

*DFOC, silnik indukcyjny,  
czujnik prądu stojana, układ odporny*

Kamil KLIMKOWSKI\*, Mateusz DYBKOWSKI\*

## **ANALIZA WPLYWU USZKODZEŃ CZUJNIKÓW PRĄDU STOJANA NA PRACĘ WEKTOROWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO – KONCEPCJA UKŁADU ODPORNEGO**

W pracy opisano analizę układu napędowego z silnikiem indukcyjnym podczas występowania uszkodzeń wybranych czujników pomiarowych. Sprawdzono działanie układu podczas awarii czujników prądu stojana. Szczególną uwagę zwrócono na zachowanie się tych zmiennych stanu, które mogą być wykorzystane w procesie diagnostyki napędu.

Zaproponowano kompletny system odporny na analizowane uszkodzenia. Wykonano badania symulacyjne w środowisku *MATLAB-SimPowerSystem*.

### **1. WPROWADZENIE**

Do prawidłowej pracy napędów wektorowych z silnikami indukcyjnymi niezbędne są informacje o zmiennych stanu maszyny uzyskiwanych na podstawie bezpośredniego pomiaru bądź estymacji [1]. Elementy elektroniczne i pomiarowe mogą ulec zużyciu, bądź uszkodzeniu mechanicznemu, zatem ogranicza się ich ilość w układzie sterowania poprzez wykorzystywanie w algorytmach regulacji coraz bardziej zaawansowanych estymatorów [2]. Zwiększone wymagania co do niezawodności napędów z silnikami indukcyjnymi wygenerowały wzrost zainteresowania układami odpornymi na uszkodzenia. W takich strukturach (ang. FTCS – *Fault Tolerant Control Systems*) konieczne jest uwzględnienie technik diagnostyki i kontroli, które w odpowiednio krótkim czasie pozwolą na detekcję uszkodzenia i adekwatną odpowiedź struktury sterowania [3], [4].

W niniejszej pracy przedstawiono analizę wpływu uszkodzeń czujników prądu stojana na pracę układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą wektorową DFOC. Ponadto przedstawiono możliwości wykorzystania podstawowych

---

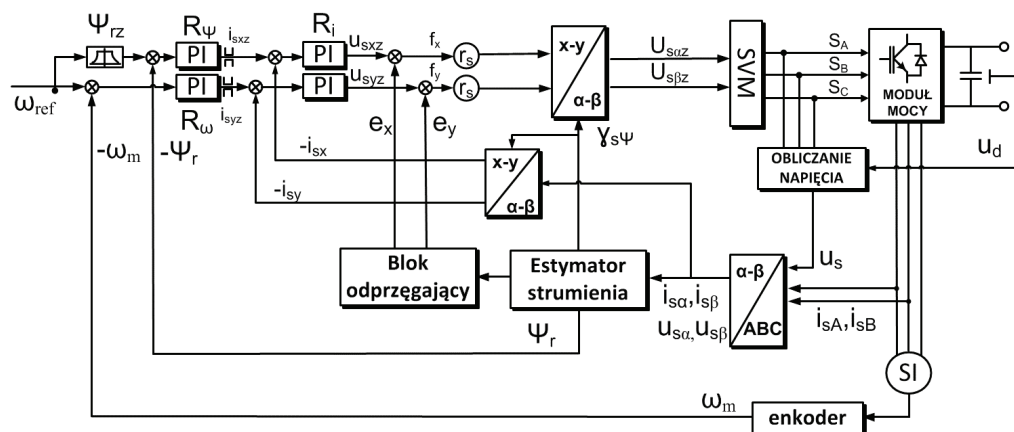
\* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, kamil.klimkowski@pwr.wroc.pl, mateusz.dybkowski@pwr.wroc.pl,

zmiennych stanu do diagnostyki i wykrywania uszkodzenia tych czujników pomiarowych.

Badania wykonano w środowisku *MATLAB-SimPowerSystem*.

## 2. UKŁAD NAPEWNIENIA Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM

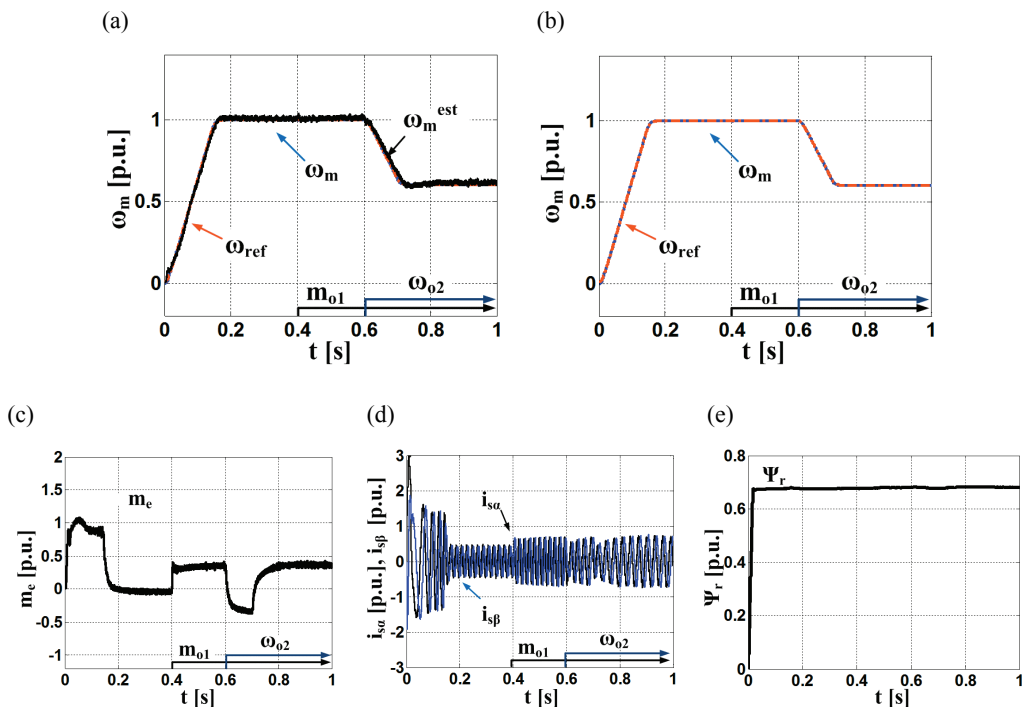
W pracy wykorzystano powszechnie znaną strukturę sterowania silnikiem indukcyjnym – metodę polowo-zorientowaną DFOC (rys. 1) [2]. Do pomiaru prędkości kątowej wykorzystano enkoder inkrementalny, napięcie stojana jest uzyskiwane na podstawie pomiaru w obwodzie pośredniczącym przemiennika częstotliwości oraz stanów łączników tranzystorowych falownika. Układ posiada dwa aktywne czujniki prądu stojana fazy A i B oraz jeden redundantny (fazy C), który załączany jest dopiero po aktywacji układu odpornego na awarie. W układzie napędowym wykorzystano prostownik aktywny sterowany metodą napięciowo zorientowaną VOC (ang. *Voltage Oriented Control*) [4].



Rys. 1. Struktura układu sterowania polowo zorientowanego dla napędu z silnikiem indukcyjnym

Poniżej (rys. 2) zaprezentowano przebiegi w układzie sterowania w czasie prawidłowej pracy, tj. bez wystąpienia uszkodzenia czujników pomiarowych.

W badaniach wykorzystano także estymator prędkości kątowej oparty na technice systemów adaptacyjnych MRAS<sup>CC</sup> [1], [3]. Estymator ten nie był jednak wykorzystany w wewnętrznej pętli regulacji – pełnił funkcję informacyjną.



Rys. 2. Przebieg prędkości kątowej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e) podczas prawidłowej pracy napędu

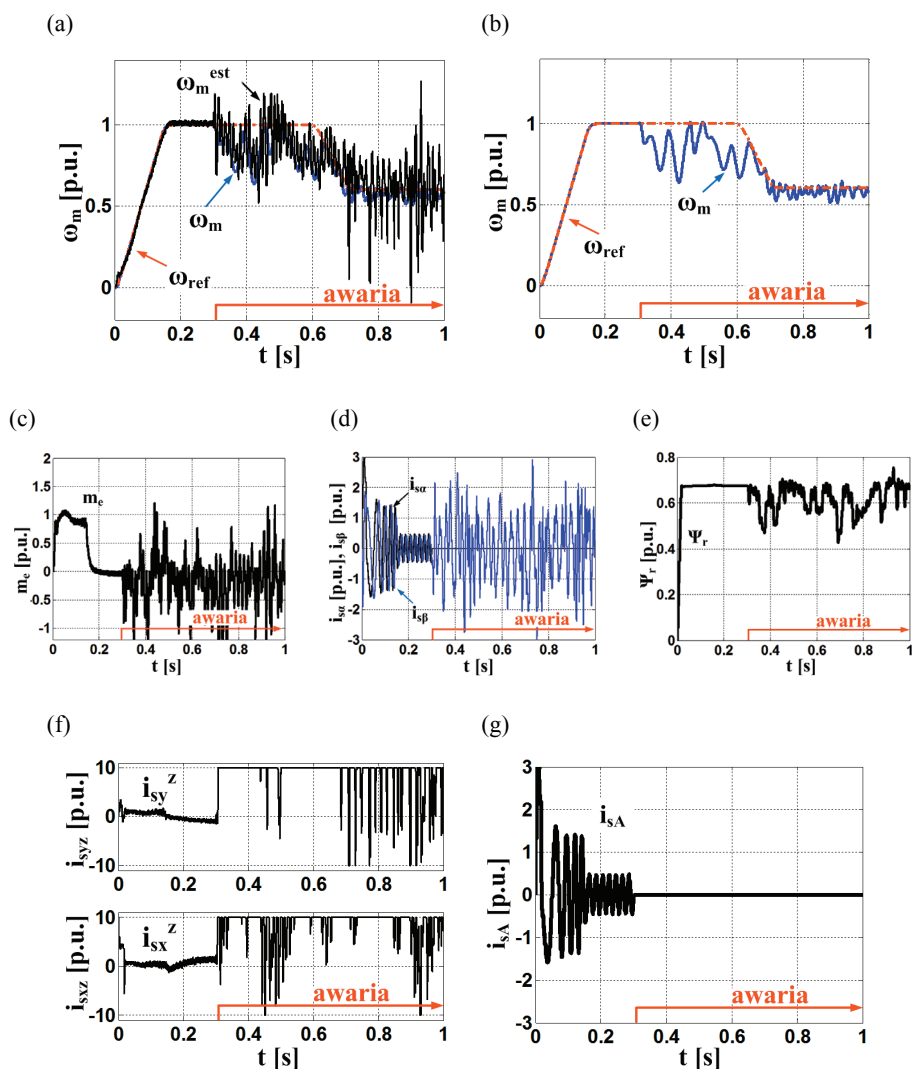
### 3. ANALIZA WPŁYWU USZKODZENIA CZUJNIKA PRĄDU STOJANA NA PRACĘ NAPĘDU WEKTOROWEGO

Najważniejszymi czujnikami wielkości elektrycznych w strukturach sterowania wektorowego są przetworniki prądu i napięcia stojana. W artykule skupiono się badaniu następstw awarii czujników pomiarowych prądu, które ze względu na wykorzystywane estymatory zmiennych stanu w badanych układach, mają bardzo duże znaczenie dla poprawnej pracy napędu.

Czujnik prądu może wskazywać błędne wyniki pomiarów wynikające z nasycenia rdzenia magnetycznego lub przesunięcia w fazie sygnału w pętli sprzężenia zwrotnego. Podstawowe rodzaje uszkodzeń czujnika prądu przedstawione w [7].

W niniejszym rozdziale przedstawiono wpływ uszkodzenia czujnika prądu stojana na pracę napędu sterowanego metodą DFOC. Badania wykonano dla pracy napędu przy prędkości znamionowej silnika indukcyjnego, a w chwilach  $t = 0,4$ s silnik został obciążony momentem  $0,5 m_{oN}$ , natomiast w chwili  $t = 0,6$  s obniżono wartość prędkości do wartości  $0,6 \omega_{mN}$ . Uszkodzenie czujnika nastąpiło w chwili  $t = 0,3$  s.

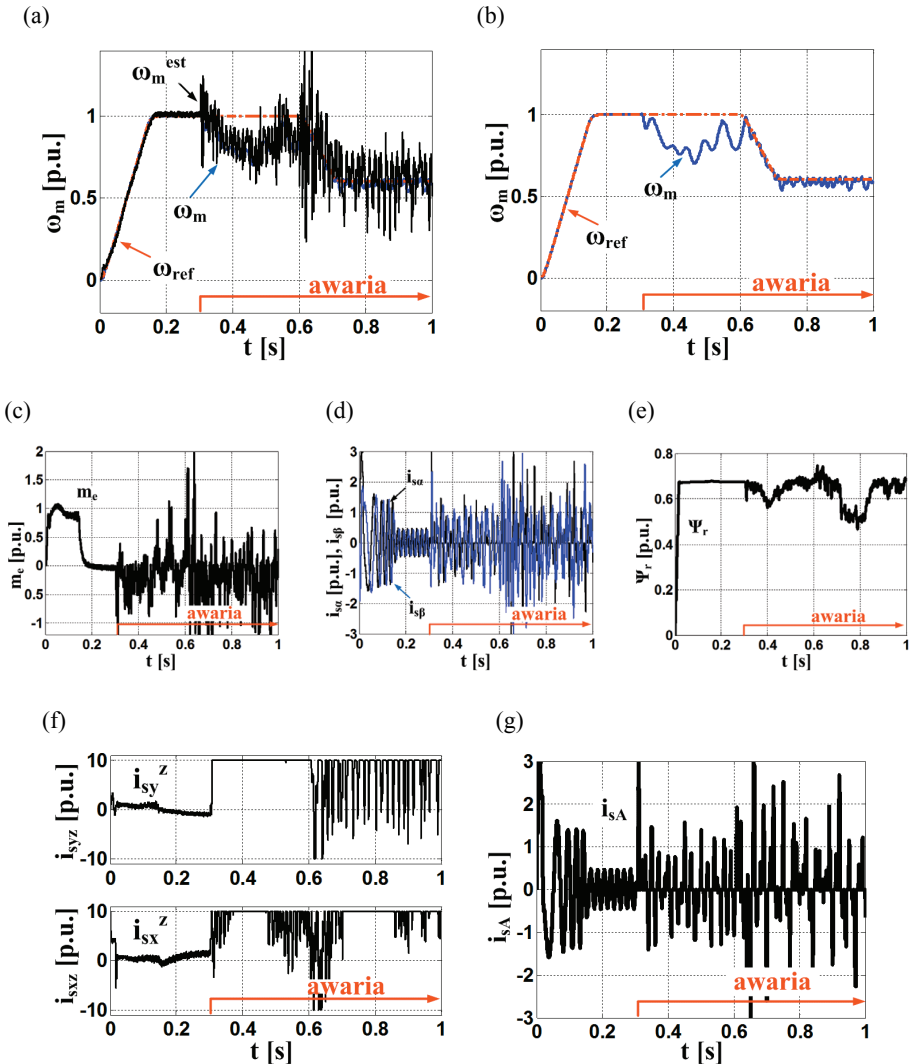
Każde z przedstawionych rodzajów awarii występowało dla czujnika pomiarowego fazy A prądu stojana.



Rys. 3. Przebieg prędkości kątovej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e), składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) oraz prądu fazowego (g) przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prądu fazy A

Cyklicznie przerywany sygnał z czujnika prądu wywołuje oscylacje o dużej amplitudzie i częstotliwości prędkości mechanicznej, estymowanej, a także momentu elektromagnetycznego.

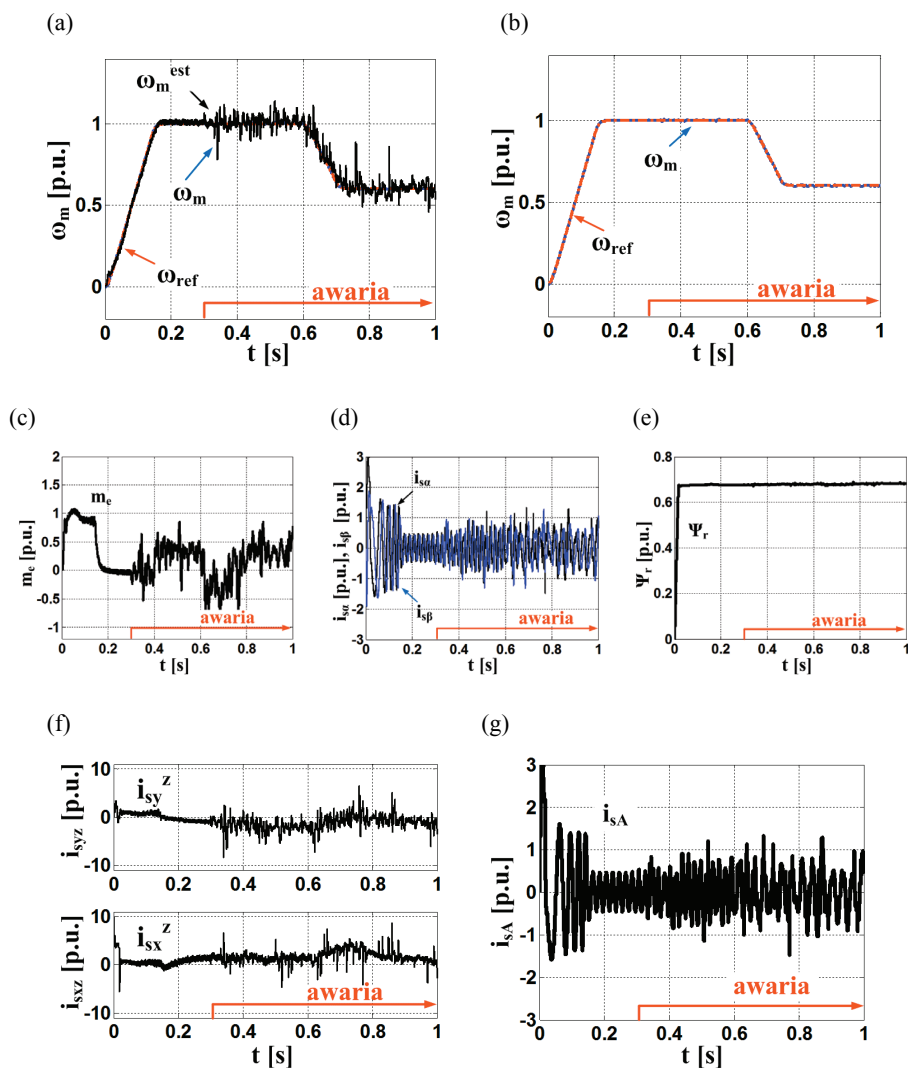
Skutki saturacji, wynikającej z nasycenia rdzenia czujnika, oraz przerwanie sprzężenia zwrotnego także powodują oscylacje prędkości oraz momentu elektromagnetycznego. Dla tych trzech przypadków, zauważalny jest spadek prędkości kątowej chwilę po obciążeniu silnika. Natomiast po obniżeniu wartości prędkości referencyjnej uchyb prędkościowy zmniejszył się, ale nadal widoczne były oscylacje. Skutki te wpłynęły także na przebieg strumienia wirnika.



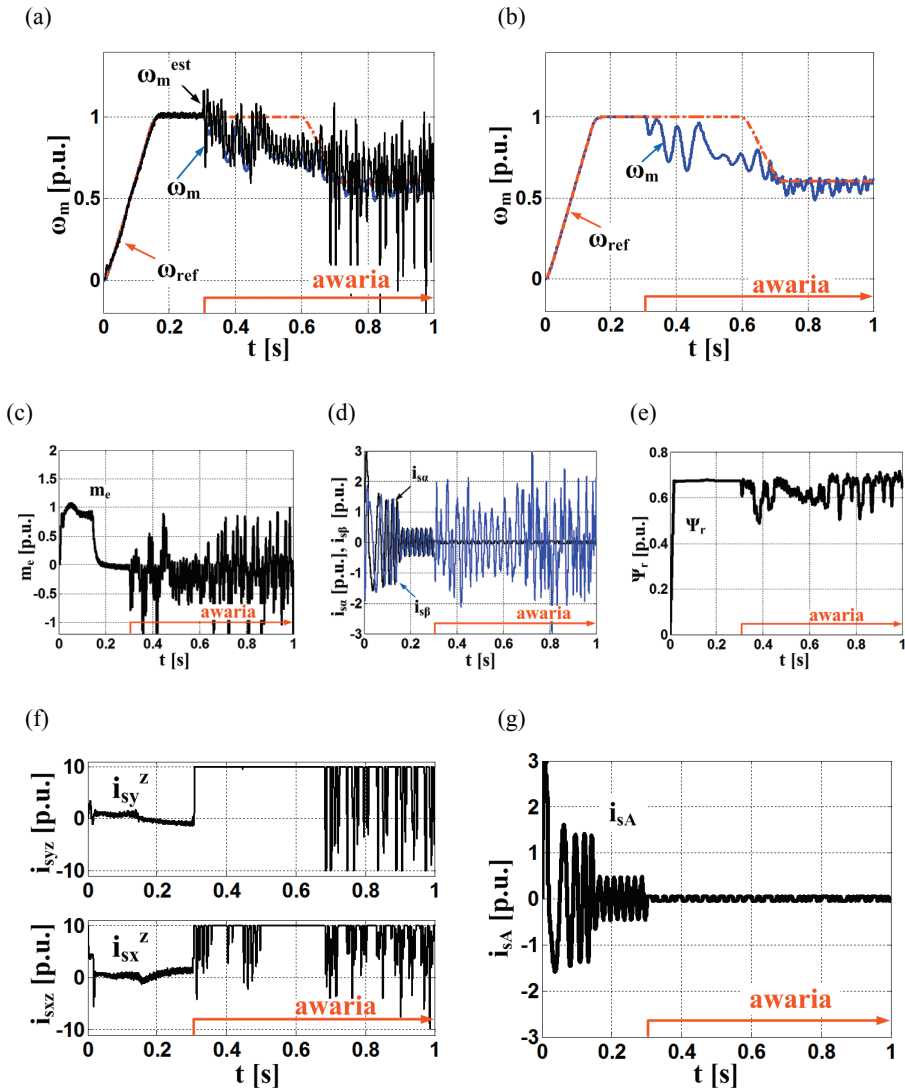
Rys. 4. Przebieg prędkości kątowej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e), składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) oraz prądu fazowego (g) przy przerywanym sygnale pomiarowym z czujnika prądu fazy A

W przypadku wystąpienia szumu w sygnale pomiarowym zauważalne są minimalne wahania prędkości mierzonej oraz znaczące zmiany w przebiegu momentu elektromagnetycznego. Uszkodzenie wpływa również na estymację prędkości, ale w znacznie mniejszym stopniu niż miało to miejsce przy pozostałych uszkodzeniach.

Największe skutki awarii czujnika prądu dla fazy A wystąpiły dla zaniku oraz ograniczeniu sygnału pomiarowego.



Rys. 5. Przebieg prędkości kątowej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e), składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) oraz prądu fazowego (g) przy wystąpieniu szumu w sygnale z czujnika prądu fazy A

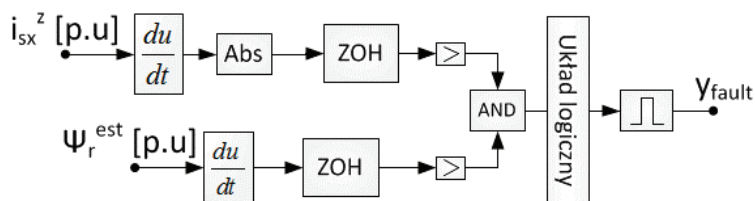


Rys. 6. Przebieg prędkości kątowej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e), składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) oraz prądu fazowego (g) przy ograniczeniu sygnału z czujnika prądu fazy A

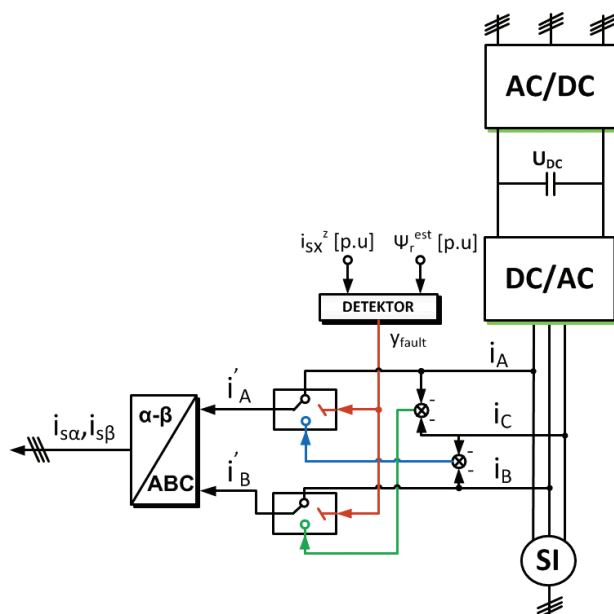
#### 4. DETEKCJA USZKODZEŃ CZUJNIKA PRĄDU STOJANA

W rozdziale zaproponowano układ wykrywania uszkodzeń czujnika prądu stojana na podstawie śledzenia wartości estymowanej strumienia wirnika. W strukturze stero-

wania polowo-zorientowanego wykorzystywana jest informacja o składowej  $i_{sx}$ . Rys. 7 przedstawia schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prądu zaimplementowany w strukturze sterowania wektorowego DFOC.



Rys. 7. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prądu dla sterowania wektorowego DFOC



Rys. 8. Schemat układu bezpiecznego z detektorem uszkodzeń czujnika prądu stojana dla sterowania wektorowego DFOC

Dla struktury polowo-zorientowanej musi być spełniony warunek (1),

$$\text{if } \left| \frac{d}{dt} i_{sx}^x \right| \geq y_1 \text{ AND } \frac{d}{dt} \psi_r^{\text{est}} \geq y_2 \quad \text{then} \quad y_{\text{fault}} = 1. \quad (1)$$

Zasada działania algorytmu polega na obserwowaniu pochodnej estymowanej wartości strumienia wirnika. Sygnał z estymatora jest dodatkowo próbkowany i opóźniany, aby uniknąć przypadkowego stwierdzenia uszkodzenia w stanach przejściowych.

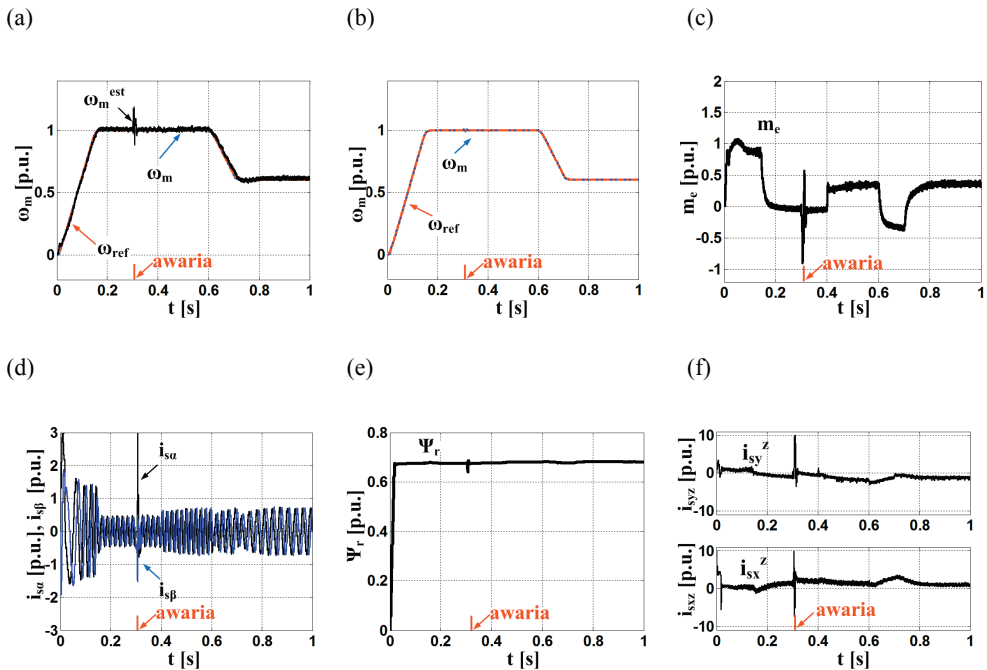


wych. Wynikiem działania takiego detektora jest wartość porównywana z dopuszczalną wartością graniczną. Jeśli wartość ta jest większa to układ generuje impuls logiczny informujący o wystąpieniu uszkodzenia. Potwierdzona awaria czujnika powoduje przełączenie pomiędzy pomiarem prądu z czujnika, a obliczeniem jego wartości według zależności:

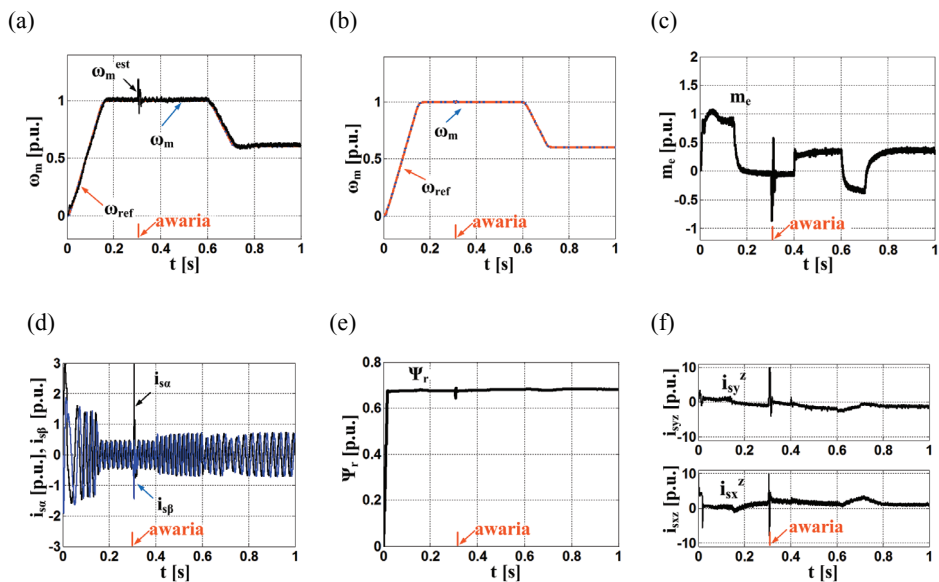
$$i_A = -(i_B + i_C). \quad (2)$$

Dodatkowo sprawdzane jest, który z czujników uległ awarii: jeżeli wartość składowej  $\alpha$  prądu stojana jest równa wartości prądu fazowego  $i_A$  po wykryciu awarii to uszkodzeniu uległ czujnik fazy B, w przeciwnym wypadku czujnik fazy A. W rezultacie możliwa jest poprawna praca napędu po wystąpieniu uszkodzenia. Poniżej przedstawiono uproszczony schemat układu bezpiecznego z detektorem uszkodzeń czujnika prądu dla struktury sterowania wektorowego DFOC.

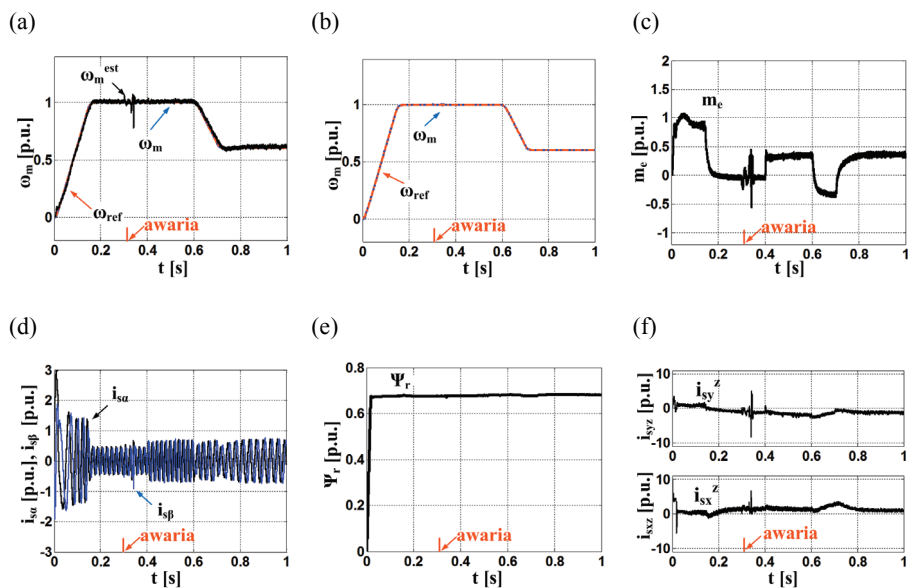
Na rys. 9–13 zaprezentowano pracę układu odpornego na uszkodzenia czujnika prądu fazy A dla wszystkich poprzednio opisanych awarii dla badanej struktury polewo-zorientowanej DFOC.



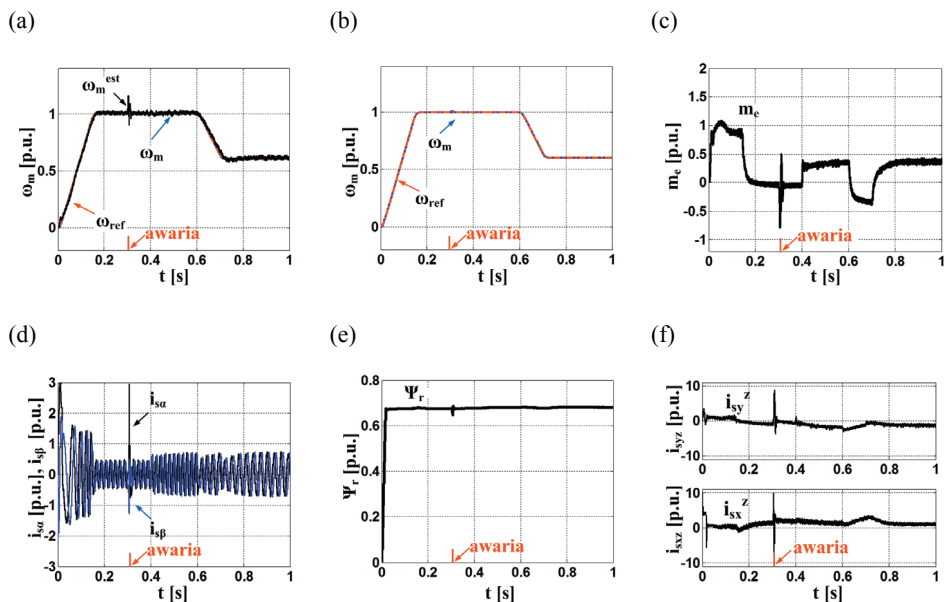
Rys. 9. Przebieg prędkości kątowej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e) oraz składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prądu fazy A



Rys. 11. Przebieg prędkości kątowej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e) oraz składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) przy przerywanym sygnale pomiarowym z czujnika prądu fazy A



Rys. 12. Przebieg prędkości kątowej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e) oraz składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) przy wystąpieniu szumu w sygnale z czujnika prądu fazy A



Rys. 13. Przebieg prędkości kątovej i estymowanej (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), składowych  $\alpha$ - $\beta$  prądu stojana (d), modułu strumienia wirnika (e) oraz składowych  $x$ - $y$  prądu stojana (f) przy ograniczeniu sygnału z czujnika prądu fazy A

Układ odporny na uszkodzenia czujnika prądu stojana zadziałał w przybliżeniu 0,005 s po wykryciu awarii. Tak jak w poprzednich rodzajach uszkodzeń zauważalne są chwilowe negatywne skutki, ale w tym przypadku dotyczą one głównie przebiegu prędkości estymowanej i momentu elektromagnetycznego. Zaproponowane rozwiązanie układu odpornego opierające się na redundancji pomiarowej prądu stojana pozwoliło na wykrycie awarii i umożliwienie tym samym dalszej pracy układu oraz na poprawną estymację prędkości.

## 5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wpływ uszkodzeń czujników pomiarowych prądu stojana na pracę układu napędowego sterowanego metodą wektorową. Wyniki badań potwierdziły, że największe skutki na działanie napędu wywoływało całkowite uszkodzenie czujników oraz przerywany sygnał pomiarowy, które generowały silne oscylacje momentu oraz prędkości kątovej.

Zaproponowano układy do wykrywania uszkodzenia wspomnianych czujników pomiarowych, które z powodzeniem mogą być wykorzystane w napędach o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Należy zaznaczyć, że zaproponowane algorytmy

detekcji są bardzo proste w konstrukcji, nie obciążają kompletnego układu napędowego i bazują na sygnałach dostępnych w wewnętrznych strukturach sterowania wektorowego.

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

#### LITERATURA

- [1] Dybkowski M., *Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych – zagadnienia wybrane*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 67, seria Monografie, Nr 20, Wrocław 2013.
- [2] Orłowska-Kowalska T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [3] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M., *Stator Current-based MRAS Estimator for a Wide Range Speed-Sensorless Induction Motor Drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 4, 2010, 1296–1308.
- [4] Malinowski M., *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*, PhD Thesis, Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Institute of Control and Industrial Electronics, Warszawa 2001.
- [5] Khalaf Salloum Gaeid, Hew Wooi Ping, *Fault Tolerant Control of Induction Motor*, Modern Applied Science, Vol. 5, No. 4, August 2011, 83–94.
- [6] Li Jiang, *Sensor fault detection and isolation using system dynamics identification techniques*, PhD thesis, The University of Michigan, 2011.
- [7] Lee K.-S., Ryu J.-S., *Instrument fault detection and compensation scheme for direct torque controlled induction motor drivers*, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 150, No. 4, 2003.

#### INFLUENCE OF THE STATOR CURRENT SENSORS FAULTS TO THE PERFORMANCE OF VECTOR CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVE – CONCEPT OF FAULT TOLERANT STRUCTURE

In the paper the influence of the stator current sensors faults to the properties of induction motor drive system were tested. Study results contains an analysis of the state variables useful in diagnostic of induction motor drive. Faults tolerant algorithm was developed and presented. The simulation tests carried out in Matlab/SimPowerSystem software.