

*DFOC, czujnik prędkości, silnik indukcyjny,
układ odporny na uszkodzenia, detektor, FTC, sieć neuronowa*

Kamil KLIMKOWSKI, Mateusz DYBKOWSKI*

ANALIZA WYBRANYCH DETEKTORÓW USZKODZEŃ CZUJNIKA PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ W NAPĘDACH Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

W artykule przedstawiono analizę porównawczą detektorów uszkodzenia czujnika prędkości kątowej: wykorzystującego między innymi estymowaną wartość prędkości kątowej oraz układu bazującego na sztucznych sieciach neuronowych. Sprawdzono działanie układów w różnych warunkach pracy w strukturze sterowania połowo zorientowanego DFOC. Zaprezentowano zasadę działania każdego z układów detekcji i uzyskane rezultaty, w tym także dla kompletnego układu odpornego na awarie enkodera inkrementalnego. Badania zrealizowano w środowisku MATLAB/SimPower Systems.

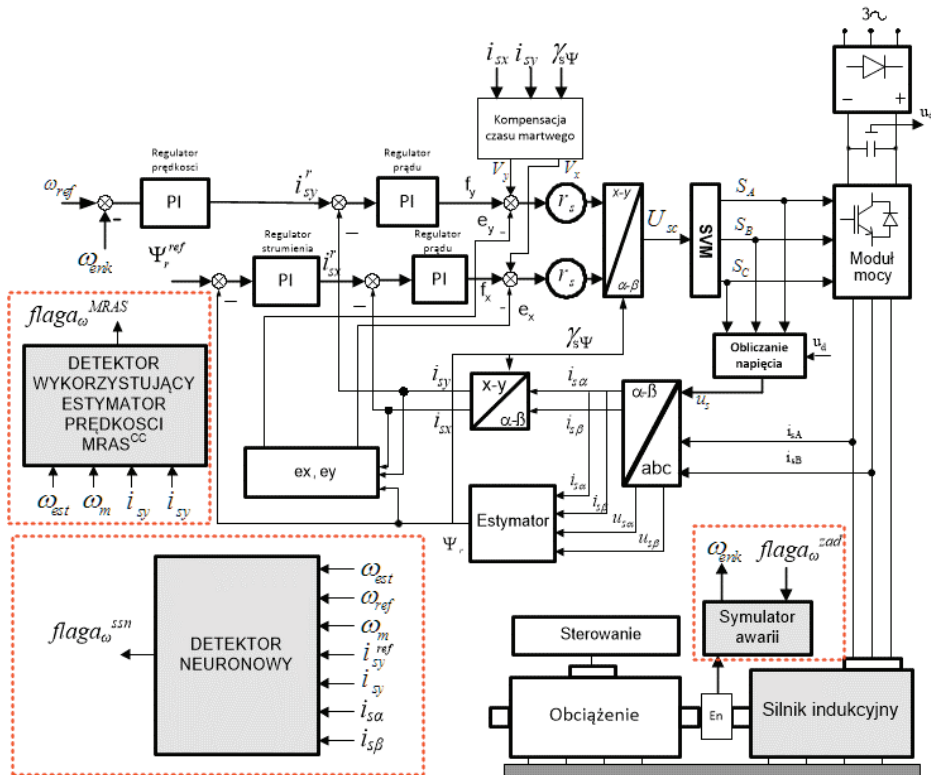
1. WPROWADZENIE

Wzrost zainteresowania układami o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa – FTC (ang. *Fault Tolerant Control* [6], [11]) wygenerował potrzebę opracowywania układów detekcji uszkodzeń komponentów systemów napędowych z silnikami indukcyjnymi, które pozwalają na szybkie wykrycie awarii [6], [3], [11]. Im dłuższy czas detekcji i kompensacji uszkodzeń, tym bardziej zakłócone są przebiegi podstawowych zmiennych stanu maszyny, ponadto awarie czujników pomiarowych w napędach sterowanych metodami wektorowymi mogą doprowadzić do utraty stabilności bądź niepożądanych stanów pracy silnika, nawet do jego uszkodzenia [9], [10]. Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie złożonych układów konieczne jest zatem uwzględnienie technik diagnostyki [9] i kontroli, które w odpowiednio krótkim czasie pozwolą na detekcję uszkodzenia i adekwatną odpowiedź struktury sterowaniem [4], [9].

W niniejszym artykule przedstawiono analizę dwóch algorytmów wykrywania awarii czujnika prędkości – jeden oparty na estymatorze MRAS^{CC} [4], [7], a drugi na

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

sztucznej sieci neuronowej. Zaprezentowano uzyskane wyniki dla układu napędowego sterowanego metodą polowo zorientowaną [4], [5], którego schemat struktury przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura układu bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego DRFOC silnikiem indukcyjnym [4], [5]

Podczas badań skoncentrowano się przede wszystkim na zapewnieniu szybkiej i pewnej detekcji awarii enkodera przez opracowane detektory oraz dalszej stabilnej pracy całego systemu napędowego z silnikiem indukcyjnym. Badania symulacyjne zostały zrealizowane w środowisku *MATLAB/SimPowerSystems*.

2. WPŁYW USZKODZEŃ CZUJNIKA PRĘDKOŚCI NA PRACĘ NAPĘDU Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM

Awarie wszystkich typów czujników prędkości można podzielić na cztery rodzaje, które przedstawiono w tabeli 1. W zależności od współczynnika pomocniczego,

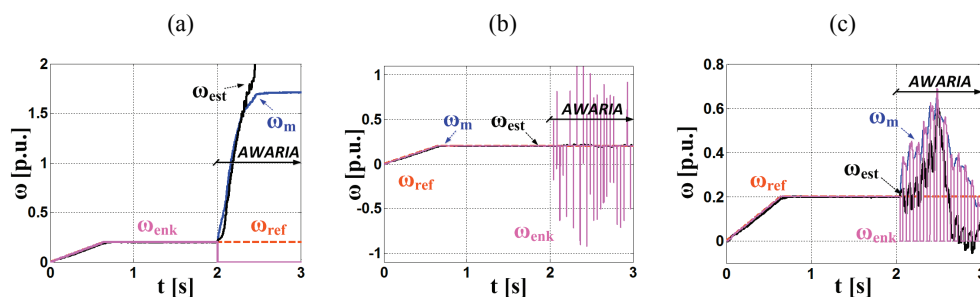
otrzymywana wartość prędkości mechanicznej pobierana z czujnika może być przerywana, zerowa bądź ujemna.

Tabela 1. Podział uszkodzeń czujników prędkości

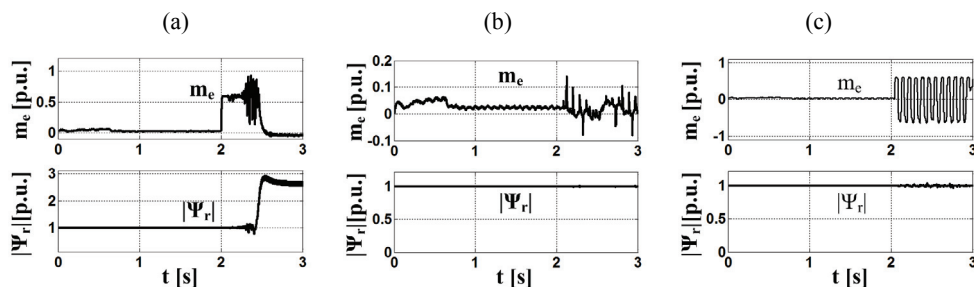
Rodzaj uszkodzenia	Wartość pobierana z czujnika prędkości	Wartość współczynnika γ
Całkowite przerwanie pętli pomiarowej	$\omega_m^m = (1 - \gamma)\omega_m$	$\gamma = 0$
Ograniczenie liczby impulsów		$0 < \gamma < 1$
Cykliczne przerywany sygnał pomiarowy		$\gamma = [0, 1]$
Offset sygnału pomiarowego		$-1 \leq \gamma \leq 1$

ω_m^m – mierzona wartość prędkości mechanicznej, ω_m – rzeczywista wartość prędkości mechanicznej, γ – współczynnik pomocniczy.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki eksperymentalne dotyczące wpływu trzech najbardziej istotnych uszkodzeń czujnika prędkości na pracę układu napędowego sterowanego metodą polowo zorientowaną DRFOC.



Rys. 2. Przebiegi prędkości estymowanej oraz zadanej silnika dla: całkowitego uszkodzenia czujnika prędkości (a), cyklicznego gubienia impulsów czujnika prędkości (b), zanik poszczególnych impulsów czujnika (c) dla sterowania DFOC (wyniki eksperymentalne)



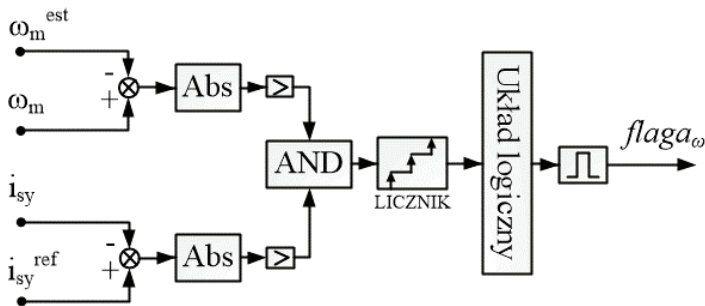
Rys. 3. Przebiegi momentu elektromagnetycznego oraz modułu strumienia wirnika dla: całkowitego uszkodzenia czujnika prędkości (a), cyklicznego gubienia impulsów czujnika prędkości (b), zanik poszczególnych impulsów czujnika (c) dla sterowania DFOC (wyniki eksperymentalne)

Jednym z najniebezpieczniejszych rodzajów uszkodzeń jest całkowite przerwanie pętli pomiarowej prędkości. W tym momencie prędkość bardzo szybko rośnie a układ regulacji wystawia maksymalnie możliwą wartość momentu elektromagnetycznego (rys. 2a, rys. 3a).

Gubienie pojedynczych impulsów nie powoduje znaczących negatywnych skutków w pracy napędu indukcyjnego, ale długotrwałe uszkodzenie może doprowadzić do niekontrolowanych zjawisk w napędzie (rys. 2b, 3b). Natomiast zanik poszczególnych impulsów sygnału pomiarowego może wynikać z drgań związanych z pracą układu napędowego w przypadku zablokowania któregoś z otworów na tarczy enkodera, czego skutkiem będzie uzyskiwana wartość zerowa prędkości kątowej dla uszkodzonego otworu. Dla każdego z przedstawionych typów awarii konieczna jest jak najszybsza jej identyfikacja i kompensacja [6], [11].

3. IDENTYFIKACJA I KOMPENSACJA WPLYWU AWARII CZUJNIKA PRĘDKOŚCI

Najprostszym i najczęściej opisywanym w literaturze [6], [7], [11] sposobem detekcji awarii enkodera jest porównywanie przebiegów prędkości mechanicznej oraz estymowanej przez dowolny estymator tej wielkości. Skuteczność i niezawodność takiego algorytmu zależy od dwóch aspektów. Pierwszym z nich jest wybranie możliwie najmniej wrażliwego na zmiany parametrów zastępczych silnika estymatora. Jednym z takich układów jest układ MRAS^{CC}[4]. Drugim utrudnieniem jest ustalenie progowej wartości błędu między wybranymi sygnałami diagnostycznymi, dla której detektor powinien zostać aktywowany. W publikacjach [13] zaproponowano algorytm oparty właśnie o estymator MRAS^{CC}, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 4, a zasada działania wyrażona jest zależnością (1). Detektor zostaje aktywowany jeśli wartości uchybów są większe niż dopuszczalne wartości graniczne i generuje wtedy impuls logiczny informujący o wystąpieniu uszkodzenia.

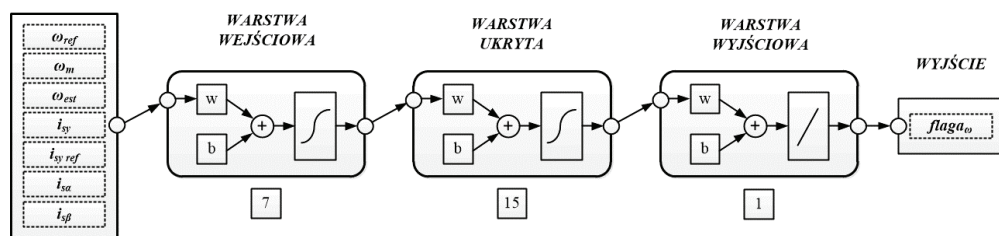


Rys. 4. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prędkości dla sterowania wektorowego DFOC

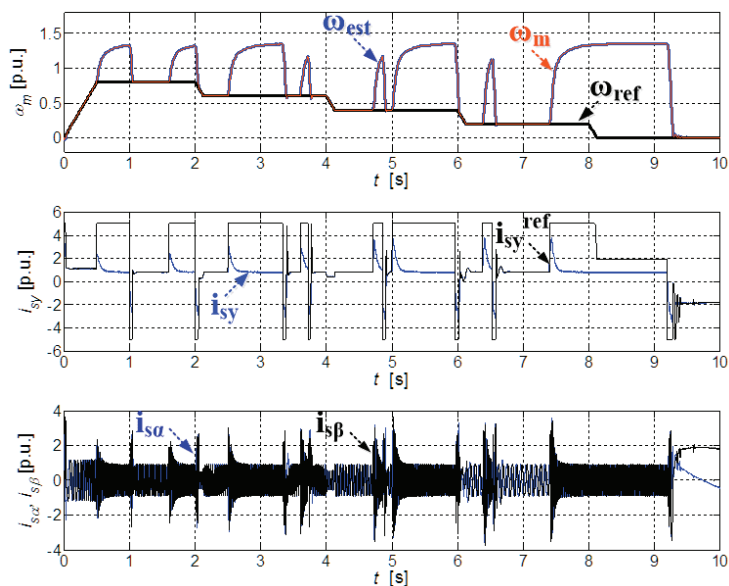
$$\text{IF} \begin{cases} |\omega_m - \omega_m^{\text{est}}| \geq \varepsilon_{1\text{DFOC}} \\ |i_{sy}^{\text{ref}} - i_{sy}| \geq \varepsilon_{2\text{DFOC}} \end{cases} \text{ THEN } \omega_m^{\text{est}} \text{ ELSE } \omega_m \quad (1)$$

gdzie: $\varepsilon_{1\text{DFOC}} = 0,02 + 0,1 \cdot |\omega_m^{\text{ref}}|$, $\varepsilon_{2\text{DFOC}}$ – dopuszczalny próg graniczny uchybu prędkości i składowej i_{sy} dla analizowanego układu napędowego sterowanego metodą DFOC.

Opracowano detektor neuronowy wykorzystujący aktualne sygnały z wewnętrznej pętli regulacji i porównano go z układem algorytmicznym (rys. 4). Schemat ideowy detektora neuronowego przedstawiono na rys. 5.

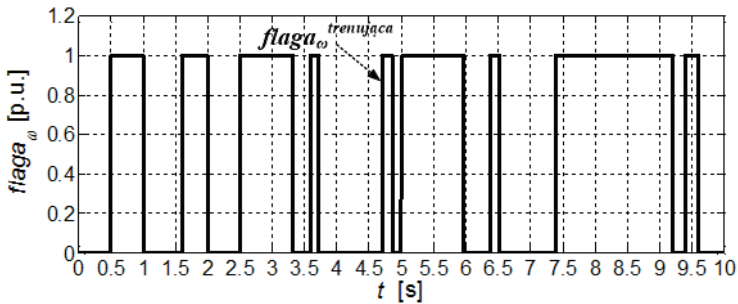


Rys. 5. Struktura statycznej sieci neuronowej służąca do detekcji uszkodzenia czujnika prędkości



Rys. 6. Przebiegi sygnałów uczących: prędkości mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej, składowej i_{sy} prądu stojana oraz składowych α - β prądu stojana przy całkowitym uszkodzeniu enkodera przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

Sygnaly wejściowe są określone przez wektor $\mathbf{U} = [\omega_{\text{ref}}, \omega_m, \omega_{\text{est}}, i_{\text{sy}}, i_{\text{sy ref}}, i_{\text{sa}}, i_{\text{s}\beta}]$. W warstwie ukrytej znajduje się 15 neuronów, a w warstwie wyjściowej 1 neuron. Odpowiedzią sieci jest sygnał określający czasy występowania uszkodzeń czujnika prędkości. W procesie uczenia zastosowano algorytm Levenberga–Marquardta, który kończy się w momencie osiągnięcia minimalnego gradientu bądź określonej ilości iteracji. Badania polegające na testowaniu zaprojektowanego detektora neuronowego przeprowadzono w środowisku MATLAB z użyciem biblioteki *Neural Network Toolbox*. W procesie nauki sieci zmianie ulegała wartość prędkości zadanej w układzie sterowania wektorowego. W pierwszej chwili napęd pracował z prędkością 80% wartości znamionowej, która następnie była zmniejszana co 2 sekundy. W czasie pracy napędu dokonywano uszkodzeń czujnika prędkości kątowej i obserwowano sygnały z wewnętrznej struktury sterowania (rys. 6). Detektor uczony był wyłącznie awarii polegającej na całkowitym przerwaniu pętli pomiarowej z czujnika prędkości.



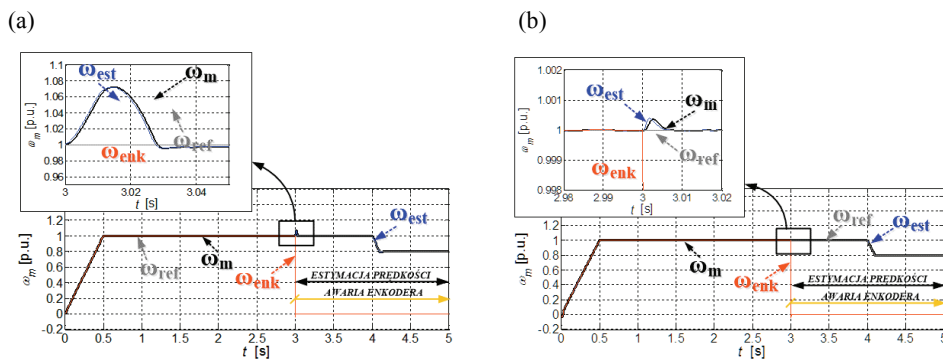
Rys. 7. Przebieg zadanego sygnału wystąpień uszkodzeń enkodera przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

Na podstawie procesu uczenia sieci neuronowej otrzymano detektor, który zweryfikowano przy zadaniu innej trajektorii prędkości kątowej, momentu obciążenia oraz awarii występujących w innych chwilach czasowych.

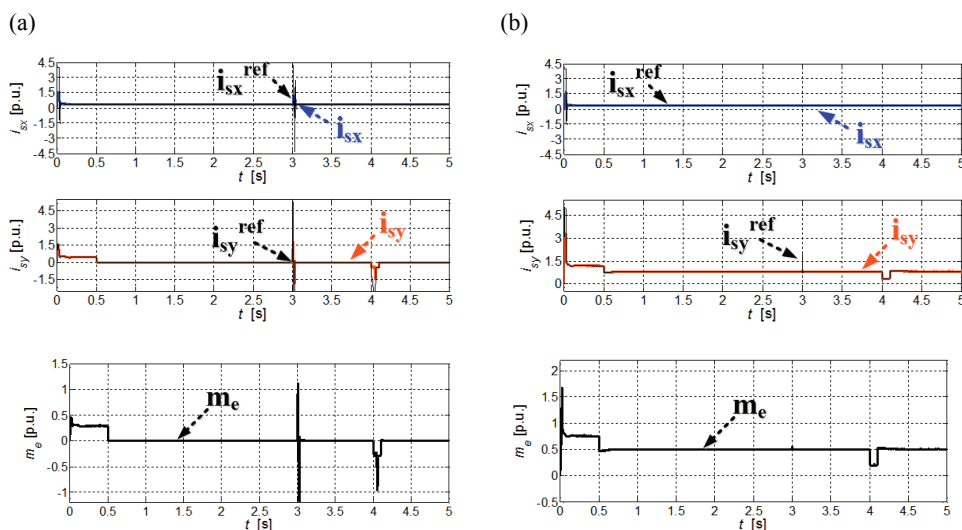
4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Przeprowadzone badania symulacyjne dotyczyły układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanego metodą polowo zorientowaną. Uszkodzenie czujnika prędkości wystąpiło w chwili $t = 3$ s. Po tym czasie detektory wykrywały uszkodzenie a układ logiczny przełączał system do pracy bezczujnikowej.

Pierwsze przebiegi (rys. 8 i 9) dotyczą pracy silnika ze znamionową prędkością kątową. Awaria polegała na całkowitym przerwaniu pętli pomiarowej z enkodera.



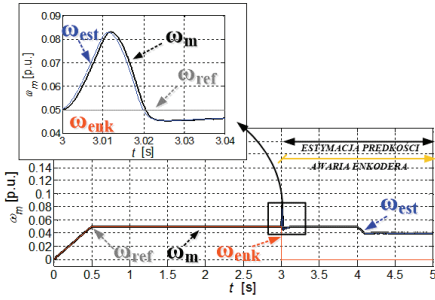
Rys. 8. Przebieg prędkości estymowanej oraz zadanej silnika dla całkowitego uszkodzenia czujnika prędkości dla sterowania FTDFOC z detektorem opartym na estymatorze MRAS (a) i sztucznej sieci neuronowej (b)



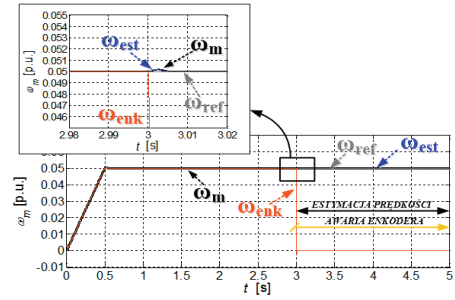
Rys. 9. Przebieg składowych x-y prądu stojana i momentu elektromagnetycznego dla całkowitego uszkodzenia czujnika prędkości dla sterowania FTDFOC z detektorem opartym na estymatorze MRAS (a) i sztucznej sieci neuronowej (b)

Układ odporny wykorzystujący estymator MRAS zadziałał stosunkowo szybko po wystąpieniu uszkodzenia, ale zauważalne są krótkotrwałe gwałtowne wzrosty amplitud prądu stojana i momentu elektromagnetycznego. Nie mniej jednak po przejściu na estymację prędkości napęd mógł pracować stabilnie. W przypadku sieci neuronowej identyfikacja wadliwego czujnika przebiegła w dużo krótszym czasie i nie wystąpiły podczas zmiany topologii układu wahania podstawowych zmiennych stanu. Analogicznie wykonano testy dla prędkości mniejszych ($\omega_m = 0,05 \omega_{mN}$) niż znamionowa – rys. 10 i 11.

(a)

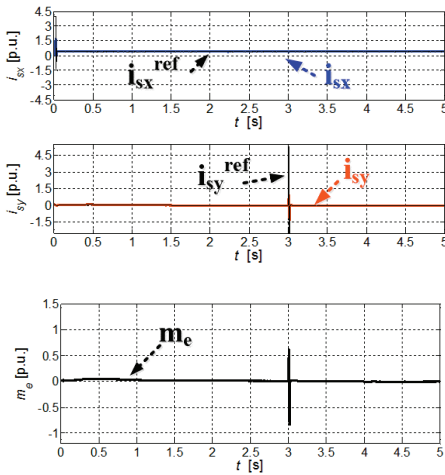


(b)

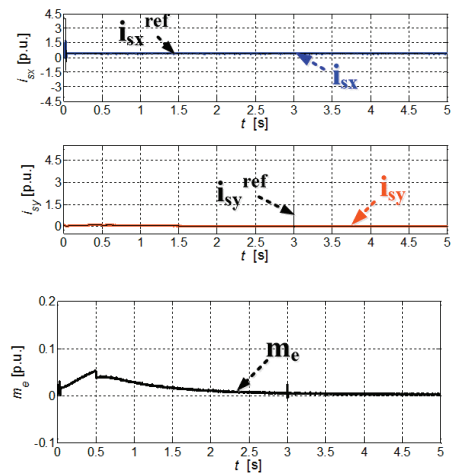


Rys. 10. Przebieg prędkości estymowanej oraz zadanej silnika dla całkowitego uszkodzenia czujnika prędkości dla sterowania FTDFOC z detektorem opartym na estymatorze MRAS (a) i sztucznej sieci neuronowej (b)

(a)



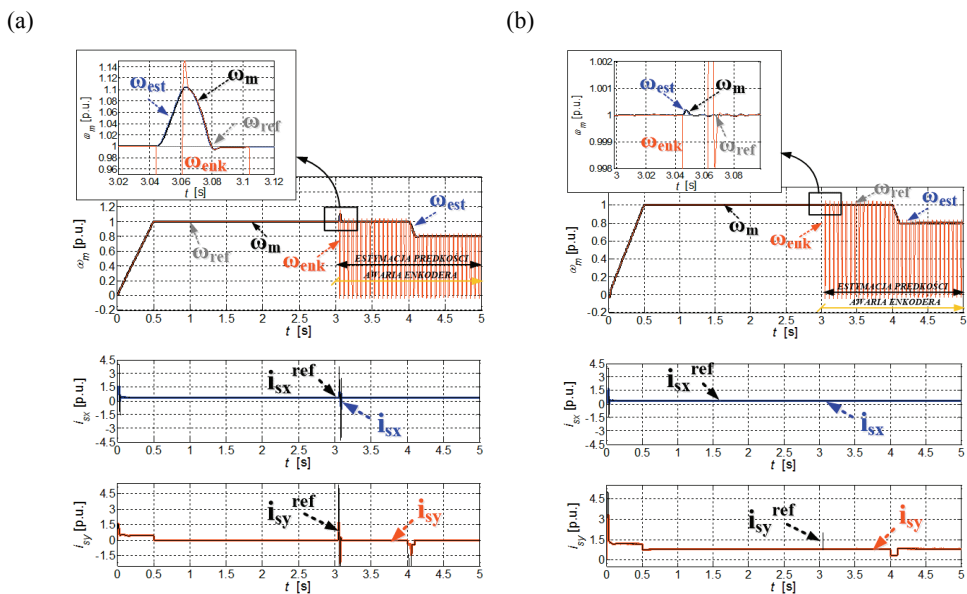
(b)



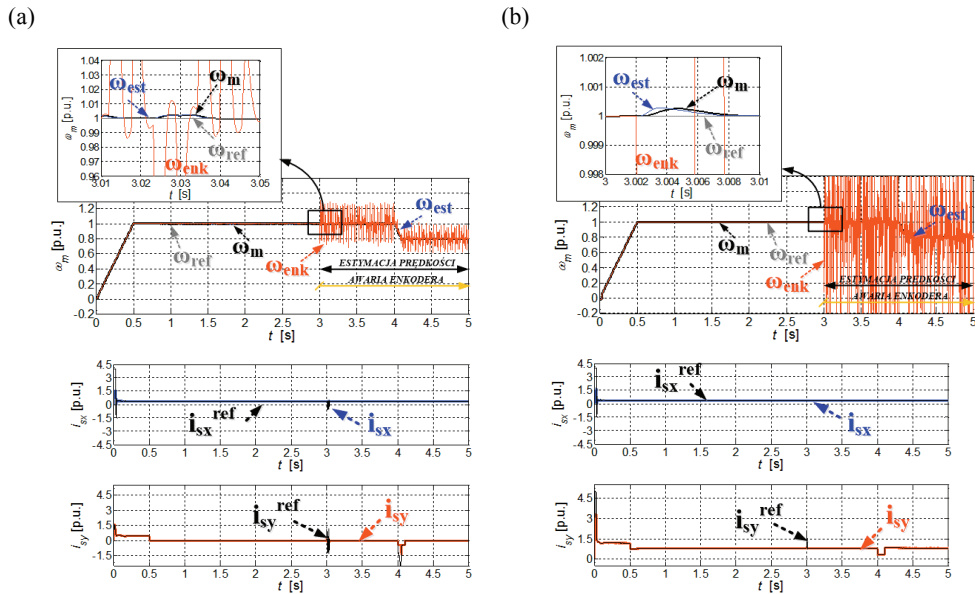
Rys. 11. Przebieg składowych x - y prądu stojana i momentu elektromagnetycznego dla całkowitego uszkodzenia czujnika prędkości dla sterowania FTDFOC z detektorem opartym na estymatorze MRAS (a) i sztucznej sieci neuronowej (b)

Przedstawione wyniki wskazują na to, że neuronowy detektor uszkodzeń enkodera działa szybciej zarówno dla prędkości kątownej znamionowej oraz dla wartości bliskich zeru. W przypadku układu z estymatorem MRAS zauważalne są krótkie impulsy w przebiegach momentu elektromagnetycznego oraz prądu stojana. Impulsy te mogą spowodować wyłączenie napędu przez zabezpieczenia nadprądowe.

Na rysunkach 12 i 13 zaprezentowano wyniki symulacyjne dla obu układów odpornych przy wystąpieniu pozostałych rodzajów uszkodzeń (tabela 1).

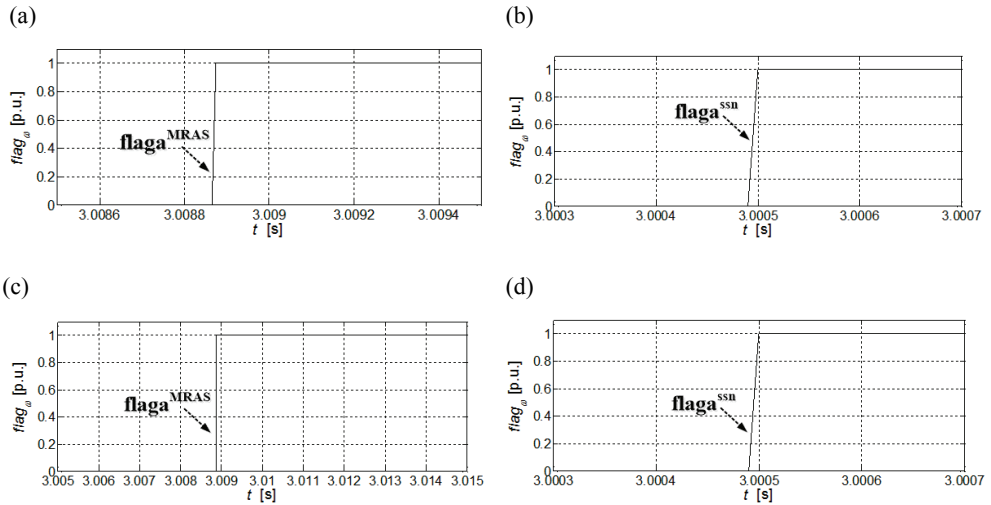


Rys. 12. Przebieg prędkości, składowych x - y prądu stojana i momentu elektromagnetycznego dla zaniku poszczególnych impulsów sygnału pomiarowego z czujnika dla sterowania FTDFOC z detektorem opartym na estymatorze MRAS (a) i sztucznej sieci neuronowej (b)



Rys. 13. Przebieg prędkości, składowych x - y prądu stojana i momentu elektromagnetycznego dla cyklicznego gubienia impulsów z czujnika prędkości dla sterowania FTDFOC z detektorem opartym na estymatorze MRAS (a) i sztucznej sieci neuronowej (b)

Przy wystąpieniu uszkodzeń polegających na cyklicznym gubieniu impulsów czujnika lub zaniku poszczególnych impulsów oba detektory poprawnie wykryły awarię i przełączyły strukturę sterowania na układ z estymatorem MRAS^{CC}. Także i w tych przypadkach szybszy okazał się detektor z siecią neuronową co wyraźnie można zauważyć w przebiegach składowych x - y prądu stojana w chwili wystąpienia uszkodzenia, czyli dla $t = 3$ s. Poniżej, na rys. 14 przedstawiono czasy wykrycia awarii dla poszczególnych detektorów w przypadku całkowitego przerwania pętli pomiarowej dla dwóch wartości prędkości silnika: $\omega_m = \omega_{mN}$ oraz $\omega_m = 0,05 \omega_{mN}$.



Rys. 14. Przebieg sygnałów wyjściowych z detektora opartego na estymatorze MRAS (a) i sztucznej sieci neuronowej (b) – (wyniki symulacyjne)

Dla obu wartości prędkości kątowej silnika czasy detekcji poszczególnych detektorów są identyczne. Istotną różnicą jest fakt, że układ z siecią neuronową zadziałał szybciej o 0,001 s. Pomimo małej rozbieżności skutki w pracy silnika są zauważalne, bowiem nie występują zakłócenia w przebiegach podstawowych zmiennych stanu, tak jak ma to miejsce w układzie wykorzystującym estymator MRAS^{CC}.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalne dotyczące wpływu uszkodzeń czujnika prędkości na pracę napędu z silnikiem indukcyjnym sterowanego metodą polowo zorientowaną. Uzyskane rezultaty wskazują na konieczność projektowania układów detekcji takich awarii o możliwie krótkim czasie reakcji. Spośród dwóch

zaproponowanych detektorów, lepszym okazał się ten oparty na sztucznej sieci neuronowej. Zastosowanie takiego detektora w układach odpornych pozwala na wyeliminowanie niepożądanych zakłóceń w przebiegach prądu stojana czy momentu elektromagnetycznego.

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

LITERATURA

- [1] ALAG S., AGOGINO A., MORJARIA M., *A methodology for intelligent sensor measurement, validation, fusion, and fault detection for equipment monitoring and diagnostics*, AI EDAM, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2001.
- [2] ARADHYE H., *Sensor fault detection, isolation, and accommodation using neural networks, fuzzy logic and bayesian belief networks*, Master's thesis, University of New Mexico, 2002.
- [3] BLANKE M., KINNAERT M., LUNZE J. et al., *Diagnosis and fault-tolerant control*, Springer-Verlag, 2003.
- [4] 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.
- [5] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [6] ISERMANN R., *Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, New York 2006.
- [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] KOWALSKI C.T., *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [10] KOWALSKI C.T., *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 57, Seria: Monografie, Nr 18, Wrocław 2005.
- [11] LI JIANG, *Sensor fault detection and isolation using system dynamics identification techniques*, PhD thesis, The University of Michigan, 2011.
- [12] ROMERO M.E., SERON M.M., DE DONA' J.A., *Sensor fault-tolerant vector control of induction motors*, IET Control Theory Applications, 2010, Vol. 4, No. 9, 1707–1724.
- [13] 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.
- [14] OSOWSKI S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.

AN ANALYSIS OF CHOSEN SPEED SENSOR FAULT DETECTORS FOR INDUCTION MOTOR DRIVES

In the paper an analysis of chosen speed sensor fault detectors is presented. The detectors are based on speed estimation and neural network. These systems are described and compared. The fault tolerant algorithm using these detectors was applied and tested during faulted conditions. Simulation results of vector controlled FTC drive with induction motor is presented. Simulation results are performed in MATLAB/SimPowerSystem.