

Analiza wpływu rozmieszczenia konkurencyjnej warstwy Petriego w neuronowo-rozmytym regulatorze adaptacyjnym na właściwości dynamiczne układu napędowego

Streszczenie W artykule przedstawiono analizę możliwości rozmieszczenia konkurencyjnej warstwy Petriego w neuronowo-rozmytym regulatorze adaptacyjnym typu PI. Zbadano wpływ ilości zerowanych sygnałów na działanie układu napędowego. Rozważania teoretyczne oraz badania symulacyjne potwierdziły zostały przez testy eksperymentalne.

Abstract. In the paper an issues related to the neuro-fuzzy adaptive controller with Petri layer are presented. The effect of number of zeroed signals on motor performance is examined. Theoretical and simulation studies are confirmed by experimental tests. (Analysis of the impact of the position of competitive Petri layer in neuro-fuzzy adaptive controller on the dynamic properties of the drive system).

Słowa kluczowe: regulator adaptacyjny, konkurencyjne warstwy Petriego, sieci Petriego, napęd elektryczny.

Keywords: adaptive regulator, Petri competitive layer, Petri Nets, electric drive

doi:10.12915/pe.2014.06.07

Wstęp

Współcześnie w przypadku przemysłowych układów napędowych wymaga się coraz lepszych właściwości dynamicznych i statycznych zarówno w znamionowych warunkach pracy jak i w obecności zakłóceń pomiarowych i parametrycznych [1]-[4]. Klasyczna kaskadowa struktura sterowania oparta na regulatorach liniowych tylko w ograniczonym stopniu może być uznana za układ odporny w związku z tym poszukuje się innych rozwiązań. W literaturze można znaleźć przykłady struktur sterowania odporne bazujących na teorii H_∞ , μ -synthesis, sterowaniu ślizgowym, rozmytym czy neuronowym [4]-[5]. Istnieje również duża liczba układów oparta na teorii sterowania adaptacyjnego. Jednym z takich układów jest struktura z modelem odniesienia (MRAS). Stosuje się ją takich zagadnieniach jak: estymacja prędkości napędu czy w układach regulacji prędkości/położenia i innych. Wykorzystuje ona różne regulatory: liniowe PI/PID, rozmyte czy rozmyto-neuronowe.

Jedną z powszechnie rozwijających się dziedzin nauki wykorzystywanych w układach napędowych są systemy oparte na zbiorach rozmytych, a zwłaszcza systemy neuronowo-rozmyte [6]-[8]. Układy te, są często stosowane w zagadnieniach modelowania, diagnostyki i sterowania układów napędowych. Istnieje bardzo duża liczba artykułów opisujących praktyczne aplikacje systemów rozmytych.

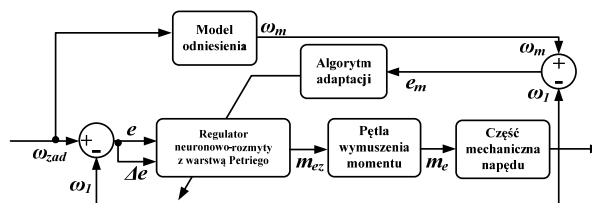
Celem niniejszej pracy jest pełna analiza możliwości wykorzystania konkurencyjnej Warstwy Petriego (WP) w neuronowo-rozmytym regulatorze adaptacyjnym typu PI, celem poprawy jego działania. Temat ten po raz pierwszy przedstawiono w [6]-[7]. W pracy tej wykorzystano Sieć Petriego w połączeniu z regulatorem neuronowo-rozmytym do sterowania silnikiem indukcyjnym w strukturze wektorowej. Modyfikacja, w stosunku do rozwiązania przedstawionego w [6]-[7] polega na zastosowaniu konkurencyjnej warstwy typu Periego zarówno do selekcji sygnałów otrzymanych po fuzyfikacji w pierwszej warstwie regulatora jak i w innych możliwych warstwach [8].

Model matematyczny obiektu badawczego

Zamodelowano obiekt badań w postaci adaptacyjnej struktury sterowania przedstawionej na rys. 1. Składa się ona z układu napędowego obejmującego część mechaniczną napędu, pętli wymuszania momentu elektromagnetycznego (zawierającej część elektromagnetyczną silnika, układ pomiaru prądu, przekształtnik

napięcia oraz regulator momentu), adaptacyjnego regulatora prędkości w postaci rozmytej sieci neuronowej z konkurencyjnymi warstwami Petriego, modelu odniesienia określającego żadaną dynamikę obiektu oraz algorytmu adaptacji.

Sterowanie adaptacyjne układu napędowego polega na zmianie (adaptacji) parametrów wag w_i regulatora neuronowo-rozmytego w celu minimalizacji różnicy pomiędzy wyjściami modelu i obiektu (błędem śledzenia):



Rys.1. Schemat blokowy adaptacyjnej struktury sterowania

$$(1) \quad w_i(k+1) = w_i(k) + f_i(k_p e_m + k_d \Delta e_m)$$

gdzie: f_i jest wartością spełnienia przesłanki dla i -tej reguły, k_p i k_d są współczynnikami adaptacji określającymi dynamikę zmian wag, a Δe_m jest zmianą błędem śledzenia przyspieszającym zbieżność algorytmu adaptacji.

Podczas badań, w pierwszej kolejności, jako układ odniesienia zastosowano klasyczny neuronowo-rozmyty regulator adaptacyjny typu PI [9]-[11] bez warstw Petriego. Następnie regulator ten został zmodyfikowany przez wprowadzenie dodatkowych warstw Petriego.

Adaptacyjny regulator neuronowo-rozmyty z warstwami Petriego

W trakcie analizy uwzględniono następujące lokalizacje konkurencyjnej warstwy Petriego. Pierwszym możliwym miejscem implementacji warstwy jest jej umieszczenie pomiędzy warstwą przynależności oraz wnioskowania. W warstwie tej występują dwie trójki sygnałów odpowiadające wartościom funkcji przynależności przy danych sygnałach wejściowych. Dwie kolejne potencjalne możliwości to umieszczenie dwóch warstw konkurencyjnych, z których każda odpowiadałaby za kontrolę jednej trójki sygnałów, druga możliwością jest umieszczenie jednej warstwy odpowiedzialnej za wszystkie sześć sygnałów. Aby układ umożliwiał sterowanie, każda z warstw k_i musi akceptować

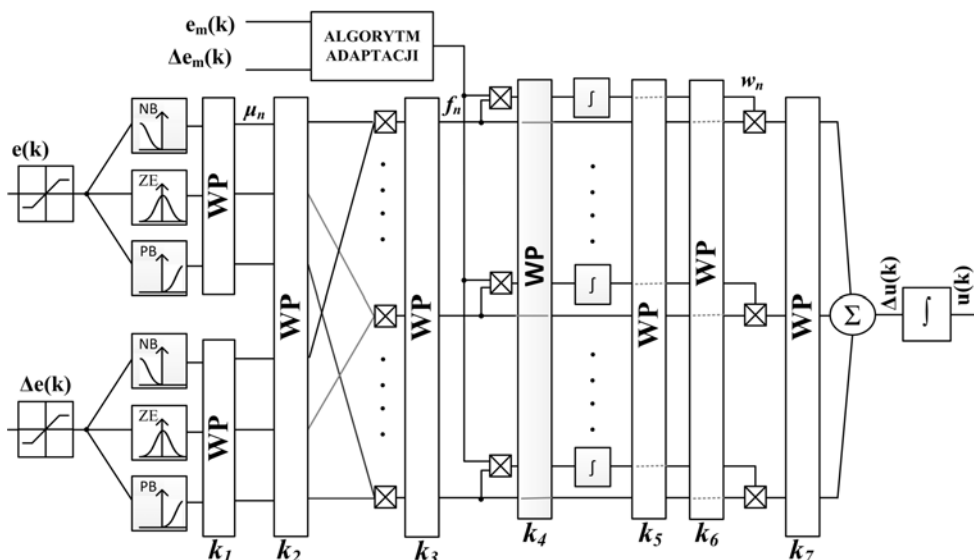
co najmniej jeden sygnał natomiast warstwa k_2 powinna akceptować co najmniej trzy sygnały; w przeciwnym wypadku, w stanach gdzie dwa lub więcej sygnałów mają tę samą wartość modułu, mogło by wystąpić sytuacja odrzucania ich wszystkich (sygnałów) co zakłóciło by pracę układu.

Kolejnym z możliwych miejsc umieszczenia konkurencyjnej warstwy Petriego jest warstwa wnioskowania, po wyznaczeniu stopnia spełnienia przesłanek reguł (k_3), może one być również umieszczona w innym miejscu (k_5), tak że algorytm adaptacji działa na wszystkie sygnały, niezależnie czy są one składową wyjściowego sygnału sterującego.

Trzecim możliwym miejscem jest umieszczenie konkurencyjnej warstwy Petriego w algorytmie adaptacji, tak, że wagi mające ulec zmianie w najmniejszym stopniu nie są adaptowane (k_4) lub wagi o najmniejszych wartościach są adaptowane, ale sygnały im odpowiadające nie mają wpływu na wyjściową wartość sterownia (k_6).

Ostatnią z możliwości jest umieszczenie warstwy konkurencyjnej w warstwie defuzyfikacji, w ten sposób, że nie wszystkie z wyliczonych sygnałów są składowymi wyjściowej wartości sterownia (k_7).

Wszystkie zaprezentowane pozycje umieszczenia konkurencyjnej warstwy Petriego zaprezentowano na rysunku 2.



Rys.2. Neuronowo rozmyty regulator adaptacyjny z konkurencyjnymi warstwami Petriego

Użyty został algorytm defuzyfikacji opisany równaniem (6) bloku sumowania stopni spełnienia przesłanek f_n . Jest to algorytm zapewniający większą dynamikę w porównaniu do rozwiązania klasycznego [6].

$$(6) \quad \Delta u(k) = \sum_n f_n \cdot w_n$$

Warstwa Petriego typu konkurencyjnego

Konkurencyjna warstwa Petriego spośród znanej ilości sygnałów wejściowych podaje na wyjścia jedynie k sygnałów o największej wartości co do modułu, zerując pozostałe sygnały, zgodnie z równaniami (7-9) [8].

$$(7) \quad A = \max_{k=1 \dots N_d \leq n} \left\{ \text{sort}_{i=1 \dots n} \underline{we} \right\}$$

$$(8) \quad \forall_{\substack{we_i \in A \\ i=1 \dots n}} wy_i = we_i$$

$$(9) \quad \forall_{\substack{we_i \notin A \\ i=1 \dots n}} wy_i = 0$$

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

Operator \max_k uwzględnia możliwość występowania stanów, gdy więcej niż jeden sygnał wejściowy ma tę samą wartość modułu. W przypadku, gdy co najmniej jeden z takich sygnałów powinien zostać przepuszczony przez warstwę bez ingerencji w jego wartość, wówczas wszystkie sygnały o danej wartości są akceptowane. Rozwiązane to jest istotne z punktu widzenia stabilności układu.

Badania symulacyjne

W trakcie badań symulacyjnych przetestowane zostały wszystkie możliwe parametry wszystkich z warstw. Jako kryterium oceny użyto kryterium ISE (5) którego wartość obliczono dla dwóch przedziałów czasowych B1: $t=0-15s$ oraz B2: $t=5-15s$. Przedziały takie pozwalają przeanalizować wpływ konkurencyjnych warstw Petriego zarówno na przebieg wstępnej adaptacji współczynników wagowych które w chwili czasowej $t=0$ mają wartości zerowe, jak i jakości sterowania po ustabilizowaniu się wartości współczynników wagowych w procesie adaptacji.

$$(10) \quad ISE = \int e_m^2 dt$$

Każda z warstw odrzuca n sygnałów o najmniejszej wartości co do modułu. Układem odniesienia jest system bez warstw Petriego, co odpowiada układowi, w którym: $n_1=n_2=n_3=n_4=n_5=n_6=n_7=0$, gdzie każda z warstw przepuszcza wszystkie sygnały. Wyniki badań zestawiono w Tabelach 1-2. Oznaczenie NS oznacza układ niestabilny. Kolorowym tłem oznaczono w tabelach wartości kryterium mniejsze od układu odniesienia, co odpowiada zmniejszeniu wskaźnika jakości sterowania.

W tabelach 1 i 2 oraz na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zestawienie zmian wskaźników jakości dla przypadku badań symulacyjnych. Jak można zauważyć implementacja warstwy oznaczonej jako k_2 spowodowało poprawę wskaźnika jakości B1 przy jednoczesnym pogorszeniu wskaźnika B2. Oznacza to, że regulator taki pozwala na szybszą adaptację współczynników wagowych regulatora do obiektu, jednocześnie jakość regulacji w późniejszych etapach jest pogorszona.

Tab. 1 Zestawienie wartości zmian wskaźników jakości w wyniku implementacji warstw Petriego, wskaźnik B1 (t=0-15s)

	Numer warstwy	Numer warstwy						
		k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
ilość odrzucanych sygnałów	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	1	4,6%	-5,3%	0,0%	0,0%	0,7%	23,0%	0,7%
	2	NS	4,6%	0,0%	-0,7%	0,7%	19,7%	0,0%
	3		10,5%	-3,9%	-2,0%	-2,0%	22,4%	0,0%
	4		NS	-5,9%	-2,0%	-3,3%	25,7%	-0,7%
	5		NS	-5,3%	-9,2%	5,9%	40,1%	-0,7%
	6			9,9%	-8,6%	27,0%	57,9%	4,6%
	7			10,5%	0,0%	18,4%	218,4%	61,8%
	8			NS	NS	NS	NS	71,1%

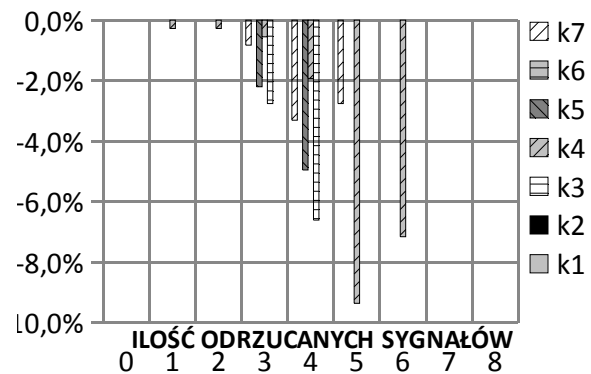


Rys. 3 Zestawienie wartości zmian wskaźników jakości w wyniku implementacji warstw Petriego, wskaźnik B1 (t=0-15s)

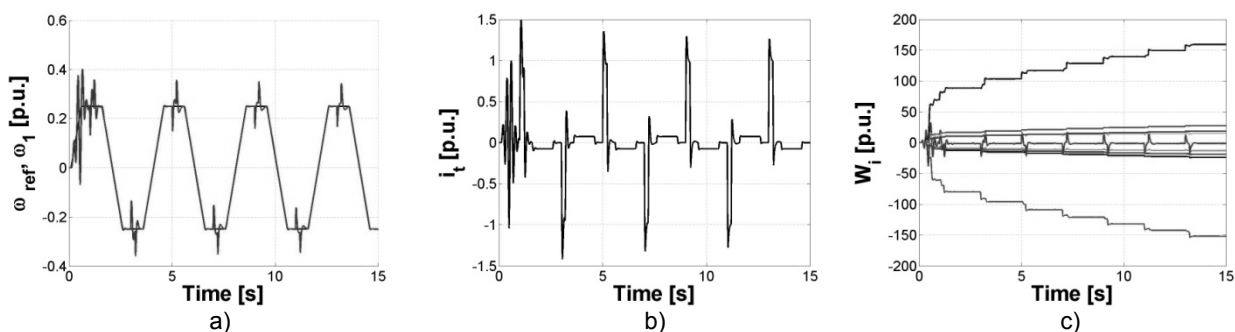
Najlepszy efekt w postaci zmniejszenia obu wskaźników jakości o ponad 9% dała implementacja konkurencyjnej warstwy Petriego oznaczonej jako k_4 i odrzucającej 5 sygnałów zgodnie z zaimplementowanym algorytmem. Jednocześnie jest to warstwa dająca największy potencjał jeżeli chodzi o poprawę wartości wskaźników jakości.

Tab. 2 Zestawienie wartości zmian wskaźników jakości w wyniku implementacji warstw Petriego, wskaźnik B2 (t=5-15s)

	Numer warstwy	Numer warstwy						
		k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
ilość odrzucanych sygnałów	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	1	53,4%	11,8%	1,1%	-0,3%	1,1%	69,1%	1,4%
	2	NS	53,4%	0,6%	-0,3%	0,8%	62,5%	0,6%
	3		19,6%	-2,8%	-0,6%	-2,2%	66,7%	-0,8%
	4		NS	-6,6%	-1,9%	-5,0%	75,2%	-3,3%
	5		NS	10,2%	-9,4%	22,0%	112%	-2,8%
	6			61,4%	-7,2%	86,0%	141%	6,9%
	7			19,6%	1,7%	25,1%	245%	183%
	8			NS	NS	NS	NS	152%



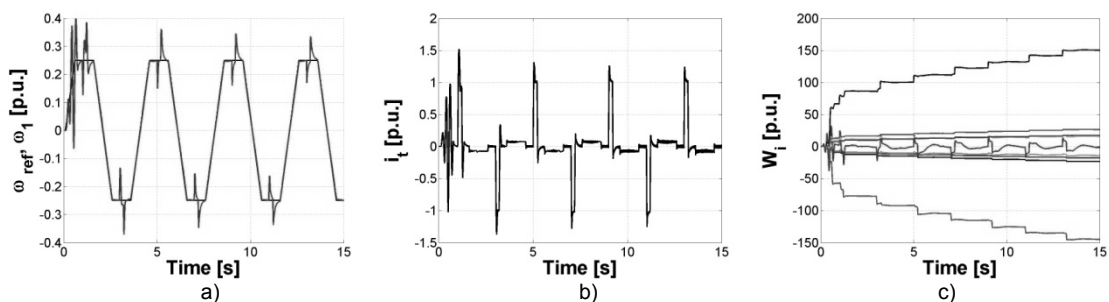
Rys.4 Zestawienie wartości zmian wskaźników jakości w wyniku implementacji warstw Petriego, wskaźnik B2 (t=5-15s)



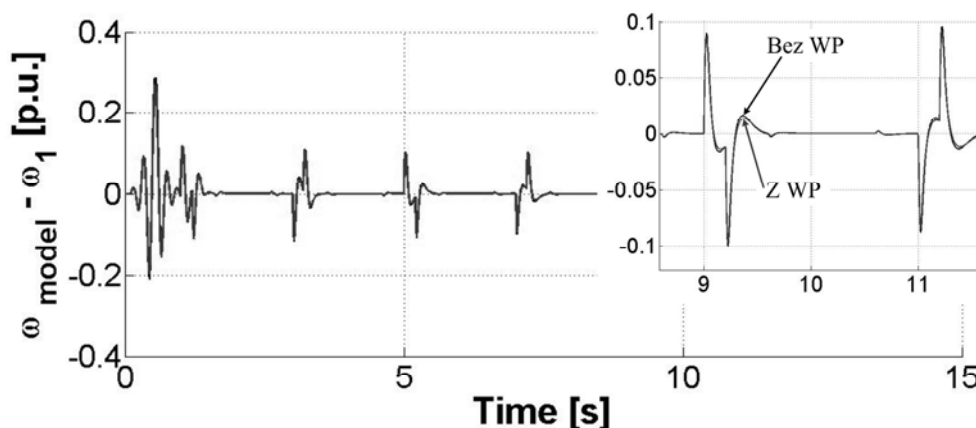
Rys. 5 Przebiegi prędkości zadanej i mierzonej (a), prądu twornika (b) oraz wartości współczynników wagowych (c) dla przypadku regulatora bez konkurencyjnej warstwy Petriego

Na rysunkach 5 i 6 zaprezentowano przebiegi wybranych zmiennych stanu układu dla przypadku z regulatorem bez konkurencyjnych warstw Petriego (rys.5) oraz dla przypadku układu z konkurencyjną warstwą Petriego k_4 odrzucającą 5 sygnałów. Rysunek 7 przedstawia przebiegi różnicy prędkości modelu oraz silnika dla obu typów regulatorów. Jak można zauważyć na tych

przebiegach różnicy, już w pierwszym okresie sterowania oscylacje tej zmiennej są mniejsze dla przypadku układu z warstwą konkurencyjną. W dalszych okresach działania układu, zauważalne są mniejsze przeregulowania w procesie powracania do prędkości zadanej po skokowej zmianie obciążenia.



Rys.6 Przebiegi prędkości zadanej i mierzonej (a), prądu twornika (b) oraz wartości współczynników wagowych (c) dla przypadku regulatora z konkurencyjną warstwą Petriego k_4 zerującą 5 sygnałów



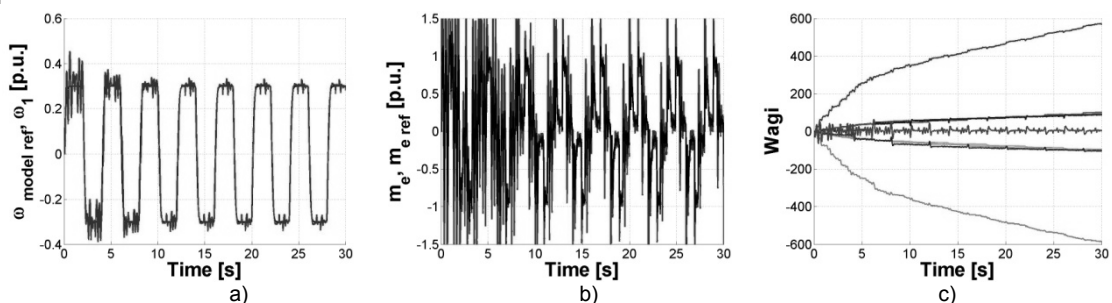
Rys.7 Przebieg różnicy prędkości modelu i mierzonej dla przypadku regulatora bez konkurencyjnej warstwy Petriego oraz z konkurencyjną warstwą Petriego k_4 zerującą 5 sygnałów

Badania eksperymentalne

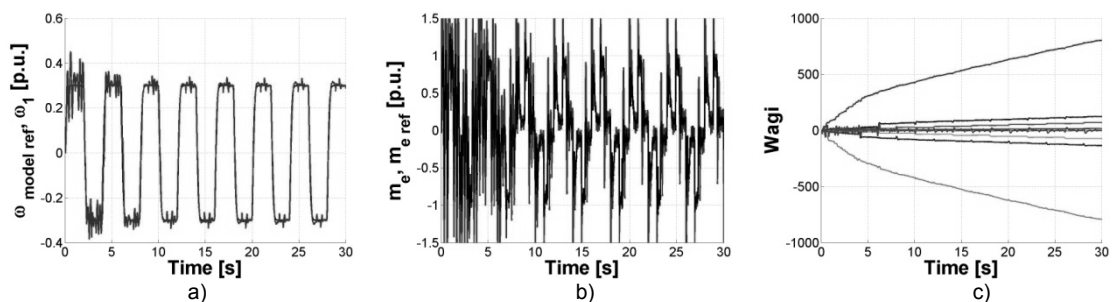
W trakcie badań eksperymentalnego przeprowadzono dwa testy, dla przypadku układu z regulatorem bez konkurencyjnych warstw Petriego, oraz dla przypadku układ z regulatorem z konkurencyjną warstwą Petriego k_4 odrzucającą 5 sygnałów. Doboru badanej warstwy dokonano na podstawie badań symulacyjnych, wybierając przypadek optymalny. Badania wykonano z użyciem platformy Denace 1103 oraz układu z dwoma silnikami

prądu stałego pracującymi jako silnik i obciążenie. Napęd pracował w trybie nawrotnym, przy okresowo zadawanym obciążeniu znamionowym.

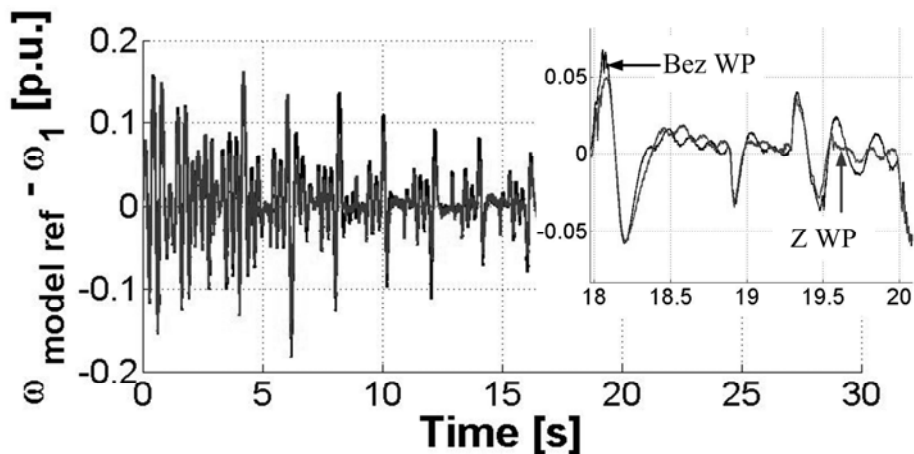
Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przebiegi wybranych zmiennych stanu układu odpowiednio dla przypadku bez warstwy Petriego oraz z warstwą Petriego. Rysunek 10 analogicznie jak dla przypadku badań symulacyjnych prezentuje porównanie przebiegów różnicy prędkości modelu oraz mierzonej dla układów bez oraz z WP



Rys. 8 Przebiegi prędkości zadanej i mierzonej (a), prądu twornika (b) oraz wartości współczynników wagowych (c) dla przypadku regulatora bez konkurencyjnej warstwy Petriego



Rys. 9 Przebiegi prędkości zadanej i mierzonej (a), prądu twornika (b) oraz wartości współczynników wagowych (c) dla przypadku regulatora z konkurencyjną warstwą Petriego k_4 zerującą 5 sygnałów



Rys. 10 Przebieg różnicy prędkości modelu i mierzonej dla przypadku regulatora bez konkurencyjnej warstwy Petriego oraz z konkurencyjną warstwą Petriego k_4 zerującą 5 sygnałów

Porównując wcześniej zdefiniowane wskaźniki jakości, w przypadku wskaźnika B1 uzyskano zmniejszenie o 23 % natomiast wskaźnik B2 zmalał o 31%. Pozwala to twierdzić o słuszności implementacji poszczególnych warstw w algorytmie adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego

Analizując poszczególne przebiegi, można zauważyć między innymi szybsze dostrajanie się wartości współczynników wagowych, które w chwili czasowej $t=0$ przyjmują wartości zerowe, co objawia się szybciej gasnącymi oscylacjami prędkości w pierwszych okresach działania układu.

Podsumowanie

W trakcie badań symulacyjnych udowodniono, że implementacja poszczególnych warstw Petriego typu konkurencyjnych, pozwala na poprawę dynamiki oraz zaproponowanych wskaźników jakości sterowania. Wyniki symulacyjne zostały potwierdzone w badaniu eksperymentalnym.

Szczególnie wartym zauważenia jest fakt przyspieszonej adaptacji poszczególnych współczynników wagowych układu z odpowiednio dobraną warstwą oraz jej parametrem.

Planowane są dalsze badania obejmujące między innymi inne algorytmy wyznaczania indeksów sygnałów które mają być zerowane w danej warstwie.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/B/ST7/02517

LITERATURA

- [1] Vasak M., Peric N., Stability analysis of a patched LQR control system for constrained multi-mass electrical drives, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 85 (2009), n.7, 109–114
- [2] Szabat K., Serkies P., Zastosowanie sterowania predykcyjnego w układzie napędowym z połączeniem sprężystym, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 2, 380–383

- [3] Serkies P., Szabat K., Dybkowski M., Predykcyjna regulacja prędkości układu dwumasowego z silnikiem indukcyjnym – badania symulacyjne. *Przeгляд Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 10, 303–306
- [4] Brock S., Sterowanie ślizgowe napędem bezpośrednim z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 4, 134–137
- [5] Pajchrowski T., Zastosowanie struktury MFC do odpornej regulacji prędkości obrotowej, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 86, (2010), nr 2, 319–324
- [6] Rong-Jong W., Chia-Chin C., Motion Control of Linear Induction Motor via Petri Fuzzy Neural Network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54 (2007), n.1, 281–295
- [7] Rong-Jong W., Chia-Ming L., Robust Control for Linear Induction Motor Servo Drive Using Neural Network Uncertainty Observer, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 56 (2009), n.7, 2667–2683
- [8] Szabat K., Dybkowski M., Derugo P., Zastosowanie adaptacyjnego neuronowo-rozmytego regulatora prędkości z konkurencyjnymi warstwami Petriego do sterowania silnika elektrycznego, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 64–67
- [9] Mamdani E.H., Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings IEEE*, No. 121 (12), (1974), 1585 - 1588
- [10] Orłowska-Kowalska T., Szabat K., Dybkowski M., Neuro-Fuzzy Adaptive Control of the IM Drive with Elastic Coupling', EPE – PEMC (2008), Poznań, Poland, on CD
- [11] Szabat K., Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym; Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Wrocław 2008

Autorzy: mgr. inż. Piotr Derugo, dr inż. Mateusz Dybkowski, dr hab. inż. Krzysztof Szabat, Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: piotr.derugo@pwr.wroc.pl, mateusz.dybkowski@pwr.wroc.pl, krzysztof.szabat@pwr.wroc.pl