

*silnik indukcyjny, napęd elektryczny, enkoder, czujnik prądu,  
fault tolerant, FTC, czujniki pomiarowe, detekcja uszkodzeń*

Kamil KLIMKOWSKI\*

## **KOMPENSACJA USZKODZEŃ WYBRANYCH CZUJNIKÓW POMIAROWYCH W UKŁADACH NAPĘDOWYCH Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM POPRAZ REDUNDANCJĘ SPRZĘTOWĄ**

W artykule opisano zagadnienie identyfikacji uszkodzeń czujników prądu stojana oraz prędkości kątowej w układach wektorowego sterowania połowo zorientowanego (DRFOC) silnikiem indukcyjnym. Przedstawiono wpływ uszkodzeń tych czujników na pracę napędu oraz zaproponowano algorytm ich detekcji. Opracowano strukturę napędu odpornego na uszkodzenia tych elementów opartego na redundancji sprzętowej. Badania symulacyjne wykonano w środowisku Matlab/SimPowerSystem.

### **1. WPROWADZENIE**

W celu zapewnienia bezpiecznego i sprawnego funkcjonowania nowoczesnych układów napędowych wektorowych z silnikami indukcyjnymi wymagane są układy pomiarowe podstawowych zmiennych stanu. Projektowane i wdrażane są systemy pozbawione wybranych sprzężeń zwrotnych, a brakujące sygnały (strumień stojana, wirnika, moment elektromagnetyczny, prędkość kątowa wirnika) mogą być estymowane na podstawie sygnałów z istniejących sprzężeń [1]–[3]. Może to być realizowane przy wykorzystaniu symulatorów, obserwatorów zmiennych stanu, Filtrów Kalmana czy sieci neuronowych [1], [2], [8], [10]. W związku z tym, że rozwiązania te wymagają prawidłowego działania czujników pomiarowych, układy napędowe powinny posiadać dodatkowe systemy diagnostyki, aby zapobiegać ich nagłym uszkodzeniom w instalacjach przemysłowych [5]–[7].

---

\* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, e-mail: kamil.klimkowski@pwr.edu.pl

Większość dostępnych obecnie publikacji z tematyki systemów FTC (*Fault Tolerant Control*) odnosi się do uszkodzeń jednego czujnika pomiarowego w danym cyklu pracy napędu [12]–[14].

Głównym celem artykułu jest przetestowanie algorytmu wykrywania awarii dwóch czujników (prędkości kątowej i prądu stojana) oraz przedstawienie układu odpornego na te uszkodzenia opartego na redundancji sprzętowej. Zawarte wyniki dotyczą struktury wektorowego sterowania połowo zorientowanego silnikiem indukcyjnym i zostały zrealizowane w środowisku MATLAB/SimPowerSystem.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADÓW STEROWANIA

Jedną z najprostszych metod sterowania silnikiem indukcyjnym jest sterowanie skalarnie, w którym wykorzystuje się zależności obowiązujące dla stanów ustalonych pracy maszyny. Układ sterowania nie oddziałuje na wzajemne położenie wektorów prądów i strumieni skojarzonych i tym samym nie ma możliwości prawidłowej kontroli procesów przejściowych w takim napędzie.

W układzie sterowania skalarnego  $U/f = \text{const}$  stabilizacja strumienia magnetycznego w silniku uzyskiwana jest na podstawie proporcjonalnej zmiany wartości napięcia i częstotliwości zasilania tj. przez utrzymanie stałego stosunku  $U/f$  [4]. Wadą sterowania skalarnego jest brak kontroli silnika w stanach przejściowych nad istotnymi wielkościami silnika takimi jak m.in. prąd, moment elektromagnetyczny czy strumień magnetyczny [4]. Realizacja takiego układu może odbywać się w pętli otwartej, tj. bez sprzężeń zwrotnych, oraz zamkniętej – z obwodem regulacji prędkości. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy struktury sterowania w zamkniętym układzie regulacji prędkości silnika indukcyjnego określonego zależnością (1) [4]:

$$|\mathbf{u}_s| = \frac{r_s}{x_s} \sqrt{\frac{\left(1 - \omega_s \omega_r \sigma \frac{x_s x_r}{r_s r_r}\right)^2 + \left(\omega_s \frac{x_s}{r_s} + \omega_r \frac{x_r}{r_r}\right)^2}{1 + \left(\omega_r \frac{\sigma x_r}{r_r}\right)^2}} \quad (1)$$

gdzie:  $x_r, x_s$  – reaktancja własna uzwojenia wirnika i stojana,  $\omega_r$  – pulsacja w wirniku, pulsacja poślizgu,  $\omega_s$  – pulsacja w stojanie,  $r_r, r_s$  – rezystancja uzwojenia wirnika i stojana,  $\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_s x_r}$  – współczynnik całkowitego rozproszenia maszyny.

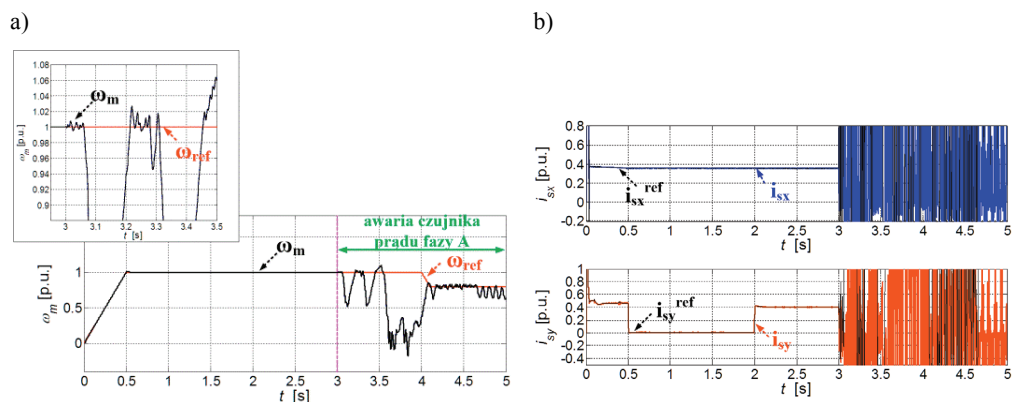
Zaletą metod skalarnych jest wykorzystywanie jednego czujnika – prędkości, bądź żadnego – w przypadku sterowania w otwartej pętli. Pozwala to na prawidłową pracę napędu w chwili uszkodzenia jakiegokolwiek czujnika pomiarowego.



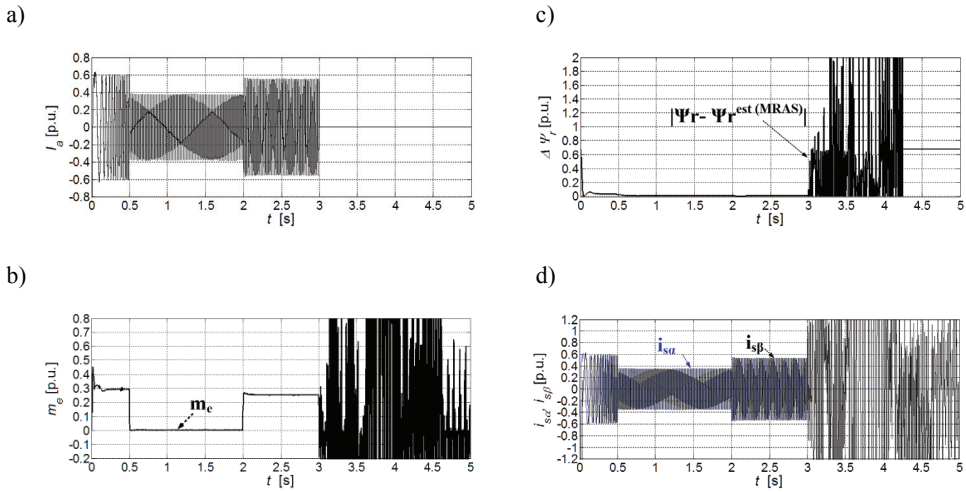
Kolejną strukturą sterowania wykorzystaną w niniejszej pracy jest metoda sterowania DRFOC. Jej idea polega na wymuszeniu w zamkniętej strukturze sterowania połowo zorientowanych składowych wektora prądu stojana  $i_{sx}$  oraz  $i_{sy}$ , które kształtują strumień wirnika i moment elektromagnetyczny. Schemat blokowy struktury DRFOC przedstawiono na rys. 2. Szczegółowy opis i analizę prezentowanej struktury sterowania przedstawiono w [11].

### 3. WPŁYW USZKODZEŃ CZUJNIKÓW PRĄDU I PRĘDKOŚCI NA PRACĘ UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM

Pomiar prądu stojana silnika indukcyjnego ma bardzo duże znaczenie dla poprawnej pracy całego układu napędowego, gdyż uzyskiwane z nich wartości są sygnałami wejściowymi dla podrzędnej pętli regulacji prądu. Ponadto do prawidłowej estymacji zmiennych stanu konieczna jest informacja o aktualnej wartości prądu stojana [4], [9]. Czujnik prądu może wskazywać błędne wyniki pomiarów wynikające z nasycenia rdzenia magnetycznego lub przesunięcia w fazie sygnału w pętli sprzężenia zwrotnego. Jednym z najniebezpieczniejszych typów uszkodzeń jest całkowita jego awaria [6], [7]. Poniżej przedstawiono wpływ uszkodzeń czujnika prądu stojana na pracę napędu sterowanego metodą wektorową DFOC (rys. 3 i 4). Analizę przeprowadzono tylko dla podstawowego trybu pracy, czyli pracy silnikowej napędu przy wymuszeniu znamionowej wartości prędkości. Zawarte wyniki dotyczą całkowitego przzerwania pętli pomiarowej z czujnika prądu fazy  $i_{sA}$ .



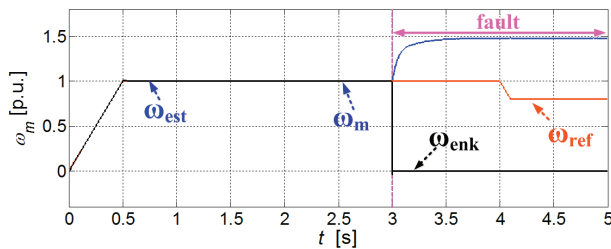
Rys. 3. Przebieg prędkości kątowej (a) oraz składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (b) przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia czujnika prądu  $i_{sA}$  przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)



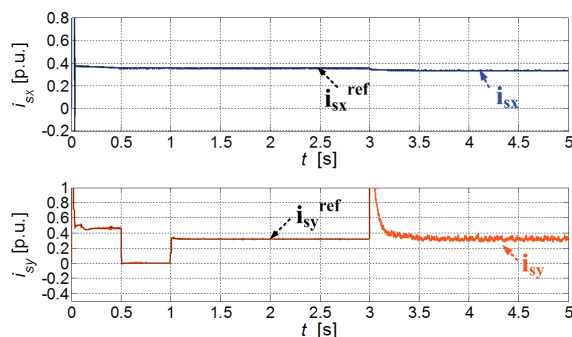
Rys. 4. Przebieg prądu fazowego  $i_{sA}$  (a), momentu elektromagnetycznego (b), wartości bezwzględnej różnicy pomiędzy estymowaną i mierzoną wartością strumienia wirnika (c) oraz składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d) przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia czujnika prądu  $i_{sA}$  przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

Całkowite uszkodzenie czujnika prądu jest najbardziej niekorzystne dla pracy napędu z silnikiem indukcyjnym. Bezpośrednio z wartością prądu związany jest moment elektromagnetyczny oraz strumień wirnika. W przebiegach tych zmiennych stanu pojawiają się silne oscylacje o dużej amplitudzie. Ponadto brak pomiaru jednej fazy prądu uniemożliwia śledzenie zadanej trajektorii prędkości, a także jej estymację.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki badań wpływu przerwania pętli sprzężenia zwrotnego na przebieg prędkości mierzonej, estymowanej przy wykorzystaniu estymatora MRAS<sup>CC</sup> [9] oraz momentu elektromagnetycznego w strukturze DFOC [4], [9]. Napęd pracuje ze znamionową prędkością. Uszkodzenie enkodera nastąpiło w chwili  $t = 3$  s. Nagły zanik sygnału z enkodera spowodował wzrost prędkości kątowej silnika oraz momentu elektromagnetycznego.



Rys. 5. Przebieg prędkości mechanicznej i estymowanej przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prędkości, przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)



Rys. 6. Przebieg składowych x-y prądu stojana przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prędkości, przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

Jednym z najniebezpieczniejszych rodzajów uszkodzeń jest całkowite przerwanie prędkościowej pętli pomiarowej. W tym momencie układ regulacji wystawia maksymalną możliwą wartość zadanego momentu elektromagnetycznego a prędkość rzeczywista bardzo szybko rośnie. Konieczne jest jak najszybsze wykrycie tego typu awarii. Szczegółowe wyniki badań wpływu uszkodzeń czujników prędkości i prądu stojana zostały przedstawione w pracach [6], [7].

#### 4. DETEKCCJA USZKODZEŃ CZUJNIKÓW PRĄDU STOJANA I PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ

W przypadku czujnika prędkości najszybszym i najprostszym sposobem detekcji awarii jest porównywanie przebiegów prędkości mechanicznej oraz estymowanej przez dowolny estymator tej wielkości [6], [7]. Przy uszkodzeniu tego typu przetworników pomiarowych w strukturach sterowania wektorowego występuje różnica pomiędzy prędkością mierzoną a estymowaną. Dlatego zdecydowano się wykorzystać dodatkowe sygnały diagnostyczne, które zwiększą niezawodność detekcji. Dla metody polowo zorientowanej wybrano uchyb pomiędzy wartością składowej  $i_{sx}$  prądu stojana a jej wartością referencyjną. Detektor zostaje aktywowany jeśli wartości uchybów są większe niż dopuszczalne wartości graniczne. Układ generuje wtedy impuls logiczny informujący o wystąpieniu uszkodzenia. Zasadę działania algorytmu przedstawia zależność (2).

$$\text{IF} \begin{cases} |\omega_m - \omega_m^{\text{est}}| \geq \varepsilon_1 \\ |i_{sy}^{\text{ref}} - i_{sy}| \geq \varepsilon_2 \end{cases} \text{ THEN flaga}^\omega = 1 \quad (2)$$

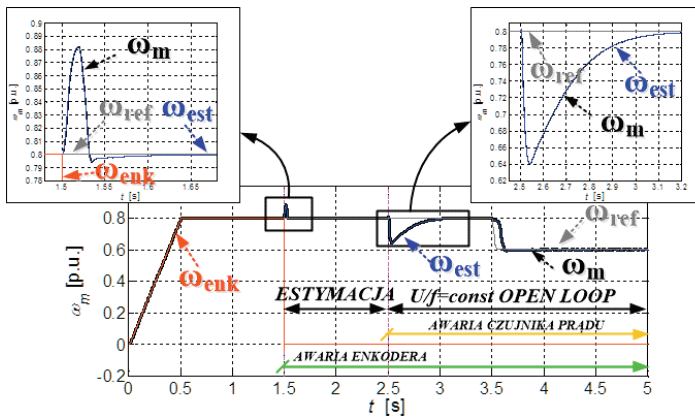
Analogicznie zaprojektowano układ do wykrywania awarii czujnika prądu. W tym przypadku zdecydowano się wykorzystać różnicę pomiędzy wartością estymowaną

a zadaną modułu strumienia wirnika oraz wartością składowej  $i_{sy}$  prądu stojana a jej wartością referencyjną – zależność (3).

$$\text{IF} \left\{ \begin{array}{l} |\Psi_r^{\text{ref}} - \Psi_r^{\text{est}}| \geq \varepsilon_3 \\ |i_{sx}^{\text{ref}} - i_{sx}| \geq \varepsilon_4 \end{array} \right. \text{ THEN flaga}^i = 1 \quad (3)$$

gdzie:  $\varepsilon_1 = 0,02 + 0,1 \cdot \omega_m^{\text{ref}}$ ,  $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  – dopuszczalne progi graniczne uchybów dla analizowanego układu napędowego sterowanego metodą DFOC.

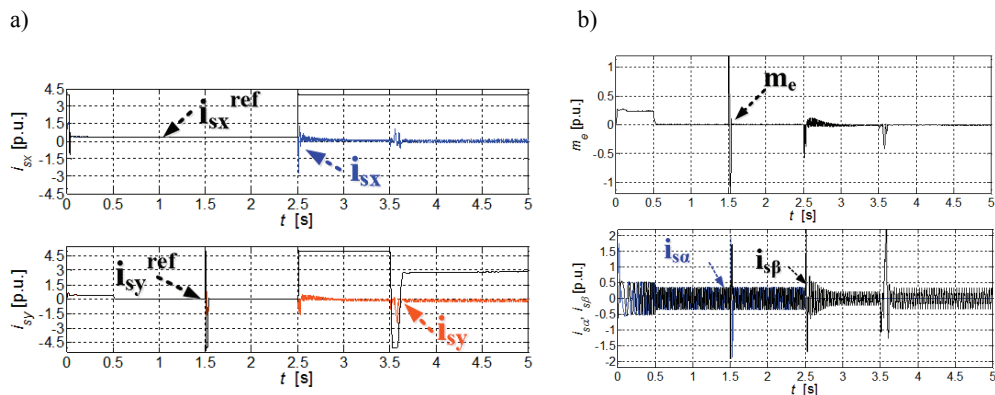
Do estymacji prędkości kątowej wykorzystano estymator MRAS<sup>CC</sup> opisany w pracy [9]. Zasada działania algorytmu polega na ciągłej obserwacji różnicy pomiędzy wartością zadaną a estymowaną strumienia wirnika i składowej  $x$  prądu stojana. Wynikiem działania takiego detektora jest wartość porównywana z dopuszczalną wartością graniczną. Jeśli wartość ta jest większa to układ generuje impuls logiczny informujący o wystąpieniu uszkodzenia. Wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych dla powyżej opisanych detektorów przedstawiono w [7], [8].



Rys. 7. Przebiegi mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej prędkości kątowej przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia enkodera w chwili  $t = 1,5$  s oraz czujnika prądu  $i_{sA}$  w chwili  $t = 2,5$  s przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

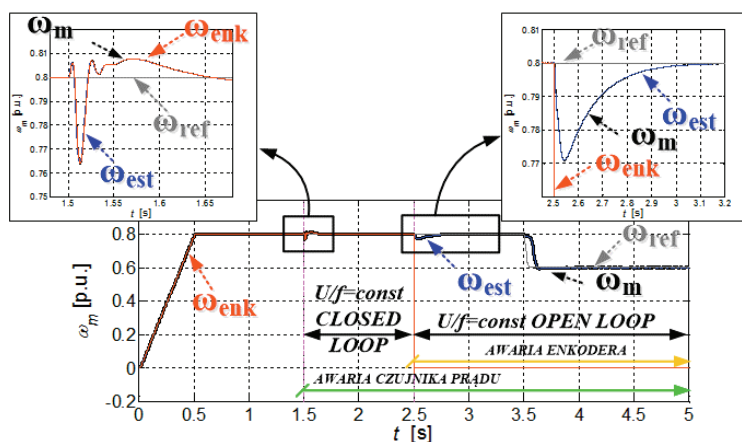
Kolejne badania dotyczą uszkodzenia czujnika prędkości oraz prądu w jednym cyklu pracy napędu (rys. 7–10). Założono, że w po czasie 1,5 s uszkodzeniu uległ czujnik prędkości kątowej, a w chwili  $t = 2,5$  s pojawiła się awaria czujnika prądu stojana. Po pierwszej awarii układ został przełączony w tryb bezczujnikowy z estymatorem MRAS w pętli sprzężenia zwrotnego. Po wystąpieniu kolejnego uszkodzenia nie możliwa jest praca w systemie sterowania wektorowego, gdyż do jego prawidłowej pracy niezbędne są informacje o aktualnej wartości prądu. System został przełączony w tryb sterowania skalarnego bez sprzężenia zwrotnego od prędkości kątowej. Esty-

macja prędkości jest niemożliwa w tym układzie pracy gdyż estymator także wykorzystuje sygnał z czujników prądu stojana. (w badaniach założono, że nie dysponujemy redundantnym czujnikiem prądu stojana).



Rys. 8. Przebiegi składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (a), momentu elektromagnetycznego oraz składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (b) przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia enkodera w chwili  $t = 1,5$  s oraz czujnika prądu  $i_{sA}$  w chwili  $t = 2,5$  s przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

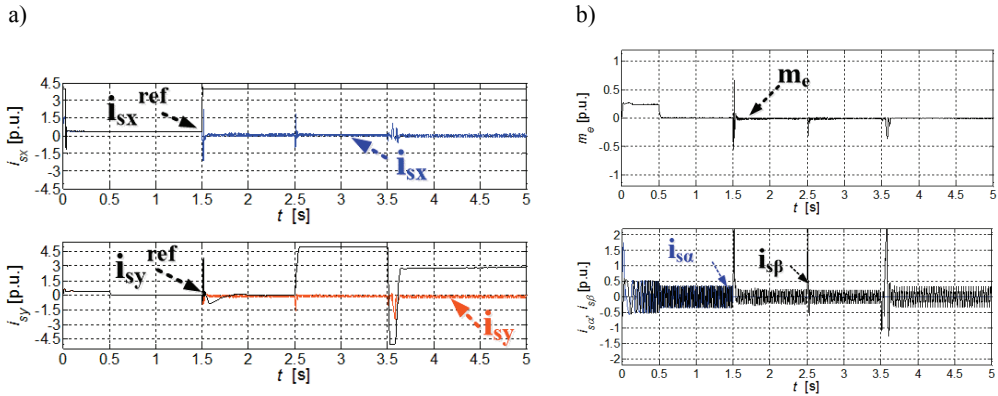
W chwili  $t = 1,5$  s widoczne są krótkotrwałe impulsy w przebiegach momentu elektromagnetycznego i prądu stojana. Natomiast w chwili  $t = 2,5$  s także wystąpiły impulsy w przebiegach podstawowych zmiennych stanu, a ponadto wystąpił spadek prędkości kątowej silnika o 25%. Po około 0,5 sekundy wartość prędkości powróciła do wartości referencyjnej.



Rys. 9. Przebiegi mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej prędkości kątowej przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia czujnika prądu  $i_{sA}$  w chwili  $t = 1,5$  s oraz enkodera w chwili  $t = 2,5$  s przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

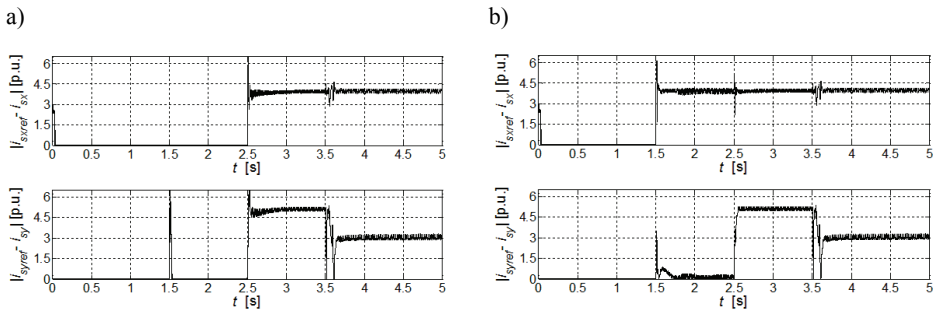


Drugim rozpatrywanym przypadkiem jest uszkodzenie czujnika prądu w pierwszej kolejności, a po upływie 1 sekundy – enkodera. Wyniki przedstawiono na rys. 9, 10.



Rys. 10. Przebiegi składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (a), momentu elektromagnetycznego oraz składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (b) przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia czujnika prądu  $i_{sA}$  w chwili  $t = 1,5$  s oraz enkodera w chwili  $t = 2,5$  s przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

Po wykryciu awarii czujnika prądu nastąpiło przełączenie struktury sterowania na skalarną z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. W przeciwieństwie do poprzedniego przypadku możliwa jest praca z pomiarem prędkości. Także przebiegi momentu elektromagnetycznego i prądu stojana nie zostały zakłócone w takim samym stopniu jak miało to miejsce poprzednio. Dopiero w chwili  $t = 2,5$  s doszło do uszkodzenia enkodera. Układ detekcji w tym momencie nie mógł przejść na estymację prędkości ze względu na fakt, że nie jest ona możliwa przy błędnym pomiarze prądu. Nastąpiło zatem przełączenie struktury sterowania na skalarną bez prędkościowej pętli sprzężenia zwrotnego. Przejście to nie wywołało dynamicznych zmian w przebiegach innych zmiennych stanu i możliwa była dalsza praca napędu. Na rysunku 11. zaprezentowano



Rys. 11. Przebieg uchybów pomiędzy wartościami składowych  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  prądu stojana a ich wartościami referencyjnymi: dla przypadku z rys. 7–8 (a) oraz z rys. 9–10 (b), przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

przebiegi sygnałów diagnostycznych: uchyby pomiędzy wartościami składowych  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  prądu stojana a ich wartością referencyjnymi dla obu przedstawionych wyżej przypadków. Przedstawione wyniki wskazują w jaki sposób odbyła się poprawna detekcja uszkodzonych czujników.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wpływ uszkodzeń czujnika prądu oraz prędkości na pracę układu napędowego z silnikiem indukcyjnym. Ponadto zaproponowano metodę kompensacji awarii opartą na redundancji sprzętowej tj. zmianie topologii struktury sterowania. Zaprezentowany algorytm pozwala na dalszą pracę silnika w sytuacji występujących po sobie uszkodzeń obu czujników pomiarowych. Należy jednak zaznaczyć, że przełączenie sterowania wektorowego na skalarne o dużo mniejszej dynamice może powodować niekontrolowane zjawiska w przebiegach zmiennych stanu silnika oraz prędkości. Ponadto taki rodzaj kompensacji nie jest wskazany dla pracy napędu przy niskich prędkościach (tj. niskiej częstotliwości) oraz przy dużym obciążeniu wału silnika momentem mechanicznym. Przejście układu sterowania na metodę skalarną z otwartą pętlą regulacji powinno skutkować awaryjnym wyłączeniem całego procesu technologicznego w odpowiednio szybkim czasie po stwierdzeniu wystąpienia awarii obu czujników pomiarowych.

*Praca zrealizowana w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-2013/09/B/ST7/04199.*

## LITERATURA

- [1] ISERMANN R., *Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, New York 2006.
- [2] BLANKE M., KINNAERT M., LUNZE J. et al., *Diagnosis and fault-tolerant control*, Springer-Verlag, 2003.
- [3] KLIMKOWSKI K., DYBKOWSKI M., *Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi sterowane metodami wektorowymi DFOC oraz DTC-SVM odporne na uszkodzenia przemiennika częstotliwości*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 33, Seria: Monografie, Nr 20, Wrocław 2013.
- [4] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [5] RODRÍGUEZ-BLANCO et al., *A Failure-Detection Strategy for IGBT Based on Gate-Voltage Behavior Applied to a Motor Drive System*, IEEE Trans. Industrial Electronics, 2011, Vol. 58, No. 5, 1625–633.
- [6] KLIMKOWSKI K., DYBKOWSKI M., *Wpływ uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych na pracę napędu indukcyjnego sterowanego metodą wektorową*, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering, 2014, No. 77, 185–192.
- [7] KLIMKOWSKI K., DYBKOWSKI M., *Analiza wektorowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym odpornego na uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych*, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering, 2014, No. 77, 193–200.

- [8] KLIMKOWSKI K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., *Speed Fault Tolerant Direct Torque Control of Induction Motor Drive*, Proc. of the 16th Int. Conf. Power Electronics and Motion Control PEMC 2014, Antalya, Turkey, 21–24.09.2014.
- [9] DYBKOWSKI M. *Estymacja prędkości kątowej w układach napędowych o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 67, Seria: Monografie, Nr 20, Wrocław 2013.
- [10] KHALAF SALLOUM GAEID, HEW WOOI PING, *Fault Tolerant Control of Induction Motor*, Modern Applied Science, 2011, Vol. 5, No. 4, 83–94.
- [11] BLASCHKE F., *The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed-loop control system for rotating field machines*, Siemens Review, 1972, 34, 217–220.
- [12] ROMERO M.E., SERON M.M., DE DONA J.A., *Sensor fault-tolerant vector control of induction motors*, IET Control Theory and Applications, 2010.
- [13] HANEN BERRIRI, MOHAMED WISSEM NAOUAR, ILHEM SLAMA-BELKHODJA, *Easy and Fast Sensor Fault Detection and Isolation Algorithm for Electrical Drives*, IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, Vol. 27, No. 2.
- [14] ROTHENHAGEN K., FUCHS F.W., *Current Sensor Fault Detection by Bilinear Observer for a Doubly Fed Induction Generator*, IEEE Industrial Electronics, IECON 2006.

COMPENSATION ALGORITHM BASED ON HARDWARE REDUNDANCY  
OF CHOSEN MEASUREMENT SENSORS FAULTS  
IN DRIVE SYSTEMS WITH INDUCTION MOTOR

In the paper the issue of identifying stator current and angular velocity sensor fault is described. The Direct Field Oriented Control (DRFOC) was applied and tested during faulted conditions. An influence of the chosen sensors faults to the performance of drive system is presented. The compensation algorithm was proposed and tested. A fault tolerant drive based on hardware redundancy was developed and presented. Simulation results are performed in MATLAB/SimPowerSystem.