schemacie blokowym (rys. 2).



Rys. 2. Algorytm dekompozycji za pomocą pakietów falkowych  
Fig. 2. Algorithm for wavelet packet decomposition

Algorytm dokonuje analizy częstotliwościowej sygnału przez iterację dwukanałowego zespołu filtrów, składającego się z filtrów dolno- i górnoprzepustowych. Sygnał uzyskany

w wyniku filtracji w poprzednim kroku poddawany jest dalszej filtracji. W wyniku każdej iteracji uzyskuje się składową wysokoczęstotliwościową, zwaną detalem, oraz składową niskoczęstotliwościową, zwaną aproksymacją. Proces dekompozycji sygnału jest procesem iteracyjnym, wielopoziomowym, kolejne detale i aproksymacje podlegają dalszej dekompozycji. Algorytm obliczeniowy ma postać zespołu filtrów o strukturze drzewa binarnego, w którym rozwijana jest gałąź dolno- i górnoprzepustowa za pomocą pary tych samych filtrów. Ten rodzaj analizy jest ostatnio powszechnie stosowany, ponieważ umożliwia tworzenie zestawów wzorców cech diagnostycznych stosowanych jako dane wejściowe klasyfikatorów neuronowych [14, 16].

Powyższe właściwości analizy falkowej powodują, że jest ona coraz częściej wykorzystywana w diagnostyce silników spalinowych, gdzie mamy do czynienia z przetwarzaniem sygnałów niestacjonarnych ze składowymi impulsowymi.

### 3. OBIEKT I PRZEBIEG BADAŃ

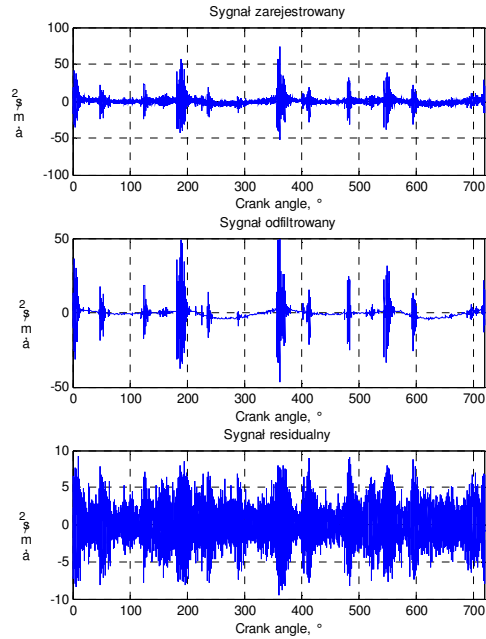
Badania pojazdów wyposażonych w silniki z zapłonem iskrowym o pojemności 1,1 dm<sup>3</sup> przeprowadzono na hamowni podwoziowej FLA 203 firmy BOSCH. Podczas badań rejestrowano przyspieszenia drgań kadłuba i głowicy silnika oraz prędkość obrotową i położenie wału korbowego w funkcji czasu. Sygnały rejestrowano za pomocą ośmiokanałowej karty akwizycji danych NI PCI-6143, sterowanej programem opracowanym w środowisku LabView 7.1.

Celem badań było określenie wpływu braku dopływu paliwa LPG do poszczególnych cylindrów na charakterystyki sygnału drganiowego. W ramach badań symulowano 7 różnych stanów pracy silnika (silnik sprawny, wyłączane kolejno cylindry 1, 2, 3, 4, wyłączne parami cylindry 1–4, 2–3).

### 4. WYNIKI BADAŃ

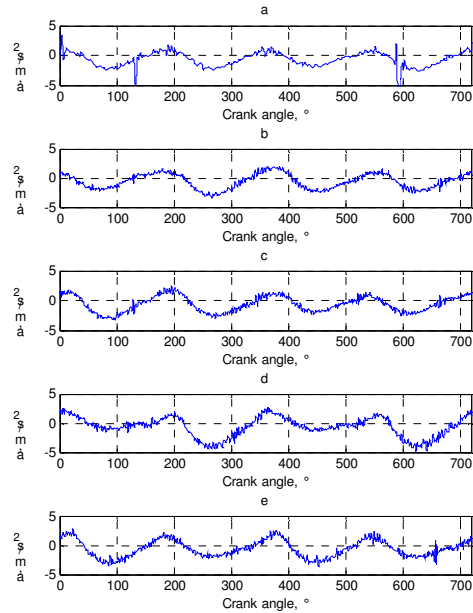
Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań oraz ich dekompozycje na składowe nisko- i wysokoczęstotliwościowe, zrealizowane z użyciem filtracji falkowej dla jednego cyklu roboczego silnika pracującego na biegu jałowym w przypadku wyłączenia dopływu paliwa do cylindrów 1 i 4 silnika, przedstawiono na rys. 3. W odfiltrowanym za pomocą dekompozycji falkowej sygnale można zauważyć niskoczęstotliwościowe zakłócenia wywołane symulowanym stanem silnika. Na rys. 4 zestawiono wyniki aproksymacji A5, a na rys. 5 przedstawiono detale D4 dla pięciu symulowanych stanów pracy silnika. Na podstawie przedstawionych wyników analizy falkowej można w prosty sposób określić miary energetyczne z rozkładów na różnych poziomach dekompozycji. Energia współczynników rozkładu falkowego dla wybranego poziomu dekompozycji  $j$  i zakresu pasma  $k$  jest określona:

$$E_{j,k} = \sum_k |c_{j,k}|^2. \quad (5)$$



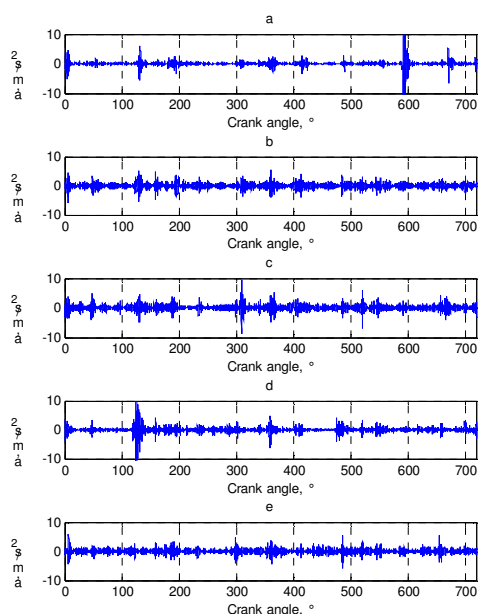
Rys. 3. Dekompozycja sygnału przyspieszeń drgań silnika z wyłączonym 1. i 4. cylindrem w okresie jednego cyklu roboczego

Fig. 3. Vibration acceleration signal of IC engine for 1 and 4 cylinder off



Rys. 4. Aproksymacje na poziomie A5: a-silnik sprawny, b - wyłączony 1. cylinder, c - wyłączony 2. cylinder, d - wyłączony 1. i 4. cylinder, e - wyłączony 2. i 3. cylinder

Fig. 4. Approximation coefficients A5, a-ICEngine in healthy condition, b - 1 cylinder off, c - 2 cylinder off, d - 1 and 4 cylinder off, e - 2 and 3 cylinder off



Rys. 5. Detale na poziomie D4: a - silnik sprawny, b - wyłączony 1. cylinder, c - wyłączony 2. cylinder, d - wyłączony 1. i 4. cylinder, e - wyłączony 2. i 3. cylinder

Fig. 5. Details coefficient D4, a-ICEngine in healthy condition, b - 1 cylinder off, c - 2 cylinder off, d - 1 and 4 cylinder off, e - 2 and 3 cylinder off

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz ostatnio publikowanych prac na ten temat można wnioskować, że wielorozdzielcza dekompozycja falkowa jest dobrym narzędziem do budowy zbioru cech diagnostycznych. Ten rodzaj analizy jest ostatnio powszechnie stosowany, ponieważ umożliwia tworzenie zestawów wzorców cech diagnostycznych stosowanych jako dane wejściowe klasyfikatorów neuronowych. 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.

#### Bibliografia

1. Batko W., Ziółko M.: Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej. Problemy Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, nr 7, Kraków 2002.
2. Czech P., Madej H.: Wykorzystanie analizy WPT i sieci neuronowych PNN w diagnozowaniu zakłóceń w dopływie paliwa do cylindrów. Problemy Eksploatacji, nr 1/2009.
3. Dąbrowski Z., Madej H.: Masking mechanical damages in the modern control systems of combustion engines. Journal of Kones, Vol. 13, No. 3/2006.

4. Dąbrowski Z., Madej H.: O użyteczności symptomów wibroakustycznych w nowoczesnej diagnostyce silników spalinowych. Przegląd Mechaniczny, nr 1/2007, s. 32-35.
5. Fabis P., Flekiewicz M., Flekiewicz B., Madej H., Wojnar G.: Influence of piston slap on engine block vibration. SAE Paper, No. 2007-01-2163.
6. Geveci M.: An investigation of crankshaft oscillations for cylinder health diagnostics. Mechanical Systems and Signal Processing, 19 (2005), p. 1107-1134.
7. Isermann R.: Diagnosis methods for electronic controlled vehicles. Vehicle System Dynamics, Vol. 36, No. 2-3.
8. Liu B.: Selection of wavelet packet basis for rotating machinery fault diagnosis. Journal of Sound and Vibration, 284(2005), p. 567-582.
9. Madej H., Flekiewicz M., Wojnar G.: Spatial-phase selection of diesel engine vibroacoustic signal for piston slap diagnostic. Journal of Kones. Powertrain and Transport, Vol. 14, No. 2/2007, p. 133-144.
10. Merkiś J., Mazurek S.: Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych. WKiŁ, Warszawa 2004.
11. Peng Z. K., Chu F. L.: Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography. Mechanical Systems and Signal Processing, 18(2004), p. 199-221.
12. Wu J. D., Liu C. H.: Investigation of engine fault diagnosis using discrete wavelet transform and neural network. Expert Systems with Applications, 35 (2008), p. 1200-1213.
13. Wu J. D., Chen J. C.: Continuous wavelet transform technique for fault signal diagnosis of internal combustion engines. NDT&E International, 39(2006), p. 304-311.
14. Yan R., Gao R. X.: An efficient approach to machine health diagnosis based on harmonic wavelet packet transform. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 21(2005), p. 291-301.
15. Zhang Z., Tomita E.: Knocking detection using wavelet instantaneous correlation method. JSAE Review 23(2002), p. 443-440.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

*Praca powstała w wyniku realizacji projektu BK-293 /RT2/2009.*