

Henryk MADEJ, Edward TRZENSIK

PROBLEMY DIAGNOZOWANIA USZKODZEŃ MECHANICZNYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy związane z diagnozowaniem uszkodzeń mechanicznych współczesnych silników spalinowych. Głównym celem współczesnych pokładowych systemów diagnostycznych nadzorujących pracę elektronicznych systemów sterowania jest przede wszystkim kontrola pracy silnika pod kątem spełnienia wymagań ekologicznych. Współczesne systemy diagnostyki pokładowej (OBD) są standardowym wyposażeniem pojazdów osobowych, które pozwalają przede wszystkim na wykrywanie usterek pojazdu, mających wpływ na emisję toksycznych składników spalin. W praktyce sprowadza się to do diagnozowania układów elektronicznych, odpowiedzialnych za podstawowe funkcje sterowania pracą silnika. Wykrycie wczesnych faz rozwoju uszkodzeń mechanicznych, np. metodami wibroakustycznymi, może znacząco wzbogacić obecnie stosowane systemy i zapobiec poważniejszym uszkodzeniom, mającym wpływ na wielkość emisji i parametry robocze silnika. Uszkodzenia mechaniczne oraz zużycie eksploatacyjne, szczególnie we wczesnych fazach rozwoju, są kompensowane przez adaptacyjne systemy regulacji wskutek przyjętych dopuszczalnych zakresów regulacji.

Autorom znane są przypadki występowania tego rodzaju uszkodzeń, których niemożliwość wykrycia doprowadziła do poważnych uszkodzeń silnika. Problem ten jest szerszy i dotyczy zarówno stacjonarnych, jak i trakcyjnych silników spalinowych.

Wiedza o tym zjawisku wyznacza dwa najbardziej istotne kierunki działań, zmierzające do zwiększenia skuteczności systemów diagnozowania. Jednym z kierunków jest opracowanie nowych konstrukcji czujników i przetworników oraz układów przetwarzania generowanych przez nie sygnałów w celu zapewnienia jak najkrótszego czasu reakcji na dynamiczne zmiany sygnałów wejściowych. Innym kierunkiem badań jest określenie tych uszkodzeń silnika, których wykrycie przez system diagnostyki pokładowej jest utrudnione lub niemożliwe.

PROBLEMS OF IC ENGINES MECHANICAL FAULT DIAGNOSTICS

Summary. The main purpose of modern, on board, diagnostic systems supervising electronic control systems is to check whether the ecological requirements are met. It means that the OBD system monitors catalyst and ignition system operations. However, the range of these activities is not sufficient for detection of engine faults formed during an exploitation. The assumed limits of the admissible variation of signals in the OBD systems are the reason of masking mechanical faults, which – at their early stages – are not visible for the system. Modern systems of on board diagnostics (OBD) are standard equipment of passenger cars allowing, first of all, to find faults which influence an emission of toxic components of

exhaust gases. In practise, it is reduced to diagnostics of electronic systems responsible for basic functions of controlling car engine operations. Thus, currently used OBD systems usually allow only to find a simple fault of an individual element. This constitutes a significant limitation in a situation when some elements undergo an exploitation wear, but a wear of individual elements does not exceed their admissible value. Detection of early phases of mechanical faults e.g. by vibroacoustic methods, can significantly improve the currently used systems and prevent more serious damages having influence on emission quantity and work parameters of an engine. To this end, the application of an additional vibroacoustic diagnostic system supplementing the standard on board system in discovering faults of I.C. engines, can be very useful.

Certain mechanical faults such as: increasing wear of valve seats and faces, shifting of timing gear phases, wear of a cylinder bearing surface even exceeding dimensions permissible for the given engine, in many cases – known from practice – do not trigger the reaction of the diagnostic system. The most often the application of algorithms of I.C. engines adaptive control systems is the reason of such situation. The engine adaptive control can lead to masking or adapting the developing errors. Mechanical faults and exploitation wear, especially in early development stages, are compensated by adaptive control systems as a result of the assumed admissible control ranges. Only, when more serious breakdown occurs, the process control is disturbed to such an extent that finding the failure becomes relatively easy since the system will switch to the breakdown mode operation.

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 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. Jest to sterowanie procesów 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 wykrywania. W badaniach wibroakustycznych silników ważnym zagadnieniem jest odpowiednia interpretacja złożonych sygnałów pomiarowych przez zastosowanie coraz doskonalszych metod ich przetwarzania [2, 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,

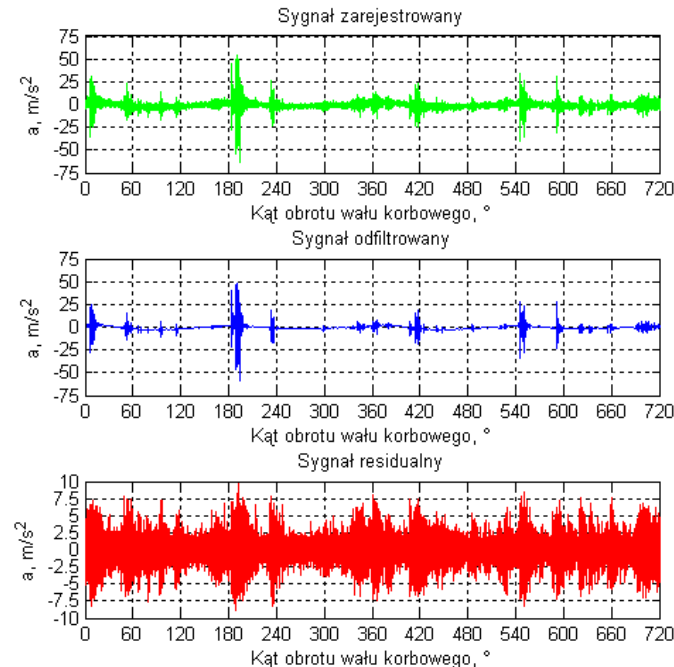
ω_i i ω_{ij} – częstości drgań składowych,

$u(t)$ – funkcja impulsowa,

t_j – czas określający wystąpienie zjawiska impulsowego,

φ_i i φ_{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 - SKAŁA

Dyskretna transformata falkowa znajduje coraz szersze zastosowanie w diagnostyce maszyn. Jej rozwinięciem są tzw. pakiety falkowe, umożliwiające wielorozdzielczą dekompozycję sygnału (WPT) [2, 11 – 15]. Pakiety falkowe składają się z liniowej kombinacji rozwinięć funkcji falkowych:

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

gdzie:

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

j – parametr skali,

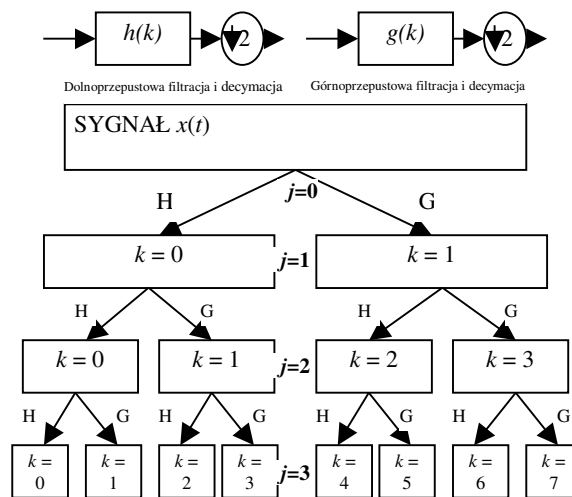
k – parametr przesunięcia.

Funkcja ψ^i jest zdefiniowana przez 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 falekowych

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 [2, 14].

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

4. OBIEKT I PRZEBIEG BADAŃ

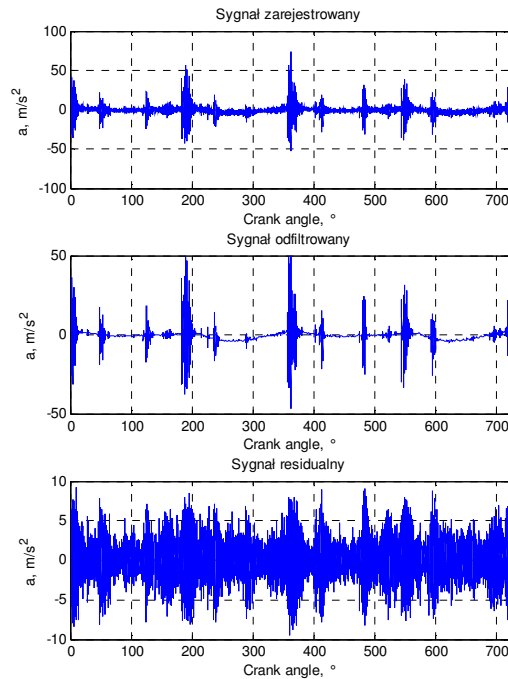
Badania pojazdów wyposażonych w silniki z zapłonem iskrowym o pojemności 1,1 dm³ przeprowadzono na hamowni podwoziowej FLA 203 firmy BOSCH. Podczas badań rejestrowano przyspieszenia drgań kadłuba i głowicy silnika oraz prędkość obrotową i położenie wału korbowego w funkcji czasu. Sygnały rejestrowano 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 – 4, wyłączane parami cylindry 1 i 4 oraz 2 i 3).

5. WYNIKI BADAŃ

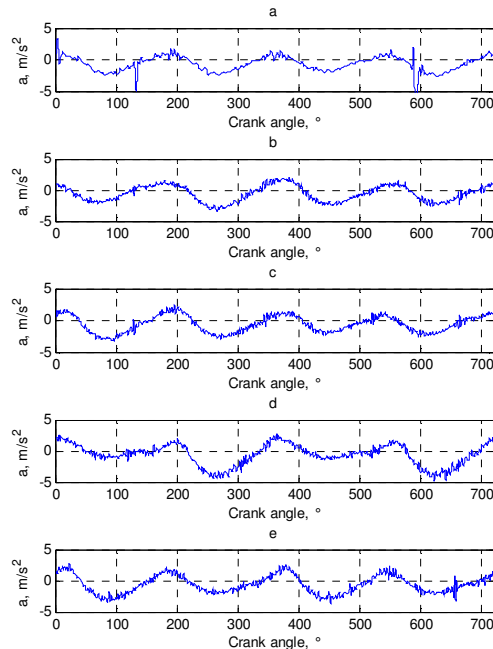
Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań oraz ich dekompozycje na składowe nisko- i wysokoczęstotliwościowe, zrealizowane z użyciem filtracji falkowej dla jednego cyklu roboczego silnika pracującego na biegu jałowym, w przypadku wyłączenia dopływu paliwa do cylindrów 1 i 4 silnika, przedstawiono na rysunku 3. W odfiltrowanym za pomocą dekompozycji falkowej sygnale można zauważyć niskoczęstotliwościowe zakłócenia wywołane symulowanym stanem silnika. Na rysunku 4 zestawiono wyniki aproksymacji A5, a na rysunku 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:

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



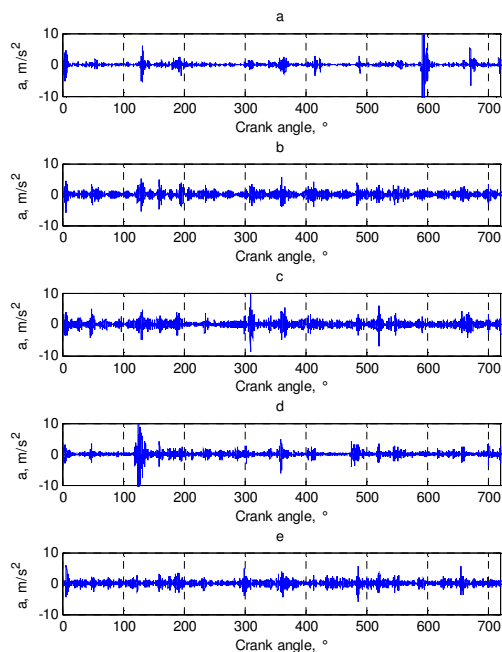
Rys. 3. Dekompozycja sygnału przyspieszeń drgań silnika z wyłączonymi cylindrami 1 i 4 w okresie jednego cyklu roboczego

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 cyl., c – wyłączony 2 cyl., d – wyłączone 1 i 4 cyl., e – wyłączony 2 i 3 cyl.

Fig. 4. Approximation coefficients A5: a – IC engine 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 cyl., c – wyłączony 2 cyl., d – wyłączone 1 i 4 cyl., e – wyłączone 2 i 3 cyl.

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

6. 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*, No. 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*, No. 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*, No. 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*, No. 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*, No. 21(2005), p. 291-301.
15. Zhang Z., Tomita E.: Knocking detection using wavelet instantaneous correlation method. *JSAE Review*, No. 23(2002), p. 443-440.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Niewczas