

Zastosowanie analizy falkowej do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych napędu z zamodelowanym uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska tocznego. Zarejestrowane sygnały drgań mechanicznych zostały poddane analizie przy wykorzystaniu transformacji falkowej. Na podstawie przedstawionych wyników dokonano oceny przydatności analizy falkowej do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych. Analiza sygnałów diagnostycznych przeprowadzona została w opracowanym w środowisku LabVIEW autorskim, wirtualnym przyrządzie umożliwiającym wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych.

Abstract. Results of an experimental research of a drive with the rolling bearing inner race fault are presented in this paper. Measured mechanical vibration signals are analyzed using the wavelet transform. Based on the presented results, the assessment of the suitability of the wavelet analysis for the detection of the bearings faults is made. Analysis of the diagnostic signals is made in application designed in LabVIEW allowing the detection of the bearings faults. (**Application of wavelet analysis for detection of the rolling bearing faults**).

Słowa kluczowe: analiza falkowa, uszkodzenia łożysk tocznych, silnik indukcyjny

Keywords: wavelet analysis, rolling bearing faults, induction motor.

Wstęp

Silniki indukcyjne z uwagi na swoją prostą konstrukcję, niską cenę oraz stosunkowo wysoką niezawodność często są częścią rozległego oraz złożonego układu napędowego, w którym wydajność oraz niezawodność jest zagadnieniem niezwykle ważnym. Nieplanowane remonty oraz związane z nimi przestoje procesu produkcyjnego powodują duże straty ekonomiczne. Dlatego też wczesne wykrycie rozwijających się uszkodzeń jest jednym z najważniejszych zagadnień związanych z eksploatacją układów napędowych z silnikami indukcyjnymi. Do tego celu stosowane są systemy monitorowania i diagnostyki uszkodzeń. Efektywny system monitorowania i diagnostyki jest zdolny do wykrycia uszkodzenia już we wczesnym jego stadium.

Łożyska toczne są najczęściej uszkadzającymi się elementami maszyn wirujących. Nieodpowiednia konserwacja i użytkowanie są jedną z przyczyn przedwczesnego zużycia łożyska [1]. Wczesne wykrycie nieprawidłowości związanych z pracą łożyska pozwala uniknąć poważnych zaburzeń wtórnych. Stąd też wynika szczególna waga diagnostyki węzła łożyskowego.

Obecnie w monitorowaniu i diagnostyce uszkodzeń silników indukcyjnych najczęściej wykorzystywane są metody analizy sygnałów bezpośrednio mierzonych na badanym obiekcie. Najpopularniejszą i najlepiej znaną metodą jest analiza częstotliwościowa wykorzystująca szybką transformatę Fouriera FFT. Tradycyjna metoda częstotliwościowa nie nadaje się jednak do analizy sygnałów niestacjonarnych, może ukrywać występujące w nich krótkoczasowe osobliwości szczególnie często spotykane w uszkodzeniach łożysk tocznych. Niestety większość z dostępnych sygnałów diagnostycznych ma charakter niestacjonarny i zazwyczaj to szybkozmienne elementy sygnałów zawierają najistotniejsze informacje na temat postępujących uszkodzeń. Z tego powodu coraz częściej stosuje się analizy wyższych rzędów: analizę krótkoczasową oraz analizę falkową [2-9]. Metody te pozwalają na analizowanie sygnałów krótkoczasowych, zawierających informacje wysokoczęstotliwościowe, oraz długoczasowych, które zawierają informacje niskoczęstotliwościowe.

Transformacja falkowa – podstawowe informacje

Transformacja falkowa jest stosunkowo nowym, lecz bardzo dynamicznie rozwijającym się narzędziem do analizy sygnałów niestacjonarnych [2, 4, 5, 9]. Przedstawia

sygnał używając skalowalnej oraz przesuwalnej funkcji, zwanej falką – matką (ang. *mother wavelet*), umożliwiając analizowanie rozwoju składowych częstotliwościowych w czasie. Możliwość reprezentowania sygnału zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości jest znaczącą korzyścią wynikającą ze stosowania falek.

Ciągła transformata falkowa (ang. *Continuous Wavelet Transform – CWT*) wyrażona jest następującą zależnością:

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

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

$$(2) \quad \psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0$$

Dodatkowo musi być spełniony warunek:

$$(3) \quad C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

gdzie: $\psi(\omega)$ – transformata Fouriera funkcji $\psi(t)$.

Równanie (1) przedstawia filtrację sygnału analizowanego $x(t)$ przez przeskalowaną w dziedzinie czasu falkę $\psi_{a,b}(t)$. Dla współczynnika $a > 1$ falka jest „rozciągana”, dla $a < 1$ „ściskana”. Współczynnik przesunięcia b określa położenie falki na osi czasu. Istnieje zależność pomiędzy współczynnikiem skali a , a częstotliwością. Wyższy współczynnik skali odpowiada bardziej „rozciągniętej” falce. Dłuższy również będzie przedział sygnału, z którym falka będzie porównywana. Wysoka skala a odpowiada więc niskim częstotliwościom, natomiast niska skala a częstotliwościom wysokim. Transformata falkowa służy więc do lokalnej analizy częstotliwościowej sygnału wykorzystując okna o zmiennej szerokości, która regulowana jest wartością współczynnika a falki.

Wynikiem CWT są współczynniki falkowe $C(a,b)$, które są funkcją skali i pozycji. Są one wyznacznikiem podobieństwa analizowanego sygnału do analizującej falki bazowej. W zależności od wybranej falki współczynniki te reprezentują charakterystyczne cechy sygnału.

Dla ciągłej transformaty falkowej CWT przyjmuje się, że współczynnik skali a oraz współczynnik przesunięcia b są funkcjami ciągłymi. Obliczanie współczynników dla każdej wartości skali i przesunięcia wymaga dużego nakładu

obliczeniowego oraz generuje ogromne ilości danych. Uproszczeniem tego procesu obliczeniowego jest przyjęcie, że skala a i przesunięcie b są funkcjami dyskretnymi zmieniającymi się z krotnością 2.

W dyskretnej analizie falkowej często używa się określeń aproksymacja oraz detal. Są to współczynniki transformacji powstałe w wyniku filtracji z użyciem filtrów dolnoprzepustowego oraz górnoprzepustowego, które zajmują po połowie pasma częstotliwości analizowanego sygnału (S). Aproksymacja (A) jest częścią sygnału o niskiej częstotliwości i wysokiej skali. Detal (D) jest elementem o wysokiej częstotliwości i niskiej skali.

Dekompozycja sygnału jest procesem iteracyjnym i może być powtarzana wielokrotnie. W wielorozdzielczej analizie falkowej kolejnej dekompozycji podlegają jedynie aproksymacje sygnału.

Uogólnieniem wielorozdzielczej analizy falkowej jest pakietowa analiza falkowa (ang. *Wavelet Packet Transform*), która w kolejnych iteracjach dekompozycji rozkłada nie tylko kolejne aproksymacje sygnału, ale także jego detale. Transformacja pakietowa umożliwia analizę wybranych zakresów częstotliwości.

Metody analizy częstotliwościowej, analizy czasowo – częstotliwościowej oraz wyspecjalizowane analizy sygnałów pozwalają na wyodrębnienie symptomów związanych z uszkodzeniem poszczególnych elementów konstrukcyjnych łożyska. Możliwe jest to dzięki założeniu, że miejscowe uszkodzenia powierzchni poszczególnych elementów generują drgania o charakterystycznych częstotliwościach [1, 4].

Metodyka badań

Analizie falkowej poddano sygnał przyspieszenia drgań zmierzony na silniku indukcyjnym Sh-90L-4 firmy INDUKTA zasilanym z sieci. W silniku zamontowane zostały łożyska toczne z zamodelowanymi uszkodzeniami elementu tocznego, bieżni wewnętrznej oraz bieżni zewnętrznej. Sygnały mierzono przez 10s z częstotliwością 2048Hz. Uzyskano widmo o paśmie 0–1024Hz z rozdzielczością 0,1Hz. Wybór poziomu dekompozycji wynikał z charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych łożyska. Częstotliwości te można wyznaczyć na podstawie znajomości parametrów konstrukcyjnych łożyska według następujących zależności:

$$(4) \quad f_{lk} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d \cdot \cos \vartheta}{D} \right)$$

$$(5) \quad f_{bz} = \frac{N_k}{2} f_r \left(1 - \frac{d \cdot \cos \vartheta}{D} \right)$$

$$(6) \quad f_{bw} = \frac{N_k}{2} f_r \left(1 + \frac{d \cdot \cos \vartheta}{D} \right)$$

$$(7) \quad f_k = \frac{D}{2 \cdot d} f_r \left(1 - \left(\frac{d \cdot \cos \vartheta}{D} \right)^2 \right)$$

gdzie: f_r – częstotliwość obrotowa, d – średnica elementu tocznego, D – średnica podziałowa łożyska, ϑ – kąt pracy łożyska [°], N_k – liczba elementów tocznych łożyska.

W widmach przyspieszenia drgań oraz obwiedni pojawiają się nie tylko częstotliwości opisane zależnościami (4)–(7), ale również ich kolejne wielokrotności oraz składowe przesunięte o aktualną wartość częstotliwości obrotowej $\pm f_r$.

W niniejszej pracy przedstawiono tylko wyniki dla uszkodzonej bieżni wewnętrznej łożyska. Dla dyskretnej transformaty falkowej DWT analizę wykonano na 1 i 2 poziomie dekompozycji. Szerokość uzyskanych pasm na kolejnych poziomach jest następująca: 1 poziom – 512Hz, 2

poziom – 256Hz. Dla pakietowej transformaty falkowej analizę sygnałów wykonano na 5 poziomie dekompozycji uzyskując pasmo o szerokości 32Hz. Badania przeprowadzone zostały dla falki Daubechies rzędu 10 (db10).

Analizie poddane zostały sygnały z wybranych węzłów uzyskane podczas dekompozycji przyspieszenia drgań, ich wartość skuteczna oraz energia własna. Wybrane pasma częstotliwości zostały również poddane klasycznej analizie FFT. Zbadany został wpływ zmian obciążenia, zmian rodzaju falki oraz wpływ długości mierzonego sygnału na wyniki analizy falkowej.

Wyniki badań laboratoryjnych

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych uzyskane z dyskretnej analizy falkowej sygnału przyspieszenia drgań silnika indukcyjnego pracującego bez obciążenia z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną.

1. Dyskretna transformata falkowa

Przekształcenie falkowe dla uszkodzonej bieżni wewnętrznej przeprowadzono na 1 i 2 poziomie dekompozycji ze względu na zakres występowania charakterystycznych częstotliwości ($f_{bw}=135\text{Hz}$ dla $f_r=24,9\text{Hz}$). Na rysunku 1 przedstawiono zestawienie widm FFT sygnału przyspieszenia drgań oraz FFT aproksymat i detali dyskretnego przekształcenia falkowego. Na rysunku strzałkami zaznaczono położenie charakterystycznych dla uszkodzonej bieżni wewnętrznej częstotliwości uszkodzeniowych.

Tabela 1. Wartości skuteczne sygnałów aproksymat i detali przekształcenia falkowego dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną

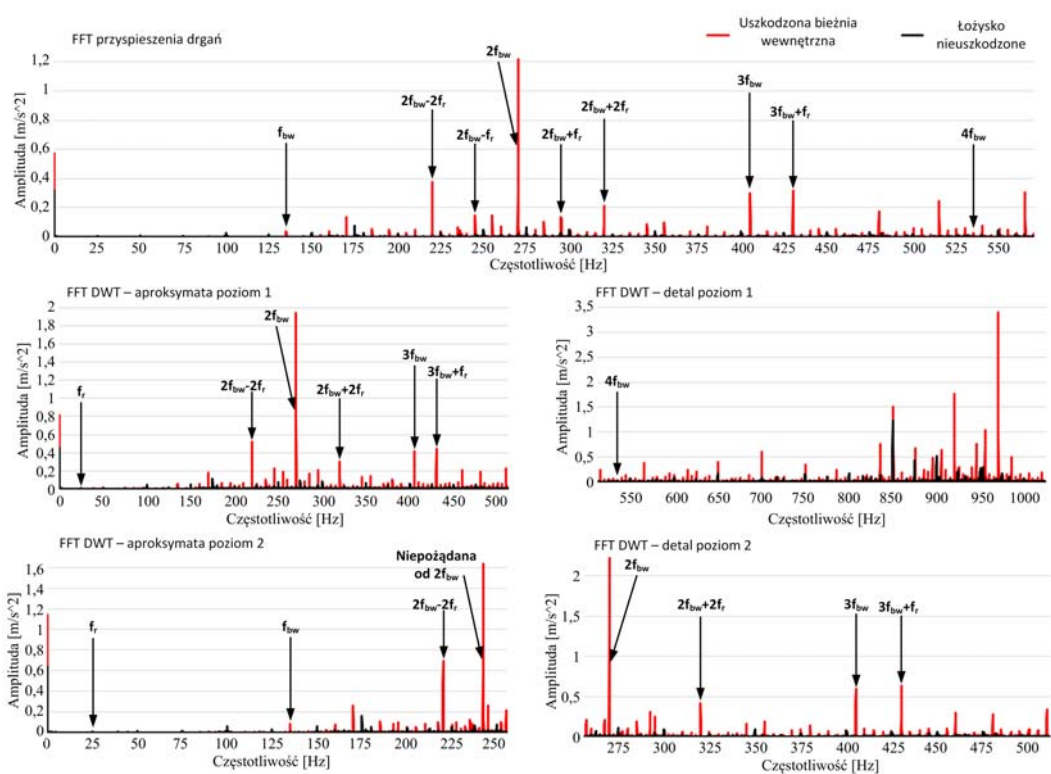
Wartość skuteczna sygnałów aproksymat i detali falkowych		
Aproksymata lub detal	Łożysko nieuszkodzone	Uszkodzona bieżnia wewnętrzna
Aproksymata poziom 1	0,4	1,74
Detal poziom 1	1,48	3,86
Aproksymata poziom 2	0,49	1,57
Detal poziom 2	0,27	1,9

Obserwowane w widmie FFT sygnałów aproksymat i detalu dyskretnego przekształcenia falkowego amplitudy charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych mają większą wartość w porównaniu do tych obserwowanych w widmie przyspieszenia drgań. Najbardziej widoczna amplituda częstotliwości $2f_{bw}$ wrosła z $1,2 \text{ m/s}^2$ (dla widma FFT przyspieszenia drgań) do ok. $2,2 \text{ m/s}^2$ dla widma FFT detalu z poziomu 2. Zmiany zauważalne są także w wartościach skutecznych badanych sygnałów aproksymat i detali dyskretnego przekształcenia falkowego (tabela 1).

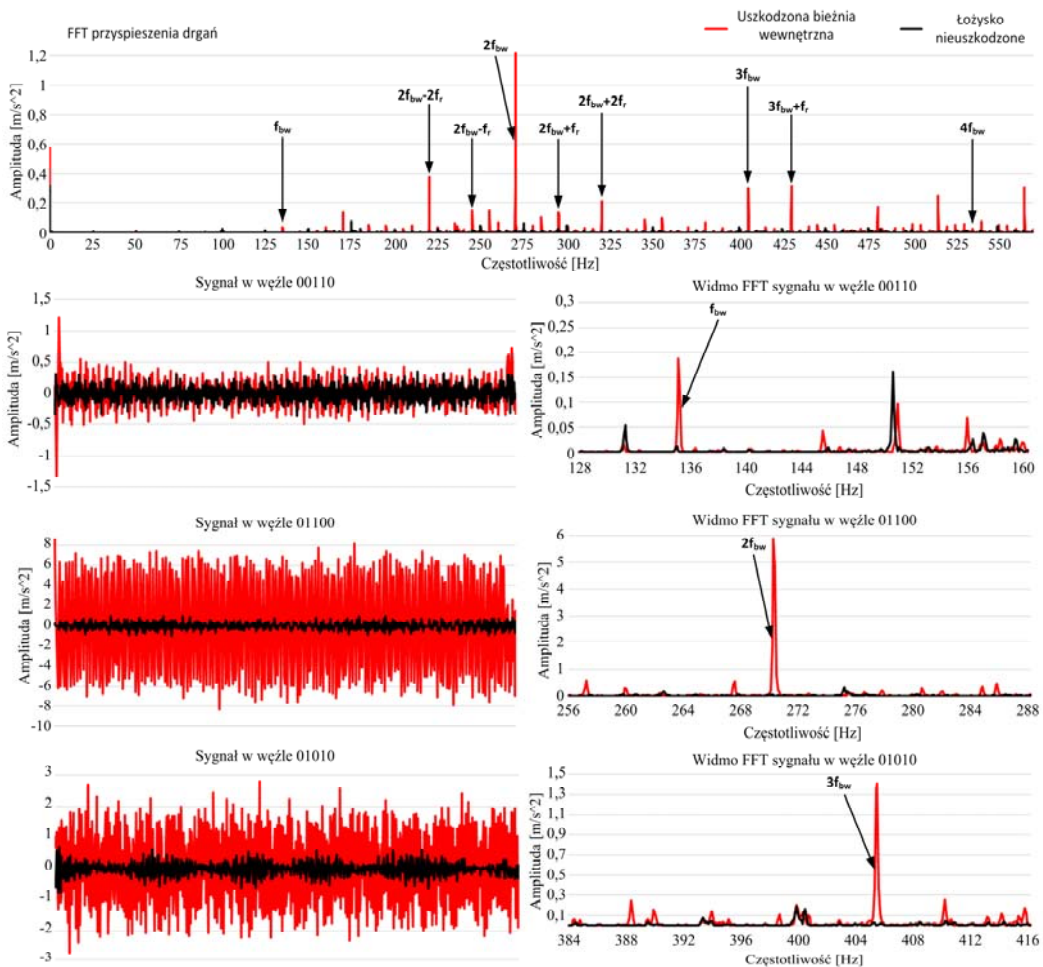
2. Pakietowa analiza falkowa

Pakietowa analiza falkowa w odróżnieniu od dyskretnej pozwala na wielopoziomową analizę nie tylko kolejnych aproksymacji ale również i detali. Badania przeprowadzono dla falki Daubechies rzędu 10 (db10). Analizę sygnałów wykonano na 5 poziomie dekompozycji, co pozwoliło uzyskać pasmo szerokości 32 Hz. Tak wąskie pasmo umożliwia dokładne wyodrębnienie charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych.

Uszkodzenia bieżni wewnętrznej obserwowano w węzłach: 00110 o zakresie częstotliwości 128–160Hz, 01100 o zakresie częstotliwości 256–288Hz oraz 01010 o zakresie 384–416Hz. Węzły te zostały wybrane z powodu obecności w ich zakresach charakterystycznych częstotliwości f_{bw} , $2f_{bw}$ oraz $3f_{bw}$. Na rysunku 2 przedstawiono widmo FFT przyspieszenia drgań oraz sygnały i ich widma FFT z wybranych węzłów z piątego poziomu pełnej dekompozycji falkowej.



Rys. 1. Widma FFT przyspieszenia drgań oraz sygnałów aproksymat i detali (1 i 2 poziom dekompozycji) dyskretnego przekształcenia falkowego dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną



Rys. 2. Widmo FFT sygnału przyspieszenia drgań oraz przebiegi czasowe sygnałów z wybranych węzłów z piątego poziomu dekompozycji i ich widma FFT dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną

Tak jak w przypadku dyskretnej transformaty falkowej amplitudy charakterystycznych częstotliwości w badanych węzłach znacząco wzrosły w porównaniu do amplitud częstotliwości uzyskanych z analizy FFT przyspieszenia drgań. Zauważalny jest również wzrost wartości skutecznej sygnałów w wybranych węzłach z piątego poziomu dekompozycji, co widać na przebiegach czasowych na rysunku 2.

3. Wpływ wartości obciążenia silnika na wyniki analizy falkowej

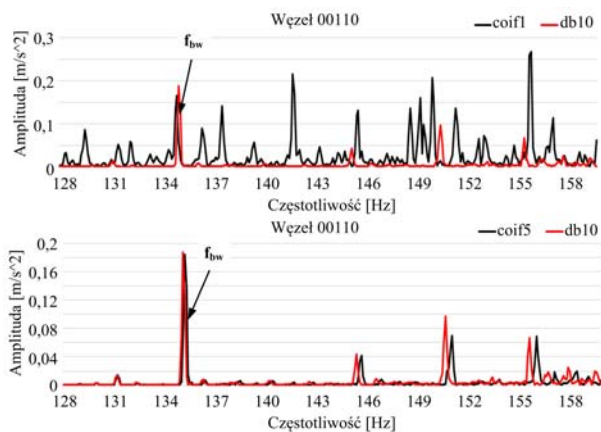
Wzrost obciążenia powoduje spadek częstotliwości rotacyjnej f_r , zmniejszają się również wartości charakterystycznych częstotliwości dla danego uszkodzenia. Amplitudy charakterystycznych częstotliwości zwiększają się wraz ze wzrostem obciążenia zarówno w analizie dyskretnej jak i pakietowej. Analiza falkowa przyspieszenia drgań jest odporna na zmiany obciążenia, dodatkowe drgania pochodzące od maszyny roboczej nie utrudniają diagnostyki uszkodzeń łożysk tocznych.

4. Wpływ rodzaju falki na wyniki analizy falkowej

Właściwe dobranie typu falki do charakteru analizowanego sygnału ma ogromny wpływ na wynik analizy. Jej odpowiedni kształt pozwala na wyodrębnienie właściwego sygnału spośród przypadkowych zakłóceń.

Poniżej przedstawiono wyniki ukazujące wpływ zmian rodzaju falki – matki na wyniki pakietowej analizy falkowej. Analizowanym sygnałem jest przyspieszenie drgań. Dotychczasowe badania z wykorzystaniem analizy falkowej przeprowadzane były dla falki Daubechies rzędu 10 (db10). Wyniki uzyskane dla wybranych węzłów z piątego poziomu dekompozycji zostały porównane z dekompozycją przeprowadzoną dla innych falek z rodzin Daubechies, Coiflets, Symlets oraz falek bioortogonalnych.

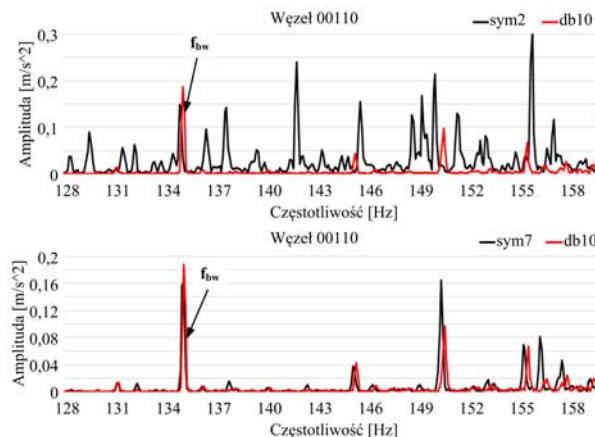
Na rysunku 3 zaprezentowano widma FFT sygnału z węzła 00110 (128–160Hz) z piątego poziomu pełnej dekompozycji dla falek z rodziny Coiflets: *coif1* oraz *coif5*, natomiast na rysunku 4 dla falek z rodziny Symlets: *sym2* oraz *sym7*. Przedział wybranego węzła zawiera w swoim zakresie częstotliwość charakterystyczną f_{bw} .



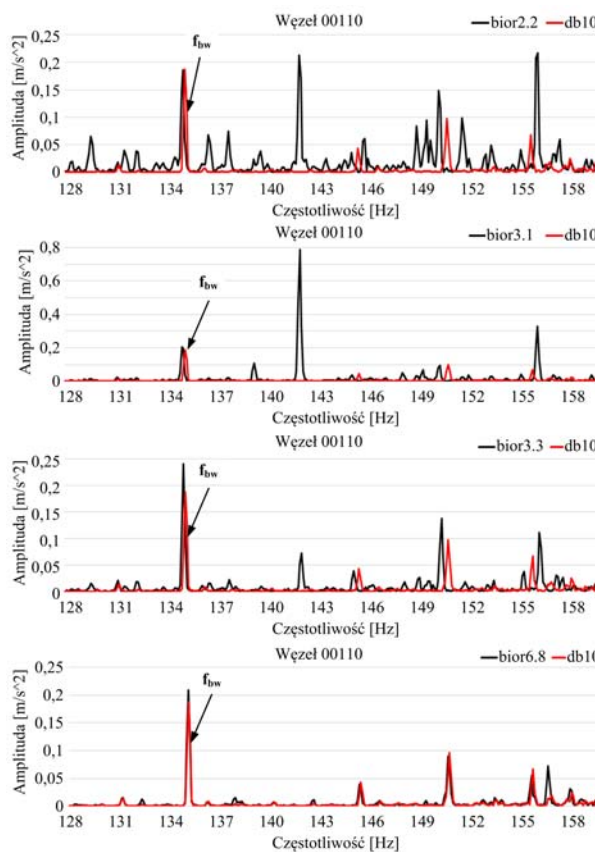
Rys. 3. Widma FFT sygnału z węzła 00110 z piątego poziomu dekompozycji łożyska z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla falek *coif1* oraz *coif5*

Falki Coiflets oraz Symlets są modyfikacjami falek Daubechies wynikającymi z prób wyeliminowania niesymetrii. Falka Coiflets rzędu 1 oraz Symlets rzędu 2 są falkami najniższego rzędu w swoich rodzinach. Użycie tych falek do analizy sygnału przyspieszenia drgań nie daje zadowalających rezultatów. Widmo FFT sygnału z badanego węzła dla tych falek jest o wiele mniej czytelne: wzmocnione są amplitudy przypadkowych częstotliwości, przez co amplituda charakterystycznej dla uszkodzenia bieżni wewnętrznej łożyska częstotliwości nie jest

dominująca w węźle i może być niezauważona. Falka Coiflets rzędu 5 oraz Symlets rzędu 7, będące falkami najwyższego rzędu w swoich rodzinach, dają zadowalający rezultat. Amplituda częstotliwości charakterystycznej f_{bw} jest dominująca w badanym węźle i jest również zbliżona do tej uzyskanej z analizy dla falki db10.



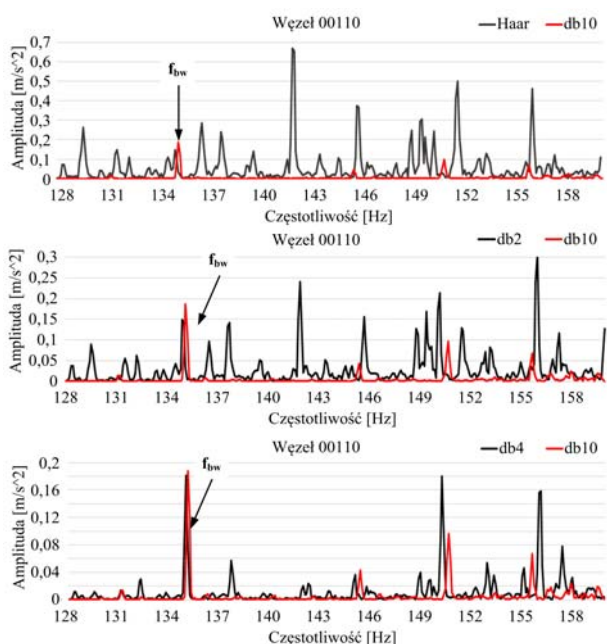
Rys. 4. Widma FFT sygnału z węzła 00110 z piątego poziomu dekompozycji łożyska z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla falek *sym2* oraz *sym7*



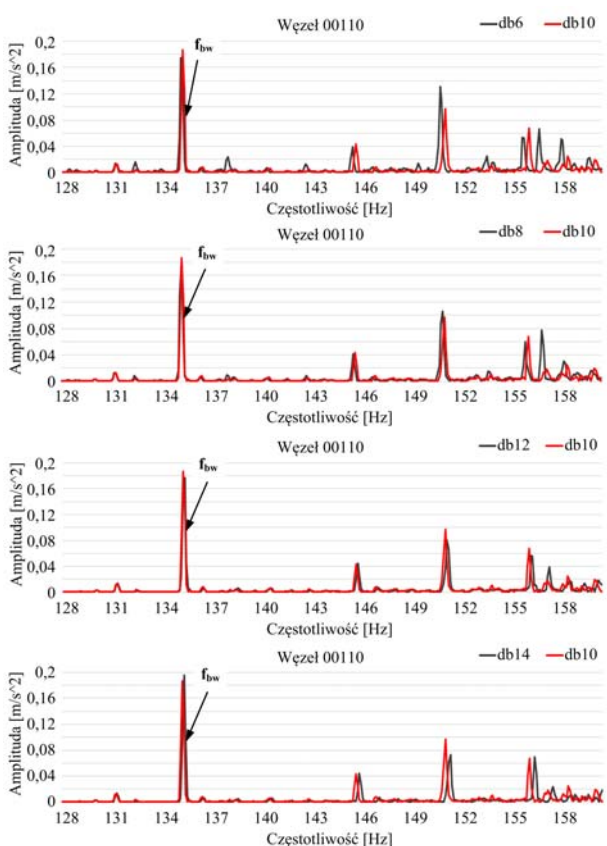
Rys. 5. Widma FFT sygnału z węzła 00110 z piątego poziomu dekompozycji łożyska z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla falek *bior2.2*, *bior3.1*, *bior3.3* oraz *bior6.8*

Na rysunku 5 przedstawiono widma FFT sygnału z węzła 00110 z piątego poziomu pełnej dekompozycji falkowej dla falek bioortogonalnych: *bior2.2*, *bior3.1*, *bior3.3* oraz *bior6.8*. Amplituda częstotliwości charakterystycznej f_{bw} uzyskana z analizy FFT dla falek bioortogonalnych jest równa lub większa amplitudzie uzyskanej dla falki db10. Falki bioortogonalne powodują także wzrost pozostałych amplitud, dla falek *bior2.2* oraz *bior3.1* poszukiwana częstotliwość nie jest dominująca w badanym węźle.

Najlepszy wynik uzyskano dla falki bior6.8, która powoduje stosunkowo mały wzrost amplitud częstotliwości niezwiązanych z uszkodzeniem.



Rys. 6. Widma FFT sygnału z węzła 00110 z piątego poziomu dekompozycji łożyska z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla falek db1 – Haar, db2 oraz db4



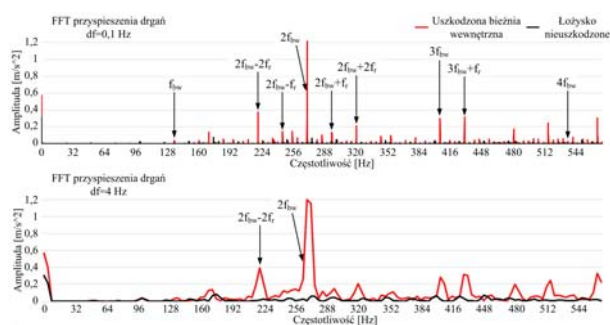
Rys. 7. Widma FFT sygnału z węzła 00110 z piątego poziomu dekompozycji łożyska z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla falek db6, db8, db12 oraz db14

Na rysunkach 6 oraz 7 przedstawiono widma FFT sygnału z węzła 00110 z piątego poziomu pełnej dekompozycji falkowej dla falek z rodziny Daubechies: db1 – Haar, db2, db4, db6, db8, db12 oraz db14. Nawet

w obrębie jednej rodziny falek wyniki uzyskane dla falek różnego rzędu mogą być bardzo zróżnicowane. Z powodu dobrej selekcji częstotliwości uszkodzeniowych i tłumienia przypadkowych zakłóceń wybrano falekę Daubechies rzędu 10 (db10). Falki niższego rzędu (Haar, db2, db4, db6 i db8) powodują wzmacnianie zakłóceń, natomiast wyniki uzyskane dla falek wyższych rzędów (db12 i db14) nie dają lepszych wyników od tych uzyskanych dla db10.

5. Wpływ długości mierzonego sygnału na wyniki analizy falkowej

Czas pomiaru oraz częstotliwość próbkowania determinują ilość próbek, a więc i rozdzielczość badanego sygnału. Rozdzielczość sygnału ma natomiast wpływ na prawidłowe wykrywanie symptomów uszkodzeń.



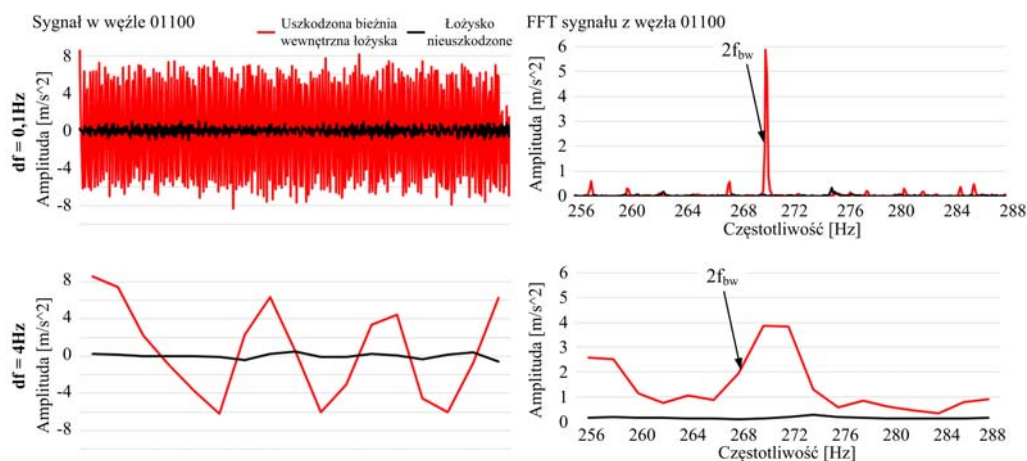
Rys. 8. Widma przyspieszenia drgań uzyskane przy zastosowaniu FFT o rozdzielczości 0,1Hz oraz 4Hz dla łożyska z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną

Tabela 2. Wartości skuteczne oraz wartości energii wybranych węzłów na piątym poziomie dekompozycji sygnału przyspieszenia drgań dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla rozdzielczości $df=0,1$ Hz oraz $df=4$ Hz

Węzeł	df	Łożysko nieuszkodzone		Uszkodzona bieżnia wewnętrzna		Częstotliwość uszkodzeniowa
		RMS	Energia	RMS	Energia	
00100	0,1	0,33	72,96	3,48	7983,26	2f _{bw} -fr
	4	0,33	3,62	3,61	443,59	
00101	0,1	0,2	26,15	1,36	1214,43	2f _{bw} -2fr
	4	0,13	0,56	1,14	44,1	
01011	0,1	0,26	45,2	1,48	1438	3f _{bw} +fr
	4	0,28	2,66	1,76	105,66	
01100	0,1	0,38	95,51	4,59	13852	2f _{bw}
	4	0,32	3,46	4,37	665,97	
01101	0,1	0,35	79,62	1,06	743,38	2f _{bw} +2fr
	4	0,24	1,97	1,13	43,26	

Badania przeprowadzono wykorzystując pakietową analizę falkową na piątym poziomie dekompozycji dla uszkodzenia bieżni wewnętrznej. Zmniejszono liczbę próbek sygnału pomiarowego z 20480 do 512, co zmieniło rozdzielczość widma sygnału z 0,1 do 4 Hz. Czas rejestracji po skróceniu liczby próbek wyniósł 0,25 s. Zastosowanie FFT do analizy takiego sygnału daje widmo o szerokich prążkach, przez co niemożliwe jest odczytanie wszystkich charakterystycznych częstotliwości. Widma FFT sygnału przyspieszenia drgań dla rozdzielczości $df=0,1$ Hz oraz $df=4$ Hz przedstawiono na rysunku 8, natomiast na rysunku 9 zaprezentowano przebiegi czasowe sygnałów oraz widma FFT wybranego węzła pakietowej analizy falkowej dla rozdzielczości $df=0,1$ Hz oraz $df=4$ Hz.

Diagnostyka uszkodzeń łożysk tocznych na podstawie widma FFT sygnałów w wybranych węzłach przy tak małej rozdzielczości jest niemożliwa, można jednak obserwować zmiany wartości skutecznej RMS oraz zmian wartości energii E węzłów dekompozycji pakietowej transformaty falkowej.



Rys. 9. Przebiegi czasowe sygnałów w węźle 01100 z piątego poziomu dekompozycji i ich widma FFT dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla rozdzielczości $df=0,1\text{Hz}$ oraz $df=4\text{Hz}$

W tabeli 2 zestawiono wartości skuteczne sygnałów i wartości energii wybranych węzłów na piątym poziomie dekompozycji dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną. Wzrost tych wartości jest największy w węzłach, w których w zakresach częstotliwości obecne są charakterystyczne częstotliwości uszkodzeniowe. Na tej podstawie, mimo bardzo małej rozdzielczości, można zdiagnozować uszkodzenie danego elementu konstrukcyjnego łożyska.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz wykonanych analiz można sformułować następujące uwagi i wnioski końcowe:

- wykorzystanie nieregularnej i zmiennej w czasie funkcji bazowej (falki) daje znacznie dokładniejsze wyniki podczas analizy sygnałów niestacjonarnych niż użycie stacjonarnej funkcji (sinusoidy),
- wyniki analizy falkowej można przedstawiać w postaci przebiegów czasowych, widma FFT, wartości skutecznej lub wartości energii węzłów,
- wykorzystanie analizy falkowej do analizy sygnału przyspieszenia drgań pozwala na skuteczne wykrywanie oraz identyfikację uszkodzeń łożysk tocznych,
- amplitudy charakterystycznych częstotliwości obecnych w widmie FFT w wybranych węzłach dekompozycji falkowej są kilkukrotnie większe od amplitud w widmie FFT analizowanego sygnału,
- zauważalny jest wzrost wartości skutecznej sygnałów w węzłach pełnej dekompozycji falkowej zawierających w swoich pasmach charakterystyczne częstotliwości uszkodzeniowe,
- analiza falkowa jest odporna na zmiany obciążenia badanego układu napędowego, ale występuje „przesuwanie” charakterystycznych częstotliwości. Duża wartość obciążenia może doprowadzić do „przesunięcia” charakterystycznej częstotliwości do innego węzła pakietowej analizy falkowej,
- prawidłowy dobór typu falki do charakteru analizowanego sygnału ma bardzo istotne znaczenie, odpowiedni kształt pozwala na wyselekcjonowanie właściwego sygnału spośród przypadkowych zakłóceń,
- pakietowa transformata falkowa umożliwia zdiagnozowanie uszkodzenia danego elementu

konstrukcyjnego łożyska nawet przy bardzo małej rozdzielczości analizowanego sygnału. Jednakże realizacja dokładnej diagnostyki wymaga zastosowania wyższej rozdzielczości,

- wykorzystanie środowiska LabVIEW do akwizycji i analizy danych pomiarowych znacznie ułatwia oraz przyspiesza proces diagnostyki uszkodzeń łożysk tocznych.

Autorzy: dr inż. Paweł Ewert, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: pawel.ewert@pwr.edu.pl; mgr inż. Anna Dorosławska, Politechnika Wrocławska

LITERATURA

- [1] Klimowski M., Diagnostyka łożysk tocznych silników elektrycznych przy wykorzystaniu metody analizy częstotliwościowej oraz metody detekcji obwiedni, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 2/2014 (102), 157–163.
- [2] Ewert P., Kowalski C.T., Zastosowanie analizy falkowej do diagnostyki łożysk tocznych silników indukcyjnych, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* Nr 66, Studia i Materiały Nr 32, 2012, 339–345.
- [3] Ewert P., Kowalski C., Wolkiewicz M., Zastosowanie analizy falkowej i sieci neuronowych do diagnostyki łożysk tocznych silników indukcyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 02b/2013, 124
- [4] Kowalski C., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013
- [5] 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* 18 (2004), 199–221.
- [6] Pietrowski W., Falkowa analiza strumienia osiowego silnika indukcyjnego pracującego na biegu jałowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 07b/2012, 20
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Zając M., Sułowicz M., Wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych z wykorzystaniem analizy falkowej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 4/2014 (104), 279–285.