

Marcin Wolkiewicz, Czesław T. Kowalski
Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych

DIAGNOSTYKA USZKODZEŃ UZWOJEŃ STOJANA SILNIKA INDUKCYJNEGO Z WYKORZYSTANIEM DYSKRETNEJ TRANSFORMATY FALKOWEJ OBWIEDNI PRĄDU STOJANA

DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTOR STATOR WINDING FAULT USING DISCRETE WAVELET ANALYSIS OF THE STATOR CURRENT ENVELOPE

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania sygnału obwiedni prądu fazowego stojana do wykrywania zwarć zwojowych, w możliwie wczesnej fazie powstania uszkodzenia. Do wyodrębnienia charakterystycznych dla uszkodzenia stojana symptomów wykorzystano dyskretną transformatę falkową oraz obliczony na jej podstawie współczynnik zmian energii sygnału dla wybranych poziomów dekompozycji. Badania eksperymentalne zrealizowano dla silnika indukcyjnego małej mocy zasilanego z przemiennika częstotliwości w otwartej pętli sterowania (sterowanie skalarnie $U/f=\text{const}$). Środowisko LabVIEW posłużyło do zaprojektowania oraz przetestowania aplikacji przyrządu pomiarowo-diagnostycznego. Aplikacja zawierała algorytmy: akwizycji danych, transformaty Hilberta do wyznaczenia obwiedni sygnału oraz transformaty falkowej sygnału do wyodrębnienia symptomów uszkodzenia. Zmiany wartości współczynnika zmian energii dla obwiedni prądu stojana dla poszczególnych poziomów dekompozycji okazały się bardzo dobrym kryterium oceny stanu uzwojenia stojana.

Abstract: This paper deals with the application of stator current envelope analysis in the incipient diagnosis of the stator winding short circuits. To separate of the characteristic symptoms of stator damage Discrete Wavelet Transform were used. Based on this analysis the energy coefficients of the stator current envelope for the chosen decomposition levels were calculated. The proposed method was implemented for a small power induction motor (with special physical modeling of shorted turns in the stator phases) supplied by voltage source inverter in open control loop. The virtual measurement-diagnostic device, developed in the LabVIEW environment includes algorithms: data acquisition, Hilbert transform for the determination of stator current envelope and wavelet transform to extract the failure symptoms. Experimental results presented in this paper show that changes of the proposed energy factor constitutes a very efficient index for the evaluation of the stator winding state.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, zwarcia zwojowe, obwiednia prądu stojana, dyskretna transformata falkowa

Keywords: induction motor, inter-turn fault, envelope of stator current, discrete wavelet transforms

1. Wstęp

W badaniach naukowych i praktyce eksploatacyjnej napędów z silnikami indukcyjnymi nieustannie trwają poszukiwania niezawodnych rozwiązań systemów diagnostycznych, którym stawia się coraz to trudniejsze do spełnienia wymagania. Nie licząc bezbłędного rozpoznania rodzaju uszkodzenia, niezmiernie ważne jest dostarczenie informacji o stopniu tego uszkodzenia. Wykrycie początkowej fazy rozwoju uszkodzenia maszyny pozwala nie tylko zaplanować jej remont, ale również nie dopuszcza do powstania poważniejszych awarii i związanych z nią kosztów. Szczególnie ważne jest to w przypadku uszkodzenia uzwojeń stojana, ze względu na silnie destrukcyjny charakter prowadzący najczęściej do poważnej awarii maszyny. W tym wypadku niezbędne

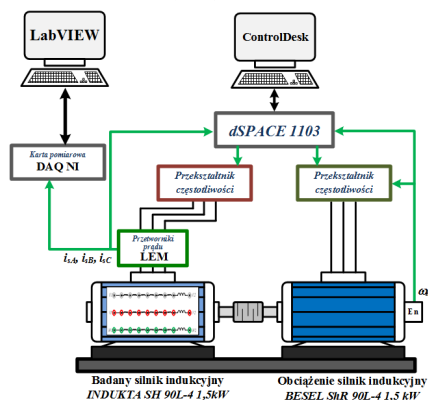
jest szybkie wykrycie stanu początkowego uszkodzenia. Najczęściej spotykaną metodą wykorzystującą sygnały prądu fazowego stojana w diagnostyce silników indukcyjnych jest analiza widmowa prądu stojana, często określana skrótem MCSA (ang. *Motor Current Signature Analysis*) [1]. W MCSA poszukuje się charakterystycznych częstotliwości, które są symptomami uszkodzenia, a wartość amplitudy tych harmonicznych są cechami służącymi do oceny stopnia uszkodzenia. Z uwagi na niedoskonałość transformaty widmowej coraz częściej wykorzystuje się bardziej złożone algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów. W szczególności dotyczy to analizy falkowej umożliwiającej dekompozycję sygnałów diagnostycznych do takiego zakresu częstotliwości

ści, w którym zawarta jest informacja diagnostyczna [2], [3], [4].

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dla silnika indukcyjnego z uszkodzonym uzwojeniem stojana, zasilanego z przekształtnika częstotliwości w otwartej strukturze sterowania. Do monitorowania stanu uzwojeń stojana wykorzystano łatwo mierzalne na obiekcie sygnały prądów stojana oraz wyznaczone dla nich z wykorzystaniem transformaty Hilberta HT (ang. *Hilbert Transform*) obwiednie prądów stojana. Do wyodrębnienia symptomów uszkodzenia uzwojenia stojana zastosowano dyskretną transformatę falkową DWT (ang. *Discrete Wavelet Transform*).

2. Metodyka badań laboratoryjnych

Przedstawione w artykule badania eksperymentalne zostały wykonane na specjalnie przygotowanym silniku indukcyjnym firmy Indukta Sh 90 L-4 o mocy 1.5 kW, umożliwiającym na kontrolowane zwarcia wybranej liczby zwojów w każdej fazie stojana. W badaniach zwierano maksymalnie 8 zwojów, co stanowiło ok. 2,6% wszystkich zwojów w fazie uzwojenia. Badany silnik połączony był sztywnym sprzęgłem z drugim silnikiem indukcyjnym Besel ShR 90L 4 o mocy również 1.5 kW. Silnik ten pełnił rolę obciążenia i zasilany był z osobnego przemiennika częstotliwości. Na rys. 1 przedstawiono schemat stanowiska laboratoryjnego.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego

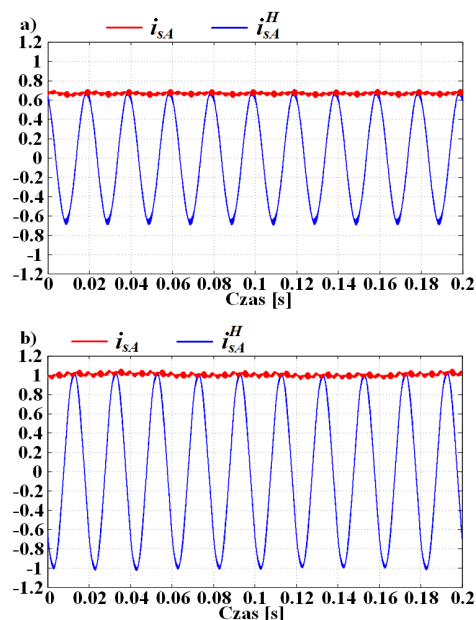
Program sterujący silnikiem (algorytm sterowania skalarnego $U/f=const$) zaimplementowany został na procesorze sygnałowym DS1103 firmy dSpace. Procesor dSpace miał również za zadanie przekazanie oczekiwanej wartości momentu obciążenia do falownika napięcia zasilającego silnik obciążający. Prądy

fazowe stojana mierzono za pomocą wielozakresowych przetworników LA 25-NP firmy LEM. Sygnały wyjściowe z przetworników pomiarowych były wprowadzane do układu akwizycji danych, który stanowiła 8-kanałowa karta pomiarowa DAQ typu NI PXI – 4472 firmy National Instruments umieszczona w komputerze przemysłowym typu NI PXI 8108 tej samej firmy. Środowisko programowalne stanowiło oprogramowanie LabVIEW. Wykonana aplikacja laboratoryjna w postaci wirtualnego przyrządu pomiarowo-diagnostycznego w całości została napisana w języku graficznym „G” i zawierała algorytmy monitorowania oraz detekcji zwarć.

3. Wykorzystanie transformaty Hilberta do wyznaczenia obwiedni sygnału prądu stojana

W artykule do wyznaczenia obwiedni prądu stojana zastosowano transformatę Hilberta, która na podstawie próbek sygnału rzeczywistego oblicza jego część urojona, przesuniętą o 90 stopni w stosunku do sygnału rzeczywistego. Moduł tak uzyskanego sygnału zespolonego stanowi obwiednię pierwotnego sygnału zmodulowanego [5]:

$$i_{sA}^H(t) = \sqrt{i_{sA}^2(t) + H^2[i_{sA}(t)]} \quad (1)$$



Rys. 2. Przebieg prądu stojana oraz obwiedni stojana wyznaczonej z wykorzystaniem transformaty Hilberta przy $f_s = 50\text{Hz}$ silnika: a) nieobciążonego, b) obciążonego momentem znamionowym

4. Wykorzystanie analizy widmowej sygnału prądu stojana oraz obwiedni prądu stojana do diagnostyki zwarc zwojowych

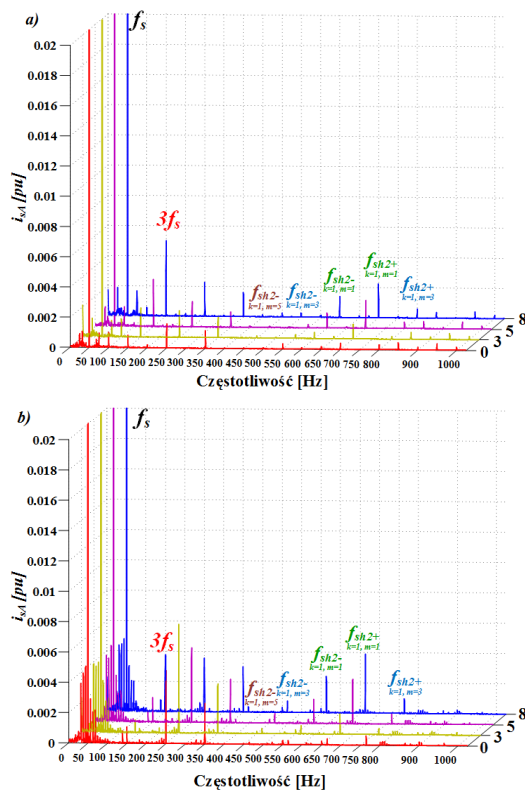
Za symptomy uszkodzeń uzwojeń stojana a analizie widmowej prądu fazowego stojana przyjmuje się wzrost amplitud charakterystycznych harmonicznych w przedziale niskich i średnich częstotliwości obliczanych według zależności [6], [7]:

$$f_{sh1} = f_s \left[k \left(\frac{1-s}{p_b} \right) \pm m \right] \quad (2)$$

$$f_{sh2} = f_s \left[k N_r \left(\frac{1-s}{p_b} \right) \pm m \right] \quad (3)$$

gdzie: f_s – częstotliwość napięcia zasilania, p_b – liczba par biegunów, s – poślizg, N_r – liczba żłobków wirnika (dla silnika Sh90-L4 - $p_b = 2$, $N_r = 26$), $k = 1, 2, 3, \dots$, $m = 1, 3, 5, \dots$

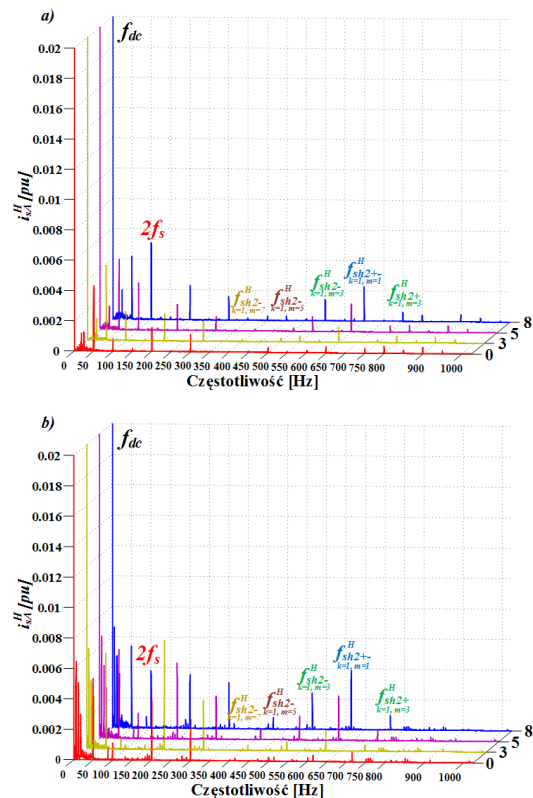
W wynikach badań przedstawionych w [6], [7] można zauważyć silny wzrost amplitudy trzeciej harmonicznej prądu stojana w zależności od stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana.



Rys. 3. Widmo prądu stojana przy zwarciu w fazie A i $f_s = 50\text{Hz}$ dla silnika: a) nieobciążonego, b) obciążonego momentem znamionowym

Na rys. 3 przedstawiono widma prądu fazowego fazy A stojana dla silnika pracującego przy $f_s = 50\text{Hz}$ przy modelowaniu zwarcia w fazie A silnika. Widmo silnika nieuszkodzonego posiada widoczną (o znacznej amplitudzie) tylko składową podstawową napięcia zasilnia f_s . Zwarcie kilku zwojów w obrębie jednej cewki fazy A silnika powoduje wzrost amplitudy składowej $3f_s$ oraz składowych wynikających z np. z równania (3) dla $k = 1$ i $m = 1$ oraz dla $m_0 = 0$ (rys. 3a): $f_{sh2+} \approx 600\text{Hz}$ oraz $f_{sh2+} \approx 700\text{Hz}$, itp. Jak można zauważyć wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana wartość amplitudy charakterystycznych częstotliwości również wzrasta. Zmiana momentu obciążenia silnika wpływa na intensywność zmian amplitudy tych częstotliwości w miarę wzrostu uszkodzenia.

Wzrost amplitudy częstotliwości uszkodzeniowych powoduje falowanie amplitudy prądu stojana. W celu wyodrębnienia powstałej modulacji prądu stojana wyznaczono z wykorzystaniem transformaty Hilberta obwiednię prądu stojana.



Rys. 4. Widmo obwiedni prądu stojana przy zwarciu w fazie A i $f_s = 50\text{Hz}$ dla silnika: a) nieobciążonego, b) obciążonego momentem znamionowym

Na rys. 4 przedstawiono widma obwiedni prądu stojana silnika zasilanego napięciem o $f_s = 50\text{Hz}$ przy zwarciu modelowanym fizycznie w fazie A. Podstawową składową widoczną dla silnika nieuszkodzonego jest f_{dc} . W przypadku uszkodzenia uzwojenia stojana widoczny jest wyraźny wzrost wartości amplitudy harmonicznej $2f_s$. Zwarcie kilku zwojów w obrębie jednej cewki powoduje również pojawianie się dodatkowych częstotliwości widocznych w zakresie częstotliwości 300-800 Hz. Częstotliwości uszkodzeniowe widoczne w widmie obwiedni prądu stojana można wyznaczyć z zależności:

$$f_{sh1,2}^H = f_{sh1,2} - f_s \quad (4)$$

gdzie:

$f_{sh1,2}$ – częstotliwości uszkodzeniowe wyznaczone z równań (2) i (3).

5. Zastosowanie dyskretnej transformaty flakowej do wykrywania zwarć zwojowych

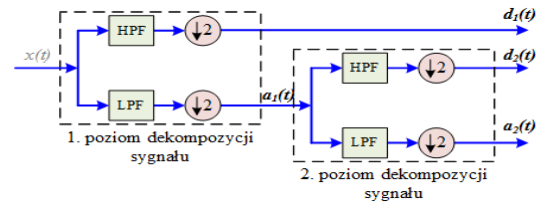
W diagnostyce uszkodzeń silników indukcyjnych wciąż rozwijane są nowe metody diagnostyczne wykorzystujące cyfrowe przetwarzanie sygnałów łatwo mierzalnych. Coraz częściej wykorzystywaną metodą filtracji sygnałów jest metoda wykorzystująca transformatę falkową. Transformata falkowa poprzez możliwość rozkładu sygnału w dziedzinie czasu na składniki o różnych oknach czasowych i różnych pasmach częstotliwości, pozwala na wyodrębnienie i śledzenie informacji zawartej w danym paśmie częstotliwościowym sygnału w czasie [8], [9].

Dyskretna transformata falkowa powoduje rozdzielenie sygnału na dwie składowe, zwane aproksymatą i detalem, poprzez filtrację odpowiednio filtrem dolnoprzepustowym (ang. *Low Pass Filter*) i górnoprzepustowym (ang. *High Pass Filter*) oraz operację próbowania sygnału przez wybieranie tylko próbek parzystych (ang. *downsampling*). Rozwinięcia w szereg sygnału $x(t)$ dokonuje się w oparciu o dwie spokrewnione ze sobą funkcje bazowe: tzw. funkcję falkową $\Psi(t)$ oraz funkcję skalującą $\varphi(t)$ [5], [8]:

$$x(t) = \sum_k a_{j_0}(k) \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_k \sum_{j_0}^{\infty} d_j(k) \Psi_{j,k}(t) \quad (5)$$

Współczynniki $d_{j,k}$ zawierają informację o wysokich częstotliwościach, tworząc zbiór tzw. detali. Natomiast współczynniki a_k zawierają

informację dolnoprzepustową wraz ze składową stałą, stanowiąc tzw. aproksymację sygnału (rys. 5).



Rys. 5. Proces dekompozycji sygnału do 2. poziomu z wykorzystaniem dyskretnej transformaty falkowej

Pełna informacja o sygnale wejściowym (oryginalnym) jest zachowana w zbiorze złożonym z połączenia w całym rozkładzie wszystkich detali i aproksymacji z najniższego poziomu dekompozycji.

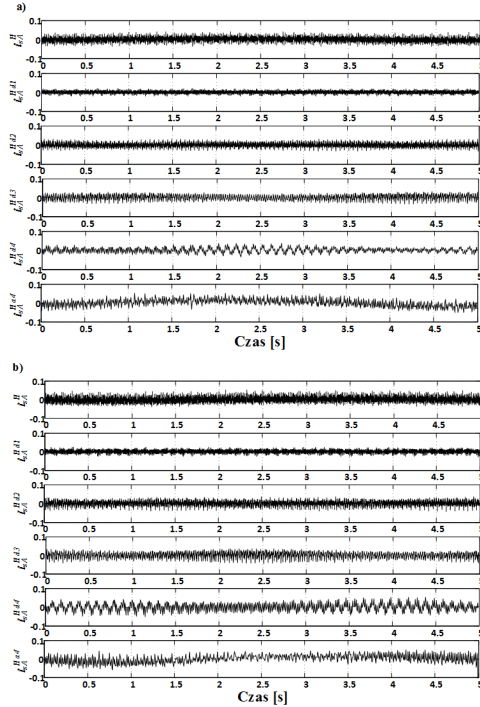
W celu dekompozycji sygnału obwiedni prądu stojana wykorzystano dostępne w środowisku LabVIEW bloki funkcyjne (*WA Get Coefficients of Discrete Wavelet Transform.vi*) umożliwiające m.in. wybór rodzaju falki (wybrano falkę Haara) oraz wybór poziomu dekompozycji [8]. W celu ujednoczenia rozdzielczości mierzonych sygnałów prądu stojana zostały one przepróbowane do poziomu 2,8kS/s. Dekompozycje sygnału przeprowadzono do 4 poziomu uzyskując pasma częstotliwościowe przedstawione w tabelicy 1.

Tablica 1. Pasma częstotliwościowe uzyskane przy dekompozycji sygnału obwiedni prądu stojana do 4 poziomu

Poziom dekompozycji	Pasma częstotliwości
Detal poziom 1 (d_1)	700 - 1400Hz
Detal poziom 2 (d_2)	350 - 700 Hz
Detal poziom 3 (d_3)	175 - 350 Hz
Detal poziom 4 (d_4)	87,5 - 175 Hz
Aproksymata poziom 4 (a_4)	0 - 87,5 Hz

Na rys. 6 przedstawiono przebieg sygnału obwiedni prądu stojana oraz kolejno przebiegi detalu oraz aproksymaty przy dekompozycji sygnału do czwartego poziomu dla silnika nieobciążonego w przypadku silnika nieuszkodzonego (rys. 6a) oraz ze zwartymi 8 zwojami w fazie A (rys. 6b). W celu wyodrębnienia z sygnału obwiedni prądu stojana zmian powstałych przy uszkodzeniu stojana wyeliminowano składową stałą. Na rys. 6 można zauważyć, że w chwili wystąpienia uszkodze-

nia zwiększa się poziom amplitudy sygnału na wybranych poziomach dekompozycji. Zmiany te są szczególnie widoczne w detalu na poziomie 1 (pasmo $f = 700 - 1400\text{Hz}$) oraz poziomie 2 (pasmo $f = 350 - 700\text{Hz}$).



Rys. 6. Transformata falkowa sygnału obwiedni prądu stojana dla silnika nieobciążonego zasilanego napięciem o $f_s=50\text{Hz}$ a) nieuszkodzonego, b) ze zwarcie 8 zwojów w fazie A

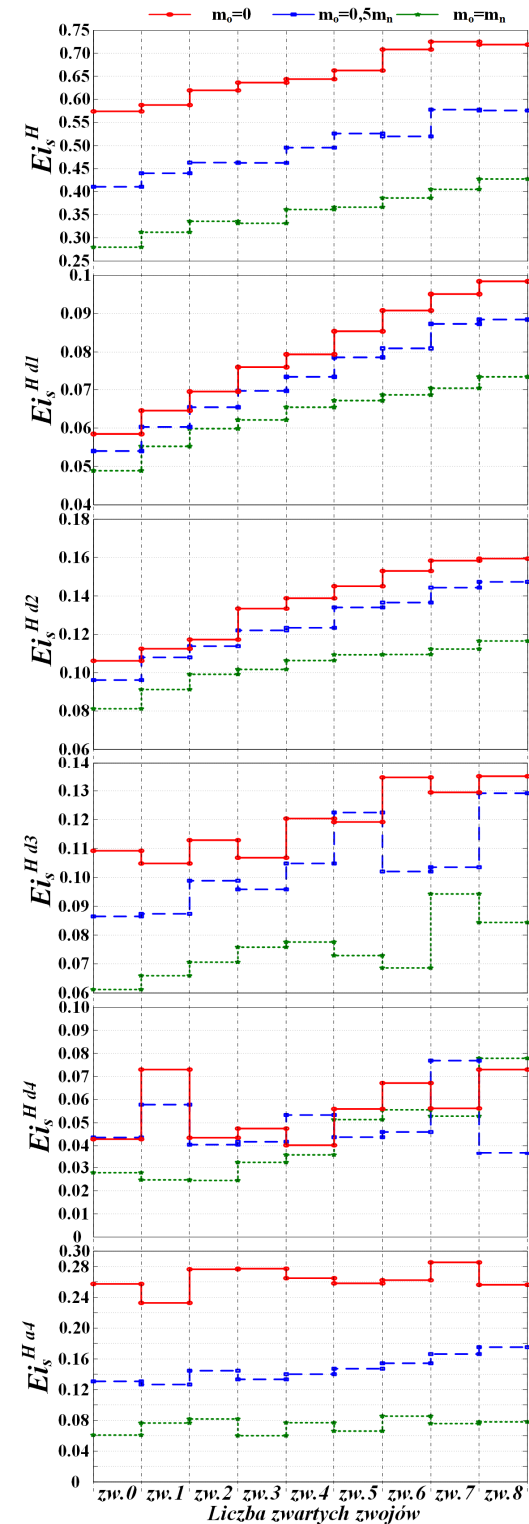
Wnioskowanie o stanie uzwojenia stojana zrealizowano wprowadzając dodatkowy współczynnik zmian energii obwiedni prądu stojana na wybranym poziomie dekompozycji:

$$E_i^{H,i} = \frac{\int_{p=0}^t (A^i(p \cdot dt))^2}{t} \quad (6)$$

i – indeks określający stopień dekompozycji sygnału (d1, d2, d3, d4 lub a4), A – amplituda obwiedni prądu stojana i_s^H na wybranym poziomie dekompozycji, t – czas rejestracji sygnału, dt – rozdzielczość sygnału.

Współczynnik ten opisuje jak zmienia się amplituda sygnału na wybranym poziomie dekompozycji w odniesieniu do czasu rejestracji sygnału. Na rys. 7 przedstawiono zmiany współczynnika obliczonego z zależności (6) dla kolejnych poziomów dekompozycji sygnału w zależności od obciążenia silnika oraz

stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana w fazie A.



Rys.7. Zależność współczynnika zmian energii obwiedni prądu stojana w zależności od liczby

zwartych zwojów w fazie A oraz momentu obciążenia

Najlepsze zmiany wyznaczonego współczynnika z punktu monitorowania uzwojeń stojana zaobserwowano dla energii dla detalu Ei_s^{Hd1} oraz Ei_s^{Hd2} wyznaczonych dla poziomu 1 (pasmo $f = 700 - 1400\text{Hz}$) oraz poziomu 2 (pasmo $f = 350 - 700\text{Hz}$). Można zauważyć praktycznie liniowy wzrost wartości Ei_s^{Hd1} oraz Ei_s^{Hd2} wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana.

6. Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań eksperymentalnych wykazują, że możliwe jest zastosowanie sygnału obwiedni prądu stojana do wczesnego wykrycia symptomów zwarc w uzwojeniu stojana silnika zasilanego z przeziennika częstotliwości. W tym celu można posłużyć się analizą widmową obwiedni prądu stojana i na podstawie ekstrakcji częstotliwości uszkodzeniowych monitorować zmiany wartości ich amplitudy. Jednak wymagana jest przy tym duża rozdzielczość analizowanego widma, a tym samym długość zarejestrowanych próbek sygnału. Zastosowanie analizy falkowej obwiedni prądu stojana znacznie poprawiało dokładność oceny stanu uzwojenia. Dekompozycja sygnału na pasma częstotliwościowe oraz wyznaczenie zmian energii dla odpowiedniego poziomu dekompozycji pozwala w łatwy i skuteczny sposób monitorować stan uzwojenia stojana. Wyniki badań wykazały wyraźny wzrost wartości zaproponowanego współczynnika już przy zwarcu 1 zwoju.

7. Literatura

- [1]. J.H. Jung, J.J. Lee, B.H. Kwon, „Online diagnosis of induction motors using MCSA”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 6, 2006, s. 1842–1852
- [2]. P. Ewert, C.T. Kowalski, „Zastosowanie analizy falkowej do diagnostyki łożysk tocznych silników indukcyjnych”, *Prace Naukowe Instytutu Ma-*

szyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. *Studia i Materiały*. 2012, nr 32, s.339-345

- [3]. Chow T.W.S., Hai S., „Induction Machine Fault Diagnostic Analysis with Wavelet Technique”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.51, No. 3, 2004, s. 558-565
- [4]. C.T. Kowalski, „Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce silników indukcyjnych”, *Przebieg Elektrotechniczny*, R. 82, nr 1, 2006, str.21-26
- [5]. J.A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, R.B. Pérez, „A Critical Comparison Between DWT and Hilbert–Huang-Based Methods for the Diagnosis of Rotor Bar Failures in Induction Machines”, *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 45, No. 5, 2009, s. 1794-1803
- [6]. M. Wolkiewicz, C.T. Kowalski, „Nieinwazyjne metody wczesnego wykrywania zwarc zwojowych w silniku indukcyjnym zasilanym z przeziennika częstotliwości, cz. I”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*. 2010, nr 87, s. 145-150
- [7]. G.M. Joksimovic, J. Penman, „The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, nr 5, 2000, s. 1078-1084
- [8]. J.T. Białasiewicz, „Falki i aproksymacje”, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa 2000
- [9]. M. Wolkiewicz, C.T. Kowalski, „Zastosowanie dyskretnej analizy falkowej do wykrywania zwarc zwojowych w silniku indukcyjnym”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*. 2013, nr 100, s. 191-196

Autorzy

dr inż. Marcin Wolkiewicz
 e-mail: marcin.wolkiewicz@pwr.edu.pl
 dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. PWr.
 e-mail: czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl
 Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

Informacje dodatkowe

Praca naukowa finansowana ze środków statutowych
 B40105/I29/W5