

Mateusz Dybkowski, Czesław T. Kowalski, Teresa Orłowska–Kowalska
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

WPLYW USZKODZENIA WIRNIKA NA PRACĘ BEZCZUJNIKOWEGO NAPĘDU INDUKCYJNEGO Z ESTYMATOREM MRAS^{CC}

INFLUENCE OF THE ROTOR FAULTS TO THE PERFORMANCE OF THE SENSORLESS INDUCTION MOTOR DRIVE WITH MRAS^{CC} ESTIMATOR

Abstract: In the paper analysis of the sensorless induction motor drive with rotor faults is presented. The rotor flux and speed is reconstructed using the MRAS^{CC} estimator, where the induction motor is used as a reference model. The stator current estimator and current model of the rotor flux are used as adapted models. Most of the speed estimators used in sensorless drives are sensitive to motor parameters changes, especially to the rotor resistance changes. The proposed MRAS^{CC} estimator is very robust to all motor parameter changes, thus it should work properly in the case of faulted rotor. In the paper simulation and experimental results of the sensorless IM drive with broken rotor bars are presented. Range of the stable work of the control system is shown. Characteristic frequency harmonics of the IM state variables connected with broken bars are introduced. The low speed region and the dynamical properties of the sensorless drive with rotor faults are tested.

1. Wstęp

Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi (SI) odgrywają coraz większe znaczenie w różnych gałęziach przemysłu [1], [2], [3]. Dzięki swoim właściwościom regulacyjnym, prostej budowie, niezawodności i niskiej cenie wypierają one maszyny prądu stałego. SI wymagają jednak stosowania specjalnych, złożonych, układów sterowania [3], które umożliwiają uzyskanie coraz lepszych właściwości dynamicznych. Układy te wymagają informacji o zmiennych stanu, które coraz częściej są dostarczane ze specjalnych układów służących do ich odtworzenia [1], [3], [4].

Silniki indukcyjne mimo stosunkowo dużej niezawodności ulegają jednak uszkodzeniom, które mogą doprowadzić do poważnych konsekwencji w szczególności w napędach bezczujnikowych. Dlatego też istotne jest wczesne wykrywanie symptomów uszkodzeń tych maszyn i jak najwcześniejsze awaryjne wyłączenie napędu [8]-[10]. Ponadto w układach napędowych, w których często dochodzi do tego typu uszkodzeń wykorzystywane powinny być tylko takie estymatory zmiennych stanu, które charakteryzują się dużą odpornością na zmiany parametrów SI.

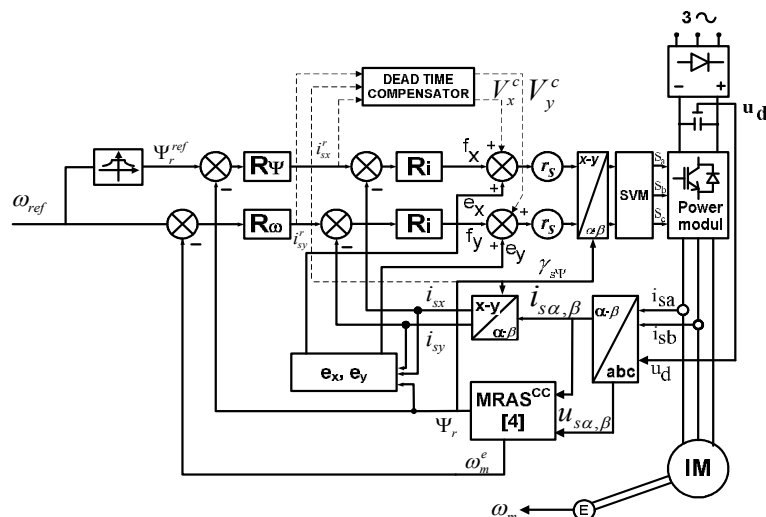
W układach wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym (DFOC) symptomy uszkodzenia wirnika mogą być widoczne w postaci charakterystycznych częstotliwości w składowych prądu

stojana, module strumienia wirnika, napięciach sterujących oraz w sygnałach odprzegajających. Monitorowanie on-line tych wielkości może ułatwić diagnostykę stanu napędu, a tym samym zwiększyć niezawodność całego układu napędowego.

W referacie przedstawiono analizę bezczujnikowego układu wektorowego sterowania SI z uszkodzonymi prętami klatki wirnika. Badania symulacyjne zweryfikowano na stanowisku laboratoryjnym.

2. Struktura sterowania napędu

Badania dotyczą układu bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego DFOC, w którym do estymacji strumienia i prędkości kątowej wykorzystano estymator adaptacyjny MRAS^{CC} [4], [7]. Schemat ideowy bezczujnikowego układu sterowania przedstawiono na rysunku 1. Model matematyczny, analizę stabilności, oraz wrażliwości estymatora MRAS^{CC} przedstawiono szczegółowo w [7]. Układ ten składa się z dwóch niezależnych estymatorów strumienia wirnika i estymatora prądu stojana, z których sygnały podawane są na mechanizm adaptacji prędkości. Na wyjściu tego układu otrzymuje się prędkość kątową, przestrajającą model prądowy strumienia wirnika i estymator prądu stojana [6]. W estymatorze MRAS^{CC} rolę modelu odniesienia pełni silnik indukcyjny.



Rys. 1. Schemat struktury bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego napędu z silnikiem indukcyjnym

W badaniach symulacyjnych układu bezczujnikowego wykorzystano model matematyczny silnika indukcyjnego umożliwiający modelowanie uszkodzenia prętów klatki wirnika. Model ten opisano szczegółowo w [10].

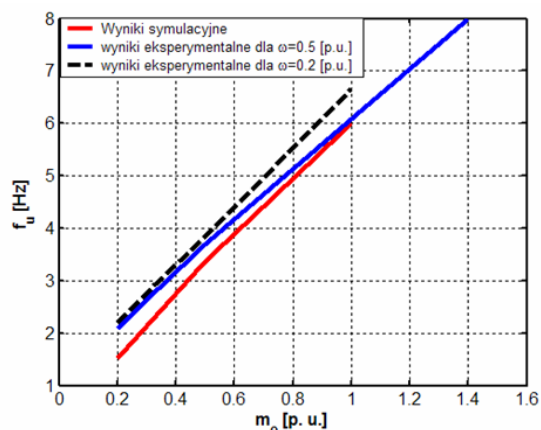
3. Wpływ uszkodzenia wirnika na jakość estymacji prędkości kątowej

W trakcie badań modelowano uszkodzenia wirnika poprzez całkowite przerwanie pręta wirnika. Badany silnik posiada 22 pręty w klatce, z czego maksymalna liczba uszkodzonych prętów wynosiła 8. Uszkodzenia dotyczyły tylko sąsiednich prętów wirnika.

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na wskazanie sygnałów związanych ze strukturą bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego, które niosą ze sobą najwięcej informacji o stopniu uszkodzenia wirnika. Wykazano, że sygnałami tymi są: składowa prądu stojana i_{sy} , sygnały odprężające e_x , e_y , moduł strumienia wirnika i estymowana wartość prędkości kątowej.

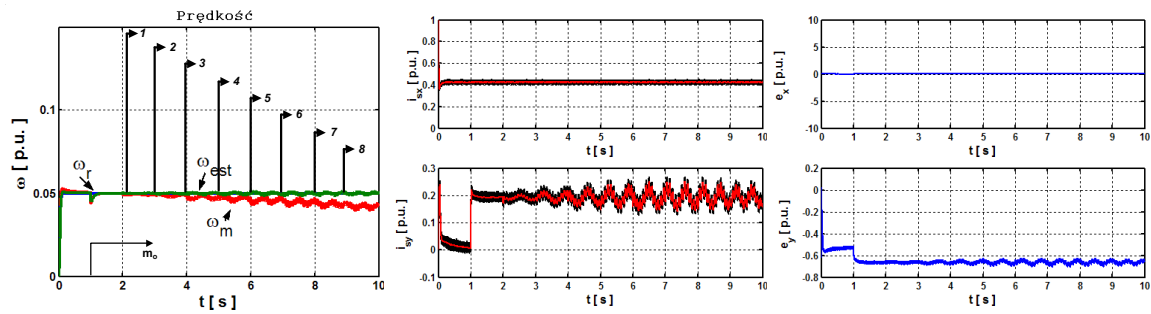
Stwierdzono także, że charakterystyczne częstotliwości pojawiające się w tych sygnałach nie zależą od aktualnej wartości prędkości kątowej. Są one jednak ściśle powiązane z bieżącym momentem obciążenia i stopniem uszkodzenia wirnika. Przykładową charakterystykę zmian częstotliwości charakterystycznej dla uszkodzenia wirnika $f_u = 2sf_s$ (f_s – częstotliwość zasilania) w funkcji zmian momentu obciążenia dla 4 uszkodzonych prętów wirnika SI przedstawiono na rysunku 2. Badania te przeprowadzono dla dwóch prędkości kątowych. Przy znajomości aktualnej wartości momentu obciążenia

sygnały te mogą być wykorzystane do skutecznej diagnostyki napędu bezczujnikowego.

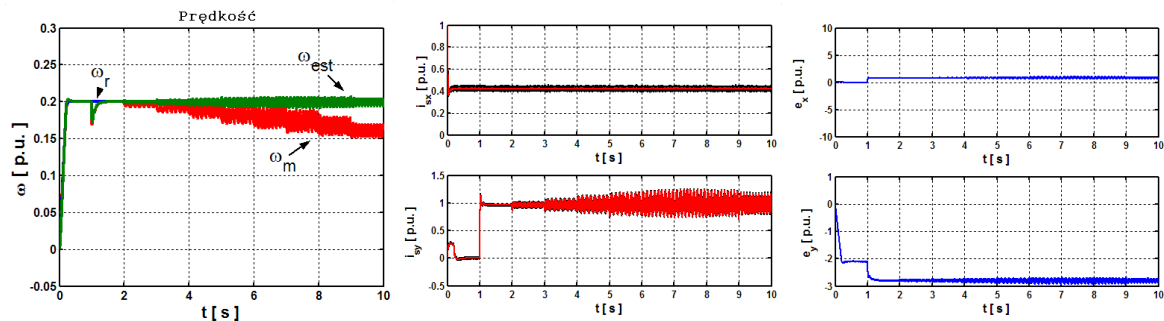


Rys. 2. Charakterystyka zmian częstotliwości f_u w funkcji momentu dla napędu z SI o uszkodzonych 4 prętach klatki wirnika

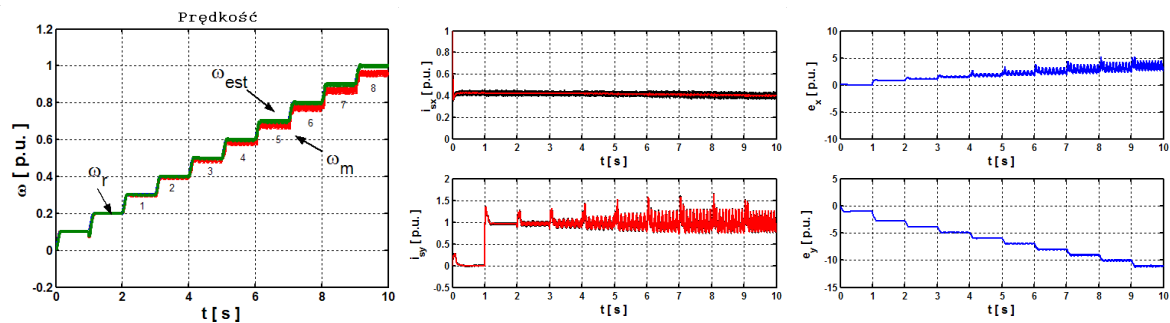
Na rysunkach 3–5 przedstawiono przebiegi prędkości zadanej, mierzonej, estymowanej, moduł strumienia wirnika, składowe prądu stojana i_{sx} , i_{sy} , sygnały odprężające e_x i e_y w różnych warunkach pracy układu bezczujnikowego. Badania wykonano w jednostkach względnych [3]. Na rysunku 3 przedstawiono start układu bezczujnikowego do prędkości $\omega_m = 0.05\omega_{mN}$. W chwili $t = 1$ s załączono moment obciążenia ($0.2m_{oN}$). W chwili $t = 2$ s następowało stopniowe zwiększanie stopnia uszkodzenia wirnika (od uszkodzonego 1 pręta w chwili $t = 2$ s, do uszkodzonych ośmiu prętów wirnika w chwili $t = 9$ s). Na przedstawionych przebiegach można zaobserwować pojawienie się charakterystycznej częstotliwości związanej z uszkodzeniem wirnika.



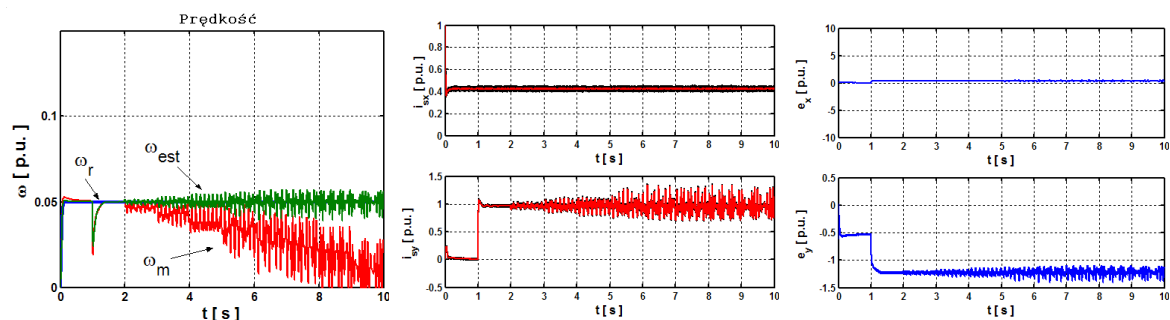
Rys. 3. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej, estymowanej, składowe prądu stojana i_{sx} , i_{sy} , sygnały e_x , e_y ; $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$, $m_o = 0,2 m_{oN}$



Rys. 4. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej, estymowanej, składowe prądu stojana i_{sx} , i_{sy} , sygnały e_x , e_y $\omega_m = 0,2\omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$



Rys. 5. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej, estymowanej, składowe prądu stojana i_{sx} , i_{sy} , sygnały e_x i e_y $\omega_m = 0 - \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$



Rys. 6. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej, estymowanej, składowe prądu stojana i_{sx} , i_{sy} , sygnały e_x , e_y , $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

Wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia wirnika zwiększa się wartość częstotliwości uszkodzeniowej oraz błąd pomiędzy prędkością mierzoną i estymowaną. Fakt ten wynika z wrażliwości struktury wektorowego sterowania SI

i estymatora na zmiany parametrów schematu zastępczego SI.

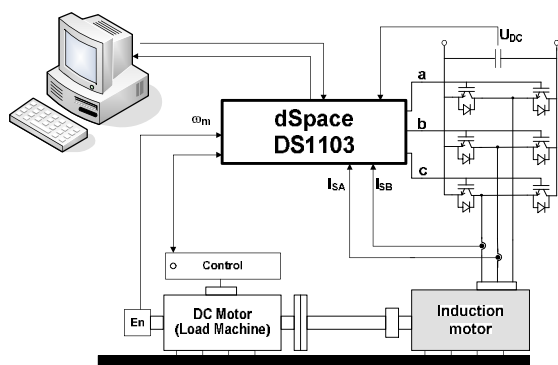
Na rysunku 4 przedstawiono podobną sytuację dla prędkości $\omega_m = 0,2\omega_{mN}$ i $m_o = m_{oN}$. Zgodnie z charakterystyką z rysunku 2, zwiększeniu uległa częstotliwość uszkodzeniowa. Wraz ze

wzrostem stopnia uszkodzenia wirnika zwiększa się błąd ustalony pomiędzy prędkością mierzoną i estymowaną. Należy jednak zwrócić uwagę, że układ bezczujnikowy pracuje w sposób stabilny w całym zakresie zmian prędkości kątowej (rys. 5). Pomimo pojawiającego się błędu ustalonego, zwiększającego się wraz ze zwiększaniem stopnia uszkodzenia wirnika, napęd nie traci stabilności, a estymator działa w sposób prawidłowy. W przypadku napędu pracującego z bardzo małą prędkością kątową przy pełnym momencie obciążenia uszkodzenie kilku prętów wirnika może doprowadzić do sytuacji, że napęd przestanie reagować na sygnały ze struktury sterowania (rys. 6).

Układ bezczujnikowy działa prawidłowo w całym zakresie zmian prędkości kątowej z pełnym momentem obciążenia wtedy, gdy liczba uszkodzonych prętów nie przekracza 3. Jeżeli ich liczba jest większa, w układzie napędowym pojawiają się problemy związane z rozruchem i stabilną pracą w zakresie bardzo małych wartości prędkości kątowych (rys. 6).

4. Wyniki badań eksperymentalnych

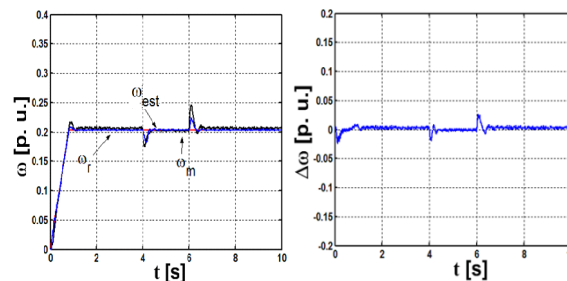
Badania eksperymentalne układu DFOC wykonano na stanowisku laboratoryjnym, wyposażonym w kartę DS1103 oraz odpowiednie oprogramowanie, za pomocą której sterowano pracą silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości MSI. Stanowisko umożliwiło badanie układu sterowania z silnikiem indukcyjnym z uszkodzonymi prętami klatki wirnika.



Rys. 7. Schemat stanowiska laboratoryjnego

Obiektem badań był silnik indukcyjny Stg 80X-4C, firmy BESEL. Sygnały prądowe oraz napięciowe mierzone były za pomocą przetworników hallotronowych LEM LA25 i LV 50 skalujących sygnały tak, aby były akceptowalne przez kartę procesora sygnałowego. Schemat ideowy układu przedstawiono na rysunku 7.

W celu szczegółowej analizy pracy układu, na rysunku 8 przedstawiono przebiegi prędkości oraz błędu jej odtworzenia dla napędu bezczujnikowego z SI ze „zdrowym” wirnikiem.

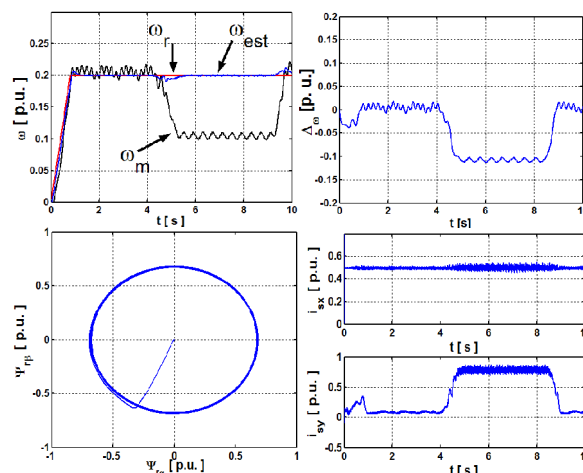


Rys. 8. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu wektorowego sterowania SI z estymatorem MRAS^{CC} („zdrowy” wirnik)

Widać, że układ działa poprawnie i prawidłowo reaguje na zmiany momentu obciążenia.

W celu weryfikacji otrzymanych wyników badań symulacyjnych bezczujnikowego układu wektorowego sterowania SI z estymatorem MRAS^{CC}, na kolejnych rysunkach przedstawiono wybrane przebiegi zmiennych stanu napędu (prędkości zadanej, mierzonej i estymowanej, błędu prędkości, hodograf strumienia wirnika oraz składowe wektora prądu stojana w układzie wirującym (x-y)), w którym uszkodzone zostały 2 pręty klatki wirnika. Taki stopień uszkodzenia pozwala na jednoznaczną ocenę układu napędowego.

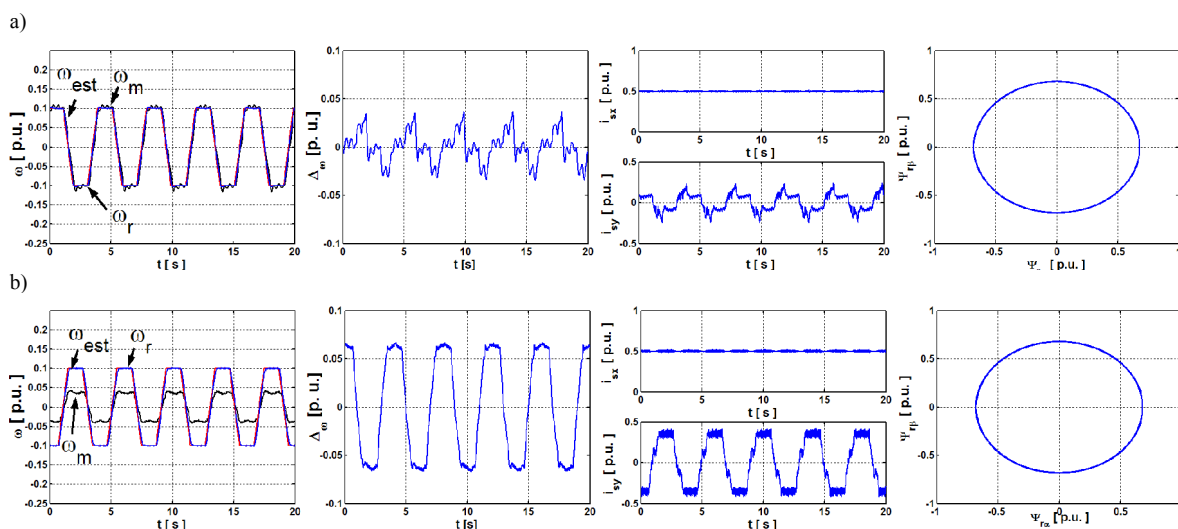
Na rysunku 9 przedstawiono proces rozruchu układu do prędkości $\omega_m = 0,2\omega_{mN}$ oraz załączenia momentu obciążenia w chwili $t = 4\text{ s}$, w przypadku uszkodzenia 2 prętów wirnika.



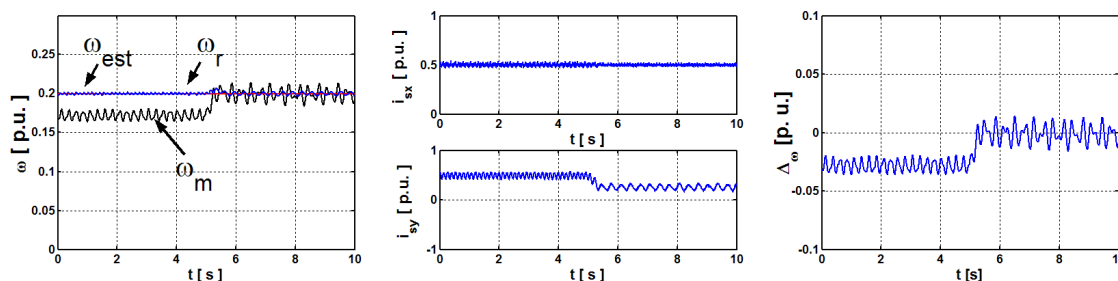
Rys. 9. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu wektorowego sterowania SI z estymatorem MRAS^{CC} (uszkodzone 2 pręty wirnika)

Po załączeniu momentu obciążenia widoczny jest duży błąd pomiędzy prędkością mierzoną i estymowaną, pojawia się także charakterystyczna częstotliwość związana z występowaniem uszkodzenia wirnika. Częstotliwość ta jest wyraźnie widoczna w sygnałach składowych prądu stojana, prędkości mierzonej i estymowanej, podczas zmiany momentu obciążenia (rys. 9).

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wpływ wartości momentu obciążenia na jakość działania bezczujnikowego układu wektorowego sterowania SI z uszkodzonymi prętami klatki wirnika. Wraz ze wzrostem momentu wzrasta błąd ustalony pomiędzy prędkością mierzoną i estymowaną.



Rys. 10. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu wektorowego sterowania SI z estymatorem MRAS^{CC} podczas cyklicznych nawrotów przy $m_o = 0,1m_{oN}$ (a), $m_o = 0,5m_{oN}$ (b) (uszkodzone 2 pręty wirnika)



Rys. 11. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu wektorowego sterowania SI z estymatorem MRAS^{CC} podczas zmiany momentu obciążenia z $m_o = 0,5m_{oN}$ do $m_o = 0,2m_{oN}$ (uszkodzone 2 pręty wirnika)

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły wyniki uzyskane w badaniach symulacyjnych. Pojawiający się błąd ustalony może doprowadzić nawet do problemów związanych z rozruchem układu napędowego. Problem ten jest szczególnie istotny w zakresie bardzo małych prędkości kątowych. W praktyce wystąpienie uszkodzenia już 1 pręta może być skutecznie wykryte przez układ diagnostyczny.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymentalne bezczujnikowego układu wektoro-

wego sterowania silnikiem indukcyjnym z uszkodzonymi prętami klatki wirnika wskazują na możliwość stabilnej pracy tego układu w napędach, w których dochodzi do częstych uszkodzeń wirnika, pod warunkiem zastosowania estymatora prędkości i strumienia wirnika odpowiednio odpornego na zmiany parametrów silnika. Badania wykazały, że układ bezczujnikowy z estymatorem MRAS^{CC} działa stabilnie w całym zakresie zmian prędkości kątowej w obecności uszkodzeń prętów klatki wirnika.

Sygnały związane ze strukturą wektorowego sterowania SI mogą być z powodzeniem wykorzystane w procesie diagnostyki napędu.

W układach z automatyczną diagnostyką wirnika możliwe jest wykrycie, przy wykorzystaniu sygnałów, w których występuje częstotliwość f_u , uszkodzenia już 1 pręta klatki wirnika. Stabilna praca napędu bezczujnikowego, w szczególności w zakresie dużych prędkości kątowych, z estymatorem MRAS^{CC} dla uszkodzonych 3 i więcej prętów wskazuje na możliwość wykorzystania tego typu układów w napędach narażonych na częste awarie.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy rozwojowy Nr R01 014 03.

6. Literatura

- [1] Vas P., *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford University Press, New York, 1998
- [2] Kazmierkowski M. P., Blaabjerg F., Krishnan: *Control in Power Electronics – Selected Problems*, Academic Press, USA, 2002
- [3] Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003
- [4] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M.: *Dynamical properties of induction motor drive with novel MRAS estimator*, Przegląd Elektrotechniczny, nr. 11, 2006, ss. 35-38
- [5] Ohyama K., Asher G. M., Sumner M.: *Comparative Analysis of Experimental Performance and*

Stability of Sensorless Induction Motor Drives, IEEE Trans. Ind. Electr., vol. 53, no. 1, 2006, pp. 178–186

[6] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M.: *Improved MRAS-type speed estimator for the sensorless induction motor drive*, Proc. of XIX Symp. EPNC'2006, Maribor, Slovenia, 2006, pp. 105-106

[7] Dybkowski M, Orłowska-Kowalska T.: *Application of the Stator Current-based MRAS Speed Estimator in the Sensorless Induction Motor Drive*, EPE-PEMC'2008, Poznan, Poland, CD

[8] Kowalski Cz. T., Pawlak M.: *Zastosowanie metody analizy wektora przestrzennego prądu stojana do wykrywania uszkodzeń w silnikach indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7-8, 2004, ss. 771-777

[9] Kowalski Cz. T.: *Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce silników indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1, 2006, ss. 21-26

[10] Pawlak M., Orłowska-Kowalska T.: *Zastosowanie uproszczonego modelu dwuosiowego do modelowania uszkodzeń wirnika silnika klatkowego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, 2006, ss. 48-53

Autorzy

Dr inż. Mateusz Dybkowski,

e-mail: mateusz.dybkowski@pwr.wroc.pl

Dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. PWR

e-mail: czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl

Prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska - Kowalska

e-mail: teresa.orlowska-kowalska@pwr.wroc.pl

Politechnika Wroclawska,

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów

Elektrycznych

ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław