

*silnik indukcyjny, sterowanie wektorowe, struktura DFOC
monitorowanie, uszkodzenia uzwojenia stojana*

Marcin WOLKIEWICZ*, Grzegorz TARCHAŁA*,
Czesław T. KOWALSKI*

MONITOROWANIE STANU UZWOJEŃ STOJANA W ZAMKNIĘTEJ STRUKTURZE STEROWANIA PRĘDKOŚCIĄ SILNIKA INDUKCYJNEGO

W artykule przedstawiono problemy związane z wykrywaniem zwarcí zwojowych w silniku indukcyjnym pracującym w zamkniętej strukturze bezpośredniego sterowania polowo-zorientowanego. Omówiono zwięźle model matematyczny silnika, strukturę sterowania DFOC z blokiem odprężającym oraz przedstawiono wyniki badań symulacyjnych. W badaniach eksperymentalnych wykazano, że zwarcia pojedynczych zwojów w stojanie są możliwe do wykrycia w sygnałach prądu stojana (w składowej kolejności przeciwnej prądu oraz zmianach w hodografie wektora przestrzennego prądu stojana) oraz w wirtualnych sygnałach e_x , e_y , f_x , f_y dostępnych w cyfrowej strukturze sterowania w procesorze sygnałowym.

1. WSTĘP

Obecnie od współczesnych przekształtnikowych układów napędowych (PUN), nawet powszechnego użytku, wymaga się niezawodnego i bezpiecznego działania. Rosnące wymagania w stosunku do właściwości napędów elektrycznych doprowadziły do znacznego skomplikowania ich struktur, jednocześnie zwiększając istotnie ryzyko awarii [1], [2]. Współczesny PUN, składający się z silnika indukcyjnego, układów zasilania i energoelektroniki (przekształtnik częstotliwości z modulacją PWM), układów pomiarowych oraz cyfrowego układu sterowania, narażony jest na wystąpienie uszkodzeń w silniku oraz w przemienniku częstotliwości i czujnikach pomiarowych. Każde z tych uszkodzeń powoduje zakłócenie normalnej pracy układu napędowego i wymaga podjęcia odpowiedniego działania przez układ sterowania.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, marcin.wolkiewicz@pwr.edu.pl, grzegorz.tarchala@pwr.edu.pl, czeslaw.t.kowalski@pwr.edu.pl,

Dlatego istotne znaczenie ma monitorowanie stanu poszczególnych podzespołów PUN [2]. W przypadku wystąpienia uszkodzeń w uzwojeniach stojana lub wirnika silnika, pracującego w zamkniętej strukturze sterowania połowo-zorientowanego, zmiana wartości parametrów uzwojeń powoduje zaburzenia w prawidłowym działaniu struktury sterowania częstotliwościowego (nieprawidłowa wartość estymowanego strumienia) [2], [3]. Niekontrolowany wzrost stopnia uszkodzenia spowoduje w konsekwencji niestabilną pracę napędu.

Metody wczesnego wykrywania zwarc zwojowych w stanie silnika indukcyjnego zasilanego z sieci i przemiennika częstotliwości w otwartej strukturze sterowania zostały szczegółowo omówione w [4], [5]. W niniejszym artykule uwaga została skupiona na analizie wpływu zwarc zwojowych na pracę silnika pracującego w strukturze bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego DFOC (ang. *Direct Field Oriented Control*) oraz możliwości wczesnego wykrywania symptomów uszkodzenia w wirtualnych sygnałach sterujących e_x, e_y, f_x, f_y w cyfrowej strukturze sterowania i sygnałach pomiarowych dostępnych w silniku. Do monitorowania zwarc wykorzystano pomiar prądów fazowych silnika i obliczanie składowej kolejności przeciwnej prądu oraz zmiany ilościowe w hodografie wektora przestrzennego prądu określane metodą PCA (ang. *Principal Component Analysis*) [2], [4], [5]. Natomiast do śledzenia wpływu zwarc w sygnałach dostępnych w strukturze sterowania wykorzystano fakt pojawienia podwójnej harmonicznej podstawowej częstotliwości napięcia zasilającego.

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA INDUKCYJNEGO

Model matematyczny silnika indukcyjnego, zapisany za pomocą równań wektorowych, w jednostkach względnych (ang. *per unit*), dla dowolnego układu współrzędnych wirującego z pulsacją ω_k może zostać opisany następującymi zależnościami [1]:

- równania napięciowe:

$$\mathbf{u}_s = r_s \mathbf{i}_s + T_N \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s + j\omega_k \boldsymbol{\psi}_s, \quad (1)$$

$$\mathbf{0} = r_r \mathbf{i}_r + T_N \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_r + j(\omega_k - \omega_m) \boldsymbol{\psi}_r; \quad (2)$$

- równania strumieniowo-prądowe:

$$\boldsymbol{\psi}_s = x_s \mathbf{i}_s + x_M \mathbf{i}_r, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r = x_r \mathbf{i}_r + x_M \mathbf{i}_s; \quad (4)$$

- równanie ruchu i równanie momentu elektromagnetycznego:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{T_M}(m_e - m_o), \quad (5)$$

$$m_e = \text{Im}(\Psi_s^* \dot{\mathbf{i}}_s). \quad (6)$$

W powyższych równaniach odpowiednio: $\mathbf{u}_s = u_{su} + ju_{sv}$, $\dot{\mathbf{i}}_s = i_{su} + ji_{sv}$, $\mathbf{i}_r = i_{ru} + ji_{rv}$, $\Psi_s = \psi_{su} + j\psi_{sv}$, $\Psi_r = \psi_{ru} + j\psi_{rv}$ – wektory przestrzenne napięcia i prądu stojana, prądu wirnika, strumienia stojana i wirnika. Parametry silnika: r_s , r_r , x_M , x_s , x_r – rezystancje uzwojenia stojana oraz wirnika, reaktancje: magnesująca, uzwojenia stojana oraz wirnika. Pulsacje: ω_k – wybranego układu współrzędnych, ω_m – kątowna wału. Momenty: m_e – elektromagnetyczny oraz m_o – obciążenia. Stałe czasowe: T_M – mechaniczna oraz $T_N = 1/\Omega_b = 1/(2\pi f_{sN})$ – wynikająca z wprowadzenia jednostek względnych.

Równania składowych wektora napięcia stojana (1) w układzie współrzędnych x - y wirującym zgodnie z wektorem strumienia wirnika ($\psi_{rx} = \psi_r$, $\psi_{ry} = 0$), stają się następujące:

$$u_{sx} = r_s i_{sx} + x_s \sigma T_N \frac{di_{sx}}{dt} + \frac{x_M}{x_r} T_N \frac{d\psi_r}{dt} - x_s \sigma \omega_c \psi_r i_{sy}, \quad (7)$$

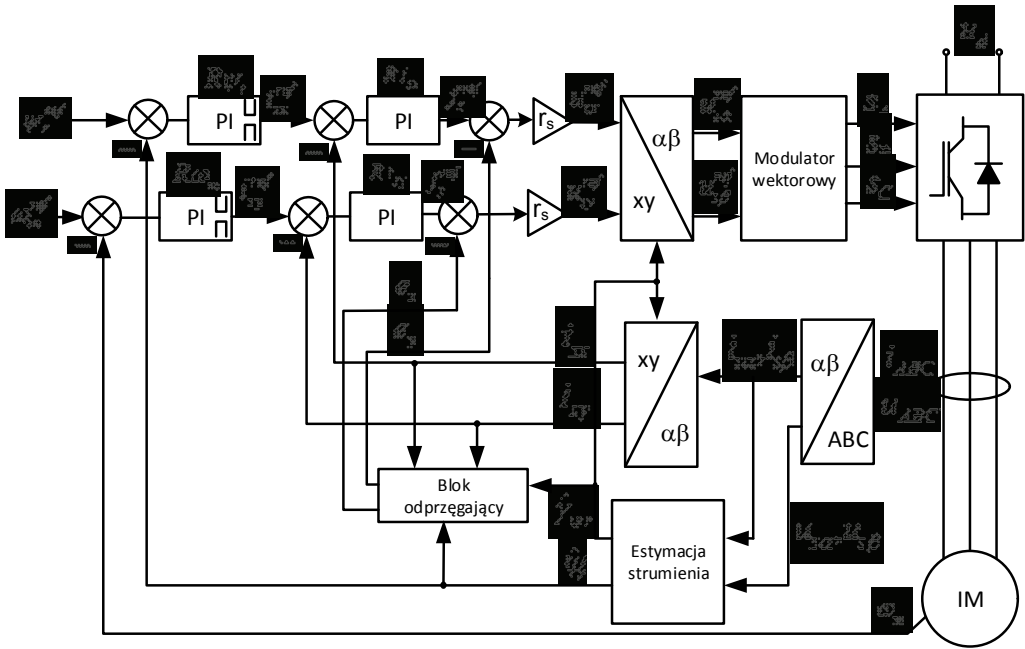
$$u_{sy} = r_s i_{sy} + x_s \sigma T_N \frac{di_{sy}}{dt} + \frac{x_M}{x_r} \omega_{s\psi} + x_s \sigma \omega_c \psi_r i_{sx}. \quad (8)$$

Moment elektromagnetyczny silnika (6) w tym układzie przyjmuje wartość:

$$m_e = \frac{x_M}{x_r} \psi_r i_{sy} \quad (9)$$

3. BEZPOŚREDNIE STEROWANIE POŁOWO-ZORIENTOWANE PRĘDKOŚCIĄ SILNIKA INDUKCYJNEGO – DFOC

Schemat blokowy metody bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego prędkością silnika indukcyjnego, stosowanej w trakcie badań, przedstawiony został na rys. 1 [1]. Metoda ta posiada dwa tory sterujące: pierwszy z nich ma na celu stabilizację amplitudy strumienia wirnika, drugi natomiast regulację prędkości kątownej. W badaniach wykorzystane zostały regulatory PI z mechanizmami zapobiegającymi nasyceniu się członu całkującego (ang. *anti wind-up*). Amplituda strumienia wirnika regulowana jest za pomocą składowej i_{sx} wektora prądu stojana, natomiast prędkość za pomocą składowej i_{sy} (w związku z zależnością momentu elektromagnetycznego od tej zmiennej (9)).



Rys. 1. Schemat blokowy układu bezpośredniego sterowania polowo-zorientowanego prędkości silnika indukcyjnego DFOC

Regulatory składowych wektora prądu stojana definiują zadane wartości napięcia w układzie x - y . Niestety, na wartość składowych wektora prądu wpływają również pozostałe zmienne silnika, co obrazują przekształcone równania napięciowe silnika (7)–(8):

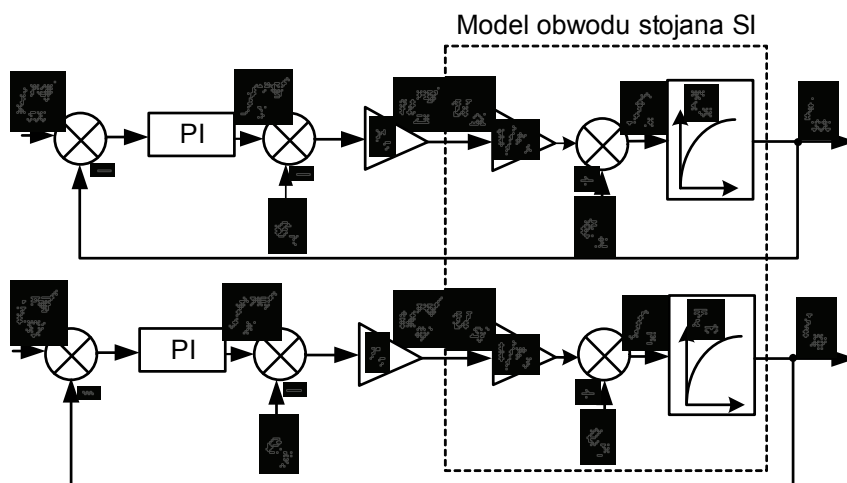
$$\underbrace{i_{sx} + T_{\sigma s} \frac{di_{sx}}{dt}}_{f_x} = \frac{1}{r_s} u_{sx} - \underbrace{\frac{x_M}{r_s x_r} T_N \frac{d\psi_r}{dt} + \frac{x_s \sigma}{r_s} \omega_{s\psi} i_{sy}}_{e_x}, \quad (10)$$

$$\underbrace{i_{sy} + T_{\sigma s} \frac{di_{sy}}{dt}}_{f_y} = \frac{1}{r_s} u_{sy} - \underbrace{\frac{x_M}{r_s x_r} \omega_{s\psi} \psi_r - \frac{x_s \sigma}{r_s} \omega_{s\psi} i_{sx}}_{e_x} \quad (11)$$

gdzie: $T_{\sigma s} = \frac{x_s \sigma}{r_s} T_N$, $\sigma = 1 - \frac{x_M^2}{x_s x_r}$ – współczynnik rozproszenia uzwojeń.

W celu uniezależnienia obu torów sterowania zastosowano blok odprzegający, obliczający zmienne e_x oraz e_y oznaczone w równaniach (10) i (11). W związku z zakładaną stałą wartością amplitudy strumienia wirnika, jej pochodną pominięto w obliczaniu zmiennej e_x . Mechanizm odprzegania przedstawiono na rys. 2. Na schemacie tym

założono, że zadane wartości składowych wektora napięcia w układzie x - y są bezinercyjnie podawane na silnik. W rzeczywistości składowe te przeliczane są do układu α - β i następnie wykorzystywane przez modulator wektorowy SVM do obliczenia odpowiednich sygnałów załączeń tranzystorów falownika s_A, s_B, s_C co wprowadza nieznaczące opóźnienie w układzie.

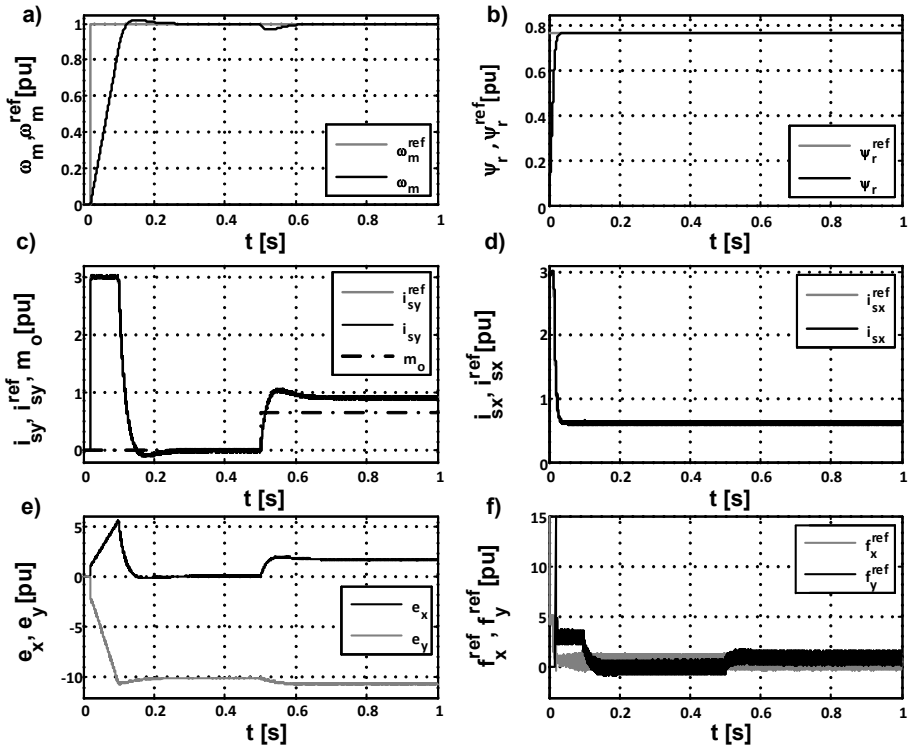


Rys. 2. Mechanizm odprężania torów sterowania w metodzie DFOC

Pulsacja synchroniczna wektora strumienia wirnika była obliczana w następujący sposób:

$$\hat{\omega}_{s\psi} = T_N \frac{d\hat{\gamma}_{\psi r}}{dt}, \quad \hat{\gamma}_{\psi r} = \arctg(\hat{\psi}_{r\beta} / \hat{\psi}_{r\alpha}). \quad (12)$$

W trakcie badań wykorzystano prosty symulator strumienia wirnika bazujący na tzw. modelu prądowym [1]. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych otrzymane dla układu DFOC. Jak pokazano na rys. 3a, prędkość silnika podąża za wartością zadaną, równą prędkości znamionowej. Po 0.5 s załączony został znamionowy moment obciążenia (należy zwrócić uwagę, że nie jest on równy 1 (patrz Załącznik). Amplituda strumienia wirnika (rys. 3b) utrzymywana jest na stałym znamionowym poziomie (załącznik). Również obie składowe wektora prądu stojana (rys. 3c,d) podążają idealnie za wartościami zadanymi. Zastosowanie bloku odprężającego spowodowało, że zmienna sterująca f_x (rys. 3f), odpowiedzialna za strumień wirnika jest stała – w tym celu zmienna e_x (rys. 3e) rośnie w chwili zmiany momentu obciążenia.



Rys. 3. Przebiegi otrzymane przy zastosowaniu metody DFOC do sterowania SI:

- a) prędkość zadana i rzeczywista, b) zadana i rzeczywista wartość amplitudy strumienia wirnika, c) zadana i rzeczywista składowa i_{sy} oraz moment obciążenia, d) zadana i rzeczywista składowa i_{sx} , e) sygnały odprężające e_x oraz e_y , f) sygnały sterujące f_x^{ref} oraz f_y^{ref}

3. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania eksperymentalne zostały wykonane na silniku indukcyjnym klatkowym firmy Indukta typu Sh 90L-4 o mocy 1.5kW, sprzęgniętym z maszyną obciążającą, którą stanowił silnik indukcyjny tego samego typu. Wykonano badania dla silnika nieobciążonego oraz obciążonego momentem znamionowym.

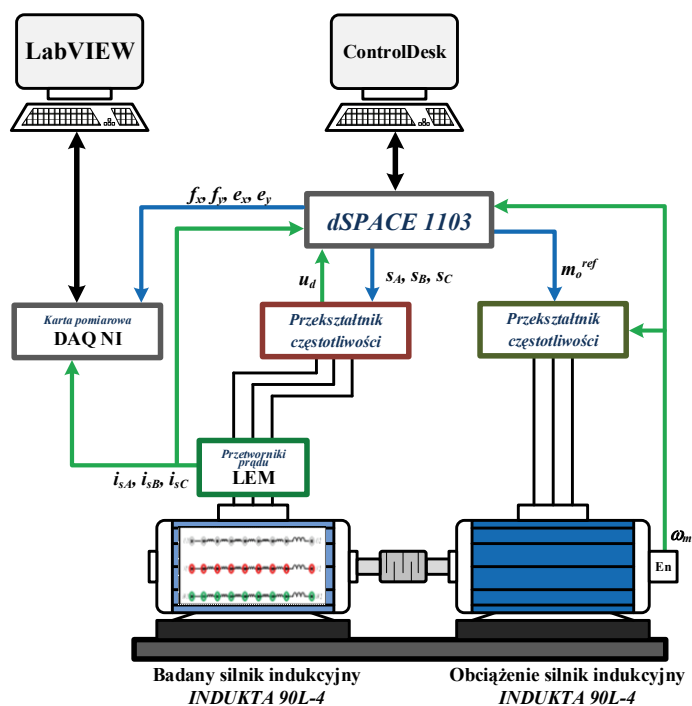
Zamknięty układ sterowania został zaimplementowany na procesorze sygnałowym *dSpace 1103*. Procesor ten wykorzystuje informację o prędkości silnika, mierzonej przy użyciu enkodera inkrementalnego, trzech prądach fazowych oraz o wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym. Program zaimplementowany na procesorze napisany został w języku C. Zawierał on akwizycję danych pomiarowych, estymację trudno mierzalnych zmiennych stanu, modulator wektorowy oraz algorytm sterowania

DFOC. Procesor *dSpace* miał również za zadanie przekazanie oczekiwanej wartości momentu obciążenia do falownika napięcia zasilającego silnik obciążający. Czas próbkowania programu wynosił $100 \mu\text{s}$, co odpowiada częstotliwości 10 kHz.

Prądy w poszczególnych fazach silnika mierzono za pomocą wielokresowych przetworników LA 25-NP firmy LEM. Do monitorowania uszkodzeń uzwojeń stojana zastosowano komputerowy system pomiarowo - diagnostyczny oparty na przyrządach wirtualnych opracowanych w środowisku LabVIEW.

W części badań eksperymentalnych dotyczących monitorowania stanu uzwojeń wykorzystano również sygnały sterujące f_x^{ref} i f_y^{ref} oraz odprzegające e_x i e_y , dostępne bezpośrednio ze struktury sterowania.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego z uwzględnieniem sygnałów pomiarowych i sterujących.



Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego

W badaniach laboratoryjnych zastosowano silnik indukcyjny o specjalnej konstrukcji, umożliwiającej fizyczne modelowanie zwarć zwojowych stojana, niezależnie w każdej z trzech faz silnika. Badania przeprowadzono przy zwarciu maksymalnie 8 zwojów w jednej z faz, co stanowi około 3% całkowitej liczby zwojów uzwojenia. Aby zapewnić rzeczywisty charakter uszkodzenia uzwojenia stojana, prąd płynący

w obwodzie zwarciovym nie był ograniczany dodatkową rezystancją. Rezystancja punktu zwarcia była niemal zerowa.

4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

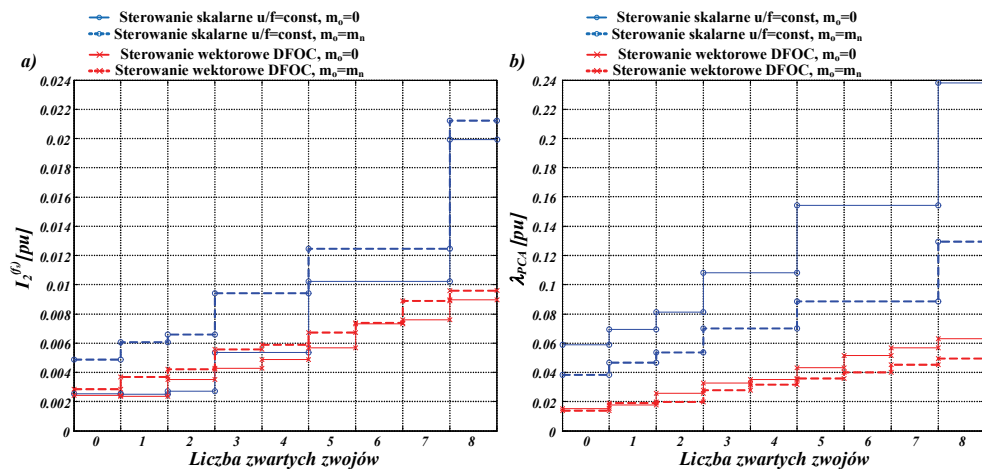
4.1. ANALIZA SYGNAŁÓW DOSTĘPNYCH NA OBIEKCIE

Brak równowagi w systemach trójfazowych może być oceniany za pomocą składowych symetrycznych prądu stojana. Jak opisano m.in. w [5] w przypadku analizowania składowych kolejności przeciwnej prądu stojana I_2 jej wartość początkowa jest bliska zeru z uwagi na fakt, że silnik jest symetryczny i napięcie zasilania jest symetryczne. Pojawienie się zwarcia zwojowego w obwodzie uzwojenia stojana powoduje powstanie niewielkiej asymetrii prądów fazowych stojana, a tym samym zwiększenie wartości składowej kolejności przeciwnej prądu stojana [5].

Na rys. 5a przedstawiono zależność amplitudy składowej kolejności przeciwnej prądu stojana I_2 od wartości momentu obciążenia silnika, dla różnej liczby zwartych zwojów w fazie B silnika, dla sterowania skalarne ($u/f = \text{const}$) oraz sterowania wektorowego (DFOC). W obu przypadkach zasilania widoczna jest duża zależność składowej I_2 od stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana. Wraz ze zwiększaniem liczby zwartych zwojów w jednej fazie silnika amplituda I_2 zwiększa swoją wartość. Dodatkowo można zauważyć, że wartość analizowanej składowej w niewielkim stopniu zależy od zmian momentu obciążenia, co jest bardzo korzystne z punktu widzenia monitorowania uszkodzenia.

Jak wcześniej wykazano uszkodzenia uzwojeń stojana wywołują zmiany w prądach fazowych stojana. Zmiany te można również zaobserwować na hodografie wektora przestrzennego prądu stojana przedstawionego w nieruchomym układzie współrzędnych α - β [4]. W przypadku uszkodzenia uzwojenia stojana pojawia się deformacja hodografu, która w miarę zwiększania się stopnia uszkodzenia powoduje przekształcenie się okręgu w elipsę. Do ilościowej analizy zmian hodografu wektora prądu stojana, wywołanej zwarciami zwojowymi, można zastosować statystyczną metodą analizy danych zwaną analizą składowych głównych PCA dokładnie opisaną w [4].

Na rysunku 5b przedstawiono zależność zmian indeksu intensywności λ_{PCA} (obliczonych na podstawie [4]) od liczby zwartych zwojów i momentu obciążenia dla sterowania skalarne ($u/f = \text{const}$) oraz sterowania wektorowego (DFOC). Dla silnika nieuszkodzonego wartość λ_{PCA} jest bliska zeru. Wraz ze zwiększaniem stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana indeks λ_{PCA} zwiększa swoją wartość. Można zauważyć, że podobnie jak w przypadku analizy składowej przeciwnej prądu stojana intensywność zmian λ_{PCA} jest mniejsza przy sterowaniu DFOC. Możliwe jest jednak wykrycie kilku zwartych zwojów w obrębie jednej cewki uzwojenia stojana.



Rys. 5. Wyniki badań eksperymentalnych dla: a) analizy składowej przeciwnej prądu stojana $I_2^{(fs)}$, b) analizy składowych głównych λ_{PC4} w układzie skalarnego i wektorowego sterowania prędkością silnika indukcyjnego

Można stwierdzić, że zamknięta struktura sterowania prędkości powoduje zmniejszenie intensywności symptomów pojawiających się w sygnałach dostępnych bezpośrednio na obiekcie (w przypadku przedstawionych badań – analizie prądu stojana), w porównaniu z układami skalarnego sterowania prędkością (np. $u/f = \text{const}$).

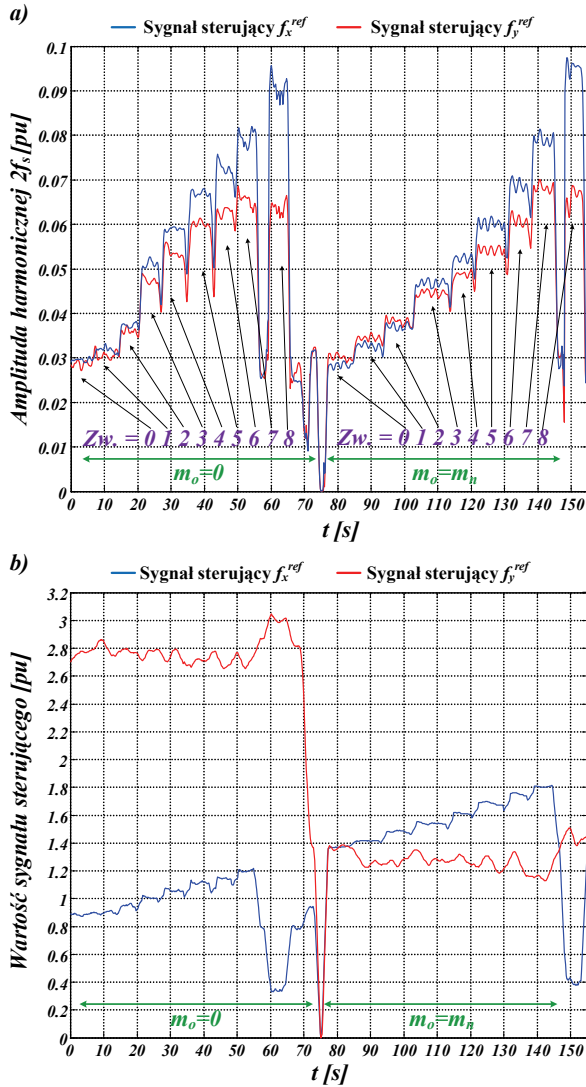
4.2. ANALIZA SYGNAŁÓW DOSTĘPNYCH W STRUKTURZE STEROWANIA

W celu zwiększenia możliwości wykrywalności uszkodzenia uzwojenia stojana zaproponowano dodatkowo 4 sygnały dostępne w strukturze sterowania. Sygnały sterujące f_x^{ref} i f_y^{ref} oraz sygnały odprzegające e_x i e_y , opisane w rozdziale 2 zostały poddane analizie FFT (ang. *Fast Fourier Transform*) celem wyodrębnienia charakterystycznych symptomów uszkodzenia uzwojenia stojana. W przypadku wystąpienia zwarcia w uzwojeniach stojana, w sygnałach tych pojawiają się dodatkowe harmoniczne. W szczególności jest to podwójna harmoniczna podstawowej częstotliwości napięcia zasilającego $2f_s$.

Do monitorowania zmian amplitudy $2f_s$ zrealizowano w środowisku LabVIEW odpowiedni blok funkcyjny, który na podstawie dostępnych informacji o częstotliwości napięcia zasilania wyodrębniał charakterystyczne harmoniczne i monitorował zmiany wartości ich amplitud.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dla pracy on-line silnika przy zwiększaniu stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana i zmiany momentu obciążenia. Wraz ze zwiększaniem stopnia uszkodzenia zwiększa się wartość amplitudy składowej $2f_s$ dla obu sygnałów sterujących (rys. 6a). Dodatkowo można zauważyć, że zmiany

tej składowej są praktycznie niezależne od momentu obciążenia. Sprawdzono również jak zmienia się wartość sygnałów sterujących przy uszkodzeniu uzwojenia stojana.

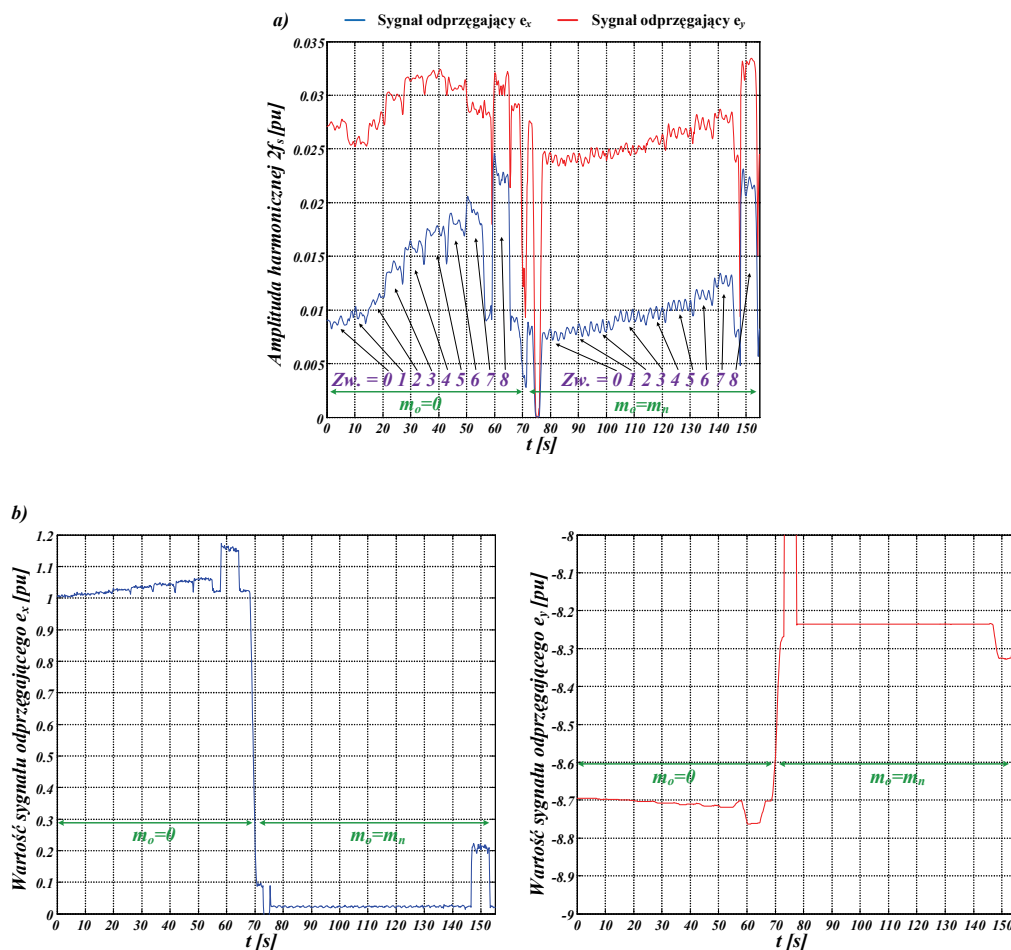


Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych dla sygnałów sterujących f_x^{ref} i f_y^{ref} podczas pracy silnika dla braku obciążenia i z obciążeniem znamionowym przy zwarcu od 1 do 8 zwojów:

a) zmiana wartości amplitudy $2f_s$ b) zmiana wartości sygnału sterującego

W przypadku analizowania zmian wartości sygnałów sterujących, w tych samych warunkach pracy (rys. 6b), można stwierdzić, że tylko wartość sygnału f_x^{ref} reaguje na

asymetrię spowodowaną zwarciem kilku zwojów w obrębie jednej cewki. Jednak zmiana tej wartości jest na niskim poziomie i w przypadku monitorowania uzwojeń stojana może być traktowana jedynie jako informacja dodatkowa. Dodatkowo widoczna jest jej duża zależność od momentu obciążenia.



Rys. 7. Wyniki badań eksperymentalnych dla sygnałów odprzegających e_x i e_y podczas pracy silnika dla braku obciążenia i z obciążeniem znamionowym przy zwarciu od 1 do 8 zwojów:
a) zmiana wartości amplitudy $2f_s$ b) zmiana wartości sygnału odprzegającego

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dla pracy on-line silnika przy zwiększaniu stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana i zmiany momentu obciążenia. Zwarcie kilku zwojów w jednej fazie silnika powoduje zwiększenie amplitudy składowej $2f_s$ dla obu sygnałów odprzegających (rys. 7a). Szczególnie wi-

doczna jest zmiana amplitudy sygnału e_x . W odróżnieniu od poprzednio analizowanych sygnałów intensywność zmian, wartości amplitudy $2f_s$ dla obu sygnałów odprzegających jest zależna od momentu obciążenia silnika. Zmniejsza się ona wraz ze wzrostem obciążenia silnika.

W przypadku analizowania zmian wartości sygnałów e_x i e_y (rys.7b) można zauważyć niewielki wzrost wraz ze zwiększaniem stopnia uszkodzenia uzwojenia dla silnika nieobciążonego, a w przypadku silnika obciążonego praktycznie niezauważalne.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych na silniku indukcyjnym z możliwością fizycznego modelowania zwarć zwojowych i pracującym w strukturze sterowania DFOC, można stwierdzić że możliwe jest monitorowanie tego typu uszkodzenia we wczesnej fazie jego wystąpienia. Pomimo kompensującego działania zamkniętej struktury sterowania na symptomy uszkodzenia, są one widoczne w składowej kolejności przeciwnej oraz w hodografie wektora przestrzennego prądu stojana już od zwarcia pojedynczych zwojów. W przypadku sygnałów wirtualnych w cyfrowej strukturze sterowania DFOC, realizowanej w procesorze sygnałowym, zwarcie pojedynczych zwojów powoduje istotne zwiększenie amplitudy składowej $2f_s$ dla obu sygnałów odprzegających e_x , e_y oraz sygnałów sterujących f_x^{ref} , f_y^{ref} . Analizując wartości sygnałów odprzegających i sterujących można zauważyć, że tylko wartość sygnału f_x^{ref} reaguje na asymetrię wywołaną zwarcie pojedynczych zwojów. Niestety, zmiany te są na niskim poziomie i mogą być traktowane tylko jako informacja dodatkowa. Realizacja praktyczna monitorowania stanu uzwojeń stojana silnika wiąże się z dodaniem dodatkowych procedur diagnostycznych do oprogramowania systemów sterujących przekształtnikowymi układami napędowymi.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu N N510 637340.

LITERATURA

- [1] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [2] KOWALSKI C.T., *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [3] KOWALSKI C., WIERZBICKI R., WOLKIEWICZ M., *Stator and Rotor Faults Monitoring of the Inverter-Fed Induction Motor Drive using State Estimators*, *Automatika – Intern. Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, Vol. 54, No. 3, 2013.
- [4] WOLKIEWICZ M., KOWALSKI C.T., *Neuronowy detektor zwarć zwojowych stojana silnika indukcyjnego wykorzystujący analizę PCA wektora prądu*, *Przebieg Elektrotechniczny*, R. 88, nr 4b, 2012, 288–293

- [5] WOLKIEWICZ M., KOWALSKI C.T., KAMIŃSKI M., *Wykrywanie zwarć zwojowych silnika indukcyjnego z wykorzystaniem składowych symetrycznych oraz sieci neuronowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, nr 4b, 2012, 276–281

ZALĄCZNIK

W tabeli 1 przedstawiono dane znamionowe, w tabeli 2 parametry badanego silnika indukcyjnego Indukta 90L-4, natomiast w tabeli 3 wielkości bazowe, niezbędne do przejścia z jednostek fizycznych do jednostek względnych [p.u.].

Tabela 1. Dane znamionowe badanego silnika

Nazwa	Symbol	Jednostki fizyczne		Jednostki względne [p.u.]
Moc	P_N	1,5	[kW]	0,621
Moment	M_N	10,16	[Nm]	0,661
Prędkość obrotowa	N_N	1410	[obr/min]	0,94
Napięcie stojana (fazowe)	U_{sN}	230	[V]	0,707
Prąd stojana	I_{sN}	3,5	[A]	0,707
Częstotliwość	f_{sN}	50	[Hz]	1
Strumień stojana	Ψ_{sN}	0,854	[Wb]	0,825
Strumień wirnika	Ψ_{rN}	0,797	[Wb]	0,770
Liczba par biegunów	p_b	2	[-]	2

Tabela 2. Parametry badanego silnika

Nazwa	Symbol	Jednostki fizyczne [Ω]	Jednostki względne [p.u.]
Rezystancja stojana	R_s	5,32	0,081
Rezystancja wirnika	R_r	3,53	0,0538
Reaktancja główna	X_m	82,396	1,25
Reaktancja rozproszenia stojana	$X_{\sigma s}$	4,8207	0,073
Reaktancja rozproszenia wirnika	$X_{\sigma r}$	4,8207	0,073

Tabela 3. Wielkości bazowe

Nazwa	Równanie	Wartość	Jednostka
Moc	$S_b = 3/2 U_b I_b$	2,415	[kW]
Moment	$M_b = p_b S_b / \Omega_b$	15,37	[Nm]
Prędkość obrotowa	$N_b = 60 f_{sN} / p_b$	1500	[obr/min]
Napięcie stojana	$U_{sb} = \sqrt{2} U_{sN}$	325,3	[V]
Prąd stojana	$I_{sb} = \sqrt{2} I_{sN}$	4,95	[A]
Częstotliwość	$f_{sb} = f_{sN}$	50	[Hz]
Pulsacja kątowna	$\Omega_b = 2\pi f_{sN}$	100π	[rad/s]
Strumień	$\Psi_b = U_b / \Omega_b$	1,035	[Wb]

STATOR WINDING CONDITION MONITORING IN A FIELD
– ORIENTED CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE

Issues of stator winding faults (short-circuit turns) of an induction motor working in the direct field-oriented control (DFOC) structure are discussed in this paper. The mathematical model and DFOC control structure with decoupling block are shortly described and tested in simulations. It is shown in experimental tests, that even single short-circuit turns of the stator winding cause significant changes in stator currents (in negative current sequence component and in vector hodograph) as well as in virtual signals, available in the DFOC structure $e_x, e_y, f_x^{ref}, f_y^{ref}$, which are accessible in the digital control structure in DSP.