

*silnik indukcyjny, falownik napięcia,
uszkodzenie łącznika, diagnostyka uszkodzeń*

Piotr SOBAŃSKI*
Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA*

ANALIZA WPLYWU USZKODZENIA TRANZYSTORA IGBT FALOWNIKA NAPIĘCIA NA PRZEBIEGI ZMIENNYCH STANU W NAPĘDZIE INDUKCYJNYM

W pracy dokonano analizy zmiennych stanu napędu indukcyjnego pracującego w układzie bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego podczas uszkodzenia polegającego na braku przewodzenia łącznika IGBT falownika napięcia. Zaprezentowane wyniki badań zostały uzyskane na drodze symulacyjnej, przy wykorzystaniu pakietu MATLAB/Simulink. Artykuł stanowi wstęp do zagadnień projektowania napędów elektrycznych odpornych na uszkodzenia przekształtników energoelektronicznych.

1. WSTĘP

Rosnące wymagania w stosunku do właściwości napędów elektrycznych doprowadziły do znacznego skomplikowania ich struktur, jednocześnie zwiększając ryzyko awarii. Aż 82,5% uszkodzeń występujących w nowoczesnych układach napędowych spowodowanych jest nieprawidłowościami pracy łączników tranzystorowych IGBT, które polegają na zwarciach bądź braku przewodzenia prądu (*short/open-switch fault*) [7, 5]. Najczęstszą przyczyną tego rodzaju awarii jest nadmierna eksploatacja napędu, która naraża przekształtnik na przeciążenia.

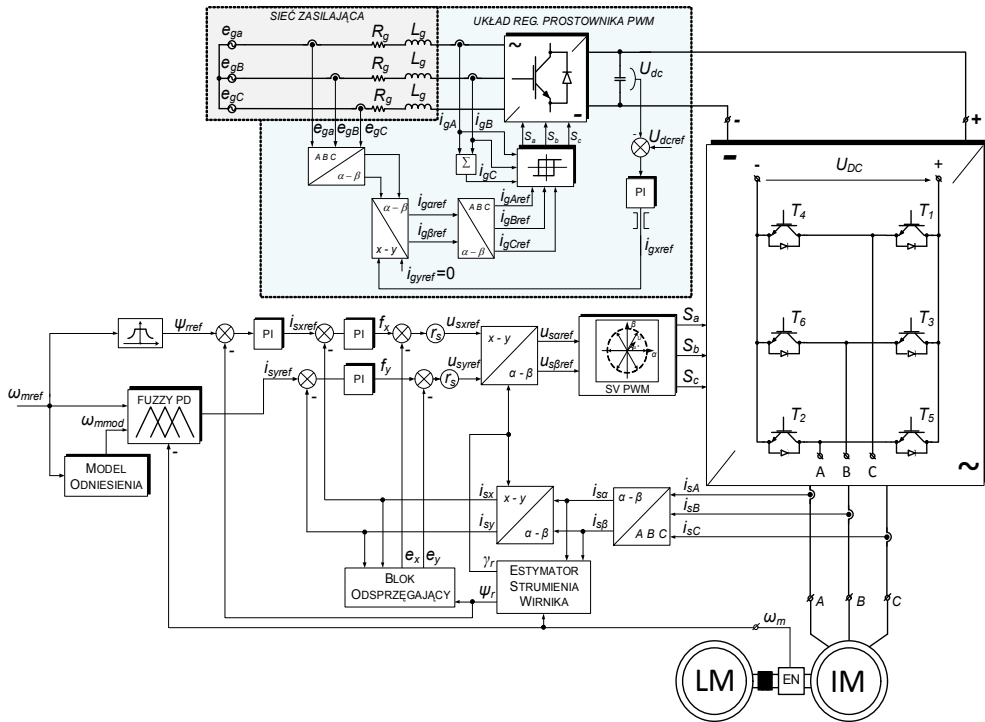
Przedstawione w literaturze przykłady metod modelowania awarii łącznika tranzystorowego IGBT falownika napięcia opierają się na wykorzystaniu podstawowego pakietu narzędziowego MATLAB/Simulink, co związane jest przyjęciem pewnych uproszczeń [1, 6], np. stałej wartości napięcia członu pośredniczącego przekształtnika.

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wrocławska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, 164129@student.pwr.wroc.pl, teresa.orlowska-kowalska@pwr.wroc.pl

W artykule przedstawiono analizę wyników badań symulacyjnych stanu uszkodzenia typu *open-switch fault* falownika napięcia w układzie zrealizowanym przy wykorzystaniu dodatkowej biblioteki pakietu MATLAB – *SimPower System*.

2. STRUKTURA STEROWANIA

Badania symulacyjne napędu indukcyjnego zostały wykonane w układzie bezpośredniego polowo-zorientowanego sterowania wektorowego, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1. Model falownika został zbudowany przy wykorzystaniu elementów *IGBT/Diode* dostępnych w bibliotece *SimPower System*. Symulacji uszkodzeń dokonano poprzez podanie sygnału logicznego o wartości 0 na bramkę odpowiedniego tranzystora.



Rys. 1. Struktura układu bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego dla napędu indukcyjnego

Fig. 1. Direct Field Oriented Control of the induction motor drive system

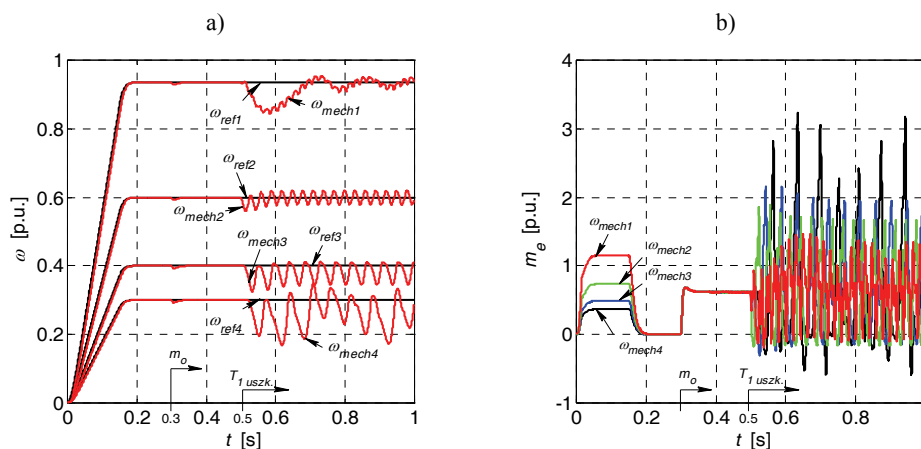
W pętli regulacji prędkości zastosowano adaptacyjny regulator rozmyty. Zmiana konkluzji reguł regulatora dokonywana jest na podstawie porównania sygnału prę-

kości mierzonej z wartością prędkości na wyjściu modelu odniesienia [4]. W pozostałych przypadkach użyto klasycznych regulatorów PI. Falownik napięcia sterowany techniką SV PWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*) [8] zasilany jest napięciem stałym z prostownika PWM ze stabilizacją napięcia w obwodzie pośredniczącym [3].

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH

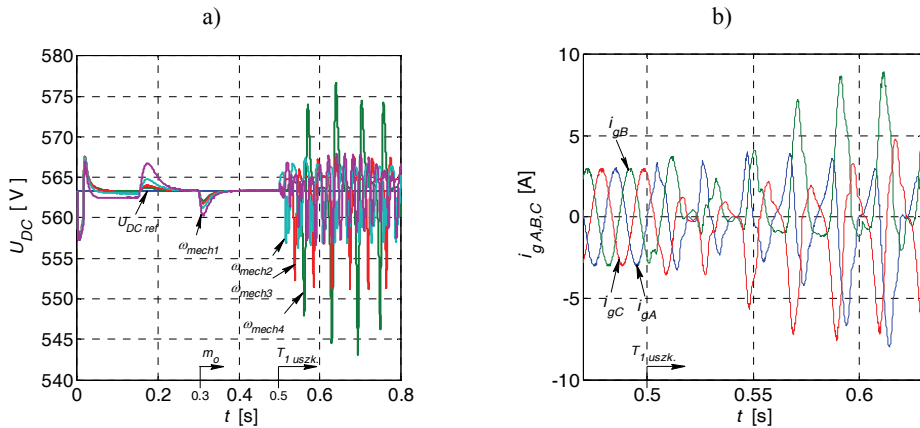
Badania symulacyjne wykonano przyjmując stały okres próbkowania $T_p = 1e-006$ s oraz metodę całkowania *Ode1*. Symulacji uszkodzeń łączników dokonywano przy różnych prędkościach obrotowych $\omega_{mech1} = \omega_N$, $\omega_{mech2} = 0,6$ p.u., $\omega_{mech3} = 0,4$, $\omega_{mech4} = 0,3$ p.u. silnika, w trakcie jego pracy ustalonej przy znamionowym momencie obciążenia $m_o = m_N$. Na rysunku 2 przedstawiono wybrane przebiegi zmierzonej prędkości silnika $\omega_{mech1}, \dots, \omega_{mech4}$ oraz odpowiednio momentu elektromagnetycznego przy różnych wartościach prędkości referencyjnej $\omega_{ref1}, \dots, \omega_{ref4}$.

Następnie na rysunku 3 przedstawiono przebiegi zadanego i zmierzonego napięcia na wyjściu prostownika PWM, odpowiadające powyższym stanom pracy napędu, oraz prądy sieci zasilającej dla wybranej wartości prędkości zadanej. W chwili $t = 0,2$ s obciążono napęd znamionowym momentem $m_o = m_N$, natomiast w chwili $t = 0,5$ s dokonano symulacji uszkodzenia tranzystora T_1 .



Rys. 2. Przebiegi prędkości zadanych ω_{ref} i zmierzonych ω_{mech} (a) oraz momentu elektromagnetycznego m_e silnika (b) przy uszkodzeniu łącznika tranzystorowego T_1 falownika napięcia

Fig. 2. Transients of the reference ω_{ref} and measured ω_{mech} rotor speed (a) and electromagnetic torque m_e of the motor (b) under T_1 switch fault of the voltage inverter



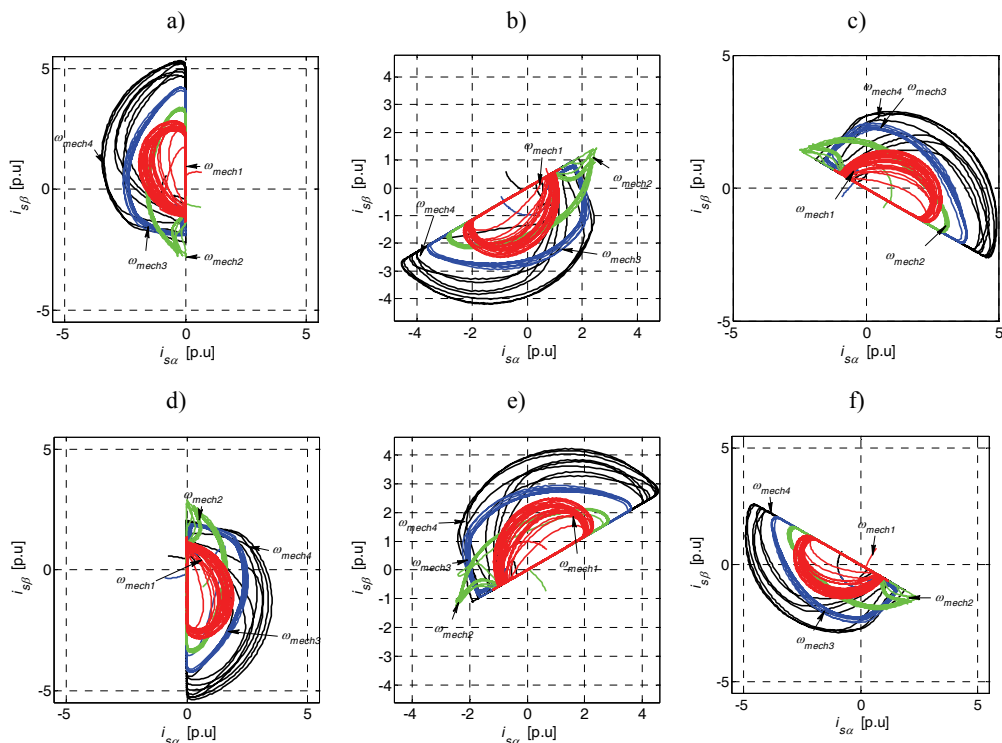
Rys. 3. Przebiegi zadanego $U_{DC\ ref}$ oraz zmierzonego napięcia wyjściowego prostownika PWM w trakcie pracy z różną prędkością silnika ω_{mech} (a) oraz prądów sieci zasilającej $i_{gA,B,C}$ przy pracy silnika z prędkością znamionową ω_{mech1} (b) w trakcie uszkodzenia tranzystora T_1 falownika napięcia
 Fig. 3. Transients of the reference $U_{DC\ ref}$ and measured output voltage of PWM rectifier during working at different rotor speed ω_{mech} (a) and grid currents $i_{gA,B,C}$ for T_1 switch fault of the voltage inverter

Awaria każdego z łączników powoduje oscylacje prędkości, których wartość amplitudy oraz częstotliwości zależy od wartości prędkości zadanej, tzn. im ω_{ref} większa tym częstotliwość oscylacji jest większa, natomiast amplituda mniejsza.

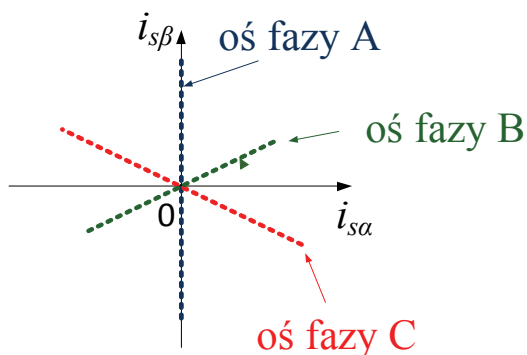
Podobne spostrzeżenia dotyczą przebiegów momentu elektromagnetycznego m_e oraz napięcia wyjściowego U_{DC} prostownika. Należy dodać, że w przypadku $|\omega_{ref}| < 0,5$ p.u. niemożliwe jest utrzymanie średniej wartości mierzonej prędkości silnika na zadanym poziomie, natomiast przy prędkości $|\omega_{ref}| < 0,27$ p.u. silnik utyka. Na rysunku 3b przedstawiono wybrany przykład przebiegu pobieranych prądów sieciowych $i_{gA,B,C}$ w trakcie uszkodzenia łącznika T_1 falownika, w których wyraźnie widoczna jest składowa stała o polaryzacji zależnej od typu uszkodzenia.

Na kolejnych rysunkach 4 i 5 przedstawiono hodografy wektora prądu stojana i strumienia wirnika podczas uszkodzenia kolejnych łączników falownika napięcia, przy różnych wartościach prędkości zadanej napędu.

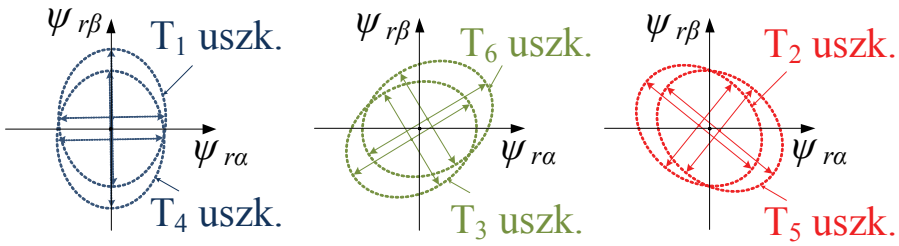
W przypadku uszkodzenia poszczególnych łączników falownika kształt hodografów wektora prądu stojana w układzie α - β ma charakter półkolistego łuku, którego położenie na płaszczyźnie zespolonej zależy od lokalizacji uszkodzenia (rys. 4). Należy zauważyć, że hodografy prądów w przypadku awarii łączników należących do obwodu jednej fazy falownika stanowią obrazy symetryczne względem środka, którego położenie zmienia się wzdłuż charakterystycznej dla danej fazy osi, w zależności od prędkości silnika. Sytuację tę zilustrowano poglądowo na kolejnych rysunkach 5 i 6, odpowiednio dla hodografów wektora prądu stojana i wektora strumienia wirnika.



Rys. 4. Zbiór hodografów wektora prądu stojana w trakcie uszkodzenia łącznika tranzystorowego T_1 (a), T_3 (b), T_5 (c), T_4 (d), T_6 (e) oraz T_2 (f) przy pracy z różną prędkością obrotową silnika ($\omega_{mech1}, \dots, \omega_{mech4}$)
 Fig. 4. Hodographs of the stator current vector for switch-fault T_1 (a), T_3 (b), T_5 (c), T_4 (d), T_6 (e) and T_2 (f) during drive operation at different rotor speeds ($\omega_{mech1}, \dots, \omega_{mech4}$)

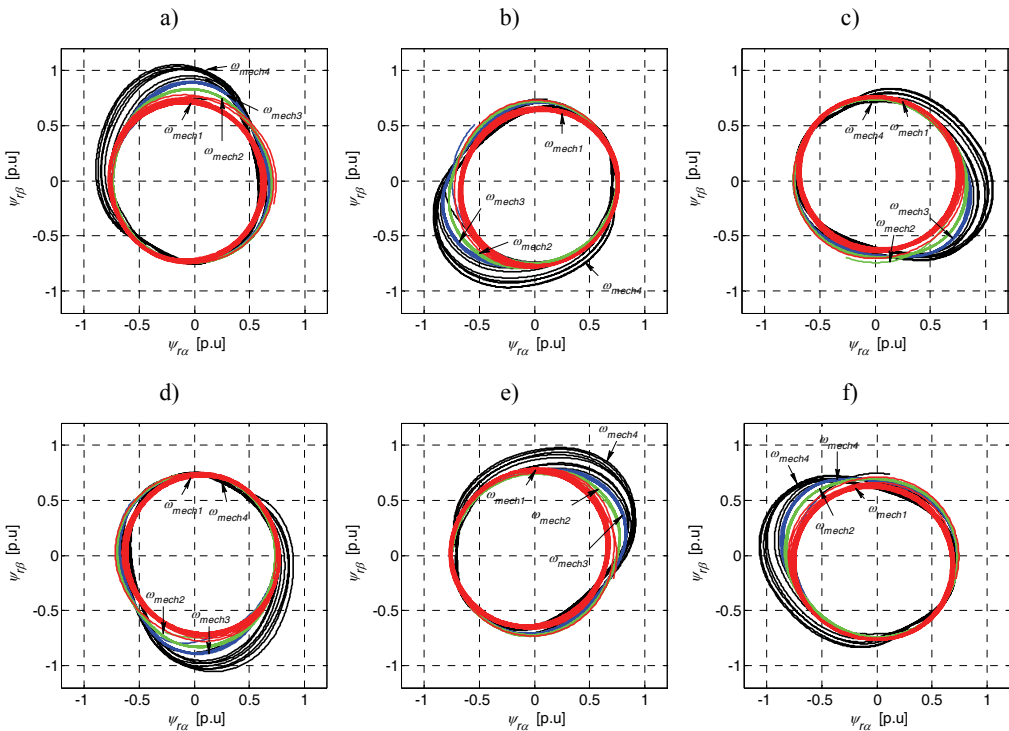


Rys. 5. Położenie charakterystycznych osi podczas uszkodzenia obwodu danej fazy falownika napięcia
 Fig. 5. Location of the characteristic axes under fault of the circuit of the voltage inverter phase



Rys. 6. Modelowe hodografy wektora strumienia wirnika ψ_r w trakcie uszkodzenia łączników tranzystorowych falownika napięcia

Fig. 6. Exemplary hodographs of the rotor flux vector ψ_r under switch-faults of the voltage inverter



Rys. 7. Zbiór hodografów wektora strumienia wirnika ψ_r w trakcie uszkodzenia łącznika tranzystorowego T_1 (a), T_3 (b), T_5 (c), T_4 (d), T_6 (e) oraz T_2 (f) falownika napięcia, przy pracy z różną prędkością obrotową silnika ($\omega_{mech1}, \dots, \omega_{mech4}$)

Fig. 7. Hodographs of the rotor flux vector ψ_r for switch-fault T_1 (a), T_3 (b), T_5 (c), T_4 (d), T_6 (e) and T_2 (f) during drive operation at different rotor speeds ($\omega_{mech1}, \dots, \omega_{mech4}$)

Analizując przebiegi hodografów wektora strumienia wirnika ψ_r w układzie α - β można zauważyć, że im niższa wartość prędkości silnika, tym ich zniekształcenie na

skutek awarii jednego z tranzystorów falownika jest większe i przyjmuje kształt zbliżony do elipsy, której położenie środka oraz osi jest charakterystyczne dla danego typu uszkodzenia (rys. 7).

Fakt ten może być wykorzystany w procesie diagnostyki wyżej opisanego typu awarii opartej, np. na analizie składowych głównych *PCA* (Principal Component Analysis) [2].

3. PODSUMOWANIE

Uszkodzenie łącznika tranzystorowego falownika napięcia pracującego w napędzie indukcyjnym w strukturze DFOC prowadzi do oscylacji momentu elektromagnetycznego silnika, charakteryzujących się dużą częstotliwością oraz amplitudą kilkukrotnie przekraczającą wartość znamionową, co ma niekorzystny wpływ na żywotność napędu oraz jakość regulacji prędkości.

Analiza obrazów hodografów wektora prądu stojana na płaszczyźnie α - β może być wykorzystana w procesie diagnostyki przekształtników energoelektronicznych pracujących w napędach indukcyjnych o strukturze regulacji prędkości DFOC. Pozwala ona na bezbłędną detekcję uszkodzenia typu *open-switch fault* falownika napięcia i chociaż daje jednoznaczną informację na temat lokalizacji awarii, to jednak sposób implementacji metody diagnostyki opartej na analizie obrazów hodografów wektora prądu stojana jest trudny w realizacji praktycznej.

Ze względu na nieznaczące zniekształcenie hodografów wektora strumienia wirnika na płaszczyźnie α - β na skutek uszkodzenia łącznika falownika podczas pracy w zakresie prędkości znamionowej, wnioski płynące z analizy tych hodografów, mogą posłużyć jedynie jako dodatkowa informacja wykorzystana w procesie diagnostyki.

Autorzy w dalszych pracach zaprezentują model symulacyjny napędu indukcyjnego odpornego na uszkodzenie łącznika tranzystorowego falownika napięcia, którego metoda działania wykorzystuje analizę badań przedstawioną w niniejszym artykule.

LITERATURA

- [1] CUI B., *Simulation of Inverter with Switch Open Faults Based on Switching Function*, [in:] Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China, 2007, pp. 2774–2778.
- [2] JOLLIFFE I.T., *Principal Component Analysis*, Springer Series in Statistics, New York, USA, 1986.
- [3] KNAPCZYK M., *Nonlinear control strategies of AC/DC line-side converters using sliding-mode approach*, Ph.D. Thesis, Wrocław, Poland, 2008.
- [4] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of a Drive System with Flexible Joint*, [in:] Proc. 32nd Annual IEEE Industrial Electronics Conference, IECON, Paris, France, 2006, pp. 994–999.
- [5] ROTHENHAGEN K., FUCHS F.W., *Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Voltage Source Active Rectifiers*, Proc. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, pp. 4348–4354.

- [6] TRABELSI M., BOUSSAK M., MESTRE P., GOSSA M., *An Improved Diagnosis Technique for IGBTs Open-Circuit Fault in PWM-VSI-fed Induction Motor Drive*, IEEE 20th International Symposium on Industrial Electronics, ISIE, Gdańsk, Poland, 2011, pp. 2111–2117.
- [7] WIKSTRON P.W., TERES L.A., KOBİ H., *Reliability, availability and maintainability of high-power variable-speed drive systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, 2000, pp. 231–241.
- [8] ŹELECHOWSKI M., *Space Vector Modulated – Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter-Fed Induction Motor Drive*, Ph.D. Thesis, Warsaw, Poland, 2005.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF IGBT TRANSISTOR FAULT IN VOLTAGE INVERTER TO STATE VARIABLE TRANSIENTS OF THE INDUCTION MOTOR DRIVE

The aim of the paper is an analysis of the state variable transients in the direct oriented control of induction motor drive under open-switch fault of the voltage inverter. Study results that were presented, were obtained by simulation tests by Matlab/Simulink environment. The paper is an introduction to the problem of power converter fault-tolerant control methods for electric drives.