

Konrad URBAŃSKI*
Dariusz MAJCHRZAK*

IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ W NAPĘDZIE Z PMSM ZA POMOCĄ SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układu napędowego z PMSM z systemem detekcji przerwy w fazie. W jego skład wchodzi m.in. dokładny model przekształtnika, który będzie umożliwiał realizację różnych scenariuszy uszkodzeń oraz układ detekcji awarii, zrealizowany przy użyciu dwóch sztucznych sieci neuronowych. Jedna z tych sieci pełni funkcję modelu napędu, druga generuje sygnał diagnostyczny. Prezentowany system diagnostyczny jest szybki – czas reakcji na uszkodzenie jest rzędu milisekundy. Ponadto przedstawiono rodzaje uszkodzeń najczęściej występujących w napędach elektrycznych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych, a także przedstawiono metody ich identyfikacji.

SŁOWA KLUCZOWE: PMSM, sztuczne sieci neuronowe, detekcja uszkodzeń, napęd elektryczny

1. WPROWADZENIE

Silniki synchroniczne o magnesach trwałych, dzięki swoim bardzo dobrym parametrom dynamicznym, zyskują coraz większą popularność w układach napędowych. Charakteryzuje je między innymi mały moment bezwładności, wysoka sprawność, duża gęstość mocy oraz duża przeciążalność momentem. Z uwagi na swoje właściwości są z powodzeniem stosowane w napędach robotów, obrabiarek, przewijarek oraz innych układach wymagających precyzyjnego sterowania prędkością i położeniem.

Zauważyć można znaczny wzrost wymagań w odniesieniu do niezawodności układów napędowych, które często pracują w systemach odpowiedzialnych za zdrowie i życie ludzkie. Ponadto od tych napędów często wymaga się precyzyjnego sterowania momentem, prędkością obrotową i położeniem wału, co implikuje zastosowanie przekształtników energoelektronicznych. W tak złożonych układach tradycyjne metody sterowania nie zapewniają dostatecznego poziomu bezpieczeństwa i konieczne jest stosowanie sterowania odpornego na uszkodzenia (*ang. Fault Tolerant Control - FTC*). Algorytmy FTC w celu podjęcia decyzji o strategii sterowania, jaką należy zastosować, wymagają znajomości rodza-

* Politechnika Poznańska.

ju oraz miejsca wystąpienia uszkodzenia [1]. W tym miejscu mają zastosowanie układy detekcji i identyfikacji uszkodzeń, które na podstawie danych pomiarowych, w krótkim czasie określają czy i jaki defekt systemu ma miejsce.

1.1. Uszkodzenia napędu elektrycznego

Awarie napędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych można podzielić na trzy główne grupy: mechaniczne, elektryczne i magnetyczne [2]. Do pierwszej zaliczyć można przede wszystkim uszkodzenia łożysk i ekscentryczność wirnika. Mogą one być następstwem niewyważenia, nieosiowości lub zbytniego zużycia elementów.

Uszkodzenia magnetyczne w silnikach PMSM (*ang. Permanent Magnet Synchronous Motor*) sprowadzają się do demagnetyzacji magnesów trwałych. Rozmagnesowanie wirnika może być m.in. reakcją na wysoką temperaturę lub rozruchy z bardzo dużym momentem i gwałtowne stany przejściowe.

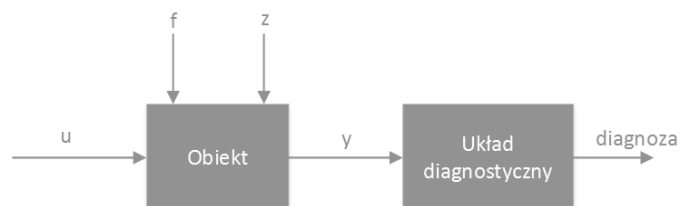
Ostatnią grupą uszkodzeń są uszkodzenia elektryczne, które w PMSM dotyczą jedynie stojana. Zalicza się do nich uszkodzenia uzwojeń takie jak zwarcia i przerwy spowodowane złym stanem izolacji oraz uszkodzenia zewnętrzne (poza silnikiem). Uszkodzeniami zewnętrznymi mogą być zwarcia i przerwy przewodów zasilających silnik lub tranzystorów w przekształtniku, uszkodzenia czujników prądu lub awarie układu sterowania (np. procesora sygnałowego). Pomijając awarie łożysk, uszkodzenia kluczy falownika stanowią ponad połowę wszystkich uszkodzeń napędów.

1.2 Przegląd metod diagnostyki napędu

Istnieje wiele metod detekcji i identyfikacji uszkodzeń napędu elektrycznego. Najczęściej dzieli się je na metody oparte o analizę sygnałów, wykorzystujące model dynamiczny napędu oraz metody sztucznej inteligencji.

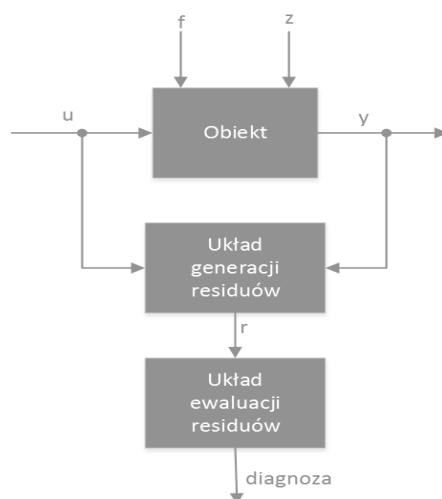
Pierwsza grupa bazuje na analizie mierzalnych sygnałów takich jak prądy fazowe, napięcie na szynie prądu stałego, wibracje silnika itp. Samo przetwarzanie sygnałów może być realizowane na wiele sposobów. Najczęściej wykorzystywana jest analiza widmowa, która pozwala na określenie zawartości poszczególnych harmonicznym sygnałów [3]. Zaletą tego podejścia jest prostota analizy i implementacji w oparciu o szybką transformację Fouriera. Jednakże metoda ta nie pozwala na diagnostykę podczas procesów przejściowych [4]. Innym, coraz częściej spotykanym podejściem jest zastosowanie analizy falkowej, która łączy zalety analizy w dziedzinie częstotliwości przy zachowaniu informacji o czasie, co pozwala analizować sygnały niestacjonarne [4]. Możliwe jest także zastosowanie innych metod, takich jak na przykład analiza korelacyjna [5], jednakże są one rzadziej spotykane w diagnostyce. Wspólną zaletą metod opartych o analizę sygnałów jest brak konieczności znajomości modelu diagnozowanego obiektu.

Poważną wadą tych metod jest brak uwzględnienia sygnałów sterujących napędem i analiza jedynie sygnałów wyjściowych, co utrudnia diagnostykę podczas stanów przejściowych [6]. Ogólny schemat blokowy metody przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Ogólny schemat metody diagnostyki układu w oparciu o analizę sygnałów wyjściowych (na rysunku: u-sygnał wejściowy, y- sygnał wyjściowy, z- sygnał zakłócenia, f - uszkodzenie)

Grupa metod opartych na modelu dynamicznym napędu wykorzystuje informacje o strukturze i parametrach modelu. Należą do nich metody estymacji stanu takie jak obserwatory stanu czy rozszerzony filtr Kalmana [7]. Ponadto skutecznym podejściem jest zastosowanie metod estymacji parametrów modelu, na przykład rekursywna metoda najmniejszych kwadratów [8]. Zadaniem powyższych metod jest generacja residuów, która polega na estymacji sygnałów wyjściowych (lub parametrów obiektu) i obliczeniu wektora błędów estymacji [9]. Poważną wadą wszystkich powyższych metod jest konieczność znajomości modelu parametrycznego napędu. Na rys. 2 przedstawiono ogólny schemat blokowy metody.



Rys. 2. Ogólny schemat metody diagnostyki układu w oparciu o model dynamiczny

Ostatnią grupą są metody wykorzystujące inteligencję obliczeniową. Są to przede wszystkim systemy eksperckie, układy wykorzystujące wnioskowanie rozmyte oraz sztuczne sieci neuronowe. Systemy eksperckie tworzone są na podstawie wiedzy i doświadczenia inżyniera, który potrafi zdiagnozować usterkę układu napędowego na podstawie jego zachowania. Częstym problemem jest przedstawienie zebranego doświadczenia w postaci bazy wiedzy, na podstawie której system realizuje swoje działanie. Logika rozmyta znajduje zastosowanie w diagnostyce głównie jako metoda modelowania układów dynamicznych. Zaprojektowane modele rozmyte wykorzystywane są później w procesie generacji residuów.

2. MODEL UKŁADU NAPĘDOWEGO

2.1. Algorytm sterowania

Koncepcja sterowania wektorowego FOC (ang. *Field Oriented Control*) jest oparta na rozkładzie składowych prądu stojana na składową wywołującą moment obrotowy oraz tę, która odpowiedzialna jest za wzbudzenie. Sterowanie takim układem jest analogiczne do napędu silnika obcowzbudnego, gdzie moment obrotowy wywoływany jest przez przepływ prądu twornika, natomiast strumień, poprzez prąd uzwojeń wzbudzenia. W przypadku silnika z magnesami trwałymi, moment elektromagnetyczny wyraża się równaniem (1):

$$T_e = \frac{3}{2} p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

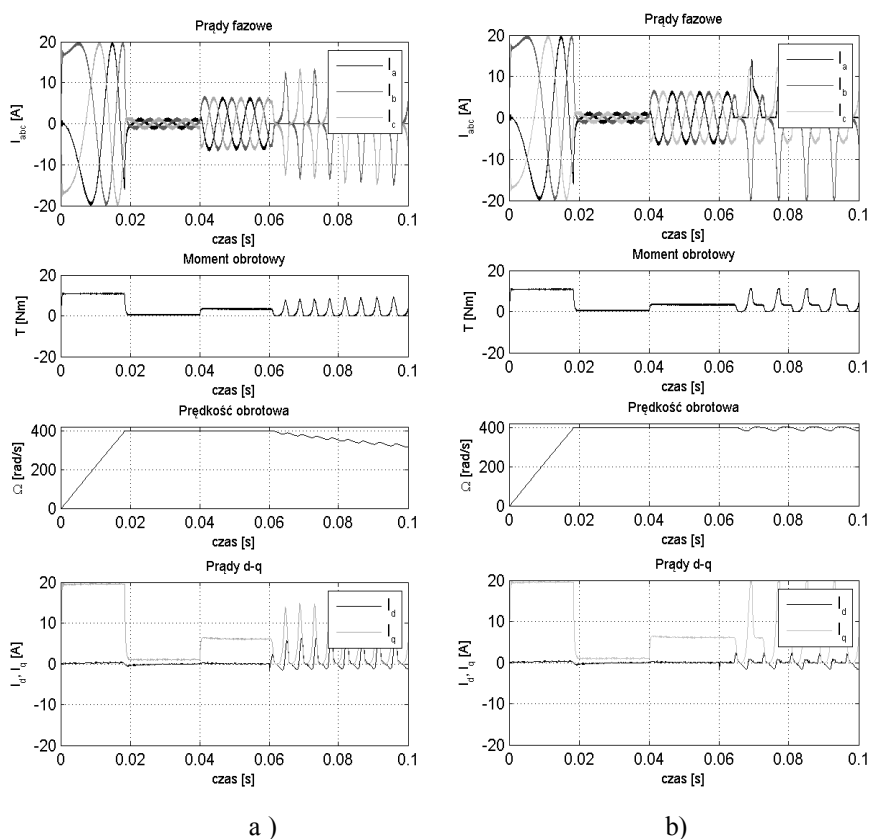
gdzie: L_q, L_d – indukcyjności w osiach d-q, i_q, i_d – prądy w osiach d-q, λ – strumień magnesów trwałych, p – liczba par biegunów, T_e – moment elektromagnetyczny. Pierwszy składnik sumy jest momentem synchronicznym, drugi natomiast reluktancyjnym. Ma on zazwyczaj znacznie mniejszy wpływ od pierwszego, dlatego dla $L_d \approx L_q$ można założyć, że moment elektromagnetyczny jest proporcjonalny do prądu i_q . W przypadku zadawania zerowej wartości prądu i_d , wektor prądu stojana ma być prostopadły do strumienia magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych. Schemat blokowy algorytmu sterowania wektorowego przedstawiono na rys. 3.

2.2. Model silnika

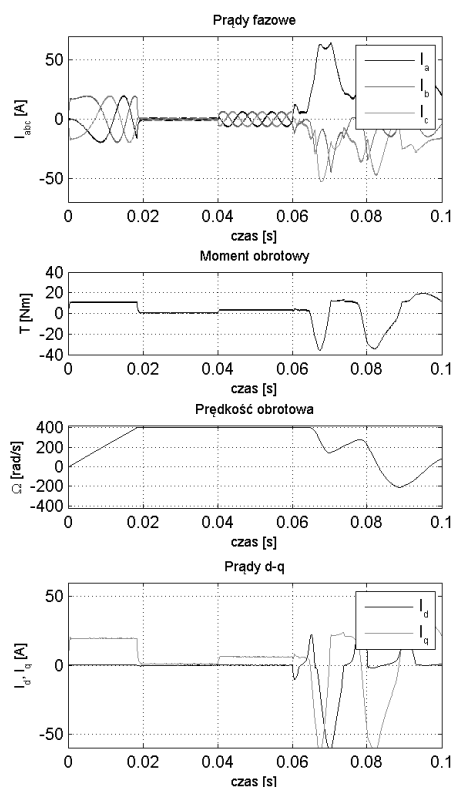
Model symulacyjny napędu wykonano w środowisku Matlab/Simulink. W symulacji wykorzystano model silnika synchronicznego o magnesach trwałych znajdujący się w bibliotece *SimPowerSystems*. Składa się on z części elektrycznej, mechanicznej oraz bloku odpowiedzialnego za model obwodowy.

2.3. Model przekształtnika

W celu stworzenia modelu przekształtnika z możliwością symulacji uszkodzeń kluczy, zmodyfikowano model trójfazowego mostka uniwersalnego, dostępnego w bibliotece *SimPowerSystems*, który został skonfigurowany jako mostek z tranzystorami bipolarnymi z izolowaną bramką. Uszkodzenia tranzystorów zostały zamodelowane poprzez odpowiednie bramkowanie sygnałów sterujących. W celu symulacji przerwy wybranego tranzystora należy zablokować impulsy sterujące i zastąpić je stałym sygnałem zerowym. Zwarcie tranzystora otrzymuje się poprzez ciągłe jego wysterowanie, czyli podawanie stałego, wysokiego sygnału logicznego na jego bramkę. Na rys. 4a) przedstawiono przebiegi prądów fazowych, momentu, prędkości oraz prądów w osiach d-q dla przerwy fazy A. rys 4b) przedstawia te same zmienne dla przerwy tranzystora T2 (w dolnej gałęzi fazy A przekształtnika). Na rys. 5 przedstawiono przebiegi dla zwarcia tranzystora T1 (w górnej gałęzi fazy A).



Rys. 4. Przebiegi prądów fazowych, momentu, prędkości i prądów w osiach d-q dla a) przerwy fazy, b) przerwy tranzystora T2



Rys. 5. Przebiegi prądów fazowych, momentu, prędkości i prądów w osiach d-q dla zwarcia tranzystora T1

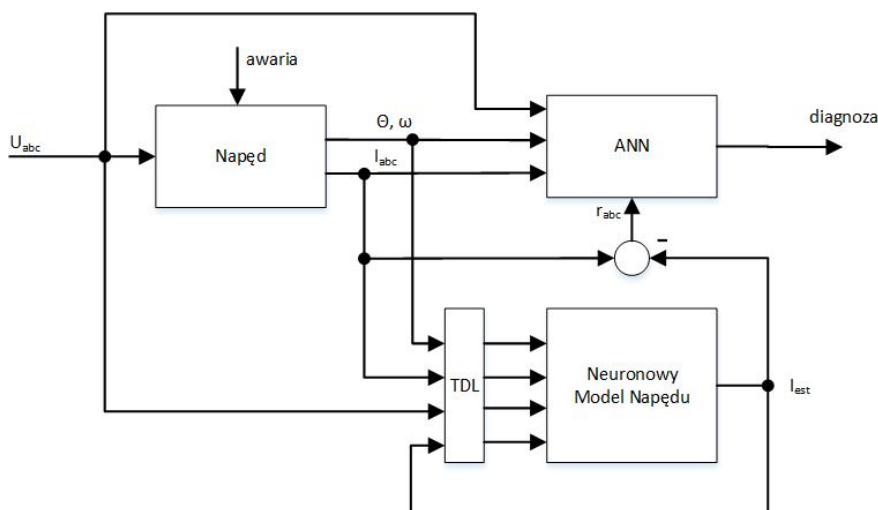
Na powyższych przebiegach w czasie od 0 do 20 ms trwa rozruch napędu, później praca na biegu jałowym do chwili 40 ms. Następnie ma miejsce skok momentu obciążenia do wartości znamionowej oraz w chwili 60 ms występuje uszkodzenie napędu. Zarówno przerwa fazy jak i przerwa tranzystora powoduje silne tętnienia momentu obrotowego, które mogą być przyczyną dalszych uszkodzeń mechanicznych układu napędowego. Zwarcia natomiast przyczyniają się do powstania dużych prądów, mogących zniszczyć układ [10].

3. PRZYKŁAD UKŁADU IDENTYFIKACJI USZKODZENIA

W artykule zastosowano metodę identyfikacji, która jest połączeniem metod inteligencji obliczeniowej oraz metod opartych o model dynamiczny obiektu. Głównymi elementami układu detekcji są bloki modelu napędu oraz moduł diagnostyczny, oba zrealizowane w postaci sztucznych sieci neuronowych. Zada-

niem systemu jest detekcja przerwy fazy silnika PMSM. Układ identyfikacji podzielić można na dwie zasadnicze części: model napędu i układ ewaluacji residuów. Sygnałami wejściowymi pierwszej z nich są prądy fazowe, napięcia fazowe zadane, prędkość obrotową oraz położenie wału silnika, a wyjściem są residua prądów fazowych. Sygnałami wejściowymi drugiej części są te same sygnały oraz wygenerowane uprzednio residua. Sieć zwraca binarny sygnał wystąpienia uszkodzenia. Schemat blokowy tak zbudowanego detektora uszkodzeń przedstawiono na rys. 6.

Blok TDL (*ang. Tapped Delay Line*) opóźnia sygnały napięć, prędkości i położenia wału o kolejno 0, 1 i 2 próbki oraz prądy fazowe o 1 i 2 próbki, zapisuje je do wektorów, a następnie przekazuje na wejścia sieci neuronowej.



Rys. 6. Schemat blokowy neuronowego układu detekcji przerwy fazy silnika

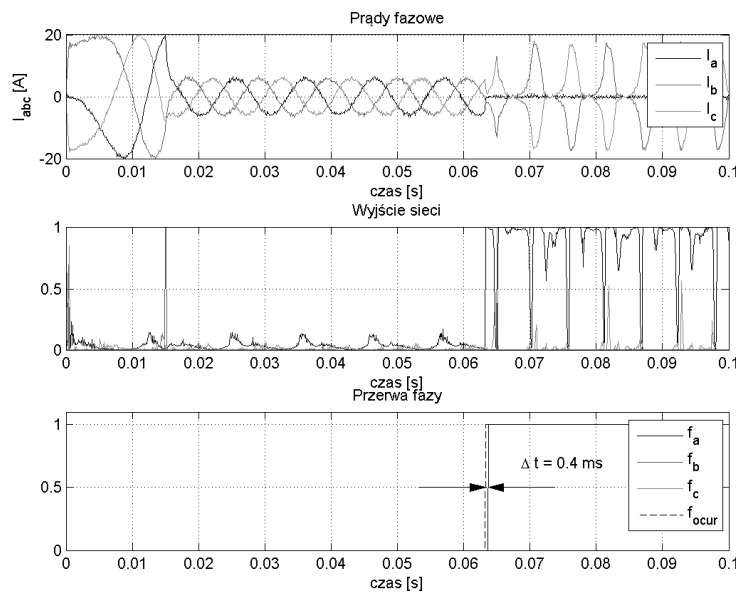
Sieć będąca neuronowym modelem napędu była uczona *off-line* z „nauczycielem” co oznacza, iż konieczne było wcześniejsze zebranie danych uczących. W tym celu dokonano symulacji kilku rozruchów sprawnego napędu do różnych prędkości obrotowych z zakresu $-400 \div 400$ rad/s wraz ze skokami momentu obciążenia za każdym razem rejestrując przebieg sygnałów wraz z opóźnieniami generowanymi w bloku TDL. Symulacje zostały przeprowadzone w środowisku Matlab/Simulink, wykorzystując elementy z biblioteki SimPowerSystems. Następnie przeprowadzono uczenie sieci przy pomocy narzędzi dostarczonych wraz z biblioteką Neural Network Toolbox. W ten sposób uzyskano neuronowy model użytego w symulacji napędu elektrycznego.

Podobnie uczona była sieć identyfikująca uszkodzenie, opisana na rys.6 jako ANN (*ang. Artificial Neural Network*). W celu zebrania danych uczących zare-

jestrowano 18 przebiegów w różnych stanach pracy (różne wartości prędkości i momentu obciążenia), podczas których generowano uszkodzenia w postaci przerwy jednej z faz. Jako wzorcowy sygnał wyjściowy wykorzystano sygnał „wyzwalania” uszkodzenia.

W celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia fałszywych alarmów w przypadku występowania krótkich „szpilek” w sygnale wyjściowym sieci, zastosowano operację prostej średniej kroczącej z ostatnich 10 próbek sygnału oraz operację progowania, w następstwie czego otrzymano binarny sygnał informujący o wystąpieniu uszkodzenia.

Kompletny układ diagnostyczny zaimplementowano w środowisku Matlab/Simulink i poddano badaniom. Testowano jego odporność na stany nieustalone podczas normalnej pracy oraz poprawność wykrywanego uszkodzenia wraz z czasem reakcji. Na rys. 7 przedstawiono przykładowe przebiegi uzyskane podczas symulacji układu.



Rys. 7. Przykładowy wynik symulacji działania układu diagnostycznego

Przebieg na rys. 7a) przedstawia prądy w poszczególnych fazach silnika. Zauważyć można kolejno rozruch silnika, pracę w stanie ustalonym przy momencie znamionowym oraz wystąpienie przerwy fazy A w chwili $t = 0,063 \text{ s}$. Rysunek 7b) prezentuje sygnały wyjściowe sieci neuronowej, odpowiedzialnej za identyfikację. Na rys. 7c) przerywaną linią zaznaczono sygnał „wyzwalenia” uszkodzenia, natomiast liniami ciągłymi sygnały odpowiadające wykrytemu uszkodzeniu w poszczególnych fazach. Zauważyć można, iż stany przejściowe,

występujące podczas normalnej pracy napędu nie powodują wystąpienia błędów w detekcji uszkodzenia. Istotną zaletą prezentowanej metody jest krótki czas reakcji - układ zinterpretował poprawnie przerwę fazy A już po czasie 0,4 ms od chwili wystąpienia awarii.

4. PODSUMOWANIE

Identyfikacja uszkodzenia w czasie pracy napędu jest aktualnym zagadnieniem badawczym. W niniejszym artykule dokonano przeglądu najczęstszych awarii napędu z PMSM oraz przedstawiono typowe metody ich identyfikacji. Zaprezentowany przykład detekcji przerwy fazy silnika charakteryzuje się odpornością na stany przejściowe oraz krótkim czasem reakcji na uszkodzenie. Czasy uzyskane podczas badań symulacyjnych umożliwiają reakcję napędu na awarię jeszcze przed wystąpieniem wyraźnych tętnień momentu obrotowego na wale, które są charakterystyczne dla przerwy fazy zasilania silnika, a mogą powodować dalsze uszkodzenia mechaniczne układu napędowego. Analiza innych rodzajów uszkodzeń jest przedmiotem aktualnych badań autorów.

LITERATURA

- [1] D. Łuczak, K Siembab. Comparison of fault tolerant control algorithm using space vector modulation of PMSM drive. Proceedings of the 16th Mechatronika, p 24-31, 2014.
- [2] B.M. Ebrahimi, J. Faiz, and M.J. Roshtkhari. Static-, Dynamic-, and Mixed- Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, p. 4727-4739, 2009.
- [3] A. Khlaief, M. Boussak and M. Gossa. Open phase faults detection in PMSM drives based on current signature analysis. IEEE XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), p. 1-6, 2010.
- [4] J.-R. Riba Ruiz, J.A. Rosero, A.G. Espinosa and L. Romeral. Detection of Demagnetization Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors Under Nonstationary Conditions. IEEE Transactions on Magnetics, p. 2961-2969, 2009.
- [5] S. Choi, B. Akin, M.M. Rahimian, H.A. Toliyat. Implementation of a Fault-Diagnosis Algorithm for Induction Machines Based on Advanced Digital-Signal-Processing Techniques. IEEE Transactions on Industrial Electronics, p. 937-948, 2011.
- [6] Xiang-Qun Liu, Hong-Yue Zhang, Jun Liu, and Jing Yang. Fault detection and diagnosis of permanent-magnet DC motor based on parameter estimation and neural network. IEEE Transactions on Industrial Electronics, p. 1021-1030, 2000.
- [7] Byoung-Gun Park, Jin-Su Jang, Tae-Sung Kim and Dong-Seok Hyun. EKF based fault diagnosis for open-phase faults of PMSM drives. IEEE In Power Electronics and Motion Control Conference, p. 418-422, 2009.

- [8] Byoung-Gun Park, Rae-Young Kim and Dong-Seok Hyun. Fault diagnosis using recursive least square algorithm for permanent magnet synchronous motor drives. In Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), p. 2506-2510, 2011.
- [9] J. Korbicz, J.M. Kościelny, Z. Kowalczyk and W. Cholewa. Diagnostyka procesów: modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.
- [10] K. Siembab. Model silnika PMSM do badań symulacyjnych sterowania tolerującego uszkodzenia. Poznan University of Technology Academic Journals, Poznań, 2013.

FAULTS DETECTION IN THE PMSM DRIVE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

This paper presents simulation research results of PMSM drive with open phase fault detection system. It includes exact model of power converter, which realizes various damage scenarios and fault detection system, implemented using two artificial neural networks. One of them is neural model of drive, and another one generates diagnostic signals. Presented diagnostic system is fast – the detection time is about 1 ms. Moreover, the most common faults in permanent magnet synchronous motor drives and the methods for their identification are presented.

(Received: 29. 01. 2016, revised: 9. 03. 2016)