

*DTC-SVM, ANFC, regulator adaptacyjny,
MRAS^{CC}, silnik indukcyjny,
napęd bezczujnikowy, wrażliwość*

Piotr DERUGO*, Mateusz DYBKOWSKI*

ANALIZA WPLYWU WARTOŚCI POCZĄTKOWYCH WEKTORA WAG NA PRACĘ BEZCZUJNIKOWEGO UKŁADU ADAPTACYJNEGO STEROWANIA DTC-SVM

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania neuronowo-rozmytego regulatora adaptacyjnego w bezczujnikowej strukturze bezpośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym silnika indukcyjnego DTC-SVM. Przeanalizowano wpływ nastaw początkowych wartości wag regulatora na działanie układu sterowania silnika w przypadku błędnej identyfikacji parametrów silnika. Badania symulacyjne przeprowadzono z użyciem pakietu MATLAB-SIMULINK z biblioteką SimPowerSystems.

1. WPROWADZENIE

Ciągły rozwój układów napędowych z silnikami indukcyjnymi (SI) jest przyczyną konieczności ciągłego doskonalenia systemów sterowania takimi maszynami, w taki sposób aby móc je bezpiecznie używać w coraz to bardziej wymagających procesach [12], [13]. Istotnymi tendencjami widocznymi na świecie są badania nad układami bezczujnikowymi [4], [10], [3] a także nad różnego rodzaju układami adaptacyjnymi [2],[4],[9], [11]. Często spotyka się także rozwiązania wykorzystujące logikę rozmytą [7], [9], [15], [16]. W pracach [9], [3] przeprowadzono analizę adaptacyjnego bezczujnikowego układu sterowania prędkością silnika indukcyjnego w strukturze DFOC. Niniejsza praca ma na celu uzupełnienie tematu o analizę pracy silnika indukcyjnego w adaptacyjnej bezczujnikowej strukturze bezpośredniego sterowania momentem DTC-SVM oraz badaniu wpływu wag regulatora na pracę takiego napędu. Zagadnienie

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: piotr.derugo@pwr.wroc.pl

gdzie: m_e – moment elektromagnetyczny, x_M – reaktancja główna, σ – współczynnik rozproszenia, x_s, x_r – reaktancje własne uzwojeń stojana i wirnika, ψ_s, ψ_r – strumienie stojana i wirnika, δ_ψ – kąt pomiędzy wektorami strumieni wirnika i stojana.

Estymacja strumienia wirnika i momentu odbywa się za pomocą estymatora opartego na modelu prądowym maszyny indukcyjnej [8].

2.1. MODEL MATEMATYCZNY ESTYMATORA MRAS^{CC}

Model matematyczny estymatora MRAS^{CC} opisano szczegółowo w pracy [10]. Wartości składowych wektora strumienia wirnika obliczane są na podstawie modelu prądowego. Równanie estymatora prądu stojana można opisać za pomocą (2):

$$T_N \frac{d\hat{\mathbf{i}}_s}{dt} = \frac{1}{x_s \sigma} \left[\mathbf{u}_s - r_s \hat{\mathbf{i}}_s - \frac{r_r x_m^2}{x_r^2} \hat{\mathbf{i}}_s + \frac{x_m r_r}{x_r^2} \hat{\psi}_r - j \frac{x_m}{x_r} \hat{\psi}_r \hat{\omega}_m \right] \quad (2)$$

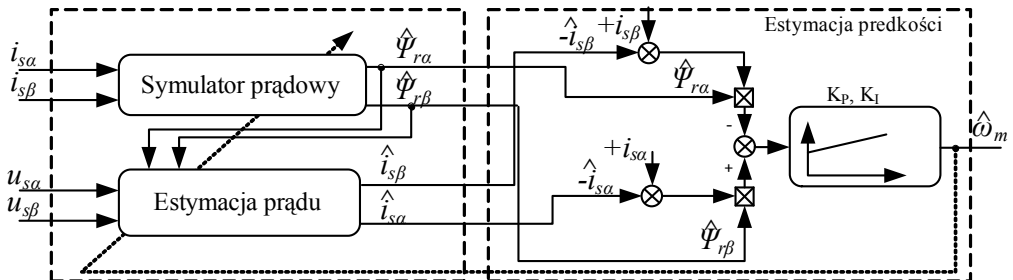
gdzie: $T_N = 1/2\pi f_{sN}$, f_{sN} – znamionowa częstotliwość stojana, $\hat{\mathbf{i}}_s$ – estymowany wektor prądu stojana, \mathbf{u}_s – estymowany wektor napięcia stojana, $\hat{\psi}_r$ – estymowany wektor strumienia wirnika, $\hat{\omega}_m$ – prędkość estymowana.

W estymatorze MRAS^{CC} prędkość kątowna otrzymywana jest na wyjściu regulatora PI, który w tym przypadku pełni rolę mechanizmu adaptacji. Wielkością wejściową regulatora jest sygnał zależny od aktualnej wartości strumienia wirnika i błędu estymacji składowych wektora prądu stojana. Mechanizm ten jest opisany zależnością:

$$\hat{\omega}_m = k_P [e_{is\alpha} \hat{\psi}_{r\beta} - e_{is\beta} \hat{\psi}_{r\alpha}] + k_I \int [e_{is\alpha} \hat{\psi}_{r\beta} - e_{is\beta} \hat{\psi}_{r\alpha}] dt \quad (3)$$

gdzie: $e_{is\alpha, \beta}$ – błąd estymacji prądu stojana, $\hat{\psi}_{r\beta}$, $\hat{\psi}_{r\alpha}$ – wartości estymowane strumienia wirnika w osiach α i β , k_I, k_P – współczynniki wzmocnienia filtra na wyjściu.

Schemat ideowy estymatora zaprezentowano na rysunku 2.



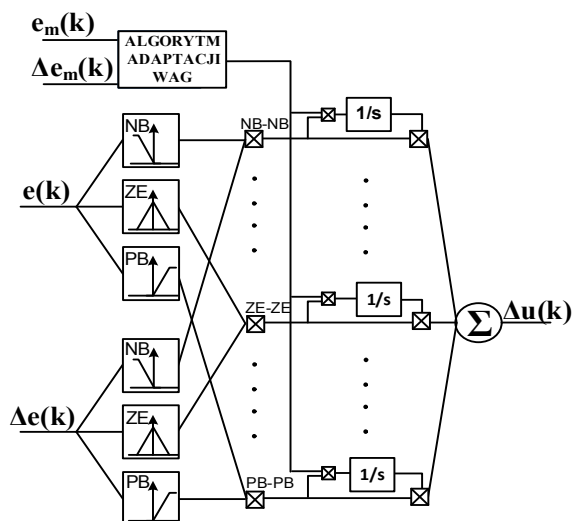
Rys. 2. Schemat ideowy estymatora MRAS^{CC} [7]

Otrzymywana w ten sposób prędkość kątowna wykorzystywana jest do przestrajania zarówno modelu prądowego jak i estymatora prądu stojana. Sygnał ten, bez dodatkowej filtracji może być używana w układzie sterowania. Układ ten nie wymaga żadnej transformacji współrzędnych. Samo strojenie regulatora PI w pętli adaptacji prędkości jest stosunkowo proste [4].

2.2. ADAPTACYJNY REGULATOR NEURONOWO-ROZMYTY

Zasada działania adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego typu została opisana między innymi w [1], [5], [6]. Opiera się on na bazie reguł i stosowaniu operatorów lingwistycznych. Jest to z punktu widzenia logiki rozmytej podejście bardzo naturalne i jednocześnie szeroko stosowane. Na podstawie sygnałów wejściowych (uchyb regulacji oraz jego pochodna), a także na podstawie wcześniej zaimplementowanej wiedzy eksperckiej wyznaczane jest sterowanie, jakie powinno zostać podane na obiekt.

W odróżnieniu od klasycznych regulatorów neuronowo-rozmytych o stałych wagach w regulatorze adaptacyjnym zmieniają się wartości współczynników wagowych funkcji aktywacji poszczególnych reguł [2], [9].



Rys. 3. Schemat ideowy adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego (ANFC)

W przypadku regulatora adaptacyjnego (ANFC) są one funkcją wszystkich poprzednich sterowań. Dodatkowo zrezygnowano z klasycznego mechanizmu defuzyfikacji w regulatorach neuronowo-rozmytych i zastąpiono go metodą singletonów [12]. Schemat ideowy adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego z trójkątnymi funkcjami przynależności przedstawiono na rys. 3. Wykorzystany został regulator typu PD.

3. BADANIA UKŁADU NAPĘDOWEGO DTC-SVM

Badania miały na celu ocenę możliwości użycia adaptacyjnego estymatora prędkości typu MRAS^{CC} działającego w beczujnikowym układzie sterowania wektorowego DTC-SVM oraz analizę doboru wag regulatora adaptacyjnego na pracę napędu. W układzie zastosowano także adaptacyjny neuronowo-rozmyty regulator prędkości. Użycie w pętli sterowania prędkością dwóch struktur adaptacyjnych wymaga większej dokładności identyfikacji parametrów silnika niż ma to miejsce w przypadku nieadaptacyjnej pętli wymuszenia momentu.

W trakcie badań symulacyjnych przeanalizowano zmiany parametrów wirnika oraz stojana maszyny indukcyjnej x_r , x_s , r_r i r_s . Przeanalizowano indywidualne zmiany każdego z parametrów w zakresie $\pm 20\%$ w stosunku do wartości rzeczywistej. Dodatkowo dla każdego z przypadków przeanalizowano 7 różnych wartości początkowych wektora współczynników wagowych adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego.

Użyte wektory zestawiono w tabeli 1 są to odpowiednio: Zerowy (tabela 1, Lp. 1): wektor wartości zerowych, gdzie wszystkie współczynniki wagowe w chwili czasowej $t = 0$ s są zerami. 10 s adaptacji (tabela 1, Lp. 2): wektor będący wartościami jakie regulator osiąga po 10 sekundach działania układu w przypadku rozpoczęcia działania z wagami zerowymi dla układu o poprawnie zidentyfikowanych parametrach silnika. Wiedza ekspercka (tabela 1, Lp. 3.) wartości wag oszacowane na podstawie znajomości przybliżonej właściwej powierzchni sterowania. Jeden parametr błędny (tabela 1, Lp. 4) wagi analogiczne do przypadku 3 z jednym dodatkowo błędnie dobranym współczynnikiem (NB-PB). Losowe 1 (tabela 1, Lp. 5) i 2 (tabela 1, Lp. 6), wektor wartości losowych. Zły (tabela 1, Lp. 7.) Współczynniki o świadomie nieprawidłowo dobranych wartościach w stosunku do prawidłowej powierzchni sterowania.

Tabela 1. Użyte w badaniach wartości wektora wag w chwili czasowej $t = 0$ s

Lp.	1	2	3	4	5	6	7
NB-NB	0	0,0860	0,1	1,0	0,5377	-1,1480	-1,0
NB-ZE	0	-0,0177	0,0	0	1,8339	0,1049	-0,5
NB-PB	0	0,0335	0,0	0,5	-2,2588	0,7223	0,0
ZE-NB	0	-0,7981	-1,0	-1,0	0,8622	2,5855	-0,5
ZE-ZE	0	-0,0096	0,0	0	0,3188	-0,6669	0,0
ZE-PB	0	0,8024	1,0	1,0	-1,3077	0,1873	0,5
PB-NB	0	-0,0402	0,0	0	-0,4336	-0,0825	0,0
PB-ZE	0	0,0389	0,0	0	0,3426	-1,9330	0,5
PB-PB	0	-0,0690	-0,1	-1,0	3,5784	-0,4390	1,0
Typ wektora	Zerowy	10 s adaptacji	wiedza ekspercka	1 parametr błędny	losowe 1	Losowe 2	zły

W tabelach 2–5 zestawiono symulacyjne wyniki działania układu serowania dla zmiennych wektorów współczynników wagowych w chwili $t = 0$ s oraz zmiennych parametrów zidentyfikowanych napędu. W tabelach użyto następujących oznaczeń:

- S – układ działa stabilnie, N – układ działa niestabilnie,
- SŚ – układ działa stabilnie jednak z relatywnie dużymi błędami regulacji,
- SŻ – układ działa stabilnie, jednak jakość regulacji jest bardzo niska.

Analizując dane przedstawione w tabelach widać, że układ DTC-SVM z dwoma elementami adaptacyjnymi jest bardzo czuły na nieprawidłową identyfikację parametrów silnika indukcyjnego. W pracach [10], [3] układ DFOC pracował stabilnie w przypadku zmian parametrów nawet o ponad 30%. W przedstawionych badaniach stabilna praca zapewniająca dobrą jakość regulacji wymagała błędów identyfikacji poszczególnych parametrów nie większego niż 5%, a w przypadku x_s nawet 5% zmiana powodowała utratę stabilności układu.

Tabela 2. Badania wpływu zmian r_r ,

Wektor	1	2	3	4	5	6	7
r_r							
80%	N	N	N	N	N	N	N
85%	N	N	N	N	SŚ	SŻ	N
90%	SŚ	SŚ	SŚ	SŚ	SŚ	SŻ	SŚ
95%	S	S	S	S	SŚ	N	S
100%	S	S	S	S	S	N	S
105%	S	S	S	S	SŚ	N	N
110%	N	N	N	N	N	N	N
115%	N	N	N	N	N	N	N
120%	N	N	N	N	N	N	N

Tabela 3. Badania wpływu zmian r_s ,

Wektor	1	2	3	4	5	6	7
r_s							
80%	N	N	N	N	N	SŻ	N
85%	N	N	N	N	N	N	N
90%	SŚ	SŚ	SŚ	SŚ	SŚ	N	SŚ
95%	S	S	S	S	SŚ	N	S
100%	S	S	S	S	SŚ	N	S
105%	N	N	N	N	N	N	N
110%	N	N	N	N	N	N	N
115%	N	N	N	N	N	N	N
120%	N	N	N	N	N	N	N

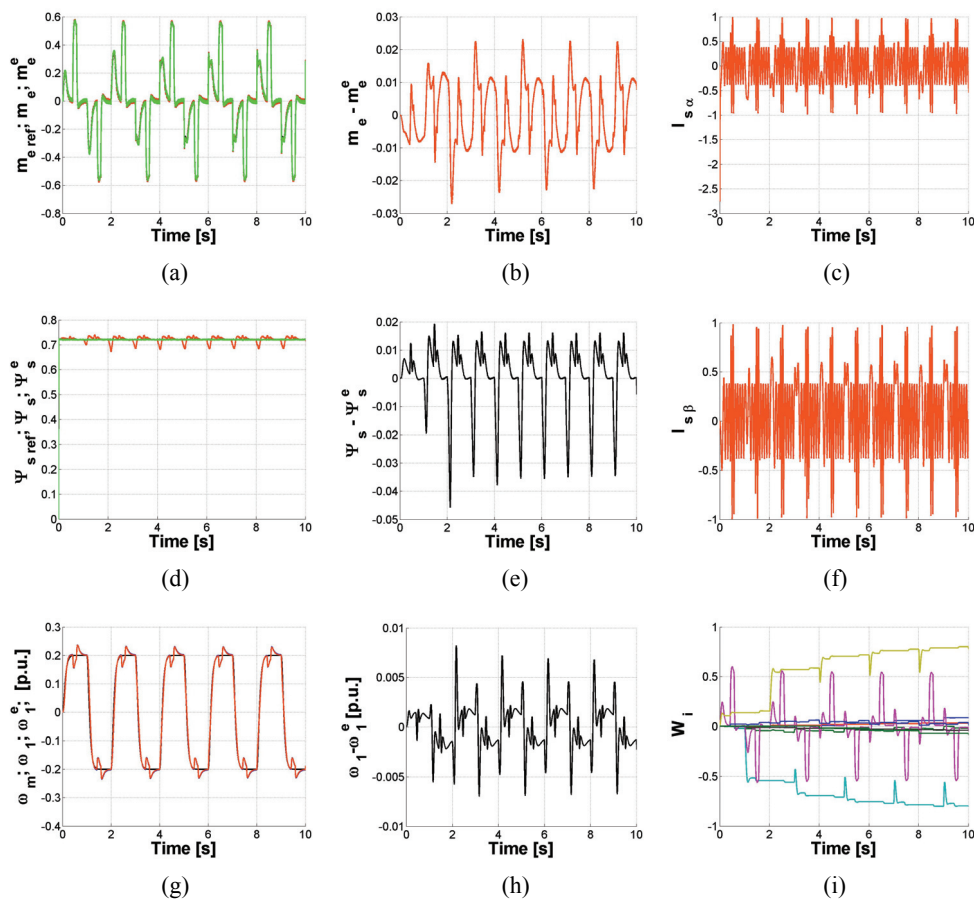
Tabela 4. Badania wpływu zmian x_r

Wektor x_r	1	2	3	4	5	6	7
80%	N	N	N	N	N	N	N
85%	N	N	N	N	N	N	N
90%	N	N	N	N	N	N	N
95%	N	N	N	N	N	N	N
100%	S	S	S	S	SS	N	S
105%	S	S	S	S	S	N	S
110%	SS	SS	SS	SS	SS	N	SS
115%	N	N	N	N	N	N	N
120%	N	N	N	N	N	N	N

Tabela 5. Badania wpływu zmian x_s

Wektor x_s	1	2	3	4	5	6	7
80%	N	N	N	N	N	N	N
85%	N	N	N	N	N	N	N
90%	N	N	N	N	N	N	N
95%	N	N	N	N	N	N	N
100%	S	S	S	S	SS	N	S
105%	N	N	N	N	N	N	N
110%	N	N	N	N	N	N	N
115%	N	N	N	N	N	N	N
120%	N	N	N	N	N	N	N

Kolejnym istotnym wnioskiem jest stosunkowo duża niewrażliwość układu na wartości początkowe wektora współczynników wagowych adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego. W przypadku wektora 6, będącego wektorem wartości losowych uzyskano istotne pogorszenie właściwości układu sterowania, niemal w każdym wypadku układ taki tracił stabilność. Wynika to z faktu różnicy znaku wagi w przypadku 4 współczynników wagowych, a co ważniejsze dla przypadku NB-NB i NB-ZE będących regułami sąsiadującymi błąd znaku powoduje zmianę znaku sterowania w stosunku do błędu wejściowego a tym samym niestabilność. W przypadku pozostałych wektorów nie uzyskano poprawy jakości sterowania lub stabilności w porównaniu do wektora o wartościach zerowych. Można więc stwierdzić że poprzez dobór niezerowego wektora można pogorszyć, natomiast nie można istotnie poprawić jakości sterowania układu.

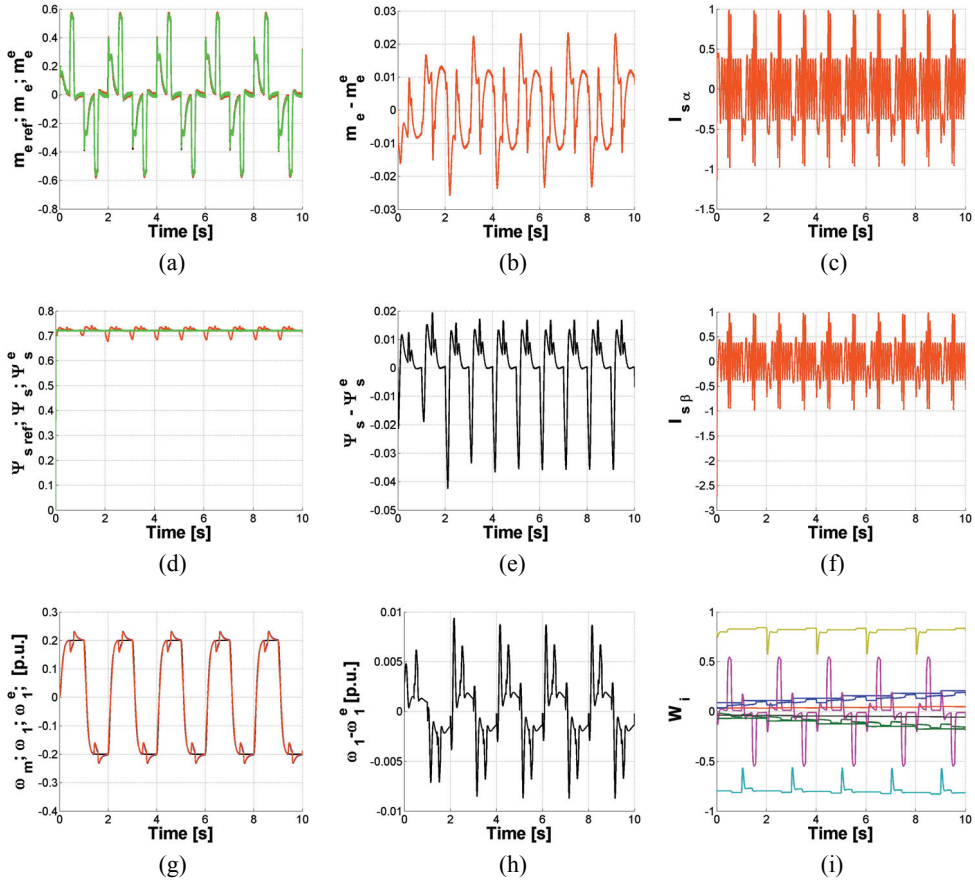


Rys. 3. Przebiegi wybranych zmiennych dla przypadku wektora zerowego (1) współczynników wagowych dla prawidłowo zidentyfikowanych parametrów silnika

Na rysunkach 3–5 zaprezentowane zostały wybrane przebiegi dla wybranych przypadków początkowych wektorów wagowych oraz wartości zidentyfikowanych parametrów. Są to kolejno, moment elektromagnetyczny zadany, rzeczywisty i estymowany (a) różnicę pomiędzy momentem rzeczywistym i estymowanym (b) prąd stojana w osi β (c) strumień stojana zadany, rzeczywisty i mierzony (d) różnicę pomiędzy rzeczywistym, a estymowanym strumieniem stojana (e) prąd stojana w osi α (f) prędkości modelu, silnika oraz estymowana (g) różnicę między prędkością silnika i estymowaną (h) przebiegi współczynników wagowych (i).

Rysunek 3 prezentuje przypadek poprawnie zidentyfikowanych parametrów silnika oraz użycie wektora zerowego współczynników wagowych. Na rysunku 4 pokazane zostały przebiegi dla przypadku wektora równego wektorowi współczynników wago-

wych z chwili $t = 10$ s przypadku pierwszego oraz z błędnie zidentyfikowaną wartością rezystancji wirnika $r_r = 1,05 r_{rn}$.

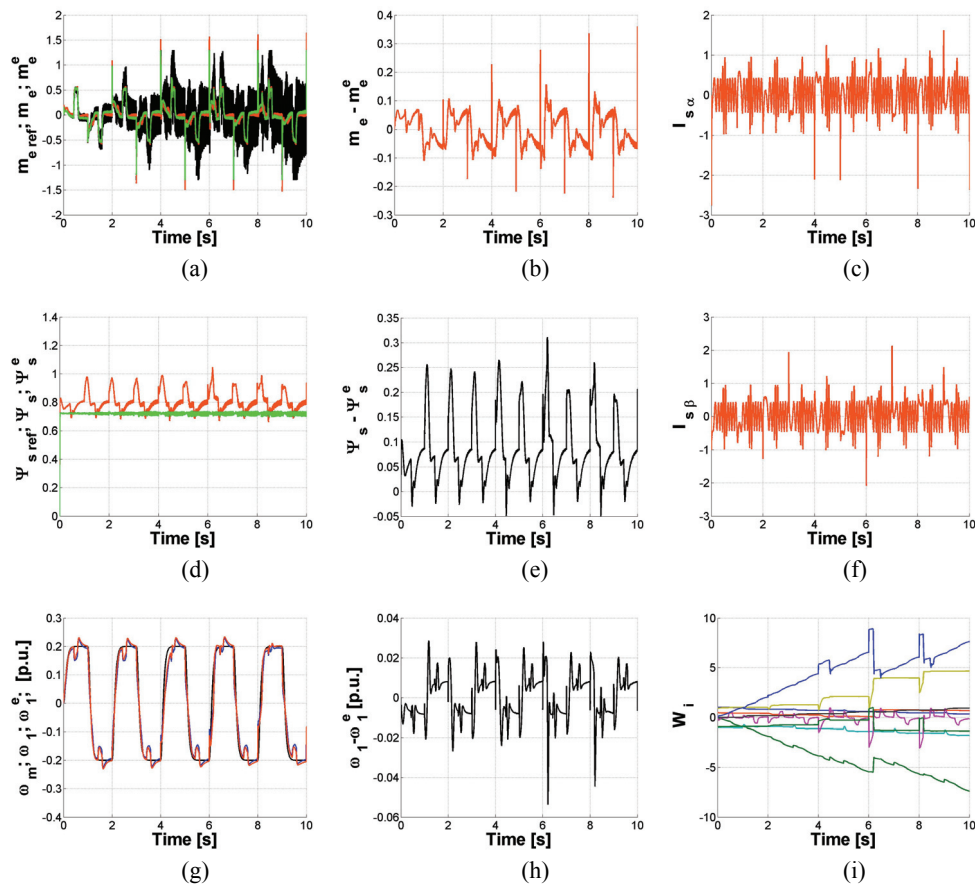


Rys.4. Przebiegi wybranych zmiennych dla przypadku wektora współczynników wagowych równego wektorowi po 10 s adaptacji w przypadku prawidłowo zidentyfikowanych parametrów obiektu (2), dla błędnie zidentyfikowanego parametru silnika $r_r = 1.05r_{rn}$

Rysunek 5 przedstawia przypadek wektora współczynników wagowych opartego o wiedzę ekspercką oraz błędnie zidentyfikowany parametr reaktancji własnej wirnika $x_r = 1,10x_{rn}$.

Z kształtu przebiegów wynika że, w przypadku prawidłowej identyfikacji parametrów obiektu, jakim jest silnik indukcyjny estymator MRAS^{CC} odtwarza zmienne stanu z bardzo dobrą dokładnością. Neuronowo-rozmyty regulator adaptacyjny typu PD jest w stanie prawidłowo się dostosować do obiektu sterowania jakim jest silnik indukcyjny w układzie bezczujnikowym. W chwili czasowej wszystkie współczyn-

niki wagowe są zerami jednak wszystkie wagi w czasie około 10 s osiągają wartości bliskie optymalnym.



Rys. 5. Przebiegi wybranych zmiennych dla przypadku wektora współczynników wagowych z jednym błędem (4) dla błędnie zidentyfikowanego parametru silnika $x_r = 1,10x_{r_n}$

Największe niedokładności odtwarzania zmiennych stanu są zauważalne w trakcie nawrotów, błędy te jednak nie prowadzą do destabilizacji pracy układu.

Nieprawidłowe wartości schematu zastępczego maszyny mogą wynikać z nieprawidłowej ich identyfikacji lub z ich zmienności w czasie. Przypadek taki przedstawiono na rysunku 4, w chwili czasowej $t = 0$ s współczynniki wagowe regulatora ustawione zostały na wartości jakie osiągnęły po 10 sekundach adaptacji w przypadku obiektu prawidłowo zidentyfikowanego, jednak rezystancję wirnika (r_r) obserwatora zwiększono o 5% w stosunku do wartości rzeczywistej.

Zauważyć można między innymi zwiększenie błędu odtwarzania prędkości mechanicznej (rys. 4h), jednak układ zachowuje stabilność. W przebiegu wartości współ-

czynników wagowych widać znaczne spowolnienie zmian co oznacza osiągnięcie wartości bliskich optymalnym dla użytego algorytmu adaptacji.

Rysunek 5 prezentuje przypadek gdy wektor współczynników wagowych został opracowany na podstawie wiedzy eksperckiej z jednym parametrem o wartości błędnej (wektor 4). Błędnie został również dobrany parametr x_r obserwatora.

Pomimo stabilnej pracy układ znacznie pogarsza swe właściwości odtwarzania prędkości zadanej po 4 sekundach by po 6 powrócić do prawidłowego działania. W przebiegu strumienia estymowanego pojawia się uchyb ustalony natomiast szybkość zmian zadanego momentu elektromagnetycznego znacznie wzrasta.

Układ w badanym okresie działał prawidłowo, jednak w dłuższym horyzoncie czasowym jakość sterowania jest niezadowalająca. Okresowe pojawianie się znacznych uchybów sterowania dyskwalifikuje ten układ z pracy ciągłej.

4. WNIOSKI

Układ z dwoma członami adaptacyjnymi działającymi jednocześnie w strukturze bezpośredniego sterowania momentem (DTC) jest bardzo czuły na niedokładności w identyfikacji parametrów silnika (inaczej niż to miało miejsce w układzie DFOC). Stosunkowo nieduże, przekraczające 5%, błędy w identyfikacji parametrów, prowadzą do znacznego pogorszenia jakości sterowania, a nierzadko do pełnej utraty stabilności przez układ.

Wartości wektora współczynników wagowych nie pozwalają na istotną poprawę jakości sterowania, jednocześnie w przypadku nieprawidłowego doboru mogą pogorszyć jakość sterowania lub w skrajnych przypadkach doprowadzić do utraty stabilności.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu: *Adaptacyjne sterowanie rozmyte złożonego układu napędowego o zmiennych parametrach*, 2011/03/B/ST7/02517.

LITERATURA

- [1] BOVA S., CODARA P., MACCARI D., MARRA V., *A logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases*, Barcelona, 18–23 July 2010, Print ISBN: 978-1-4244-6919-2.
- [2] DERUGO P., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Adaptacyjne wektorowe sterowanie układem napędowym z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, Studia i Materiały, Nr 32, t. 2, 2012, 67–76.
- [3] DYBKOWSKI M., *Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych – zagadnienia wybrane*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 67, Monografie, Nr 20, Wrocław 2013.
- [4] DYBKOWSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Self-tuning adaptive sensorless induction motor drive with the stator current based MRAS speed estimator*, EUROCON, 2009, 804–810.

- [5] DYBKOWSKI M. ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Wpływ sposobu adaptacji prędkości kątowej w estymatorze MRAS na właściwości bezczujnikowego układu wektorowego sterowania silnika indukcyjnego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 58, Studia i Materiały, Nr 25, 2005, 328–340.
- [6] GÓRNIAK K., *Wpływ opóźnienia na dynamikę układów z regulacją klasyczną i rozmytą*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, Studia i Materiały, Nr 31, 2011, 222–232.
- [7] JOSÉ L. AZCUE P., ALFEU J. SQUAREZI FILHO, ERNESTO R., *The DTC-SVM scheme with Takagi-Sugeno fuzzy controller for three-phase Induction Motor*, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Vol. 2, 2011, 901–906.
- [8] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [9] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Adaptive sliding mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors*, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, 2010, 553–564, 19.
- [10] 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, April 2010, 1296–1308.
- [11] PAJCHROWSKI T., *Application of Artificial Neural Network for Speed Control of Servodrive with Variable Parameters*, Springer International Publishing, Mechatronics, 2013, 693–700.
- [12] SZABAT K., *Robust control of electrical drives using adaptive control structures – a comparison*, ICIT 2008, IEEE International Conference, Industrial Technology, 2008, 1–6.
- [13] SZABAT K., SERKIES P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., CYCHOWSKI M., *Robust torque constraints handling in drive systems with elastic transmission*, Proc. ICIT 2010, 398–403.
- [14] SIEKLUCKI G., ORZECHOWSKI T., SYKULSKI R., *Model matematyczny napędu z silnikiem indukcyjnym – metoda DTC-SVM*, Elektrotechnika i Elektronika, vol. 29, z. 1–2, 2010, 33–40.
- [15] WAI RONG-JONG, LIU CHIA-MING, *Robust Control for Linear Induction Motor Servo Drive Using Neural Network Uncertainty Observer*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 7, July 2009, 2667–2683.
- [16] WAI RONG-JONG, CHU CHIA-CHIN, *Motion Control of Linear Induction Motor via Petri Fuzzy Neural Network*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, 2007, 281–295.

ANALYSIS OF IMPACT OF INITIAL WEIGHT VECTOR VALUES ON WORK OF THE ADAPTIVE SENSORLESS DTC-SVM CONTROL SYSTEM

The paper presents the possibility of using neuro-fuzzy adaptive controller in sensorless direct torque control structure DTC-SVM of the induction motor. The influence of the initial set of weights parameters on the machine performance in case of incorrect identification of motor parameters has been investigated during simulations in MATLAB-SIMULINK package using SimPowerSystems toolbox.