Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Nr 70 Politechniki Wrocławskiej Nr 70

Studia i Materiały Nr 34 2014

DTC-SVM, sterowanie wektorowe, silnik indukcyjny, regulator adaptacyjny, ANFC, uszkodzenia czujnika prędkości, detektor uszkodzenia czujnika prędkości

Mateusz DYBKOWSKI*

UKŁAD NAPĘDOWY O ZWIĘKSZONYM STOPNIU BEZPIECZEŃSTWA Z ADAPTACYJNYM REGULATOREM NEURONOWO-ROZMYTYM

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania adaptacyjnego regulatora neuronowo rozmytego w układzie bezpośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym (DTC-SVM) silnika indukcyjnego o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Wykonano badania ilustrujące wpływ zastosowania układu adaptacyjnego w torze regulacji prędkości kątowej na jakość pracy napędu podczas zmiany topologii układu sterowania, wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej. Badania wykonano w środowisku Sim Power System.

1. WPROWADZENIE

Intensywny rozwój układów napędowych sterowanych metodami wektorowymi, w szczególności w przemyśle automotive, spowodował wzrost zainteresowania systemami o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa – FTC (ang. *Fault Tolerant Control*) [6], [7], [10], [11]. Do podstawowych uszkodzeń napędów, występujących w przemyśle, zalicza się awarie silnika indukcyjnego, czujników pomiarowych oraz przemiennika częstotliwości.

Awarie każdego z elementów prowadzą do powstania niekontrolowanych zjawisk w układzie napędowym, a w skrajnym przypadku mogą doprowadzić do utraty jego stabilności i/lub uszkodzenia. Konieczne jest więc wykrywanie uszkodzeń w możliwie wczesnej fazie ich występowania i przełączaniu systemu na układ redundantny (jeżeli istnieje taka możliwość) [6].

* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl

Jednym z najczęściej występujących uszkodzeń w złożonych układach napędowych jest uszkodzenie czujnika prędkości kątowej. Jego awaria, powoduje, że niemożliwa staje się praca napędu, który z samego założenia wymaga tej mechanicznej zmiennej stanu do prawidłowej pracy. Istnieje wiele koncepcji wykrywania uszkodzeń tego typu układów pomiarowych i ich kompensacji [10]. Istotne jest aby w fazie zmiany topologii układu sterowania lub systemu pomiarowego przejście pomiędzy nimi było możliwie płynne i niezauważalne dla użytkownika [8], [10], [11].

W niniejszym artykule przedstawiono analizę układu napędowego sterowanego metodą wektorową DTC-SVM podczas wystąpienia uszkodzenia inkrementalnego czujnika prędkości kątowej [8]. Skupiono się na fazie przejścia pomiędzy systemem z pomiarem prędkości kątowej na układ bezczujnikowy [9]. Sprawdzono i porównano możliwości pracy takiego napędu z klasycznym regulatorem PI oraz z Adaptacyjnym Regulatorem Neuronowo-Rozmytym (ang. *Adaptive Neuro Fuzzy Controller* – ANFC) w torze regulacji prędkości kątowej. Wykonano badania symulacyjne w środowisku Sim Power System.

2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO DTC-SVM ORAZ REGULATORA ANFC

Jedną z najbardziej popularnych metod sterowania silnikiem indukcyjnym w zastosowaniach przemysłowych, jest struktura DTC-SVM [8], [9] (rys. 1), 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 [8].

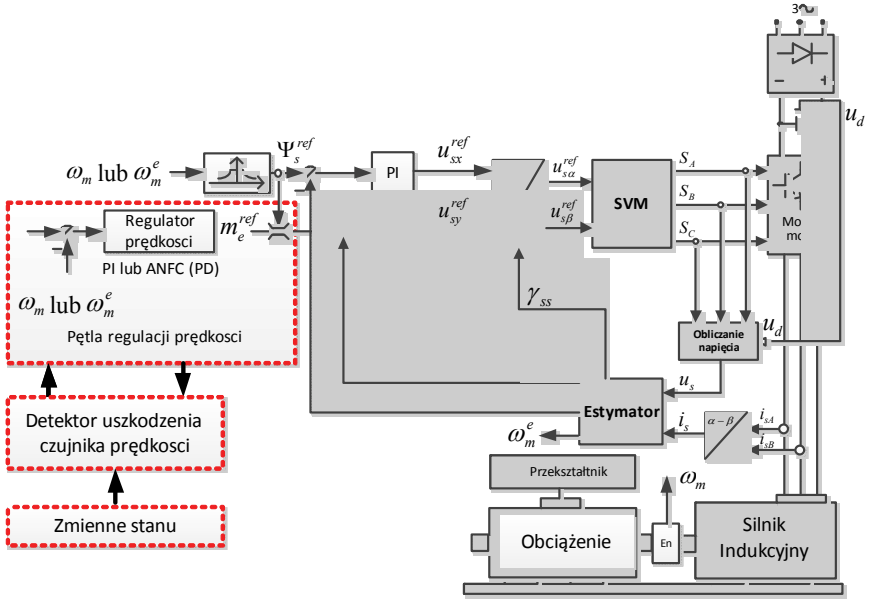
Schemat ideowy struktury DTC-SVM przedstawiono na rys. 1 [8]. Składowe strumienia stojana, niezbędne do prawidłowej pracy układu DTC-SVM można wyznaczyć z zależności:

$$\boldsymbol{\Psi}_s^e = \frac{x_m}{x_r}\boldsymbol{\Psi}_r^e + x_s\sigma\mathbf{i}_\mathbf{s}\,. \tag{1}$$

Do wyznaczenia składowych strumienia wirnika wykorzystano model prądowy silnika indukcyjnego:

$$\frac{d}{dt}\boldsymbol{\Psi}_r^{\,i} = \left[\frac{r_r}{x_r}(x_m\mathbf{i}_s - \boldsymbol{\Psi}_r^{\,i}) + j\omega_m^e\boldsymbol{\Psi}_r^{\,i}\right]\frac{1}{T_N}\,. \tag{2}$$

Do pomiaru prędkości kątowej wykorzystano enkoder inkrementalny o rozdzielczości 5000 imp./obr.



Rys. 1. Struktura układu bezpośredniego sterowania momentem dla napędu z silnikiem indukcyjnym

W estymatorze prędkości MRAS^{CC}, który wykorzystano w układzie jako system redundantny, 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 [8]:

$$T_N \frac{d\,\mathbf{i}_s^e}{dt} = \frac{1}{x_s \sigma}\left(\mathbf{u_s} - r_s \mathbf{i}_s^e - \frac{r_r x_m^2}{x_r^2}\mathbf{i}_s^e + \frac{x_m r_r}{x_r^2}\boldsymbol{\Psi}_\mathbf{r}^i - j\frac{x_m}{x_r}\boldsymbol{\Psi}_\mathbf{r}^i \omega_m^e\right). \tag{3}$$

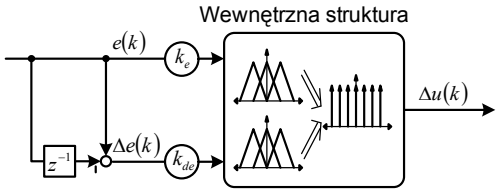
W estymatorze tym prędkość kątowa otrzymywana jest na wyjściu regulatora PI, który w tym przypadku spełnia zadanie mechanizmu adaptacji.

$$\begin{gathered}\omega_m^e = k_p\left(e_{is\alpha}\psi^i{}_{r\beta} - e_{is\beta}\psi^i{}_{r\alpha}\right) + k_I\int\left(e_{is\alpha}\psi^i{}_{r\beta} - e_{is\beta}\psi^i{}_{r\alpha}\right)dt, \\ e_{is\alpha,\beta} = i_{s\alpha,\beta} - i^e{}_{s\alpha,\beta}.\end{gathered} \tag{4}$$

Otrzymywana w ten sposób prędkość kątowa wykorzystywana jest do przestrajania zarówno modelu prądowego jak i estymatora prądu stojana [8].

W układzie sprawdzono możliwości wykorzystania Adaptacyjnego Regulatora Neuronowo-Rozmytego w pętli regulacji prędkości kątowej w celu poprawy pracy napędu podczas zmiany topologii sterowania napędu. Schemat ideowy zastosowanego Regulatora Neuronowo-Rozmytego przedstawiono na rys. 2. Widoczne są relacje

między błędem regulacji prędkości kątowej $e(k)$, jego zmiany $\Delta e(k)$ i sygnału sterującego $\Delta u(k)$. Układ ten jest regulatorem typu PD, jeżeli integrator wyjściowy zostanie pominięty (rys. 3) (taki układ poddany był analizie w niniejszej pracy) [2], [3], [4], [5].



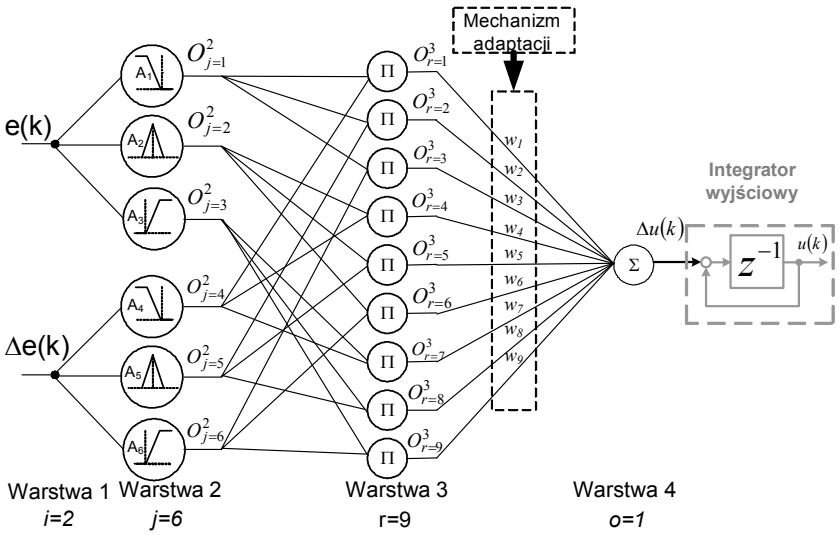
Rys. 2. Schemat regulatora typu PD lub ślizgowego regulatora rozmytego [1], [3]

Powierzchnię przełączania w regulatorze ślizgowym można obliczyć na podstawie właściwości bazy reguł, które opisują związek między błędem (e) a jego zmianą. Podobnie jak dla klasycznego regulatora, powierzchnia przełączania może być opisana za pomocą zależności [2]:

$$s^* = \lambda^* e^* + \Delta e^*, \tag{5}$$

gdzie λ przedstawia nachylenie funkcji przełączającej $\lambda^* e^* + \Delta e^* = 0$.

Adaptacyjny regulator rozmyty można przedstawić jak na rys. 3.



Rys. 3. Struktura wewnętrzna regulatora rozmytego
(PD, jeśli integrator wyjściowy jest pominięty, PI jeśli integrator jest wykorzystywany)

Baza reguł regulatora rozmytego opiera się na kilku zasadach opisanych warunkami IF-THEN:

$$R_j : \text{IF } x_1 \text{ is } A_r^j \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ THEN } y = w_i, \tag{6}$$

gdzie x_i – zmienna wejściowa, A_r^j – wejściowa funkcja przynależności, w_i – waga wyjściowa [2].

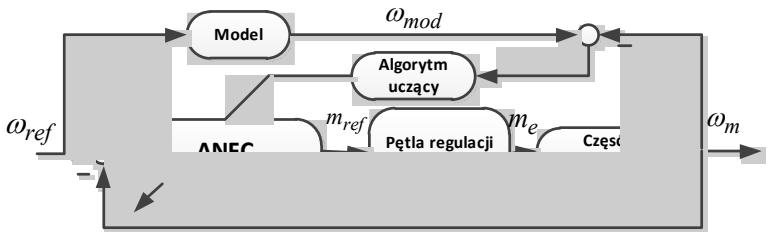
Regulator startuje z wagami zerowymi i jest dostrajany na podstawie błędu odtworzenia prędkości kątowej [2], [8]. Model odniesienia wykorzystywany w analizowanej strukturze sterowania może być opisany zależnością:

$$G_m(p) = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2}, \tag{7}$$

gdzie ζ – współczynnik tłumienia, ω_n – częstotliwość rezonansowa.

Mechanizm adaptacji poszczególnych wag Regulatora Neuronowo-Rozmytego w warstwie wyjściowej opisano w sposób szczegółowy w pracy [4].

Na rysunku 4 przedstawiono schemat ideowy układu sterowania DTC-SVM z Adaptacyjnym Regulatorem Neuronowo-Rozmytym.



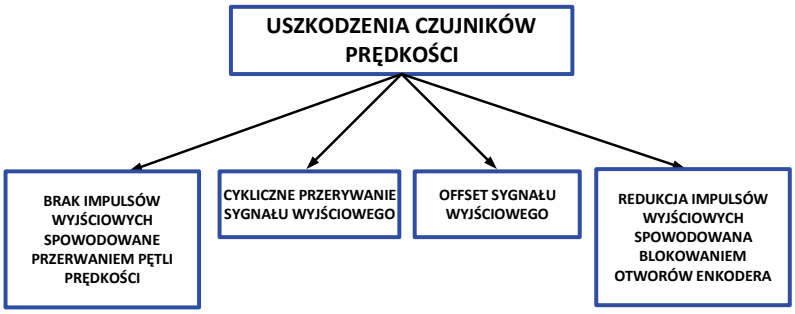
Rys. 4. Schemat ideowy układu sterowania DTC-SVM z regulatorem ANFC typu PD

3. ANALIZA PRACY UKŁADU NAPĘDOWEGO O ZWIĘKSZONYM STOPNIU BEZPIECZEŃSTWA

W przypadku inkrementalnego czujnika prędkości kątowej możliwe są do wystąpienia cztery typy uszkodzeń, przedstawione na rys. 5, które można opisać za pomocą równania [7]:

$$\omega_m^m = (1 - \gamma)\omega_m \tag{8}$$

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



Rys. 5. Rodzaje uszkodzeń czujników prędkości

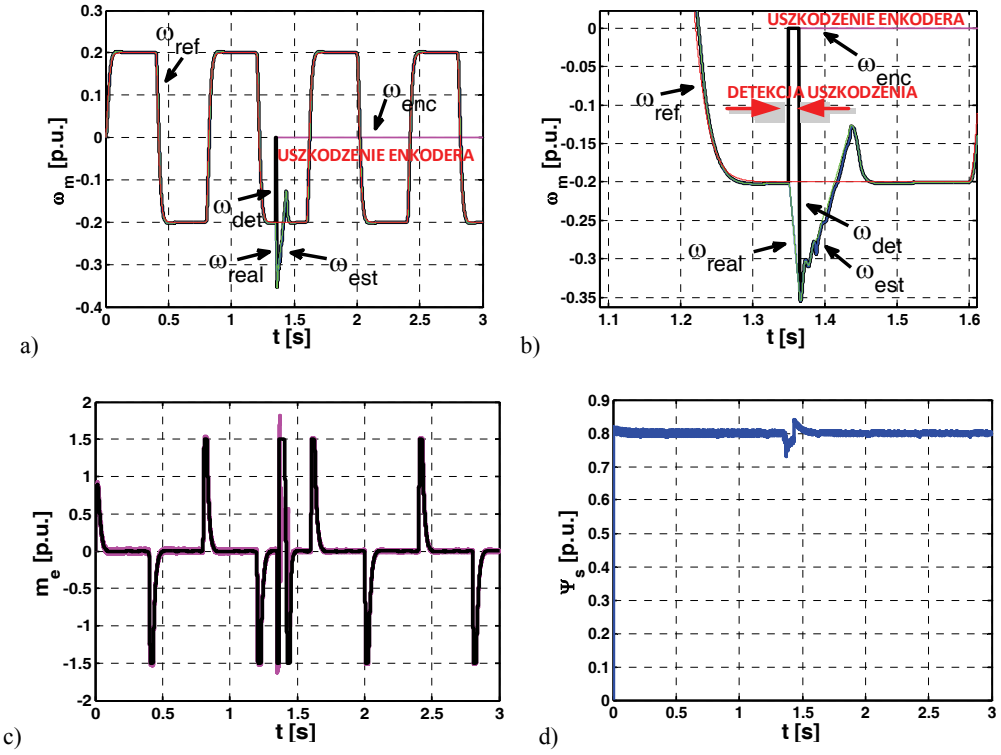
W zależności od współczynnika γ, otrzymywana wartość prędkości mechanicznej pobierana z czujnika może być przerywana lub zerowa. Brak impulsów wyjściowych z enkodera jest spowodowane całkowitym przerwaniem pętli pomiarowej. Ograniczenie liczby impulsów może być wynikiem blokowania otworów tarczy czujnika, a cykliczne przerywanie sygnału pomiarowego występuje dla uszkodzenia elektroniki bądź przewodów zasilających [10].

Najprostszym sposobem detekcji awarii w układach napędowych jest wykorzystanie zmiennych stanu z wewnętrznej pętli sterowania. W niniejszej pracy wykorzystano algorytm opisany w pracach [10], [11].

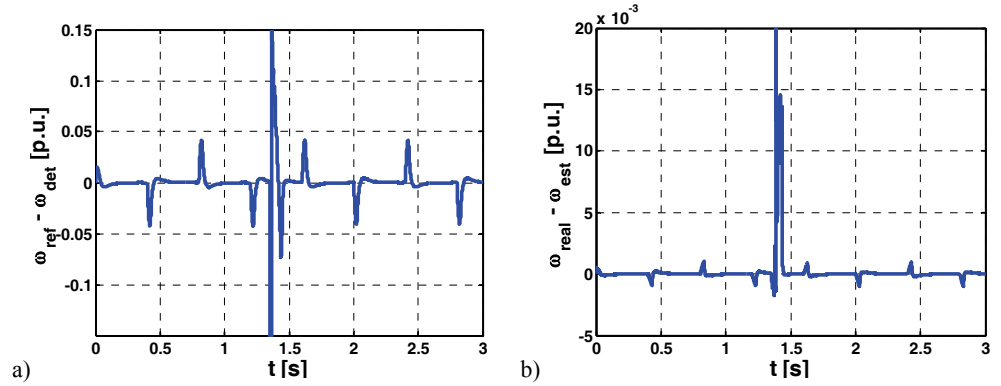
Analizie poddano zachowanie się układu sterowanego metodą DTC-SVM podczas zmiany topologii sterowania (z układu z pomiarem prędkości na system bezczujnikowy) wywołanej detekcją jednego z opisanych uszkodzeń czujnika prędkości kątowej. Sprawdzono działanie napędu z klasycznym regulatorem typu PI oraz z układem ANFC.

W celu możliwości oceny jakości adaptacji regulatora ANFC do zmiennych warunków pracy w pierwszej kolejności sprawdzono odpowiedź klasycznego układu DTC-SVM (z regulatorem liniowym typu PI) na zmianę w nadrzędnym torze regulacji z sygnału mierzonego na sygnał estymowany za pomocą estymatora MRAS. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 6.

Napęd w czasie początkowym pracuje w układzie sterowania z pomiarem prędkości kątowej. Wartość strumienia stojana wyznaczana jest na podstawie modelu prądowego silnika indukcyjnego (1), (2). Po chwili $t = 1{,}3$ s następuje awaria czujnika prędkości kątowej oraz jego detekcja (po upływie 10 ms). Napęd przełączony zostaje w tryb pracy bezczujnikowej. W momencie przejścia na tryb pracy bezczujnikowej następuje stosunkowo duży uchyb pomiędzy prędkością rzeczywistą (oraz



Rys. 6. Przebiegi prędkości (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), modułu strumienia stojana (d) podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej (t = 1,3 s); układ z klasycznym regulatorem PI

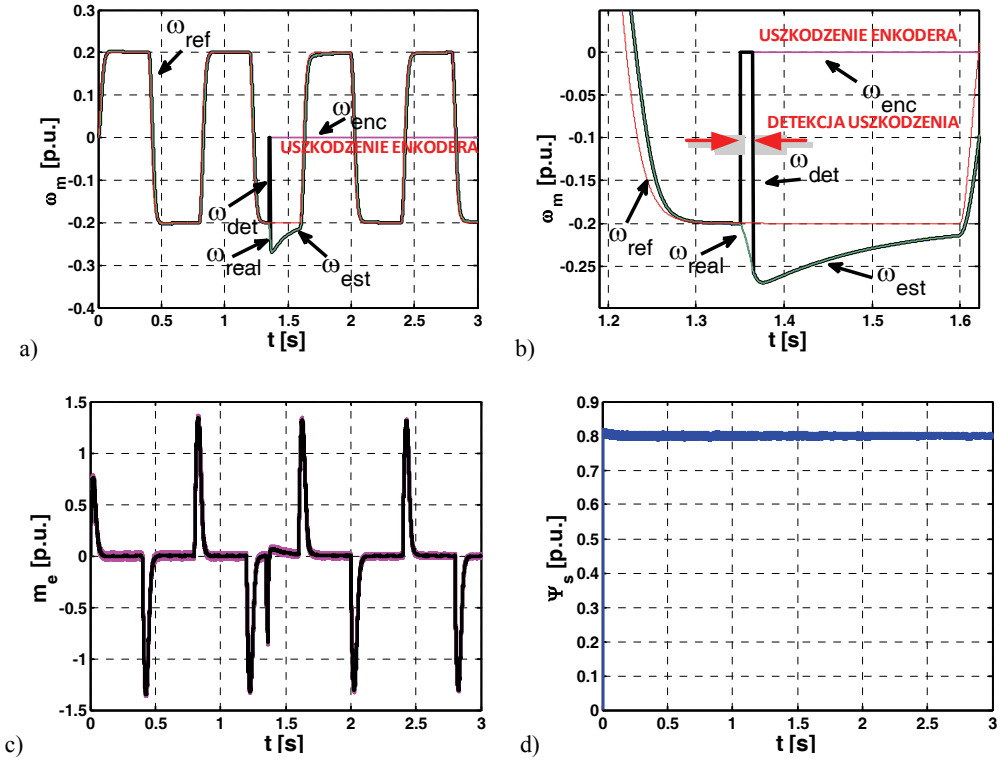


Rys. 7. Przebiegi uchybu w pętli sterowania prędkością oraz błędu odtwarzania podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej (t = 1,3 s); układ z klasycznym regulatorem PI

estymowaną) a wartością zadaną. Parametry regulatora PI dobrane były dla układu z pomiarem prędkości, które przy zmianie topologii układu sterowania nie pozwalają na szybszą reakcję napędu. W czasie pracy napędu błąd estymacji prędkości jest bliski zeru (rys. 7).

Prędkość kątowa odtwarzana jest z niewielkim błędem także podczas zmiany sygnału podawanego na wejście struktury sterowania z pomiaru na wartość estymowaną. Istotne jest, że napęd z klasycznym regulatorem PI zapewnia stabilną pracę napędu nawet podczas występowania uszkodzenia czujnika prędkości kątowej i zmiany topologii sterowania.

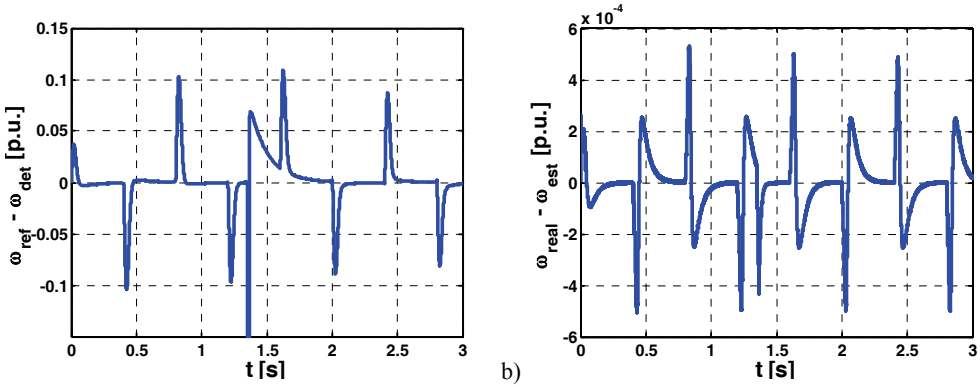
W kolejnej części pracy przedstawiono wybrane wyniki badań układu napędowego sterowanego metodą DTC-SVM odpornego na uszkodzenia czujnika prędkości kątowej z adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym. Na podstawie wcześniejszych badań zdecydowano się wykorzystać układ typu PD, zwany regulatorem ślizgowym [4], [5].



Rys. 8. Przebiegi prędkości (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), modułu strumienia stojana (d) podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej (t = 1,3 s); układ z regulatorem ANFC

W pierwszej kolejności wykonano badania dla trajektorii zmian prędkości kątowej jak dla struktury z regulatorem typu PI. Wagi początkowe regulatora były ustawione na zero.

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi prędkości mierzonej, zadanej, estymowanej i rzeczywistej (z modelu silnika), a na rys. 9 odpowiadające im przebiegi błędów.



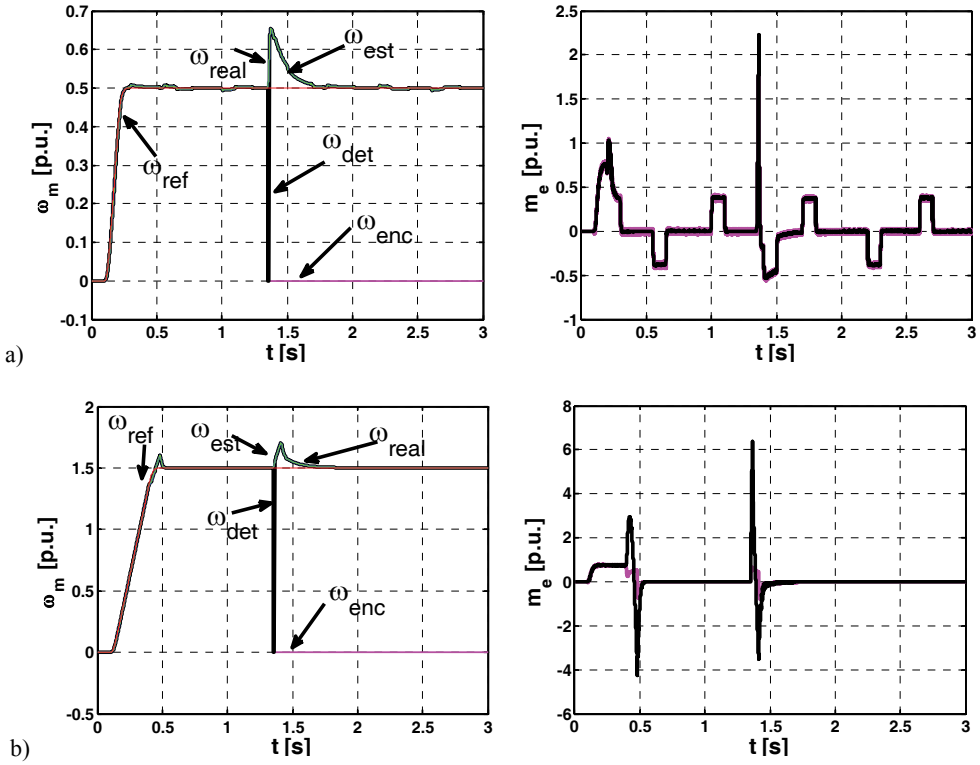
a) b)

Rys. 9. Przebiegi uchybu w pętli sterowania prędkością oraz błędu odtwarzania podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej (t = 1,3 s); układ z regulatorem ANFC

W przypadku układu z adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym podczas normalnej pracy praktycznie nie da się zaobserwować różnicy pomiędzy działaniem obu napędów. Po wykryciu awarii enkodera i przełączeniu układu w tryb bezczujnikowy, zauważalne jest jednak, że układ z zaproponowanym regulatorem szybciej adaptuje się do aktualnych warunków pracy. Zapad prędkości jest zdecydowanie mniejszy niż w przypadku napędu z regulatorem typu PI, błędy odtwarzania prędkości przyjmują mniejsze wartości, co istotne ulegają one zmianom podczas kolejnych cykli pracy napędu.

Na kolejnym rysunku przedstawiono pracę układu z regulatorem ANFC podczas wystąpienia awarii czujnika prędkości dla innych jej wartości i podczas zmian momentu obciążenia.

Zmienny moment obciążenia wpływa w sposób istotny na pracę napędu oraz na wartość zapadu prędkości przy wystąpieniu uszkodzenia enkodera. Szczególnie widoczne jest to na przebiegu momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego. W chwili awarii impuls dochodzi do ponad 4× większej wartości od momentu znamionowego. Podobnie w przypadku osłabiania pola. W momencie zmiany topologii sterowania powstaje duży udar momentu, który może doprowadzić do wyłączenia napędu przez zewnętrzne zabezpieczenia.



Rys. 10. Przebiegi prędkości i momentu elektromagnetycznego podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej (t = 1,3 s) dla układu z regulatorem ANFC pracującego z prędkością 50% (a) i 150% (b) wartości znamionowej

4.WNIOSKI

Celem pracy było opracowanie układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym (ANFC) odpornego na uszkodzenia czujnika prędkości kątowej. Wykazano, że zastosowanie tego typu rozwiązania poprawia pracę napędu podczas zmiany jego topologii na bezczujnikową wywołaną uszkodzeniem czujnika prędkości.

Czas detekcji ma istotny wpływ na wartość przeregulowania prędkości kątowej. Możliwe jest opracowanie detektora, cechującego się zdecydowanie krótszym czasem działania, a tym samym zmniejszenie skutków zmiany topologii struktury sterowania. W pracy zdecydowano się jednak na wykorzystanie bardzo prostego w konstrukcji systemu diagnostycznego cechującego się stosunkowo długim czasem potrzebnym na prawidłową diagnozę w celu dokładnego zilustrowania zjawisk zachodzących w na-

pędzie podczas zmiany struktury sterowania z układu z pomiarem prędkości na strukturę bezczujnikową.

LITERATURA

[1] SZABAT K., ORLOWSKA-KOWALSKA T., *Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, 1193–1206.

[2] ORLOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Control of the Drive System with Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 1, 228–240.

[3] YAGER R.R., FILEV D.P., *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, Wiley, 1994.

[4] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Adaptive neuro-fuzzy control of the sensorless induction motor drive system*, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. EPE – PEMC 2006, 1836–1841.

[5] ORLOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., DYBKOWSKI M., *Neuro-Fuzzy Adaptive Control of the IM Drive with Elastic Coupling*, EPE – PEMC 2008, Poznań, Poland, on CD.

[6] BENBOUZID M.E.H., DIALLOD D., ZERAOULIA M., *Advanced fault-tolerant control of induction motor drives for EV/HEV traction applications*, *from conventional to modern and intelligent techniques*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56, 519–528.

[7] CAMPOS-DELGADO D.U., ESPINOZA-TREJO D.R., PALACIOS E., *Fault-tolerant control in variable speed drives*, *a survey*, Electric Power Applications IET, 2008, 2 (2), 121–134.

[8] 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, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2013.

[9] ORLOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.

[10] KLIMKOWSKI K., DYBKOWSKI M., *An influence of the chosen sensors faults to the performance of induction motor drive system working in vector control method*, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering, 2014, No. 77, 185–192 (in Polish).

[11] KLIMKOWSKI K., DYBKOWSKI M., *An analysis of the chosen sensors fault tolerant induction motor drive*, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering, 2014, No. 77, 193–200 (in Polish).

FAULT TOLERANT DIRECT TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTOR WITH ADAPTIVE NEURO-FUZZY CONTROLLER

In the paper the possibility of adaptive neuro-fuzzy controller application in the Direct Torque Controlled (DTC-SVM) induction motor drive system was presented. Simulation results of the vector controlled induction motor drive system during the speed sensor faults were illustrated. System was checked during the control topology changes. Control structure was tested and checked during different drive operations. Simulation results were obtained using Sim Power System.