

Kamil KLIMKOWSKI*
Mateusz DYBKOWSKI*

KONCEPCJA NEURONOWEGO DETEKTORA USZKODZEŃ CZUJNIKA PRĘDKOŚCI DLA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM STEROWANYCH METODĄ POŁOWO ZORIENTOWANĄ

W artykule przedstawiono koncepcję układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą połowo - zorientowaną o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Do detekcji uszkodzenia wykorzystano sztuczną sieć neuronową. Detektor sprawdzono w różnych warunkach pracy, dla różnych rodzajów uszkodzeń czujnika. Opracowano kompletny system o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Badania symulacyjne wykonano w środowisku Matlab/SimPowerSystem.

SŁOWA KLUCZOWE: napęd elektryczny, enkoder, fault tolerant, FTC, czujniki pomiarowe, detekcja uszkodzeń, detektor neuronowy

1. WPROWADZENIE

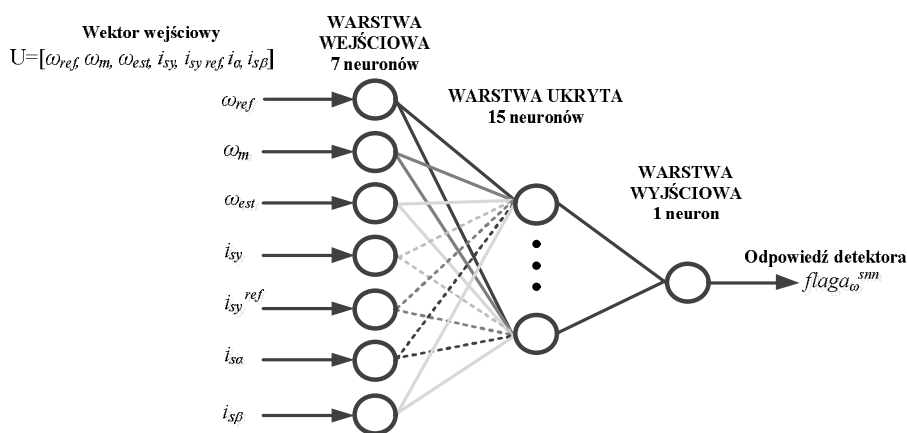
Rosnące wymagania, co do niezawodności napędów elektrycznych doprowadziły do znacznego skomplikowania ich struktur, jednocześnie zwiększając ryzyko wystąpienia ich awarii [1, 6, 8]. Uszkodzenia elementów systemu, które mogą pojawić się w trakcie eksploatacji, wynikające z procesów zużycia podzespołów lub błędów obsługi, mają istotny wpływ na bezpieczeństwo procesu i obsługi oraz jego ekonomiczną opłacalność [8]. Identyfikacja awarii komponentów napędu może odbywać się różnymi metodami, wśród których wyróżnia się: redundancję sprzętową i analityczną [1]. Ta druga może być podzielona na techniki oparte na modelach matematycznych, wiedzy eksperta czy na analizie danych [1, 2]. Obecnie panuje tendencja do projektowania niewrażliwych i niezawodnych systemów odpornych, które pozwalają na bardzo szybką i pewną detekcję awarii. Coraz częściej badane są układy wykorzystujące metody sztucznej inteligencji, przede wszystkim sztuczne sieci neuronowe [8].

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję prostego detektora opartego właśnie na tych układach. Zawarte wyniki dotyczą struktury wektorowego sterowania połowo zorientowanego silnikiem indukcyjnym i zostały zrealizowane w środowisku MATLAB/SimPowerSystem.

* Politechnika Wrocławska.

3. DETEKCJA USZKODZEŃ CZUJNIKA PRĘDKOŚCI PRZY WYKORZYSTANIU SIECI NEURONOWEJ

W niniejszym rozdziale przedstawiono koncepcję wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń czujnika prędkości kątowej zaimplementowanego w układzie sterowania wektorowego. Detektor oparty jest na jednokierunkowej sieci neuronowej z jedną warstwą ukrytą, złożonej z neuronów o nieliniowych funkcjach aktywacji w konfiguracji 7-15-1. Jako sygnał uczący podany został wektor $U = [\omega_{ref}, \omega_m, \omega_{est}, i_{sy}, i_{sy\ ref}, i_{sa}, i_{s\beta}]$. Schemat ideowy detektora przedstawiono na Rys. 2.



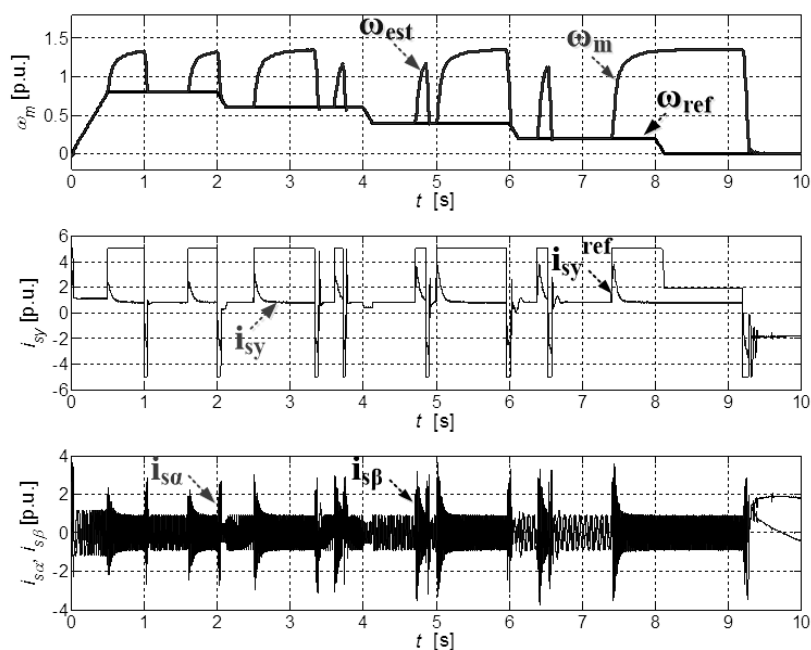
Rys. 2. Schemat ideowy detektora neuronowego

Sieć neuronowa trenowana była sygnałem przedstawionym na Rys. 3 według algorytmu Levenberga-Marquardta. Zmianie ulegała wartość prędkości zadanej w układzie sterowania wektorowego. W pierwszej chwili napęd pracował z prędkością 80% wartości znamionowej. W odpowiednich chwilach czasowych była ona zmniejszana. W czasie pracy napędu dokonywano uszkodzeń czujnika prędkości kątowej (Rys. 4). Obserwowano sygnały pochodzące z wewnętrznej struktury sterowania oraz sygnały odpowiadające prądowi stojana. Detektor uczony był wyłącznie na awarię polegającą na całkowitym przerwaniu pętli pomiarowej z czujnika prędkości.

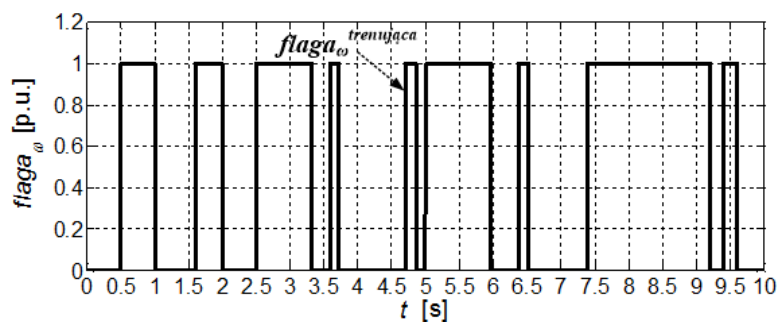
Awaria czujnika prędkości powodowała gwałtowny wzrost prędkości oraz zwiększenie się amplitudy prądów stojana. Wartość prędkości estymowanej (przy wykorzystaniu estymatora MRAS^{CC} opisanego szerzej w [6]) pokrywa się z wartością rzeczywistą, która różni się od aktualnie zadawanej.

Na podstawie procesu uczenia sieci neuronowej otrzymano detektor, którego działanie zweryfikowane zostało przy wymuszeniu innej wartości prędkości kątowej i awarii występujących w innych chwilach czasowych. Sprawdzono

możliwość wykorzystania opracowanego detektora w układzie, w którym występują inne typy uszkodzeń enkodera – czujnika prędkości (takie, dla których sieć nie była trenowana) [4]. Na Rys. 5 i Rys. 6 zaprezentowano wyniki dotyczące pracy napędu z prędkością znamionową dla silnika nieobciążonego oraz układu pracującego ze znamionowym momentem obciążenia.



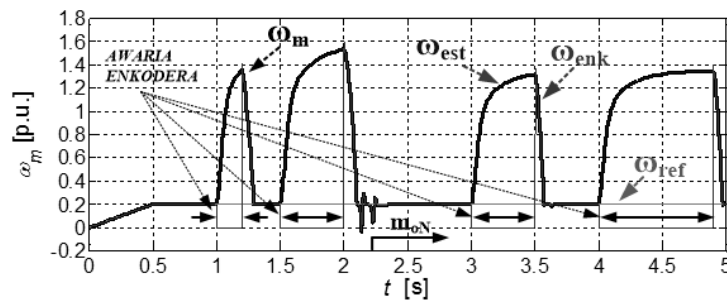
Rys. 3. Przebiegi sygnałów uczących: prędkości mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej, składowej i_{sy} prądu stojana oraz składowych α - β prądu stojana przy całkowitym uszkodzeniu enkodera przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)



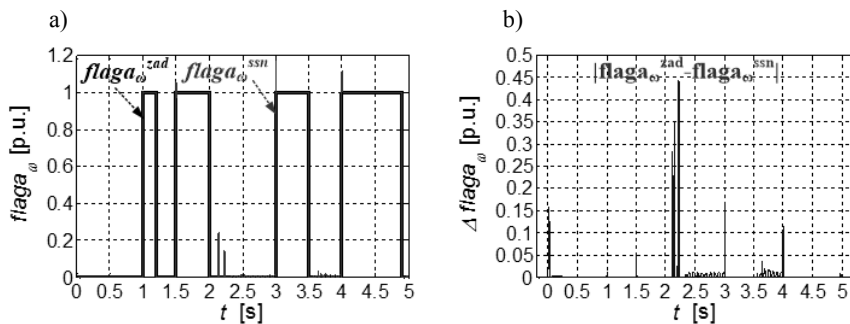
Rys. 4. Przebieg zadanego sygnału wystąpienia uszkodzeń enkodera przy sterowaniu DFOC (badania symulacyjne)

Rys. 5 a) przedstawia przebiegi prędkości kątowej, mierzonej oraz estymowanej przy występowaniu uszkodzeń czujnika. Na Rys. 5b) przedstawiono przedziały czasów, w których odbyła się symulacja awarii enkodera oraz odpowiedź sieci neuronowej, natomiast Rys. 5c) przedstawia moduł różnicy pomiędzy tymi sygnałami. Na Rys. 6 przedstawiono odpowiedź detektora przy wymuszeniu jak na Rys. 5, z pełnym momentem obciążenia. Wyraźnie widoczne jest, że detektor prawidłowo reaguje na pojawienie się uszkodzenia niezależnie od tego czy napęd pracuje z momentem czy bez momentu obciążenia. Jedyne różnice widoczne są w sygnałach pochodzących z wewnętrznej pętli sterowania. Prędkość wzrasta do większych wartości, gdy napęd jest nieobciążony.

W dalszej części przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla małych wartości prędkości kątowej ($\omega_m = 0,2\omega_{mN}$) i dla pracy ze znamionowym obciążeniem.



Rys. 7. Przebieg prędkości mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej przy całkowitym uszkodzeniu enkodera przy sterowaniu DFOC, $\omega_m = 0,2\omega_{mN}$ – praca z obciążeniem

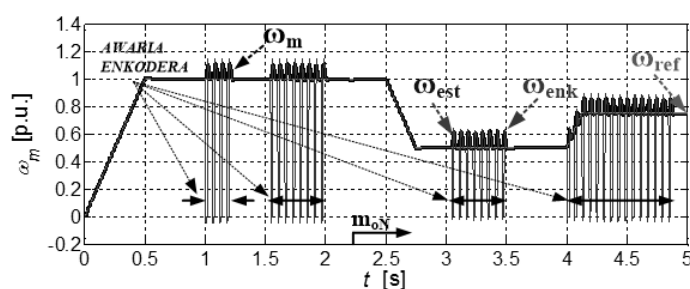


Rys. 8. Przebieg sygnału symulującego uszkodzenie enkodera i odpowiedź sieci neuronowej (a) oraz modułu różnicy pomiędzy tymi sygnałami (b) przy całkowitym uszkodzeniu enkodera przy sterowaniu DFOC, $\omega_m = 0,2\omega_{mN}$ – praca z obciążeniem

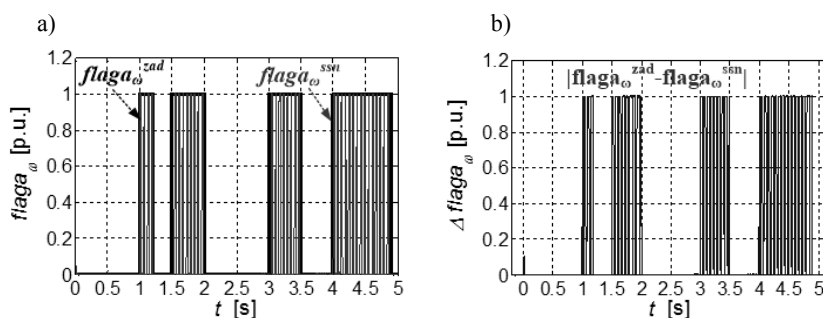
Dla pracy z małą prędkością uzyskano zadowalające rezultaty - detektor wykrył uszkodzenia podczas pracy napędu z obciążeniem. Można zatem stwierdzić, że zaprojektowany układ identyfikacji uszkodzenia czujnika

prędkości oparty na sztucznej sieci neuronowej może być wykorzystany w układach odpornych na tego typu awarie.

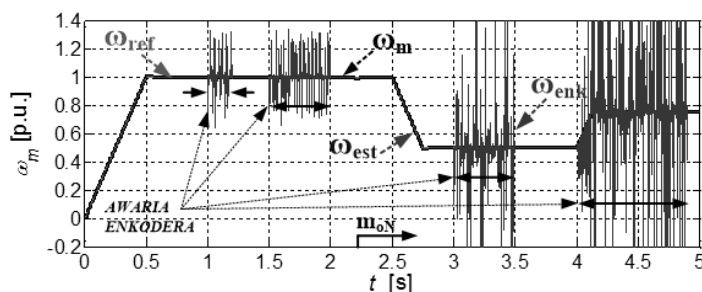
Kolejno sprawdzono działanie zaprojektowanego neuronowego detektora w przypadku innych uszkodzeń enkodera (opisanych między innymi w [4, 5] tj. zatkaniu pojedynczych otworów tarczy enkodera i przy uszkodzeniu elektroniki lub przewodów łączących enkodera). Na Rys. 9-14 przedstawiono wyniki uzyskane dla obu wspomnianych typów awarii.



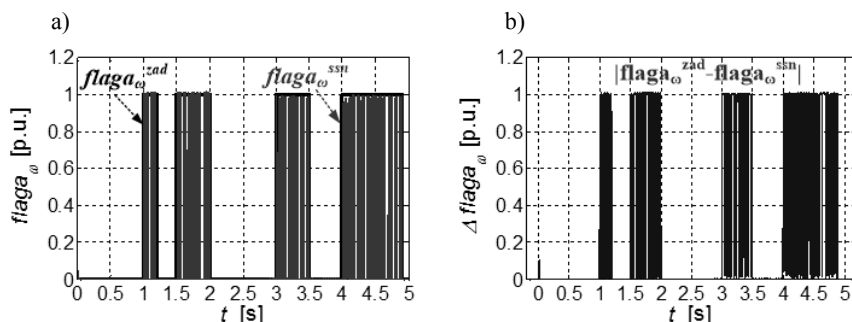
Rys. 9. Przebieg prędkości mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej przy uszkodzeniu enkodera – zatkane otwory na tarczy przy sterowaniu DFOC – praca z obciążeniem



Rys. 10. Przebieg sygnału symulującego uszkodzenie enkodera i odpowiedź sieci neuronowej (a) oraz modułu różnicy pomiędzy tymi sygnałami (b) przy uszkodzeniu enkodera – zatkane otwory na tarczy enkodera przy sterowaniu DFOC, praca z obciążeniem



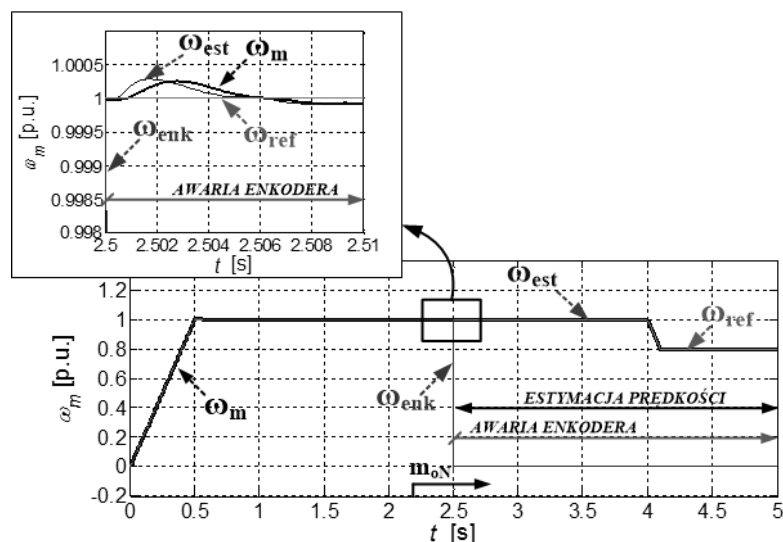
Rys. 11. Przebieg prędkości mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej przy uszkodzeniu enkodera - sygnał przerywany cyklicznie przy sterowaniu DFOC – praca z obciążeniem



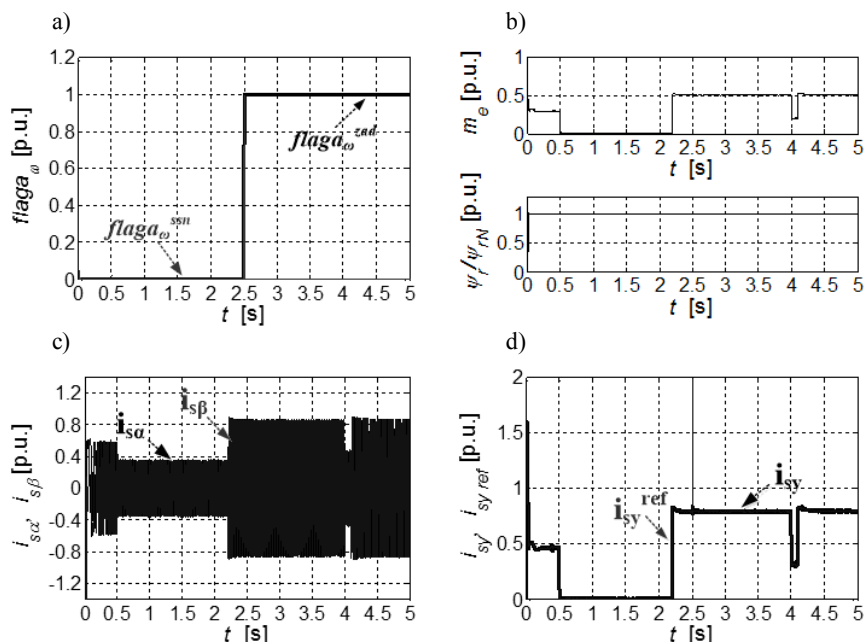
Rys. 12. Przebieg sygnału symulującego uszkodzenie enkodera i odpowiedź sieci neuronowej (a) oraz modułu różnicy pomiędzy tymi sygnałami (b) przy uszkodzeniu enkodera – sygnał przerywany cyklicznie przy sterowaniu DFOC, praca z obciążeniem

Dla obu typów uszkodzeń detektor wykrył awarie w chwili ich wystąpienia, ale otrzymany sygnał wyjściowy z sieci neuronowej jest sygnałem cyklicznym. Oznacza to, że konieczne w tym przypadku, jest użycie licznika bądź przerzutnika bistabilnego, pozwalającego na detekcję awarii w pierwszej próbie po jej wystąpieniu. Istotnym jest to, że, że detektor nie był uczony sygnałem polegającym na cyklicznym gubieniu impulsów enkodera.

W kolejnej części pracy przedstawiono możliwość wykorzystania opracowanego detektora neuronowego w układzie odpornym na uszkodzenia czujnika prędkości.



Rys. 13. Przebieg prędkości mierzonej, referencyjnej oraz estymowanej przy całkowitym uszkodzeniu enkodera i przełączeniu układu w tryb pracy bezczujnikowej przy sterowaniu DFOC, praca z obciążeniem



Rys. 14. Przebieg sygnału symulującego uszkodzenie enkodera i odpowiedź sieci neuronowej (a), momentu elektromagnetycznego i strumienia wirnika (b), składowych $i_{sa,\beta}$ (c) oraz i_{sy} prądu stojana (d) przy całkowitym uszkodzeniu enkodera i przełączeniu układu w tryb pracy bezczujnikowej przy sterowaniu DFOC - praca z obciążeniem

Po wykryciu awarii enkodera system zostaje przełączony na układ bezczujnikowy z estymatorem MRAS^{CC} [8] w pętli sprzężenia zwrotnego (w chwili $t = 2,5\text{sek}$. doszło do całkowitego przerwania pętli pomiarowej enkodera). Detekcja awarii trwa zdecydowanie krócej niż ma to miejsce w przypadku metod opartych wyłącznie na modelu matematycznym silnika [4, 5]. Skutkiem tego jest niemalże natychmiastowe przełączenie układu na strukturę bezczujnikową po wystąpieniu uszkodzenia oraz zdecydowanie mniejsze przeregulowanie prędkości kątowej silnika w tym momencie.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję neuronowego detektora uszkodzenia czujnika prędkości dla silnika indukcyjnego sterowanego metodą wektorową polowo zorientowaną DFOC. Przeanalizowano dokładność działania opracowanego systemu w różnych warunkach pracy napędu oraz dla różnych typów uszkodzeń. Wykazano, że prosty detektor skutecznie wykrywa awarie i może być z powodzeniem wykorzystany w układach o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa.

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] Orłowska-Kowalska T., Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
- [4] Klimkowski K., Dybkowski M., Wpływ uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych na pracę napędu indukcyjnego sterowanego metodą wektorową, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering No. 77, pp 185-192, 2014.
- [5] 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 No. 77, pp 193-200, 2014.
- [6] 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.
- [7] Khalaf Salloum Gaeid, Hew Wooi Ping, Fault Tolerant Control of Induction Motor, Modern Applied Science Vol. 5, No. 4; pp 83-94, August 2011.
- [8] Kowalski Cz., 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.
- [9] Osowski S., Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.

CONCEPT OF THE SPEED SENSOR FAULTS DETECTOR FOR DFOC DRIVE BASED ON THE NEURAL NETWORK

In the paper the concept of safety induction motor drive system is presented. The speed sensor fault detector, based on the neural network, is described and tested in vector controlled (DFOC) induction motor drive. The fault tolerant algorithm using this system was applied and tested during different conditions. Simulation (obtained in MATLAB/SimPowerSystem) results are presented.