Mateusz DYBKOWSKI, Krzysztof SZABAT

Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

doi:10.15199/48.2016.02.54

Analiza bezczujnikowego układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z kompensatorem neuronowo rozmytym

Streszczenie. *W artykule opisano możliwości wykorzystania adaptacyjnego regulatora neuronowo rozmytego (ang. Adaptive Neuro Fuzzy Controller - ANFC) w strukturach bezczujnikowego wektorowego sterowania DTC-SVM i DFOC silnika indukcyjnego 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 estymator MRAS^{CC}. Badania eksperymentalne wykonano przy wykorzystaniu układu szybkiego prototypowania DS1103.*

Abstract. *The possibility of application the Adaptive Neuro Fuzzy Controller - ANFC in the structure of sensorless vector controlled induction motor drive (DTC-SVM and DFOC) as a so-called neuro fuzzy speed compensator are presented in the paper. In the paper the experimental results of the vector controlled induction motor drive system under different conditions are presented. Drive operations in the low speed region are presented. To the rotor / stator flux and rotor speed reconstruction the MRAS^{CC} estimator is used. DS1103 card is applied in the experimental tests. (**Analysis of the sensorless vector controlled induction motor drive with adaptive neuro fuzzy compensator**).*

Słowa kluczowe: DFOC, DTC-SVM regulator adaptacyjny, MRAC, MRAS, kompensator, sterowanie wektorowe
Keywords: DFOC, adaptive controller, MRAC, MRAS, compensator, vector control algorithm

Wstęp

W ostatnim dziesięcioleciu można zaobserwować intensywny rozwój układów napędowych z silnikami indukcyjnymi [1], [3], [8], które pozbawione są czujników wielkości mechanicznych. Układy takie nazywane są napędami bezczujnikowymi (*ang. sensorless*). Eliminacja czujników prędkości obrotowej pozwala na minimalizację kosztów, redukcję przestrzeni zajmowanej przez napęd. Dodatkowo wykorzystanie estymatorów zmiennych stanu jako układów redundantnych powoduje zwiększenie bezpieczeństwa kompletnego napędu elektrycznego.

Jednym z podstawowych założeń stawianym napędom elektrycznym jest ich stabilna praca w szerokim zakresie zmian prędkości kątowej i przy zmienności parametrów napędów [1], [2], [3], [8], [9].

Układami, które są najczęściej wykorzystywane w przemysłowych układach napędowych są struktury DTC-SVM (Direct Torque Control) i DFOC (Direct Field Oriented Control) [2], [3]. Pozwalają one na wykonanie złożonych struktur sterowania dla napędów pozycyjnych jak również dla napędów momentowych (trakcyjnych) [2], [10], [11].

W niniejszej pracy przedstawiono możliwości wykorzystania Adaptacyjnego Regulatora Neuronowo Rozmytego, jako tzw. kompensatora w strukturach bezczujnikowych DTC-SVM i DFOC.

Do estymacji prędkości kątowej i strumienia stojana i/lub wirnika wykorzystano estymator adaptacyjny MRAS^{CC}.

Adaptacyjny układ neuronowo rozmyty jako kompensator w obwodzie regulacji prędkości

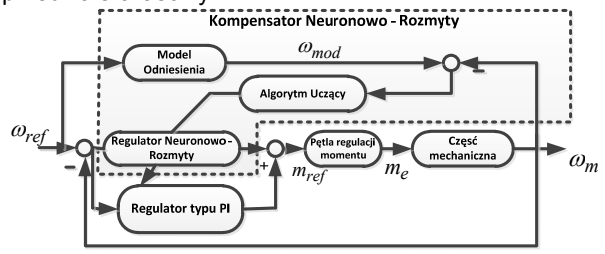
W niniejszym artykule zaproponowano wykorzystanie regulatora adaptacyjnego neuronowo - rozmytego (ANFC) w systemie sterowania wektorowego silnika indukcyjnego, jako kompensatora neuronowo rozmytego, poprawiającego pracę klasycznego regulatora prędkości typu PI.

Rolą systemu adaptacyjnego jest zapewnienie stabilnej pracy napędu przy zmianach parametrów napędu i warunków jego pracy. Rolą regulatora PI jest zapewnienie stabilności w początkowej fazie pracy, dzięki wstępnie dobranym parametrom.

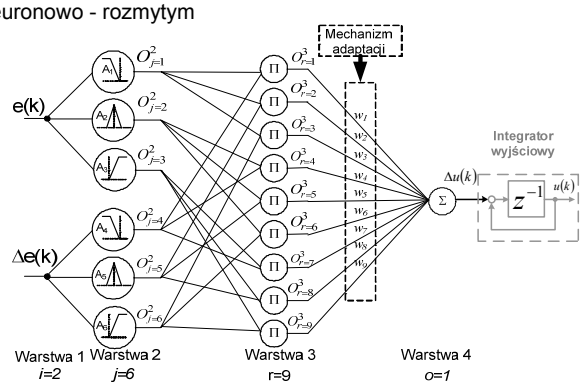
Schemat ideowy struktury sterowania kaskadowego z klasycznym regulatorem PI oraz z kompensatorem neuronowo – rozmytym przedstawiono na Rys. 1, a schemat ideowy regulatora neuronowo rozmytego na Rys. 2.

Wykorzystanie regulatora ANFC jako kompensatora neuronowo rozmytego nie zapewnia tak szybkiego procesu adaptacji jak ma to miejsce w przypadku wykorzystania go jako podstawowego układu, 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 zapewnia poprawę działania systemu w dłuższym przedziale czasowym.



Rys. 1. Schemat ideowy układu napędowego z kompensatorem neuronowo - rozmytym



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

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

$$F = \frac{(\omega_m - \omega)^2}{2} \tag{1}$$

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

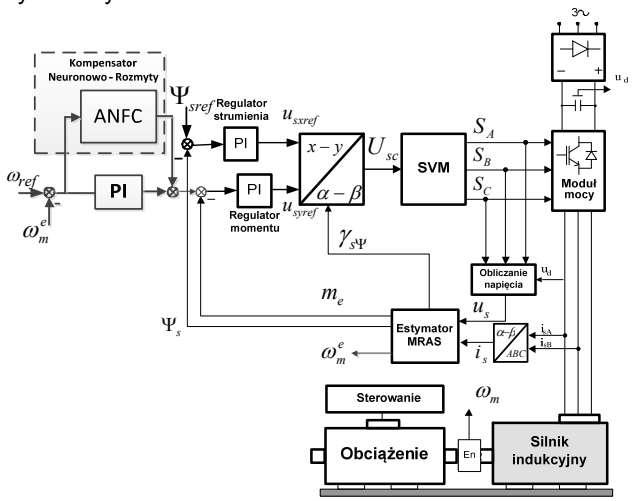
(2) $$\delta_o \cong e_m + \Delta e_m$$

Wprowadzenie sygnału proporcjonalnego Δe_m zapewnia większą swobodę w kształtowaniu właściwości algorytmu. Natomiast rozbicie 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:

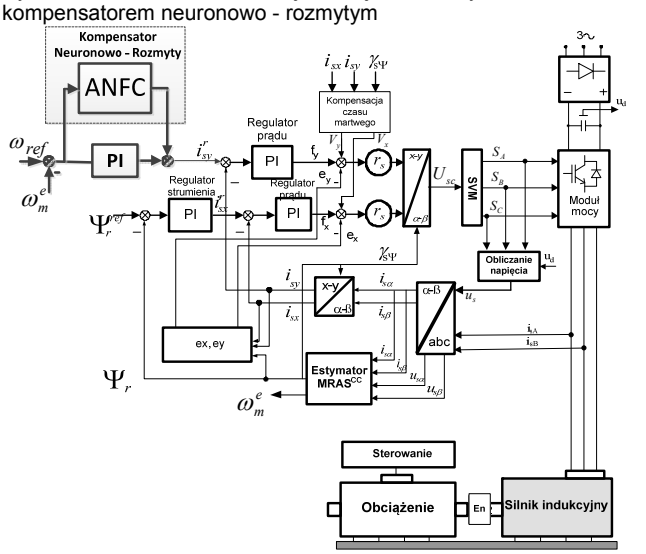
(3) $$\Delta w_j(k+1) = w_j(k) + (k_p e_m + k_d \Delta e_m) u_j$$

Bezczujnikowy układ napędowy sterowany metodami DFOC i DTC - SVM z kompensatorem neuronowo rozmytym

W niniejszej pracy analizie poddane zostały dwie struktury sterowania wektorowego. Bezpośrednie sterowanie momentem (DTC-SVM) oraz sterowanie polowo zorientowane DFOC [3]. Schemat ideowy bezczujnikowego układu DTC-SVM i DFOC przedstawiono odpowiednio na Rys. 3 i Rys. 4



Rys. 3. Schemat bezczujnikowej struktury DTC-SVM z kompensatorem neuronowo - rozmytym



Rys. 4. Struktura bezczujnikowego układu DFOC silnikiem indukcyjnym z kompensatorem neuronowo - rozmytym

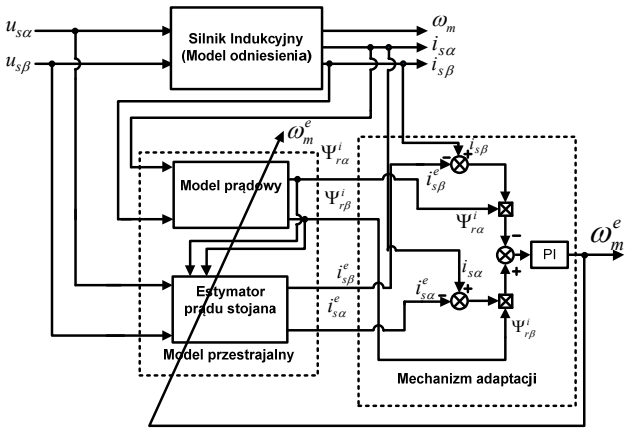
Idea sterowania z wykorzystaniem metody polowo zorientowanej polega na wymuszeniu w zamkniętej strukturze sterowania polowo zorientowanych składowych wektora prądu stojana i_{sx} oraz i_{sy}, które kształtują strumień wirnika i moment elektromagnetyczny.

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*). 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:

(4) $$\boldsymbol{\Psi}_s^e = \frac{x_m}{x_r}\boldsymbol{\Psi}_r^e + x_s \sigma \mathbf{i}_s$$

Estymator MRAS^{CC} [2] jest układem adaptacyjnym, w którym prąd stojana silnika indukcyjnego, traktowanego jako układ odniesienia, jest porównywany z prądem odtwarzanym za pomocą modelu napięciowo-prądowego obwodu stojana, przestrajanego wyznaczanym za pomocą algorytmu adaptacji sygnałem prędkości wirnika [2] (Rys. 5). Taki model wektora prądu stojana wymaga wcześniejszego wyznaczenia składowych wektora strumienia wirnika. W estymatorze MRAS^{CC} [2] proponuje się wykorzystanie do tego celu przestrajalnego modelu prądowego strumienia wirnika. Schemat ideowy estymatora prędkości i strumienia wirnika typu MRAS pokazano na Rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy estymatora MRAS^{CC}

Estymator prądu stojana otrzymuje się z modelu napięciowego i prądowego strumienia wirnika [2].

(5) $$\frac{d\mathbf{i}_s^e}{dt} = -\mathbf{i}_s^e\frac{r_r x_m^2 + x_r^2 r_s}{\sigma T_N x_s x_r^2} + \frac{1}{\sigma T_N x_s}\mathbf{u}_s + \frac{x_m r_r}{\sigma T_N x_s x_r^2}\boldsymbol{\Psi}_r - j\omega_m \boldsymbol{\Psi}_r \frac{x_m}{\sigma T_N x_s x_r}$$

Estymowany prąd stojana jest wykorzystywany wyłącznie w mechanizmie obliczania prędkości kątowej.

(6) $$\omega_m^e = K_P\left(1+\frac{1}{sT_I}\right)e_\Psi^{i\Psi}, \quad e_\Psi^{i\Psi} = e_{i_{s\alpha}}\Psi_{r\beta} - e_{i_{s\beta}}\Psi_{r\alpha}, \quad e_{i_{s\alpha,\beta}} = i_{s\alpha,\beta} - i_{s\alpha,\beta}^e$$

Do wyznaczenia składowych strumienia wirnika wykorzystuje się model prądowy silnika indukcyjnego:

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

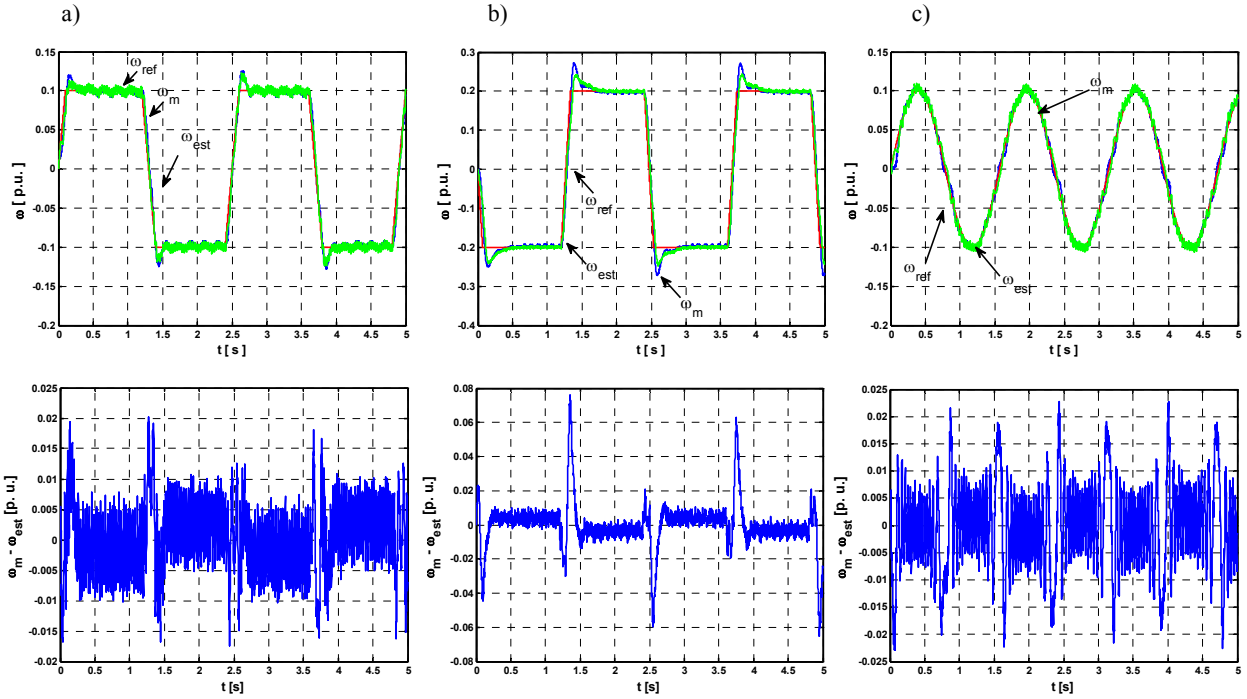
W celach porównawczych do pomiaru prędkości kątowej wykorzystano enkoder inkrementalny o rozdzielczości *5000imp./obr*.

Analiza pracy bezczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym i adaptacyjnym kompensatorem neuronowo rozmytym

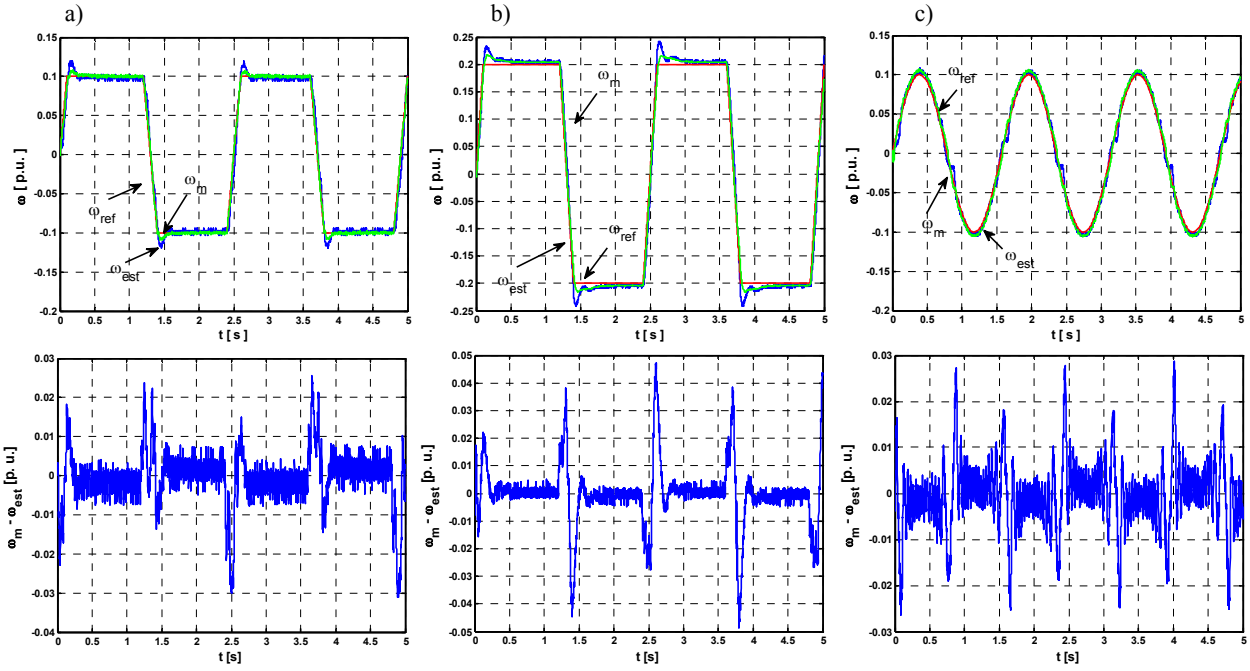
Wykonano badania eksperymentalne bezczujnikowego napędu sterowanego metodami DTC-SVM i DFOC zarówno z klasycznym regulatorem PI w torze regulacji prędkości

kątowej jak i układu z dodatkowym kompensatorem neuronowo rozmytym typu PD.

Na Rys. 6 przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych napędu bezczujnikowego DFOC, a na Rys. 7 DTC-SVM z klasycznym regulatorem PI.

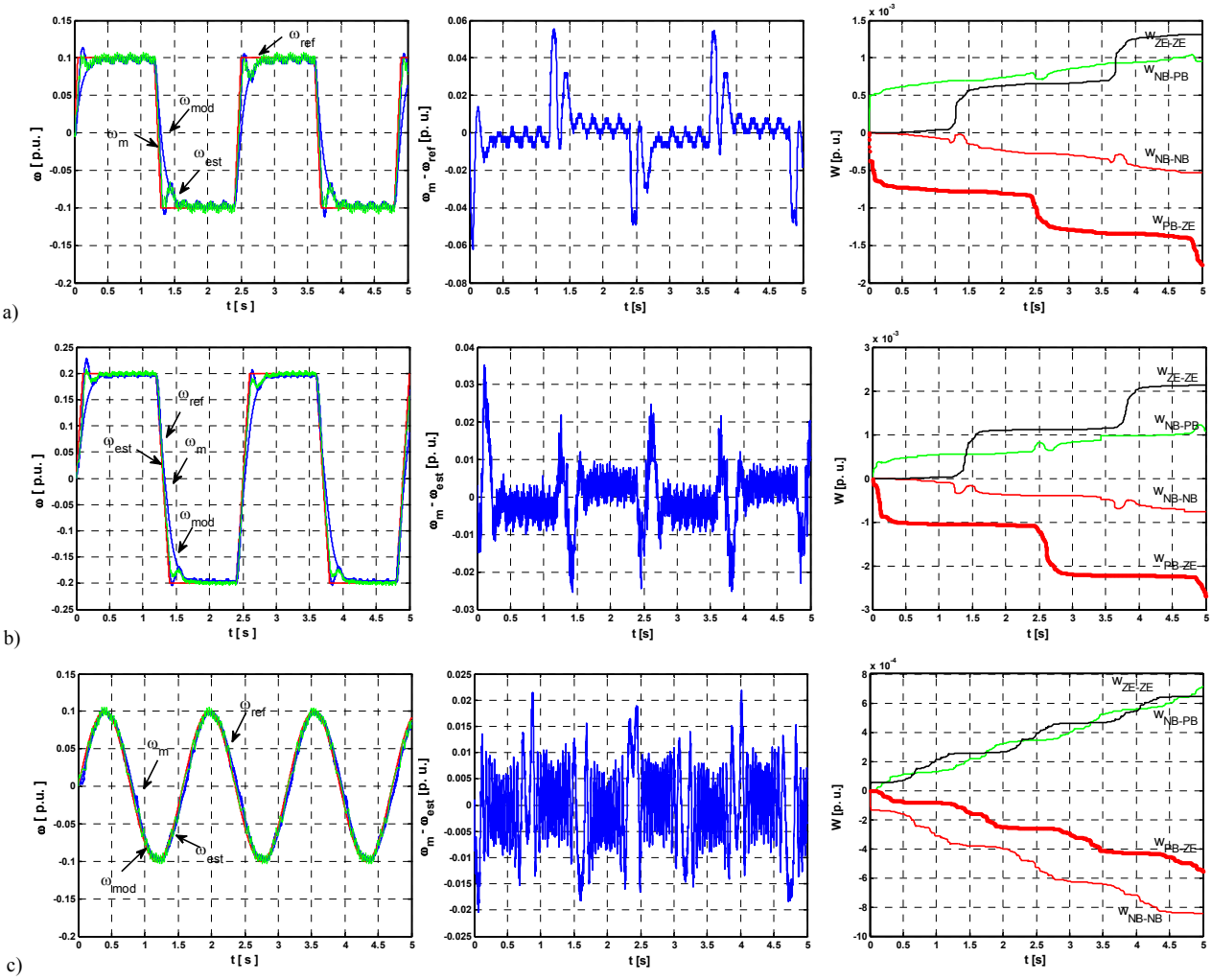


Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DFOC z regulatorem PI; przy skokowych zmianach prędkości kątowej $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$, (a) $\omega_m = \pm 0.2\omega_{mN}$ (b) przy wymuszeniu sinusoidalnym $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$ (c)

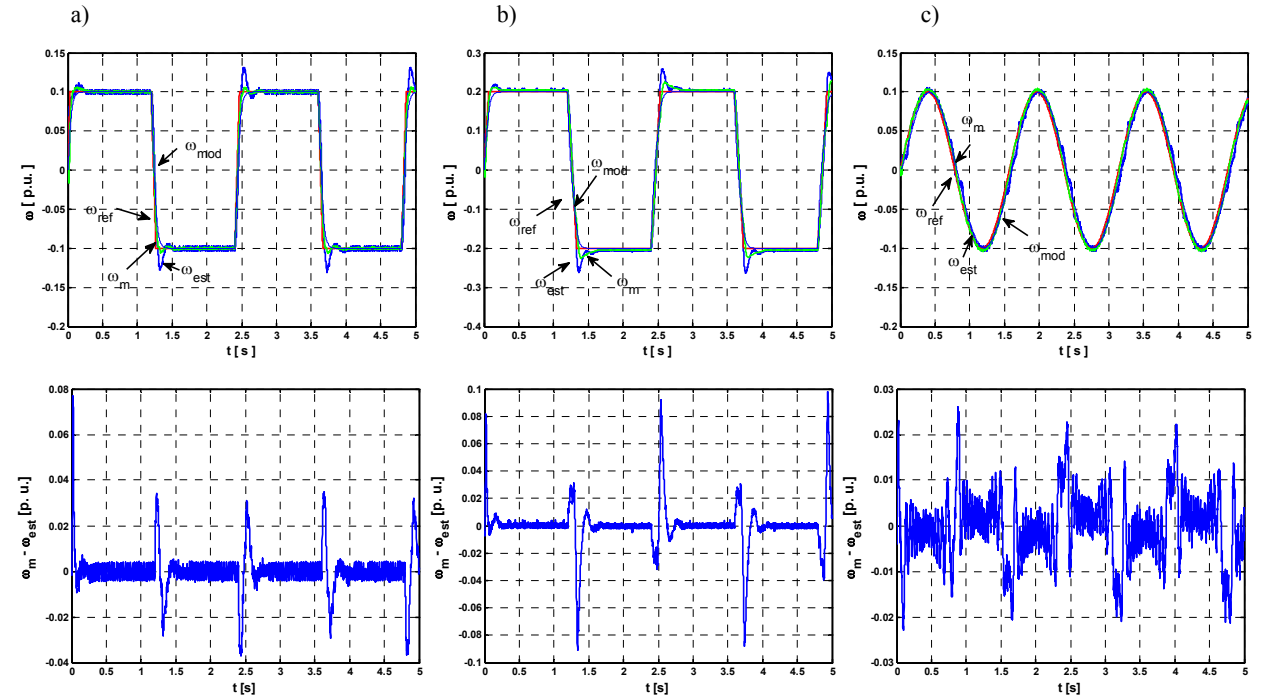


Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DTC-SVM z regulatorem PI; przy skokowych zmianach prędkości kątowej $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$, (a) $\omega_m = \pm 0.2\omega_{mN}$ (b) przy wymuszeniu sinusoidalnym $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$ (c)

Zarówno struktura sterowania DFOC i DTC-SVM zostały sprawdzone przy pracy nawrotnej z prędkością zadaną 10% i 20% wartości znamionowej oraz dla wymuszenia sinusoidalnego. Badania miały na celu zilustrowanie zachowania się napędu w otoczeniu niskich prędkości kątowych dla różnej dynamiki jej zmian. Oba bezczujnikowe układy sterowania działają 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 bezczujnikowej strukturze sterowania DFOC (Rys. 7) oraz DTC-SVM (Rys. 8).



Rys. 7. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DFOC z regulatorem PI i kompensatorem neuronowo - rozmytym; przy skokowych zmianach prędkości kątowej $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$, (a) $\omega_m = \pm 0.2\omega_{mN}$ (b) przy wymuszeniu sinusoidalnym $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$ (c)



Rys. 8. Wyniki badań eksperymentalnych bezczujnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym metodą DTC-SVM z regulatorem PI i kompensatorem neuronowo - rozmytym; przy skokowych zmianach prędkości kątowej $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$, (a) $\omega_m = \pm 0.2\omega_{mN}$ (b) przy wymuszeniu sinusoidalnym $\omega_m = \pm 0.1\omega_{mN}$ (c)

Wyraźnie widoczne jest, że prędkość mierzona pokrywa się z prędkością estymowaną i prędkością z modelu napędu (Rys. 7, Rys. 8) dla wszystkich wymuszeń prędkości kątowej. Podczas przejścia prędkości przez zero prędkość estymowana także pokrywa się z wartością mierzoną. Błędy odtwarzania prędkości w układach DFOC (Rys. 7) i DTC-SVM (Rys. 8) z kompensatorem neuronowo – rozmytym są mniejsze niż miało to miejsce w układzie z regulatorem PI. Strumień wirnika (stojana) utrzymywany jest na stałej wartości, wagi regulatora adaptacyjnego rosną od wartości równej zero i powodują, że napęd adaptuje się do aktualnych warunków pracy napędu. Dla przebiegów o większej dynamice szybkość ich zmian jest większa.

Na Rys. 7 c) i Rys. 8 c) 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).

Zaletą zaproponowanego systemu jest możliwość jego płynnego dopasowania się do aktualnych warunków pracy (przy zmianach parametrów elektrycznych i mechanicznych napędu). Z przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że zastosowanie kompensatora najlepiej wpływa na pracę napędu momentowego DTC-SVM.

Podsumowanie

Celem pracy była analiza pracy bezczujnikowego układu napędowego sterowanego metodami DFOC oraz 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).

***Autorzy**:*
dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, dr hab. inż. Krzysztof Szabat, prof. PWr, Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl, krzysztof.szabat@pwr.edu.pl

LITERATURA

[1] M. Dybkowski, T. Orłowska-Kowalska, D. Kapela, *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, Wrocław 2010

[2] Dybkowski M., *Speed estimation in the vector controlled induction motor drive – selected problems*, Scietnific Works of Inst. El. Machines Drives and Measurements,, vol. 67, series Monographs, no 20, Wroclaw University of Technology Press, 2013

[3] T. Orłowska-Kowalska, *Bezczujnikowe Ukłakdy Napędowe z Silnikami Indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003

[4] Piegat A, *Modelowanie i sterowania rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999,

[5] K. Szabat, *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, Issue 20, 2008, pp. 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, Issue 2, 1999, pp. 566 -578

[8] Gierlotka K., Układy sterowania napędów elektrycznych z elementami sprężystymi, Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, nr 1181, Gliwice, 1992

[9] Janiszewski D., Bezczujnikowy napęd z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych oparty na bezśladowym filtrze Kalmana, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)86 (2010), 169-174

[10] Brock S., Sterowanie ślizgowe napędem bezpośrednim z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr 4,134-137

[11] Pajchrowski T., Zastosowanie struktury MFC do odpornej regulacji prędkości obrotowej, Przegląd Elektrotechniczny, 86, (2010), nr 2, 319-324