

*monitorowanie stanu łożysk tocznych,
silniki indukcyjne, analiza falkowa*

Paweł EWERT*, Czesław T. KOWALSKI*

ZASTOSOWANIE ANALIZY FALKOWEJ DO DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK TOCZNYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

W pracy przedstawiono metodę monitorowania stanu łożysk tocznych silników indukcyjnych opartą na analizie falkowej. Omówiono dyskretną transformatę falkową oraz jej uogólnienie w postaci pełnego przekształcenia falkowego. Zaprezentowano podział na aproksymatę i detal sygnału przyspieszenia drgań. Eksperymentalnie sprawdzono możliwość wykrywania oraz identyfikowania uszkodzeń poszczególnych elementów konstrukcyjnych łożysk takich jak: element toczny, bieżnia zewnętrzna oraz bieżnia wewnętrzna. Badania zrealizowano na zestawie specjalnie przygotowanych łożysk z zamodelowanymi uszkodzeniami. Przedstawiono przykładowe wyniki badań laboratoryjnych. Dokonano oceny skuteczności wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych przy wykorzystaniu analizy falkowej przyspieszenia drgań.

1. WPROWADZENIE

Niestacjonarność dostępnych sygnałów diagnostycznych powoduje, że w ostatnich latach coraz częściej wykorzystywana jest analiza falkowa do wykrywania symptomów uszkodzeń w silnikach indukcyjnych. Podejście to zakłada, że sygnał diagnostyczny w dziedzinie czasu można rozłożyć na składniki o różnych oknach czasowych i różnych pasmach częstotliwości i uzyskane w ten sposób informacje przedstawić w dziedzinie czas-skala. Ze względu na charakter odpowiedzi częstotliwościowej podejście to jest skuteczne zarówno dla długich sygnałów o niskich częstotliwościach jak i krótkich sygnałów zawierających wysokie częstotliwości. Podejście falkowe ma przewagę nad tradycyjnym przekształceniem Fouriera w przypadku analizy sygnałów zawierających niespójności oraz krótkie impulsy (procesy niestacjonarne). Przekształcenie Fouriera powoduje zmianę reprezentacji sygnału z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości, co powoduje utratę informacji o czasie a w konsekwencji trudności

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, pawel.ewert@pwr.wroc.pl, czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl.

w interpretacji. Wady tej nie posiada przekształcenie falkowe, które reprezentuje sygnał przesunięty oraz przeskalowany względem tzw. falki macierzystej. Umożliwia to analizę informacji częstotliwościowej sygnału w trakcie jego rozwoju w czasie. Zdolność do jednoczesnego reprezentowania sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości jest istotną zaletą przekształcenia falkowego [1], [3].

Okazuje się, że sygnały niestacjonarne o ostrych zmianach mogą być lepiej rozpoznane przy wykorzystaniu nieregularnej falki niż przy rozłożeniu na regularne sinusoidy [7]. Dlatego przy zastosowaniu analizy falkowej bardzo istotne znaczenie ma prawidłowy dobór typu falki. Obecnie najczęściej stosowana w diagnostyce silników indukcyjnych jest falka Daubechies [4], [5], [6].

W niniejszym artykule zostaną przedstawione wyniki zastosowania analizy falkowej sygnału przyspieszenia drgań do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych silnika indukcyjnego zasilanego z sieci. W badaniach zastosowano algorytmy analizy falkowej dostępne w środowisku programistycznym LabVIEW.

2. ANALIZA FALKOWA – PODSTAWOWE INFORMACJE

Ciągła transformata falkowa (ang. *Continuous Wavelet Transform – CWT*) jest zdefiniowana za pomocą następującego równania [1]:

$$CWT x(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

gdzie: a – współczynnik skali, b – współczynnik przesunięcia, $*$ – sprzężenie funkcji zespolonej, oraz

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

gdzie: $a, b \in \mathbb{R}$ i $a \neq 0$.

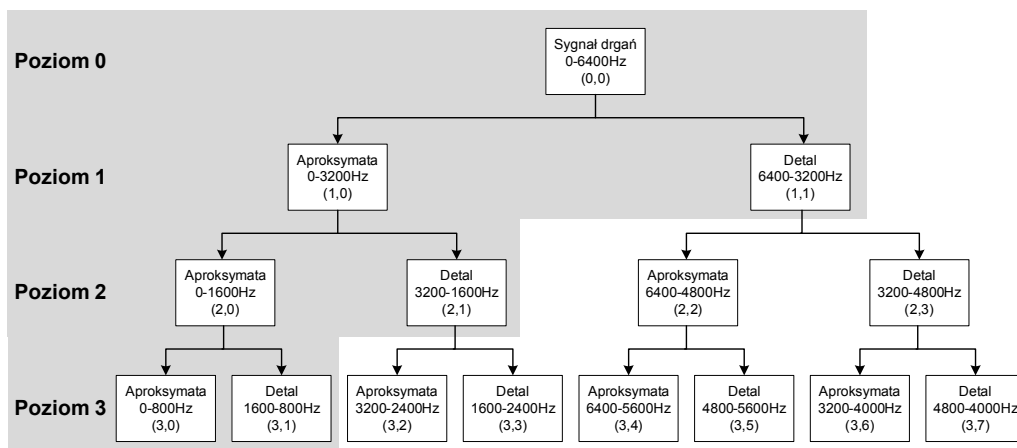
W przypadku ciągłego przekształcenia falkowego zakłada się, że współczynniki skali a i przesunięcia b są funkcjami ciągłymi. Gdy parametry przekształcenia są funkcjami dyskretnymi, przekształcenie (1) opisuje tzw. dyskretną transformatę falkową (ang. *Discrete Wavelet Transform – DWT*). Ponieważ przyjmuje się, że współczynniki skali a oraz przesunięcia b zmieniają się z krotnością 2, przekształcenie (1) przyjmuje postać [3]:

$$DWT x_{jk} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \psi_{jk}^*(n) \quad (3)$$

gdzie:

$$\psi_{jk}(n) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}n - k) \quad (4)$$

Przyjmuje się, że: $n \cdot T$ – czas trwania sygnału $x(t)$, T – okres próbkowania sygnału $x(t)$, N – liczba próbek określona przez granice występowania falki $\psi_{jk}(n)$.



Rys. 1. Przykład całkowitej dekompozycji falkowej sygnału drgań do poziomu trzeciego.

Ciemne tło – przykład drzewa niepełnej dekompozycji falkowej

Fig. 1. An example of signal vibration wavelet packet decomposition tree up to the third level.

Dark background – An example of signal vibration wavelet decomposition tree

Dyskretna transformata falkowa umożliwia rozdzielenie sygnału wyjściowego $x(t)$ na dwie składowe, których pasma częstotliwości zajmują połowę pasma sygnału $x(t)$. Składowe uzyskuje się poprzez filtrację sygnału odpowiednio filtrem dolno- i górno-przepustowym oraz operację próbkowania sygnału przez wybieranie tylko próbek parzystych (ang. *downsampling*). Sygnał na wyjściu filtra dolnoprzepustowego jest aproksymatą, natomiast sygnał na wyjściu filtra górnoprzepustowego jest detalem – zawiera szczegóły uzupełniające aproksymatę. Aproksymacje są elementami sygnału $x(t)$ o wysokiej skali i niskiej częstotliwości, natomiast detale są elementami o niskiej skali i wysokiej częstotliwości. Proces dekompozycji może być powtarzany o rozkład kolejnych aproksymat sygnału na ich aproksymatę i detal. Mówi się wówczas o dekompozycji wielopoziomowej. Uogólnieniem wielopoziomowej dekompozycji jest całkowita dekompozycja sygnału, w której w kolejnych krokach filtruje się nie tylko kolejne aproksymaty sygnału ale również jego detale.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładową całkowitą dekompozycję sygnału do poziomu trzeciego. Ciemnym tłem zaznaczono przykładowe drzewo niepełnej dekompozycji falkowej sygnału drganiowego (również do poziomu 3). Proces dekompozycji wielopoziomowej może być kontynuowany do momentu osiągnięcia pojedynczej

próbki, a w przypadku obrazów do pojedynczego piksela. Dekompozycja sygnału umożliwia analizę poszczególnych zakresów częstotliwości, które odpowiadają poszczególnym węzłom drzewa dekompozycji.

3. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

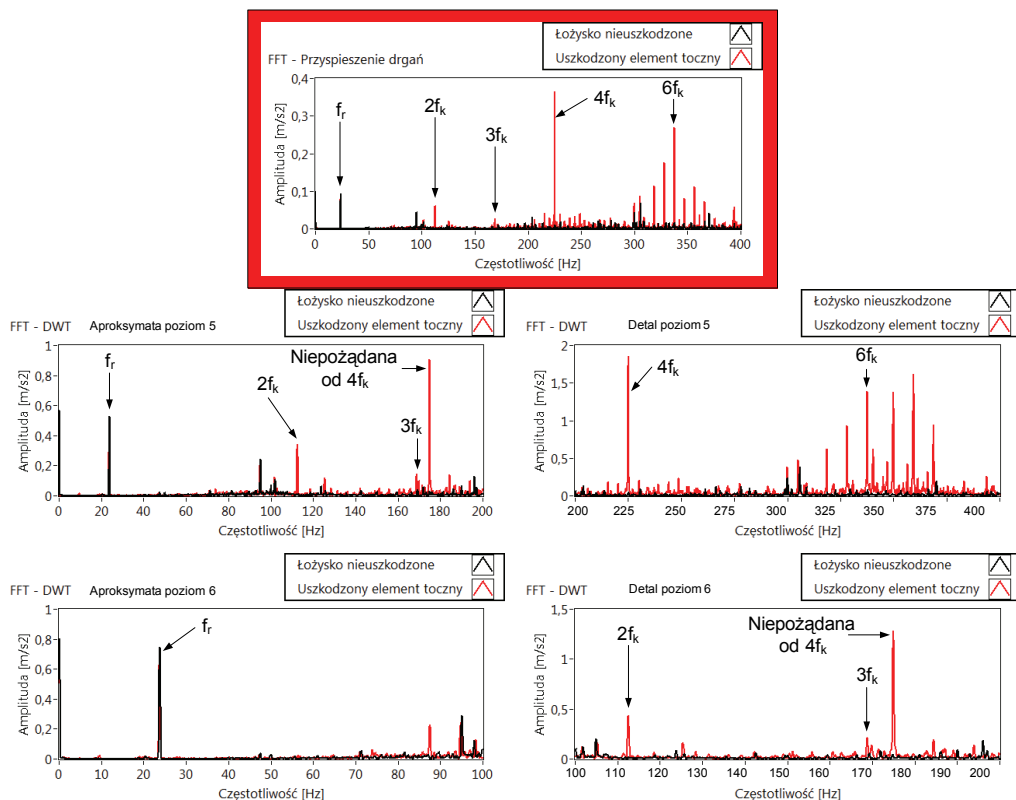
Badania laboratoryjne przeprowadzono na silniku Sh-90L-4 firmy INDUKTA zasilanym z sieci, w którym montowane były łożyska kulkowe typ 6205 2Z ze sztucznie modelowanymi uszkodzeniami kulki, bieżni wewnętrznej i zewnętrznej. Pomiarzy zrealizowano przy wykorzystaniu komputera przemysłowego NI PXI 8186 wyposażonego w kartę przemysłową NI PXI 4472. Akwizycję sygnału diagnostycznego oraz analizę danych pomiarowych dokonano przyrządem wirtualnym zrealizowanym w środowisku LabView. Do pomiaru drgań wykorzystano akcelerometr jednoosiowy typu M622B01 firmy IMI SENSORS umieszczony na pokrywie łożyska silnika (pomiar drgań w kierunku osiowym). Sygnał mierzono z próbkowaniem 12,8 kS/s w czasie 10 s co umożliwiło uzyskanie widma o paśmie 0–6,4 kHz z rozdzielczością 0,1 Hz.

Analizie falkowej poddano sygnał przyspieszenia drgań. Poziom dekompozycji wynikał z charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych łożyska. Dla dyskretnego przekształcenia falkowego analizę wykonano na 5 i 6 poziomie dekompozycji. Uzyskana szerokość pasma aproksymaty i detalu na 6 poziomie dekompozycji wyniosła 100 Hz, natomiast na 5 poziomie 200 Hz. Umożliwiło to pokazanie częstotliwości uszkodzeniowych w paśmie do 400 Hz. W przypadku pełnego przekształcenia falkowego analizę dokonano na 8 poziomie dekompozycji. Na 8 poziomie dekompozycji uzyskano pasmo 25 Hz. Tak wąskie pasmo ułatwia wyodrębnienie charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane z dyskretnego przekształcenia falkowego przyspieszenia drgań silnika pracującego pod obciążeniem znamionowym z uszkodzeniem elementu tocznego łożyska.

Zestawienie prezentuje widma FFT aproksymaty oraz detalu z 5 oraz 6 poziomu dekompozycji. Dodatkowo w ramce, przedstawiono analizę FFT przyspieszenia drgań silnika z dobrym oraz uszkodzonym łożyskiem. Strzałkami zaznaczono charakterystyczne częstotliwości uszkodzeniowe. Porównując widma z przekształcenia falkowego z widmem przyspieszenia drgań można zauważyć, że charakterystyczne częstotliwości uszkodzeniowe mają dużo większe amplitudy przy przekształceniu falkowym. Dodatkowo, oprócz składowych podstawowych kf_k , widoczna jest również niepożądana częstotliwość od składowej $4f_k$.

Pojawianie się w analizie falkowej niepożądanych częstotliwości wynika z nakładania się na siebie pasm zastosowanych filtrów [6], [7]. Niestety zastosowane filtry nie są idealne, w związku z czym posiadają pewne nachylenie charakterystyki w pa-

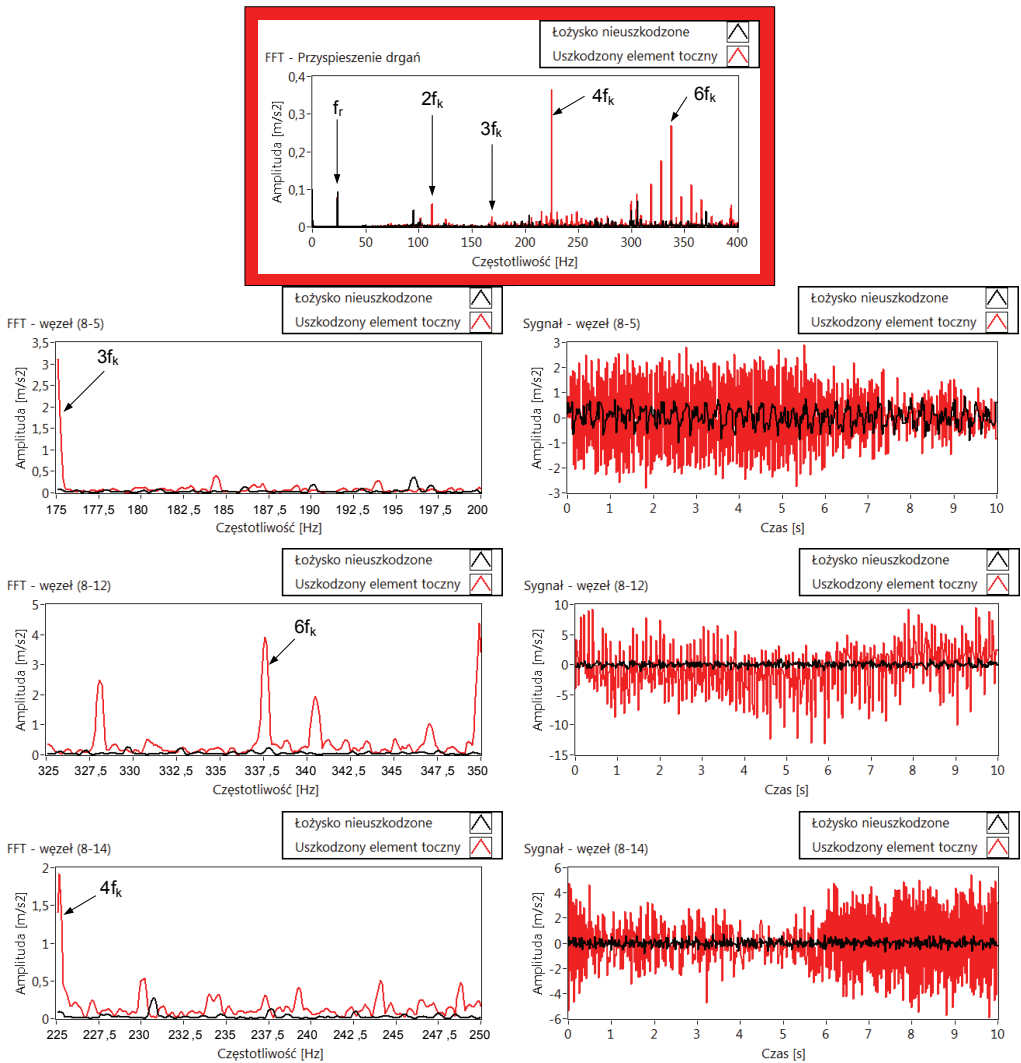
śmie zaporowym, zależne od rzędu filtru. Niepożądane częstotliwości pojawiają się gdy częstotliwość o bardzo dużej amplitudzie występuje w pobliżu granicy sąsiedniego przedziału częstotliwości (aproxymaty lub detalu).



Rys. 2. Przykładowe widma FFT przyspieszenia drgań (ramka) i dyskretnego przekształcenia falkowego do 5 i 6 poziomu dekompozycji dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzonym elementem tocznym
 Fig. 2. An example of vibration spectrum (frame) and wavelet decomposition up to the 5th and 6th level of healthy and damaged bearing (one broken ball)

W przypadku pełnego przekształcenia falkowego analizę dokonano na 8 poziomach dekompozycji. Szczegółowa analiza sygnałów w węzłach z 8 poziomu pozwoliła wybrać te, w których najlepiej były odzwierciedlone efekty uszkodzenia elementu tocznego łożyska (rys. 3). Analogicznie jak dla dyskretnego przekształcenia falkowego w ramce, przedstawiono klasyczną analizę FFT przyspieszenia drgań oraz zaznaczono strzałkami charakterystyczne częstotliwości uszkodzeniowe. Dodatkowo pokazano przebiegi czasowe sygnałów w wybranych węzłach. Ilustrują one wpływ uszkodzenia łożyska na przebieg przyspieszenia drgań w danym węźle. W przypadku pełnego przekształcenia falkowego, amplitudy charakterystycznych częstotliwości są również

kilkakrotnie większe od tych uzyskanych w klasycznej analizie FFT przyspieszenia drgań. W wybranych węzłach możliwe jest odnalezienie charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych świadczących o uszkodzeniu elementu konstrukcyjnego łożyska.



Rys. 3. Przykładowe widma FFT przyspieszenia drgań (ramka) i pełnego dyskretnego przekształcenia falkowego oraz przebiegi czasowe wybranych węzłów z 8 poziomu dekompozycji dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzonym elementem tocznym

Fig. 3. An example of vibration spectrum (frame), wavelet packet decomposition and time-domain signal up to the 8th level of healthy and damaged bearing (one broken ball)

4. PODSUMOWANIE

W procesach monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych coraz większe znaczenie mają metody oparte na transformatach czasowo-częstotliwościowych. Szczególnie intensywnie wdrażane są metody oparte o analizę falkową. Zaprezentowane wybrane wyniki badań potwierdziły dużą skuteczność analizy falkowej w wykrywaniu i identyfikacji rodzaju uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych. Dotyczy to zarówno analizy falkowej pakietowej częściowej, jak i całkowitej.

Z przedstawionych przykładów wynika, że informacja uzyskana z analizy falkowej może być bezpośrednio wykorzystana do monitorowania charakterystycznych częstotliwości w aproksymatach i detalach lub pośrednio, za pomocą wytrenowanych sieci neuronowych [2]. Do trenowania i testowania mogą być również wykorzystane wartości skuteczne lub energie w wybranych węzłach drzewa dekompozycji sygnału przyspieszenia drgań.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy promotorski nr N N510 538139

LITERATURA

- [1] BIAŁASIEWICZ J. T., *Falki i aproksymacje*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [2] EWERT P., *Neuronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, R. 88, nr 4b, 70–75.
- [3] KOWALSKI CZ.T., *Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce silników indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 82, nr 1, 21–26.
- [4] RUBINI R., MENEGHETTI U., *Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearings*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(2), 287–302.
- [5] YANG D.-M., *Induction Motor Bearing Fault Detection with Non-stationary Signal Analysis*, Proceedings of International Conference on Mechatronics, Kumamoto Japan, 8–10 May 2007, 1–6.
- [6] YANG D.-M., STRONACH A.F., MACCONNELL P., *The application of advanced signal processing techniques to induction motor bearing condition diagnosis*, Meccanica 38, 2003, 297–308.
- [7] ZHANG J.-Y., CUI L.-L., YAO G.-Y., GAO L.-X., *Research on the selection of wavelet function for the feature extraction of shock fault in the bearing diagnosis*, Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Beijing, China, 2–4 Nov. 2007, 1630–1634.

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS FOR THE DIAGNOSIS OF BEARING FAULT IN INDUCTION MOTORS

The paper describes a monitoring method of damaged detection in induction motors rolling bearings. The method is based on wavelet transform analysis of the vibration. Quality of the bearing faults detection and identification methods was tested experimentally. The experiments have been conducted on induction motors with the bearing faults, such as: balls, outer and inner races. Correctness of the proposed methods has been confirmed by satisfactory tests results.