

doi:10.15199/48.2015.08.41

Układ bezpośredniego sterowania momentem silnika indukcyjnego DTC-SVM odporny na uszkodzenia czujnika prędkości kątowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania symulacyjne i eksperymentalne pozwalające na ocenę pracy napędu sterowanego metodą DTC-SVM przy występowaniu uszkodzeń czujnika prędkości kątowej. Zaproponowano algorytm detekcji uszkodzeń czujnika inkrementalnego i opracowano kompletną strukturę napędu odpornego na uszkodzenia tego elementu. Badania symulacyjne wykonano w środowisku Matlab/Sim Power System a badania eksperymentalne przy wykorzystaniu układu szybkiego prototypowania DS1103. Zaproponowane rozwiązanie może być z powodzeniem wykorzystane w systemach FTC (Fault Tolerant Control).

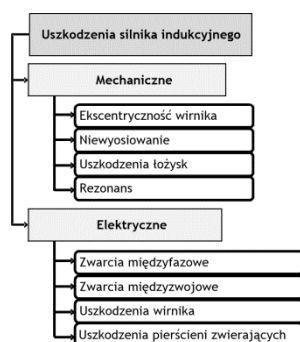
Abstract. In the paper the simulation and experimental results of the Direct Torque Control (DTC-SVM) of induction motor drive system under speed sensor faults are presented. Faults detection algorithm is developed. The simulation tests carried out in Matlab/Sim Power System software, DS1103 card is applied in the experimental tests. The proposed solution can be successfully applied in the fault tolerant drive systems. (Rotor speed sensor fault tolerant Direct Torque Control structure of induction motor drive).

Słowa kluczowe: DTC-SVM, napęd odporny na uszkodzenia, detekcja uszkodzenia, czujnik prędkości, MRAS

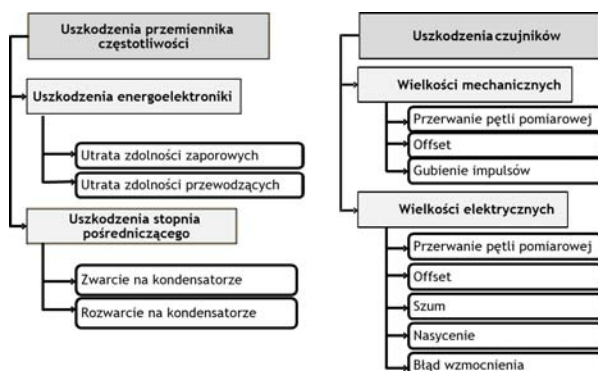
Keywords: DTC-SVM, fault tolerant drive, fault detection, speed sensor, MRAS

Wstęp

Nowoczesne układy napędowe są systemami coraz bardziej złożonymi i skomplikowanymi pod względem obliczeniowym i technicznym. Duża liczba czujników i przetworników, niezbędnych do ich prawidłowego działania powoduje, że układy te nie są niezawodne [4],[13]. Intensywny rozwój tego typu napędów, w szczególności w przemyśle automotive, spowodował wzrost zainteresowania układami o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa – FTC (*ang. Fault Tolerant Control*) [5], [6]. Można je podzielić na dwa typy: pasywne oraz aktywne [5].



Rys. 1. Rodzaje uszkodzeń silnika indukcyjnego



Rys. 2. Rodzaje uszkodzeń przemiennika częstotliwości i czujników pomiarowych

Do podstawowych uszkodzeń napędów, występujących w przemyśle, zalicza się awarie silnika indukcyjnego, czujników pomiarowych oraz przemiennika częstotliwości.

Na Rys. 1 przedstawiono szczegółowy podział możliwych do wystąpienia awarii silnika indukcyjnego, a na Rys. 2 uszkodzenia przemiennika częstotliwości i czujników pomiarowych [1].

W niniejszej pracy przedstawiono analizę wpływu uszkodzeń czujnika prędkości na pracę układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą wektorową DTC-SVM.

Zaproponowano algorytm wykrywania uszkodzeń na podstawie przebiegów łatwo dostępnych zmiennych stanu oraz przedstawiono propozycję układu odpornego na analizowane uszkodzenia, charakteryzującego się prostą konstrukcją, łatwą do praktycznej implementacji w przemysłowych układach napędowych [8], [9].

Układ napędowy z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DTC-SVM

Jedną z najbardziej popularnych metod sterowania silnikiem indukcyjnym w zastosowaniach przemysłowych, jest struktura DTC-SVM [10], w której dzięki zastosowaniu modulatora wektorowego (*ang. Space Vector Modulation*) i zastąpieniu regulatorów histerezowych strumienia i momentu silnika (które występują w klasycznej strukturze DTC-ST) – regulatorami typu PI, można uzyskać stałą częstotliwość łączeń zaworów przemiennika częstotliwości, a tym samym stałą wartość strat łączeniowych w przekształtniku.

Schemat ideowy struktury DTC-SVM przedstawiono na Rys. 3 [2]. Składowe strumienia stojana, niezbędne do prawidłowej pracy układu DTC-SVM można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad \Psi_s^e = \frac{x_m}{x_r} \Psi_r^e + x_s \mathbf{o}i_s$$

Do wyznaczenia składowych strumienia wirnika wykorzystano model prądowy silnika indukcyjnego:

$$(2) \quad \frac{d}{dt} \Psi_r^i = \left[\frac{r_r}{x_r} (x_m \mathbf{i}_s - \Psi_r^i) + j \omega_m^e \Psi_r^i \right] \frac{1}{T_N}$$

W badaniach do pomiaru prędkości kątowej wykorzystano enkoder inkrementalny o rozdzielczości 5000imp./obr., ponadto czujnik napięcia w obwodzie pośredniczącym przemiennika częstotliwości oraz dwa czujniki prądu stojana.

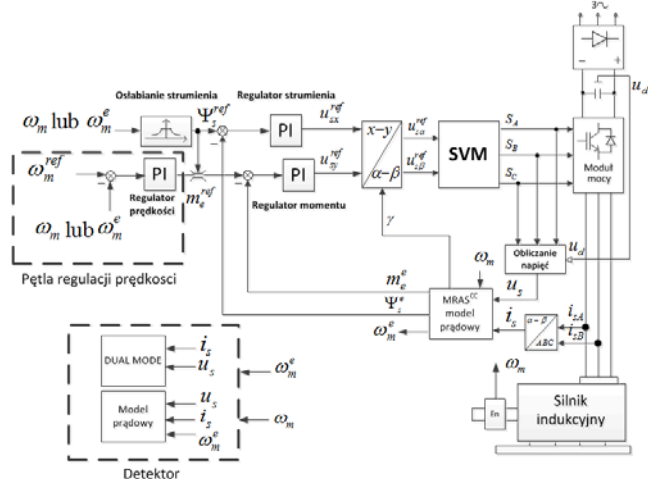
Dodatkowo w układzie zastosowano estymator prędkości MRAS^{CC} [1], [3] oraz DUAL MODE [11] (w celach

porównawczych i do zastosowań w procesie diagnostyki w układzie bezpiecznym [3].

W estymatorze MRAS^{CC} wartości składowych wektora strumienia wirnika obliczane są na podstawie modelu prądowego (2) (stąd oznaczenie C – *ang. current*), natomiast równanie estymatora prądu stojana wynika z przekształcenia równań opisujących silnik indukcyjny [3]:

$$(3) \quad T_N \frac{d \mathbf{i}_s^e}{dt} = \frac{1}{x_s \sigma} \left(\mathbf{u}_s - r_s \mathbf{i}_s^e - \frac{r_r x_m^2}{x_r^2} \dot{\mathbf{i}}_s^e + \frac{x_m r_r}{x_r^2} \Psi_r^i - j \frac{x_m}{x_r} \Psi_r^i \omega_m^e \right)$$

W estymatorze tym prędkość kątowna otrzymywana jest na wyjściu regulatora PI, który w tym przypadku spełnia zadanie mechanizmu adaptacji.



Rys. 3. Struktura układu bezpośredniego sterowania momentem dla napędu z silnikiem indukcyjnym

Wielkością wejściową regulatora jest sygnał zależny od aktualnej wartości strumienia wirnika i błędu estymacji składowych wektora prądu stojana. Mechanizm ten jest opisany zależnością:

$$(4) \quad \omega_m^e = k_p (e_{is\alpha} \Psi_r^i \beta - e_{is\beta} \Psi_r^i \alpha) + k_I \int (e_{is\alpha} \Psi_r^i \beta - e_{is\beta} \Psi_r^i \alpha) dt$$

$$e_{is\alpha,\beta} = i_{s\alpha,\beta}^e - i_{s\alpha,\beta}^e$$

Otrzymywana w ten sposób prędkość kątowna wykorzystywana jest do przestrajania zarówno modelu prądowego jak i estymatora prądu stojana. Prędkość ta, bez dodatkowej filtracji może być używana w układzie sterowania.

Ze względu na fakt, że w przypadku uszkodzeń czujników wielkości elektrycznych (prądu lub napięcia stojana) układu napędowego może dojść do fałszywej identyfikacji awarii, w procesie diagnostyki dodatkowo wykorzystano estymator Dual – Mode (DM) zaproponowany w [11]. Układ ten w połączeniu z innym systemem do wyznaczania prędkości gwarantuje stabilną pracę napędu odpornego na uszkodzenia czujników. Estymator ten wykorzystuje transformację pomiędzy układami współrzędnych związanymi ze stojanem oraz wirnikiem, w celu uniezależnienia modelu prądowego strumienia wirnika od prędkości kątownej wirnika. Niezależność od estymowanej wartości prędkości silnika zapewnia brak opóźnienia czasowego w estymacji składowych strumienia. Estymator ten wykorzystuje jednocześnie technikę ruchu ślizgowego oraz bezpośrednią metodę estymacji prędkości kątownej za pomocą zależności na pulsację poślizgu wirnika [1], [11].

W układzie tym wektory strumienia stojana i wirnika oraz prądu stojana można wyznaczyć korzystając z modeli zapisanych w układzie stacjonarnym ($\alpha-\beta$):

$$(5) \quad T_N \frac{d \Psi_s^e}{dt} = \mathbf{u}_s - r_s \mathbf{i}_s + K_1 \mathbf{v}$$

$$(6) \quad \Psi_r^{se} = \frac{x_r}{x_m} (\Psi_s^e - x_s \sigma \mathbf{i}_s)$$

$$(7) \quad \mathbf{i}_s^e = \frac{1}{x_s \sigma} \left(\Psi_s^e - \frac{x_m}{x_r} \Psi_r^{se} \right)$$

W układzie nieruchomym względem pola wirnika ($x-y$) można wyznaczyć strumień wirnika korzystając z modelu prądowego strumienia wirnika:

$$(8) \quad T_N \frac{d \Psi_{rx}^{re}}{dt} = \frac{x_m r_r}{x_s x_r \sigma} \Psi_{sx}^{re} - \frac{r_r}{x_r \sigma} \Psi_{rx}^{re} + K_2 v_x^r$$

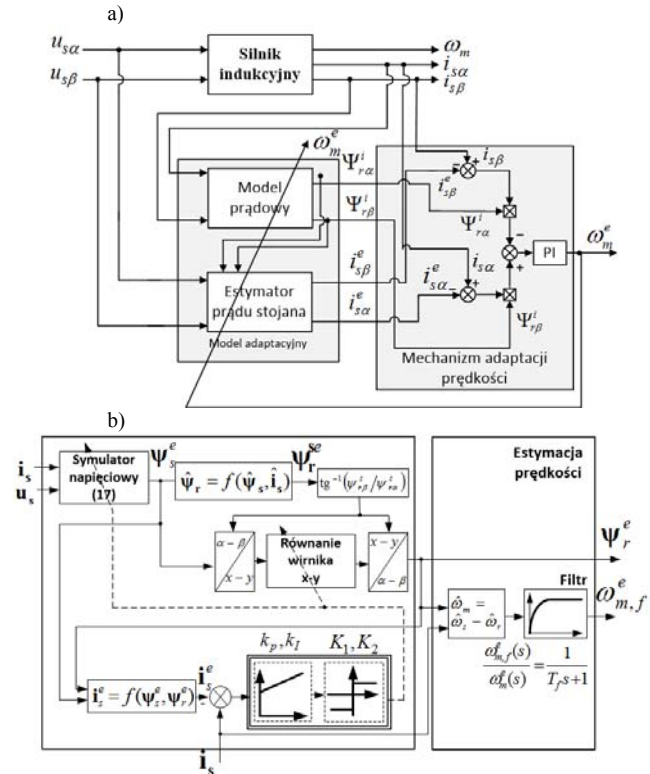
gdzie: $\mathbf{v} = \text{sign}(s)$, $s = k_p e_i + k_I \int e_i dt$, $e_i = \mathbf{i}_s - \mathbf{i}_s^e$

K_1, K_2, k_p, k_I – dodatnie stałe, $\Psi_{ry}^{re} = 0$.

Kąt niezbędny do transformacji współrzędnych wyliczany jest z zależności:

$$(9) \quad \gamma_{s\psi} = \arctg(\Psi_{r\beta}^s / \Psi_{r\alpha}^s)$$

Schematy estymatorów MRAS i DM przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Schemat estymatora MRAS^{CC} (a) oraz DM (b) [11]

Uszkodzenia czujnika pomiarowego prędkości kątownej

W przypadku inkrementalnego czujnika prędkości kątownej możliwe do wystąpienia uszkodzenia przedstawiono na Rys. 5. Awarie te można zdefiniować zależnością [10]:

$$(10) \quad \omega_m^m = (1 - \gamma) \omega_m$$

gdzie: ω_m^m – mierzona wartość prędkości mechanicznej, ω_m – rzeczywista wartość prędkości mechanicznej, γ – współczynnik pomocniczy, przy czym: $-1 \leq \gamma \leq 1$.

W zależności od współczynnika γ , otrzymywana wartość prędkości mechanicznej pobierana z czujnika może być przerywana lub zerowa. Brak impulsów wyjściowych z enkodera jest spowodowane całkowitym przerwaniem pętli pomiarowej. Ograniczenie liczby impulsów może być wynikiem blokowania otworów tarczy czujnika, a cykliczne przerywanie sygnału pomiarowego występuje dla uszkodzenia elektroniki bądź przewodów zasilających.

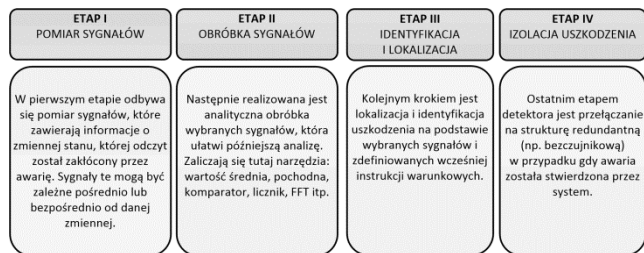


Rys. 5. Rodzaje uszkodzeń czujników prędkości

Detekcja uszkodzeń czujnika prędkości kątowej

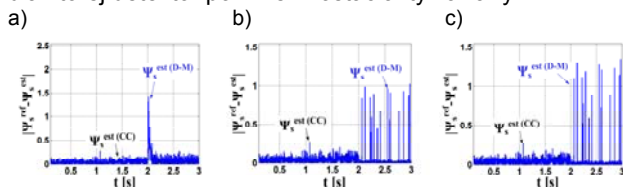
Najprostszym sposobem detekcji awarii w układach napędowych jest wykorzystanie zmiennych stanu z wewnętrznej pętli sterowania.

Algorytm wykrywania uszkodzenia można podzielić na cztery etapy, które opisano na Rys. 6.



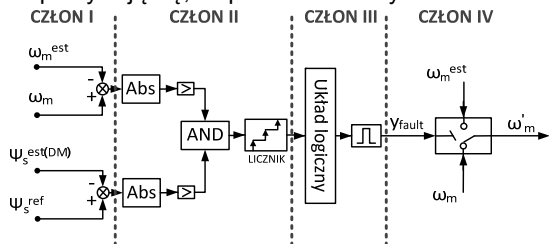
Rys. 6. Etapy wykrywania uszkodzenia czujników pomiarowych

W przypadku czujnika prędkości najszybszym i najprostszym sposobem detekcji awarii jest porównywanie przebiegów prędkości mechanicznej oraz estymowanej przez dowolny estymator tej wielkości [1] (może to być zarówno układ MRAS jak i estymator DM). Przy czym istotnym utrudnieniem w tego rodzaju algorytmie jest ustalenie progowej wartości błędu między tymi sygnałami, dla której detektor powinien zostać aktywowany.



Rys. 7. Przebieg uchybu pomiędzy modułami estymowanej wartości strumienia stojana przy wystąpieniu uszkodzenia enkodera w chwili $t=2\text{sek}$.

Przy uszkodzeniu dowolnego czujnika pomiarowego występuje różnica pomiędzy prędkością mierzoną a estymowaną. W związku z tym konieczne jest wykorzystanie dodatkowych sygnałów diagnostycznych umożliwiających poprawną lokalizację uszkodzonego komponentu napędu. Wybór tych sygnałów zależy od wykorzystywanej struktury sterowania. W przypadku uszkodzenia czujnika prędkości kątowej, przebiegi uchybów estymowanych wartości modułów strumienia stojana na podstawie estymatora opartego na modelu prądowym i Dual-Mode pokrywają się, co pokazano na Rys. 7.



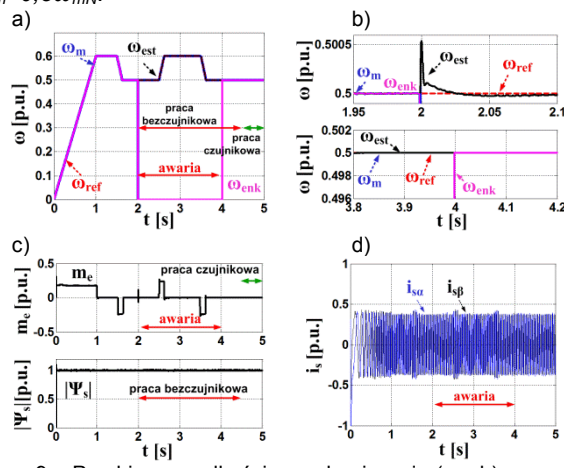
Rys. 7. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prędkości dla sterowania wektorowego DTC SVM

W zaproponowanym układzie detekcji awarii enkodera (Rys. 8) użyto wartości bezwzględnej uchybu strumienia stojana w oparciu o estymator Dual-Mode.

Układ diagnostyczny po stwierdzeniu wystąpienia awarii dokonuje przełączenia na obwód bezczujnikowy zawierający, w wewnętrzznym sprzężeniu zwrotnym, estymator MRAS^{CC} [1], [3], a w momencie powrotu sygnału z czujnika, detektor przełącza sterowanie z powrotem na układ z pomiarem prędkości kątowej (należy jednocześnie zaznaczyć, że w praktycznych układach FTC powrót do pierwotnej struktury sterowania możliwy jest wyłącznie po wyzerowaniu znacznika awarii, co wiąże się z wymianą lub naprawą czujnika).

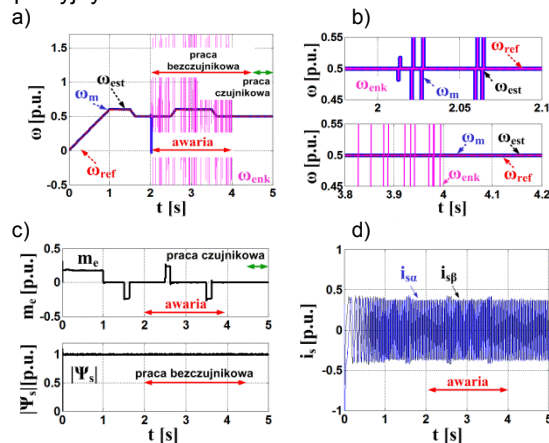
Na Rys. 9 – Rys. 11 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układu DTC-SVM z opracowanym detektorem uszkodzenia podczas przerwania pętli sprzężenia zwrotnego.

Przedstawiono przebiegi prędkości mechanicznej, momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana i prądów stojana przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prędkości (Rys. 9), przy cyklicznym gubieniu impulsów czujnika prędkości (Rys. 10) oraz przy zatkanium konkretnych otworów czujnika prędkości (Rys. 11) dla $\omega_m=0,5\omega_{mN}$.

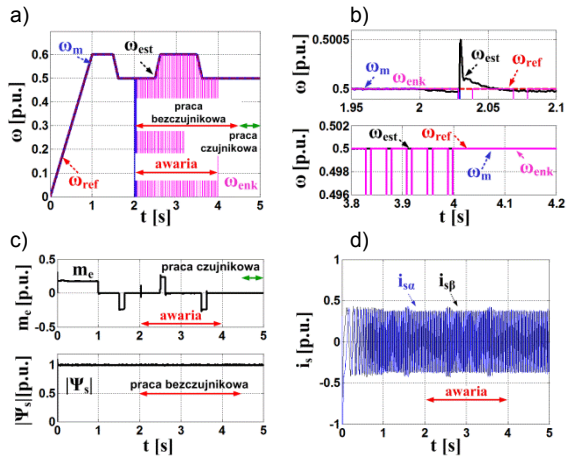


Rys. 9. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM dla $\omega_m=0,5\omega_{mN}$ (wyniki symulacyjne)

Widoczne jest, że po wystąpieniu awarii enkodera w chwili $t=2\text{sek}$. (dla wszystkich typów uszkodzeń) następuje zmiana topologii układu z systemu z pomiarem prędkości na napęd bezczujnikowy z estymatorem adaptacyjnym.

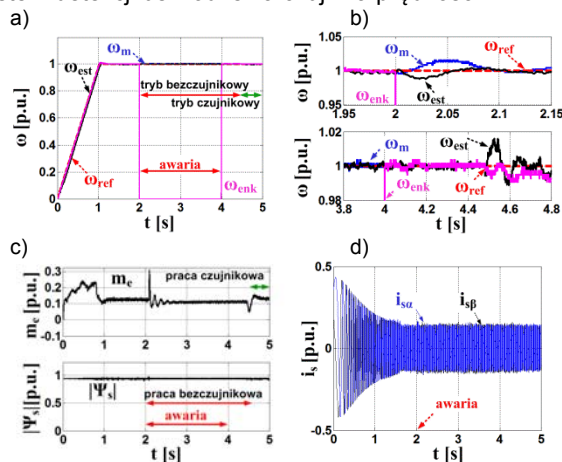


Rys. 10. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy cyklicznym gubieniu impulsów czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM dla $\omega_m=0,5\omega_{mN}$ (wyniki symulacyjne)



Rys. 11. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy zatkaniu konkretnych otworów czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM dla $\omega_m=0,5\omega_{mN}$ (wyniki symulacyjne)

Na kolejnych rysunkach (Rys. 12 – Rys. 17) przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych napędu indukcyjnego, w którym zastosowano zaproponowany system detekcji uszkodzenia czujnika prędkości.



Rys. 12. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM $\omega_m=\omega_{mN}$ (badania eksperymentalne)

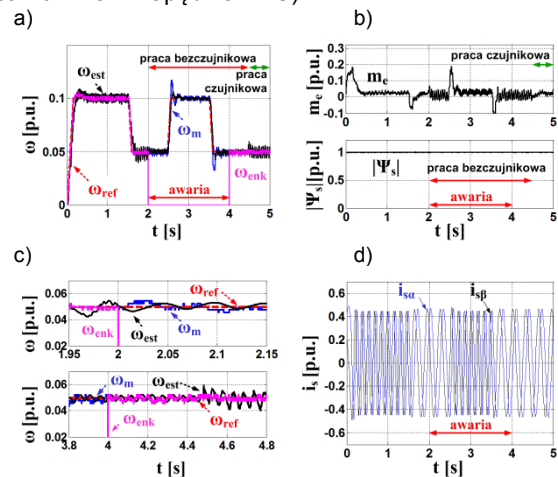
Sprawdzono działanie układu przy awariach jak w badaniach symulacyjnych. Oceniono działanie układu przy pracy z prędkością znamionową oraz podczas pracy napędu DTC-SVM z prędkością 5% wartości znamionowej.

Uszkodzenie, tak jak poprzednio, nastąpiło w chwili $t=2sek$. Po tym czasie detektor przełączył układ na tryb pracy bezczujnikowej. W chwili $t=4sek$. napęd powrócił do pracy z czujnikiem prędkości kątowej. Test ma na celu zademonstrowanie poprawności pracy proponowanego systemu detekcji.

Na Rys. 12 i Rys. 13 przedstawiono pracę napędu podczas awarii polegającej na całkowitym zaniku sygnału z czujnika prędkości, na Rys. 14 i Rys. 15 podczas cyklicznego gubienia impulsów czujnika prędkości oraz na Rys. 16 i Rys. 17 podczas zatknięcia konkretnych otworów czujnika prędkości.

Z punktu widzenia napędu elektrycznego, jednym z najmniej niebezpiecznych rodzajów uszkodzeń jest całkowite przerwanie pętli pomiarowej. Układ regulacji wystawia maksymalną możliwą wartość momentu elektromagnetycznego a prędkość bardzo szybko rośnie (wynika to z faktu, że do sprzężenia zwrotnego podawana jest zerowa wartość prędkości kątowej – uchyb jest

maksymalny). W takim wypadku konieczne staje się jak najszybsze wykrycie awarii i przełączenie układu na tryb pracy bezczujnikowej (lub na tryb pracy momentowej, co jest możliwe w napędzie DTC).



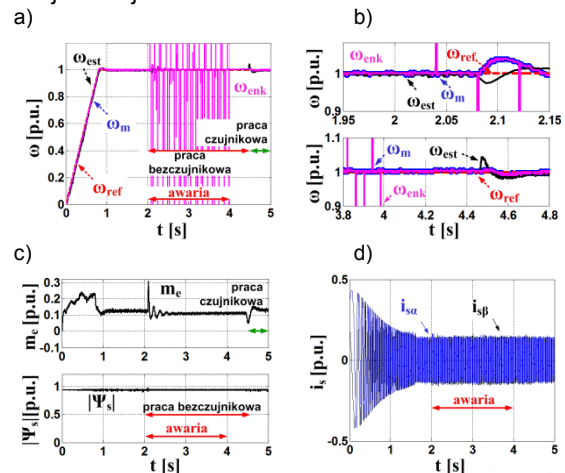
Rys. 13. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy całkowitym uszkodzeniu czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM $\omega_m=0,05\omega_{mN}$ (badania eksperymentalne)

Jak widać na Rys. 12 i Rys. 13 napęd w bardzo szybkim czasie wykrywa ten typ uszkodzenia i zmienia topologię na tryb pracy bez czujnika prędkości kątowej.

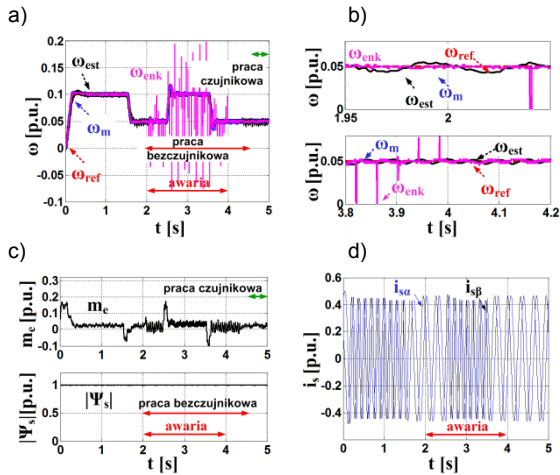
Kolejnym rodzajem uszkodzenia jest gubienie impulsów lub zatkanie tarczy enkodera (Rys. 14 i Rys. 15). Uszkodzenia tego typu nie są tak niebezpieczne jak całkowity zanik sygnału, jednak mogą doprowadzić do powstania niekontrolowanych zjawisk w napędzie lub nawet do utraty jego stabilności. Istotne jest więc także szybkie wykrycie tych awarii. Zaproponowany system detekcji w sposób zadawalający wykrywa je i przełącza na tryb bezczujnikowy.

Na przebiegu momentu elektromagnetycznego widoczne są impulsy powstające w chwili uszkodzenia enkodera i przejścia na tryb bezczujnikowy. Nie są one jednak na tyle duże aby mogły doprowadzić do uszkodzenia napędu.

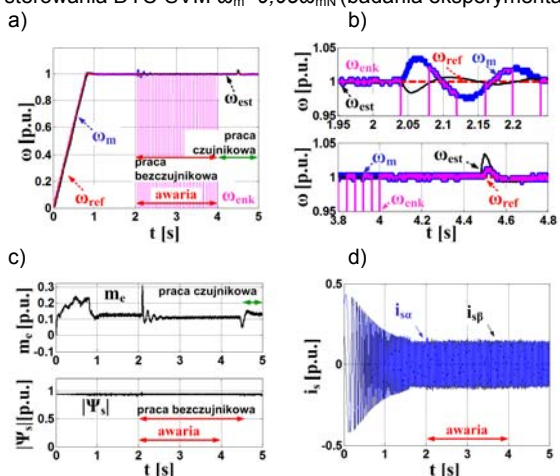
Niezależnie od rodzaju uszkodzenia pojawiającego się w układzie sterowania DTC-SVM układ diagnostyczny reaguje w sposób podobny. W bardzo szybkim czasie dokonywana jest detekcja i przełączenie w tryb pracy bezczujnikowej.



Rys. 14. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy zatknięciu konkretnych otworów czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM $\omega_m=\omega_{mN}$ (badania eksperymentalne)

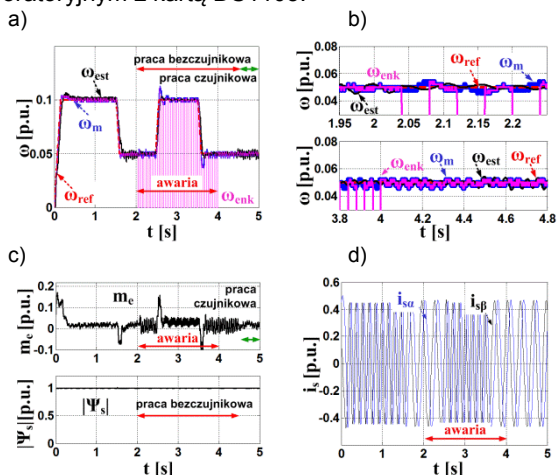


Rys. 15. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy zatkaniu konkretnych otworów czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM $\omega_m=0,05\omega_{mN}$ (badania eksperymentalne)



Rys. 16. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy cyklicznym gubieniu impulsów czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM $\omega_m=\omega_{mN}$ (badania eksperymentalne)

Badania symulacyjne zostały całkowicie potwierdzone w badaniach eksperymentalnych wykonanych na zestawie laboratoryjnym z kartą DS1103.



Rys. 17. Przebieg prędkości mechanicznej (a, b), momentu elektromagnetycznego, modułu strumienia stojana (c) i prądów stojana (d) przy cyklicznym gubieniu impulsów czujnika prędkości dla sterowania DTC-SVM $\omega_m=0,05\omega_{mN}$ (badania eksperymentalne)

Przez cały cykl pracy wartość mierzona i estymowana prędkości pokrywają się.

Podsumowanie

W artykule zaproponowano algorytm do wykrywania uszkodzeń czujnika pomiarowego w układzie DTC-SVM, który z powodzeniem może być wykorzystany w napędach o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Należy zaznaczyć, że zaproponowany algorytm detekcji jest bardzo prosty w konstrukcji, nie obciąża układu napędowego i bazuje na sygnałach dostępnych w wewnętrznej strukturze sterowania wektorowego. Zaproponowane rozwiązanie układu odpornego opierające się na redundancji pomiarowej i estymacji prędkości kątowej wirnika pozwoliło na wykrycie awarii i umożliwienie tym samym dalszej pracy układu.

Załącznik

Badania wykonano dla silnika Stg 80X-4C firmy BESEL:

$P_N = 1100 \text{ W}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $U_{Nf} = 220 \text{ V}$; $I_N = 5,0/2,9 \text{ A}$;

$n_N = 1400 \text{ obr/min}$; $f_N = 50 \text{ Hz}$, $pb = 2$;

$R_s = 5,90 \Omega$; $R_r = 4,56 \Omega$; $X_s = 131,10 \Omega$; $X_r = 131,10 \Omega$; $X_m = 123,30 \Omega$

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

LITERATURA

- [1] Dybkowski M., *Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych – zagadnienia wybrane*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 67, seria Monografie nr 20, 2013
- [2] Orłowska-Kowalska T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003
- [3] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M., *Stator Current-based MRAS Estimator for a Wide Range Speed-Sensorless Induction Motor Drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 57, no. 4, 2010, pp. 1296-1308
- [4] Shicai Fan, Jianxiao Zou, "Sensor Fault detection and fault tolerant control of induction motor drivers for electric vehicles", IEEE 7th Int. Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, China, pp. 1306-1309, 2012
- [5] Khalaf Salloum Gaeid, Hew Wooi Ping, *Fault Tolerant Control of Induction Motor*, Modern Applied Science Vol. 5, No. 4; August 2011, pp 83-94
- [6] Li Jiang, *Sensor fault detection and isolation using system dynamics identification techniques*, PhD thesis, The University of Michigan, 2011
- [7] K.S. Lee, J.-S. Ryu, *Instrument fault detection and compensation scheme for direct torque controlled induction motor drivers*, IEE Control Theory Appl., Vol.150, No.4, 2003
- [8] Klimkowski K., Dybkowski M., *Wpływ uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych na pracę napędu sterowanego metodą wektorową*, ZKwE 2014, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering nr 77, str. 185-192
- [9] Klimkowski K., Dybkowski M., *Analiza wektorowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym odpornego na uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych*, ZKwE 2014, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering nr 77, str. 193-200, 2014
- [10] G. S. Buja, M. P. Kazmierkowski *Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors—A Survey*, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 51, No. 4, 2004
- [11] Boldea I., Lascu C., Blaabjerg F., *A Class of Speed-Sensorless Sliding-Mode Observers for High-Performance Induction Motor Drives*, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 56, no.9, 2009
- [12] Romero M.E., Seron M.M., De Dona J.A., "Sensor fault-tolerant vector control of induction motors", IET Control Theory Applications., vol. 4, no. 9, pp. 1707–1724, 2010
- [13] Isermann R., "Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance", Springer, New York, 2006.

Autorzy:

mgr inż. Kamil Klimkowski, dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
E-mail: kamil.klimkowski@pwr.edu.pl, mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl