ELEKTROTECHNIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ELECTRICAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-E/2012
ZESZYT 24
ROK 109
ISSUE 24
YEAR 109

ARKADIUSZ DZIECHCIARZ, MACIEJ SUŁOWICZ*

# ZASTOSOWANIE ANALIZY FALKOWEJ DO DIAGNOZOWANIA USZKODZEŃ W SILNIKU INDUKCYJNYM PODCZAS PRACY PRZY ZMIENNYM OBCIĄŻENIU

# APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS FOR INDUCTION MOTOR FAULTS DIAGNOSTICS OPERATING AT VARIABLE LOAD

Streszczenie

Ocena stanu klatki wirnika silnika indukcyjnego opiera się na analizie prądu stojana. Analiza ta może zostać przeprowadzona w stanie ustalonym z wykorzystaniem transformacji FFT. Bardzo dobrym sposobem oceny stanu klatki jest analiza prądu rozruchowego z wykorzystaniem transformacji falkowej. Zaletą tej metody jest to, że możemy zaobserwować nie tylko obecność symptomów świadczących o uszkodzeniu klatki, lecz także charakter ich zmian w czasie. Okazuje się, że charakterystyczne symptomy, które świadczą o uszkodzeniu klatki występują również przy pracy silnika indukcyjnego ze zmiennym momentem obciążenia, czemu towarzyszy zmiana prędkości obrotowej oraz poślizgu. Stany dynamiczne, w których następuje zmiana momentu występują znacznie częściej niż rozruchy silnika, co zwiększa możliwości aplikacji tej metody. W artykule przedstawiono wyniki analizy falkowej prądu stojana silnika zmierzonego podczas pracy ze zmiennym obciążeniem

*Słowa kluczowe*: *silniki indukcyjne*, *diagnostyka*, *analiza falkowa*

Abstract

Technical condition assessment of induction motor can be done with stator current analysis. This analysis can be done in steady state with FFT transform. Starting current analysis with wavelet transform is a very good method of cage condition assessment. The advantage of this method is that we can observe how characteristic components vary in time. Characteristic fault symptoms can be observed when the machine is working with alternating load which causes rotor's angular speed and slip change. Transient states when the load changes, occur very often increases the application of this method. This paper presents the results of application wavelet transform in motor fault diagnostics in transient states.

*Keywords*: *induction motors*, *diagnostics*, *wavelet analysis*

* Mgr inż. Arkadiusz Dziechciarz, dr inż. Maciej Sułowicz, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Obecnie układy napędowe w wielu gałęziach przemysłu oparte są na silnikach indukcyjnych klatkowych. Jest to uwarunkowane względami ekonomicznymi i stosunkowo niedużym kosztem zakupu tych maszyn w porównaniu z innymi rodzajami maszyn do tego samego układu napędowego. Za zastosowaniem silników indukcyjnych w układach napędowych przemawiają również dobre właściwości regulacyjne tych maszyn, które łatwo można uzyskać dzięki połączeniom silnika do układu przekształtnikowego umożliwiającego płynną regulację prędkości obrotowej maszyny indukcyjnej.

Warunki, w jakich pracują maszyny są niekorzystne i często nie do końca przewidywalne. Każda poważna awaria powoduje zatrzymanie procesu technologicznego lub uszkodzenie innych maszyn współpracujących z danym zespołem napędowym, co wiąże się z dużymi stratami ekonomicznymi. Dlatego też wczesne wykrywanie niewielkich uszkodzeń jest tak bardzo ważne, gdyż pozwala uniknąć poważniejszych awarii [3–11]. Stąd też bardzo duże zainteresowanie diagnostyką i potrzebą poszukiwania, opracowywania i udoskonalania metod umożliwiających wczesne wykrywanie uszkodzeń [3–7, 9–11]. Metody bezinwazyjne kontrolowania stanu maszyn są bardzo popularne, gdyż bazują na sygnałach pomiarowo dostępnych, nie ingerując w pracę urządzeń, co pozwala na kontrolę stanu urządzenia w czasie rzeczywistym bez konieczności wyłączenia maszyny.

Dla silników indukcyjnych większość stosowanych metod analiz diagnostycznych, wykorzystuje sygnały diagnostyczne zarejestrowane podczas stanu ustalonego lub rozruchu [3–11]. Bardzo rzadko [10–11] lub w ogóle nie są wykorzystywane sygnały podczas przejściowych stanów pracy maszyny. W niniejszym artykule pokazano jak na tle dobrze znanych i skutecznych metod analizy prądu rozruchowego prezentuje się metoda analiz diagnostycznych przy zmiennym obciążeniu w dynamicznych stanach pracy maszyny. Jest to obiecująca i skuteczna metoda diagnostyczna, szczególnie dla maszyn pracujących w trybie ciągłym, dla których rozruchy występują sporadycznie.

## 2. Uszkodzenie klatki wirnika

Jednym z istotnych elementów silnika, który ulega uszkodzeniu jest wirnik, a w szczególności pręty lub pierścienie zwierające segmenty jego klatki. Pęknięcie pręta klatki czy pierścienia zwierającego powoduje powstanie magnetycznej oraz prądowej niesymetrii w obwodzie wirnika, co również przekłada się na niesymetrię stojana, która pociąga za sobą wiele negatywnych zjawisk, takich jak:

- zwiększenie strat i obniżenie sprawności,
- zwiększenie przyrostu temperatury uzwojenia stojana,
- odkształcenie przebiegu momentu rozruchowego,
- zwiększenie naciągu magnetycznego (większe obciążenie łożysk).

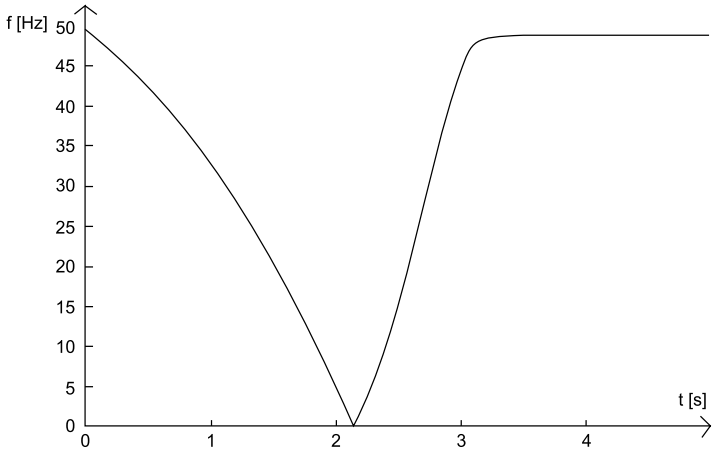
Nawet drobne pęknięcie pręta rozpoczyna proces niszczenia klatki. Uszkodzenie pręta klatki ma swoje odzwierciedlenie w widmie prądu stojana, gdyż na skutek powstałej niesymetrii indukują się dodatkowe składowe prądu określone wzorem [5, 6]:

$$f_b = (1 \pm 2ks) f_s \tag{1}$$

gdzie:

$f_b$ – wykrywalne częstotliwości uszkodzeń prętów,
$s$ – poślizg,
$k = 1, 2, 3, \ldots$,
$f_s$ – częstotliwość napięcia zasilającego.

Lewa harmoniczna poślizgowa jest opisana wzorem $f_b = (1 - 2ks)f_s$ i jest ona najczęściej wyszukiwanym symptomem w sygnale prądu świadczącym o uszkodzeniu klatki. Przebieg tej harmonicznej podczas rozruchu silnika przedstawiono na rys. 1.




Rys. 1. Zmiana częstotliwości lewej harmonicznej poślizgowej podczas rozruchu silnika
Fig. 1. Left sideband harmonic waveform during motor start

Częstotliwość lewej harmonicznej poślizgowej wynosi 50 Hz w chwili, gdy maszyna jest załączana do pracy. W początkowej fazie rozruchu, gdy wirnik przyśpiesza, częstotliwość ta maleje i osiąga wartość 0 Hz dla poślizgu równego $s = 0{,}5$. Od tego momentu częstotliwość ponownie zwiększa się, osiągając prawie 50 Hz w stanie ustalonym. W stanie ustalonym częstotliwość harmonicznej poślizgowej jest prawie równa częstotliwości napięcia zasilającego.

Bardzo istotnym zadaniem jest wyodrębnienie tej składowej z rejestrowanego sygnału prądu rozruchowego. Szczególnie zauważalne w prądzie rozruchowym są zmiany harmonicznej poślizgowej przy uszkodzeniu klatki wirnika. Znanych jest kilka metod, które umożliwiają jej wyodrębnienie. Są to filtracja cyfrowa sygnałów, jak również ciągła i dyskretna transformacja falkowa.

## 3. Podstawy analizy falkowej

Ciągła transformacja falkowa sygnału $x(t)$ określona jest zależnością [1, 2]:

$$CWT_x(a,b) = (x, \psi_{a,b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi^*_{a,b}(t)\,dt \tag{2}$$

gdzie:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{3}$$

jest tzw. falką matką.

Parametr $a$ jest współczynnikiem skali, od którego zależy kształt falki, natomiast parametr $b$ jest współczynnikiem przesunięcia. Mnożenie przez współczynnik $\frac{1}{\sqrt{a}}$ ma zapewnić stałość energii sygnału po transformacji. Duże wartości parametru $a$ ($a >> 1$) powodują rozciąganie falki i w związku z tym pomaga wyizolować długotrwałe cechy dynamiki sygnału, a w szczególności jego zachowanie się w stanie ustalonym.

Małe wartości parametru $a$ ($0 < a$ 1) odpowiadają za ściskanie falki, dzięki czemu można zidentyfikować krótkotrwałe zachowania się sygnału. Wynik działania ciągłej transformacji falkowej badanego sygnału przedstawiane są na skalogramie, który przedstawia energię obliczonych współczynników falkowych za pomocą całki (2).

Ciągła transformata falkowa jest bardzo nadmiarowa z punktu widzenia diagnostyki. Poza tym wszelkie obliczenia przeprowadzane są za pomocą komputerów, które operują na słowach bitowych o skończonej długości oraz dysponują skończonym rozmiarem pamięci. Oznacza to, że niemożliwa jest zmiana parametrów skali $a$ oraz przesunięcia $b$ w sposób ciągły. Dlatego też wykorzystuje się skończony zbiór wartości parametrów skali oraz przesunięcia. Poddając parametr skali $a$ oraz przesunięcia $b$ dyskretyzacji, uzyskujemy dyskretną transformatę falkową.

Współczynnik skali i przesunięcia kwantyzuje się według wzoru [2]:

$$a = a_0^j \tag{4}$$

$$b = b_0 n a_0^j \tag{4a}$$

gdzie:

$j, n$ – są odpowiednio współczynnikiem skali oraz przesunięcia.

Po podstawieniu do wzoru (3) oraz przekształceniu otrzymujemy:

$$\psi_{j,n}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}}\psi(a_0^{-j}t - nb_0) \tag{5}$$

Przyjmując $a_0 = 2$ i $b_0 = 1$, uzyskuje się diadyczną ortonormalną bazę falkową przestrzeni $L^2(R)$.

$$\psi_{j,n}(t) = 2^{-\frac{j}{2}}\psi(2^{-j}t - n) = 2^{-\frac{j}{2}}\psi\left(\frac{t-2^j n}{2^j}\right) \tag{6}$$

Z powyższego wzoru widać, że współczynnik skali $2^{-j}$ jest związany z odwrotnością częstotliwości. Zmiana wartości $j$ o 1 odpowiada dwukrotnej zmianie (skali) częstotliwości, mówimy więc w tym wypadku o skalowaniu diadycznym. Przesunięcie funkcji również zależy od współczynnika skali i wynosi $2^j n$. Współczynnik $2^{-\frac{j}{2}}$ jest współczynnikiem normalizującym.

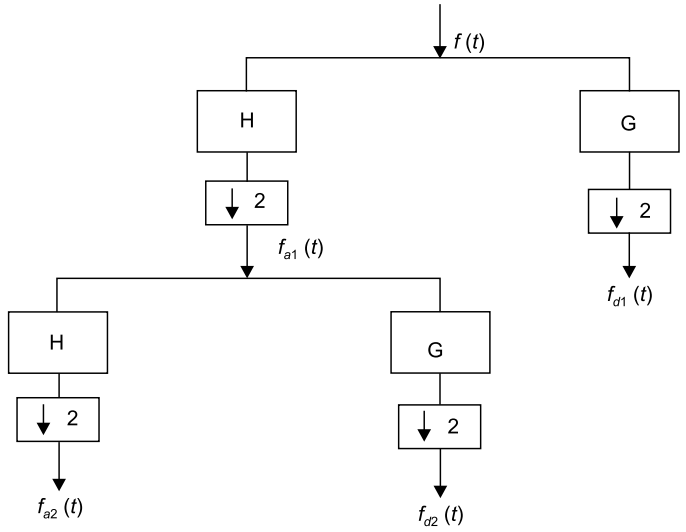
Dyskretna transformacja falkowa określona jest wzorem przedstawionym poniżej.

$$DWTx_{j,n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\psi^*_{j,n}(n) \tag{7}$$

Dyskretna transformacja falkowa jest ściśle powiązana z analizą wielorozdzielczą. Badany sygnał może być przedstawiony w przestrzeniach o różnej rozdzielczości, a co za tym idzie może zawierać mniej bądź więcej składowych wysokoczęstotliwościowych, co z kolei przesądza o dokładności aproksymacji.

Za pomocą dyskretnej transformacji falkowej przeprowadza się pasmową filtrację sygnału. Do takiej filtracji wykorzystuje się funkcję skalującą oraz odpowiadającą jej falkę. Charakterystyka częstotliwościowa funkcji skalującej przypomina charakterystykę filtru dolnoprzepustowego, natomiast charakterystyka częstotliwościowa falki – filtru górnoprzepustowego. Współczynniki takich filtrów cyfrowych są ściśle powiązane z rodzajem falki oraz funkcji skalującej. Funkcja skalująca służy więc do aproksymacji sygnału, natomiast falka do wyodrębnienia składowych wysokoczęstotliwościowych.

Filtrację sygnału $f(t)$ na drugim poziomie dekompozycji przedstawia poniższy rysunek.




Rys. 2. Filtracja sygnału na drugim poziomie dekompozycji filtrami dolnoprzepustowymi *H* oraz górnoprzepustowymi *G* [2]

Fig. 2. Second level decomposition of a signal with highpass filters *H* and lowpass filters *G* [2]

Sygnał $f(t)$ jest równolegle podawany na wejście filtru dolnoprzepustowego *H*, który odpowiada funkcji skalującej $\varphi(t)$ oraz pasmowoprzepustowego (górnoprzepustowego) *G*, który odpowiada funkcji falkowej $\psi(t)$.

Składnik $f_{d1}(t)$ zawiera składowe wysokoczęstotliwościowe sygnału $f(t)$ uzyskane po filtracji sygnału na pierwszym poziomie i jest to tzw. detal. Z kolei składnik $f_{a1}(t)$ jest aproksymacją sygnału $f(t)$ na pierwszym poziomie dekompozycji uzyskaną w wyniku filtracji dol-

noprzepustowej. Sygnał $f_{a1}(t)$ jest ponownie przepuszczany równolegle przez parę filtrów w wyniku czego otrzymujemy detal $f_{d2}(t)$ z poziomu drugiego dekompozycji oraz aproksymację $f_{a2}(t)$ na poziomie drugim.

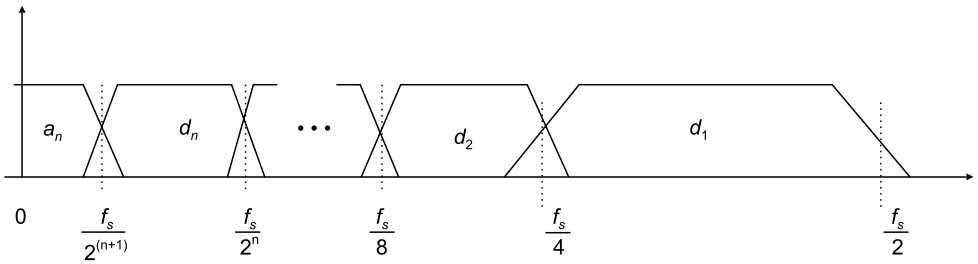
Wówczas zachodzą następujące równości:

$$\begin{aligned} f_{a1}(t) &= f_{a2}(t) + f_{d2}(t) \\ f(t) &= f_{a1}(t) + f_{d1}(t) \end{aligned} \tag{8}$$

Proces filtracji jest nadmiarowy. W wyniku filtracji sygnału o $n$ próbkach dostajemy sygnał o długości $2n$. Dlatego też, aby temu zapobiec stosuje się tzw. downsampling, czyli usunięcie co drugiej próbki sygnału wejściowego, co na rys. 2. zaznaczone jest symbolem $\downarrow 2$.

Dekompozycję sygnału można przeprowadzić na dowolnej liczbie poziomów w zależności od potrzeb.

Każdy z $n + 1$ sygnałów, które otrzymuje się w wyniku dekompozycji oryginalnego sygnału na $n$-tym poziomie, zawiera składowe oryginalnego sygnału należące do określonego pasma częstotliwości.




Rys. 3. Pasma częstotliwości skojarzone z dekompozycją sygnału [6]

Fig. 3. Frequency bandwidths of DWT [6]

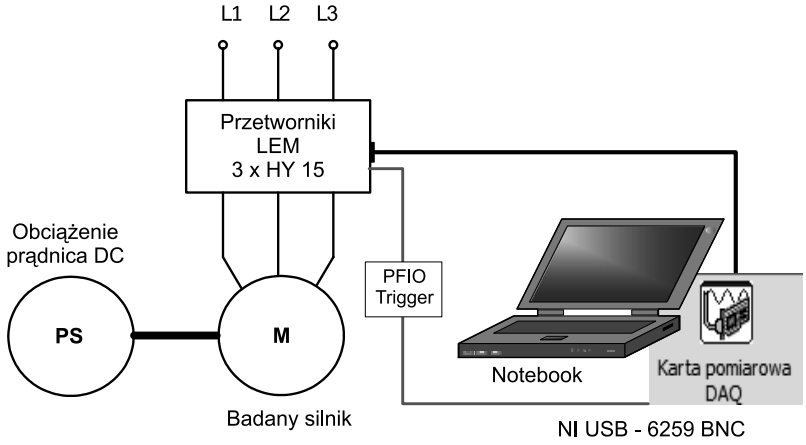
Na rysunku 3 widać zachodzenie poszczególnych pasm na siebie, co sprawia, że występują pewne przecieki pomiędzy sąsiednimi pasmami. Aby zminimalizować to zjawisko, do dekompozycji sygnału należy zawsze wybierać falkę o najwyższym rzędzie z danej rodziny falek.

## 4. Układ do rejestracji sygnałów i metoda pomiaru

W celu wyodrębnienia charakterystycznych cech z sygnałów, które świadczą o uszkodzeniu klatki przy pracy silnika indukcyjnego ze zmiennym momentem obciążenia, przygotowano układ pomiarowy do rejestracji sygnałów prądów stojana w stanach dynamicznych.

Badano zakłócenia momentu obciążenia dla silnika zdrowego i silnika z uszkodzeniem pręta klatki wirnika. Badania były prowadzone dla silnika Sg112M-4 o danych znamionowych: $P_N = 4$ kW, $U_N = 380$ V ($\Delta$), $I_N = 8{,}6$ A, $n_N = 1430$ obr/min. Obciążenie silnika stanowiła prądnica prądu stałego, która pozwalała na dowolne obciążanie badanego silnika i symulowanie zakłóceń momentu obciążenia.

Schemat ideowy połączenia elementów stanowiska pomiarowego z układem akwizycji sygnałów przedstawiono na rys. 4.




Rys. 4. Ideowy schemat systemu akwizycji do badanego silnika
Fig. 4. Schematic of acquisition system

Wszystkie pomiary wykonano za pomocą zestawu akwizycji sygnałów składającego się z następujących elementów: karty pomiarowej NI USB-6259 BNC, przetworników prądowych LEM HY-15 z przekaźnikowym układem do wyzwalania pomiarów oraz komputera PC z oprogramowaniem do zbierania danych napisanym w języku Matlab.

Dla badanego silnika dla każdego przypadku zarejestrowano w tych samych chwilach czasowych przebiegi czasowe trzech prądów. Wszystkie sygnały rejestrowano z częstotliwością próbkowania 10 kHz, przy konfiguracji wejść analogowych karty pomiarowej w trybie różnicowym. Dane zbierano przez 60 sekund od chwili wyzwolenia pomiaru prądu rozruchowego przez układ wyzwalania. Pomiar był wyzwalany automatycznie przez podanie sygnału wyzwalającego z przekaźnika na wejście cyfrowe PFI0 karty pomiarowej.

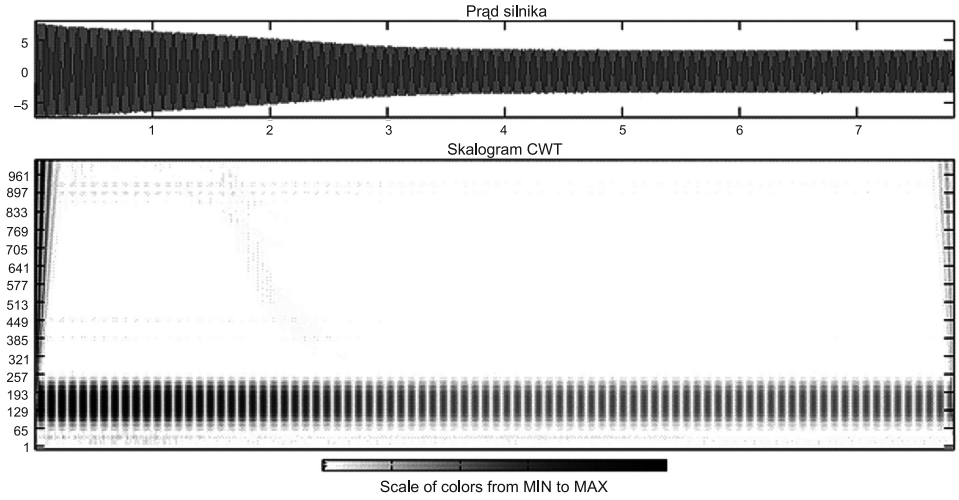
Po upływie około 10 sekund od rozruchu maszyny dokonano kilkukrotnego zakłócenia momentu obciążenia.

## 5. Wykrywanie uszkodzeń

Badanie stanu klatki wirnika można przeprowadzić dokonując analizy FFT prądu silnika i poszukując prążków o charakterystycznych częstotliwościach, które opisuje wzór (1). Metoda ta ma jednak swoje wady, gdyż pokazuje globalną zawartość częstotliwości w sygnale prądu, lecz nie mówi nam nic o czasie ich występowania. Z tego względu nadaje się tylko analizy prądu silnika w stanie ustalonym. Brak informacji o czasie wystąpienia określonych harmonicznych nie daje pewności, czy przyczyną ich obecności w widmie prądu jest na pewno uszkodzenie klatki. Klasyczny sposób diagnozowania uszkodzeń klatki wirnika wykorzystujący analizę falkową polega na badaniu prądu rozruchowego silnika.

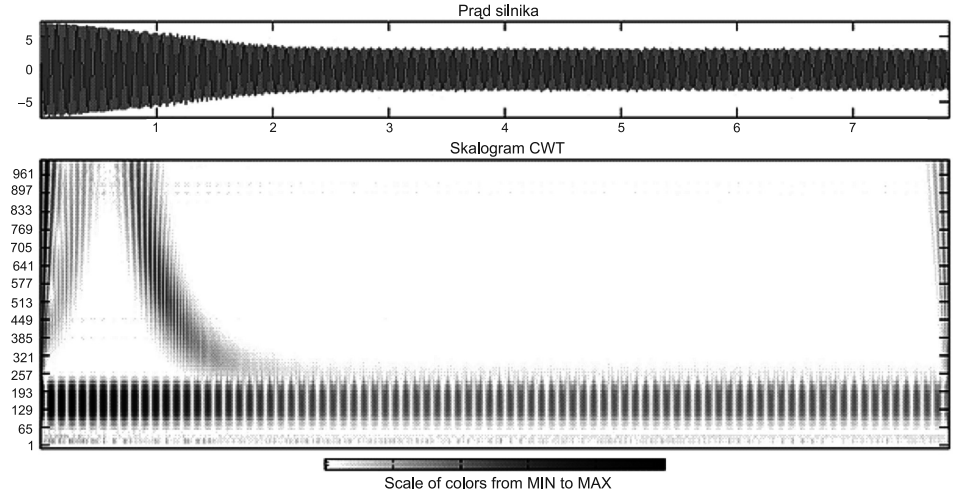
Rozruch silnika jest stanem przejściowym pracy maszyny, a więc sygnał prądu rozruchowego jest sygnałem niestacjonarnym. Do analizy sygnałów niestacjonarnych służą tzw. metody czasowo-częstotliwościowe, takie jak: STFT, transformacja Gabora czy też analiza falkowa.

Analiza falkowa jest przekształceniem czasowo-częstotliwościowym, dzięki czemu otrzymujemy informację na temat rozkładu częstotliwości w czasie. Ta cecha czyni przekształcenie falkowe bardzo przydatnym narzędziem do analizy sygnałów niestacjonarnych.




Rys. 5. Analiza prądu rozruchowego – silnik bez uszkodzeń

Fig. 5. Starting current analysis – healthy motor




Rys. 6. Analiza prądu rozruchowego – silnik z uszkodzoną klatką

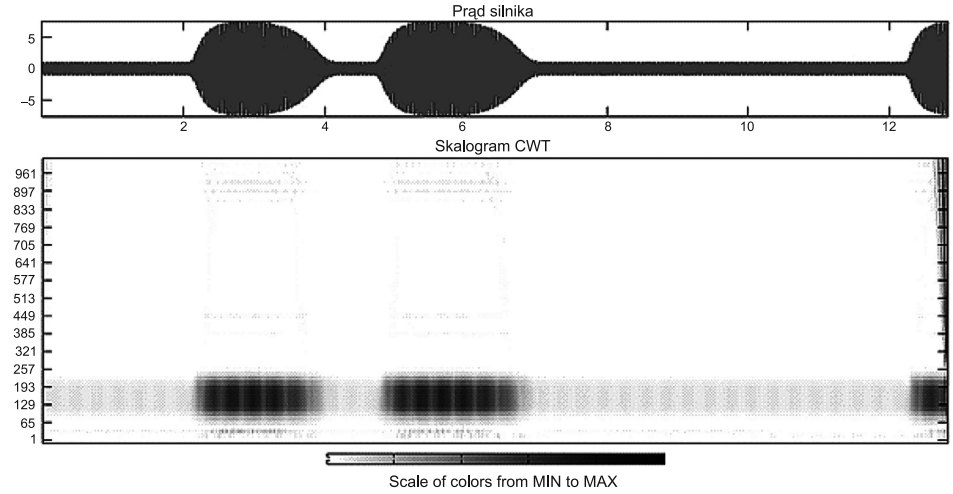
Fig. 6. Starting current analysis – broken bar

Badając prąd rozruchowy za pomocą falek otrzymujemy klarowny przebieg wspomnianej wcześniej lewej harmonicznej poślizgowej.

Wyniki ciągłej transformacji falkowej prądu rozruchowego przedstawiono na powyższych rysunkach. Do analizy wykorzystano falkę Morleta.

W przypadku uszkodzenia klatki wirnika w prądzie rozruchowym obecna jest lewa harmoniczna poślizgowa, co widać na rys. 6. Można zaobserwować jej przebieg na skalogramie, przy czym jest on odwrócony w stosunku do przebiegu pokazanego na rys. 1. Spowodowane jest to faktem, iż częstotliwość reprezentowana przez falkę jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika skali, a więc dla liniowego charakteru zmian częstotliwości otrzymamy nieliniowy przebieg na skalogramie. Na skalogramie dla silnika bez uszkodzeń przebiegu omawianej harmonicznej nie widać. Analiza prądu rozruchowego silnika indukcyjnego bardzo dobrze się sprawdza w wykrywaniu uszkodzeń klatki wirnika. Problemem jest jednak fakt, że w niektórych przypadkach rozruch silnika jest dokonywany rzadko, silnik pracuje bez przerwy przez dłuższy czas, więc badanie prądu rozruchowego byłoby w tym przypadku dość ograniczone. Jednak obciążenie silnika z reguły nie jest stałe zwłaszcza w przypadku układów napędowych. Stany przejściowe, takie jak zmiany momentu obciążenia i towarzyszące im zmiany prędkości obrotowej, występują bardzo często przy pracy silnika indukcyjnego.

Dlatego też uzasadnione wydaje się analizowanie prądu silnika w stanach przejściowych. Zmianie momentu obciążenia silnika indukcyjnego towarzyszy zmiana prędkości obrotowej, a co za tym idzie zmiana poślizgu, podobnie jak podczas rozruchu. Poniżej przedstawiono wyniki analizy falkowej prądu silnika podczas pracy ze zmiennym obciążeniem.

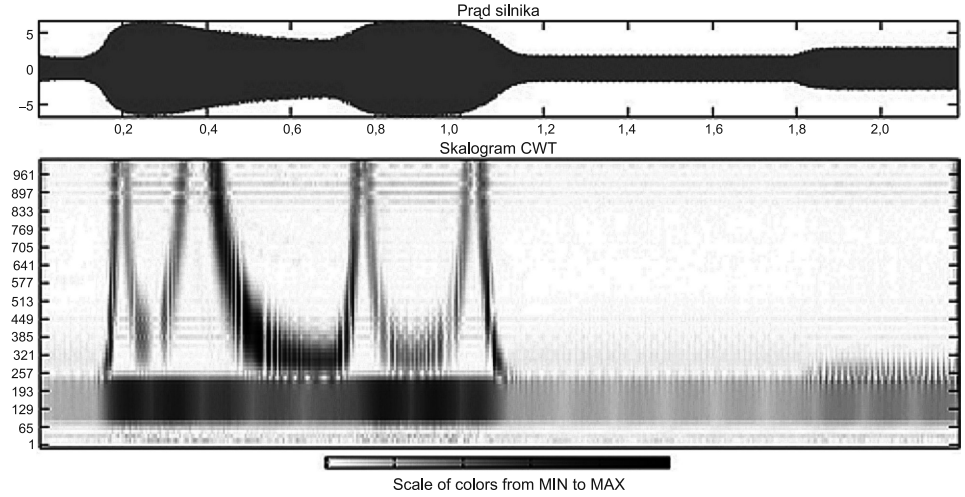



Rys. 7. Analiza prądu silnika w stanach przejściowych – silnik bez uszkodzeń

Fig. 7. Stator current in transient states – healthy motor

Na rysunku 8 widać, że przy każdej zmianie wartości prądu silnika na skalogramie pojawiają się dodatkowe współczynniki falkowe, które swoim rozmieszczeniem przypominają przebieg lewej harmonicznej poślizgowej, podobnie jak w przypadku rozruchu silnika. Wy-

krywanie obecności lewej harmonicznej poślizgowej w sygnale prądu silnika można również przeprowadzić za pomocą analizy wielorozdzielczej. Dekompozycję sygnału przeprowadzono do poziomu ósmego. Występowania charakterystycznej częstotliwości poszukiwano w sygnale aproksymacji i detalu ósmego. Zakresy częstotliwości zawartych w poszczególnych detalach oraz aproksymacji sygnału przedstawione są w tabeli poniżej.




Rys. 8. Analiza prądu silnika w stanach przejściowych – silnik z uszkodzoną klatką

Fig. 8. Stator current in transient states – broken bar

Tabela 1

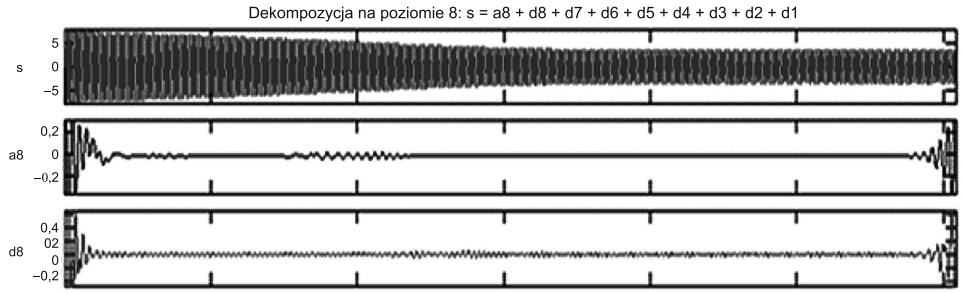
**Przedziały częstotliwości związane z poziomami dekompozycji**

| Poziom dekompozycji | Przedziały częstotliwości dla aproksymacji | Przedziały częstotliwości dla detali |
|---|---|---|
| 1 | 0–2,5 kHz | 2,5–5 kHz |
| 2 | 0–1,25 kHz | 1,25–2,5 kHz |
| 3 | 0–625 Hz | 0,625–1,25 kHz |
| 4 | 0–312,5 Hz | 312,5–625 Hz |
| 5 | 0–156,25 Hz | 156,25–312,5 Hz |
| 6 | 0–78,125 Hz | 78,125–156,25 Hz |
| 7 | 0–39,06 Hz | 39,06–78,125 Hz |
| 8 | 0–19,53 Hz | 19,53–39,06 Hz |

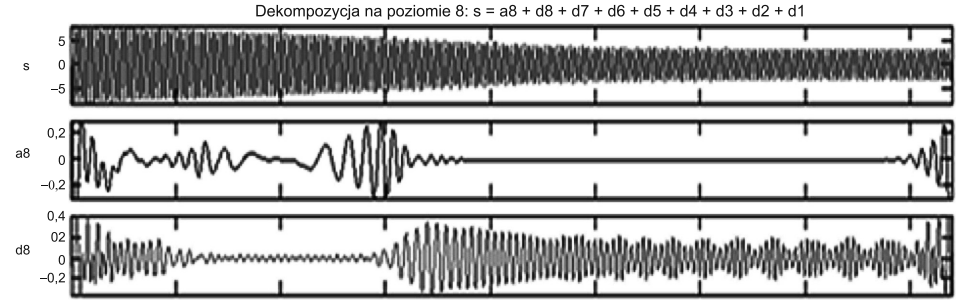
Do analizy użyto falki Daubechies45 (db45) jako falki o najwyższym rzędzie z rodziny falek Daubechies w celu zminimalizowania zjawiska przecieków częstotliwości pomiędzy sąsiednimi pasmami.

Sygnał aproksymacji dla silnika zdrowego jest poza brzegami niemal równy zero. Ewentualne wartości, które się pojawiają są bardzo małe. Tak samo jest w przypadku detalu ósme-

go. W przypadku silnika z uszkodzonymi prętami sygnał aproksymacji przyjmuje większe wartości w dwóch miejscach, po czym maleje do zera. Podobnie jest z detalem ósmym, którego wartość oscyluje wokół zera tylko w wąskim przedziale czasu, natomiast poza nim przyjmuje znacznie większe wartości.



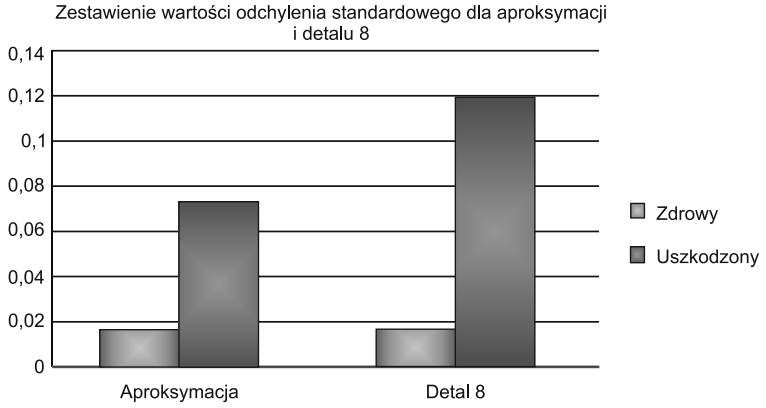

Rys. 9. Dekompozycja sygnału prądu silnika zdrowego na poziomie 8 – rozruch silnika
Fig. 9. Healthy motor's current decomposition on 8th level – motor's start



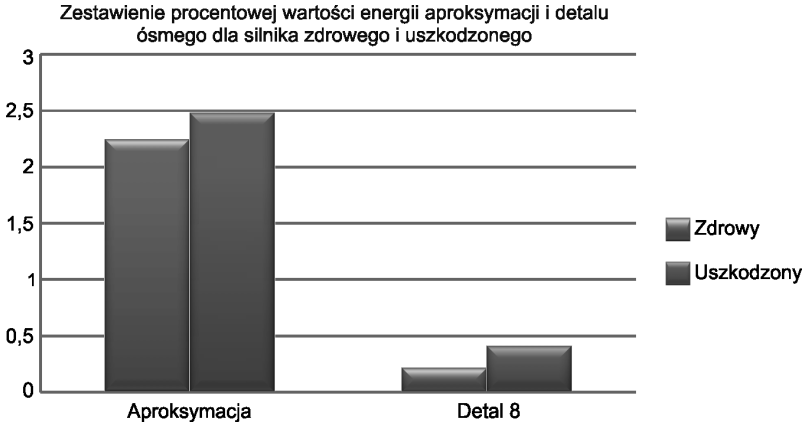

Rys. 10. Dekompozycja sygnału prądu silnika uszkodzonego na poziomie 8 – rozruch silnika
Fig. 10. Decomposition of faulty motor's current on 8th level – motor's start

Dobrym parametrem określającym różnicę w szczegółach w badanych sygnałach dla obu przypadków jest odchylenie standardowe [8]. Procentowa wartość energii poszczególnych detali oraz aproksymacji zawiera również cenne informacje o zmianach występujących w sygnałach uzyskanych po dekompozycji falkowej sygnału prądu silnika. Wartość odchylenia standardowego, jak i procentowej energii obliczono dla sygnału aproksymacji oraz detalu ósmego dla dwóch badanych przypadków, gdyż w tych sygnałach zawiera się przebieg lewej harmonicznej poślizgowej. Porównanie ich wartości przedstawiono na rys. 11 oraz rys. 12. Widać, że w przypadku silnika uszkodzonego, wartość odchylenia standardowego przyjmuje znacznie większe wartości niż dla silnika zdrowego.

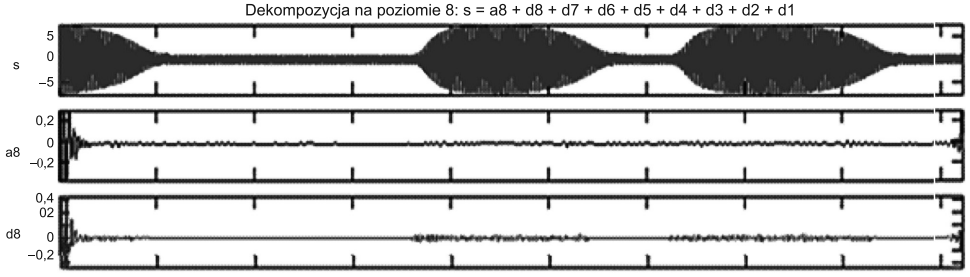
Podobnie dzieje się w przypadku procentowej energii detalu ósmego oraz aproksymacji. Spowodowane jest to tym, iż w przypadku wystąpienia uszkodzenia prętów klatki rośnie amplituda lewej harmonicznej poślizgowej, a więc procentowa energia sygnału zawierającego lewą harmoniczną poślizgową jest większa.



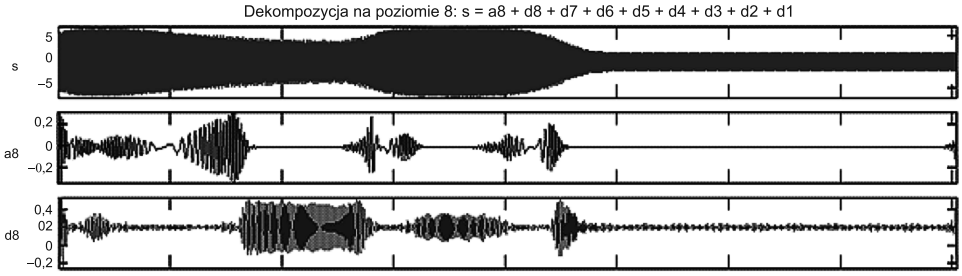

Rys. 11. Wartości odchylenia standardowego dla silnika zdrowego i uszkodzonego
Fig.11. Standard deviation for healthy motor and motor with faults



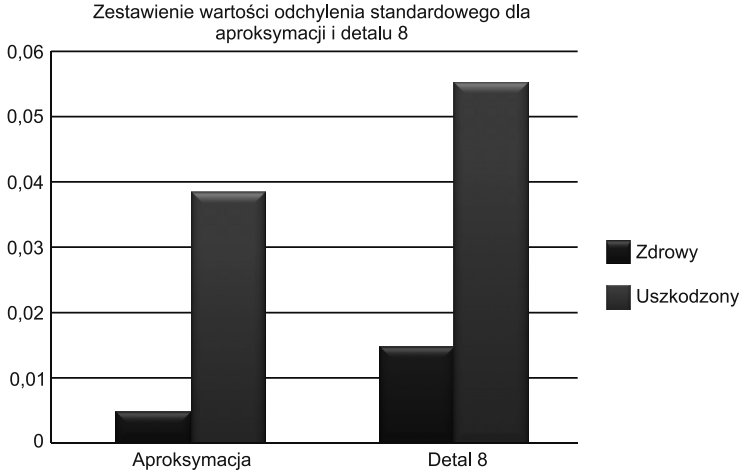

Rys. 12. Wartości procentowej energii dla silnika zdrowego i uszkodzonego
Fig. 12. Percentage energy for healthy motor and motor with faults




Rys. 13. Dekompozycja sygnału prądu silnika zdrowego na poziomie 8 – zmienne obciążenie
Fig. 13. Healthy motor's current decomposition on 8th level – transient states




Rys. 14. Dekompozycja sygnału prądu silnika uszkodzonego na poziomie 8 – zmienne obciążenie
Fig. 14. Decomposition of faulty motor's current on 8th level – transient states

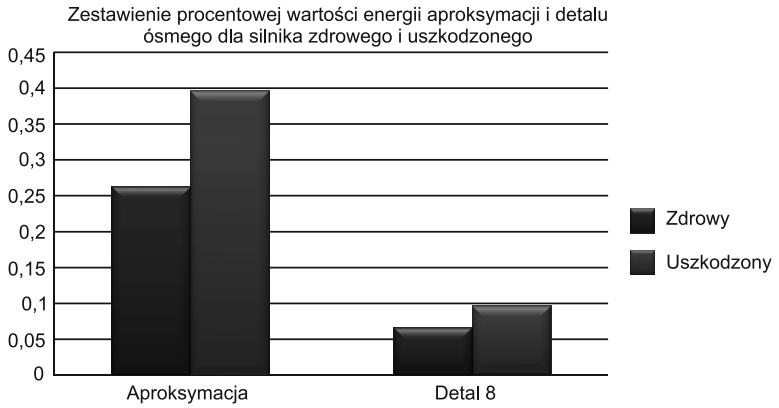



Rys. 15. Wartości odchylenia standardowego dla silnika zdrowego i uszkodzonego – zmienne obciążenie
Fig. 15. Standard deviation for healthy motor and motor with faults – transient states

W trakcie pomiarów, silnik zasilany był obniżonym napięciem 230 V. Po dokonaniu rozruchu silnika zmieniano moment obciążenia przez zmianę napięcia wzbudzenia prądnicy obcowzbudnej, która była sprzęgnięta wałem z badanym silnikiem. Celem takiego działania było uzyskanie przejściowych stanów pracy silnika indukcyjnego.

Zwiększenie momentu obciążenia skutkowało wzrostem prądu silnika, co można zaobserwować na przebiegach z rys. 13 oraz rys. 14. Jak widać, przebiegi prądów na omawianych rysunkach nieco się różnią. Ich wartości zwiększają się w innych chwilach czasowych. Wynika to z faktu, iż w obydwu przypadkach chwile załączania momentu obciążenia były różne, co więcej czas trwania stanu obciążenia też był inny. Nie wpływa to jednak na przeprowadzenie analiz dla uzyskanych sygnałów, gdyż istotą przeprowadzonych badań było zbadanie występowania symptomów uszkodzenia podczas zmiennych warunków pracy silnika. Na rys. 13 widać, że podczas zmiany wartości prądu wartość współczynników aproksymacji praktycznie nie ulega zmianie. Poza brzegami wartość aproksymacji jest praktycznie równa

zero, a ewentualne zmiany są bardzo małe i trudno dostrzegalne w tej skali. Wartości detalu ósmego zachowują się podobnie. Na rys. 14 przedstawiono przebiegi sygnału prądu i jego dekompozycji dla silnika z uszkodzonymi prętami klatki wirnika. W tym przypadku aproksymacja sygnału prądu osiąga większe wartości podczas stanów przejściowych. Widać wyraźnie, że przy zmianie wartości prądu pojawiają się większe wartości aproksymacji, która osiąga wartość bliską zero po czasie około sześciu sekund, gdy moment obciążenie został wyłączony.




Rys. 16. Wartości procentowej energii dla silnika zdrowego i uszkodzonego
Fig. 16. Percentage energy for healthy motor and motor with faults

Podobny charakter ma przebieg ósmego detalu, który oscyluje wokół zera, zwiększając swoją wartość przy zmianach wartości prądu silnika. Odchylenie standardowe aproksymacji i detalu ósmego jest większe w przypadku silnika uszkodzonego niż w przypadku silnika zdrowego. Porównanie ich wartości zobrazowano na rys. 15. Również procentowa wartość energii aproksymacji oraz detalu ósmego jest większa w przypadku uszkodzonego silnika niż w przypadku silnika zdrowego. Spowodowane jest to tym, iż przy zmianie prędkości obrotowej (a więc również przy zmianie poślizgu), w sygnale prądu silnika uszkodzonego pojawia się przebieg lewej harmonicznej poślizgowej, co powoduje zwiększenie się energii aproksymacji oraz detalu ósmego.

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki zastosowania analizy falkowej w diagnostyce silników indukcyjnych. Ze względu na charakter sygnałów poddanych analizie, falki okazały się skutecznym narzędziem do ekstrakcji charakterystycznych cech sygnałów świadczących o uszkodzeniu maszyny. Analiza sygnału prądowego polegała na jego badaniu podczas pracy silnika przy zmiennej prędkości wirowania, takich jak rozruch silnika i praca przy obciążeniu zmiennym momentem oporowym. Podczas takich zmian najbardziej uwydatniają się zjawiska świadczące o awarii silnika. Ponadto amplitudy składowych odpowiadających konkretnemu uszkodzeniu są zazwyczaj większe w stanach przejściowych niż w stanach ustalonych.

Stosowanie metod o charakterze lokalnym, a taką metodą jest bez wątpienia analiza falkowa, jest w tym przypadku wskazane.

Dzięki zastosowaniu ciągłej transformacji falkowej obecność symptomów świadczących o awarii klatki wirnika możemy wykryć wizualnie gdyż współczynniki falkowe zawarte na skalogramie bardzo dobrze obrazują przebieg tzw. lewej harmonicznej poślizgowej, charakterystycznej składowej przy uszkodzeniu klatki wirnika. Zastosowanie analizy wielorozdzielczej sygnału prądu również dawało bardzo dobre rezultaty w poszukiwaniu cech sygnału świadczących o uszkodzeniu. Podobnie jak w poprzednim przypadku, metoda bardzo dobrze się sprawdzała podczas rozruchu i podczas pracy silnika przy zmiennym momencie obciążenia. Poziom dekompozycji zapewniał zawieranie się lewej harmonicznej poślizgowej w sygnale aproksymacji oraz detalu z najwyższego poziomu, gdyż górna graniczna częstotliwość pasma tych sygnałów była mniejsza od wartości częstotliwości napięcia zasilania.

Należy podkreślić, że zaprezentowana w artykule metoda diagnostyki silników przy zmiennym momencie obciążenia jest bardzo obiecująca i można z powodzeniem zastosować ją do maszyn pracujących ciągle i niemających zbyt wielu rozruchów. W trakcie pracy tych maszyn częściej niż rozruchy będą występować stany dynamiczne, w których następuje zmiana momentu warunkująca powodzenie stosowania przedstawionej metody. Połączenie tej metody diagnostycznej oraz możliwości automatycznej rejestracji sygnałów podczas występowania stanów dynamicznych może pozwolić w przyszłości na opracowanie automatycznych systemów do skutecznej ceny stanu klatki silników indukcyjnych pracujących w trybie ciągłym.

## Literatura


[1] Białasiewicz J.T., *Falki i aproksymacje*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.

[2] Augustyniak P., *Transformacja falkowe w zastosowaniach elektrodiagnostycznych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.

[3] Kowalski C.T., *Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce silników indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny R. 82, Nr 1/2006.

[4] Rad M., *Ciągła transformata falkowa jako narzędzie wspierające diagnostykę silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 77/2007.

[5] Rad M., *Automatyczna diagnostyka klatki wirnika na podstawie prądu rozruchu silnika indukcyjnego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 79/2008.

[6] Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J.A., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., *A general approach for the transient detection of slip-dependent fault components based on the discrete wavelet transform*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, no. 12, December 2008.

[7] Cusido J., Romeral L., Ortega J.A., Rosero J.A., Garcia Espinosa A., *Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.55, no.2, pp.633-643, Feb. 2008.

[8] Zając M., *Metody falkowe w monitoringu i diagnostyce układów elektromechanicznych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009.

[9] Kechida R., Menacer A., *DWT wavelet transform for the rotor bars faults detection in induction motor*, Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference, Nov. 2011, 1-5, 15-17.

[10] Antonino-Daviu J., Aviyente S., Strangas E., Riera-Guasp M., *A scale invariant algorithm for the automatic diagnosis of rotor bar failures in induction motors*, Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium, 27–30 June 2011, 496-501.

[11] Gritli Y., Rossi C., Zarri L., Filippetti F., Chatti A., Casadei D., Stefani A., *Advanced diagnosis of broken bar fault in induction machines by using Discrete Wavelet Transform under time-varying condition*, Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, 15–18 May 2011, 424-429.