

*regulator neuronowo-rozmyty, warstwy Petriego
sieci Petriego, sterowanie napędem elektrycznym*

Piotr DERUGO*

ANALIZA WPLYWU KONKURENCYJNYCH WARSTW PETRIEGO NA DZIAŁANIE REGULATORA NEURONOWO-ROZMYTEGO

W artykule przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania konkurencyjnych warstw Petriego w regulatorze neuronowo-rozmytym w celu poprawy wskaźników jakości sterowania. Opisano zasadę działania, oraz możliwe miejsca implementacji konkurencyjnej warstwy Petriego we wspomnianym regulatorze. Przeprowadzono serię badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Jako obiekt badawczy użyto obcowzbudnego silnika prądu stałego w kaskadowej strukturze regulacji. Analizowany regulator został wykorzystany w zewnętrznej pętli regulacji prędkości.

1. WSTĘP

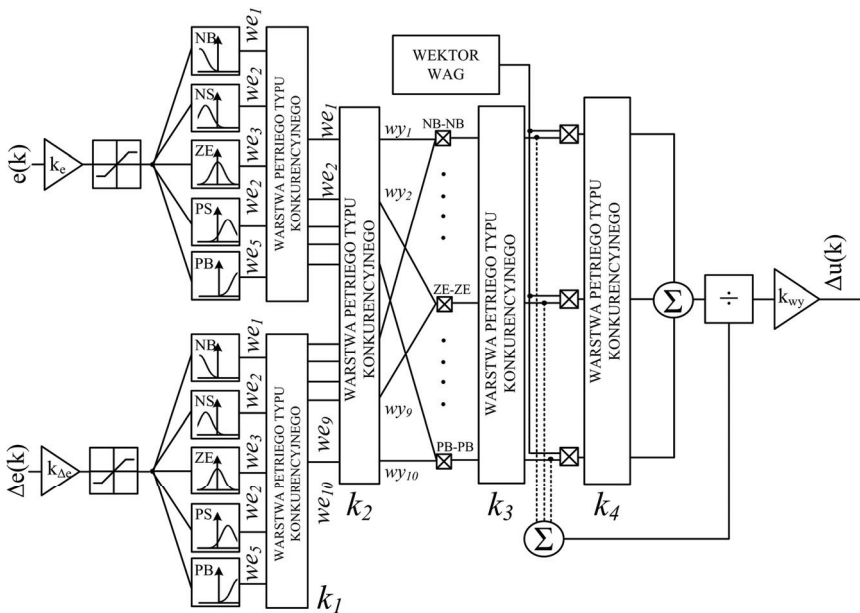
Współczesne przemysłowe układy napędowe cechują się znacznymi wymaganiami, odnośnie do jakości sterowania. Wymagania te podyktowane są wciąż rosnącymi oczekiwaniami odbiorców końcowych. Dokładność oraz powtarzalność produkcji przemysłowej w dużej mierze zależy od sterowania poszczególnymi procesami. W związku z tym, prowadzone są ciągłe badania nad możliwościami poprawy jakości procesów. Koniecznym staje się tworzenie rozwiązań znacznie bardziej zaawansowanych niż klasyczne regulatory typu PID. Jedną z takich możliwości jest logika rozmyta. W niniejszej publikacji przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania konkurencyjnych Warstw Petriego (WP) [5, 6] w neuronowo-rozmytym regulatorze neuronowo-rozmytym [1] o 25 regułach celem poprawy wskaźników jakości sterowania układu napędowego z silnikiem prądu stałego.

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

2. REGULATOR NEURONOWO-ROZMYTY Z KONKURENCYJNYMI WARSTWAMI PETREIGO

2.1. MOŻLIWE MIEJSCA ROZMIESZCZENIA WARSTWY KONKURENCYJNEJ

W trakcie analizy uwzględniono wszystkie możliwe miejsca rozmieszczenia konkurencyjnej WP. W przypadku klasycznego regulatora neuronowo-rozmytego [1] pierwszym możliwym miejscem implementacji WP jest jej umieszczenie pomiędzy warstwą przynależności oraz wnioskowania. W warstwie tej istnieją dwie piątki sygnałów odpowiadające wartościom funkcji przynależności sygnałów wejściowych. Potencjalne możliwości to umieszczenie dwóch warstw konkurencyjnych, z których każda odpowiadałaby za kontrolę jednej piątki sygnałów (k_1), lub umieszczenie jednej warstwy odpowiedzialnej za wszystkie dziesięć sygnałów (k_2). Aby układ umożliwiał sterowanie, każda z warstw k_1 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, może się zdarzyć, że układ regulacji będzie działał w sposób nieprawidłowy.



Rys. 1. Neuronowo-rozmyty regulator z zaznaczonymi możliwymi miejscami implementacji konkurencyjnych warstw Petreigo

Kolejnym z możliwych miejsc umieszczenia konkurencyjnej WP jest warstwa wnioskowania, przed odczytaniem wartości współczynników przynależności do algo-

rytmu inferencji ($k3$). Sygnały o najmniejszej wartości są zerowane i nie mają wpływu na wyjściową wartość sterowania.

Ostatnią z możliwości jest umieszczenie WP w warstwie defuzyfikacji, w ten sposób, że wszystkie sygnały są sumowane podczas obliczania mianownika funkcji defuzyfikacji, jednak nie wszystkie są brane pod uwagę podczas wyznaczania licznika tej funkcji ($k4$). Wszystkie z możliwych implementacji oznaczono na rysunku 1.

2.2. KONKURENCYJNA WARSTWA PETRIEGO

Konkurencyjna WP spośród znanej ilości sygnałów wejściowych podaje na wyjścia jedynie k sygnałów o największej wartości, co do modułu. Pozostałe sygnały są zerowane zgodnie z równiami (1)–(3).

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

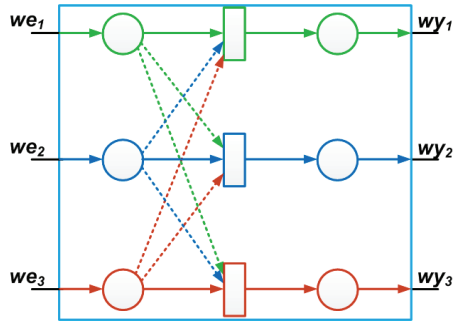
$$\underset{\substack{we_i \in A \\ i=1 \dots n}}{\forall} wy_i = we_i \quad (2)$$

$$\underset{\substack{we_i \notin A \\ i=1 \dots n}}{\forall} wy_i = 0 \quad (3)$$

gdzie: A – wektor k wartości maksymalnych z wartości wektora wejściowego, $\max \underline{k}$ – 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 – liczba elementów wektorów wejściowego oraz wyjściowego.

Operator $\max \underline{k}$ 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 są akceptowane. Rozwiązanie to jest istotne z punktu widzenia stabilności układu. W przyszłych pracach przewidziana jest implementacja operatora $\max \underline{k}$ akceptująca sztywną liczbę sygnałów, w przypadku równości sygnałów, która mogłaby spowodować konieczność akceptacji większej liczby sygnałów, algorytm będzie dokonywał selekcji na podstawie znajomości stanów układu w poprzednich chwilach czasowych oraz wiedzy eksperckiej.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat sieci Petriego opisujący trójwejściową warstwę konkurencyjną typu Petriego. Warunkiem aktywacji przejścia dla danego toru $we_n - wy_n$ jest spełnienie przez sygnał warunku przynależności do operatora $\max \underline{k}$.



Rys. 2. Sieć Petriego opisująca warstwę konkurencyjną

3. UKŁAD BADAWCZY

3.1. MODEL SYMULACYJNY

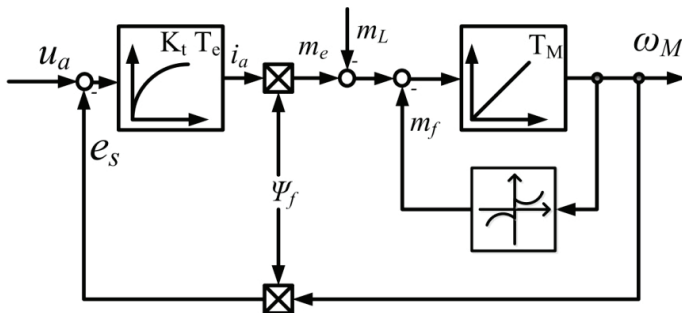
W badaniach do niniejszej pracy wykorzystano obcowzbudny silnik prądu stałego. Założono stałą wartość strumienia wzbudzenia Ψ_f . Dzięki takiemu założeniu silnik taki można opisać za pomocą równań w jednostkach względnych [3].

$$T_e \frac{di_a}{dt} = -i_a + K_t(u_a - \psi_f \omega_M) \quad (4)$$

$$T_M \frac{d\omega_M}{dt} = \psi_f i_a - m_L - m_f \quad (5)$$

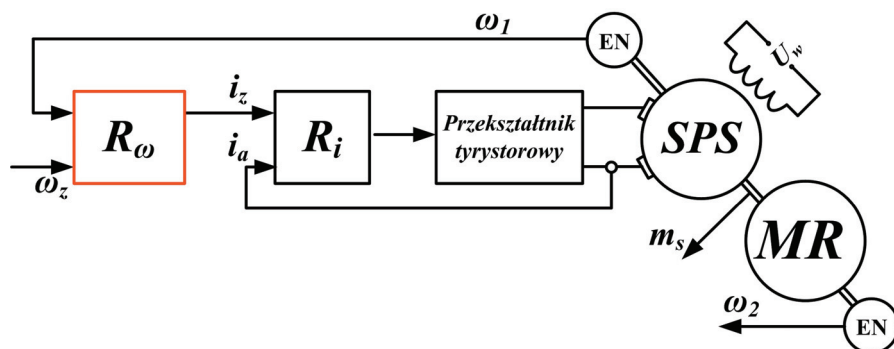
gdzie: T_e – stała elektromagnetyczna, T_M – stała mechaniczna, i_a – prąd twornika, ω_m – prędkość, Ψ_f – strumień wzbudzenia, m_L – moment obciążenia, m_f – tarcie.

Schemat blokowy silnika DC odpowiadający równaniom (4) i (5), przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy silnika prądu stałego

Układ sterowania składa się z dwóch kaskadowo połączonych regulatorów (rys. 4). W pętli zewnętrznej zastosowano regulator prędkości mający na celu skompensowanie stałej mechanicznej układu, będącej największą stałą czasową układu. W pętli wewnętrznej użyty został regulator prądowy niwelujący wpływ mniejszych stałych czasowych występujących w układzie. W trakcie badań zaproponowane regulatory implementowane były jako regulator prędkości.



Rys. 4. Schemat blokowy kaskadowej struktury sterowania

W przypadku badań zarówno symulacyjnych, jak i eksperymentalnych użyto układu z połączeniem sprzężystym. Część mechaniczną takiego układu można opisać równaniami (6)–(8) [2, 4].

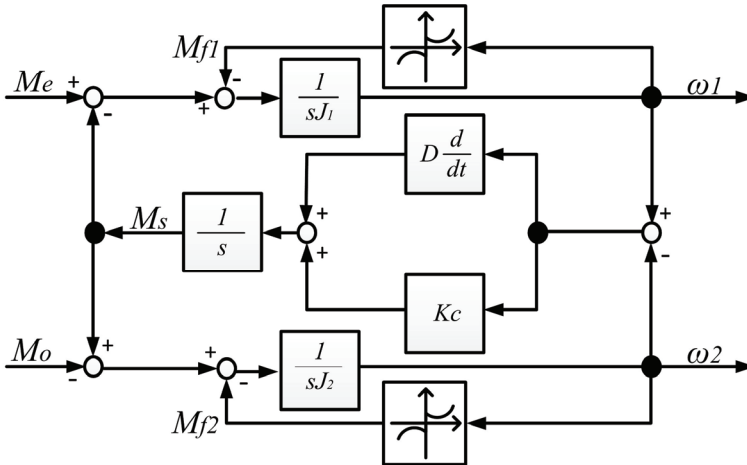
$$\frac{d\omega_1(t)}{dt} = \frac{1}{J_1} [M_e(t) - M_s(t) - M_{f1}] \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_2(t)}{dt} = \frac{1}{J_2} [M_s(t) - M_o(t) - M_{f2}] \quad (7)$$

$$\frac{dM_s}{dt} = K_C [\omega_1(t) - \omega_2(t)] + D \frac{d[\omega_1(t) - \omega_2(t)]}{dt} \quad (8)$$

gdzie: ω_1 , ω_2 – prędkości maszyny napędzającej i roboczej, M_S – moment skrętny, K_C , D – współczynniki sprzężystości i tłumienia drgań, $M_{f1,2}$ – moment tarcia, $J_{1,2}$ – momenty bezwładności silnika i obciążenia.

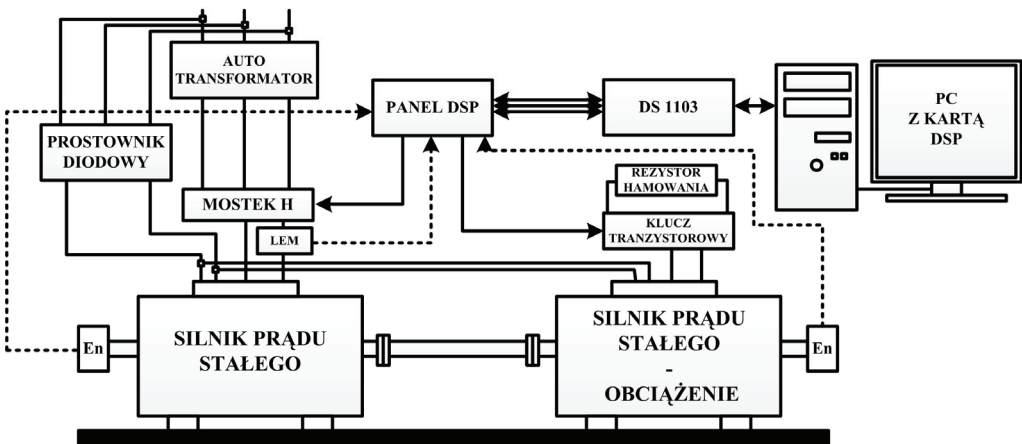
Schemat blokowy odpowiadający powyższym równaniom prezentuje rysunek 5.



Rys. 5. Schemat blokowy części mechanicznej silnika z połączeniem sprężystym

3.2. UKŁAD EKSPERYMENTALNY

Badania eksperymentalne zostały zrealizowane na stanowisku laboratoryjnym składającym się z dwóch silników prądu stałego typu PZBb 22b (silnik-obciążenie). Zasilanie silnika odbywa się poprzez mostek H. Sterowanie zestawem odbywa się za pomocą komputera wyposażonego w procesor sygnałowy i oprogramowanie dSPACE 1106. Obwód regulacji próbkowany jest z częstotliwością 2 kHz. Układ dwumasowy uzyskano poprzez użycie wału sprężystego. Schemat blokowy układu badawczego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy układu eksperymentalnego

4. BADANIA

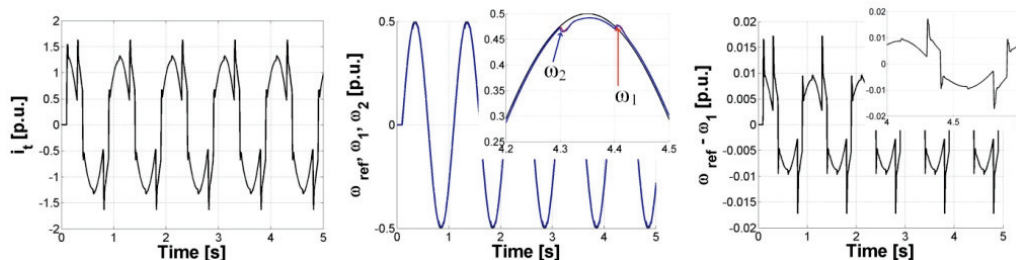
W trakcie badań, w pierwszej kolejności przeprowadzono pełne testy symulacyjne. Przeanalizowano wszelkie możliwe pozycje oraz parametry konkurencyjnych WP. Badania przeprowadzono dla trajektorii sinusoidalnej i prostokątnej. Układ pracował w trybie pracy nawrotnej z okresowo załączanym obciążeniem. Zastosowano trzy kryteria jakości sterowania. B1 – ISE (suma kwadratów błędów w czasie symulacji), B2 – ISE dla stanów statycznych ($t = [0,75-2 \text{ s}], [2,75-4 \text{ s}], [4,75-6 \text{ s}], [6,75-8 \text{ s}], [8,75-10 \text{ s}]$), B3 – ISE dla stanów dynamicznych (B1-B2). Wyniki zestawiono w tabelach 1–4. Jako n oznaczono ilość zerowanych sygnałów, oznaczenie ZE oznacza niepożądaną pracę układu.

4.1. WYNIKI SYMULACYJNE

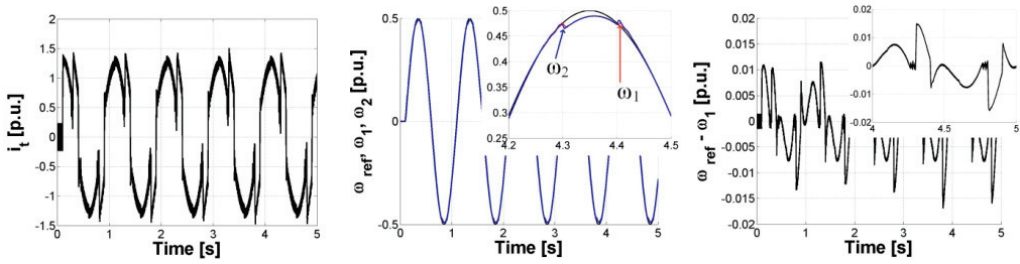
W tabeli 1 przedstawiono zmiany kryteriów jakości sterowania dla przypadków różnej ilości odrzucanych reguł przez warstwę k_1 . Analizując tabelę zauważyć można istotną poprawę wskaźników jakości regulacji dla przypadku odrzucania 3 z 5 sygnałów wejściowych. Odrzucanie 1 i 2 sygnałów skutkuje nieznaczną zmianą wskaźników, jednak jest to zmiana na poziomie błędu numerycznego.

Tabela 1. Zestawienie zmian kryteriów jakości sterowania dla przypadku warstwy k_1

K1	n	0	1	2	3	4
Nawroty – prostokąt	B1	0,00%	–0,01%	0,07%	–48,63%	ZE
	B2	0,00%	–0,01%	0,06%	–59,11%	ZE
	B3	0,00%	–0,03%	0,07%	–3,35%	ZE
Nawroty – sinus	B1	0,00%	–0,11%	0,07%	–36,41%	ZE
	B2	0,00%	–0,11%	0,07%	–32,15%	ZE
	B3	0,00%	–0,11%	0,07%	–43,28%	ZE



Rys. 7. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem bez WP



Rys. 8. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem z warstwą k_1 zerujące 3 sygnały

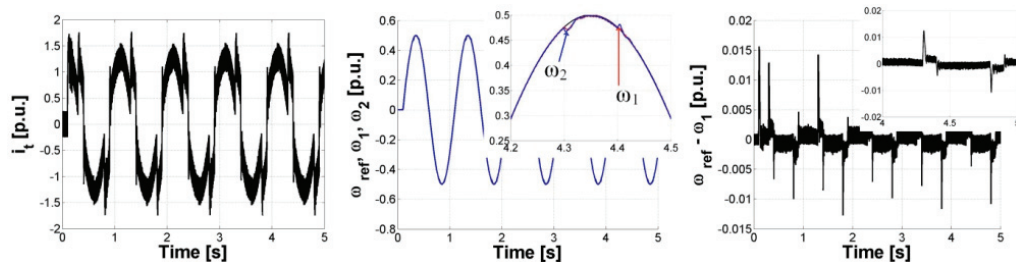
Na rysunkach 7 i 8 zaprezentowano przebiegi wybranych zmiennych odpowiednio układu z regulatorem bez WP oraz z WP k_1 zerującą 3 spośród 5 sygnałów. Dla większej przejrzystości przedstawiono jedynie 5 pierwszych sekund symulacji. Układ Rozpoczyna pracę w chwili czasowej $t = 0,2$ s. Poza chwilami skokowych zmian obciążenia układ z dobrą dokładnością śledzi zadaną trajektorię.

Analizując przebiegi, zauważyć można lepsze śledzenie trajektorii zadanej przez układ z WP w porównaniu do układu bez WP. Dobrze widoczne jest to na przykładzie przebiegów różnicy prędkości referencyjnej oraz mierzonej. Co istotne pomimo mniejszych wartości maksymalnych prądu, zauważyć można jego oscylacje o małej amplitudzie.

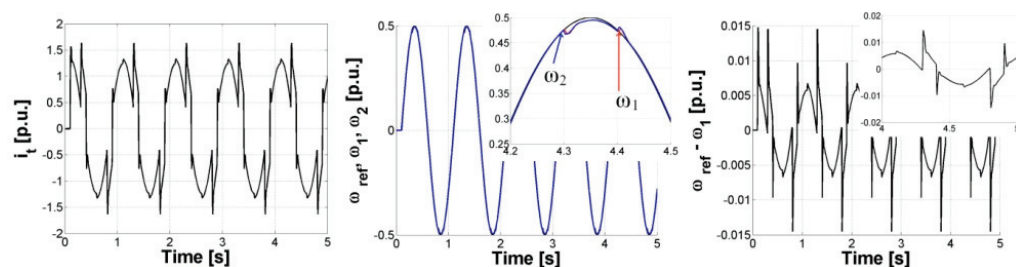
W przypadku warstwy k_2 (tabela 2) widać analogiczne zachowanie układu, istotną poprawę obserwuje się dla przypadków warstwy zerującej 5–7 sygnałów. Na rysunku 9 widać znaczne zmniejszenie wartości uchybów regulacji dla stanów statycznych, okupione jest to jednak wzrostem amplitudy oscylacji w przebiegach prądu oraz różnicy prędkości zadanej i mierzonej.

Tabela 2. Zestawienie zmian kryteriów jakości sterowania dla przypadku warstwy k_2

K2	n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Nawroty – prostokąt	B1	0,00%	-0,16%	-0,01%	-0,16%	0,07%	-87,03%	-48,63%	-87,03%	ZE
	B2	0,00%	-0,14%	-0,01%	-0,14%	0,06%	-88,78%	-59,11%	-88,78%	ZE
	B3	0,00%	-0,24%	-0,03%	-0,23%	0,07%	-79,45%	-3,35%	-79,45%	ZE
Nawroty – sinus	B1	0,00%	-0,13%	-0,11%	-0,13%	0,07%	-91,90%	-36,41%	-91,90%	ZE
	B2	0,00%	-0,13%	-0,11%	-0,13%	0,07%	-91,44%	-32,15%	-91,44%	ZE
	B3	0,00%	-0,13%	-0,11%	-0,13%	0,07%	-92,65%	-43,28%	-92,65%	ZE



Rys. 9. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem z warstwą k_2 zerujące 7 sygnały



Rys. 10. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem z warstwą k_3 zerujące 18 sygnały

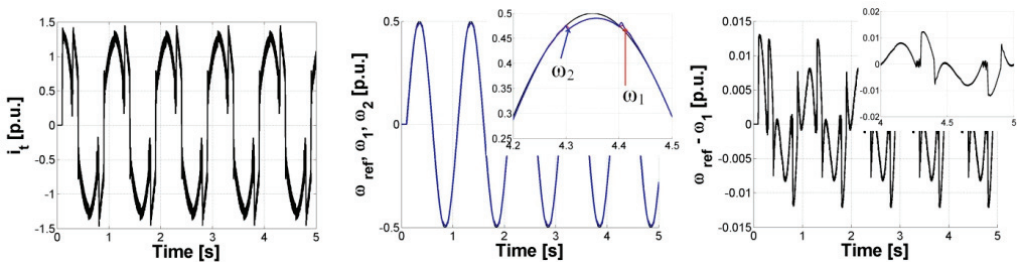
Tabela 3. Zestawienie zmian kryteriów jakości sterowania dla przypadku warstwy k_3

K3	n	Nawroty - prostokąt																								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nawroty - sinus	B1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-26,6%	-57,9%	-18,1%	17,9%	-91,4%	-37,4%	-91,4%	ZE	ZE
	B2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-25,7%	-57,8%	-16,9%	17,6%	-90,1%	-33,9%	-90,1%	ZE	ZE
	B3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-28,1%	-58,1%	-20,2%	18,5%	-93,5%	-42,9%	-93,5%	ZE	ZE
	B1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-26,6%	-57,9%	-18,1%	17,9%	-91,4%	-37,4%	-91,4%	ZE	ZE
	B2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-25,7%	-57,8%	-16,9%	17,6%	-90,1%	-33,9%	-90,1%	ZE	ZE
	B3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-28,1%	-58,1%	-20,2%	18,5%	-93,5%	-42,9%	-93,5%	ZE	ZE
	B1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-26,6%	-57,9%	-18,1%	17,9%	-91,4%	-37,4%	-91,4%	ZE	ZE
	B2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-25,7%	-57,8%	-16,9%	17,6%	-90,1%	-33,9%	-90,1%	ZE	ZE
	B3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-28,1%	-58,1%	-20,2%	18,5%	-93,5%	-42,9%	-93,5%	ZE	ZE

W tabelach 3 oraz 4 przedstawiono odpowiednio wpływ parametrów konkurencyjnych WP oznaczonych jako k_3 oraz k_4 na wartości wskaźników jakości sterowania. Podobnie jak w przypadku warstw k_1 oraz k_2 obserwuje się małe zmiany wskaźników jakości w momencie odrzucania mniej niż połowy sygnałów. Istotne zmiany obserwuje się dla przypadków odrzucania więcej niż 16 sygnałów, dla warstwy k_3 oraz więcej niż 19 sygnałów, dla warstwy k_4 . Dla przypadku warstwy k_4 odrzucającej 23 sygnały obserwuje się podobne zachowanie układu jak dla przypadku układu z warstwą k_1 odrzucającą 3 sygnały, mniejszy błąd regulacji, oraz pojawienie się oscylacji prądu.

Tabela 4. Zestawienie zmian kryteriów jakości sterowania dla przypadku warstwy k_4

K4	n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nawroty - prostokąt	B1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0,01%	-0,14%	0%	-0,14%	0,07%	-57,4%	18,1%	-85,4%	-48,5%	-85,4%
	B2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0,01%	-0,12%	0%	-0,12%	0,07%	-56,2%	17,8%	-88,0%	-51,4%	-88,0%
	B3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	0%	0%	-0,01%	-0,03%	0,01%	-0,21%	-0,02%	-0,21%	0,07%	-62,4%	19,2%	-73,8%	-35,9%	-73,8%
Nawroty - sinus	B1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0,01%	-0,11%	-0,09%	-0,11%	0,07%	-57,5%	19,6%	-91,4%	-41,9%	-91,4%
	B2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	0,01%	-0,12%	-0,09%	-0,12%	0,07%	-57,4%	19,2%	-90,1%	-41,9%	-90,1%
	B3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-0,01%	-0,02%	0%	0,01%	-0,11%	-0,09%	-0,11%	0,08%	-57,7%	20,2%	-93,5%	-42,1%	-93,5%



Rys. 11. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem z warstwą k_4 zerującą 23 sygnały

4.2. WYNIKI EKSPERYMENTALNE

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki eksperymentalne uzyskane w układzie napędowym z dwoma silnikami prądu stałego oraz kartą DSpace 1103. Badania przeprowadzono dla wybranych parametrów konkurencyjnych warstw Petriego. Wyniki zmian wskaźników jakości pod wpływem implementacji poszczególnych warstw wraz z parametrami zestawiono w tabeli 5. Wybrane przebiegi zmiennych stanu układu dla różnych przypadków zaprezentowano na rysunkach 12–15.

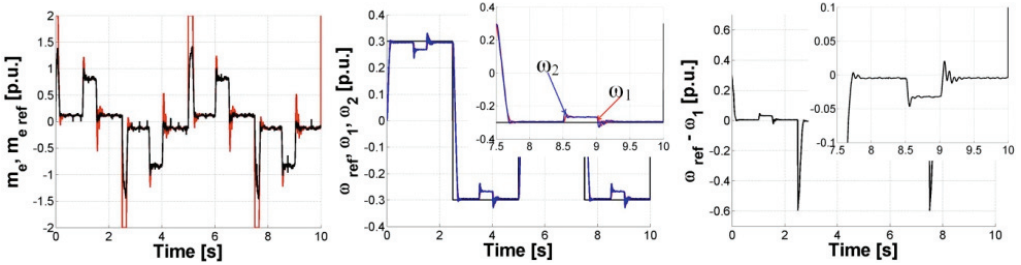
Tabela 5. Zestawienie zmian kryteriów jakości sterowania w badaniach eksperymentalnych

Prostokąt	Ref		$k_1 = 3$		$k_2 = 5$		$k_2 = 6$		$k_2 = 7$		$k_3 = 17$		$k_3 = 18$		$k_3 = 19$		$k_3 = 20$		$k_3 = 21$		$k_3 = 22$		$k_3 = 23$		$k_4 = 20$		$k_4 = 21$		$k_4 = 22$		$k_4 = 23$		$k_4 = 24$			
	B3	B2	B1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
	0,0%	0,0%	0,0%	-1,39%	1,19%	-1,09%	1,51%	2,13%	2,22%	2,45%	0,94%	1,64%	-0,76%	0,72%	2,23%	1,30%	3,36%	2,03%	2,84%	0,0%	-4,06%	-1,47%	-3,75%	-1,07%	1,92%	1,67%	1,97%	1,29%	-0,92%	-3,40%	-1,81%	1,66%	1,56%	0,75%	-0,67%	0,33%

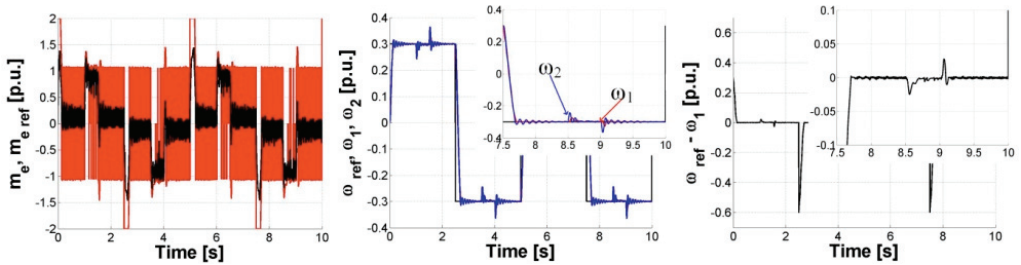
Analizując tabelę 5, można zauważyć znaczne zmiany wartości wskaźników. Szczególnie w przypadkach $k_1 = 3$, $k_2 = 6$, $k_3 = 22$ widoczna jest poprawa analizowanych wskaźników, co zgadza się z symulacjami. Podobnie w przypadku $k_4 = 21$ oraz $k_3 = 20$ zarówno w symulacjach, jak i w eksperymentach wszystkie wskaźniki ulegają pogorszeniu. W pozostałych przypadkach zgodność pomiędzy symulacjami, a eksperymentem wykazuje jedynie wskaźnik B2. Z uwagi na to iż sygnały są zerowane w kolejności od najmniejszego do największego pod względem wartości modułu oraz faktu funkcji przynależności o kształcie gaussowskim największy wpływ na aktualną wartość sterowania mają 3–5 reguł o największym poziomie aktywacji. Pomiedzy regułą o największym poziomie aktywacji, a piątą w kolejności, są co najmniej trzy rzędy różnicy. W związku z tym poziom zmian oferowany w przypadku pozostawienia co najmniej 4 najbardziej aktywnych reguł jest kilkukrotnie mniejszy niż w przypadku zerowania co najmniej jednej z nich.

Rysunki 12–15 prezentują wybrane przebiegi zmiennych układu, kolejno dla układu z regulatorem bez WP, z warstwą k_1 zerującą 3 sygnały, warstwą k_3 zerującą 22 sygnały oraz warstwą k_4 zerującą 23 sygnały. Jak można zauważyć analizując wspomniane przebiegi, implementacja każdej z warstw pozwoliła na znaczne ograniczenie wartości błędu ustalonego podczas pracy z obciążeniem. Lepsza kontrola

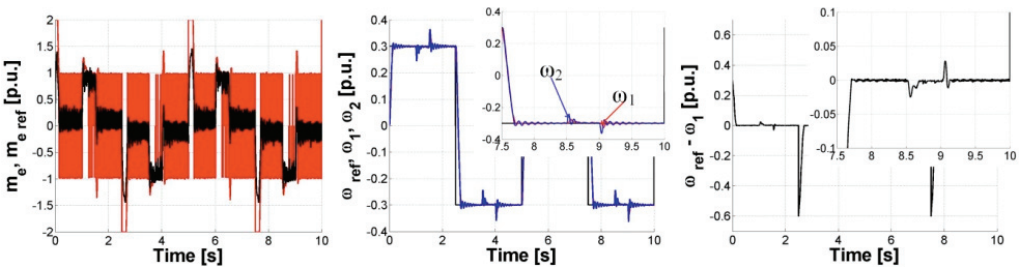
ω_1 skutkuje niestety większymi oscylacjami prędkości maszyny obciążającej w stanach o dużej dynamice. Zauważalne są także, podobnie jak w badaniach symulacyjnych, oscylacje prądu mierzonego o dużej częstotliwości oraz stosunkowo niewielkiej amplitudzie.



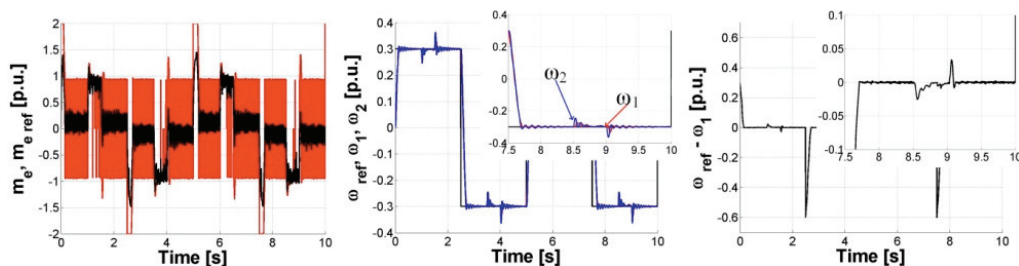
Rys. 12. Przebiegi eksperymentalne wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem bez WP



Rys. 13. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem z warstwą k_1 zerujące 3 sygnały



Rys. 14. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem z warstwą k_3 zerujące 22 sygnały



Rys. 15. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla układu z regulatorem z warstwą k_4 zerujące 23 sygnały

Analizując przebiegi z rysunków 13–15, można stwierdzić brak istotnych różnic w zależności od implementacji poszczególnych warstw. W przypadku przebiegów różnicy prędkości zadanej oraz mierzonej widać nieznaczne różnice w chwilach gdy układ działa pod obciążeniem. Co istotne, każda z zaprezentowanych warstw pozwala na znaczne poprawienie wskaźników jakości w stosunku do układu odniesienia bez konkurencyjnych WP.

5. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, stwierdzić można o słuszności stosowania konkurencyjnych warstw Petriego w regulatorach neuronowo-rozmytych w celu eliminacji pewnej liczby sygnałów. Pozorne ograniczenie skutkuje poprawą dynamiki działania układu, a tym samym prowadzi to zmniejszenia wartości zaproponowanych wskaźników jakości regulacji. Szczególnie dobre efekty dają warstwy oznaczone jako k_1 oraz k_2 zerujące odpowiednio 3 oraz 6 sygnałów. Implementacje te sprawdzają się zarówno w przypadku badań symulacyjnych jak i eksperymentalnych. W przyszłych pracach planowane są inne algorytmy wyznaczania sygnałów które mają ulegać zerowaniu.

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] DERUGO P., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego neuronowo-rozmytego regulatora prędkości z konkurencyjnymi warstwami Petriego do sterowania silnika elektrycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 89, nr 12, 2013, 64–67.
- [2] 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.

- [3] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., JASZCZAK K., *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] SERKIES P., SZABAT K., *Predykcyjny regulator prędkości napędu dwumasowego z rozmytą adaptacją ograniczeń*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 88, nr 4, 2012, 209–212.
- [5] 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.
- [6] 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.

ANALYSIS OF COMPETITIVE PETRI LAYERS IMPACT ON FUZZY MAMDANI TYPE REGULATOR PERFORMANCE

The article analyzes the possibility of using competitive Petri layers in neuro-fuzzy controller for improvement of control quality. Principle of operation, and the possible implementation of a competitive Petri layer in controller are presented. A series of simulations and experiments are conducted in order to show improvement. As a research plant separately excited DC motor in a cascade control structure was used. Analyzed controller is used in the outer speed control loop.