

## DIAGNOZOWANIE ŁOŻYSK TOCZNYCH Z ZASTOSOWANIEM PACZKOWEJ TRANSFORMACJI FALKOWEJ

Bogdan WYSOGLĄD

Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn  
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18a,  
fax: (032) 2371360, email: bogdan.wysoglad@kpkmt.polsl.gliwice.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono przykłady zastosowań paczkowej transformacji falkowej do identyfikacji niesprawności łożysk tocznych. Paczkową transformację falkową wykorzystano do wielopasmowej filtracji sygnałów drgań rejestrowanych na obudowie łożyska. Doboru ortogonalnych baz falkowych, zastosowanych do analizy sygnałów, dokonano w oparciu o kryterium wykorzystujące ocenę intensywności impulsów wywołanych uszkodzeniem łożyska.

Słowa kluczowe: łożyska toczne, transformacja falkowa, diagnostyka, wibroakustyka.

### ROLLING ELEMENT BEARINGS DIAGNOSING WITH THE USE OF WAVELET PACKED TRANSFORM

### Summary

In this paper, the examples of an application of the wavelet packed transform for the evaluation of vibration signals of rolling element bearings for fault detection are described. The wavelet packed transform was applied to multiple band-pass filtering of the signal. The orthogonal base to a given signal, which contains information about shocks produced by bearing faults, has been matched.

Keywords: rolling element bearing, wavelet transform, diagnostics, vibration.

## 1. WPROWADZENIE

Powszechność stosowania łożysk tocznych w maszynach oraz fakt, że są one najczęściej elementami krytycznymi powoduje, że prace nad rozwojem wibroakustycznych metod diagnostyki technicznej łożysk tocznych są prowadzone w wielu ośrodkach badawczych.

W referacie przedstawiono przykłady zastosowania paczkowej transformacji falkowej do analizy sygnałów wibroakustycznych łożysk tocznych. Właściwości transformacji falkowej (WT) powodują, że jest ona szczególnie przydatna do analizy sygnałów silnie niestacjonarnych np. o charakterze impulsowym, czyli sygnałów o cechach którymi charakteryzują się sygnały drgań łożysk tocznych.

Opisywane w literaturze metody diagnozowania najczęściej wykorzystują WT do wielopasmowej filtracji lub demodulacji sygnału (estymacji obwiedni sygnału)[1]. Metody te posiadają poniżej opisane trzy etapy.

1. Wybór funkcji bazowej i szeregu wartości skali które decydują o rozdzielczości w dziedzinie czasu i częstotliwości uzyskanych wyników transformacji.
2. Kolejnym elementem opisywanych metod jest wybór pasm w dziedzinie częstotliwości do

dalszych badań. W przypadku ciągłej transformacji falkowej wybierane są wiersze macierzy współczynników będącej wynikiem transformacji falkowej. W przypadku dyskretnej transformacji falkowej wybierane są tak zwane detale lub aproksymacje będące wynikiem dekompozycji sygnału na składowe wysokoczęstotliwościowe i nisko-częstotliwościowe.

3. Analiza wybranego wiersza macierzy współczynników WT (lub detali i/lub aproksymacji) umożliwiająca ocenę stanu technicznego łożyska i identyfikację rodzaju uszkodzeń. Oceny te dokonywane są na podstawie analiz w dziedzinie czasu lub częstotliwości.

Poniżej przedstawiono przykłady zastosowań paczkowej transformacji falkowej do wielopasmowej filtracji sygnałów drgań rejestrowanych na obudowie łożyska.

## 2. PACZKOWA TRANSFORMATA FALKOWA

W rozdziale przedstawiono paczkową transformację falkową do której opisu wykorzystano kwadraturowe filtry lustrzane. Transformacja falkowa dekomponuje sygnał na składowe niskoczęstotliwościowe i wysokoczęstotliwościowe z zastosowaniem

pary filtrów splotowych. Oznaczając przez  $\{h_k\}_{k=0}^{L-1}$  filtr dolnoprzepustowy (reprezentujący funkcję skalującą) oraz przez  $\{g_k\}_{k=0}^{L-1}$  filtr górnoprzepustowy (reprezentujący falke) operacje filtracji (splotu) i decymacji (poprzez odrzucanie co drugiej próbki) za pomocą filtrów  $h_k$  i  $g_k$  można zapisać [2, 3]

$$(Hf)_k = \sum_{l=0}^{L-1} h_l f_{2k+l} \quad (1)$$

$$(Gf)_k = \sum_{l=0}^{L-1} g_l f_{2k+l} \quad (2)$$

gdzie:  $k = 0, 1, \dots, 2K-1$  oraz  $f = \{f_k\}_{k=0}^{K-1}$  jest wektorem o długości  $K$ .

Operacje odwrotne czyli rozplatania i interpolacji  $H^*$  i  $G^*$  można zapisać

$$(H^*f)_k = \sum_{0 \leq k-2l < L} h_{k-2l} f_l \quad (3)$$

$$(G^*f)_k = \sum_{0 \leq k-2l < L} g_{k-2l} f_l \quad (4)$$

dla  $k=0, 1, \dots, 2K-1$ .

Jeżeli spełnione są warunki, że

$$HG^* = GH^* = 0 \quad \text{oraz} \quad H^*H + G^*G = I \quad (5)$$

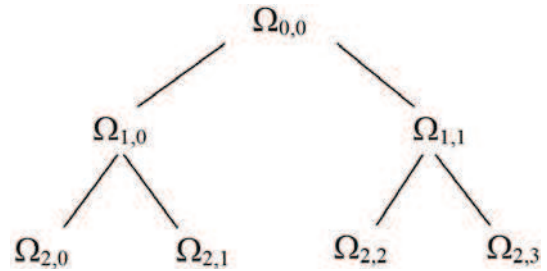
to operatory  $H$  i  $G$  nazywane są kwadraturowymi filtrami lustrzanymi.

Poniżej przedstawiono dekompozycję sygnału  $x = \{x_k\}_{k=0}^{n-1} \in \mathcal{R}^n$  ( $n = 2^{n_0}$ ) z zastosowaniem paczkowej transformacji falkowej (Wavelet Packet Transform). Na pierwszym poziomie dekompozycji sygnał  $x$  został rozdzielony na dwa podciągi współczynników falkowych  $Hx$  i  $Gx$  o długościach  $n/2$ . Na drugim poziomie dekompozycji wygenerowane są cztery podciągi  $HHx$ ,  $GHx$ ,  $HGx$ ,  $GGx$ , każdy o długości  $n/4$ , przedstawione na rys. 1 [2]. Proces dekompozycji można kontynuować do poziomu  $J$  ( $J < n_0$ ) otrzymując  $Jn$  współczynników falkowych.

Zastosowanie transformaty umożliwia wielopoziomową dekompozycję sygnału na wzajemnie ortogonalne podprzestrzenie tworzące drzewo binarne. Oznaczając przestrzeń  $\mathcal{R}^n$  jako  $\Omega_{0,0}$ , to  $\Omega_{1,0}$  i  $\Omega_{1,1}$  będą wzajemnie ortogonalnymi podprzestrzeniami powstałymi przez zastosowania odpowiednio operatorów  $H$  i  $G$  na  $\Omega_{0,0}$ . Dla przestrzeni  $\Omega_{j,k}$  zachodzi [2]:

$$\Omega_{j,k} = \Omega_{j+1,2k} \oplus \Omega_{j+1,2k+1} \quad (6)$$

dla  $j = 0, 1, \dots, J$ ;  $k = 0, \dots, 2^j - 1$ .



Rys. 1. Drzewo 2-poziomowej dekompozycji sygnału z zastosowaniem paczkowej transformacji falkowej [2]

### 3. ZAŁOŻENIA METODY DIAGNOZOWANIA ŁOŻYSK

W wyniku dekompozycji sygnału otrzymujemy redundantny zestaw podprzestrzeni, rozpinanych przez paczki falkowe. Dekomponując sygnał składający się z  $n = 2^{n_0}$  próbek sygnału do poziomu  $J = n_0$  można wygenerować pełne drzewo binarne, z którego można wybrać  $2^n$  niezależnych ortogonalnych baz falkowych.

Konstruowanie optymalnej bazy polega na porządkowaniu pełnego drzewa binarnego adaptując je do charakterystyk badanych sygnałów, według przyjętego kryterium optymalizacji. Optymalizacja bazy falkowej najczęściej stosowana jest do kompresji danych i usuwania szumu z sygnałów. Dla tych celów zestaw wektorów bazowych, tworzących ortogonalną bazę, dobierany jest na podstawie kryterium bazującego na entropii, opisującej informację zawartą w sygnale [4].

W przypadku analizy sygnałów drgań łożysk dla celów diagnostyki przyjęcie powyższego kryterium jest nieodpowiednie [5]. W opisanych poniżej badaniach wyboru zestawu wektorów bazowych dokonano według przyjętego kryterium zwiększania stosunku składowych pochodzących od uszkodzenia łożyska do mocy sygnału.

Algorytm identyfikacji niesprawności łożysk z zastosowaniem wielopasmowej filtracji sygnałów drgań rejestrowanych na obudowie łożysk opartej na paczkowej transformacji falkowej opisano poniżej. Doboru ortogonalnych baz falkowych, dokonano w oparciu o kryterium wykorzystujące ocenę zawartości impulsów wywołanych uszkodzeniem łożyska.

1. Dekompozycja sygnału do poziomu  $j$  z zastosowaniem wybranej funkcji bazowej. W badaniach zastosowano dekompozycję do poziomu  $j=5$  oraz w większości analiz zastosowano funkcję bazową Daubechies 10. Z otrzymanego drzewa binarnego można wybrać  $2^5 = 32$  niezależnych ortogonalnych baz.

2. Wyznaczenie widm dla wszystkich otrzymanych podciągów współczynników falkowych.

3. Wyznaczanie cech.

Przyjęto, że uwzględnianą cechą będzie wartość amplitudy składowej widma podciągu współczynników falkowych o częstotliwości równej częstotliwo-

ści charakterystycznej uszkodzenia badanego łożyska (czyli częstotliwości przetaczania się kolejnych elementów tocznych przez uszkodzenie punktowe bieżni) [6].

Analizowano sygnały wibroakustyczne łożysk. Każdy z badanych sygnałów składa się z 30 rekordów zawierających 8192 próbek. Identyfikacji składowych charakterystycznych dokonano na podstawie widm powstałych w wyniku 30-krotnego uśredniania po realizacjach (punkt 1 i 2 powtarzany był 30 razy).

Ostatecznie w badaniach jako cechy dyskryminatywne przyjęto amplitudy składowych charakterystycznych podzielone przez średnią wartość widma w przedziale od 0 do 600 Hz.

#### 4. Wybór bazy falkowej.

Przyjmując oznaczenie  $A_{j,k}$  jako amplitudę składowej charakterystycznej widma podciągu współczynników falkowych dobór bazy falkowej dokonywany jest z zastosowaniem zasady:

postępując od korzenia drzewa binarnego, jeżeli spełnione są warunki że,  $A_{j,k} > A_{j+1,2k}$  i  $A_{j,k} > A_{j+1,2k+1}$  podprzestrzeń  $\Omega_{j,k}$  wchodzi w skład przyjętej bazy falkowej a podprzestrzenie znajdujące się poniżej  $\Omega_{j,k}$  w gałęzi drzewa binarnego nie są już brane pod uwagę.

Otrzymana w ten sposób baza falkowa zachowuje ortogonalność.

5. Synteza sygnału na podstawie optymalnej bazy falkowej. Dokonywana jest synteza 30 realizacji sygnału.

6. Analiza obwiedni sygnału otrzymanego w wyniku syntezy i identyfikacja amplitud składowych charakterystycznych.

#### 4. PRZYKŁADY WYNIKÓW ANALIZ

Analizowano sygnały przyspieszeń drgań bezwzględnych zarejestrowane na stanowisku laboratoryjnym [5]. Badaniom poddano łożyska typu NU305 z punktowymi uszkodzeniami bieżni wewnętrznej, zewnętrznej lub elementu tocznego. Łożyska na stanowisku mocowane były w dzielonej obudowie łożyskowej firmy SKF wykonanej z żeliwa. Zarejestrowano drgania górnej pokrywy obudowy w kierunku pionowym z częstotliwością próbkowania 51.2 kHz.

Tab. 1 zawiera otrzymane wartości amplitud składowych charakterystycznych uszkodzenia łożyska wyznaczone na podstawie sygnałów po syntezie z zastosowaniem przyjętych baz falkowych. Analizowano sygnały zarejestrowane dla trzech rozpatrywanych uszkodzeń.

Do analizy wybrano sygnały zarejestrowane w obecności silnych zakłóceń oraz zastosowano funkcję bazową Biorthogonal 3.9. W przypadku uszkodzenia pierścienia zewnętrznego amplitudy składowych charakterystycznych osiągnęły znacząco większe wartości od 1 tylko dla bazy wyznaczonej na podstawie składowych charakterystycznych dla uszkodzenia pierścienia zewnętrznego. Analogiczna sytuacja występuje w przypadku analizy sygnałów dla uszkodzenia pierścienia wewnętrznego i elementu tocznego. Otrzymane wyniki potwierdzają poprawność zastosowanej metody.

Ponieważ podczas badań znane były uszkodzenia poszczególnych łożysk w dalszej części prezentowanie wyników (np. amplitudy składowych charakterystycznych) ograniczono do tych, które otrzymano na podstawie bazy falkowej przyjętej dla danego uszkodzenia. W przypadku badania łożyska o nieznanym uszkodzeniu takie uproszczenie prezentacji wyników byłoby niemożliwe.

Tabela.1. Przykład wyników zastosowania opracowanej metody

Sygnał z łożyska z uszkodzonym:	Wartości amplitudy składowej charakterystycznej sygnału uzyskanego w wyniku syntezy na podstawie bazy przyjętej dla uszkodzenia:		
	pierścienia wewnętrznego	pierścienia zewnętrznego	elementu tocznego
pierścień zewnętrznym	1,08	2,24	0,98
pierścień wewnętrznym	1,98	1,03	0,96
elementem tocznym	1,13	1,2	2,31

Tab. 2. Porównanie uzyskanych wyników z zastosowaniem różnych funkcji bazowych

Analizowany sygnał z łożyska z uszkodzonym:	Funkcja bazowa	Amplituda składowej charakterystycznej
pierścieniem zewnętrznym	Daubechies 10	2,39
	Biorthogonal 3.9	2,24
	Haar	1,63
pierścieniem wewnętrznym	Daubechies 10	2,14
	Biorthogonal 3.9	1,98
	Haar	1,77

Tab. 3. Porównania opracowanej metody z metodą obwiedni

		Amplituda składowej charakterystycznej		
		bez szumu	„mały” szum	„duży” szum
Uszkodzony pierścień wewnętrzny	Metoda z zastosowaniem baz falkowych	3,47	2,63	1,89
	Metoda obwiedni	3,26	1,68	1,74
Uszkodzony pierścień zewnętrzny	Metoda z zastosowaniem baz falkowych	3,89	2,82	2,37
	Metoda obwiedni	3,94	1,92	2,04
Uszkodzony element toczny	Metoda z zastosowaniem baz falkowych	2,64	1,87	1,21
	Metoda obwiedni	2,02	1,76	0,67

Efektywne stosowanie analizy falkowej do diagnostowania łożysk tocznych autorzy wielu artykułów wiążą z wyborem odpowiedniej funkcji bazowej. Wyrażany jest pogląd, że falki powinny mieć kształt zbliżony do odpowiedzi układu łożysko-obudowa na wymuszenie impulsowe wywołane uszkodzeniem łożyska.

Podczas badań porównano wyniki zastosowania różnych funkcji bazowych do analizy sygnałów zarejestrowanych w przypadku wybranych uszkodzeń łożysk tocznych.

W tab. 2 porównano wyniki uzyskane przy zastosowaniu trzech funkcji bazowych: Daubechies 10, Biorthogonal 3.9 i Haara. Stosując funkcję bazową Haara uzyskano wyraźnie gorsze wyniki. Do dalszych badań wybrano funkcję bazową Daubechies10.

W tab. 3 przedstawiono wyniki analiz sygnałów z łożysk z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym, wewnętrznym i elementem tocznym zarejestrowanych przy różnych wartościach wprowadzanych zakłóceń wibroakustycznych. Otrzymane wyniki porównano z wynikami zastosowania tradycyjnej metody obwiedni.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione przykłady zastosowań paczkowej transformacji falkowej do identyfikacji niesprawności łożysk tocznych potwierdziły przydatność opracowanej metody.

Paczkową transformację falkową wykorzystano do wielopasmowej filtracji sygnałów. Wyboru zestawu wektorów bazowych dokonano według przyjętego kryterium zwiększania stosunku składowych pochodzących od uszkodzenia łożyska do mocy sygnału.

Przyjęty algorytm wyboru bazy falkowej dla analizowanego sygnału umożliwia usunięcie części składowych sygnału nie niosących informacji o uszkodzeniu łożyska. Zastosowany algorytm nie umożliwia uzyskanie bazy optymalnej w świetle przyjętego kryterium, co wymaga dalszych badań.

## LITERATURA

- [1] WYSOGLĄD B.: *Metody diagnostowania łożysk tocznych z zastosowaniem transformacji falkowej*. Diagnostyka vol.29, 2003 s.47-52.
- [2] MISITI M., MISITI Y., OPPENHEIM G., POGGI J.M.: Wavelet toolbox. The Math Works, Inc. Natick - 1996.
- [3] KLEMIATO M., DUDA J.T.: *Analiza falkowa w diagnostyce układów regulacji*. Materiały V Krajowej Konferencji Diagnostyka Procesów Przemysłowych. Łągow Lubuski, 17-19.09.2001.
- [4] COIFMAN R.R., WICKERHAUSER M.V.: Entropy based algorithms for best basis selection. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 38, No.2, 1992.
- [5] WYSOGLĄD B.: *Metoda diagnostowania stanu technicznego łożysk tocznych z zastosowaniem transformacji falkowej*. Raport z Realizacji Projektu Badawczego, Gliwice 2002.
- [6] CEMPEL CZ.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa, 1989.



Dr inż. Bogdan Wysogład jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Pol. Śl. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką maszyn wirnikowych i łożysk tocznych oraz metodami analizy sygnałów wibroakustycznych.