

*DTC-SVM, sterowanie wektorowe, silnik indukcyjny,
regulator adaptacyjny, ANFC, kompensator neuronowo-rozmyty*

Mateusz DYBKOWSKI, Krzysztof SZABAT*

BEZCZUJNIKOWY UKŁAD NAPĘDOWY Z KOMPENSATOREM NEURONOWO-ROZMYTYM

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego (ang. *Adaptive Neuro Fuzzy Controller* – ANFC) w bezczujnikowej strukturze bezpośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym silnika indukcyjnego DTC-SVM. Sprawdzono możliwości jego aplikacji w charakterze tzw. kompensatora regulatora prędkości kątowej. Przeprowadzono badania eksperymentalne pozwalające na ocenę pracy napędu bezczujnikowego w różnych warunkach pracy. Zwrócono szczególną uwagę na zakres niskich prędkości kątowych, w których napędy tego typu mogą pracować w sposób niestabilny. Do estymacji prędkości i strumienia wirnika/stojana wykorzystano adaptacyjny estymator MRAS^{CC}. Badania eksperymentalne wykonano przy wykorzystaniu układu szybkiego prototypowania DS1103.

1. WPROWADZENIE

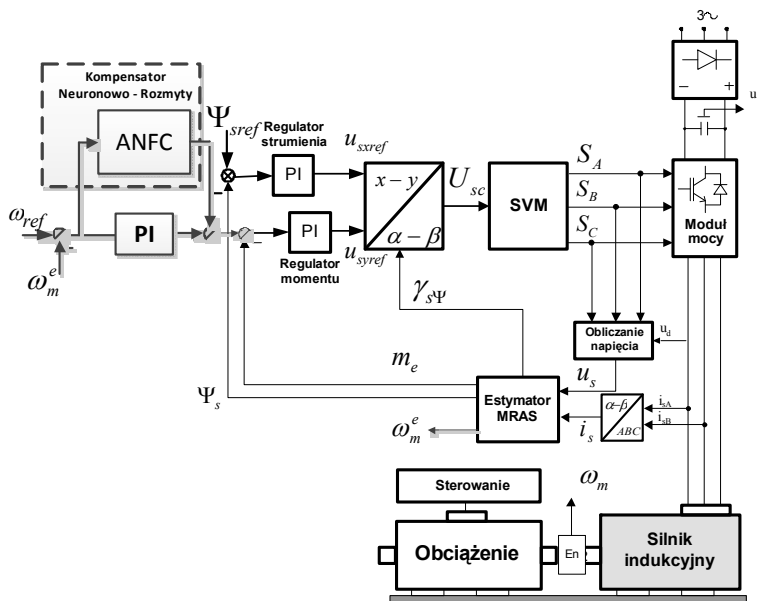
Układy bezczujnikowe stanowią alternatywne rozwiązanie dla napędów, w których często dochodzi do awarii układu pomiaru prędkości kątowej. W ostatnim dziesięcioleciu można zaobserwować intensywny rozwój systemów napędowych z silnikami indukcyjnymi [1], [3], które pozbawione są czujników wielkości mechanicznych. W ich miejsce wykorzystywane są estymatory zmiennych stanu. Układy takie nazywane są napędami bezczujnikowymi (ang. *sensorless*) [3]. Poza zwiększeniem bezpieczeństwa napędu eliminacja czujników prędkości obrotowej pozwala na minimalizację kosztów, redukcję przestrzeni zajmowanej przez napęd. Często estymatory zmiennych stanu (prędkości kątowej) wykorzystywane są jako układy redundantne [2]. Takie podejście powoduje zwiększenie bezpieczeństwa kompletnego napędu elektrycznego.

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

Jednym z podstawowych założeń stawianym napędom elektrycznym jest ich stabilna praca w szerokim zakresie zmian prędkości kątovej i przy zmienności parametrów napędów [1]–[3]. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w napędach bezczujnikowych, które w otoczeniu niskich prędkości mogą pracować błędnie. Dlatego w niniejszej pracy przedstawiono możliwości wykorzystania Adaptacyjnego Neuronowo-Rozmytego Regulatora (ANFC – *Adaptive Neuro Fuzzy Controller*), jako tzw. kompensatora w strukturze bezczujnikowej DTC-SVM. Do estymacji prędkości kątovej i strumienia stojana i/lub wirnika wykorzystano estymator adaptacyjny MRAS^{CC} [3].

2. MODEL MATEMATYCZNY BEZCZUJNIKOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO DTC-SVM Z KOMPENSATOREM ANFC

W niniejszej pracy analizie poddana została struktura bezpośredniego sterowania momentem (DTC-SVM) [3]. Schemat ideowy bezczujnikowego układu DTC-SVM przedstawiono odpowiednio na rys. 1.



Rys. 1. Struktura układu bezpośredniego sterowania momentem dla napędu z silnikiem indukcyjnym z kompensatorem neuronowo-rozmytym

Wraz z rozwojem metod sterowania wykorzystujących koncepcję DTC układy te stają się coraz bardziej złożone i zależne od parametrów schematu zastępczego SI.

Można powiedzieć, że najnowsze metody sterowania DTC-SVM (bezpośrednie sterowanie momentu) coraz bardziej przypominają klasyczną metodę DFOC (ang. *Direct Field Oriented Control*) [2], [3]. Do ich prawidłowego działania niezbędna staje się transformacja współrzędnych, bloki estymacji strumienia wirnika i/lub stojana, a ich wewnętrzna struktura często wykorzystuje model matematyczny maszyny do obliczania odpowiednich wielkości strumienia zadanego lub kąta.

Składowe strumienia stojana niezbędne do prawidłowej pracy układu DTC-SVM można wyznaczyć z zależności:

$$\Psi_s^e = \frac{x_m}{x_r} \Psi_r^i + x_s \sigma \mathbf{i}_s, \quad \text{gdzie} \quad \sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_s x_r}. \quad (1)$$

Do wyznaczenia składowych strumienia wirnika wykorzystano model prądowy silnika indukcyjnego:

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

Do estymacji prędkości kątovej wykorzystano estymator MRAS^{CC} [3]. W układzie tym 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]:

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

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

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

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

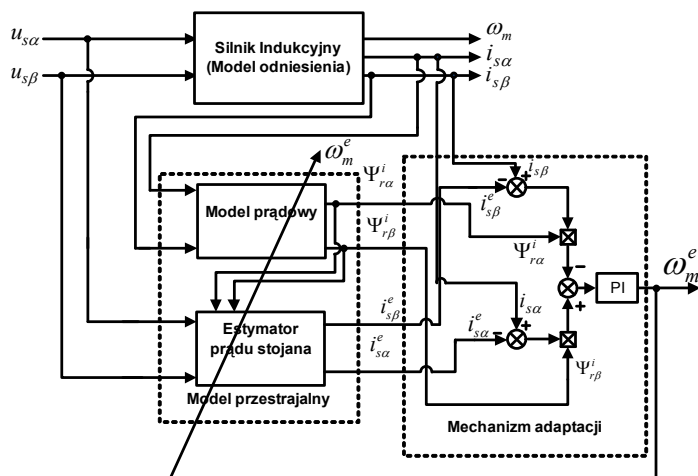
Otrzymywana w ten sposób prędkość kątowa wykorzystywana jest do przestrajania zarówno modelu prądowego jak i estymatora prądu stojana [2].

Schemat ideowy estymatora prędkości i strumienia wirnika typu MRAS pokazano na rys. 2.

W pracy zaproponowano wykorzystanie regulatora adaptacyjnego neuronowo-rozmytego (ANFC) [5] w systemie sterowania wektorowego silnika indukcyjnego, jako kompensatora neuronowo-rozmytego, poprawiającego pracę klasycznego regulatora prędkości typu PI.

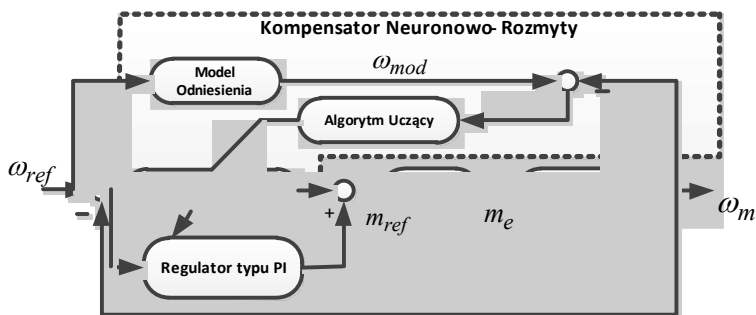
Rolą systemu adaptacyjnego jest zapewnienie stabilnej pracy napędu przy zmianach parametrów i warunków jego pracy [5]. Dzięki zastosowaniu dodatkowo wstęp-

nie nastrojonego regulatora PI uzyskuje się zapewnienie stabilnej pracy napędu w początkowej fazie jego pracy.



Rys. 2. Schemat blokowy estymatora MRAS^{CC}

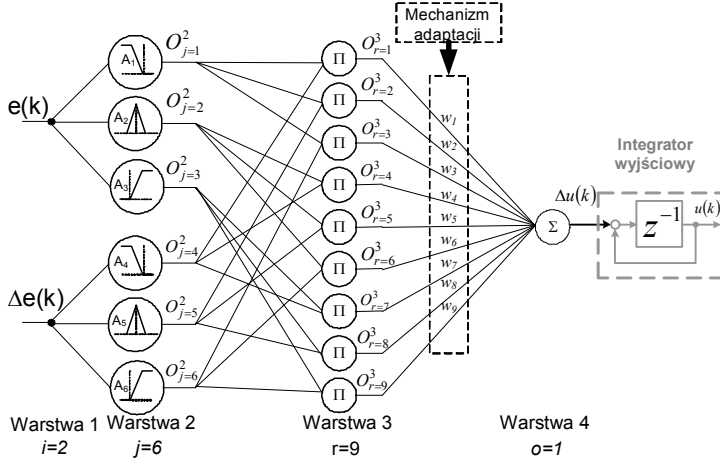
Schemat ideowy struktury sterowania kaskadowego z klasycznym regulatorem PI oraz z kompensatorem neuronowo-rozmytym przedstawiono na rys. 3, a schemat ideowy regulatora neuronowo-rozmytego na rys. 4.



Rys. 3. Schemat ideowy układu napędowego z kompensatorem neuronowo-rozmytym

Wykorzystanie regulatora ANFC jako kompensatora neuronowo-rozmytego nie zapewnia tak szybkiego procesu adaptacji, jak ma to miejsce w przypadku wykorzystania go jako podstawowego układu [4], jednak zapewnienia stabilność napędu podczas różnych warunków pracy, w tym także przy rozruchu dla zerowych wag początkowych.

W niniejszej pracy założono, że dominującym układem jest regulator PI z ograniczeniami sygnałów wyjściowych o dobranych nastawach K_p i T_i . Regulator adaptacyjny zapewni poprawę działania systemu w dłuższym przedziale czasowym.



Rys. 4. Struktura regulatora rozmytego (PD, jeśli integrator wyjściowy jest pominięty, PI jeśli integrator jest wykorzystywany) [2], [6]

Jako algorytm adaptacji wykorzystano metodę bazującą na lokalnym gradiencie, w celu adaptacji wag parametrów warstwy rozmytej sieci neuronowej. Funkcję celu definiuje się w następujący sposób [6]:

$$F = \frac{(\omega_m - \omega)^2}{2}. \quad (5)$$

W celu przyspieszenia działania algorytmu użyta została modyfikacja algorytmu optymalizacji polegająca na wprowadzeniu sygnału proporcjonalnego do zmiany błędu:

$$\delta_o \cong e_m - \Delta e_m. \quad (6)$$

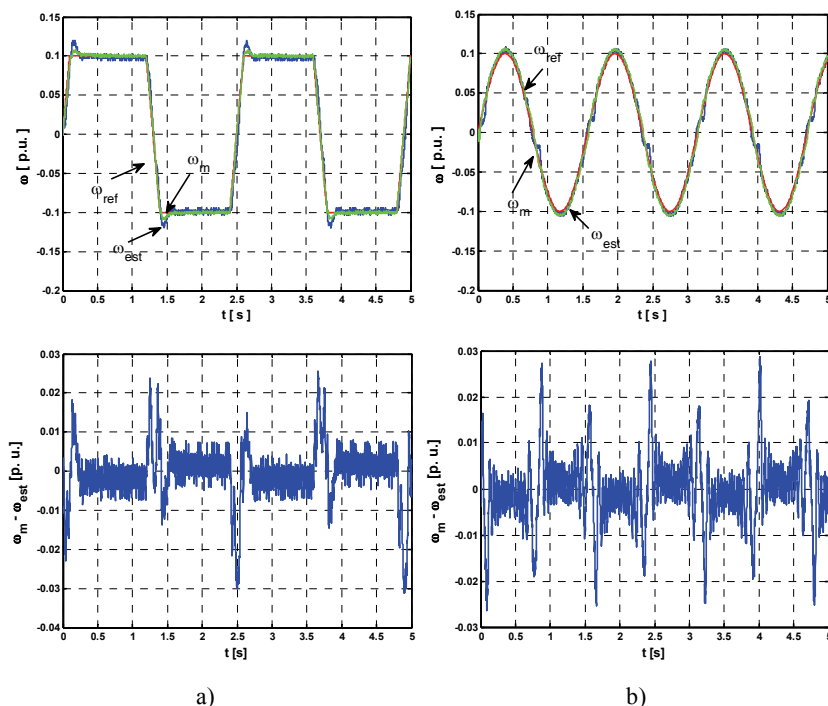
Wprowadzenie sygnału proporcjonalnego Δe_m zapewnia większą swobodę w kształtowaniu właściwości algorytmu. Natomiast rozbiecie współczynnika uczenia γ na dwie niezależne składowe k_p i k_d ułatwia uzyskanie korzystniejszych właściwości dynamicznych sterowanego obiektu. Po modyfikacjach algorytm przedstawia się następująco [5]:

$$\Delta w_j(k+1) = w_j(k) + (k_p e_m + k_d \Delta e_m) u_j. \quad (7)$$

3. ANALIZA PRACY BEZCZUJNIKOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO DTC-SVM Z KOMPENSATOREM NEURONOWO ROZMYTYM

Wykonano badania eksperymentalne bezczujnikowego napędu sterowanego metodą DTC-SVM zarówno z klasycznym regulatorem PI w torze regulacji prędkości kątowej, jak i układu z dodatkowym kompensatorem neuronowo-rozmytym typu PD.

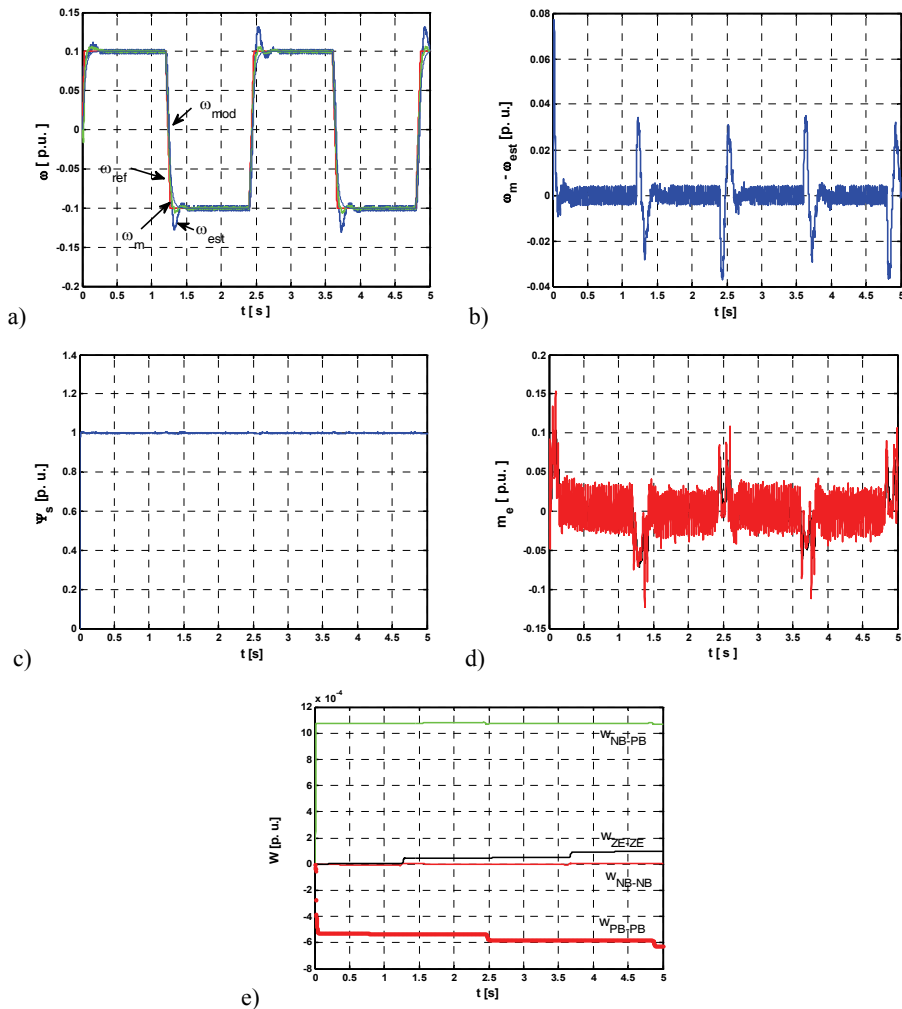
Na rysunku 5 przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych napędu bezczujnikowego DTC-SVM z klasycznym regulatorem liniowym typu PI.



Rys. 5. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DTC-SVM z regulatorem PI; przy skokowych zmianach prędkości kątowej $\omega_m = \pm 0,1 \omega_{mN}$, (a) oraz przy wymuszeniu sinusoidalnym $\omega_m = \pm 0,1 \omega_{mN}$ (b)

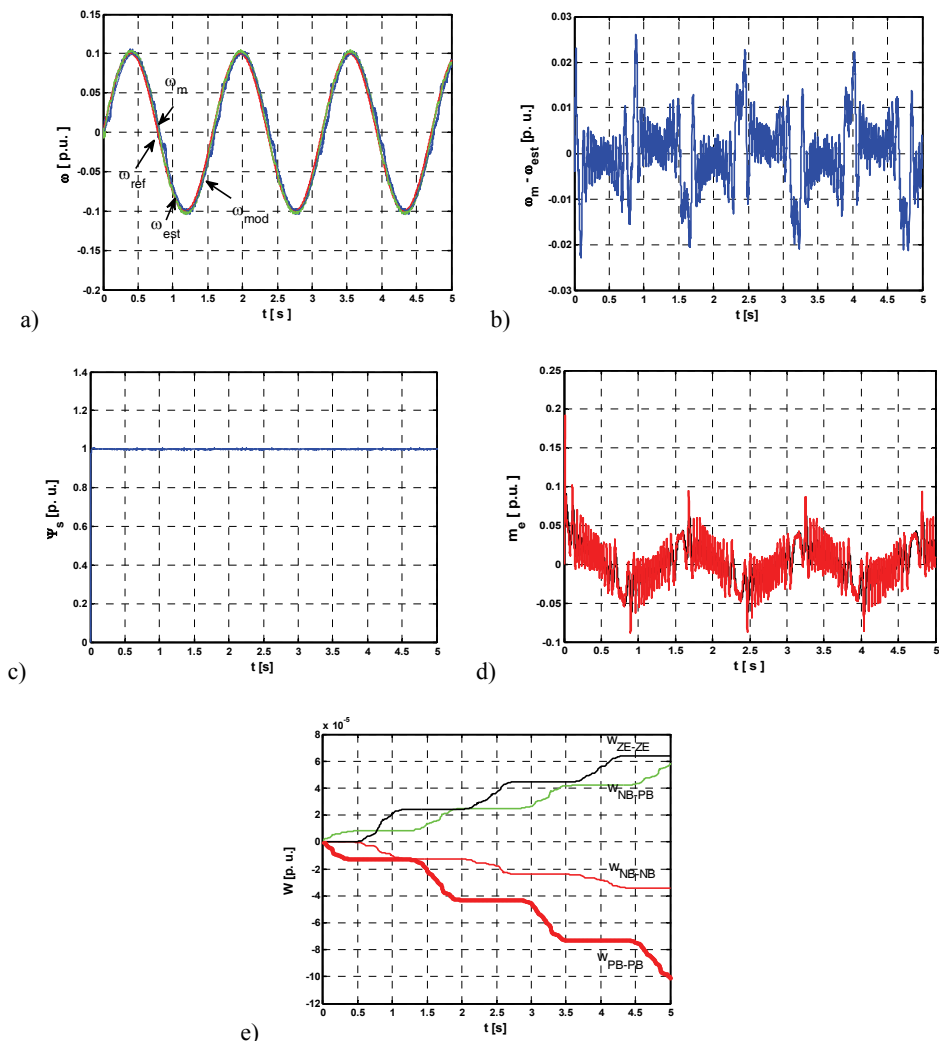
Struktura sterowania została sprawdzona przy pracy nawrotnej z prędkością zadaną 10% wartości znamionowej oraz dla wymuszenia sinusoidalnego. Badania miały na celu zilustrowanie zachowania się napędu w otoczeniu niskich prędkości kątowych oraz dla różnej dynamiki jej zmian. Napęd bezczujnikowy działa w sposób stabilny dla analizowanych wymuszeń. Błędy estymacji prędkości kątowej oscylują wokół zera. Podczas przejścia prędkości przez zero błędy te się zwiększają.

Na kolejnych przebiegach pokazano wpływ zastosowania kompensatora neuronowo-rozmytego w beczujnikowej strukturze sterowania DTC-SVM (rys. 6, 7).



Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych beczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DTC-SVM z regulatorem PI i kompensatorem neuronowo-rozmytym; przy skokowych zmianach prędkości kątowej $\omega_m = \pm 0.1 \omega_{mN}$, prędkości (a), błąd odtworzenia prędkości (b), moduł strumienia stojana (c), moment elektromagnetyczny (d), wybrane wagi (e)

Widoczne jest, że prędkość mierzona pokrywa się z prędkością estymowaną i prędkością z modelu napędu (rys. 6a, 7a) dla wszystkich wymuszeń prędkości kątowej. Podczas przejścia prędkości przez zero prędkość estymowana pokrywa się z wartością mierzoną.



Rys. 7. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DTC-SVM z regulatorem PI i kompensatorem neuronowo-rozmytym; przy sinusoidalnych zmianach prędkości kątowej $\omega_m = \pm 0.1 \omega_{mN}$; prędkości (a), błąd odtworzenia prędkości (b), moduł strumienia stojana (c), moment elektromagnetyczny (d), wybrane wagi (e)

Błędy odtwarzania prędkości w układzie DTC-SVM (rys. 6b, 7b) z kompensatorem neuronowo-rozmytym są mniejsze niż miało to miejsce w układzie z regulatorem PI (ulegają one stopniowemu zmniejszeniu wraz z czasem). Strumień stojana utrzymywany jest na stałej wartości (rys. 6c, 7c), wagi regulatora adaptacyjnego różną od wartości równej zero i powodują, że napęd adaptuje się do aktualnych wa-

runków pracy napędu. Dla przebiegów o większej dynamice szybkość ich zmian jest większa.

Na rysunku 7 przedstawiono działanie układu przy sinusoidalnym wymuszeniu prędkości kątowej. Widoczne jest lepsze śledzenie wartości zadanej przez napęd niż miało to miejsce w układzie wyłącznie z regulatorem typu PI. Podczas przejścia prędkości przez zero błąd odtworzenia prędkości jest niewielki (mniejszy niż w przypadku układu bez kompensatora).

4. WNIOSKI

Celem pracy była analiza pracy bezczujnikowego układu napędowego sterowanego metodą DTC-SVM z kompensatorem neuronowo-rozmytym w torze regulacji prędkości kątowej. Wykazano, że w przypadku zastosowania dodatkowego kompensatora neuronowo-rozmytego w układzie bezczujnikowym uzyskano poprawę działania napędu. Widoczna jest ona przede wszystkim podczas wolnych zmian prędkości.

Zastosowanie dodatkowego układu adaptacyjnego komplikuje budowę napędu jednak gwarantuje dopasowanie się obiektu do aktualnych warunków pracy.

Praca zrealizowana w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji UMO-2011/03/B/ST7/02517 (2012–2015).

LITERATURA

- [1] DYBKOWSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KAPELA D., *Analiza wpływu metod adaptacji regulatorów prędkości na właściwości dynamiczne napędu indukcyjnego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów elektrycznych, Nr 64, Seria: Studia i Materiały, Nr 30, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2010.
- [2] DYBKOWSKI M., *Speed estimation in the vector controlled induction motor drive – selected problems*, Scientific Works of Inst. El. Machines Drives and Measurements, Vol. 67, Monographs, No. 20, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2013.
- [3] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [4] PIEGAT A., *Modelowanie i sterowania rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
- [5] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [6] CHUN-FEI HSUA, PING-ZONG LINB, TSU-TIAN LEEC, CHI-HSU WANGB, *Adaptive asymmetric fuzzy neural network controller design via network structuring adaptation*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 159, Iss. 20, 2008, 2627–2649.
- [7] FAA-JENG LIN, RONG-JONG WAI, PAO-CHUAN LIN, *Robust Speed Sensorless Induction Motor Drive*, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, Vol. 35, Iss. 2, 1999, 566–578.

SENSORLESS DIRECT TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTOR WITH ADAPTIVE NEURO-FUZZY COMPENSATOR

The possibility of application the adaptive neuro-fuzzy controller in the structure of Direct Torque Control as a so-called neuro-fuzzy speed compensator are presented in the paper. In the paper the simulation and experimental results of the vector controlled induction motor drive system under different conditions are presented. The simulation tests carried out in Matlab/Sim Power System software, DS1103 card is applied in the experimental tests.