

ZASTOSOWANIE METOD FALKOWYCH W SYSTEMACH MONITORINGU WIBROAKUSTYCZNEGO ŁOŻYSKOWANIA URZĄDZENIA WYCIĄGOWEGO

Wojciech BATKO, Andrzej MIKULSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30, tel. (12) 617-36-24, e-mail: batko@uci.agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy zaproponowano zastosowanie analizy falkowej do rozwiązania niektórych problemów z przetwarzaniem niestacjonarnych sygnałów pomiarowych występujących w diagnozowaniu węzłów łożyskowych maszyny pracującej w krótkotrwałym ruchu obrotowym. Rozważania teoretyczne zostały zweryfikowane na obiekcie rzeczywistym – górnicy wyciągu szybowym. Opracowana metodyka jest nowością w diagnozowaniu tych urządzeń i zezwala na badanie łożysk w czasie ruchu, a nie jak dotychczas podczas postoju maszyny wyciągowej.

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna, przetwarzanie sygnałów, algorytmy oceny stanu.

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS IN MONITORING SYSTEMS OF BEARINGS OF HOISTING MACHINE

Summary

The authors proposed application of wavelet transform to solve some problems with processing of signals from diagnostic test of bearings. In the paper they consider bearings of a hoisting machine where measuring signals are nonstationary. The theoretical works were verified to hoisting machines and a new method might be used to tests while it running instead of tests while the machine is standstill.

Keywords: vibroacoustical diagnostics, signal processing, algorithms of state evaluation.

1. WSTĘP

Przetwarzanie sygnałów pomiarowych z wykorzystaniem transformaty falkowej w ostatnim czasie znalazło wiele zastosowań w badaniach wibroakustycznych. Falki stosowane są diagnostyce maszyn i urządzeń np. silników spalinowych np.: [1], [2], przekładni zębatych np. [3] czy też podzespołów np. łożysk [4].

Jedną z zalet tego narzędzia jest możliwość przetwarzania sygnałów pomiarowych drgań maszyn wirujących w krótkotrwałych cyklach pracy [5], [6] dla których zmienna prędkość obrotowa w czasie rozpędzania, jazdy ustalonej i hamowania, zmienne warunki obciążenia, zależne od obciążenia powodują, że sygnały pomiarowe mają charakter niestacjonarny.

Brak opracowanych dotychczas procedur przetwarzania tej klasy sygnałów - z jednej strony oraz możliwości filtracyjne i aproksymujące falek - z drugiej, zainspirował autorów do opracowania ujednoliconej metodyki diagnozowania takich maszyn. Poniżej, na przykładzie badań łożyskowania koła linowego górnicy wyciągowej, przedstawiono część otrzymanych rezultatów.

2. ANALIZA KINEMATYKI RUCHU URZĄDZENIA WYCIĄGOWEGO

Niestacjonarność sygnału drgań łożyska urządzenia wyciągowego mają bezpośredni związek z kinematyką ruchu opisaną układem równań:

$$\omega(t) = \begin{cases} \alpha & \text{dla } 0 < t \leq t_1 \\ \omega = \varepsilon t & \text{dla } t_1 < t \leq t_2 \\ \alpha_2 - \alpha & \text{dla } t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (1)$$

W rozważanym przypadku prędkość kątowa jest zmienna, a równanie opisujące drgania harmoniczne ma postać:

$$y = A \sin \left[\int_{t_1}^{t_2} \omega(\tau) + \varphi_0(t) \right] \quad (2)$$

gdzie: A - amplituda drgań, $\omega(t)$ - częstość drgań, $\varphi_0(t)$ - faza drgań; $\varphi_0(t)=0$

Dla warunków rozruchu i hamowania argument funkcji sinus występującej w równaniu (2) można wyznaczyć wg wzorów:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \int_{t_1}^{t_1} \omega(\tau) d\tau & \text{for } 0 < t \leq t_1 \\ 0 & \\ \int_{t_3}^{t_2} \omega(\tau) d\tau & \text{for } t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (3)$$

Dla liniowego narastania prędkości kątowej równanie ruchu ma postać:

$$y(t) = \begin{cases} A \sin(0.5 \varepsilon^2 t) & \text{dla } 0 < t \leq t_1 \\ A \sin(\omega t) & \text{dla } t_1 < t \leq t_2 \\ A [\sin(\omega t_2) - \sin(0.5 \varepsilon^2 t)] & \text{dla } t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (4)$$

a przyspieszenie można wyznaczyć z zależności:

$$a(t) = \begin{cases} A \varepsilon [\cos(0.5 \varepsilon^2 t - \varepsilon^2 \sin(0.5 \varepsilon^2 t))] & \text{dla } 0 < t \leq t_1 \\ -A \omega^2 \sin(\omega t) & \text{dla } t_1 < t \leq t_2 \\ -A \varepsilon [\cos(0.5 \varepsilon^2 t + \varepsilon^2 \sin(0.5 \varepsilon^2 t))] & \text{dla } t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (5)$$

gdzie: A – jak wyżej, ε – przyspieszenie kątowe

3. IDENTYFIKACJA USZKODZENIA ELEMENTU ŁOŻYSKA KOŁA LINOWEGO

Do typowych uszkodzeń eksploatacyjnych łożysk tocznych należą uszkodzenia bieżni zewnętrznej, bieżni wewnętrznej, elementów tocznych i kosza. Każde z nich ma swój obraz w widmie częstotliwościowym sygnału pomiarowego. Uszkodzenia punktowe bieżni zewnętrznej generują sygnał o częstotliwości (Ball-Pasing Frequency Outer-race *BPF*O):

$$BPF\text{O}[\text{Hz}] = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right) \quad (6)$$

uszkodzenia bieżni wewnętrznej (Ball-Pasing Frequency Inner-race *BPF*I):

$$BPF\text{I}[\text{Hz}] = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \quad (7)$$

a uszkodzenia elementu tocznego (Ball Spin Frequency *BSF*):

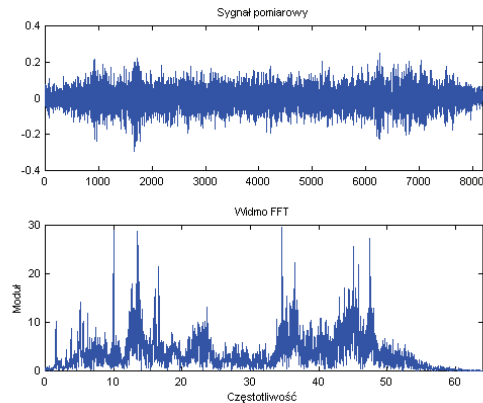
$$BSF[\text{Hz}] = \frac{d}{D} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (8)$$

gdzie: n – liczba elementów tocznych, f_r – częstotliwość względna pomiędzy bieżnią wewnętrzną a zewnętrzną, d – średnica elementu tocznego, D – średnica łożyska,

Wzory (6)-(8) są proste do zastosowania w przypadku stacjonarnego ruchu obrotowego maszyny, gdy częstotliwość względna f_r pomiędzy bieżniami wewnętrzną a zewnętrzną jest stała, a do obliczania częstotliwości można stosować klasyczny aparat matematyczny przekształcenia Fouriera np. dla łożysk wentylatora, pompy, silnika elektrycznego itp. Metodyka ta jednak zawodzi, gdy założenie stałej prędkości obrotowej w czasie pracy nie jest spełnione tak jak w przypadku urządzeń wyciągowych. Pełny cykl wydobywczy trwa w zależności od głębokości szybu i prędkości jazdy od kilkudziesięciu sekund do co najwyżej dwóch, trzech minut i składa się kolejno z rozpędzania

naczynia wydobywczego, jazdy z ustaloną prędkością oraz hamowania. Krótkie cykle pracy i małe prędkości obrotowe, rzędu kilkudziesięciu obrotów w ciągu minuty są dodatkowymi problemami, gdyż dla tych warunków istnieją naturalne ograniczenia w obliczaniu widm FFT, techniki powszechnej w większości współczesnej aparatury cyfrowej. Ponadto często dodatkowym utrudnieniem są zakłócenia towarzyszące pomiarom, pochodzące od pracy urządzenia wyciągowego.

Rysunek 1 przedstawia przykład sygnału pomiarowego zarejestrowany na obiekcie rzeczywistym oraz jego widmo. W sygnale zawarty jest sygnał uszkodzenia bieżni zewnętrznej, lecz jego obraz w klasycznej transformacji Fouriera jest kompletnie nieczytelny.



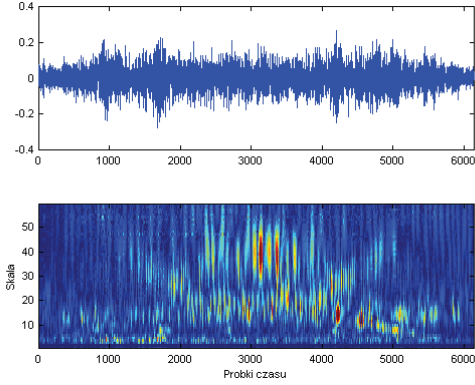
Rys. 1. Sygnał drgań bezwzględnych łożyska jednonolinowego koła zabudowanego na wieży szybowej oraz jego widmo obliczone za pomocą FFT

W celu obserwacji zmian częstotliwości rezonansowej uszkodzenia w czasie jazdy urządzenia wyciągowego, sygnał czasowy transformowano na płaszczyznę dwuwymiarową wyznaczoną przez współrzędne czas-częstotliwość. W rozważanym przypadku zastosowano ciągłą transformatę falkową CWT (*Continuous Wavelet Transform*) z wykorzystaniem falki Morleta [7] opisaną wzorem:

$$\psi(t) = C e^{-x^2/2} \cos(5x) \quad (9)$$

Wyniki przetwarzania przedstawione są na rysunku 1, na którym składnik energii sygnału pochodzący od uszkodzenia bieżni łożyska widoczny jest w postaci współczynników falkowych o podwyższonych wartościach rozłożonych na płaszczyźnie czas-skala w kształcie litery „U”. Prezentowana metoda zezwala na obserwację zmian poszukiwanego symptomu zarówno przy okresach zmiennej prędkości obrotowej dla rozruchu i hamowania, jak również dla okresu stałej prędkości. W obrazie współczynników widoczne są również obszary podwyższonych współczynników falkowych nieskorelowanych ze zmienną prędkością obrotową, które z punktu widzenia diagnostyki

łożyska są zakłóceniami pochodzącymi prawdopodobnie od drgań konstrukcji wieży szybowej, losowego pobudzenia do drgań związanego z prowadzeniem naczynie w szybie, parcia wiatru na konstrukcję wieży, współpracy koła i liny stalowej i innych. Znajomość rozkładu poszukiwanych częstotliwości na płaszczyźnie czas-skala zezwala na odfiltrowanie sygnału.



Rys. 2. Sygnał drgań z rysunku 1 oraz rozkład współczynników falkowych na płaszczyźnie czas-skala

4. APROKSYMACJA SYGNAŁU DRGAŃ ŁOŻYSK

Sygnał drganiowy rejestrowany podczas badania urządzeń wyciągowych charakteryzuje się dużą zmiennością amplitudy sygnału oraz często obecnością silnych zakłóceń. Zmiana dynamiki wynika z równań (1)-(5), a o przyczynach zakłóceń wspomniano wcześniej. Dla potrzeb opracowania systemów monitorowania stanu istniała potrzeba pozyskania jednorodnej bazy odniesień pomiarowych dla okresowych kontroli stanu łożyskowania. Baza taka powinna zapewnić dobrą korelację pomiędzy stanem technicznym urządzenia a sygnałem pomiarowym i powtarzalność przebiegu niezależnie od występujących zakłóceń.

Jednym z podstawowych problemów do rozwiązania w tym przypadku jest filtracja zakłóceń i aproksymacja sygnału pomiarowego.

Sygnał pomiarowy $s[n]$, gdzie n jest zmienną dyskretną można rozpatrywać jako sumę sygnału diagnostycznego $f[n]$ oraz zakłóceń $W[n]$.

$$s[n] = f[n] + W[n] \quad (10)$$

Sygnał (10) możemy zdekomponować w przestrzeni sygnałów względem bazy ortogonalnej $\{g_m\}_{0 \leq m < N}$ na:

$$\langle s, g_m \rangle = \langle f, g_m \rangle + \langle z, g_m \rangle \quad (11)$$

Celem rozważań jest wyznaczenie estymatora \tilde{Y} sygnału f takiego, aby błąd aproksymacji był jak najmniejszy.

W przypadku deterministycznego podejścia do modelowania sygnałów wygodnie jest zastosować nieliniową estymację w bazach sygnałów [8]. W tym przypadku zamiast rozważać całą klasę sygnałów jako pojedynczą realizację procesu Y , badane są niezależnie od siebie każda realizacja f bez wykorzystywania własności probabilistycznych obliczonych poprzez uśrednianie kilku realizacji. Nieliniowe estymatory są niezależne od sygnału i ich zachowanie jest różne w każdej realizacji. Z punktu widzenia obliczeń ten przypadek jest trudniejszy do rozważań niż podejście z wykorzystaniem klasycznej filtracji Wienera sygnałów losowych za pomocą optymalnych estymatorów liniowych, lecz wykorzystanie transformaty falkowej trudności te skutecznie omija.

Dla estymacji nieliniowej estymator sygnału diagnostycznego ma postać:

$$\tilde{Y} = \sum_{m=0}^{N-1} \langle s, g_m \rangle \theta[m] g_m \quad (11)$$

gdzie $\theta[m]$ jest pewną funkcją zależną od każdej realizacji f procesu Y i przybiera wartości ze zbioru dwuelementowego $\theta[m] \in \{0,1\}$.

Średni błąd kwadratowy jest dany wyrażeniem:

$$\varepsilon = \mathbf{E} \left\{ \|f - \tilde{Y}\|^2 \right\} = \sum_{m=0}^{N-1} \mathbf{E} \left\{ \left(\langle f, g_m \rangle - \langle s, g_m \rangle \theta[m] \right)^2 \right\} \quad (12)$$

Ponieważ $s=f+W$ oraz z powodu faktu, że wartość oczekiwana szumu jest równa wariancji:

$$\mathbf{E} \left\{ \langle W, g_m \rangle^2 \right\} = \sigma^2 \quad \text{równanie (12) możemy zapisać:}$$

$$\mathbf{E} \left\{ \left(\langle f, g_m \rangle - \langle s, g_m \rangle \theta[m] \right)^2 \right\} = \left| \langle f, g_m \rangle \right|^2 (1 - \theta[m])^2 + \sigma^2 \theta[m]^2 \quad (13)$$

Aby obliczyć najmniejszą wartość błędu przyrównujemy pochodną (13) do zera:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \theta} = \frac{\partial \left(\left| \langle f, g_m \rangle \right|^2 (1 - 2\theta[m] + \theta[m]^2) + \sigma^2 \theta[m]^2 \right)}{\partial \theta} \quad (14)$$

i po uproszczeniach możemy napisać:

$$\theta[m] = \frac{|\langle f, g_m \rangle|^2}{|\langle f, g_m \rangle|^2 + \sigma^2} \quad (15)$$

Jeżeli uwzględnimy wartości $\theta[m]$, to prawdziwa jest relacja:

$$\theta[m] = \begin{cases} 1 & \text{dla } |\langle f, g_m \rangle|^2 \geq \sigma^2 \\ 0 & \text{dla } |\langle f, g_m \rangle|^2 < \sigma^2 \end{cases} \quad (16)$$

Zatem jeżeli wartość zdekomponowanego sygnału w bazie ortogonalnej będzie większa niż wariancja szumu, to funkcja $\theta[m]$ przyjmie wartość równą jeden, co spowoduje, że estymator \tilde{Y} będzie obliczany ze wzoru (11). W przeciwnym przypadku \tilde{Y} przyjmie wartość równą zero. Rozwiązaniem problemu estymacji sygnału diagnostycznego jest wyznaczenie błędu będącego minimum funkcji:

$$\varepsilon = \mathbf{E} \left\{ \|f - \tilde{Y}\|^2 \right\} = \sum_{m=0}^{N-1} \min \left(|\langle f, g_m \rangle|^2, \sigma^2 \right) \quad (17)$$

Idea obliczania błędu estymacji wg powyższych wzorów jest intuicyjnie prosta w interpretacji jednak w praktyce trudna do zastosowania, ponieważ jak wspomnieliśmy powyżej każda realizacja procesu jest niezależna i nie znamy wartości f . Wyjście z sytuacji zaproponowali Donoho i Johnstone [9] wprowadzając estymację za pomocą estymatorów progowych, które tłumią każdy z obciążonych szumem współczynników $\langle Z, g_m \rangle$ za pomocą pewnej funkcji nieliniowej tzn. $\theta = \theta(\langle Z, g_m \rangle)$ takiej, że (11) ma postać:

$$\tilde{Y} = \sum_{m=0}^{N-1} \theta(\langle Z, g_m \rangle) g_m \quad (18)$$

Idea estymacji za pomocą współczynników progowych jest podobna do rozważań powyższych i w przypadku zastosowania dekompozycji w bazach falkowych sprowadza się do porównania wartości współczynników falkowych względem progu estymacji. Jeżeli więc wartość współczynnika falkowego jest większa od wartości progu, to ta część informacji o sygnale zostanie zachowana. W przeciwnym przypadku współczynnik falkowy przyjmuje wartość zero i ta informacja w sygnale traktowana jest jako zakłócenie. Ze względu na sposób estymacji funkcja nieliniowa θ może być definiowana jako „estymacja twarda”:

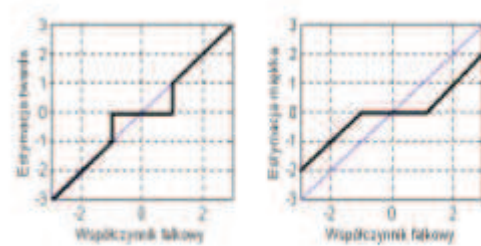
$$\theta_h(x) = \begin{cases} x & \text{dla } |x| > T \\ 0 & \text{dla } |x| \leq T \end{cases} \quad (19)$$

lub „estymacja miękka”

$$\theta_s(x) = \begin{cases} x - T & \text{dla } x \geq T \\ x + T & \text{dla } x \leq -T \\ 0 & \text{dla } |x| \leq T \end{cases} \quad (20)$$

gdzie: T - współczynnik estymacji progowej.

Wykreślne funkcje (19) i (20) przedstawione są na rysunku 3.



Rys. 3. Estymacja wartości współczynników falkowych za pomocą estymatorów progowych

Można powiedzieć, że estymacja progowa twarda jest przeprowadzana wg zasady „przepuszczania lub odcięcia” estymowanych wartości funkcji (lewa część rysunku 3), podczas gdy estymacja miękka jest zasadą „zbliżania się” do estymowanych wartości lub ich „odcięcia” (prawa część rysunku 3). Donoho i Johnstone [9] udowodnili, że dla θ_h błąd średniokwadratowy estymacji z wykorzystaniem współczynników progowych zależy od długości wektora sygnału i jest nie większy względem błędu (17) niż $2 \ln N + 1$ razy, jeżeli próg T jest równy $T = \sigma \sqrt{2 \ln N}$. Estymator progowy miękki wyznaczony dla tego samego T dostarcza często większy błąd średniokwadratowy, niż estymator twardy. Zdarza się jednak, że w przypadku estymacji sygnałów zawierających składniki nieustalone i przejściowe estymacja miękka dostarcza mniejszego błędu. Wybór sposobu estymacji zależy zatem od rodzaju przetwarzanych sygnałów.

Estymacja progowa w bazach falkowych dokonywana jest w trzech krokach:

1. Dekompozycja względem dyskretnej ortogonalnej bazy falkowej w przedziale [0 N-1]:

$$\left\{ \psi_{j,m} \right\}_{0 < j < J, 0 \leq m < N 2^{-j}}, \left\{ \varphi_{j,m} \right\}_{0 \leq m < N 2^j} \quad (21)$$

Operacja ta oznacza rzutowanie sygnału pomiarowego na kolejne pary podprzestrzeni V_j i W_j dla $j=1,2,\dots, J$. W wyniku sygnał jest reprezentowany przez $N 2^j$ detali $\langle \psi_{j,m}, s \rangle$ dla każdego $j=1,2,\dots, J$ oraz $N 2^j$ współczynników aproksymacji $\langle \varphi_{j,m}, s \rangle$ na poziomi J .

2. Estymacja progowa detali przekształcenia falkowego

Dla każdego ze współczynników falkowych wyznaczana jest wartość funkcji $\theta(x)$, co prowadzi do estymatora następującej postaci:

$$\tilde{Y} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=0}^{N2^{j-1}-1} \theta(\langle \psi_{j,m}, s \rangle) \psi_{j,m} + \sum_{m=0}^{N2^{J-1}-1} \theta(\langle \varphi_{J,m}, s \rangle) \varphi_{J,m} \quad (22)$$

Estymator \tilde{Y} zastępujący współczynniki falkowe zaszumionego sygnału diagnostycznego pełni rolę podobną do wygładzania adaptacyjnego. W wyniku tej operacji wartość zero przyjmują wszystkie współczynniki falkowe o wartościach bezwzględnych mniejszych od progu estymacji. Gdy współczynnik falkowy (iloczyn skalarny sygnału i falki) jest większy od progu estymacji, to z dużym prawdopodobieństwem przenosi istotne informacje diagnostyczne w sygnale. Duże wartości współczynników falkowych występują przy małych skalach w otoczeniu ostrych zmian sygnału. Natomiast tam, gdzie współczynniki falkowe mają małe wartości, oznacza to, że sygnał jest gładki.

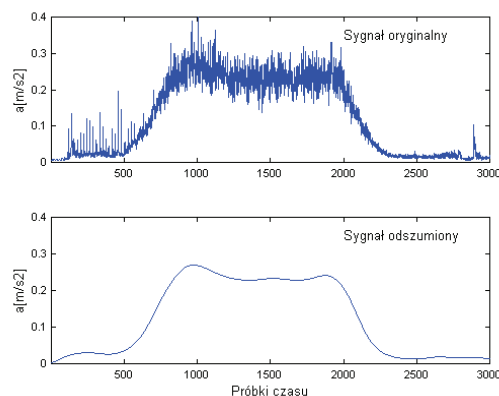
3. Rekonstrukcja – powrót do jednowymiarowego sygnału w dziedzinie czasu następuje za pomocą odwrotnego przekształcenia falkowego.

Przedstawione powyżej metoda filtracji zakłóceń z badań łożysk kół linowych urządzeń wyciągowych jest przedmiotem publikacji [5],[6],[10],[11],[12].

Przykład

Przedmiotem badań diagnostycznych były łożyska zabudowane w jednolinowym kole kierującym maszyny wyciągowej usytuowanej na zrubie. Zestaw pomiarowy składał się z przenośnego analizatora dźwięku i drgań typu SVAN 912 firmy SVANTEK i akcelerometru 393A03 firmy PCB. W rozpatrywanym przypadku zastosowano funkcję analizującą db10 z rodziny funkcji falek Daubechies

[13]. Do analiz wykorzystywano oprogramowanie Wavelet Toolbox firmy MathWorks [14] pracujące w środowisku MATLAB. Dekompozycję sygnału oryginalnego na składowe przedstawiono na rysunku 4. Dla estymacji sygnału przyspieszenia zastosowano algorytm bazujący na twierdzeniu Donoho i Johnsona [8] o wyznaczaniu estymatorów progowych z wykorzystaniem estymacji miękkiej. Rysunek 5.7 przedstawia otrzymane wyniki, które mogą następnie służyć do wyznaczania statystyk stanowiących bazę odniesienia dla kolejnych pomiarów w czasie eksploatacji badanego łożyska.



Rys. 4. Wyniki procedury odszumiania z wykorzystaniem estymatorów progowych

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zastosowanie metod analizy falkowej do badania niestacjonarnych sygnałów diagnostycznych uzyskanych w czasie pomiarów łożysk tocznych kół linowych urządzeń wyciągowych. Zastosowanie tego narzędzia zezwala na przetwarzanie niestacjonarnych sygnałów pomiarowych, które są znamienne w diagnostyce łożyskowania maszyn pracujących w krótkotrwałych cyklach roboczych. Transformata sygnału na płaszczyznę czas-częstotliwość zezwala na obserwację ewolucji zmian częstotliwości drgań w tym częstotliwości rezonansowej uszkodzenia, co z kolei zezwala na rozpoznanie symptomów uszkodzenia w sygnale. Z kolei własności aproksymujące transformaty falkowej zezwalają na efektywną filtrację zakłóceń i zastosowanie aproksymacji w algorytmach identyfikacji sygnałów tej klasy obiektów.

LITERATURA

- [1] Ghanem R., Romeo F. *Wavelets in Vibration Monitoring*, Proceedings VII International Congress on Sound and Vibration, Garmish-Partenkirchen, 4-7.07.2000r.
- [2] Goedeckemeyer M., Hess H., Daadbin A.: *An Effective and Portable Electronic Ear for Fault Diagnosis Using Machine Operating Sound Directly*, Proceedings VII International

- Congress on Sound and Vibration, Garmish-Partenkirchen, 4-7.07.2000r.
- [3] Wilk, A., Madej, H., Łazarz, B.,: *Diagnostyka eksploatacyjna przekładni zorientowana na wykrywanie lokalnych uszkodzeń kół zębatych*, Materiały II Międzynarodowego Kongresu Diagnostyki Technicznej *Diagnostyka 2000*, Warszawa 19-22 Września 2000r.
- [4] Wysogład, B.,: *Przykłady zastosowania transformaty falkowej do analizy sygnałów drgań łożysk tocznych*, Materiały II Międzynarodowego Kongresu Diagnostyki Technicznej *Diagnostyka 2000*, Warszawa 19-22 Września 2000r.
- [5] Batko W., Mikulski A.: *Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce łożysk tocznych kół linowych górniczych urządzeń wyciągowych*. IV Krajowa konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów” DIAG'98, Szczecin-Międzyzdroje-Ystad, 1998
- [6] Batko W., Mikulski A.,: *Zastosowanie procedury odsumowania sygnału przy filtracji zakłóceń w diagnostyce łożysk tocznych kół linowych*. III Seminarium „Wibroakustyka w Systemach Technicznych”, IPBM Pol. Warszawska, Warszawa, 1998.
- [7] Daubechies, I.: *Ten lectures on wavelets*, SIAM, 1992
- [8] Mallat, S.,: *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, San Diego, 1998
- [9] Donoho, D., Johnstone, I.,: *Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage*, *Biometrika* 81: 425-455, December 1994.
- [10] Batko, W.,: *Aproksymacja sygnału przyspieszenia drgań z wykorzystaniem przekształcenia falkowego*, Mat. IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Diagnostyka Procesów Przemysłowych” Kazimierz Dolny, 13-16.09.1999r.
- [11] Mikulski, A.,: *Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce łożysk tocznych kół linowych*, Mat. Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Wyciągi Szybowe u Progu XXI Wieku”, Szczyrk, kwiecień 1999r.
- [12] Batko, W., Mikulski, A.,: *Application of a Wavelet Analysis to Diagnostic of Rope Pulley Rolling Bearings in Mine Winding Gears*, Proceedings International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering INTERNOISE 2001, Hague, 27-30.09.2001
- [13] Daubechies I., *The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis*. IEEE Trans. Inform. Theory, 36, 1990, 961-1005.
- [14] Misiti M., i inni, *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB*. The MathWorks Inc., 1996.

Prof. dr .hab. inż. **Wojciech BATKO** ur.1946, absolwent Wydziału Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej Akademii Górniczo-Hutniczej



w Krakowie. Specjalista z zakresu dynamiki i wibroakustyki maszyn i związanych z nimi zagadnień: diagnostyki technicznej, budowy systemów monitorujących stan maszyn i procesów wibroakustycznych, ich układów filtracyjnych i predykcyjnych oraz doboru rozwiązań minimalizujących ich oddziaływania. Autor, bądź współautor 162 publikacji w czasopismach krajowych, zagranicznych oraz w materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych, w tym 10 monografii i książek oraz około 200 niepublikowanych raportów z opracowań naukowo-badawczych, projektowych i ekspertyz dla przemysłu i gospodarki narodowej. Obecnie Kierownik Katedry Mechaniki i Wibroakustyki oraz dziekan Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej. Promotor 5 doktoratów i około 35 prac magisterskich z dziedziny diagnostyki technicznej i wibroakustyki. Członek wielu Towarzystw Naukowych, Komitetów Naukowych i Programowych szeregu konferencji krajowych i międzynarodowych oraz Rady Naukowej Faculty of Mechanical Engineering Technical University of Ostrava.

Dr inż. **Andrzej MIKULSKI** ur. 1964, absolwent Wydziału Maszyn Górniczych i Hutniczych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalista z zakresu eksploatacji urządzeń transportu linowego i diagnostyki wibroakustycznej. Autor, bądź współautor 15 publikacji w czasopismach krajowych, zagranicznych oraz w materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych. Obecnie Kierownik Laboratorium Diagnostyki Technicznej w Ośrodku Pomiarów i Automatyki S.C. w Katowicach - firmy zajmującej się badaniami urządzeń górniczych i badaniami szkodliwości czynników fizycznych w środowisku pracy.