

# Wybrane problemy diagnostyki układów napędowych z falownikami napięcia

Adam Sołbut

**W**spółczesne układy napędowe wykorzystują do zasilania silników układy przekształtnikowe pracujące pod nadzorem systemów mikroprocesorowych. Stosowane są tu rozbudowane algorytmy oparte zwykle na estymatorach strumienia i prędkości obrotowej [1, 3, 7, 8, 9]. Używane algorytmy diagnostyczne [6] wykorzystywane są dla przypadku wymuszenia napięciowego. Prace autora prowadzą do poszukiwania wskaźników oceny stanu niezależnych od stosowanych algorytmów sterowania [17]. Praktyczne rozwiązania układów napędowych, z falownikami napięcia i silnikami klatkowymi, wykorzystują estymatory strumienia i prędkości obrotowej [8, 9]. W przypadku wymuszenia napięciowego o znanej zadanej wartości częstotliwości (np.  $U/f = \text{const}$ ) do diagnostyki mogą być stosowane klasyczne algorytmy oparte na analizie harmonicznej prądów stojana. W przypadku sterowania układów ze sprzężeniami zwrotnymi ich wykorzystanie jest dyskusyjne.

Klasyczne metody diagnostyczne wykorzystują analizę harmoniczną prądu stojana. W przypadku niesinusoidalnego napięcia zasilającego stosowanie klasycznych algorytmów oceny stanu układu napędowego może prowadzić do błędnych wniosków [2]. Wpływ sprzężeń zwrotnych w algorytmach sterowania może także powodować błędną interpretację wyników analiz sygnałów diagnostycznych. Fakt istnienia harmonicznych w prądach fazowych oraz brak informacji o częstotliwości napięcia powodują zwiększenie wymagań co do długości rekordu danych oraz częstotliwości próbkowania. Problemem jest także zmienna prędkość obrotowa silnika. Wartość napięcia wymuszona jest przez algorytmy sterowania oraz stosowane rozwiązania regulatorów [5, 7, 8, 9].

W niniejszej publikacji opisano wyniki badań laboratoryjnych układów napędowych z silnikiem klatkowym oraz falownikami napięcia sterowanymi metodami orientacji wektora pola [1, 7, 8] oraz bezpośredniej regulacji momentem [9].

## Opis stanowiska badawczego

W celu sprawdzenia różnych algorytmów oceny stanu układów napędowych zbudowano stanowisko badawcze (fot. 1) składające się z falownika napięcia, układu obciążającego, zestawu maszyn z modelowanymi uszkodzeniami oraz układów pomiarowych. Do sterowania falownika wykorzystano procesor sygnałowy ADSP21262 firmy Analog Devices. Wszystkie algorytmy zostały opracowane w języku C++, umożliwiając sterowanie metodami skalarnymi [1, 7], orientacji wektora pola [5, 8] oraz bezpośredniej regulacji momentem [9, 19]. Stosowane są tu klasyczne regulatory liniowe (typu PI) oraz regulatory nieliniowe. Badania prowadzono dla trzech silników typu Sh90-L2.

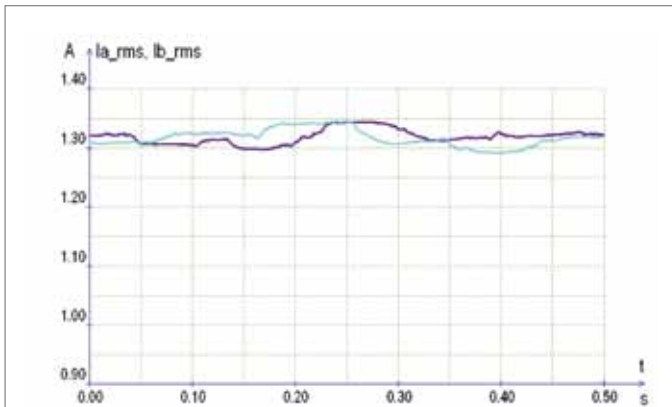
## CHOOSE PROBLEMS OF INVERTER – FED MOTOR DRIVES DIAGNOSTICS

**Abstract:** *Inverter-fed squirrel-cage motor diagnostics generates many problems. Causes of those problems can be for example variety of control methods, or working with various angular speeds. Present-day diagnostic methods apply to motors supplied directly by sinusoidal voltage power system. Analysis of chosen diagnostic algorithms that can be used independently from control method is presented in the paper. Efficiency of their adaptation had been proven with laboratory tests results. Test results through various angular speeds and control algorithms such as Direct Torque Control (DTC) and Field-Oriented Control (FOC) had been shown.*

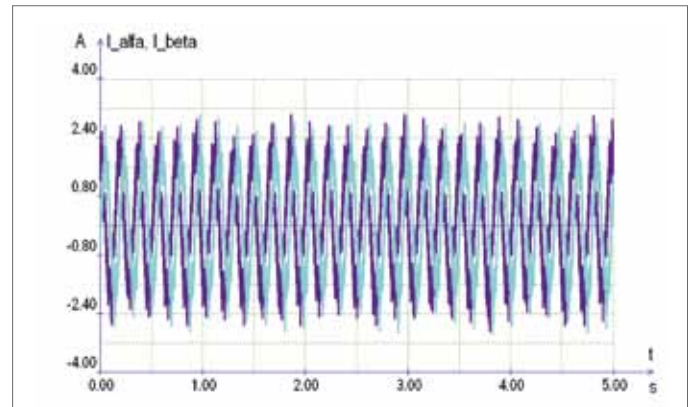
Jeden traktowany jako maszyna bez uszkodzeń, drugi z celowo wykonanym mimośrodem statycznym i ostatni z uszkodzeniami klatki wirnika. Wszystkie maszyny poddano badaniom w powtarzalnych warunkach przy zasilaniu z falowników sterowanych algorytmami  $U/f = \text{const}$ , DTC, DTC- $\delta$ , DTC-SVM,



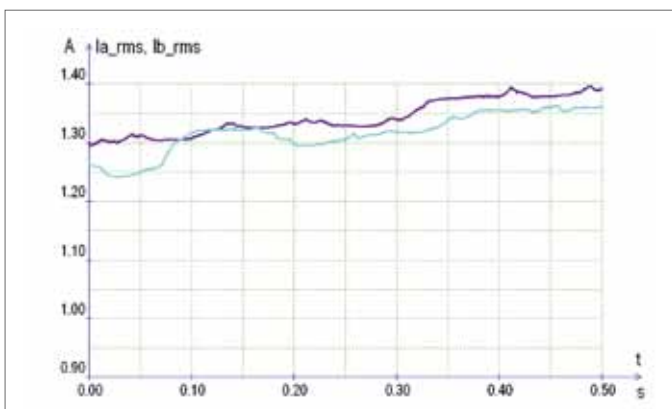
Fot. 1. Laboratoryjne stanowisko badawcze



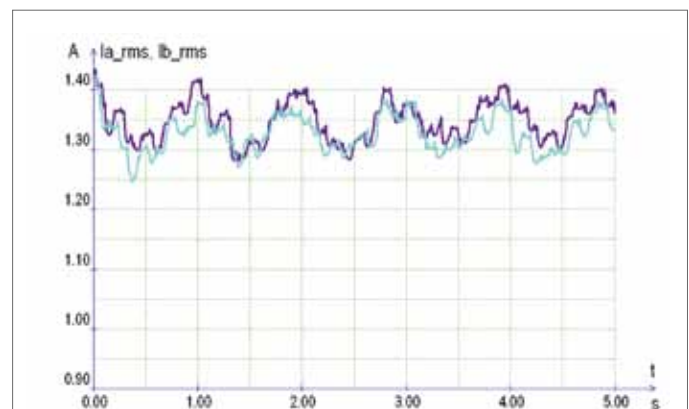
Rys. 2. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu stojana; 300 obr/min, DTC, maszyna sprawna



Rys. 4. Wartość chwilowa składowych wektora prądu stojana; 300 obr/min, DTC, uszkodzone 3 pręty



Rys. 3. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu stojana; 300 obr/min, DTC, uszkodzone 3 pręty



Rys. 5. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu stojana w czasie 5 s; 300 obr/min, DTC, uszkodzone 3 pręty

DFOC, FOC-SVM [10, 11, 12]. Do rejestracji przebiegów wykorzystano oscyloskop cyfrowy TDS 5034B firmy Tektronix. Oscyloskop wyposażony jest w pamięć umożliwiającą rejestrację 2 milionów próbek na każdym z 4 kanałów. Analizę danych wykonano, korzystając z autorskiego programu Anagaf\_win. Rejestrowano przebiegi prądów w układzie alfa/beta, prądu związanego z wymuszeniem strumienia w maszynie  $i_d$  oraz uchyb strumienia wirnika. Sygnały te wybrano na podstawie wyników modelowania numerycznego jako możliwe do wykorzystania w ocenie stanu silnika [14, 15, 16, 17, 18]. Obserwowano także inne sygnały wykorzystywane w algorytmach sterowania. Do estymacji strumienia wykorzystano estymator Jansena-Lorentza [8, 9]. Testowano także estymatory napięciowy i prądowy [4, 7].

W algorytmach diagnostycznych wykorzystano wartość estymowanej prędkości pola wirującego. Wielkość ta była szacowana na podstawie mierzonej (oraz zamiennie estymowanej) wartości prędkości kątowej wirnika oraz wartości prądu  $i_q$ , proporcjonalnego do momentu silnika. Na podstawie rejestrowanych wielkości obliczano wskaźniki diagnostyczne, które mogą być wykorzystane do oceny stanu w czasie normalnej eksploatacji napędu. Wobec silnego zniekształcenia wartości chwilowych prądu do analiz wykorzy-

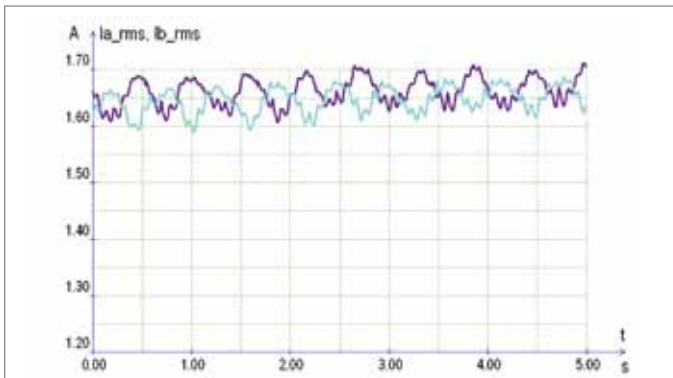
stano sygnały poddane filtracji polegającej na obliczaniu ruchomych wartości skutecznych i średnich odpowiednich sygnałów. Okres całkowania wynikał z estymowanej prędkości wirowania strumienia. Tak wybrana wartość okresu całkowania w znacznym stopniu ułatwia ocenę skali uszkodzeń [16].

### Badania diagnostyczne

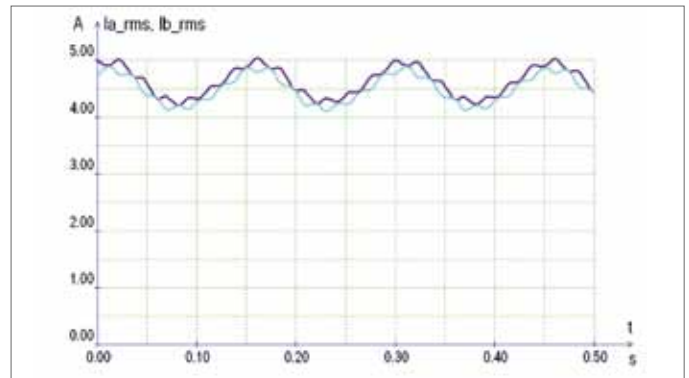
Badania symulacyjne wykazały [14], że przy niskich wartościach prędkości kątowej stosowanie znanych algorytmów diagnostycznych jest silnie utrudnione. Algorytmy związane z analizą harmoniczną przebiegu prądu stojana wymagają rejestracji bardzo dużej liczby próbek. Jest to efekt istnienia w przebiegu prądu składników wynikających z częstotliwości modułacji (wykonywania obliczeń przy sterowaniu mikroprocesorowym) oraz konieczności zapamiętania przebiegu w znacznie dłuższym okresie czasu. Stosowanie wstępnej obróbki danych, w postaci obliczania wielkości uśrednionych (np. rucho-

reklama

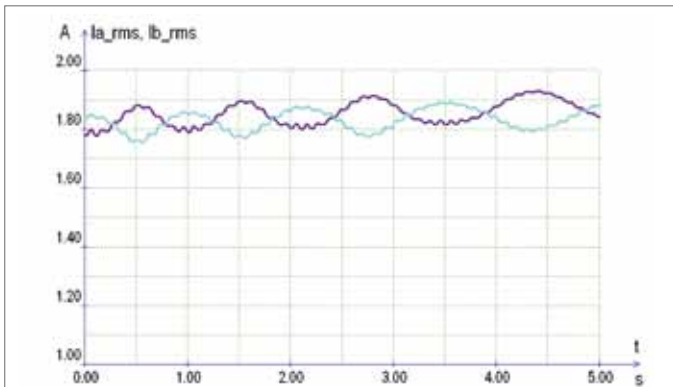




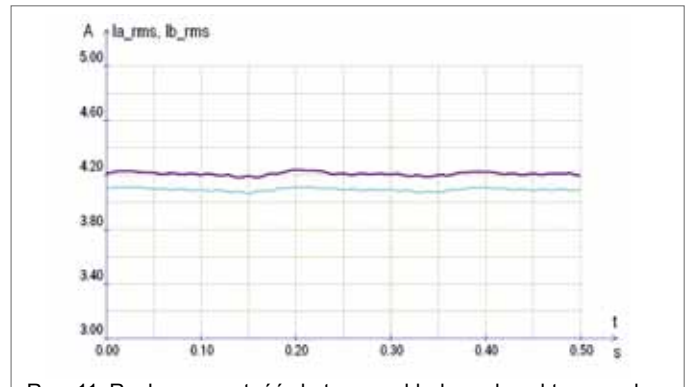
Rys. 6. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu stojana w czasie 5 s; 300 obr/min, DFOC, uszkodzone 3 pręty



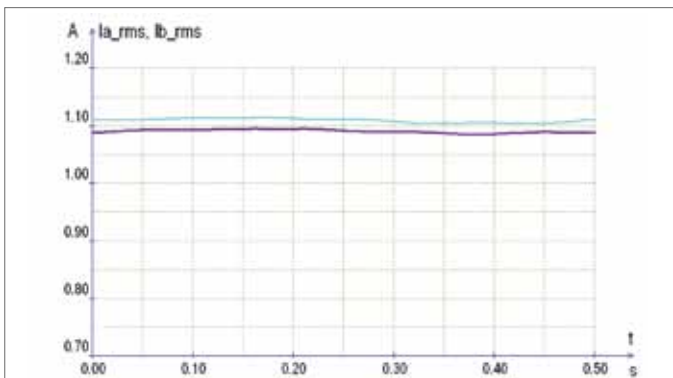
Rys. 10. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu, sterowanie skalarne, 25 Hz, obciążenie znamionowe, uszkodzona klatka wirnika



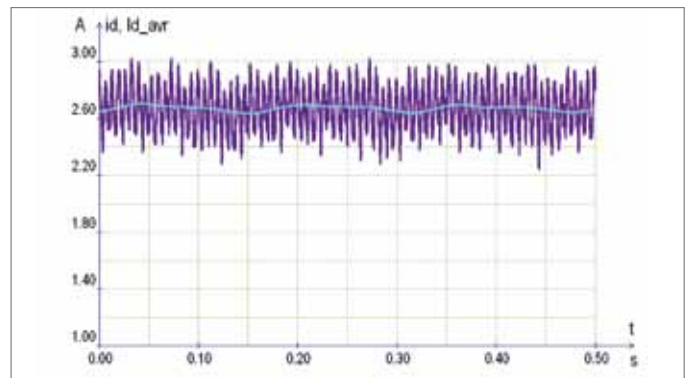
Rys. 7. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu, sterowanie skalarne, 5 Hz, bieg jałowy, uszkodzona klatka wirnika



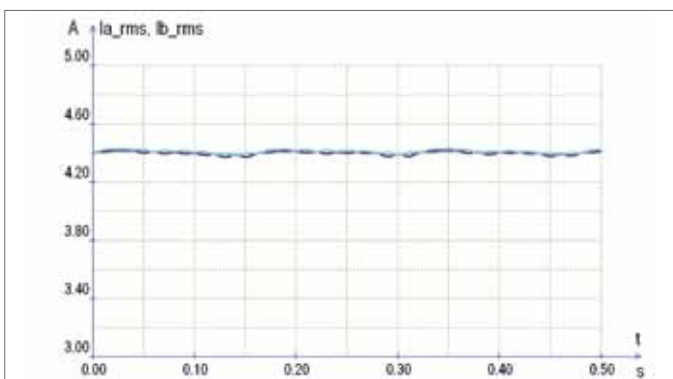
Rys. 11. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu, sterowanie skalarne, 25 Hz, obciążenie znamionowe, mimośród statyczny



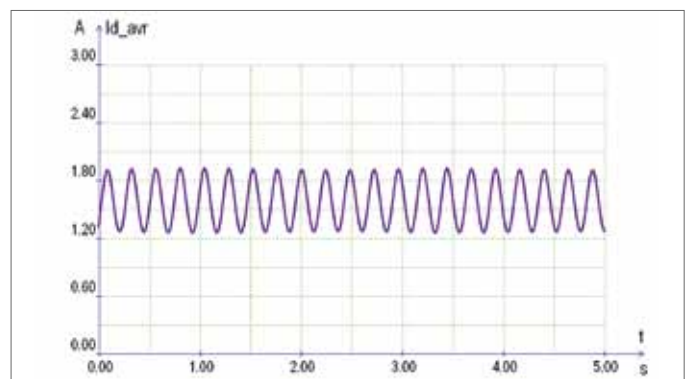
Rys. 8. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu, sterowanie skalarne, 5 Hz, bieg jałowy, mimośród statyczny



Rys. 12. Wartość prądu  $i_d$  oraz ruchoma wartość średnia prądu  $i_d$ , sterowanie skalarne, 25 Hz, obciążenie znamionowe, maszyna sprawna



Rys. 9. Ruchoma wartość skuteczna składowych wektora prądu, sterowanie skalarne, 25 Hz, obciążenie znamionowe, maszyna sprawna



Rys. 13. Wartość prądu ruchoma, wartość średnia prądu  $i_d$ , sterowanie skalarne, 25 Hz, obciążenie znamionowe, uszkodzona klatka wirnika



	Maszyna sprawna	Pęknięte pręty wirnika	Mimośród wirnika
DFOC	0,99	0,96	0,85
DTC- $\delta$	1,00	0,99	0,81
DTC-s	1,00	0,94	0,86
DTC_SVM	1,00	0,94	0,85
FOC-PWM	0,99	0,98	0,81
U/f = const	1,00	0,92	0,88

	Maszyna sprawna	Pęknięte pręty wirnika	Mimośród wirnika
DFOC	0,95	0,86	0,93
DTC- $\delta$	0,90	0,80	0,90
DTC-s	0,95	0,83	0,94
DTC_SVM	0,96	0,84	0,96
FOC-PWM	0,90	0,84	0,88
U/f = const	0,97	0,80	0,97

	OCF	SCF	MS_ $\Psi$	MS_ $I_d$
A	0.947	0.998	1.94	0.00009
B	0.834	0.985	265.1	6.55
C	0.95	0.969	1.65	0.00014

	OCF	SCF	MS_ $\Psi$	MS_ $I_d$
A	0.931	0.998	82	1.46
B	0.817	0.987	83	77.8
C	0.917	0.960	72	1.34

me wartości skuteczne, średnie), w znacznym stopniu powoduje zmniejszenie wymagań dotyczących długości zapamiętywania danych.

Na rys. 2 pokazano przebieg ruchomej wartości skutecznej składowych alfa/beta wektora prądu stojana dla maszyny sprawnej. Sterowanie metodą DTC dla zadanej wartości prędkości obrotowej równej 300 obr/min. Wartości średnie przebiegu w czasie 0,5 s są praktycznie równe sobie, ich wartości oscylują w zakresie od 1,3 do 1,35 A. W przypadku usterek w postaci uszkodzonych trzech sąsiednich prętów klatki wirnika wartości te oscylują w zakresie od 1,24 do 1,4 A. Przy czasie analizy 0,5 s widoczne są już oscylacje, lecz lepszym rozwiązaniem jest sprawdzenie zakresu oscylacji w czasie dłuższym (rys. 5). Obserwacja wartości chwilowych czasie 5 s wykazuje

także oscylacje (rys. 4), lecz do analizy harmoniczej należałoby zarejestrować znacznie dłuższy okres czasu. Wynika to z minimalizacji wpływu niedopasowania czasu rejestracji do okresu podstawowej harmoniczej napięcia zasilającego. Proponowane algorytmy nie wymagają zapamiętywania wartości w tak długim okresie czasu i mogą być wykonywane w czasie normalnej eksploatacji napędu [17]. Oscylacje ruchomych wartości skutecznych są wyraźnie widoczne także przy sterowaniu metodą DFOC (rys. 6).

Większą skuteczność diagnostyki można uzyskać przy sterowaniu w układzie otwartym (np. sterowanie skalarne U/f = const).

Rys. 7 przedstawia przebiegi ruchomych wartości skutecznych składowych prądu dla sterowania skalarne, przy 5 Hz zadanej częstotliwości i z uszkodzoną klatką wirnika.

Wyraźnie widoczne są oscylacje tych wielkości. Dla maszyny sprawnej są to praktycznie pokrywające się linie proste. W tym przypadku widoczny jest także wpływ mimośrodu statycznego (rys. 8). Pojawia się tu asymetria składowych prądu stojana.

Ocena stanu przy niskich prędkościach jest utrudniona. Trudno jest także interpretować wyniki zarejestrowanych wielkości z uwagi na konieczność rejestracji dużej liczby próbek oraz wpływ zmian momentu obciążenia. Znacznie lepsze efekty diagnostyczne uzyskano przy większych prędkościach obrotowych.

W tabeli 1 pokazano współczynniki oceny symetrii prądów silnika [14]:

$$SCF = \frac{\min(I_{RMS\_a}^2, I_{RMS\_b}^2)}{\max(I_{RMS\_a}^2, I_{RMS\_b}^2)} \quad (1)$$

gdzie:

$I_{RMS\_MIN}$ ,  $I_{RMS\_MAX}$  – wartość minimalna i maksymalna ruchomej wartości skutecznej prądu stojana w czasie pomiaru.

Przedstawione wyniki dotyczą silnika Sh90-L2 przy zadanej wartości prędkości obrotowej równej 3000 obr/min oraz obciążeniu momentem znamionowym. Widoczny jest wpływ mimośrodu na wartość tego współczynnika. W zależności od metody sterowania mimośród spowodował zmniejszenie jego wartości od 12 do 19%. Pęknięcia klatki wirnika powodują jedynie zmiany jego wartości zależnie od metody sterowania od 1 do 8%.

Tabela 2 prezentuje współczynniki oceny oscylacyjności ruchomej wartości skutecznej [14]:

$$OCF = \frac{I_{RMS\_MIN}^2}{I_{RMS\_MAX}^2} \quad (2)$$

gdzie:

$I_{RMS\_a}$ ,  $I_{RMS\_b}$  – ruchoma wartość skuteczna składowych  $\alpha/\beta$  wektora prądu stojana.

Uszkodzenie prętów klatki wirnika w każdym badanym przypadku powoduje zmniejszenie wartości współczynnika oscylacyjności. W większości przypadków różnica sięga 10%. Jedynie w metodzie FOC-PWM wynosi tylko ok. 6%. Tabele 3 i 4 przedstawiają wybrane współczynniki oceny stanu dla sterowania metodami DFOC i DTC, przy zadanej prędkości obrotowej 1500 obr/min i obciążeniu momentem znamionowym. Kolejne wiersze dotyczą maszyny sprawnej (A), uszkodzonej klatki

wirnika (pęknięte 3 pręty – B) oraz mimośrodowego osadzenia wału wirnika (C). Przy sterowaniu DFOC widoczne są efekty wpływu uszkodzeń na wielkości OCF oraz SCF. Uszkodzenie klatki wirnika wpływa także znacząco na średnie odchylenie kwadratowe sygnałów liczonych jako ruchome wartości średnie uchybu strumienia silnika ( $MS_{\Psi}$  [mWb]) oraz prądu  $i_d$  ( $MS_{I_d}$  [mA]). Dla uszkodzenia w postaci mimośrodowo statycznego wyrażną zmianę wykazuje jedynie wartość współczynnika SCF.

Dla sterowania DTC (tabela 4) istotne znaczenie mają współczynniki OCF oraz SCF. W tym przypadku dla oceny pęknięć klatki można wykorzystać współczynnik  $MS_{I_d}$ . W sygnale uchybu strumienia wirnika wpływ uszkodzeń jest pomijalny. Podobnie jak w przypadku DFOC, wyraźny wpływ mimośrodowo statycznego dotyczy wartości współczynnika SCF.

## Wnioski

Wyniki badań laboratoryjnych układów napędowych z silnikami klatkowymi zasilanymi z falowników napięcia wykazują możliwość oceny stanu pracy w trakcie normalnej eksploatacji napędu. Silne zniekształcenia wartości chwilowych sygnałów, które mogą być wykorzystane do diagnostyki, utrudniają interpretację wyników analiz sygnałów diagnostycznych. Skutecznym rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie wstępnej obróbki w postaci filtracji sygnałów, polegającej na całkowaniu w czasie rzeczywistym, z okresem zależnym od prędkości wirowania estymowanego strumienia silnika. Rozwiązanie takie jest stosunkowo łatwe do implementacji i nie wymaga dużej mocy obliczeniowej. Wykonane analizy wykazują, że optymalnymi sygnałami diagnostycznymi są ruchome wartości skuteczne składowych wektora prądu stojana. Analizy polegające na ocenie oscylacji tych sygnałów wskazują na skuteczność identyfikacji uszkodzeń klatki wirnika. W przypadku awarii polegającej na powstaniu mimośrodowego osadzenia wału wirnika jedynie ocena asymetrii prądów okazała się skuteczna, niezależnie od metod sterowania. Najlepsze efekty proponowanych algorytmów diagnostycznych uzyskuje się przy sterowaniu w układach sterowania skalarnego, w których dostępna jest informacja o wartości częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia zasilającego.

## Literatura

- [1] BOSE B.K.: *Power electronics and variable frequency drives*. IEEE Press, New York 1997.
- [2] DYBOWSKI P.: *Wpływ zasilania napięciem odkształconym na widmo prądów stojana, cz. 2*. XIII Seminarium Techniczne: Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych. Eksploatacja, diagnostyka i modernizacja silników elektrycznych, Ustroń-Jaszowiec, 19–21 maja 2004, s. 25–29.
- [3] HABETLER T.G., PROFUMO F., PASTORELLI M., TOLBERT L.M.: *Direct torque control of induction machines using space vector modulation*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, Sep/Oct 1992, p. 1045–1053.
- [4] JANSEN P.L., LORENZ R.D.: *A physically insightful approach to the design and accuracy assessment of flux observers for field oriented induction machines driver*. Proc. IEEE-IAS Annual Meet., 1992, p. 570–577.
- [5] KAŻMIERKOWSKI M.P., BLAABJERG F., KRISHNAN R.: *Control In Power Electronics – Selected Problems*. Academic Press, USA, 2002.
- [6] KOWALSKI C.: *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 57, Wrocław 2005.
- [7] KRZEMIŃSKI Z.: *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [8] ORŁOWSKA-KOWALSKA T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [9] SIKORSKI A.: *Bezpośrednia regulacja momentu i strumienia silnika indukcyjnego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2009.
- [10] SIKORSKI A., KORZENIEWSKI M.: *Porównanie właściwości trójfazowego przekształtnika DC/AC sterowanego metodami DTC-ST i DTC-SVM*. „Przegląd Elektrotechniczny” nr 6, 2008, s. 117–120.
- [11] SIKORSKI A., KORZENIEWSKI M.: *Possibilities of torque and flux control using DTC-d method*. „Electronics”, Vol. 7, No 2, 2003, p. 95–99.
- [12] SIKORSKI A., RUSZCZYK A., KORZENIEWSKI M., KAŻMIEROWSKI M. P., ANTONIEWICZ P., KOŁOMOYJSKI W., JASIŃSKI M.: *Porównanie właściwości metod bezpośredniej regulacji strumienia i momentu (DTC-SVM, DTC- $\delta$ , DTC-2x2)*. VII Krajowa Konferencja Naukowa „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym”, Łódź 2007, s. 427–432.
- [13] SOLBUT A.: *Calculation of squirrel-cage motor inductances including rotor eccentricity*. Archives of Electrical Engineering, VOL. LVII, No. 3–4, 2009, pp. 157–169.
- [14] SOLBUT A.: *Modelowanie numeryczne wybranych algorytmów diagnostycznych maszyn asynchronicznych*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” nr 77(2007), s. 15–18.
- [15] SOLBUT A.: *Ocena stanu układu napędowego sterowanego metodą orientacji wektora pola*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” nr 80/2008, s. 5–9.
- [16] SOLBUT A.: *Squirrel-cage motor drive dynamics modeling including chosen damages – program tools*. Archives of Electrical Engineering, Vol. LVII, No. 3–4, 2010.
- [17] SOLBUT A.: *Wybrane algorytmy diagnostyki układu napędowego z falownikami napięcia*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” nr 86/2010, s. 35–40.
- [18] SOLBUT A.: *Zalety zastosowania sygnału skutecznej ruchomej prądu w diagnostyce maszyny asynchronicznej zasilanej z falownika napięcia*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” nr 74(2006), s. 109–114.
- [19] ŻELECHOWSKI M., KAŻMIEROWSKI M.P., BLAABJERG F.: *Controller design for direct torque controlled space vector modulated (DTC-SVM) induction motor driver*. IEEE ISIE 2005, Dubrownik, Croatia, s. 951–956.

Artykuł opracowano w ramach pracy badawczej N N510 352436.

dr inż. Adam Solbut – Wydział Elektryczny, Politechnika Białostocka; a.solbut@pb.edu.pl