

Układ sterowania wektorowego silnikiem indukcyjnym odporny na uszkodzenia przetwornika prądu stojana

Streszczenie. Artykuł związany jest z tematyką układów napędowych o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa odpornych na uszkodzenia przetworników prądu stojana. W niniejszej pracy zaproponowano dwa algorytmy diagnostyczne, oparte na zależnościach analitycznych pomiędzy dostępnymi sygnałami. Sprawdzono ich skuteczność w przypadku wystąpienia różnych typów awarii czujników. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano układ napędowy z silnikiem indukcyjnym sterowany metodą polowo zorientowaną na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w kartę szybkiego prototypowania DS1202 i platformę MicroLabBox firmy dSpace.

Abstract. The paper is related to the electrical motor drive systems with increased level of safety tolerant to stator current transducer faults. In the paper two diagnostic algorithms based on analytical relations between different available signals are presented and described. An analysis of the performance of these detection systems for selected types of faults is performed and presented. Experimental results of fault tolerant induction motor drive controlled by field oriented control system DRFOC were obtained in laboratory set up based on rapid prototyping card DS1202 and MicroLabBox platform by dSpace. (**Stator current sensor fault tolerant vector control of induction motor drive**).

Słowa kluczowe: DFOC, FTC, silnik indukcyjny, detektor uszkodzeń, uszkodzenia przetwornika prądu,

Keywords: DFOC, FTC, induction motor, fault detector, current transducer faults

Wstęp

Kluczową rolę w zaawansowanych układach sterowania silnikami elektrycznymi [1-7] pełnią przetworniki prądu stojana. Brak prawidłowego pomiaru wartości tej wielkości wpływa bezpośrednio na jakość i stabilność pracy systemów napędowych sterowanych metodami wektorowymi. Uszkodzenia przetwornika prądu stojana powodują powstawanie oscylacji estymowanych i/lub mierzonych zmiennych stanu silnika. Badania dotyczące wpływu uszkodzeń tych elementów pomiarowych przedstawiono m. in. w [8], [9], [10]. Uzyskane wyniki wskazują, że najbardziej niebezpieczne skutki uszkodzeń występują przy całkowitym przerwaniu sprzężenia zwrotnego oraz przy ograniczeniu sygnału pomiarowego. Konieczne jest ich wcześnie wykrycie w celu zapobiegnięcia ich eskalacji i utraty stabilności przez napęd lub zdolności regulacji prędkości. Z diagnostycznego punktu widzenia, największe znaczenie mają: całkowite uszkodzenie przetwornika, wystąpienie szumu pomiarowego i zmiana wzmocnienia sygnału pomiarowego. W dwóch ostatnich przypadkach wykrycie awarii jest zadaniem trudnym, ze względu na ich znikomy wpływ na pracę napędu [9].

W niniejszej pracy poruszono zagadnienia związane z układem odpornym na uszkodzenia przetworników prądu stojana w układzie wektorowego sterowania polowo zorientowanego DRFOC silnikiem indukcyjnym. Analizie poddano wybrane systemy detekcji awarii, bazujące na modelach matematycznych. Badania eksperymentalne wykonano na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w kartę szybkiego prototypowania DS1202 i platformę MicroLabBox firmy dSpace.

Metody diagnostyczne układów pomiarowych

Do jednych z najbardziej popularnych i często analizowanych technik przeznaczonych do diagnostyki uszkodzeń czujników pomiarowych należą metody oparte na modelach matematycznych [11], [12], [13]. Techniki te wymagają implementacji w strukturze sterowania obserwatora [13] lub grupy obserwatorów [14] zmiennych stanu napędu. Ekstrakcja symptomów uszkodzeń odbywa się na podstawie residuów, generowanych w oparciu o porównanie sygnałów mierzonych i otrzymanych z modelu. Na podstawie tych sygnałów diagnostycznych możliwa jest detekcja i lokalizacja uszkodzeń.

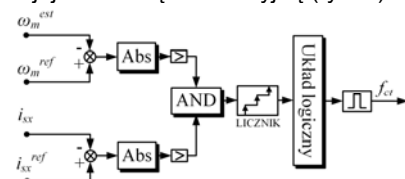
Metody diagnostyczne bazujące na grupie obserwatorów przeważnie składają się z trzech układów

odtworzących strumień wirnika wykorzystując różne pary prądów fazowych zasilających silnik (fazy A i B, B i C oraz C i A). Sygnały wyjściowe z tych obserwatorów są przekazywane do bloku decyzyjnego, który wybiera wartość estymowanego wektora strumienia wirnika o najmniejszym błędzie w odniesieniu do wartości zadanej. Wystąpienie awarii powoduje zwracanie błędnych wartości przez dwa obserwatory, natomiast sygnał wyjściowy trzeciego z nich będzie przekazywany do struktury sterowania. Na podstawie tych informacji możliwe jest jednoznaczne określenie, który z przetworników prądu uległ uszkodzeniu [15].

W metodach diagnostycznych opartych na modelach matematycznych, kluczowym aspektem jest wybranie takich technik odtwarzania zmiennych stanu, które są jak najmniej wrażliwe na zmiany parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego. Rozwiązanie wykorzystujące kilka różnych obserwatorów pozwala na zwiększenie niezawodności detektora. Wadą takiego rozwiązania jest duża złożoność kompletnego układu diagnostycznego wymagającego znacznej mocy obliczeniowej do prawidłowej pracy [11], [14]. Minimalizację wpływu tego problemu na funkcjonowanie systemów diagnostycznych można uzyskać przez stosowanie obserwatorów adaptacyjnych [5], [16].

Wybrane detektory uszkodzeń przetworników prądu dla sterowania polowo zorientowanego

Jednym z najprostszych sposobów detekcji uszkodzenia przetworników prądu stojana w układach napędowych sterowanych wektorowo jest porównanie chwilowych wartości zmiennych stanu silnika, które reagują w istotny sposób na wszystkie rodzaje awarii. W niniejszym artykule wykorzystano błąd pomiędzy prędkością estymowaną (otrzymaną z estymatora typu MRAS^{CC} [5]) a prędkością zadaną oraz błąd pomiędzy sygnałami zależnymi od odtwarzanego strumienia wirnika: składową i_{sx} prądu stojana i jej wartością referencyjną (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy detektora uszkodzenia przetwornika prądu stojana dla sterowania wektorowego DRFOC

Zasadę działania algorytmu przedstawia zależność (1).

$$(1) \quad IF \begin{cases} W_3 \geq \varepsilon_{3DFOC} \\ W_4 \geq \varepsilon_{4DFOC} \end{cases} THEN f_{ct} = TRUE,$$

gdzie: ε_{3DFOC} , ε_{4DFOC} - dopuszczalne progi graniczne uchybu prędkości estymowanej i składowej prądu stojana dla układu napędowego sterowanego metodą DRFOC, uchyby diagnostyczne:

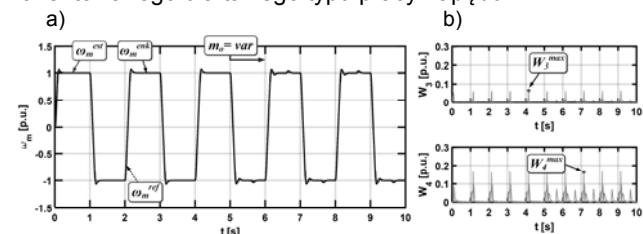
$$(2) \quad W_3 = |\omega_m^{ref} - \omega_m^{est}|, W_4 = |i_{sx}^{ref} - i_{sx}|.$$

Detektor oparty na zależnościach (1) i (2) przedstawiony na rys. 1 zostaje aktywowany jeśli wartości uchybów są większe niż dopuszczalne progi graniczne. Układ generuje wtedy impuls logiczny f_{ct} informujący o wystąpieniu uszkodzenia. Układ diagnostyczny po stwierdzeniu wystąpienia awarii przetwornika prądu stojana dokonuje rekonfiguracji układu pomiarowego, w którym informacja o prądzie stojana fazy A uzyskiwana jest na podstawie dwóch pozostałych faz, zgodnie z zależnością:

$$(3) \quad i_A' = -(i_B + i_C).$$

Kluczowym problemem w przedstawionym analitycznym algorytmie diagnostycznym jest ustalenie progowych wartości błędów monitorowanych sygnałów (ε_3 i ε_4), dla których detektor zostaje aktywowany. Od precyzyjnego doboru tych wartości zależy poprawność pracy układu diagnostycznego, jego skuteczność i wrażliwość przy identyfikacji awarii w możliwie najkrótszym czasie. Wartości progów granicznych można wyznaczyć doświadczalnie po przeprowadzeniu cyklu nawrotów silnika z oraz bez momentu obciążenia podczas bezawaryjnej pracy napędu.

Na rys. 2 przedstawiono uzyskane eksperymentalnie przebiegi prędkości (rys. 2a) oraz wartości sygnałów diagnostycznych (rys. 2b) dla przebiegu nawrotnego, sterowanie DRFOC, wyniki eksperymentalne, $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$



Rys. 2. Przebiegi prędkości mierzonej, zadanej oraz estymowanej (a), sygnałów diagnostycznych W_3 i W_4 (b) dla przebiegu nawrotnego, sterowanie DRFOC, wyniki eksperymentalne, $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

Na tej podstawie możliwe jest określenie zależności określających progi graniczne detektora użytego w sterowaniu polowo zorientowanym:

$$(4) \quad \begin{cases} \varepsilon_{3DFOC} = \gamma_{03} + \gamma_{13} \cdot |\omega_m^{ref}| \\ \varepsilon_{4DFOC} = \gamma_{04} + \gamma_{14} \cdot |\omega_m^{ref}| \end{cases},$$

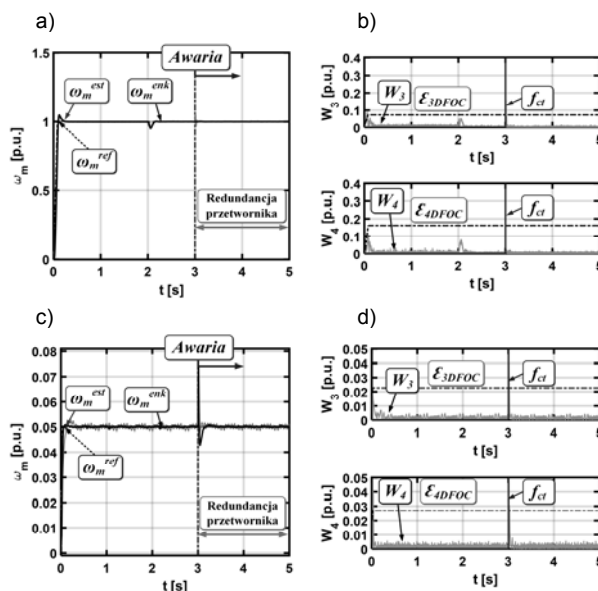
gdzie: $\gamma_{03,04} = \max(W_{3,4})$ - wartości wynikające z sygnałów diagnostycznych, $\gamma_{13,14}$ - współczynniki pomocnicze.

Dla badanego przypadku wartości maksymalne sygnałów W_3 i W_4 wyniosły odpowiednio: 0,016 i 0,024, a wartość współczynników pomocniczych jest równa $\gamma_{13,14} = 0,1$. Wartości progów diagnostycznych powinny zmieniać się również w zależności od aktualnie zadanej prędkości ω_m^{ref} .

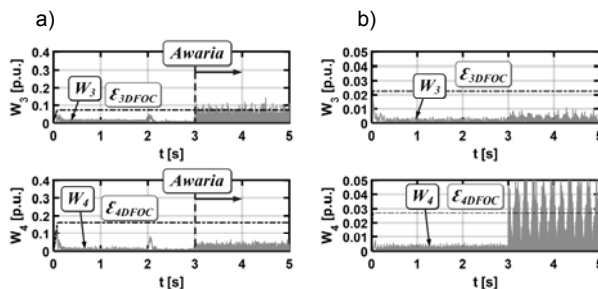
Zaprojektowany detektor został przetestowany podczas przerwania pętli pomiarowej z układu pomiarowego prądu stojana fazy A, które symulowane było w chwili $t = 3$ s. Badania przeprowadzono dla dwóch wartości prędkości: znamionowej (rys. 3a, b) i 5% znamionowej (rys. 3c, d). W pierwszym przypadku silnik startuje z prędkości zerowej do znamionowej, a w chwili $t=2$ s jest obciążony znamionową wartością momentu mechanicznego.

Wystąpienie awarii przetwornika prądu w chwili $t = 3$ s spowodowało nagły wzrost amplitud sygnałów diagnostycznych, które przekroczyły dopuszczalne progi graniczne. Jednocześnie został wyzwolony sygnał wyjściowy z detektora informujący o wykryciu uszkodzenia i pozwalający na rekonfigurację układu pomiarowego zgodnie z zależnością (3). W drugim badanym przypadku silnik pracuje z prędkością $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$. Uszkodzenie wpłynęło na napęd w identycznym stopniu umożliwiając rekonfigurację układu pomiarowego i dalszą pracę silnika. Zauważalny uchyb prędkości jest spowodowany dłuższym czasem detekcji i kompensacji uszkodzenia.

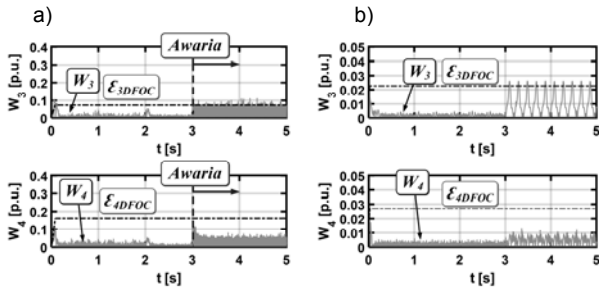
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki eksperymentalne dotyczące dwóch pozostałych rodzajów uszkodzeń przetwornika prądu fazy A dla dwóch wartości prędkości silnika: $\omega_m = \omega_{mN}$ (rys. 4a, 5a) i $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$ (rys. 4b, 5b).



Rys. 3. Przebiegi prędkości mierzonej, zadanej oraz estymowanej (a, c) oraz progów granicznych, sygnałów diagnostycznych i sygnału wyjściowego z detektora (b, d) przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia przetwornika prądu stojana fazy A, dla sterowania DRFOC z analitycznym detektorem awarii, wyniki eksperymentalne: $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$ (a, b) i $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$ (c, d)



Rys. 4. Przebiegi sygnałów diagnostycznych, progów granicznych i sygnału wyjściowego z detektora przy o wystąpieniu awarii przetwornika prądu fazy A - wystąpienie szumu pomiarowego, sterowanie DRFOC z analitycznym detektorem awarii, wyniki eksperymentalne: $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$ (a) i $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$ (b)



Rys. 5. Przebiegi sygnałów diagnostycznych, progów granicznych i sygnału wyjściowego z detektora przy o wystąpieniu awarii przetwornika prądu fazy A: zmiana wzmocnienia sygnału pomiarowego, sterowanie DRFOC z analitycznym detektorem awarii, wyniki eksperymentalne: $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$ (a) i $\omega_m = 0,05 \omega_{mN}$ (b)

Uzyskane rezultaty wskazują, że mało znaczące awarie, których skutki wpływają w małym stopniu na pracę napędu nie mogą zostać wykryte w pierwszych chwilach po ich wystąpieniu. Będzie to możliwe dopiero po eskalacji uszkodzeń lub zwiększeniu się ich poziomu zaawansowania.

W tabeli 1 przedstawiono czasy detekcji awarii przetworników prądu obu faz dla różnych typów uszkodzeń i prędkości kątownej silnika.

Tabela 1. Czasy detekcji Δt [ms] awarii przetwornika prądu fazy A i B z wykorzystaniem detektora analitycznego dla sterowania DRFOC

| Typ uszkodzenia | $\omega_m = \omega_{mN}$ $m_o = m_{oN}$ | $\omega_m = 0,05 \omega_{mN}$ |
|--|--|-------------------------------|
| Wyniki eksperymentalne (faza A) | | |
| Przerwanie pętli pom. | 2,1 ms | 4,7 ms |
| Wyniki eksperymentalne (faza B) | | |
| Przerwanie pętli pom. | 2,5 ms | 82,9 ms |

Wynika z niej, że tylko przerwanie pętli pomiarowej jest poprawnie wykrywane przez system diagnostyczny. Co więcej, w przypadku całkowitej awarii przetwornika fazy B dla silnika pracującego z prędkością $\omega_m = 0,05 \omega_{mN}$, czas detekcji uszkodzenia jest bardzo długi w porównaniu do pozostałych wyników.

Algorytm detekcji oparty na analitycznych zależnościach pomiędzy odpowiednimi zmiennymi stanu nie sprawdza się w przypadku mało znaczących awarii oraz nie pozwala na lokalizację awarii. Z tego względu zaproponowano system diagnostyczny, który wykorzystuje wzajemne relacje pomiędzy mierzonymi wartościami prądów fazowych. W tym celu należy określić różne zależności wyrażające wartości składowych $i_{s\alpha-\beta}$ prądów fazowych, które są wykorzystywane w wewnętrznych pętlach układu sterowania. Wykorzystując wszystkie trzy przetworniki prądu stojana można posłużyć się zależnością (5a), natomiast biorąc pod uwagę informację z przetworników prądu z dwóch faz stosuje się zależność (5b) i (5c).

$$(5a) \quad i_{s\alpha 1} = \frac{2}{3} \left(i_{sA} - \frac{1}{2} (i_{sB} + i_{sC}) \right), i_{s\beta 1} = \frac{\sqrt{3}}{3} (i_{sB} - i_{sC}),$$

$$(5b) \quad i_{s\alpha 2} = i_{sA}, i_{s\beta 2} = \frac{\sqrt{3}}{3} (i_{sA} + 2i_{sB}),$$

$$(5c) \quad i_{s\alpha 3} = -(i_{sB} + i_{sC}), i_{s\beta 3} = -\frac{\sqrt{3}}{3} (i_{sA} + 2i_{sC}).$$

Na podstawie tych zależności możliwe jest wyznaczenie trzech znaczników (6), które charakteryzują się określoną wrażliwością na awarię przetwornika prądu jednej z dostępnych faz.

$$(6a) \quad F_{CT1} = (i_{s\alpha 3}^2 + i_{s\beta 1}^2) \Rightarrow F_{CT1} = f(i_{sB}, i_{sC}),$$

$$(6b) \quad F_{CT2} = (i_{s\alpha 2}^2 + i_{s\beta 3}^2) \Rightarrow F_{CT2} = f(i_{sA}, i_{sC}),$$

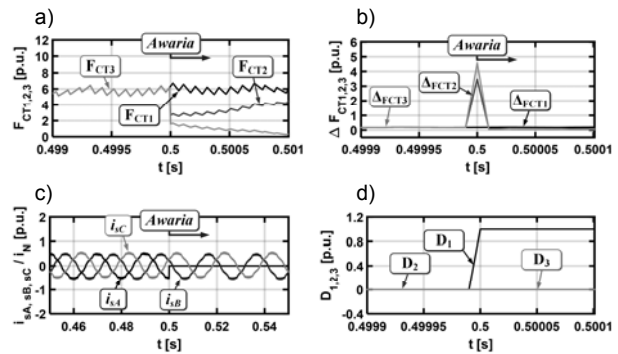
$$(6c) \quad F_{CT3} = (i_{s\alpha 2}^2 + i_{s\beta 2}^2) \Rightarrow F_{CT3} = f(i_{sA}, i_{sB}).$$

W stanie normalnej pracy składowe $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ prądu stojana spełniają warunek:

$$(7) \quad i_{s\alpha 1} = i_{s\alpha 2} = i_{s\alpha 3} \wedge i_{s\beta 1} = i_{s\beta 2} = i_{s\beta 3}.$$

Uszkodzenie jednego z przetworników powoduje, że jedna z par prądów $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ reaguje w dużo mniejszym stopniu niż pozostałe dwie, ponieważ nie bazuje ona na informacji o wartości prądu pobieranej z wadliwego przetwornika.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi znaczników F_{CT1-3} w czasie przed i po wystąpieniu awarii przetwornika prądu w fazie A. Jako, że przy sterowaniu silnika w zamkniętej pętli układ regulacji silnie reaguje na awarię czujnika prądu to dla czytelniejszego opisu algorytmu poniższe wyniki dotyczą pracy napędu w strukturze otwartej (sterowanie $U/f=const$) przy wymuszeniu znamionowych wartości napięcia zasilającego oraz częstotliwości w chwili wystąpienia uszkodzenia ($t=0,5s$).



Rys. 6. Przebiegi sygnałów diagnostycznych F_{CT1-3} (a), ich błędów dyskretnych ΔF_{CT1-3} (b), prądów fazowych $i_{sA,B,C}$ (c) oraz sygnałów informujących o wystąpieniu awarii D_{1-3} przetwornika prądu fazy A, sterowanie $U/f=const$, wyniki symulacyjne - $\omega_m = \omega_{mN}$

W praktycznej realizacji detektora posłużono się dodatkowo wartością różnicy między poszczególnymi znacznikami F_{CT1-3} w dwóch próbkach czasowych, tj. przed oraz po wystąpieniu uszkodzenia (8). Umożliwia to stwierdzenie, który ze znaczników F_{CT} reaguje w największym stopniu na awarię.

$$(8) \quad \Delta F_{CTj} = |F_{CTj}(k) - \Delta F_{CTj}(k-1)| \quad \text{dla } j = 1, 2, 3.$$

W tabeli 2 przedstawiono zależności pomiędzy poszczególnymi uchybami ΔF_{CT1} , ΔF_{CT2} , ΔF_{CT3} oraz adekwatne do nich odpowiedzi układu detekcji na wykryte awarie. Na podstawie tych informacji możliwe jest jednoznaczne określenie, który z czujników prądu stojana uległ awarii.

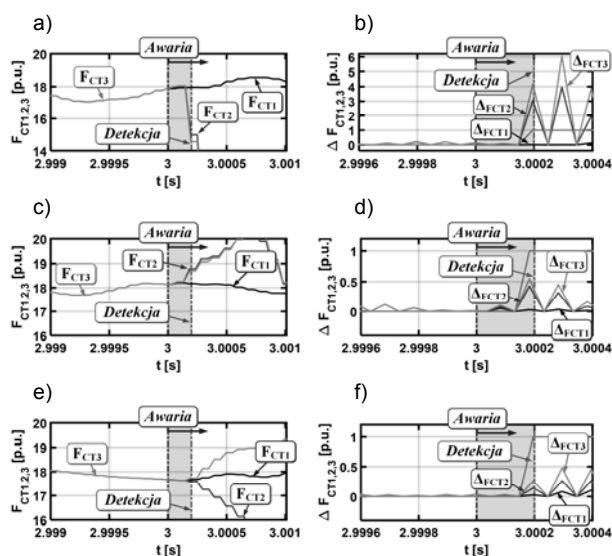
Jeżeli wszystkie uchyby są sobie równe detektor zwraca wartość zero dla wszystkich trzech sygnałów D_1 , D_2 , D_3 określających wystąpienie i lokalizację awarii czujnika. W chwili wystąpienia uszkodzenia na wyjściu układu detekcji pojawi się sygnał logiczny wskazujący, który z przetworników zwraca nieprawidłową wartość prądu. Opierając się na tej informacji oraz zależnościach (6) możliwe jest wybranie takiej pary składowych $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ prądu stojana, która jest niewrażliwa na dany prąd fazowy i podanie jej do wewnętrznej struktury sterowania.

Tabela 2. Zależność uszkodzonego przetwornika prądu na znaczniki kryterialne

| Uszkodzony przetwornik prądu | ΔF_{CT} | D_1 | D_2 | D_3 |
|------------------------------|---|-------|-------|-------|
| żaden | $\begin{cases} \Delta F_{CT1} - \Delta F_{CT2} < \varepsilon \\ \Delta F_{CT2} - \Delta F_{CT3} < \varepsilon \\ \Delta F_{CT3} - \Delta F_{CT1} < \varepsilon \end{cases}$ | 0 | 0 | 0 |
| i_A | $\begin{cases} \Delta F_{CT2} - \Delta F_{CT1} > \varepsilon \\ \Delta F_{CT3} - \Delta F_{CT1} > \varepsilon \end{cases}$ | 1 | 0 | 0 |
| i_B | $\begin{cases} \Delta F_{CT1} - \Delta F_{CT2} > \varepsilon \\ \Delta F_{CT3} - \Delta F_{CT2} > \varepsilon \end{cases}$ | 0 | 1 | 0 |
| i_C | $\begin{cases} \Delta F_{CT1} - \Delta F_{CT3} > \varepsilon \\ \Delta F_{CT2} - \Delta F_{CT3} > \varepsilon \end{cases}$ | 0 | 0 | 1 |

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki eksperymentalne przedstawionego systemu diagnostycznego dla trzech analizowanych uszkodzeń przetwornika prądu stojana fazy A w strukturze sterowania DRFOC.

We wszystkich przedstawionych przypadkach zaproponowany detektor był w stanie wykryć awarie przetwornika prądu w bardzo krótkim czasie równym dwóm próbom czasowym, tj. $\Delta t_{DET} = 200\mu s$. Dla prędkości mniejszych $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$ czas ten może się wydłużyć do 4 próbek czasowych, co nadal jest zdecydowanie dużo lepszym wynikiem w porównaniu do poprzedniego algorytmu detekcji.



Rys. 7. Przebiegi sygnałów diagnostycznych F_{CT1-3} (a, c, e) oraz ich błędów dyskretnych ΔF_{CT1-3} (b, d, f), przy o wystąpieniu awarii przetwornika prądu fazy A: przerwanie pętli pomiarowej (a, b), wystąpienie szumu pomiarowego (c, d) oraz zmiany wzmocnienia (e, f), sterowanie DRFOC, wyniki eksperymentalne - $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z diagnostyką uszkodzeń przetworników prądu stojana w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi sterowanymi metodami wektorowymi. Przedstawiono i sprawdzono skuteczność dwóch algorytmów analitycznych umożliwiających wykrywanie uszkodzeń tych elementów pomiarowych. Uzyskane wyniki wskazują na zdecydowaną wyższość systemu diagnostycznego opartego na mierzonych sygnałach prądowych w porównaniu do konwencjonalnego układu wykorzystującego dostępne

zmienne stanu. Istotną zaletą tego systemu jest także jego zdolność do wykrycia mało znaczących awarii, takich jak zmiana wzmocnienia sygnału czy wystąpienie szumu pomiarowego, a także możliwość jego wykorzystania w innych strukturach sterowania wektorowego.

Autor: mgr inż. Kamil Klimkowski, Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, e-mail: kamil.klimkowski@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Blaschke F., The principle of field orientation as applied to the new Transvektor closedloop control system for rotating field machines, *Siemens review*, vol. 34, nr 3, str. 217-220, 1972.
- [2] Kaźmierkowski, M. P., Krishnan, R., Control in power electronics: selected problems, Academic press, 2002.
- [3] Orłowska-Kowalska, T., Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami Indukcyjnymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [4] Tunia, H., Kaźmierkowski, M. P., Automatyka napędu przekształtnikowego, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1987.
- [5] Dybkowski M., Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych zagadnienia wybrane, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Monografie*, vol. 67, nr 20, 2013.
- [6] Isermann R., Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance, Springer, New York, 2006.
- [7] Orłowska-Kowalska T., Kowalski C. T., Dybkowski, M., Fault-Diagnosis and Fault-Tolerant-Control in Industrial Processes and Electrical Drives, In *Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters*, Springer International Publishing, str. 101-120, 2017.
- [8] Klimkowski K. Dybkowski M., Neural network approach for stator current sensor fault detection and isolation for vector controlled Induction motor drive, 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2016, Varna, Bulgaria, s. 1064-1070, 2016.
- [9] Klimkowski K., Dybkowski M., Stator current sensor fault detection and isolation for vector controlled Induction motor drive, 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2016: USB proceedings, Varna, Bulgaria, s. 1089-1094, 2016.
- [10] Klimkowski K., Dybkowski M., Orłowska-Kowalska T., Speed and current sensor fault-tolerant-control of the Induction motor drive, *Advanced control of electrical drives and power electronic converters / ed. by Jacek Kabziński*. Cham: Springer, s. 141-167, 2017.
- [11] Rothenhagen K., Fuchs F., Model-based fault detection of gain and offset faults in doubly fed Induction generators, *IEEE International symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives SDEMPED*, Cargese, 2009.
- [12] Campos-Delgado D., Espinoza-Trejo D., Palacios E., Fault-tolerant control in variable speed drives: a survey, *IET Electr Power Appl*, vol. 2, nr 2, str. 121-134, 2008.
- [13] Berriri H., Naouar M., Slama-Belkhdja I., Parity space approach for current sensor fault detection and isolation in electrical systems, 8th international multi-conference on systems, signals and devices EDD, Sousse, 2011.
- [14] Youssef A., El Khil S., Slama-Belkhdja I., State observer-based sensor fault detection and isolation, and fault tolerant control of a single-phase PWM, *IEEE Transactions on Power Electronics* vol. 28, nr 12, str. 5842-5853, 2013.
- [15] Yu, Y., Wang, Z., Xu, D., Zhou, T., Xu, R., Speed and current sensor fault detection and isolation based on adaptive observers for IM drives, *Journal of Power Electronics* vol. 14, nr 5, str. 967-979, 2014.
- [16] Klimkowski K. Dybkowski M., Bednarz Sz., Influence of stator and rotor resistances changes to the properties of the Fault Tolerant Vector Control of induction motor drive, *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Naleczow, Poland, 2017