

Piotr DERUGO*
Mateusz DYBKOWSKI*
Krzysztof SZABAT*

ANALIZA ADAPTACYJNEGO NEURONOWO ROZMYTEGO REGULATORA Z WYKORZYSTANIEM KONKURENCYJNYCH WARSTW TYPU PETRIEGO W STEROWANIU SILNIKIEM PRĄDU STAŁEGO

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem adaptacyjnej struktury sterowania z przestrajalnym regulatorem neuronowo - rozmytym, dla układu napędowego o nieznanym momencie bezwładności. Zastosowano adaptacyjną strukturę sterowania z modelem odniesienia. Regulator neuronowo – rozmyty zmodyfikowano poprzez wprowadzenie konkurencyjnej warstwy Petriego. Zmiana taka pozwoliła na poprawę właściwości dynamicznych układu napędowego z silnikiem prądu stałego w porównaniu do klasycznego regulatora neuronowo - rozmytego. Rozważania teoretyczne zostały potwierdzone przez badania symulacyjne wykonane w pakiecie SimPower system.

1. WSTĘP

W większości rzeczywistych aplikacji przemysłowych, wykorzystywane układu napędowe są systemami wielomasowymi, w których występuje połączenie sprężyste. Coraz większe wymagania, co do jakości sterowania, stawiane nowoczesnym układom napędowym, każą uwzględniać rzeczywiste parametry połączeń, oraz tłumić wynikające z nich drgania skrętne. Nietłumione oscylacje występujące na wale maszyny, mogą prowadzić do wahań prędkości, a w skrajnych przypadkach nawet do utraty stabilności napędu.

Istnieje wiele sposobów na kompensowanie wpływu drgań skrętnych na prędkość maszyny roboczej, szeroki opis stanu zagadnienia został przedstawiony w [1].

Celem niniejszej publikacji jest zaprezentowanie możliwości wykorzystania sieci Petriego w układach napędowych. Temat ten po raz pierwszy przedstawiono w [6]. W pracy tej wykorzystano Sieć Petriego w połączeniu z regulatorem neuronowo - rozmytym do sterowania silnikiem indukcyjnym w strukturze wektorowej. Modyfikacja, w stosunku do klasycznego rozwiązania przedstawionego w [1] polega na zastosowaniu konkurencyjnej warstwy typu Petriego zarówno do selekcji sygnałów otrzymanych po fuzyfikacji w pierwszej warstwie rozmytego adaptacyjnego regulatora Mamdaniego [2], jak i do selekcji sygnałów adaptacji wag.

* Politechnika Wroclawska.

2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO

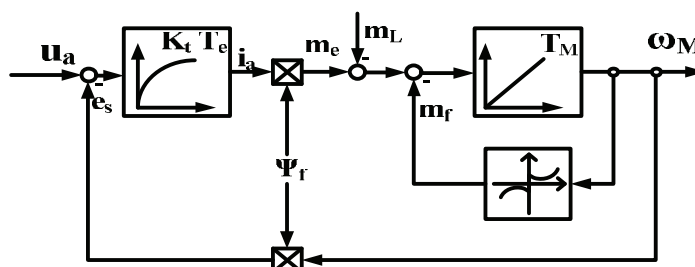
Do badań, w niniejszej pracy, wykorzystano obcowzbudny silnik prądu stałego. Przyjęto stałą wartość strumienia wzbudzenia Ψ_f . Silnik taki można opisać za pomocą równań w jednostkach względnych [3].

$$T_e \frac{di_a}{dt} = -i_a + K_t(u_a - \Psi_f \omega_m) \quad (1)$$

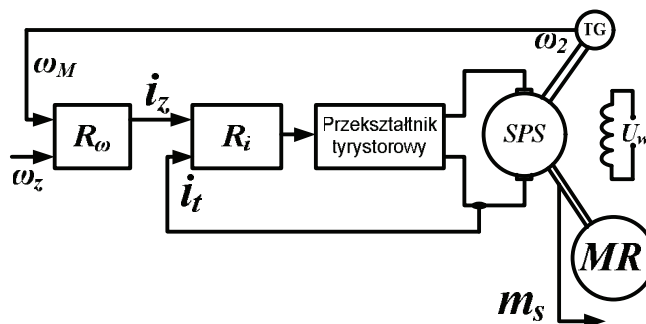
$$T_M \frac{d\omega_M}{dt} = \Psi_f i_a - m_L - m_f \quad (2)$$

gdzie: T_e stała elektromagnetyczna, T_M stała mechaniczna.

Schemat blokowy silnika DC, opracowany na podstawie równań (1) i (2), przedstawiono na Rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat blokowy silnika prądu stałego



Rys. 2.2. Schemat układu sterowania

Układ sterowania składa się z dwóch kaskadowo połączonych regulatorów (Rys. 2.2). W pętli zewnętrznej zastosowano regulator prędkości mający na celu skompensowanie stałą mechanicznej układu, będącej największą stałą czasową układu. W pętli wewnętrznej użyty został regulator prądowy niwelujący wpływ mniejszych stałych czasowych występujących w układzie.

Podczas badań pierwszej kolejności, jako układ odniesienia zastosowano klasyczny regulator prędkości typu PI z nastawami zgodnymi z kryterium modułu. Następnie regulator ten został zamieniony na neuronowo rozmyty regulator adaptacyjny z warstwami Petriego.

3. ADAPTACYJNY NEURONOWO - ROZMYTY REGULATOR Z KONKURENCYJNĄ WARSTWĄ PETRIEGO

Schemat ideowy adaptacyjnego regulatora rozmytego z konkurencyjną warstwą Petriego przedstawiono na Rys. 3.1.

Sygnałami wejściowymi regulatora są błąd odtwarzania prędkości $e(k)$, oraz jego pochodna $\Delta e(k)$ sygnałem wyjściowym jest natomiast sygnał sterujący $\Delta u(k)$ lub $u(k)$. Regulator ten jest regulatorem typu PI, jeżeli istnieje w nim blok całkowania na wyjściu obiektu. W przypadku braku bloku całkowania jest to regulator typu PD [4], [5].

W pracy [6] zaproponowana została neuronowo rozmyta sieć z wykorzystaniem warstwy konkurencyjnej typu Petriego. W niniejszej publikacji, rozważono implementację analogicznej warstwy dla przypadku regulatora o 9 regułach oraz trójkątnych funkcjach aktywacji.

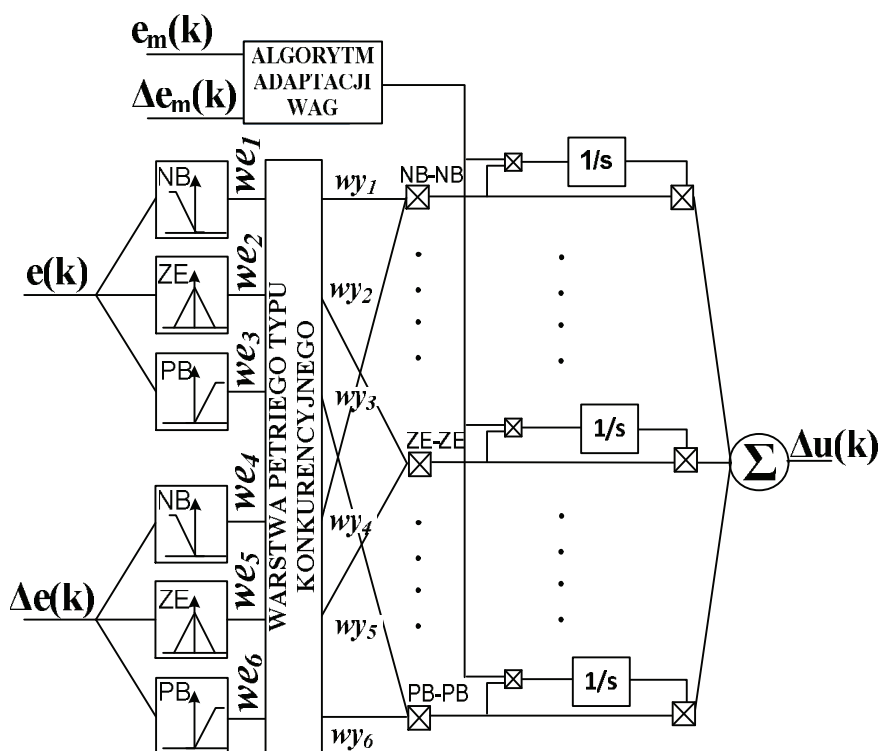
Selekcja odbywa się pomiędzy warstwą rozmywania, a wnioskowania. Konkurencyjna warstwa Petriego spośród zadanej ilości sygnałów wejściowych podaje na wyjścia jedynie k sygnałów o największej wartości, zgodnie z równaniami:

$$\mathbf{A} = \max_k \left\{ \begin{array}{l} \text{sort } \mathbf{we} \\ k=1 \dots N_d \leq n \\ i=1 \dots n \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\forall_{\substack{wei \in A \\ i=1 \dots n}} wy_i = we_i \quad (4)$$

$$\forall_{\substack{wei \in A \\ i=1 \dots n}} wy_i = 0 \quad (5)$$

gdzie: A - wektor k wartości maksymalnych z pośród wartości wektora wejściowego, \max_k - operator wyboru k wartości maksymalnych spośród wektora wejściowego, sort - operator sortowania wartości malejąco według wartości ich modułów, we - wektor wejściowy, wy_i - i -ta wartość wektora wyjściowego, N_d - zadana ilość wartości maksymalnych mających pozostawać aktywnymi, n - liczność wektorów wejściowego oraz wyjściowego.



Rys. 3.1. Adaptacyjny neuronowo rozmyty regulator z dwoma warstwami Petriego

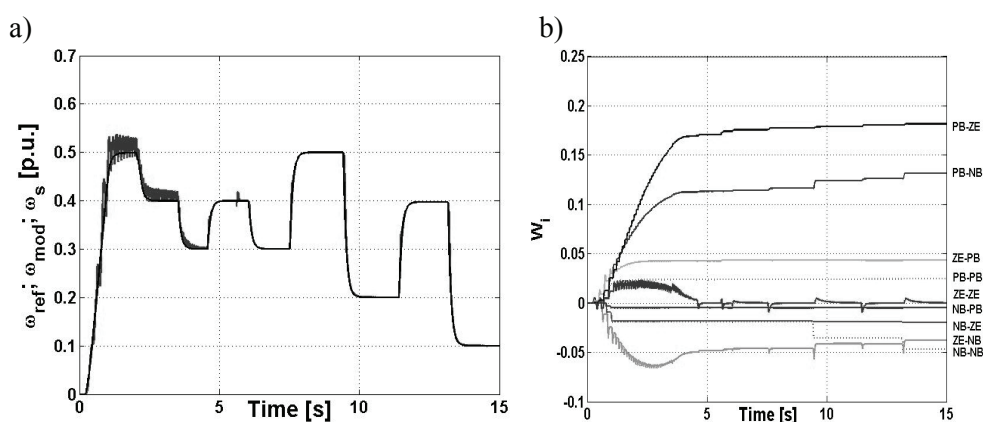
W przypadku regulatora neuronowo-rozmytego o 9 regułach oraz dwóch zmiennych wejściowych, na wyjściu warstwy fuzyfikacji uzyskuje się 6 sygnałów, natomiast na wyjściu każdej z kolejnych warstw 9 sygnałów. W związku z zasadą działania logiki rozmytej, przy funkcjach przynależności zdefiniowanych jako trójkątne, dowolny sygnał nie może jednocześnie przynależeć do więcej niż dwóch reguł. Oznacza to, że na wyjściu warstwy rozmywania, co najmniej dwa sygnały są zawsze zerowe, a pozostałe cztery przyjmują wartości niezerowe. W przypadkach skrajnych dwa sygnały mają wartość maksymalną, a pozostałe przyjmują wartości zerowe. Możliwe są także sytuacje, gdy wszystkie cztery sygnały przyjmują takie same wartości.

W algorytmie doboru wartości maksymalnych uwzględniono możliwość zaistnienia faktu równości dwóch lub więcej sygnałów co do modułu ich wartości. Jeżeli przez warstwę miałby przejść, co najmniej jeden z takich sygnałów, wówczas przechodzą wszystkie, nawet pod rygorem przekroczenia ilości sygnałów akceptowanych. Rozwiązanie takie jest szczególnie istotne z punktu widzenia stabilności układu.

4. BADANIA SYMULACYJNE

W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych układu sterowania silnikiem prądu stałego z regulatorem neuronowo – rozmytym w torze regulacji prędkości kątowej z warstwą Petriego.

Na Rys. 4.1 przedstawiono przebieg regulacji prędkości, oraz wartości wag, dla adaptacyjnego regulatora rozmytego o 9 regułach, bez wykorzystania warstwy konkurencyjnej typu Petriego.



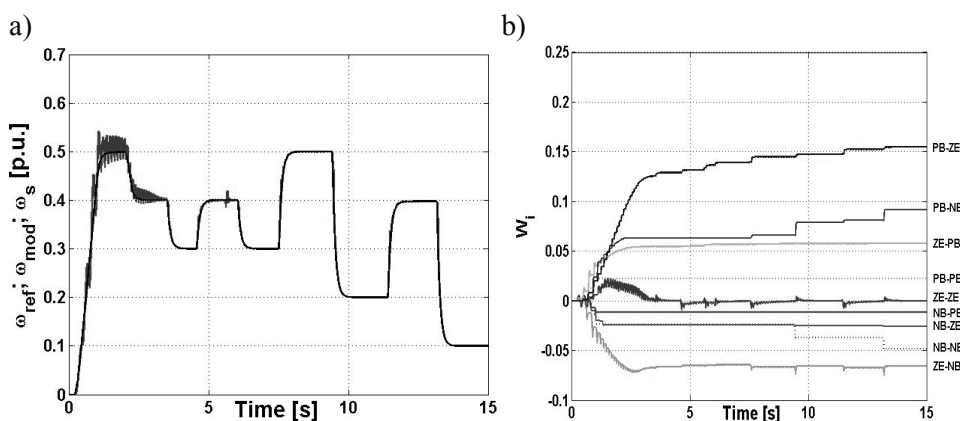
Rys. 4.1. (a) Przebiegi prędkości zadanej, modelu oraz silnika, (b) przebiegu wartości wag regulatora adaptacyjnego dla regulatora bez warstwy Petriego

Wszystkie wagi regulatora w chwili czasowej $t = 0$ mają wartości zerowe. Wynika to z faktu założenia nieznanności obiektu sterowania uniemożliwiającej oszacowanie koniecznych nastaw wstępnych.

W chwili czasowej $t = 0.2$ sekundy sygnał prędkości zadanej zmienia się po rampie wartość z 0 na 0.5 prędkości znamionowej. Szczególnie w pierwszych chwilach widać duże oscylacje prędkości wokół prędkości zadanej. W czasie tym następuje drastyczna zmiana wartości poszczególnych współczynników wagowych. Obciążenie silnika jest proporcjonalne do chwilowej prędkości, w chwili czasowej następuje skokowa zmiana obciążenia. W tym czasie regulator dostosował już swoje nastawy, przez co uchyb spowodowany skokiem obciążenia jest niewielki.

Na Rys. 4.2 przedstawiono odpowiedź układu regulacji oraz przebieg wartości wag dla układu z zastosowaniem konkurencyjnej Warstwy Petriego [WP] pomiędzy blokiem fuzyfikacji oraz interferencji (warstwa Petriego 1. Rys. 3.1), analogiczne rozwiązanie w swoich pracach nad liniowym silnikiem indukcyjnym zaproponowano w pracy [6]. Na WP podawanych jest 6 sygnałów, z czego co najmniej 2 są zawsze zerowe. Co za tym idzie odrzucanie jednego lub dwóch

sygnałów o najmniejszych wartościach nie spowoduje zmiany działania układu. Z racji konieczności posiadania na wejściu warstwy interferencji co najmniej dwóch sygnałów niezerowych, których iloczyn w dalszych warstwach byłby niezerowy, należy akceptować co najmniej 2 sygnały o wartościach maksymalnych co do modułu. Z tych powodów postanowiono przebadać układ akceptujący 2 oraz 3 wagi o największej wartości co do modułu. Akceptacja 4 sygnałów daje układ odniesienia. Na podstawie symulacji, stwierdzono, że akceptacja jedynie dwóch sygnałów prowadzi do okresowych oscylacji prędkości, co jest zjawiskiem niepożądanym.



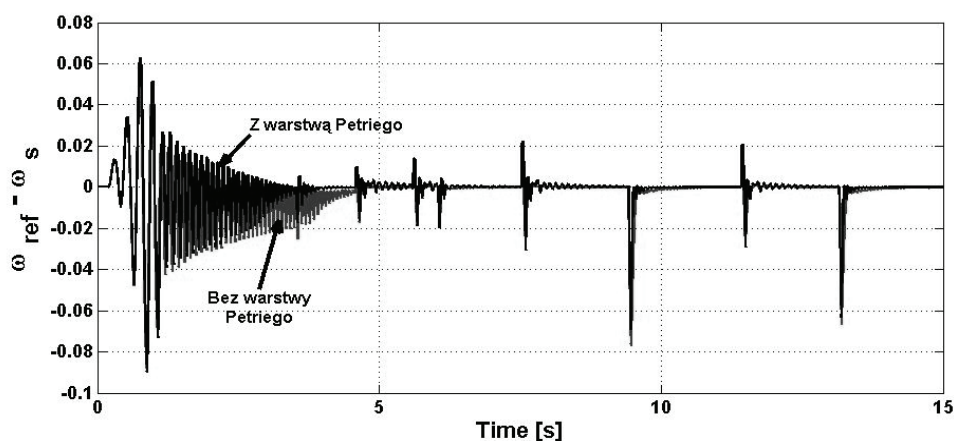
Rys. 4.2. a) Przebiegi prędkości zadanej, modelu oraz silnika, (b) przebiegu wartości wag regulatora adaptacyjnego dla regulatora z warstwą Petriego za warstwą interferencji

Z tych też powodów na Rys. 4.2 przedstawiono przebiegi dla układu z konkurencyjną WP akceptującą 3 największe sygnały co do modułu, a tym samym zerującą jeden z sygnałów o najmniejszej, niezerowej wartości modułu, oraz nie wpływającą na pozostałe sygnały o wartościach zerowych.

Jak widać z przebiegów układ taki działa lepiej w pierwszych fazach dostrajania regulatora, jednak w dalszym toku działania zauważalne jest minimalnie większe przeregulowanie prędkości przy skokowej zmianie obciążenia.

Na Rys. 4.3 przedstawiono przebiegi błędów sterowania dla układów z regulatorami z oraz bez warstwy Petriego. Wyraźnie widoczne jest znacznie szybsze dostosowanie się regulatora z konkurencyjną WP do nieznanego obiektu. Proces wstępnego dostrajania wag zajmuje około 3.5s zamiast 4.5s w przypadku układu z regulatorem bez WP. Widoczne są też mniejsze uchyby prędkości w stanach o wysokiej dynamice. Pewną wadą rozwiązania jest dłuższy czas ustalania się odpowiedzi w przypadku stanów o niskiej dynamice. Najprawdopodobniej istniałaby możliwość zniwelowania tej wady poprzez

wprowadzenia nieliniowych współczynników skalujących sygnały wejściowe regulatora w zależności od aktualnie wymuszanej dynamiki.



Rys. 4.3 Porównanie wartości błędów regulacji dla regulatora z oraz bez warstwy Petriego

5. WNIOSKI

Jak pokazały badania symulacyjne, zastosowanie konkurencyjnej warstwy Petriego dla warstwy fuzyfikacji adaptacyjnego neuronowo rozmytego regulatora rozmytego o dziewięciu trójkątnych funkcjach aktywacji, pozwoliło na poprawę jego właściwości, w szczególności dynamicznych.

Układ taki szybciej, startując z zerowymi wagami, adaptuje się do nieznanego obiektu sterowania. Efekt ten jest skutkiem autonomizacji obszarów płaszczyzny sterowania względem układu bez konkurencyjnej warstwy Petriego. Co ważne zerując pewne wagi uzyskujemy przyspieszenie działania algorytmu poprzez uproszczenie obliczeń.

Należy pamiętać o konieczności analizy układu pod względem stabilności, odrzucanie zbyt dużej ilości sygnałów może doprowadzić jej utraty.

LITERATURA

- [1] Krzysztof Szabat; Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprzężystym; Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Wrocław 2008.
- [2] Simone Bova, Pietro Codara, Daniele Maccari and Vincenzo Marra; A logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases; Conference Location: Barcelona; Date of Conference: 18-23 July 2010; Print ISBN: 978-1-4244-6919-2.

- [3] Orłowska-Kowalska Teresa, Szabat Krzysztof, Jaszcak Krzysztof, The influence of parameters and structure of PI-type fuzzy-logic controller on DC drive system dynamics, *Fuzzy Sets and Systems* 131 (2002) 251 – 264.
- [4] T. Orłowska-Kowalska, M. Dybkowski, K. Szabat, Adaptive neuro-fuzzy control of the sensorless induction motor drive system, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC 2006 pp. 1836-1841.
- [5] G. Zhang, J. Furusho, Speed Control of Two-Inertia System by PI/PID Control, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, no.3, pp. 603-609, 2000.
- [6] 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, FEBRUARY 2007 p. 281-295.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu Adaptacyjne sterowanie rozmyte złożonego układu napędowego o zmiennych parametrach, 2012-2015, 2011/03/B/ST7/02517

ANALYSIS OF USAGE OF ADAPTIVE NEURO FUZZY CONTROLLER WITH COMPETITIVE PETRI LAYERS IN THE CONTROL OF DC MOTOR

The article presents the issues associated with the use of adaptive control structure with adaptive fuzzy controller for the drive system with unknown moment of inertia. Adaptive control structure with a reference model has been used. Competitive Petri layer was introduced to the fuzzy controller. This has allowed the improvement of the dynamic properties of the system as compared to the classic fuzzy controller. Theoretical considerations were confirmed by simulation.