

Wpływ uszkodzeń silnika indukcyjnego i przekształtnikowego układu napędowego na proces detekcji awarii wybranych czujników pomiarowych

Streszczenie. Artykuł związany jest z analizą pracy układu napędowego o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Sprawdzono wpływ uszkodzeń wybranych elementów układu napędowego z silnikiem indukcyjnym oraz samego silnika na proces detekcji awarii elementów pomiarowych w układzie wektorowego sterowania polowo – zorientowanego. Analizowano wpływ awarii prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego, uszkodzenia tranzystora falownika napięcia oraz sprawdzono wpływ zmienności wybranych parametrów maszyny na jakość pracy detektorów uszkodzeń czujników pomiarowych.

Abstract. The paper is concerned with the analysis of safety electrical drive systems. The analysis of the influence of selected components faults of the drive system with the induction motor on the process of detecting failure of the measuring elements in the vector control system was analyzed. The rotor bars faults of induction motor, IGBT transistor failure, and the influence of machine parameters changes were investigated. (Influence of induction motor faults on performance of the chosen measurements sensors faults detectors in vector controlled motor drives).

Słowa kluczowe: DFOC, FTC, silnik indukcyjny, detektor uszkodzeń, uszkodzenia silnika

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

Wstęp

Układy odporne na uszkodzenia to systemy charakteryzujące się zwiększoną odpornością na zmiany zachodzące w wybranych procesach na skutek awarii lub innych zdarzeń losowych. W przypadku układów napędowych mówi się o takich systemach, gdy awaria dowolnego elementu wchodzącego w skład elektrycznego układu napędowego nie powoduje utraty jego stabilności i zdolności do kontynuowania dalszej pracy [1], [2], [3].

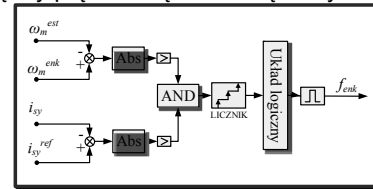
W przypadku metod sterowania wektorowego rozróżnia się kilka typów układów o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa: układy odporne na uszkodzenia elementów elektrycznych przekształtnika częstotliwości [4]-[7], układy odporne na uszkodzenia czujników pomiarowych [8]-[9], układy odporne na uszkodzenia maszyny elektrycznej [10]-[13], układy odporne na dowolne uszkodzenia [1].

W niniejszej pracy poruszono zagadnienia związane z układem odpornym na uszkodzenia czujników pomiarowych prędkości kątowej i prądu stojana w układzie wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym. Analizie poddano wybrane systemy detekcji uszkodzeń, bazujące zarówno na prostych relacjach logicznych oraz na sztucznych sieciach neuronowych. Detektory tego typu były szczegółowo analizowane między innymi w pracach [14]-[16]. W związku z tym, że każdy detektor powinien z możliwie największą skutecznością wykrywać wybrane uszkodzenia, konieczne jest przeprowadzenie analizy wpływu zmienności parametrów schematu zastępczego silnika oraz awarii innych komponentów napędu na proces detekcji uszkodzenia czujnika pomiarowego. Sprawdzono wpływ uszkodzenia przekształtnika częstotliwości oraz silnika indukcyjnego na proces detekcji uszkodzeń enkodera inkrementalnego oraz przetwornika prądu typu LEM. Badania symulacyjne wykonano w środowisku Matlab Simulink. Wybrane wyniki zostały zweryfikowane na stanowisku laboratoryjnym z kartą MicroLabBox DS1202.

Wybrane detektory uszkodzeń czujników pomiarowych dla sterowania polowo - zorientowanego

W celu detekcji uszkodzeń czujnika prędkości kątowej w metodzie sterowania polowo zorientowanej DRFOC [17] wykorzystano różnicę pomiędzy wartością składowej i_{sy}

prądu stojana i jej wartością referencyjną i_{sy}^{ref} (rys. 1) oraz różnicę pomiędzy prędkością mierzoną i estymowaną [2].



Rys.1. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prędkości dla sterowania wektorowego DRFOC

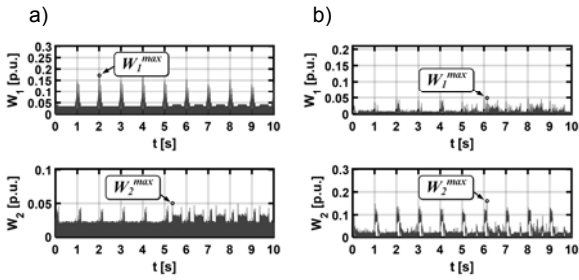
Detektor przedstawiony na rysunku 1 może być opisany zależnością (1). Zostaje on aktywowany jeśli wartości uchybów W_{1DFOC} , W_{2DFOC} (dla sterowania DRFOC W_1 , W_2) są większe niż dopuszczalne progi graniczne ε_1 i ε_2 . Układy diagnostyczne generują wtedy impulsy logiczne informujące o wystąpieniu uszkodzenia.

$$(1) \quad IF \begin{cases} W_{1DFOC} \geq \varepsilon_{1DFOC} \\ W_{2DFOC} \geq \varepsilon_{2DFOC} \end{cases} THEN \omega_m^{est} ELSE \omega_m^{enk}$$

gdzie: ε_{1DFOC} , ε_{2DFOC} dopuszczalne progi graniczne uchybu prędkości i składowej prądu stojana dla układu napędowego sterowanego metodą DRFOC. Uchyby diagnostyczne: $W_{1DFOC} = |\omega_m^{enk} - \omega_m^{est}|$, $W_{2DFOC} = |i_{sy}^{ref} - i_{sy}|$.

Układ diagnostyczny po stwierdzeniu wystąpienia awarii dokonuje przełączenia na obwód bezczujnikowy zawierający w wewnętrznym sprzężeniu zwrotnym estymator MRAS^{CC} [2]. Istotnym utrudnieniem w przedstawionym analitycznym algorytmie diagnostycznym jest ustalenie progowych wartości błędów monitorowanych sygnałów (ε_1 i ε_2), dla których detektor zostaje aktywowany. Odpowiedni dobór tych wartości jest głównym czynnikiem decydującym o poprawności zaprojektowania układu diagnostycznego i jego skuteczności przy identyfikacji awarii w możliwie najkrótszym czasie.

Aby uniknąć fałszywych informacji z układu detekcji, należy określić wartości błędów ε_1 i ε_2 podczas bezawaryjnej pracy napędu. W tym celu przeprowadzono serię nawrotów silnika z oraz bez obciążenia dla znamionowych wartości prędkości i momentu obciążenia.



Rys.2. Przebiegi sygnałów diagnostycznych W_1 i W_2 dla przebiegu nawrotnego, dla sterowania DRFOC, wyniki symulacyjne (a) i eksperymentalne (b), $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

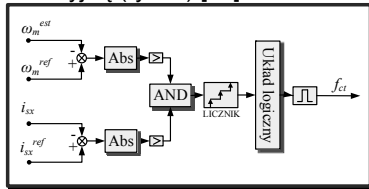
Na podstawie otrzymanych wyników (maksymalnych błędów (rys. 2)) zdefiniowano zależności określające wartości progów granicznych detektora wykorzystywanego w strukturze sterowania polowo zorientowanego:

$$(2) \quad \begin{aligned} \mathcal{E}_{1DFOC} &= \gamma_{01}^{DFOC} + \gamma_{11}^{DFOC} \cdot \left| \omega_m^{ref} \right| \\ \mathcal{E}_{2DFOC} &= \gamma_{02}^{DFOC} + \gamma_{12}^{DFOC} \cdot \left| \omega_m^{ref} \right| \end{aligned}$$

gdzie: $\gamma_{01}^{DFOC} = \max(W_1)$, $\gamma_{02}^{DFOC} = \max(W_2)$ – wartości maksymalne uchybów sygnałów diagnostycznych, ω_m^{ref} – wartość prędkości zadanej, $\gamma_{11,12}^{DFOC}$ – współczynniki pomocnicze, przy czym: $0 \leq \gamma_{11,12}^{DFOC} \leq 1$.

Od prawidłowego pomiaru prądu stojana zależy jakość i stabilność pracy układów napędowych sterowanych metodami wektorowymi.

Do celów diagnostycznych związanych z wykrywaniem uszkodzeń przetworników prądu stojana zdecydowano się wykorzystać błąd pomiędzy prędkością estymowaną a prędkością zadaną oraz błąd pomiędzy sygnałami zależnymi od odtwarzanego strumienia magnetycznego. Dla metody polowo zorientowanej DRFOC wykorzystano różnicę pomiędzy wartością składowej i_{sx} prądu stojana i jej wartością referencyjną (rys. 2) [16].



Rys.2. Schemat blokowy detektora uszkodzeń przetwornika prądu stojana dla sterowania wektorowego DRFOC

Przedstawiony detektor zostaje aktywowany jeśli wartości uchybów są większe niż dopuszczalne progi graniczne. Układ generuje wtedy impuls logiczny f_{ct} informujący o wystąpieniu uszkodzenia. Zasadę działania algorytmu przedstawia zależność (3).

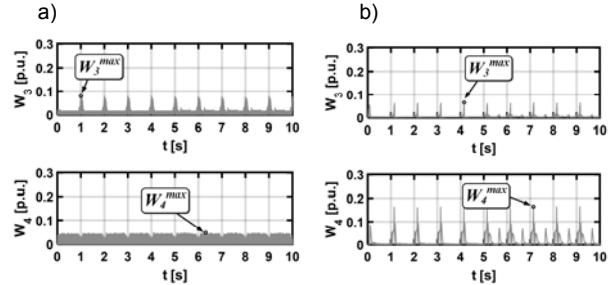
$$(3) \quad IF \begin{cases} W_{3DFOC} \geq \mathcal{E}_{3DFOC} \\ W_{4DFOC} \geq \mathcal{E}_{4DFOC} \end{cases} THEN f_{ct} = TRUE$$

gdzie: \mathcal{E}_{3DFOC} , \mathcal{E}_{4DFOC} - dopuszczalne progi graniczne uchybu prędkości estymowanej i składowej prądu stojana, uchyby diagnostyczne: $W_{3DFOC} = \left| \omega_m^{ref} - \omega_m^{est} \right|$, $W_{4DFOC} = \left| i_{sx}^{ref} - i_{sx} \right|$.

Układ diagnostyczny po stwierdzeniu wystąpienia awarii przetwornika prądu aktywuje sygnał logiczny, co skutkuje rekonfiguracją układu pomiarowego, w którym informacja o prądzie stojana fazy A uzyskiwana jest na podstawie dwóch pozostałych faz, zgodnie z zależnością:

$$(4) \quad i_A' = -(i_B + i_C)$$

W celu uniknięcia błędnych informacji z układu detekcji o wystąpieniu uszkodzenia przetwornika, przeprowadzono identyczny jak w przypadku badań uszkodzeń enkodera inkrementalnego, cykl nawrotów silnika podczas bezawaryjnej pracy napędu. Poniżej przedstawiono uzyskane symulacyjnie i eksperymentalnie wartości sygnałów diagnostycznych dla sterowania polowo zorientowanego dla takiego typu pracy napędu.

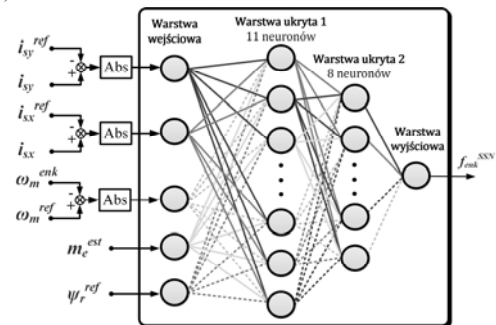


Rys. 3. Przebiegi sygnałów diagnostycznych W_3 i W_4 dla przebiegu nawrotnego, dla sterowania DRFOC, wyniki symulacyjne (a) i eksperymentalne (b), $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

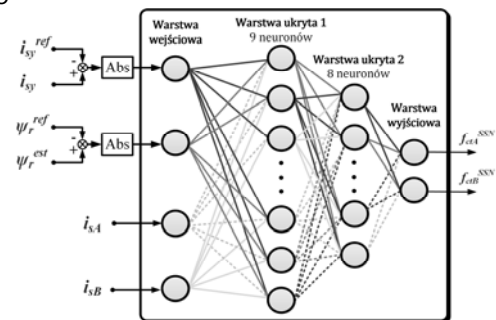
Uzyskane przebiegi błędów sygnałów diagnostycznych przedstawiono na rys. 3. Na tej podstawie możliwe jest określenie zależności określających progi graniczne detektora użytego w sterowaniu polowo zorientowanym:

$$(5) \quad \begin{aligned} \mathcal{E}_{3DFOC} &= \gamma_{03}^{DFOC} + \gamma_{13}^{DFOC} \cdot \left| \omega_m^{ref} \right| \\ \mathcal{E}_{4DFOC} &= \gamma_{04}^{DFOC} + \gamma_{14}^{DFOC} \cdot \left| \omega_m^{ref} \right| \end{aligned}$$

gdzie: $\gamma_{03}^{DFOC} = \max(W_3)$, $\gamma_{04}^{DFOC} = \max(W_4)$ – wartości początkowe wynikające z uchybów sygnałów diagnostycznych, ω_m^{ref} – wartość prędkości zadanej, $\gamma_{13,14}^{DFOC}$ – współczynniki pomocnicze, przy czym: $0 \leq \gamma_{13,14}^{DFOC} \leq 1$.



Rys.4. Schemat zaprojektowanej sieci neuronowej do detekcji uszkodzeń enkodera inkrementalnego dla struktury sterowania DRFOC



Rys.5. Schemat zaprojektowanej sieci neuronowej wykorzystanej do detekcji uszkodzeń przetworników prądu stojana dla struktury sterowania DRFOC

Kolejnym detektorem, który został sprawdzony pod względem odporności na zakłócenia występujące w układzie napędowym był detektor oparty na sztucznych sieciach neuronowych. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono koncepcję detektorów neuronowych do wykrywania uszkodzeń enkodera inkrementalnego oraz przetworników prądu stojana. Analiza tych metod została zaprezentowana w pracy [14], [16].

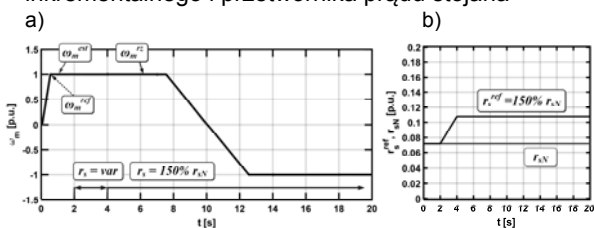
Wpływ zmian parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego na proces detekcji uszkodzeń czujników pomiarowych

Na skutek normalnej eksploatacji maszyny zmianom ulegają jej podstawowe parametry, zwłaszcza rezystancja wirnika i stojana. Jest więc uzasadnionym przeprowadzenie testów weryfikujących skuteczność i wrażliwość na zmiany parametrów SI wybranych detektorów uszkodzeń czujników pomiarowych zaprezentowanych w niniejszej pracy.

Przeprowadzone badania symulacyjne dotyczyły wpływu zmian rezystancji stojana i wirnika na pracę detektorów uszkodzeń czujników pomiarowych. Zakres zmian tych parametrów wynosi 100 % do 150 % ich wartości znamionowej. Zadane wartości rezystancji stojana i wirnika są wprowadzane tylko do modelu matematycznego silnika indukcyjnego – wartości parametrów w układzie sterowania i estymatorach pozostają bez zmian.

Przeprowadzona analiza dotyczyła:

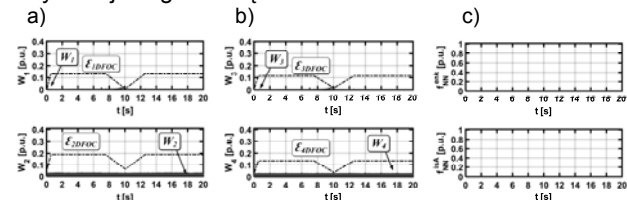
- detektora analitycznego uszkodzeń enkodera inkrementalnego i przetwornika prądu stojana fazy A
- detektora neuronowego uszkodzeń enkodera inkrementalnego i przetwornika prądu stojana



Rys. 6. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej i estymowanej (a) oraz znamionowej i zadanej wartości rezystancji stojana (b) przy zmianie wartości rezystancji stojana r_s (od 100 do 150%) od chwili $t=2$ s, sterowanie DRFOC, wyniki symulacyjne - $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi prędkości mierzonej, zadanej oraz estymowanej podczas pracy napędu

z prędkości znamionową i przeprowadzenia nawrotu podczas zmian rezystancji stojana o 50%. Wartość rezystancji ulegała zwiększeniu od chwili $t=2$ s.

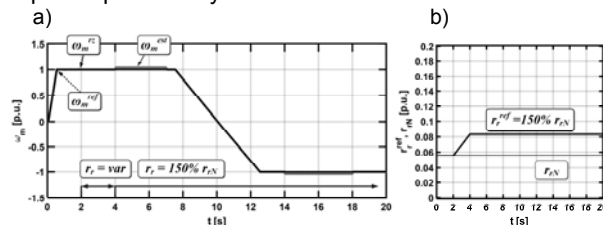


Rys. 7. Przebiegi sygnałów diagnostycznych W_1 , W_2 , W_3 , W_4 dla analitycznego detektora uszkodzeń enkodera inkrementalnego (a), przetwornika prądu fazy A (b), sygnałów wyjściowych z neuronowych detektorów (c) przy zmianie wartości rezystancji stojana r_s (od 100 do 150%) od chwili $t=2$ s, sterowanie DRFOC, wyniki symulacyjne - $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

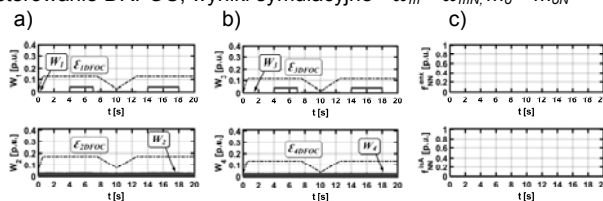
Na rysunku 7 przedstawiono wpływ zmiany rezystancji stojana na proces detekcji awarii czujnika prędkości kątowej i przetwornika prądu stojana. Widoczne jest, że wskaźniki detektorów w żadnym z przypadków nie przekraczają progów granicznych co świadczy jednoznacznie

o niewrażliwości zaproponowanych systemów na zmiany tego parametru.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki podobnych badań, jednak zmianie ulegała wartość rezystancji wirnika. Pomimo tego, że zmiana rezystancji powoduje powstanie ustalonego błędu pomiędzy prędkością mierzoną i estymowaną, co widoczne jest na rysunku 8, detektory nie wystawiły fałszywego alarmu (Rys.9). Można więc stwierdzić, że działają one w sposób prawidłowy.



Rys.8. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej i estymowanej (a), znamionowej i zadanej wartości rezystancji wirnika (b) przy zmianie wartości rezystancji wirnika r_r (od 100 do 150%) od chwili $t=2$ s, sterowanie DRFOC, wyniki symulacyjne - $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$



Rys.9. Przebiegi sygnałów diagnostycznych W_1 , W_2 , W_3 , W_4 dla analitycznego detektora uszkodzeń enkodera inkrementalnego (a), przetwornika prądu fazy A (b), sygnałów wyjściowych z neuronowych detektorów (c) przy zmianie wartości rezystancji wirnika r_r (od 100 do 150%) od chwili $t=2$ s, sterowanie DRFOC, wyniki symulacyjne - $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_{oN}$

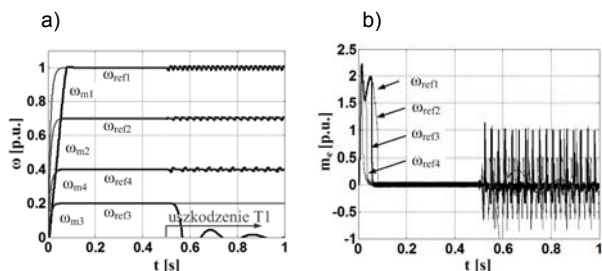
Wpływ uszkodzenia silnika indukcyjnego oraz tranzystora IGBT na proces detekcji uszkodzeń czujników pomiarowych

W niniejszej części artykułu przedstawiono badania dotyczące analizy wrażliwości zaprojektowanych detektorów na uszkodzenia tranzystora przekształtnika częstotliwości. Szacuje się, że ponad 80% uszkodzeń przemienników częstotliwości jest spowodowanych nieprawidłowościami pracy łączników tranzystorowych, spośród których najczęściej występującymi awariami są zwarcia (ang. short circuit) lub brak przewodzenia prądu (ang. open-switch fault) [4]-[7]. Zwarcia mogą być spowodowane uszkodzeniami izolacji przewodów, przepływem zbyt dużych wartości prądów lub degradacją bramek łączników wynikającą z efektów starzeniowych. Ten typ awarii obecnie jest eliminowany przez stosowanie standardowych zabezpieczeń nadprądowych, które w sytuacji krytycznej wyłączają układ napędowy.

Znacznie częściej dochodzi do uszkodzeń łączników spowodowanych brakiem przewodzenia prądu, co może być źródłem silnych oscylacji momentu elektromagnetycznego, strumienia wirnika bądź stojana, napięcia w układzie pośredniczącym przemiennika czy też wzrostu amplitudy prądu stojana. Jeśli taki stan trwa przez dłuższy czas to może on spowodować trwałe uszkodzenia w układzie zasilania, sterowania oraz silnika [4]-[7]. Po wystąpieniu takiego rodzaju uszkodzenia łącznika możliwa jest dalsza prawidłowa praca napędu, ale konieczne jest stosowanie układów odpornych na awarie, np. obwodów redundantnych.

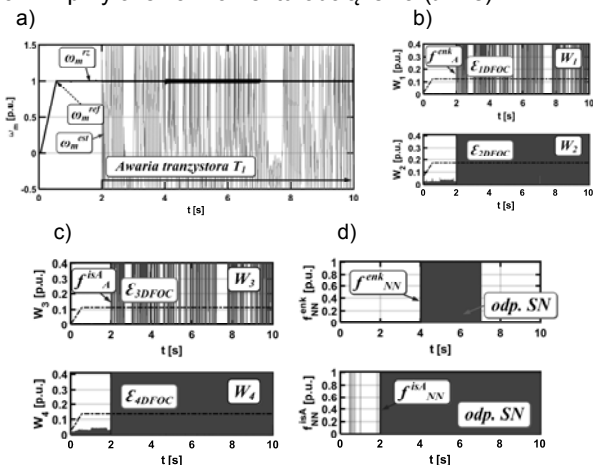
W związku z tym, że ten rodzaj awarii wpływa zarówno na przebieg prędkości, jak i innych wielkości estymowanych, konieczne jest przeprowadzenie badań, które pozwolą zweryfikować, czy układy diagnostyczne

uszkodzeń czujników pomiarowych nie generują fałszywych informacji o uszkodzeniu.

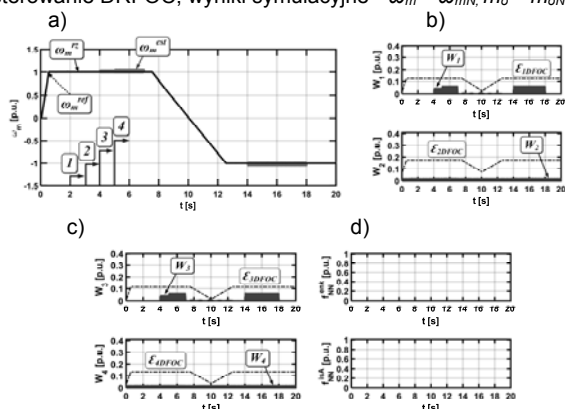


Rys. 10. Przebiegi prędkości referencyjnej i mierzonej (a) oraz momentu elektromagnetycznego (b) przy uszkodzeniu tranzystora T1 w chwili $t=0,5$ s, sterowanie DRFOC, $\omega_m=(0.2-1.0) \omega_{mN}$

Wyniki z rysunku 11 wskazują, że uszkodzenie tranzystora przemiennika częstotliwości wpływa w bardzo dużym stopniu na estymowaną prędkość kątową silnika, przez co detektory analityczne i neuronowe (przetwornika prądu) wskazały fałszywe wystąpienie awarii. Detektor neuronowy enkodera inkrementalnego zareagował (błędnie) w chwili przyłożenia momentu obciążenia ($t=4$ s).



Rys.11. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej i estymowanej (a), sygnałów diagnostycznych W_1, W_2, W_3, W_4 dla analitycznego detektora uszkodzeń enkodera inkrementalnego (b), przetwornika prądu fazy A (c), sygnałów wyjściowych z neuronowych detektorów (d) przy wystąpieniu awarii tranzystora T1 w chwili $t=2$ s, sterowanie DRFOC, wyniki symulacyjne - $\omega_m = \omega_{mN}, m_o = m_{oN}$



Rys.12. Przebiegi prędkości zadanej, mierzonej i estymowanej (a), sygnałów diagnostycznych W_1, W_2, W_3, W_4 dla analitycznego detektora uszkodzeń enkodera inkrementalnego (b), przetwornika prądu fazy A (c), sygnałów wyjściowych z neuronowych detektorów (d) przy wystąpieniu uszkodzenia prętów klatki wirnika S1 od chwili $t=2$ s, sterowanie DRFOC, wyniki symulacyjne - $\omega_m = \omega_{mN}, m_o = m_{oN}$

Ostatnie badania dotyczyły analizy wrażliwości zaproponowanych układów detekcji uszkodzeń czujników

pomiarowych przy wystąpieniu uszkodzenia prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego. Założono, że awarii ulegają 4 pręty w odstępach 1 sekundowych: od chwili $t=2$ s do $t=5$ s.

Przedstawione wyniki wskazują jednoznacznie, że zaproponowane systemy detekcji uszkodzeń czujników pomiarowych są niewrażliwe na wystąpienie uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego. Rezultaty są podobne do tych otrzymanych przy zmianie rezystancji wirnika, co jest związane z zmianą tego parametru podczas degradacji wirnika silnika.

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z diagnostyką i bezpieczeństwem układów napędowych z silnikami indukcyjnymi sterowanymi metodami wektorowymi. Sprawdzono wpływ uszkodzeń silnika i elementów energoelektronicznych na proces detekcji uszkodzeń czujnika prędkości i prądu stojana. Wykazano, że zarówno detektory analityczne oparte na prostych zależnościach pomiędzy sygnałami z wewnętrznej pętli sterowania oraz układ oparty na sztucznej sieci neuronowej są:

- odporne na zmiany rezystancji stojana $r_s = +50\% r_{sN}$,
- odporne na zmiany rezystancji wirnika $r_r = +50\% r_{rN}$,
- odporne na uszkodzenia (4) prętów wirnika,
- wrażliwe na uszkodzenia tranzystorów IGBT (open-switch) przemiennika częstotliwości.

Autorzy: dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, mgr inż. Kamil Klimkowski, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, E-mail: mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl, kamil.klimkowski@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Isermann R., *Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, New York, 2006.
- [4] Orłowska-Kowalska T., Sobanski P., IGBT open-circuit fault diagnostic methods for SVM-VSI vector-controlled Induction motor drives, *Advanced control of electrical drives and power electronic converters*. Springer, str. 121-139, 2017.
- [5] Freire N. M. A, Estima J. O., Cardoso A. J. M., A voltage-based approach for open circuit fault diagnosis in voltage-fed SVM motor drives without extra hardware, XXth International Conference on Electrical Machines ICEM, Marseille, 2012.
- [6] Freire N. M. A, Estima J. O., Cardoso A. J. M., Recent advances in fault diagnosis by Park's vector approach, IEEE workshop on electrical machines design control and diagnosis WEMDCD, Paris, 2013.
- [7] Śleszyński W., Nieznański J., Cichowski A., Open-Transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* vol. 56, nr 11, str. 4681-4688, 2009.
- [8] Jiang J., Yu X., Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches, *Annual Reviews in Control*, vol. 36, nr 1, str. 60-72, 2012.
- [9] Gao Z., Cecati C., Ding S. X., A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, nr 6, str. 3757-3767, 2015.
- [10] Benbouzid M. E. H., A review of Induction motors signature analysis as a medium for faults detection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, nr 5, str. 984-993, 2000.

- [11] Kowalski C.T., Stan obecny i tendencje rozwojowe metod monitorowania i diagnostyki napędów z silnikami indukcyjnymi, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 4, str. 160-164, 2003.
- [12] Nandi S., Toliyat H. A., Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machine - a review, *Electric Machines and Drives*, International Conference IEMD'99, s. 219-221, 1999.
- [13] Sin M. L., Soong W. L., Ertugrul N., Induction machine on-line condition monitoring and fault diagnosis – a survey, *Australasian Universities Power Engineering Conference*, AUPEC2003, Christchurch, nr 32, 2003.
- [14] 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, 25-28 September 2016. s. 1064-1070, 2016
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Orłowska-Kowalska, T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami Indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.