

*sterowanie wektorowe, napęd bezczujnikowy,
silnik indukcyjny, regulator adaptacyjny, sieci Petriego*

Mateusz DYBKOWSKI*, Piotr DERUGO*

BEZCZUJNIKOWA STRUKTURA STEROWANIA SILNIKIEM INDUKCYJNYM Z ADAPTACYJNYM REGULATOREM ROZMYTYM Z DODATKOWĄ WARSTWĄ PETRIEGO

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania adaptacyjnych regulatorów neuronowo rozmytych z dodatkowymi warstwami Petriego w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi. Badania wykonano w strukturach sterowania wektorowego DFOC. Do estymacji prędkości kątowej, w strukturze bezczujnikowej, wykorzystano estymator MRAS^{CC}. Sprawdzono działanie układów w różnych warunkach pracy. Wykonano badania eksperymentalne na stanowisku z kartą Micro Lab Box 1202 firmy dSpace.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach można zaobserwować coraz większe zapotrzebowanie w różnych gałęziach przemysłu na układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, także w tych, w których do niedawna dominowały silniki prądu stałego [9], [12]. Dzięki zastosowaniu struktur sterowania wektorowego możliwe są do uzyskania bardzo dobre właściwości dynamiczne, a także dobra kontrola nad zmiennymi stanu tych maszyn [9]. Rosnące wymagania, co do tych układów powodują, że poszukiwane są takie algorytmy sterowania prędkością (pozycją), które gwarantują stabilną pracę napędu nawet w przypadku zmienności parametrów mechanicznych i elektrycznych układu napędowego [4], [7], [13].

W pracy analizowane są metody sterowania wektorowego z regulatorami adaptacyjnymi w warstwach tranzycji Petriego [2], [3].

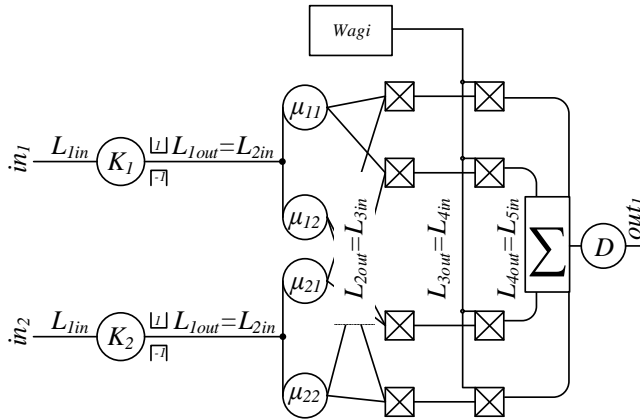
Przeprowadzono zarówno badania symulacyjne i eksperymentalne. Wszystkie badania zostały wykonane w tzw. układzie bezczujnikowym, tzn. w takim, w którym

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

pomiar prędkości kątowej został zastąpiony algorytmicznym systemem jej wyznaczania [9]. W pracy wykorzystano estymator MRAS^{CC} [5], [6], [10].

2. ADAPTACYJNY REGULATOR NEURONOWO ROZMYTY Z WARSTWAMI TRANZYJCJI PETRIEUGO

W niniejszym punkcie opisano adaptacyjny regulator neuronowo rozmyty [1], [8], [11] za pomocą równań węzłów sieci neuronowo-rozmytej. W tym wypadku stosuje się zapis w formie zależności pomiędzy poszczególnymi sygnałami dla poszczególnych węzłów sieci. Wyjście warstwy n jest wejściem warstwy $n+1$.



Rys. 1. Schemat blokowy regulatora na potrzeby opisu równaniami sieciowymi

W warstwie pierwszej następuje normalizacja sygnałów wejściowych. Sygnały wejściowe są skalowane oraz ograniczane do rozważanej przestrzeni sterowań.

$$L_{1out_n} = \max[\min[(K_n \cdot in_n), 1], -1] = L_{2in_n} \quad (1)$$

Warstwa druga to warstwa rozmywania. Na podstawie przeskalowanych sygnałów wejściowych wyznaczone są poziomy aktywacji poszczególnych funkcji przynależności. Reguły przynależności zdefiniowano jako μ_{ij} gdzie i to numer wejścia jakiemu jest przyporządkowana dana reguła, natomiast j to numer funkcji w danym m licznym zestawie przyporządkowanym każdemu z n wejść. Nie został jednoznacznie zdefiniowany kształt funkcji przynależności gdyż nie jest on istotny z punktu widzenia możliwości implementacji poszczególnych rekurencji [2], [3].

$$[L_{2out}] = [\mu_{ij}(L_{2in_i})]_{j=1\dots m} = [L_{3in}] \quad (2)$$

Warstwa trzecia to warstwa wyznaczania poziomów aktywacji poszczególnych reguł. W niniejszym przypadku wykorzystana została jedna z najpopularniejszych T -norma typu *product*. Odpowiada to klasycznemu rozwiązaniu znanemu zarówno z regulatorów typu Mamdaniego, jak i TSK gdzie $R_n = f(\mu_{i1j1}, \mu_{i2j2})$.

$$[L_{3out}] = [\mu_{ij} \cdot \mu_{ij}]_{\substack{i=1\dots n \\ j=1\dots m}} = [L_{4in}] \quad (3)$$

W warstwie czwartej następuje aplikacja współczynników wagowych zgodnie ze wzorem.

$$[L_{4out}] = [L_{4in_ij} \cdot w_{ij}]_{\substack{i=1\dots n \\ j=1\dots m}} = [L_{5in}] \quad (4)$$

Ostatnią warstwą dającą się wyróżnić w strukturze regulatora jest warstwa wnioskowania. Zastosowano tu blok sumowania oraz blok defuzyfikacji D . Blok D może odpowiadać zarówno defuzyfikacji klasycznej, singletonów lub Mamdaniego z użyciem funkcji (jednej lub wielu) wyjściowych. Domyślnie będzie to defuzyfikacja metodą singletonów. Punkty te z reguły dotyczą rekurencje obejmujące wyjściowe funkcje przynależności.

$$out_1 = D(L_{5out}) = D \left(\sum_{\substack{i=1\dots n \\ j=1\dots m}} [L_{5in_ij}] \right) \quad (5)$$

Adaptacyjną modyfikacją klasycznego systemu neuronowo-rozmytego jest algorytm regulatora adaptacyjnego (ANFC) z modelem referencyjnym (MRAS). Proces wyznaczania wartości wyjściowej systemu jest analogiczny do układu nieadaptacyjnego. Przy czym wagi nie są stałe, a zmienne w czasie. Schemat regulatora rozszerzony o bloki adaptacji zaprezentowano na rys. 2.

Algorytm adaptacji współczynników wagowych ma postać [11]:

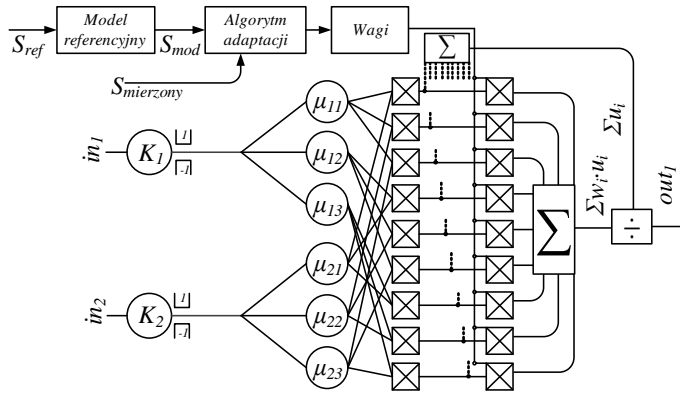
$$w_{j1j2}(k+1) = w_{j1j2}(k) + R_{j1j2} \cdot \gamma(e_m) \quad (6)$$

gdzie: R_{j1j2} – wartość aktywacji reguły, γ – współczynnik uczenia, e_m – błąd śledzenia modelu ($e_m = \omega_{\text{modelu}} - \omega_{\text{silnika}}$). Współczynniki uczenia używane w trakcie badań bazowały na wartości błędu śledzenia modelu i jego pochodnej (7), a niekiedy dla przypadków regulatorów PID także na całce z tej wartości (8). Model referencyjny zdefiniowano jako obiekt oscylacyjny drugiego rzędu:

$$\gamma(e_m(t)) = (k_{em} e_m(t) + k_{\Delta m} \Delta e_m(t)) \quad (7)$$

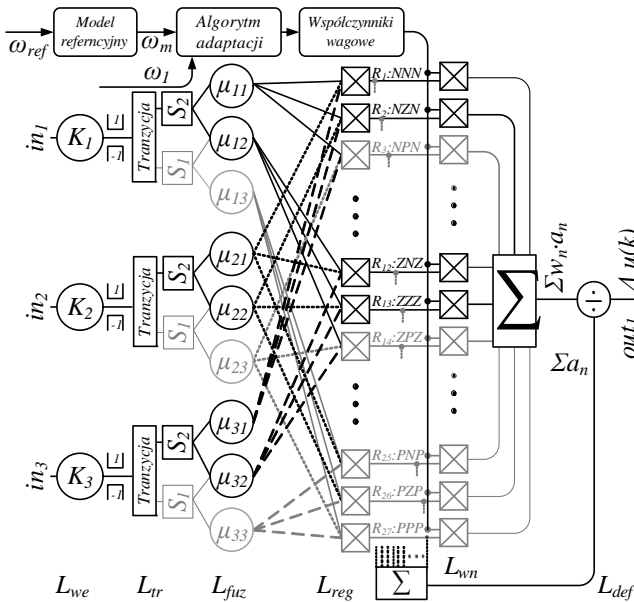
$$\gamma(e_m(t)) = (k_{em} e_m(t) + k_{\Delta m} \Delta e_m(t) + k_{\int m} \int e_m(t) dt) \quad (8)$$

$$G(s) = \frac{\omega_r^2}{s^2 + s \cdot \xi \cdot \omega_r + \omega_r^2} \quad (9)$$



Rys. 2. Adaptacyjny regulator neuronowo-rozmyty, defuzyfikacja singletonami 2we-1wy

Warstwa tranzycji Petriego [2], [3] jest analogiem warstwy konkurencyjnej [1], [14], z punktu widzenia wartości wyjściowej algorytmu z tą różnicą, że modyfikuje także sam sposób wykonywania się algorytmu regulatora. W przypadku warstwy konkurencyjnej odpowiednie sygnały są zerowane. Warstwa tranzycji natomiast sprawia, że sygnały te nie są uwzględniane w obliczeniach. Algorytm taki jest znacznie mniej złożony numerycznie. Szczególnie w przypadku regulatora o dużym rozmiarze bazy reguł i relatywnie małym oknie obliczeniowym.



Rys. 3. Schemat blokowy regulatora z warstwą tranzycji

Z uwagi, iż warstwa tranzykcji powoduje niejako pełne odcięcie części powierzchni rozważań z bazy reguł systemu wnioskowania neuronowo-rozmytego, najlepszym miejscem na umieszczenie warstwy tranzykcji jest strefa pomiędzy warstwą pierwszą (L_1) normalizującą sygnały wejściowe, a warstwą drugą (L_2): rozmywania (rys. 3). Dzięki temu na podstawie rozpoznanego sektora, w jakim aktualnie znajduje się dane wejście, aktywowane są odpowiednie funkcje przynależności. Sektory nieaktywne i odpowiadające im reguły zostały zaznaczone na rysunku kolorem szarym.

Umieszczenie warstwy tranzykcji w innym miejscu skutkowałoby mniejszą poprawą złożoności numerycznej, pozycja za warstwą rozmywania powodowałoby ignorowanie pewnych z sygnałów poziomów aktywacji funkcji przynależności, jednak poziomy przesłanek były by wyliczane, mimo że nie byłyby dalej wykorzystywane.

Wszystkie funkcje przynależności byłyby liczone, jednak część tych sygnałów nie była by dalej wykorzystywana, co jest nieekonomiczne z punktu widzenia złożoności obliczeniowej algorytmu. Szczegółowy model matematyczny analizowanego układu i jego dokładny opis przedstawiono w pracy [2], [3].

Tabela 1. Zestawienie parametrów adaptacji uzyskanych w procesie optymalizacji poszczególnych regulatorów, wraz z wartością optymalizowanego kryterium

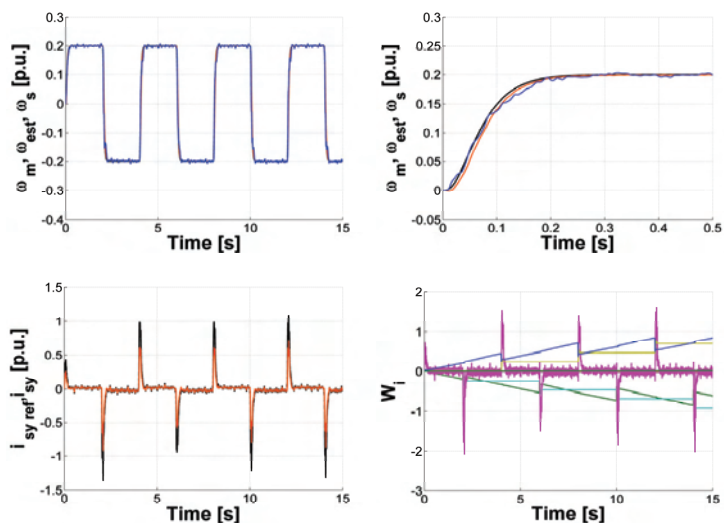
Lp.	AD_P	AD_D	ISE ₁ [e-8]	ISE ₂ [e-6]	PD/PID	WTP	L.reg/We
1	980,0	1,1875	5,43582	0,1334	PD	Tak	3
2	980,0	1,2500	5,20124	0,1280	PD	Tak	5
3	948,0	1,1875	5,15984	0,1245	PD	Tak	7
4	980,0	1,2500	4,94765	0,1222	PID	Tak	3
5	996,0	1,2813	4,34433	0,1083	PID	Tak	5
6	948,0	1,2500	4,33654	0,1060	PID	Tak	7
7	980,0	1,2500	5,09013	0,1294	PD	Nie	3
8	948,0	1,1875	5,57276	0,1431	PD	Nie	5
9	948,0	1,1875	5,39658	0,1341	PD	Nie	7
10	980,0	1,2500	4,56851	0,1180	PID	Nie	3
11	980,0	1,4375	4,69059	0,1222	PID	Nie	5
12	996,0	1,3125	4,28497	0,1071	PID	Nie	7

W tabeli 1. Zestawione zostały uzyskane w procesie optymalizacji wartości nastaw parametrów adaptacji. Kryteria ISE₁ oraz ISE₂ odpowiadają wartością całki z kwadratu błędu odtwarzania prędkości modelu przez układ w przypadku trajektorii nawrotnej bez obciążenia (ISE₁) oraz nawrotnej z obciążeniem okresowym (ISE₂). Badania wykonano dla napędu bezczujnikowego z estymatorem MRAS^{CC}.

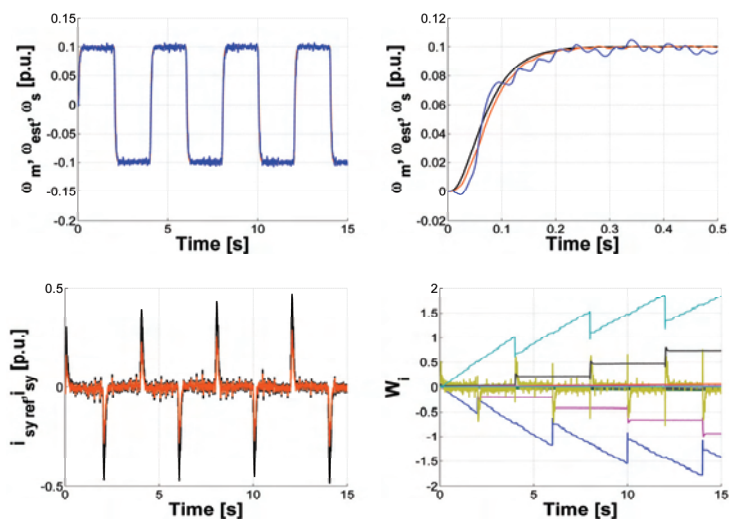
Analizując powyższą tabelę można stwierdzić co następuje:

- Regulator o większej liczbie zmiennych wejściowych (PID) daje lepszą jakość regulacji w stosunku do odpowiadającego mu regulatora o mniejszej liczbie zmiennych wejściowych (PD) a takiej samej liczbie funkcji przynależności na wejście.

W celu uniknięcia pracy z ograniczeniem sprawdzono działanie układu dla wymuszenia 20% wartości znamionowej dla systemów z 3 i 5 funkcjami przynależności: wymuszenie skokowe.



Rys. 4. Przebiegi wybranych zmiennych stanu układu napędowego z SI dla przypadku trajektorii prostokątnej o amplitudzie $0,2 \omega_{mN}$, regulator typu PD o 3 gaussowskich funkcjach przynależności na wejście z Warstwą Tranzycji Petriego



Rys. 5. Przebiegi wybranych zmiennych stanu układu napędowego z SI dla przypadku trajektorii prostokątnej o amplitudzie $0,2 \omega_{mN}$, regulator typu PD o 5 gaussowskich funkcjach przynależności na wejście z Warstwą Tranzycji Petriego

Przeprowadzone badania eksperymentalne bezczujnikowego układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z Warstwą Tranzykcji Petriego dla regulatorach o 3 i 5 gaussowskich funkcjach przynależności pokazują poprawę działania układu adaptacyjnego sterowania wektorowego w stosunku do klasycznych regulatorów adaptacyjnych. Uzyskuje się redukcję układu i jego szybsze adaptowanie się do aktualnych warunków pracy. Prędkość mierzona pokrywa się z wartością estymowaną, a ich oscylacje są na mniejszym poziomie.

4. WNIOSKI

W niniejszej pracy przedstawiono możliwości wykorzystania układów adaptacyjnych w strukturze wektorowego sterowanie silnikiem indukcyjnym. Założono, że pomiar prędkości zastąpiony został estymacją poprzez system MRAS^{CC}.

Analizując wyniki dotyczące wykorzystania WTP widać potencjał stosowania tego typu modyfikacji ARNR. Słuszność stosowania WTP ze względu na optymalizację numeryczną algorytmów w napędach z silnikami DC został przeanalizowany i udowodniony we wcześniejszych publikacjach [2], [3]. Niniejsza pozycja uzupełnia tę analizę o układ bezczujnikowy z silnikiem indukcyjnym.

Badania eksperymentalne na obiekcie rzeczywistym przeprowadzono w układzie DFOC z estymatorem MRAS^{CC}. Są one dodatkowym potwierdzeniem możliwości zastosowania WTP w regulatorze adaptacyjnym w układzie bezczujnikowym, gdzie dodatkowo zauważono zmniejszenie oscylacji prędkości w okolicy prędkości zadanej w trakcie pracy bezczujnikowej.

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

LITERATURA

- [1] DERUGO P., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego neuronowo-rozmytego regulatora prędkości z konkurencyjnymi warstwami Petriego do sterowania silnika elektrycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89, 12, 64–67.
- [2] DERUGO P., SZABAT K., *Implementation of the low computational cost fuzzy PID controller for two-mass drive system*, Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International. IEEE, 2014.
- [3] DERUGO P. et al., *Analiza ARN-R PID z warstwą Tranzykcji Petriego, w sterowaniu silnikiem liniowym z magnesami trwałymi*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2015, No. 83, 31–38.
- [4] DRÓŹDŹ K., SZABAT K., *Adaptacyjne sterowanie układu dwumasowego z wykorzystaniem rozmytego filtru Kalmana*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, 90, 6, 40–44.

- [5] 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, Wrocław 2013.
- [6] KAMIŃSKI M., DYBKOWSKI M., *Analiza układu bezczujnikowego wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z estymatorem MRASCC z neuronowym mechanizmem wyznaczania prędkości kątowej*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88, 116–121.
- [7] KNYCHAS S., SZABAT K., *Adaptacyjny układ sterowania z rekurencyjnymi regulatorami rozmytymi dla układu napędowego o zmiennych parametrach*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89.
- [8] KNYCHAS S., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu II do sterowania prędkością układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, 87, 160–163.
- [9] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [10] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the sensorless induction motor drive with MRAS CC estimator*, 13th European Conference on Power Electronics and Applications 2009, EPE '09, IEEE, 2009.
- [11] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57, 2, 553–564.
- [12] SERGELEN BYAMBAA et al., *Energy saving by using variable speed drives with AC induction motors in industries*, Third International Forum on Strategic Technologies, 2008, IFOST 2008, IEEE, 2008.
- [13] SERKIES P.J., WRÓBEL K., *Wielowarstwowy miękko przełączalny predykcyjny regulator prędkości napędu dwumasowego o zmiennych parametrach*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, 90, 12, 7–10.
- [14] WAI, RONG-JONG, CHIA-CHIN CHU, *Motion control of linear induction motor via petri fuzzy neural network*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54, 1, 281–295.

SENSORLESS INDUCTION MOTOR DRIVE SYSTEM WITH ADAPTIVE CONTROLLER AND PETRI LAYERS

In the paper the adaptive control structure with induction motor drive system with MRAS type flux and speed estimator is tested and developed. System with the Petri layers was implemented and checked during different drive operations. Proposed algorithm was applied in the Direct Field Oriented Control Structure and Direct Torque Control of Induction Motor and tested in laboratory set-up with DS1202 dSpace Micro Lab Box card. Control structure was tested and checked during different drive operation.