

Zastosowanie metod selekcji sygnału drganiowego w diagnostyce silników spalinowych

W artykule dokonano porównania cech metod selekcji sygnału drganiowego. Metody te mogą być stosowane jako techniki wstępnego przetwarzania sygnału drganiowego generowanego przez silniki spalinowe - niestacjonarnego w sensie widmowym i amplitudowym. Przedstawiono przykładowe wyniki stosowania procedur selekcji do ekstrakcji składowych sygnałów związanych z pracą podzespołów i procesów zachodzących w silniku spalinowym. Zamieszczony przykład pokazał, że na podstawie uśrednionej krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT) parametry selekcji czasowej i widmowej sygnału drganiowego mogą być adaptacyjnie zmieniane.

1. Wprowadzenie

Silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym (ZS) średniej i dużej mocy stosowane są jako elementy jednostek napędowych pojazdów szynowych. Diagnostowanie ich stanu technicznego pozwala prowadzić politykę remontową uwarunkowaną stanem technicznym, zapobiegać większości nieplanowanych postojów, a poprzez wykrycie uszkodzeń we wczesnym stadium rozwoju, radykalnie zmniejszyć zakres i koszty napraw i obsługi. Odrębnym aspektem są względy bezpieczeństwa przewozów oraz ich terminowość.

Do oceny stanu technicznego lub oceny stanu pracy (parametrów funkcjonalnych i operacyjnych) silnika spalinowego coraz częściej wykorzystywane są miary i charakterystyki sygnału drganiowego generowanego przez silnik spalinowy [9,10,12 i 13]. Pozyskanie informacji użytecznej diagnostycznie zawartej w drganiach nie jest łatwe. Trudność identyfikacji i wnioskowania o stanie technicznym/pracy elementu lub podzespołu silnika na podstawie powszechnie stosowanych miar i charakterystyk sygnału wibroakustycznego (WA), wynika między innymi ze złożonej natury drgań generowanych przez silnik, zachodzących w nim procesów, koegzystencji wielu źródeł drgań, a także złożonej kinematyki. Skład widmowy drgań w dużej mierze jest zależny od lokalizacji i zorientowania przetworników drgań umieszczonych w polu zjawiskowym. Przemieszczenie przetwornika drgań nawet do niezbyt odległego punktu pomiarowego powoduje zmianę funkcji transmitancji drgań na drodze źródło-miejsce odbioru sygnału [2]. Należy mieć również na uwadze fakt, że w poszczególnych punktach pomiarowych zlokalizowanych na silniku w sygnale drganiowym w różnej mierze mogą być widoczne składowe odpowiadające częstościom własnym struktury. Zróżnicowanie to wynika głównie z wzajemnego usytuowania przetwornika względem układu strzałek i węzłów dla danej postaci drgań własnych. Powyższe czynniki są główną przyczyną trudności uzyskania powtarzalności wyników nawet dla obiektów tego samego typu.

Mając na uwadze powyższe uwarunkowania można stwierdzić, że dla tak złożonego sygnału przed jego parametryzacją celowe jest stosowanie następujących metod selekcji sygnału: przestrzennej, czasowej, widmowej [7], lub ich kombinacji [6]. Coraz częściej stosowane są procedury selekcji oparte na rozwijanych obecnie metodach analiz czasowo-widmowych [11].

W artykule opisano podstawowe cechy wyżej wymienionych metod, ich zalety i ograniczenia. Porównanie cech powinno ułatwić dokonywanie świadomego wyboru metody analizy sygnałów drganiowych generowanych przez silniki spalinowe, w zależności od planowanego obszaru zastosowań. W dalszej części zamieszczono przykład zastosowania metod selekcji jako metody *preprocessingu* przed procesem parametryzacji sygnału drganiowego stosowanego do diagnozowania luzu zaworowego silnika typu SB 3.1.

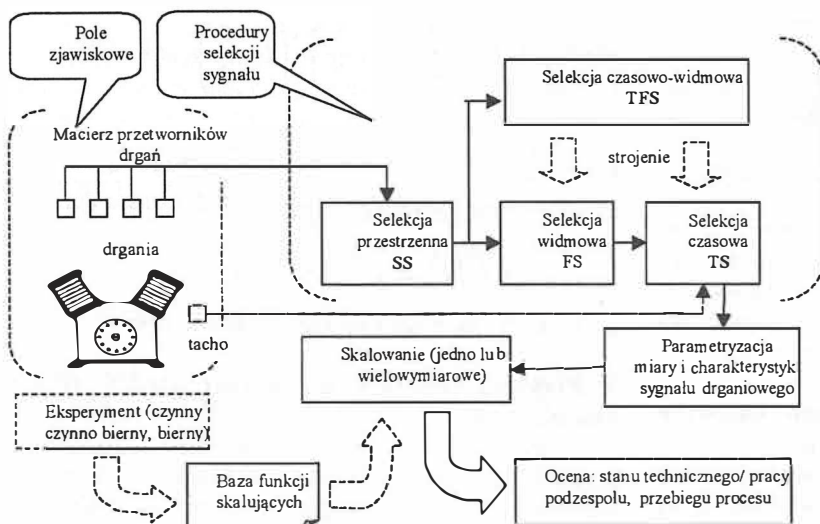
2. Charakterystyka metod selekcji sygnałów drganiowych

2.1. Miejsce procedur selekcji w procesie diagnozowania silnika spalinowego

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat przetwarzania sygnału drganiowego ukazujący miejsce procedur selekcji sygnału w procesie diagnozowania silnika spalinowego. Podstawowym celem ich stosowania jest wydobycie i /lub wyeksponowanie z procesu drganiowego informacji związanych z pracą poszczególnych podzespołów lub przebiegiem procesów. W polu zjawiskowym oprócz macierzy przetworników drgań w większości przypadków konieczne jest zainstalowanie przetworników tachometrycznych. Sygnały tachometryczne są niezbędne do poprawnego funkcjonowania procedur selekcji czasowej. Procedury selekcji czasowo-widmowej są zazwyczaj wykorzystywane w procesie adaptacyjnego strojenia procedur selekcji czasowej (skalowanie okien czasowych) oraz procedur selekcji widmowej (określenia rodzaju i pasm filtracji). Dalsza parametryzacja sygnału (tworzenie miar i charakterystyk) prowadzi do uzyskania symptomów wspólnych np. ze stanem technicznym/pracy, czy też jakością procesu np. spalania. Do uzyskania odwzorowań np. parametry drgań – parametry funkcjonalne (operacyjne), parametry drgań – stan techniczny podzespołu konieczne jest zastosowanie funkcji skalujących. Pozyskuje się je na podstawie badań eksperymentalnych.

2.2. Selekcja przestrzenna, czasowa i widmowa

Selekcja przestrzenna polega na sumowaniu sygnałów z kilku przetworników odpowiednio rozmieszczonych i zorientowanych w polu zjawiskowym. W procesie sumowania uwzględniane są związki fazowe i amplitudowe pomędzy sygnałami.



Rys. 1. Miejsce procedur selekcji sygnału w procesie diagnozowania silnika spalinowego

Selekcja przestrzenna pozwala między innymi na uzyskanie sygnału drgań względnych pomiędzy podzespołami na drodze syntezy sygnałów drgań bezwzględnych, ekstrakcję lub częściową redukcję składowych związanych z drganiami strukturalnymi (modalnymi) czy też dokonanie separacji sygnału diagnostycznego związanego z interesującym nas podzespołem silnika.

Selekcja czasowa stosowana jest głównie do wyodrębnienia z sygnału jego fragmentu, który może być poddawany dalszemu przetwarzaniu. Selekcja czasowa pozwala na obserwację, dalszą analizę lub parametryzację fragmentu sygnału związanego z poszczególnymi fazami pracy silnika związanego np. z procesem spalania, pracą zaworów itp. Selekcja oparta jest na przemnażaniu analizowanego sygnału przez funkcję okna czasowego zdefiniowanego przez eksperymentatora. W przypadku sygnałów przetworzonych wstępnie do postaci cyfrowej i przechowywanych w postaci szeregów czasowych w pamięciach masowych selekcja czasowa polega na stosowaniu techniki ruchomego okna. W przypadku silnika spalinowego charakteryzującego się zmienną prędkością obrotową lokalizacja okna jak i jego rozmiar powinny być adaptacyjnie korygowane. Zastosowanie sumowania synchronicznego wraz z dynamiczną decymacją sygnału [1] pozwala na poprawę stosunku sygnału do szumu oraz tworzenie np. przebiegów wzorcowych dla poszczególnych faz pracy silnika. Należy pamiętać, że stosowanie sumowania synchronicznego jest uzasadnione w przypadku sygnału o charakterze poliharmonicznym. Zastosowanie okien różnych od prostokątnego umożliwia dodatkowe formowanie amplitudowe wyseparowanej sekwencji sygnału.

Selekcja widmowa dokonywana jest w dziedzinie częstotliwości, a prowadzona jest w celu wyodrębnienia i wyeksponowania w sygnale pasm częstotliwości lub poszczególnych składowych. Oprócz selekcji widmowej dokonywanej filtrami dolno, górno-przepustowymi, pasmowymi środkowo zaporowymi, grzebieniowymi, stosowane są filtry śledzące, a także techniki zaawansowane między innymi analiza rzędów (*order analysis*) czy też poliharmoniczna filtracja rekurencyjna [5].

2.3. Charakterystyka metod analizy/selekcji czasowo-widmowej

Analizując proces drgań generowanych przez silnik w obrębie realizacji jednego cyklu pracy można stwierdzić, że jest to proces czasowo zmienny zarówno w sensie amplitudowym jak i częstotliwościowym, wynikający z kolejnych faz pracy silnika. W diagnozowaniu silnika spalinowego celem jest zastosowanie selekcji łącznej czasowo-widmowej. Potencjalne szerokie możliwości stoją zatem przed rozwijaniem obecnie metodami analizy czasowo-widmowej. Do najczęściej stosowanych metod można zaliczyć:

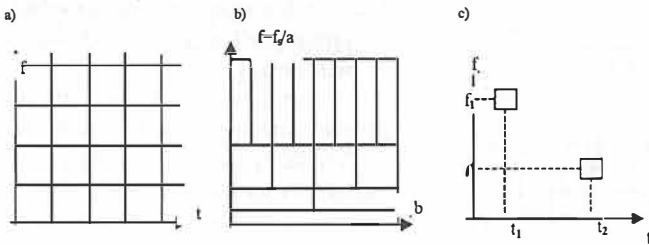
Krótkoczasową Transformatę Fouriera (*Short Time Fourier Transform - STFT*), Transformatę Wavelet (*Wavelet Transform - WT*) oraz Dystrybucję Wigner Ville (*Wigner Ville Distribution - WVD*) [11].

Krótkoczasowa Transformata Fouriera (*STFT*) polega na poddaniu analizie FFT krótkich sekwencji sygnału, w których może być on traktowany jako quasi stacjonarny. Ekstrakcja z sygnału wejściowego kolejnych segmentów danych do analizy FFT realizowana jest techniką ruchomego okna [4]. Zestawienie obok siebie uzyskanych w ten sposób widm daje w rezultacie mapę czasowo-widmową analizowanego procesu. Definicyjny zapis *STFT* przedstawia wzór (1).

$$STFT[x_w(t, \tau)] = X_w(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t, \tau) x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

gdzie: $x(t)$ - przebieg czasowy reprezentujący sygnał wejściowy poddawany analizie,
 $w(t)$ - funkcja okna czasowego (funkcja wagowa),
 τ - pozycja okna czasowego w dziedzinie czasu,
 $x_w(t, \tau) = w(t - \tau)x(t)$ - wyekstrahowany segment danych do analizy.

Wynik *STFT* można traktować jako serię widm wyznaczonych dla lokalnych, krótkich segmentów czasowych. Do zalet tej metody można zliczyć krótki czas obliczeń potrzebny do wyznaczenia mapy czasowo-częstotliwościowej, łatwą, intuicyjną interpretację wyników analizy oraz stałą rozdzielczość w całym zakresie częstotliwości. Postać wyniku jest zależna od przyjętej funkcji okna czasowego i parametrów przetwarzania sygnału: liczby próbek w segmencie danych i kroku czasowego analizy. Do ograniczeń metody można zaliczyć niemożność uzyskania jednocześnie wysokiej rozdzielczości w dziedzinach czasu i częstotliwości. Rozdzielczość w dziedzinie czasu można poprawić stosując *overlapping* polegający na częściowym zachodzeniu na siebie analizowanych segmentów sygnału. Błąd estymacji amplitudy i częstotliwości dla lokalnych maksimumów mapy można zminimalizować stosując korekcję amplitudowo-częstotliwościową AFC [2,3].



Rys. 2. Postacie okien mapy czasowo widmowej a) Krótkoczasowej Transformaty Fouriera (STFT), b) Transformaty Wavelet (WT), Dystrybucji Wigner Ville (WVD)

W transformacji Wavelet funkcjami bazowymi (*mother function*) mogą być dowolne funkcje. Z uwagi na uproszczenie procesu obliczeniowego w wielu przypadkach stosowana jest jako funkcja bazowa - funkcja Morlet'a. Jej zastosowanie pozwala na wykorzystanie w procesie przetwarzania procedury FFT, efektywnie przyspieszającej proces obliczeniowy. Postać wyniku jest w dużym stopniu zależna od przyjętych funkcji bazowych. Definicję transformaty Wavelet przedstawia wzór (2).

$$WT_{\Psi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

gdzie: $\Psi(t - \tau)$ - funkcja bazowa; wavelet - „falka”,
 b - parametr wskazujący pozycję w dziedzinie czasu (*translation*),
 a - skala - parametr związany lokalizacją w dziedzinie częstotliwości (*dilation, scale*),
 $\Psi^*(\cdot)$ - funkcja sprzężona funkcji $\Psi(\cdot)$.

Ten typ analizy można przyrównać do filtracji o stałej względnej szerokości pasma $\Delta f/f_s$. Pozycja filtra na mapie czasowo-częstotliwościowej jest określona przez parametry skali i przesunięcia (a - *dilation*, b - *translation*). Wraz z przesuwaniami się na stronę wyższych częstotliwości, wzrasta szerokość pasma analizy (następuje zmniejszenie rozdzielczości analizy w dziedzinie częstotliwości), rośnie natomiast rozdzielczość w dziedzinie czasu i na odwrót. Cecha ta może być przydatna w przypadku jednoczesnej analizy i obserwacji z różnym krokiem czasowym szybkozmiennych procesów wysokoczęstotliwościowych (np. praca zaworów, proces spalania) i wolnozmiennych procesów niskoczęstotliwościowych. Do wad metody można zaliczyć zależność postaci wyniku od przyjętej funkcji bazowej oraz nie zawsze intuicyjną interpretację graficznej postaci wyniku.

Dystrybucja Wigner Ville jest realizowana poprzez dwuwymiarowe okno czasowo-częstotliwościowe. Ten rodzaj analizy teoretycznie pozwala na przyjmowanie dowolnego rozmiaru okna analizy. Dowolność w definiowaniu rozmiaru okna analizy może prowadzić do uzyskiwania ujemnych wartości dystrybucji, powstawania interferencji w dziedzinie czasu i częstotliwości, co w efekcie końcowym prowadzi do trudności interpretacji wyników. WVD charakteryzuje się w porównaniu z poprzednimi metodami stosunkowo długim czasem obliczeń, zwłaszcza dla długich szeregów czasowych. Dystrybucja WVD jest częściej definiowana jako dystrybucja Wigner Ville w postaci (3):

$$WVD_w(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x \left(t + \frac{\tau}{2} \right) x^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) l_w(t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

gdzie: $l_w(t)$ - jest symetryczną funkcją wagową. Optymalną funkcją wagową jest funkcja *Gausa* definiowana jako:

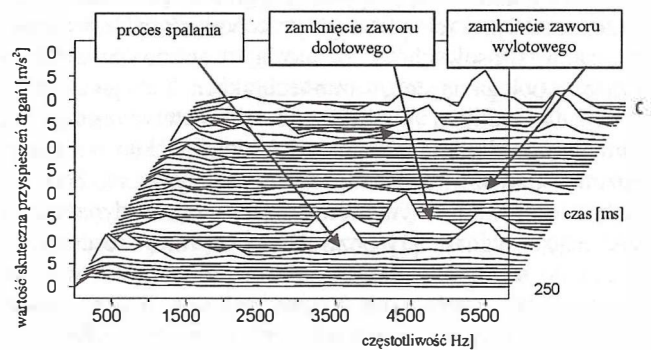
$$l_w(t) = c^2 e^{-\frac{1}{2} \rho^2 t^2}$$

gdzie: c i ρ - są dodatnimi rzeczywistymi stałymi.

3. Przykład realizacji technicznej selekcji sygnałów drganiowych

Prezentowany przykład ilustruje funkcjonowanie procedur selekcji sygnałów pozwalającej na ekstrakcję z sygnału drganiowego zarejestrowanego na silniku spalinowym i niezależne analizowanie składowych sygnału związanych z pracą zaworów oraz procesem spalania. Dane pozyskano z silnika spalinowego o ZS typu SB 3.1. W trakcie badań stosowano stałą prędkość obrotową silnika 700 obr/min (bieg jałowy). Silnik pracował bez obciążenia, hamowany oporami własnymi hamulca. Do rejestracji przebiegów czasowych przyspieszeń drgań oraz sygnału tachometrycznego z pola zjawiskowego użyto zestawu pomiarowego składającego się z piezoelektrycznych przetworników przyspieszeń drgań, przedwzmacniacza ładunkowego, znacznika kąta obrotu wału korbowego oraz rejestratora DAT. Przetworniki drgań zamocowano na głowicy silnika poprzez kostkę sześcienną umożliwiającą trójosiowy pomiar drgań [8]. Cyfrowe przetwarzanie sygnałów realizowano w wirtualnym środowisku pomiarowo-analizującym DASYLab.

Na rysunku 3 przedstawiono mapę czasowo-widmową uzyskaną w wyniku selekcji czasowo-widmowej na drodze zsynchronizowanego uśredniania 30 realizacji krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT).

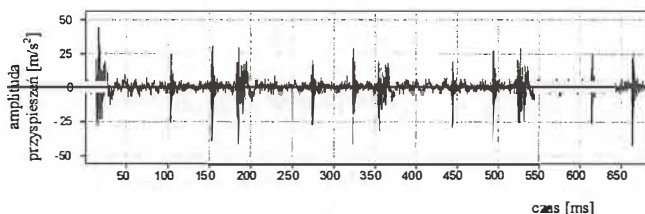


Rys. 3. Selekcja czasowo-widmowa uzyskana na drodze zsynchronizowanego uśredniania 30 realizacji krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT)

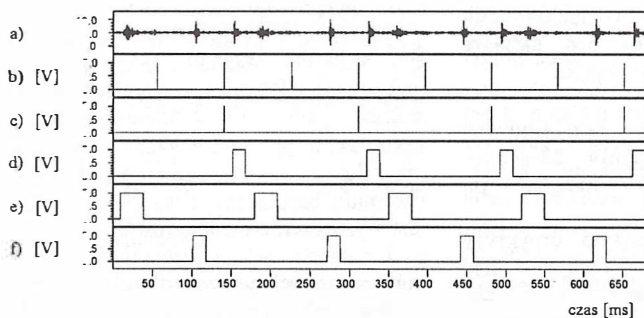
Parametryzacja mapy umożliwia dokonywanie zmian parametrów selekcji czasowej i widmowej w zależności od parametrów operacyjnych i funkcjonalnych silnika. W przypadku selekcji czasowej adaptacyjnie realizowane jest pozycjonowanie okien czasowych względem sygnału początku cyklu pracy silnika τ oraz określenie rozmiaru okna czasowego Δt dla każdego z rozpatrywanych zdarzeń (zamknięcia zaworów i procesu spalania).

W analizowanym przypadku, dla zadanej prędkości obrotowej $n = 700$ obr/min i pracy silnika bez obciążenia, pozycja i rozmiary okien wynosiły: dla procesu spalania $\tau_{s,sp} = 38.9$ ms, $\Delta t_{s,sp} = 29.2$ ms, zamknięcie zaworu dolotowego $\tau_{s,zd} = 10.8$ ms; $\Delta t_{s,zd} = 16.7$ ms, zamknięcie zaworu wylotowego $\tau_{s,zw} = 130.2$ ms; $\Delta t_{s,zw} = 16.7$ ms. Dla modułu selekcji widmowej zakresy częstotliwości filtracji pasmowej wynoszą: dla procesu spalania 250÷2000 Hz oraz 3000÷5500 Hz, zamykanie zaworu dolotowego 500÷2000 Hz oraz 2700÷5500 Hz, zamykanie zaworu wylotowego 1700÷6000 Hz.

Rysunek 4 ilustruje przebieg czasowy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na głowicy silnika. Na rysunku 5 przedstawiono sygnał przyspieszeń drgań po usunięciu składowych niskoczęstotliwościowych, sygnał tachometryczny związany z obrotem wału korbowego, sygnał detekcji początku cyklu pracy silnika oraz postacie okien czasowych (sygnał TTL) sterujących procesem ekstrakcji zdarzeń, związanych z procesem spalania i zamykania zaworów. Na rysunku 6 przedstawiono efekt przeprowadzonej selekcji czasowej i widmowej. Sygnały te poddawane są w kolejnych krokach parametryzacji i skalowaniu. Tak przetworzony sygnał może stanowić podstawę oceny stanu technicznego/pracy zachodzących w silniku procesów.



Rys. 4. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na głowicy silnika spaliniowego SB 3.1



Rys. 5. Postać okien czasowych sterujących procesem ekstrakcji z sygnału przyspieszeń drgań (a), zdarzeń związanych z zamykaniem zaworu dolotowego (d), procesem spalania (e), zamykaniem zaworu wylotowego (f). Selekcja jest synchronizowana sygnałem znacznika cyklu pracy silnika (c), uzyskanego w wyniku decymacji sygnału tachometrycznego obrotu wału korbowego (b)

4. Podsumowanie

Selekcja sygnałów drganiowych jest niezbędna, a wręcz wymagana w przypadku silników wielocylindrowych. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania metod analiz czasowo-widmowych w procesie adaptacyjnej zmiany parametrów selekcji czasowej i widmowej. Dalsze prace w tej tematyce będą zmierzały do zastosowania transformaty Wavelet dającej możliwość jednoczesnego analizowania procesów szybko i wolnozmiennych zachodzących w silniku spaliniowym.

Odrębnym zagadnieniem będzie parametryzacja map czasowo-widmowych oraz proces retransformowania przetworzonych map w dziedzinę czasu. Technika ta powinna pozwolić na bezpośrednie zastosowanie analiz czasowo-widmowych jako techniki selekcji sygnałów czasowo-zmiennych.

Literatura

- [1] Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H., *Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych*. Wydawnictwo Collegium Columbinum, Kraków, 1999.
- [2] Barczewski R., *Analiza nieliniowości z zastosowaniem STSF-AFC jako metoda diagnozowania*. II International Congress of Technical Diagnostics Warsaw, Poland 19-22 September 2000. Abstract pp 29-30 (pełen tekst jęz. pol. w postaci elektronicznej - CD).
- [3] Barczewski R., *AFC - the method of amplitude spectrum correction*. Congress of Technical Diagnostics, Gdańsk 1996.
- [4] Barczewski R., *Application of the Short Time Fourier Transform (STFT) with Amplitude and Frequency Correction (AFC) to non-linear system free vibration signal analysis*. Report: CRI Hannover -DAAD, November 1997.
- [5] Barczewski R., *Poliharmoniczna filtracja rekurencyjna - diagnostycznie zorientowana metoda analizy sygnału*. Diagnostyka '92, Materiały X Szkoły Diagnostyki Poznań - Zajęczkowo 1992.
- [6] Barczewski R., Tabaszewski M., *Analiza przestrzenno-widmowa w diagnostyce złożonych obiektów mechanicznych*. XXVI Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn” Węgierska Górka 15-20.03.1999 Zeszyt 1/99.
- [7] Cempel Cz., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne Warszawa 1982.
- [8] Czechyra B., Szymański G., Tomaszewski F., *Ocena luzu zaworów silnika spaliniowego w oparciu o parametry drgań - założenia metodyczne*. Silniki Spaliniowe nr 1/2004 (118).
- [9] Newland D.E. *Practical Signal Analysis: Do Wavelets make any difference?*. Proceedings of DTC '97 1997 ASME Design Engineering Technical Conference, September 14-17, 1997 Sacramento, California.
- [10] Riches P., *Computerised vibroacoustic analysis of Diesel engines and other reciprocating machines*. VII Szkoła Diagnostyki Rydzyna 1989 (maszynopis).
- [11] Shie Qian, Dapang Chen, *Joint Time-Frequency analysis*. Methods and Applications, Prentice Hall PTR Inc. 1996.
- [12] Szymański G., *Ocena stanu regulacji zaworów silnika spaliniowego za pomocą sygnału drganiowego*. Praca magisterska. Politechnika Poznańska Poznań 2000.
- [13] Tomaszewski F., *Zastosowanie procesów wibroakustycznych do oceny stanu technicznego silnika spaliniowego lokomotywy*. Praca doktorska. Politechnika Poznańska Poznań 1987.