



Politechnika Wroclawska

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
AUTOMATYKA I ROBOTYKA
Specjalność: Automatyka napędu elektrycznego

Piotr Derugo

Sieci Petriego w regulatorach rozmytych
Fuzzy Controllers with petri nets

AUTOREFERAT

Studia: stacjonarne
Promotor: dr hab. Krzysztof Szabat prof. PWr
Promotor pomocniczy: dr inż. Jarosław Kacerka (Politechnika Łódzka)
Katedra Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Politechnika Wroclawska

Wroclaw-Łódź, 2013-2016

SYLWETKA DOKTORANTA

Doktorant Piotr Derugo studia magisterskie w Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Elektrycznym w dziedzinie Automatyka i Robotyka ukończył jako jeden z dziesięciu najlepszych studentów w roku 2012. Zwieńczeniem studiów drugiego stopnia była praca magisterska na temat adaptacyjnego sterowania rozmytego silnika indukcyjnego. Po pozytywnej obronie doktorant wziął udział w 2 miesięcznym wolontariacie w Mołdawii gdzie pracował z młodzieżą w wieku licealnym. We wrześniu 2012 rozpoczął studia doktoranckie na wydziale macierzystym.

Tematyka, wokół której skupił się doktorat była w znacznej mierze kontynuacją zainteresowań wcześniejszych i objęła sterowanie rozmyte dla różnego rodzaju napędów elektrycznych.

W trakcie studiów doktoranckich doktorant pracował jako wykonawca w dwóch grantach NCN, z czego w znacznej mierze praca doktorska była realizowana w ramach grantu „Adaptacyjne sterowanie rozmyte złożonego układu napędowego o zmiennych parametrach”.

W trakcie 4 letnich studiów doktoranckich doktorant był autorem lub współautorem 26 publikacji o charakterze naukowym. Wśród nich 4 publikacje w ramach konferencji SENE (2013, 2015), z czego jedna samodzielna. Kolejne 4 z pośród publikacji ukazały się nakładem Przeglądu Elektrotechnicznego. Wśród dorobku doktoranta należy wyróżnić publikację w czasopiśmie Compel znajdującego się na liście filadelfijskiej, a także udział w krajowych jak i zagranicznych konferencjach naukowych.

Zwieńczeniem dotychczasowej pracy badawczej jest dysertacja doktorska o temacie „Sieci Petriego w Regulatorach Rozmytych”. Autoreferat rozprawy zamieszczono poniżej. Zamieszczono w nim prócz tytułu uzasadnienie celu i tematu, tezy, krótki opisu struktury rozprawy z zaprezentowaniem metodologii badawczej, a także znaczenia teoretycznego jak i praktycznego wykonanych prac.

TYTUŁ DYSERTACJI

Sieci Petriego w Regulatorach Rozmytych

CELOWOŚĆ WYBORU TEMATU

W miarę rozwoju automatyzacji, układom regulacji stawiane są coraz większe wymagania [1] dotyczące ich właściwości statycznych i dynamicznych. Wiele prac skupia się na poprawie jakości regulacji poprzez opracowywanie nowych jak i modyfikację istniejących algorytmów sterowania. Jako przykład można wymienić sterowanie predykcyjne [15], adaptacyjne [7], [16] czy rozmyte [9], [10], [13]. Zwłaszcza te ostatnie cieszą się stale rosnącym zainteresowaniem.

Pierwsze regulatory rozmyte zaproponował w latach 70 XX wieku prof. E. Mamdani. Obecnie są one podstawą wielu układów opartych na logice rozmytej. Systemy wnioskowania rozmytego są wykorzystywane jako regulatory w wielu aplikacjach przemysłowych w tym napędzie elektrycznym. Pomimo swojej popularności posiadają one szereg wad. W klasycznym podejściu modelowanie (sterowanie) lokalnych nieliniowości polega na zagęszczeniu podziału siatkowego, co prowadzi do znacznego zwiększenia wymiaru bazy reguł.

Liczne ośrodki krajowe jak i światowe pracują nad poprawą działania klasycznych regulatorów rozmytych poprzez modyfikację ich struktury. Modyfikacje te polegają między innymi na wprowadzaniu dodatkowych sprzężeń rekurencyjnych [6], zastępowaniu zbiorów typu I zbiorami typu II [8], używaniu funkcji Falkowych [1].

Jak wspomniano wyżej, najprostszą możliwością zwiększenia potencjału dopasowania się powierzchni sterowania do obiektu jest zwiększenie liczby reguł. Podejście takie jednak napotyka na istotny problem. Wzrost liczby reguł przekłada się na zwiększenie złożoności obliczeniowej regulatora rosnącej w szybkim tempie. Prowadzi to do zwiększenia kosztów numerycznych takiego rozwiązania [4], [5]. Jedną z metod, umożliwiającą redukcję złożoności obliczeniowej regulatora, jest jego implementacja *off-line* w sposób analogiczny do algorytmów predykcyjnych *off-line*. Utrudnia to jednak wprowadzenie bezpośredniej adaptacji do struktury regulatora i z tego powodu jest to rzadko stosowane podejście. Tak więc poszukiwanie rozwiązań umożliwiających redukcję złożoności obliczeniowych regulatorów rozmytych jest jak najbardziej

oczekiwane. Podobnie, poszukuje się algorytmów poprawiających jakość sterowania rozmytego nie powodujących istotnego wzrostu złożoności obliczeniowej.

W ostatnich latach pojawiają się prace stosujące w zaawansowanych układach sterowania algorytmy zaczerpnięte z teorii sieci Petriego. Pierwotnie były one implementowane przede wszystkim w analizie procesów informatycznych czy produkcyjnych [11], [23], [24]. Wraz z upływem czasu ich zakres zastosowań systematycznie się zwiększał. Obecnie aplikuje się je w różnych dziedzinach techniki w tym w sterowaniu rozmytym [12], [14], [21]. Zdaniem autora, algorytmy zaczerpnięte z sieci Petriego zawierają w sobie bardzo duży potencjał usprawniający działanie sterowania rozmytego. Celem jaki realizuje rozprawa jest zaprezentowanie, przebadanie oraz przeanalizowanie możliwości wykorzystania warstw Petriego w regulatorach rozmytych w celu poprawy wskaźników jakości działania układu.

TEZY

We wstępie postawiono dwie tezy, których udowodnienia podjęto się w niniejszej rozprawie. Pierwsza teza mówi o możliwości wprowadzenia do struktury neuronowo rozmytych regulatorów dodatkowych warstw, których działanie oparte jest na teorii Sieci Petriego. Warstwy te, poprzez modyfikację wypadkowej funkcji sterującej pozwalają na poprawę wskaźników jakości sterowania. Warstwy nazwano Warstwami Konkurencyjnymi Petriego. Druga z tez również mówi o możliwości zastosowania elementów teorii SP, tym razem w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej układów neuronowo-rozmytych. Tezy te udowodniono zarówno dla regulatorów nieadaptacyjnych jak i adaptacyjnych.

ZASTOSOWANA METODOLOGIA BADAWCZA ORAZ STRUKTURA PRACY

W pierwszej kolejności przeprowadzony został przegląd literatury, zarówno krajowej jak i światowej w celu określenia zasadności wybranego tematu, a także określenia założeń początkowych dla pracy.

Rozdział 2 opisuje modele matematyczne obiektów i układów regulacji użytych w trakcie badań. Opisano w nim także podstawy teoretyczne działania używanych silników. W kolejnych rozdziałach opisano kolejno w sposób ogólny systemy neuronowo rozmyte (rozdział 3), strukturę sterowania adaptacyjnego z

modelem odniesienia (rozdział 4) oraz Sieci Petriego (rozdział 5) które są punktami wyjściowymi do dalszej analizy.

W rozdziale 5 przedstawiono zaproponowane układy regulatorów neuronowo rozmytych z zaimplementowanymi warstwami Petriego. W pierwszej kolejności w podrozdziale 6.2 opisane zostały warstwy konkurencyjne Petriego oraz ich potencjalne implementacje w regulatorach neuronowo-rozmytych. Począwszy od opisu zasady działania wspomnianej warstwy, poprzez jej potencjalne pozycje w strukturze regulatorów nieadaptacyjnych i adaptacyjnych, aż po analizę wpływu WKP na algorytm działania regulatora. Zasada działania WKP polega na resetowaniu pewnych sygnałów istniejących w poszczególnych warstwach systemu neuronowo-rozmytego. Resetowanie sygnałów powoduje zmianę wypadkowej funkcji sterującej. Wyzerowane sygnały przestają mieć wpływ na wynikową funkcję sterującą, co wpływa na zmianę wskaźników jakości sterowania. Podrozdział 6.3 opisuje warstwę tranzycji Petriego. Warstwa tranzycji sprawia, iż pewne sygnały podobnie jak w warstwie konkurencyjnej przestają mieć wpływ na wynikową funkcję sterującą, jednakże w tym przypadku sygnały nie są resetowane, lecz w ogóle nieuwzględniane w algorytmie. Z punktu widzenia wartości wyjściowej suma wyjściowa pewnych sygnałów i suma tych samych sygnałów z wartościami zerowymi jest tożsama, jednakże z punktu widzenia złożoności numerycznej algorytm wymaga znacznie mniejszych nakładów obliczeniowych. Zmiany złożoności obliczeniowej regulatorów adaptacyjnych i nieadaptacyjnych z WT opisano w podrozdziałach 6.3.2 i 6.3.3.

W rozdziale 7 zaprezentowano na przykładzie układu adaptacyjnego metodologię projektowania regulatora neuronowo – rozmytego. Opisano zarówno sposób doboru struktury układu (liczba wejść, użyte funkcje przynależności etc.) jak i doboru poszczególnych parametrów regulatora.

W rozdziale 8 przeprowadzono obszerne badania zarówno symulacyjne jak i eksperymentalne. W pierwszej kolejności przeprowadzone zostały badania symulacyjne, a następnie eksperymentalne WKP w regulatorach nieadaptacyjnych oraz adaptacyjnych. Następnie przeprowadzono podobnie badania symulacyjne, a następnie eksperymentalne regulatorów z WT. W trakcie badań regulatorów z WT pod uwagę wzięto układy adaptacyjne, a także adaptacyjne z rekurencjami.

Podrozdział 8.8 prezentuje badania symulacyjne regulatorów nieadaptacyjnych z WKP. W przypadku zoptymalizowanej pętli wewnętrznej (wymuszenia prądu / momentu) obiekt sterowania w postaci silnika elektrycznego prądu stałego, silnika indukcyjnego sterowanego polowo czy liniowego o magnesach trwałych mogą z pewnym przybliżeniem być traktowane jako inercja, w związku z tym symulacje przeprowadzono tylko i wyłącznie dla przypadku silnika prądu stałego, natomiast w eksperymentach użyto różnych maszyn. W podrozdziale 8.9 przeprowadzono analogiczne badania symulacyjne dla układów regulatorów adaptacyjnych z WKP.

W podrozdziałach 8.10 oraz 9.11 w celu weryfikacji wcześniejszych przypuszczeń przeprowadzono serie badań eksperymentalnych odpowiednio dla układów nieadaptacyjnych (8.10) oraz adaptacyjnych (8.11).

W kolejnych podrozdziałach zaprezentowano badania symulacyjne (8.12), a także eksperymentalne (8.13) wpływu warstwy tranzycji na algorytm regulatora adaptacyjnego.

Rozdział 9 jest podsumowaniem pracy wyników badań zaprezentowanych w rozprawie.

WARSTWY PETRIEGO W REGULATORACH NEURONOWO ROZMYTYCH

Warstwa Konkurencyjna Petriego

Warstwa Konkurencyjna Petriego zmienia wartości wektora w warstwie układu wnioskowania rozmytego. Z pośród jej sygnałów wejściowych podaje na wyjście w formie niezmięnionej jedynie k sygnałów o największej wartości (co do modułu) zerując pozostałe. Operacje tę można zapisać za pomocą następujących wyrażeń (1-3):

$$(1) \quad A = \max_{k=1 \dots N_d \leq n} k \{ \text{sort}(we) \}$$

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

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

gdzie: A - wektor k wartości maksymalnych z wektora wejściowego, \max_k - operator wyboru k wartości maksymalnych z wektora wejściowego, sort - operator sortowania wartości malejąco według wartości ich modułów, we - wektor wejściowy, wy_i - i -ta wartość wektora wyjściowego, we_i - i -ta wartość

wektora wejściowego, N_d - zadana ilość wartości maksymalnych mających pozostawać aktywnymi, n - liczność wektorów wejściowego oraz wyjściowego.

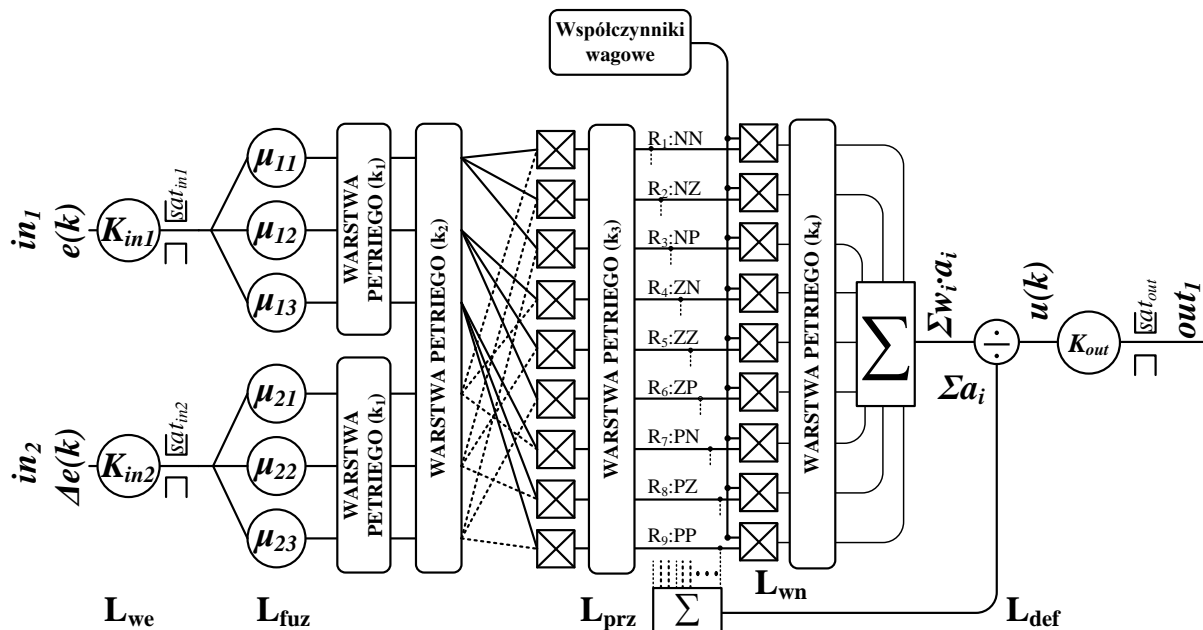
Operator max_k uwzględnia możliwość występowanie w wektorze wejściowym przypadków gdy więcej niż jeden element wektora wejściowego ma tę samą wartość modułu. W przypadku, gdy co najmniej jeden z takich sygnałów powinien zostać przepuszczony przez warstwę, wszystkie sygnały są akceptowane. Rozwiązane to jest istotne z punktu widzenia kompletności numerycznej układu. Możliwa jest również implementacja operatora max_k akceptująca sztywno zdefiniowaną liczbę sygnałów. W tym rozwiązaniu, w przypadku wystąpienia równości sygnałów (która mogłaby spowodować konieczność akceptacji większej liczby sygnałów), algorytm uwzględniać powinien schemat akceptacji na przykład z poprzedniej chwili czasowej.

Możliwe rozmieszczenia warstw konkurencyjnych Petriego w nieadaptacyjnym regulatorze neuronowo-rozmytych

W literaturze daje się odnaleźć przypadek implementacji WKP umieszczonej w regulatorze neuronowo-rozmytym przed warstwą przesłanek [18], [19], [20]. Brakuje jednak uzasadnienia tej lokalizacji. W odróżnieniu od prac obecnych w literaturze, w niniejszej dysertacji uwzględniono wszystkie możliwe miejsca rozmieszczenia WKP (rys. 1.). W przypadku nieadaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego, pierwszym możliwym rozwiązaniem jest miejsce za warstwą rozmywania (fuzyfikacji). W warstwie tej istnieją dwie trójki sygnałów wynikające z obecności trzech funkcji przynależności dla każdego z dwóch wejść (rozważa się układ o dwóch wejściach i trzech funkcjach przynależności dla każdego z wejść). Potencjalne możliwości to umieszczenie dwóch warstw konkurencyjnych, z których każda odpowiadałaby za kontrolę sygnałów odpowiadających jednemu wejściu (k_1), drugą możliwością jest umieszczenie jednej warstwy odpowiedzialnej za wszystkie sześć sygnałów (k_2). Aby układ działał poprawnie, każda z warstw k_1 musi akceptować co najmniej jeden sygnał. W przypadku implementacji warstwy k_2 , powinna ona przepuszczać tyle sygnałów, aby zapewnić kompletność numeryczną układu. Konsekwencją wyzerowania wszystkich sygnałów w jednym z zestawów byłby brak możliwości obliczenia wyjścia systemu.

Kolejnym z możliwych miejsc umieszczenia konkurencyjnej warstwy Petriego jest lokalizacja za warstwą wyznaczenia stopni spełnienia przesłanek, a przed warstwą wnioskowania (k_3).

Ostatnią z możliwości jest umieszczenie warstwy konkurencyjnej za warstwą konkluzji (wag), w ten sposób, że nie wszystkie reguły są składowymi wyjściowej wartości sterowania (k_4).



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

Możliwe rozmieszczenie warstw konkurencyjnych Petriego w adaptacyjnym regulatorze neuronowo-rozmytym

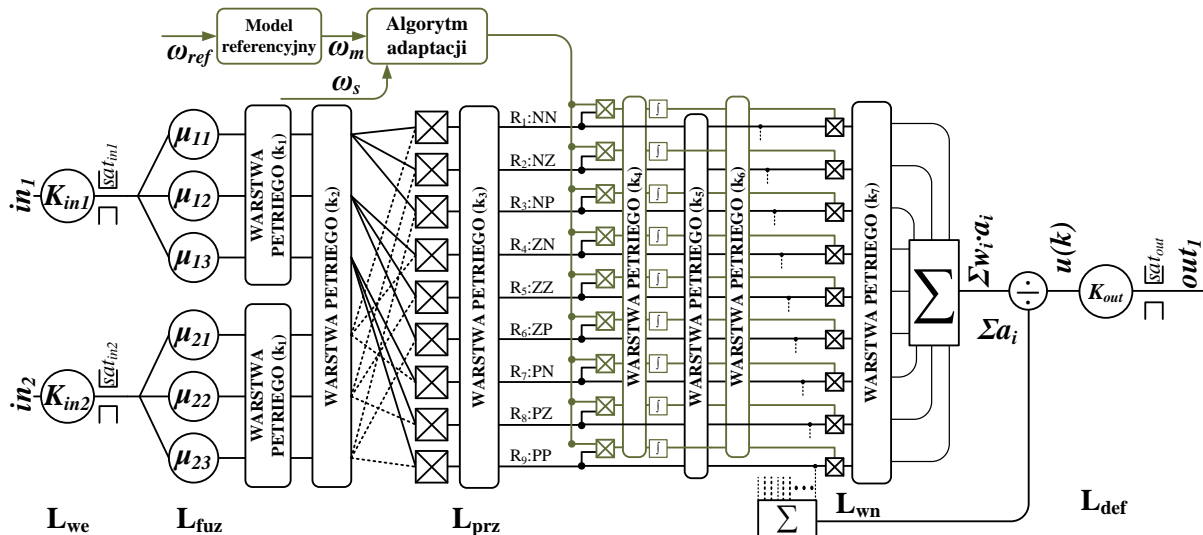
W regulatorach adaptacyjnych istnieje większa liczba potencjalnych pozycji WKP. Poza analogicznymi pozycjami jak w regulatorze nieadaptacyjnym (k_1, k_2, k_3, k_7) możliwe są pozycje oznaczone jako k_4, k_5 oraz k_6 (rys.). Warstwy k_1, k_2 i k_3 dla układu adaptacyjnego odpowiadają warstwom o tych samych numerach z układu nieadaptacyjnego, warstwa k_7 z układu adaptacyjnego odpowiada warstwie k_4 w układzie nieadaptacyjnym

Poniżej omówiono możliwości odmienne od przypadku regulatora nieadaptacyjnego.

- Warstwa k_4 : wagi, które pod wpływem algorytmu adaptacji miałyby się zmienić w najmniej znaczący sposób, nie ulegają zmianom. Jednakże reguły biorą udział w wyjściowej wartości sterowania z poprzednim współczynnikiem wagowym.

- Warstwa k_5 : wyłącza ona poszczególne gałęzie z procesu wnioskowania, na podstawie wartości spełnienia przesłanek reguł. Dla regulatora bez adaptacji warstwa ta byłaby tożsama z warstwą (k_3).

- Warstwa k_6 : powoduje zerowanie sygnałów współczynników wagowych, w efekcie pewne reguły na wyjściu otrzymują wartość zero wynikającą z iloczynu przesłanek danej reguły, z wyzerowanym jej odpowiadającym współczynnikiem wagowym. Jednocześnie współczynniki wagowe są adaptowane.



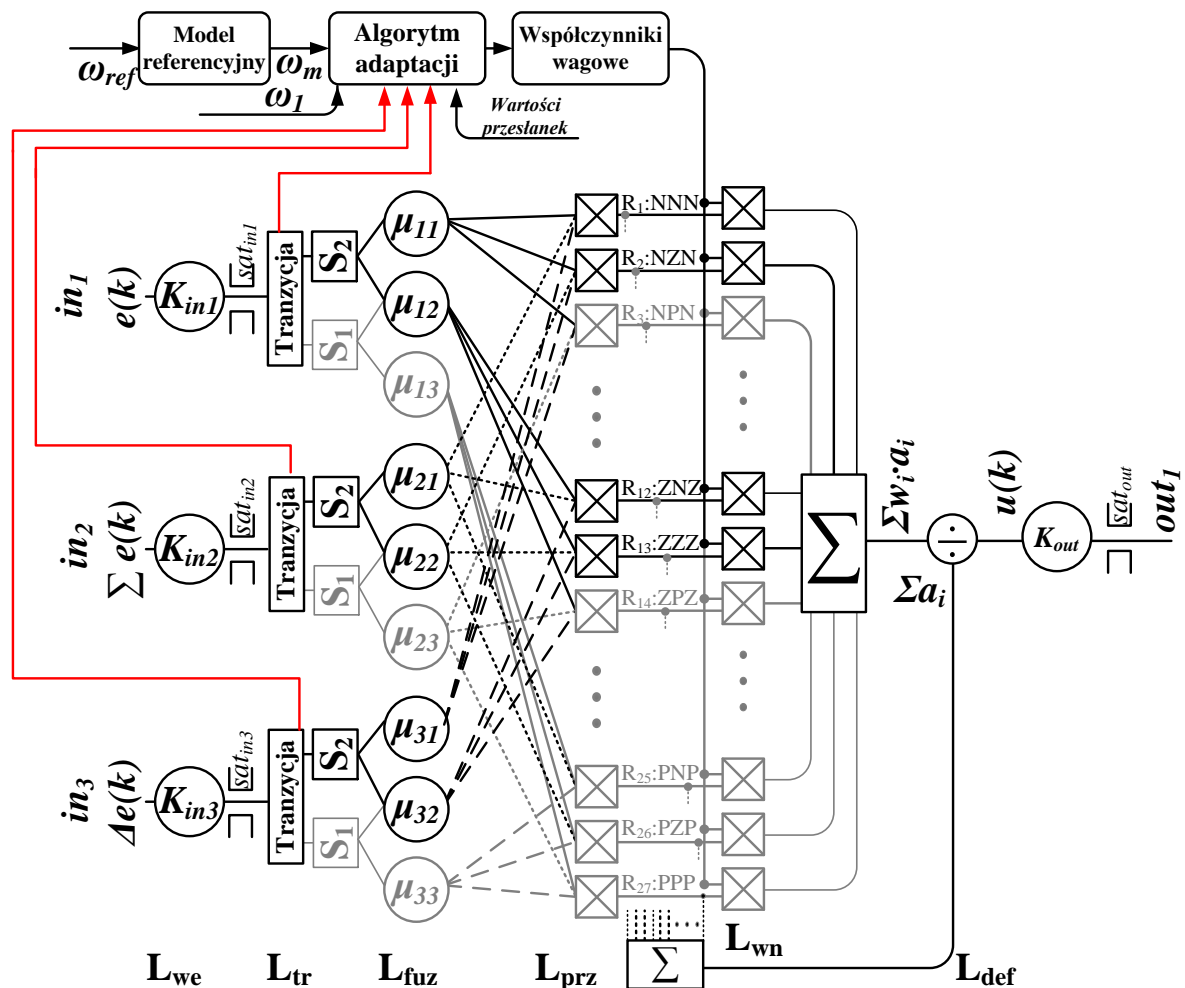
Rys.2. Adaptacyjny regulator neuronowo-rozmyty z zaznaczonymi możliwymi miejscami implementacji konkurencyjnych warstw Petriego

Regulatory neuronowo-rozmyte z warstwą tranzycji Petriego

Warstwa Tranzycji Petriego jest analogiem warstwy konkurencyjnej 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 sprawia, że sygnały te nie są uwzględniane w obliczeniach. Algorytm taki jest znacznie mniej złożony numerycznie. Szczególnie w przypadku regulatora o znacznym rozmiarze bazy reguł.

Ponieważ WTP powoduje wyzerowanie z punktu widzenia matematycznego, ale także nieuwzględnienie w algorytmie obliczeniowym wybranej części reguł systemu wnioskowania neuronowo-rozmytego, najlepszym miejscem na jej umieszczenie jest lokalizacja pomiędzy warstwą pierwszą (L_{we}) normalizującą sygnały wejściowe, a warstwą drugą (L_{fuz}): rozmywania (rys.). W konsekwencji WTP umożliwia rozpoznanie zakresu wartości w jakim aktualnie znajduje się dane wejście. Aktywowane są wówczas odpowiadające funkcje przynależności. Sektory nieaktywne i odpowiadające im reguły (zaznaczone na rys. kolorem szarym), nie są uwzględniane w obliczeniach aktualnej iteracji. Taka lokalizacja Warstwy Petriego jest najbardziej korzystna pod względem redukcji złożoności obliczeniowej systemu.

Poprzez redukcję złożoności rozumie się tu mniejszą liczbę operacji matematycznych koniecznych do wyznaczenia wyjściowej wartości sterowania.



Rys.3. Schemat blokowy regulatora z Warstwą Tranzycji

Umieszczenie warstwy tranzycji w innym miejscu zmniejsza efektywność redukcji złożoności numerycznej. Przykładowo pozycja za warstwą rozmywania powodowałoby ignorowanie wybranych sygnałów poziomów aktywacji funkcji przynależności. Część tych sygnałów nie była by wykorzystywana, jednak wszystkie stopnie poziomów przynależności do zbiorów wejściowych musiałyby być nadal wyznaczone.

Należy jednak podkreślić, iż inne rozmieszczenie warstwy Tranzycji modyfikuje w odmienny sposób prawo sterowania (analogicznie do innych warstw konkurencyjnych), co w konsekwencji może prowadzić większej poprawy pewnych wskaźników jakości regulacji kosztem mniejszej redukcji złożoności obliczeniowej.

Wpływ warstwy tranzycji na działanie algorytmu regulatora

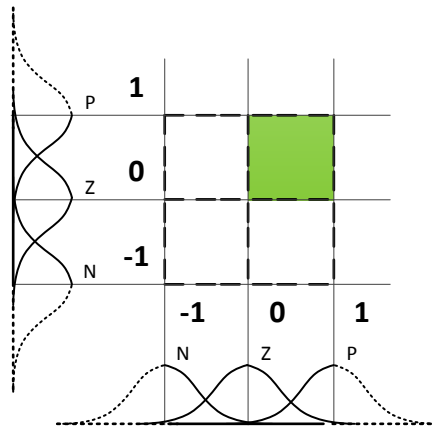
Z punktu widzenia wynikowej wartości sterowania zastosowanie warstwy Tranzycji jest tożsame z warstwą Konkurencyjną. Uzyskiwane zmiany sterowania, a tym samym zmiany wskaźników jakości są jednakowe. Zasadniczą różnicą pomiędzy WTP, a WKP jest dodatkowa redukcja złożoności obliczeniowej w przypadku WTP.

Wprowadzenie WTP pozwala na wybór sektora w przestrzeni sterowania, w jakim obecnie znajduje się układ sterowania. Znając sektor układ jest w stanie rozważać jedynie część przestrzeni sterowania, która dotyczy aktualnego stanu obiektu. Dzięki eliminacji z algorytmu obliczeniowego części sygnałów uzyskuje się redukcje złożoności obliczeniowej.

W przypadku Gaussowskich funkcji przynależności w klasycznym przypadku konieczne jest rozważanie (przeprowadzenie obliczeń) wszystkich reguł regulatora. Zastosowanie WTP sprawia, że obliczenia przeprowadzane są jedynie na pewnej małej liczby reguł. Dla takiego przypadku można mówić o znacznej redukcji złożoności obliczeniowej regulatora z WTP w porównaniu do rozwiązania bez WTP.

Z powodu niemożliwości podzielenia powierzchni sterowania na niezależne sektory (każda funkcja wejściowa ma wpływ na wyjście dla dowolnej wartości wejściowej, wynika to z nieograniczonego nośnika funkcji Gaussowskiej) powierzchnie sterowania przedstawiono w postaci kwadratów o granicach przyjętych dla małych wartości aktywacji funkcji przynależności. Skutkuje to między innymi sytuacją, w której maksymalnie dodatnia wartość wejściowa powoduje aktywację funkcji odpowiedzialnej za wartości maksymalnie ujemnie. Zerowanie lub dające analogiczny skutek nieliczenie wartości pewnych sygnałów może spowodować, że sytuacja tego typu nie będzie mieć miejsca. Prowadzi to do zawężenia okna obliczeniowego w stosunku do pełnego obszaru rozważań. Oknem będzie nazywany obszar charakteryzujący funkcje aktywne i liczone w danym kroku obliczeniowym algorytmu. Okno o wymiarze n oznacza, że jedynie n funkcji przynależności dla każdego z wejść jest uznawana za aktywne i ich wartość jest wyznaczana. Reguły z poza okna aktywacji nie są obliczane w kolejnych krokach działania algorytmu.

Ograniczono się do analizy układu o dwóch wejściach. Na rys.4. zaprezentowano rozważaną powierzchnie sterowania (jej rzuty na płaszczyznę) i odpowiadające jej funkcje przynależności.



Rys.4. Powierzchnia sterowania dla 3 funkcji przynależności na wejście z uwzględnieniem WTP

W przypadku systemu wnioskowania neuronowo-rozmytego o trzech funkcjach przynależności dla każdego z dwóch w każdej chwili czasowej odrzucana jest funkcja przynależności odpowiedzialna za wartości wejściowe o znaku przeciwnym do aktualnego. Przykładowo na rys.4. dla wartości wejściowych z części płaszczyzny rozważań oznaczonej kolorem zielonym analizowane będą jedynie funkcje przynależności Z i P, a dalej reguły będące ich kombinacjami. Wszystkie reguły bazujące na funkcjach przynależności typu N nie będą rozważane, a ich wpływ na wartość wyjściową zostanie pominięty.

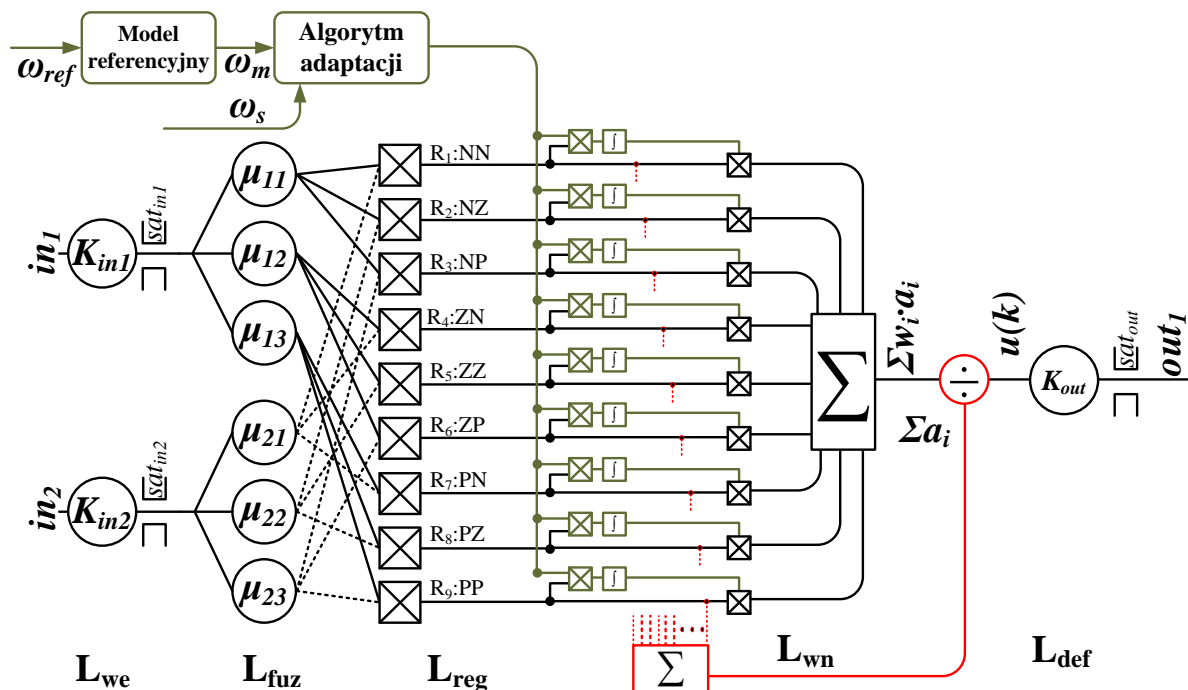
DOBÓR PARAMETRÓW REGULATORA

Metody doboru poszczególnych parametrów dla regulatorów neuronowo rozmytych zaprezentowano na przykładzie układu adaptacyjnego (rys. 5.). Można bowiem założyć analogię pomiędzy regulatorem adaptacyjnym i nieadaptacyjnym, jeżeli dla regulatora adaptacyjnego zastosujemy pewne wartości początkowe współczynników wagowych, a współczynnik uczenia zostanie sztywno ustawiony jako 0, układ adaptacyjny będzie działać tożsamo z układem nieadaptacyjnym o analogicznych współczynnikach wagowych.

Przyjęto następujące wartości projektowe regulatorów (zmiennych):

- Liczba zmiennych wejściowych: 2 i wyjściowych: 1. Liczba zmiennych wejściowych oraz wyjściowych zależą od obiektu sterowania oraz typu sterowania jakie chcemy uzyskać. Można więc stwierdzić, że są one zdeterminowane przez warunki zewnętrzne.

- W przypadku liczby funkcji przynależności, dla każdego z wejść dobrano 3 funkcje. Jest to parametr projektowy wynikający z pożądanej jakości sterowania.



Rys.5. Schemat adaptacyjnego regulatora neuronowo-rozmytego

- Kształt funkcji przynależności: zdecydowano się na funkcje gaussowskie dające dobre efekty w przypadku układów sterowania napędami elektrycznymi.

- Rozmieszczenie / parametry funkcji przynależności: funkcje są równomiernie rozłożone na przyjętej przestrzeni rozważań. Przestrzeń rozważań w jednostkach względnych będzie rozciągać się od -1 do $+1$ dla każdej z obu zmiennych wejściowych. Rozmieszczenie funkcji przynależności wynika z właściwości obiektu, w przypadku braku wiedzy najprostszym rozwiązaniem jest przyjęcie równomiernego rozłożenia funkcji.

- Wzmocnienie sygnału wejściowego (K_{inn}). Dla każdego z wejść współczynnik ten musi przeskalowywać sygnał tak, aby uzyskany zakres wartości pozwalał na pracę obiektu w całym zakresie [22]. Ograniczenia dotyczące wartości wyjścia (sat_{inn}) ustawiono na ± 1 z uwagi, iż zgodnie z poprzednim założeniem taka jest rozciągłość użytej przestrzeni zmiennych.

W przypadku założonego układu o dwóch wejściach parametrami projektowymi regulatora są współczynniki skalujące dla wejść, odpowiednio K_e , K_{de} . Model odniesienia jest elementem determinującym działanie układu, należy mieć na uwadze, że trajektoria zadana (w połączeniu z modelem odniesienia)

powinna z uwzględnieniem ograniczeń fizycznych obiektu, możliwa do osiągnięcia.

Współczynnik K_e decyduje o wartości uchybu sterowania, który będzie traktowany przez układ sterowania jako „duży”. W przypadku układu sterowania w jednostkach względnych, uzasadnionym wydaje się dobór współczynnika $K_e = 1$. W takim wypadku różnica pomiędzy prędkością mierzoną, a zadaną co do modułu równa lub większa od prędkości znamionowej jest traktowana jako maksymalna wartość uchybu. Wewnątrz tego zakresu regulator będzie realizować zaimplementowaną funkcję sterowania.

Współczynnik $K_{\Delta e}$ odpowiada za skalowanie sygnału zmiany błędu sterowania. Należy założyć, że obiekt sterowania daje się z zadowalającą dokładnością uprościć do postaci układu oscylacyjnego drugiego rzędu, co jest podejściem stosowanym w literaturze [3], [17]. Przechodząc z dziedziny Laplace’a do dziedziny czasu otrzymuje się odpowiedź skokową obiektu. Kolejno należy wyznaczyć pierwszą oraz drugą pochodną przebiegu czasowego. Druga pochodna pozwala zidentyfikować położenie ekstremum pierwszej pochodnej. Wyznaczając jej wartość, która dla skoku jednostkowego będzie maksimum globalnym, określimy maksymalną dynamikę, jaką obiekt może osiągnąć pod wpływem wymuszenia skokowego. Dobór współczynnika $K_{\Delta e}$ powinien umożliwić operowanie w pełnym zakresie dynamiki osiągalnej przez obiekt. Chcąc przeskalować wartość sygnału do przestrzeni ± 1 [22] należy dobrać wartość $K_{\Delta e}$ jako $1/[\max(f'(t))]$. Mniejsza wartość $K_{\Delta e}$ spowoduje, że pewien obszar funkcji sterowania (pewne reguły regulatora rozmytego) nie będzie nigdy aktywny, co oznacza niewykorzystanie potencjału regulatora. Wartość większa spowoduje, że pewien zakres dynamiki będzie wykraczał poza zakres ± 1 , w pewnych sytuacjach może być to rozwiązaniem korzystnym. Ograniczenie dynamiki może okazać się konieczne między innymi dla przypadku sprzęgów magnetycznych gdzie należy ograniczać moment skrętny działający na sprzęg, aby go nie zerwać. Wówczas jednak powinno zostać to uwzględnione w równaniu modelu odniesienia, który decyduje o wymuszanej dynamice.

- Metody wnioskowania i defuzyfikacji: wartości poziomów aktywacji reguł są iloczynami poziomów aktywacji składowych funkcji przynależności, poziomy te są następnie mnożone przez odpowiadające im współczynniki wagowe, jako metody defuzyfikacji można użyć klasycznej lub uproszczonej metody singletonów.

- Wzmocnienie (K_{outk}) dla przypadku regulatorów adaptacyjnych może być pominięte ponieważ jego wartość można łatwo propagować na wartości współczynników wagowych, które są adaptowane w trakcie działania algorytmu. Ograniczenie sygnału wyjściowego (sat_{outk}) należy dobrać w zależności od funkcji sygnału wyjściowego. Dla sygnału wyjściowego regulatora prędkości będącego zadaną wartością dla regulatora prądu wartość ta powinna być dostosowana do możliwości układu, np. 2-krotność prądu znamionowego.

- W przypadku algorytmu adaptacji koniecznym jest dobór współczynników K_{P_AD} , K_{D_AD} decydujących o właściwościach algorytmu adaptacji, przy jednoczesnym uwzględnieniu warunków stabilności. Jedną z możliwych metod jest dobór parametrów algorytmu adaptacji za pomocą algorytmów genetycznych, minimalizując żądane kryterium jakości sterowania.

W związku z tym, iż układ jest adaptacyjny, co oznacza, że współczynniki wagowe powinny po pewnym czasie osiągnąć prawidłowe wartości, w chwili czasowej $t=0$ s wszystkie współczynniki wagowe są równe zeru.

Z uwagi na istnienie całkowania / sumy w algorytmie zmiany współczynników wagowych, w przypadku nieprawidłowego doboru wartości współczynników adaptacji lub wymuszenia nie możliwego do osiągnięcia przez układ, układ może prowadzić adaptację w nieskończoność. W związku z tym powinno się wprowadzić ograniczenia wartości współczynników wagowych. W przypadku regulatorów o liczbie reguł będących w stanie w sposób zadowalający odwzorować pożądaną funkcję sterowania minimalizującą kryterium ISE ograniczenie to zostało ustawione jako $\pm 2 \cdot Y_{wy_max}$. Punkt przecięcia dwóch funkcji trójkątnych, w przypadku spełnienia warunku uzupełniania się funkcji do jedności znajduje się na 'wysokości' 0,5. Od tego momentu funkcja staje się funkcją dominującą, w związku z tym musi mieć ona możliwość pełnego wysterowania wyjścia. Y_{wy_max} – to właśnie maksymalna wartość wyjścia jaką układ osiąga zgodnie z wolą projektanta. W niniejszej pracy użyto ograniczenia wyjścia do poziomu $\pm 1,5 In$. Oznacza to w tym konkretnym przypadku poziom ograniczenia wag jako ± 3 . Należy także pamiętać o zatrzymaniu procesu adaptacji współczynników wagowych w przypadku nasycenia się współczynników i/lub wyjścia regulatora. W przypadku innych kształtów funkcji przynależności należy wyznaczyć zakres wartości jaki przyjmuje suma poziomów zapłonów reguł i na jego podstawie wyznaczyć poziom ograniczenia. Sprawa komplikuje się w przypadku

regulatora przyrostowego PI gdzie poziomy zapłonów reguł mają pośredni wpływ na wartość wyjściową układu będącą całką z wszystkich poprzednich wartości.

Warunkiem poprawnego działania układu jest wymuszanie trajektorii będącej możliwą do śledzenia przez układ. Szczególnie w przypadku trajektorii statycznej o amplitudzie nie możliwej do osiągnięcia przez układ adaptacja będzie dążyła do ciągłej adaptacji poszczególnych wag, a w efekcie do ich nasycenia.

- Początkowe wartości współczynników wagowych dla przypadku regulatora adaptacyjnego mogą być ustawione jako zerowe lub dobrane w inny sposób na przykład poprzez propagację żądanej funkcji sterowania na wektor wag. W przypadku regulatora nieadaptacyjnego muszą one generować żądaną funkcję sterowania.

W przypadku gdy pożądana funkcja sterowania jest znana lub możliwa do wyznaczenia, możliwym jest odtworzenie pożądanego sterowania poprzez odpowiednie dobranie współczynników wagowych. W tym celu należy w pierwszej kolejności określić pożądaną funkcję sterowania. Następnie należy określić na podstawie parametrów projektowych (liczby wejść, liczba i parametry funkcji przynależności dla każdego z wejść, metody wnioskowania) hipotetyczną funkcję przed aplikacją współczynników wagowych (lub przy wszystkich współczynnikach wagowych równych jedności i założeniu, że współczynniki wagowe są mnożone z poziomami zapłonów reguł). Znając pożądaną wyjściową funkcję sterowania oraz hipotetyczną funkcję przed aplikacją współczynników wagowych należy podzielić pierwszą przez drugą aby uzyskać macierz współczynników wagowych pozwalającą na odwzorowanie drugiej (pożądanego) funkcji w pierwszą (faktyczna funkcja sterowania). W przypadku niezadowalającego odwzorowania możliwa jest zmiana typu funkcji przynależności, czy zagęszczenie podziału siatkowego.

ZNACZENIE PRAKTYCZNE I TEORETYCZNE DOKTORATU

W pracy przeanalizowano wpływ warstw Petriego typu konkurencyjnego oraz typu tranzycja na działanie regulatorów neuronowo-rozmytych. Analizie poddano szerokie spektrum układów regulacji nieadaptacyjnej jak i adaptacyjnej.

Za istotne osiągnięcie pracy należałoby uznać dokonanie szerokiej analizy możliwości wykorzystania warstw Petriego w systemach neuronowo-

rozmytych. Analiza objęła wszystkie możliwe pozycje WP w różnego rodzaju układach. Zastosowane szerokie spektrum wskaźników jakości i trajektorii badawczych sprawiło, iż ocena przydatności poszczególnych rozwiązań może być uznana za pełną.

Oryginalnym dorobkiem doktoranta jest rozróżnienie pomiędzy warstwą konkurencyjną (powodującą zerowanie sygnałów) oraz warstwą tranzycji (powodującą zmniejszenie złożoności obliczeniowej poprzez pomijanie pewnych części obliczeń). Dotychczas w analizowanej literaturze nie zastosowano podobnego rozróżnienia, a fakt potencjalnej optymalizacji numerycznej algorytmów dzięki zastosowaniu warstw tranzycji Petriego nie był analizowany.

Do ważnych osiągnięć należy zaliczyć dokonanie zbiorczego podsumowania potencjalnych sprzężeń w systemie neuronowo-rozmytym, zarówno sprzężeń pomiędzy warstwami jak i sprzężeń obejmujących pojedyncze węzły sieci. Także przeprowadzona analiza stabilności i pełen opis regulatora i sygnałów w nim istniejących należy uznać za kwestię istotną z punktu widzenia dalszej analizy takich systemów.

W toku prac badawczych, zarówno symulacyjnych jak i eksperymentalnych udowodniono tezy pracy. Potwierdzono bezsprzecznie korzyści numeryczne płynące z zastosowania Warstwy Tranzycji Petriego, a także pokazano obszary potencjalnych zastosowań i korzyści z nich płynących w przypadku Warstw Konkurencyjnych Petriego. Wnioski, jak i badania z których one płyną, dowodzą poprawności postawionych tez.

Na podstawie przeprowadzonych badań celowym wydaje się rozważenie wykonania dalszych prac w zakresie:

- analizy możliwości implementacji warstw Petriego w regulatorach neuronowo-rozmytych uwzględniających różnego rodzaju warunku aktywacji poszczególnych reguł. W niniejszej pracy warunkiem aktywacji reguły jest jej przynależność do operatora max_k w warstwie aktualnej implementacji. Zastosowanie innych kryteriów można by porównać do wykorzystania kolorowanych sieci Petriego,

- badań nad potencjałem poprawy jakości sterowania w przypadku implementacji warstwy tranzycji w regulatorach wymagających znacznej liczby

reguł na potrzeby sterowania obiektami wymagającymi silnie nieliniowych praw sterowania,

- opisanie metodologii propagacji pożądanego prawa sterowania na bazę współczynników wagowych w celu możliwie dokładnego odwzorowania tego prawa przez regulator. Dodatkowo określenie klasy funkcji aproksymującej dane prawo regulacji w sposób najlepszy celem doboru kształtu funkcji przynależności. Badania takie pozwoliłyby określić parametry projektowe regulatora dla dowolnego prawa sterowania (z zachowaniem pewnego przybliżenia wynikającego z ograniczonej bazy reguł).

LITERATURA

- [1] Abiyev R. H., Kaynak O., *Fuzzy Wavelet Neural Networks for Identification and Control of Dynamic Plants—A Novel Structure and a Comparative Study*, IEEE transactions on industrial electronics, VOL. 55, NO. 8, AUGUST 2008, (3133-3140)
- [2] Brock, S., Zawirski, K., *New approaches to selected problems of precise speed and position control of drives*, IECON - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, (6291 – 6296)
- [3] Derugo P., Szabat K., *Analysis of adaptive neuro-fuzzy PD controller with competitive Petri layers in speed control system for DC motor*, Computer applications in electrical engineering. Vol. 11 / ed. by Ryszard Nawrowski. Poznan, Publishing House of Poznan University of Technology, 2013, (267-280)
- [4] Derugo P., Szabat K., *Algorytm implementacji regulatora rozmytego o niskim koszcie numerycznym*, Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 11, (235-238)
- [5] Derugo P., Szabat K., *Implementation of the low computational cost fuzzy PID controller for two-mass drive system*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014 (previous EPE-PEMC), 2014, (661-665)
- [6] Gorrini, V., Bersini, H., *Recurrent fuzzy systems*, In Fuzzy Systems, IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1994, June, (193-198)
- [7] Juang C. F., Hsu C. H., *Temperature Control by Chip-Implemented Adaptive Recurrent Fuzzy Controller Designed by Evolutionary Algorithm*, IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: regular papers, VOL. 52, NO. 11, NOVEMBER 2005, (2376-2384)
- [8] Juang C. H., Huang R., Lin Y., *A Recurrent Self-Evolving Interval Type-2 Fuzzy Neural Network for Dynamic System Processing*, IEEE Tr. On Fuzzy Sys., 17, 2009, nr.5, (1092-1105)
- [9] Kluska Jacek, Hajduk Zbigniew, *Digital Implementation of Fuzzy Petri Net Based on Asynchronous Fuzzy RS Flip-Flop*, 7th International Conference, Zakopane, Poland, June 7-11, 2004. Proceedings
- [10] Knychas S., Szabat K., *Adaptive Recurrent Neuro-Fuzzy Control of the Complex Drive System*, EuroCon 2013, 1-4 July 2013, Zagreb, Croatia, (1932-1936)
- [11] Kowalski M., Magott J., Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S., *Analiza systemu transportowego z wykorzystaniem sieci Petriego*, Eksploatacja i Niezawodność nr1/2011, (48-62)
- [12] Li X., Lara-Rosano F., *Adaptive fuzzy Petri nets for dynamic knowledge representation and inference*, Expert Systems with Applications 19.3, 2000, (235-241)
- [13] Lin, F. J., Wai, R. J., Lee, C. C., *Fuzzy neural network position controller for ultrasonic motor drive using push-pull DC-DC converter*, Control Theory and Applications, IEEE Proceedings-Vol. 146, No. 1, 1999, January, (99-107)
- [14] Looney C. G., *Fuzzy Petri nets and applications*, Fuzzy Reasoning in Information, Decision and Control Systems, Springer Netherlands, 1994, (511-527)
- [15] Lu C-H., Tsai C-C., *Generalized predictive control using recurrent fuzzy neural networks for industrial processes*, Journal of Process Control, Volume 17, Issue 1, January 2007, (83-92)
- [16] Orłowska-Kowalska T., Szabat K., *Control of the drive system with stiff and elastic couplings using adaptive neuro-fuzzy approach*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54.1, 2007, (228-240)
- [17] Szabat K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprzężystym*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008
- [18] Wai R. J., Liu C. M., *Design of Dynamic Petri Recurrent Fuzzy Neural Network and Its Application to Path-Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robot*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 56, NO. 7, July 2009, (2667-2683)

- [19] Wai R. J., Lin Y. W., *Adaptive Moving-Target Tracking Control of a Vision-Based Mobile Robot via a Dynamic Petri Recurrent Fuzzy Neural Network*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems 21.4 2013, (688-701)
- [20] Wai R. J., Chu C. C., *Robust petri fuzzy-neural-network control for linear induction motor drive*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54.1, 2007, (177-189)
- [21] Wai R. J., Liu C. M., *Design of Dynamic Petri Recurrent Fuzzy Neural Network and Its Application to Path-Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robot*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 56, NO. 7, July 2009, (2667-2683)
- [22] Yager R. R., Filev D. P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1995.
- [23] Yamalidou E. C., Kantor J. C., *Modeling and optimal control of discrete-event chemical processes using Petri nets*, Computers & chemical engineering 15.7, 1991, (503-519)
- [24] Zhu J.J., Denton R.T., *Timed Petri nets and their application to communication protocol specification*, Conference record. 21st Century Military Communications - What's Possible? 1988 IEEE, vol.1,23-26 Oct 1988, (195 – 199)

DOROBEK NAUKOWY AUTORA

Lp.	Rodz. pracy	Autor	Tytuł	Źródło	Rok
1	Referat	Derugo Piotr S., Kacerka Jarosław, Szabat Krzysztof	Adaptacyjny regulator neuronowo-rozmyty z rekurencjami i warstwą tranzycji Petriego w sterowaniu napędem elektrycznym.	XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2015 [Dokument elektroniczny] : Łódź, 18-20 listopada 2015. [Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2015]. s. 1-8.	2015
2	Referat	Derugo Piotr S.	Zastosowanie warstw Petriego typu konkurencyjnego i tranzycji w adaptacyjnym regulatorze neuronowo-rozmytym.	XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2015 [Dokument elektroniczny] : Łódź, 18-20 listopada 2015. [Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2015]. s. 1-6.	2015
3	Referat	Derugo Piotr S., Szabat Krzysztof	Damping of torsional vibrations of two-mass system using adaptive low computational cost fuzzy PID controller.	2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 9-12 June 2015, Sydney, Australia. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2015. s. 1162-1165.	2015
4	Artykuł	Derugo Piotr S., Kacerka Jarosław, Jastrzębski Marcin, Szabat Krzysztof	Sterowanie silnikiem liniowym z wykorzystaniem adaptacyjnej struktury sterowania z regulatorem rozmytym typu PID.	Przegląd Elektrotechniczny. 2015, R. 91, nr 7, s. 93-96.	2015
5	Referat	Derugo Piotr S.	Single node recursions in adaptive neuro-fuzzy controller.	2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics, CYBCONF 2015 [Dokument elektroniczny] : Gdynia, Poland, 24-26 June 2015 / eds. Piotr Jędrzejowicz [i in.].Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2015. s. 433-438.	2015
6	Artykuł	Derugo Piotr S. Szabat Krzysztof	Adaptive neuro-fuzzy PID controller for nonlinear drive system.	Compel. 2015, vol. 34, nr 3, s. 792-807.	2015
7	Artykuł	Derugo Piotr S. Kacerka Jarosław Jastrzębski Marcin Szabat Krzysztof	Analiza ARN-R PID z Warstwą Tranzycji Petriego w sterowaniu silnikiem liniowym z magnesami trwałymi.	Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. 2015, nr 83, s. 31-38.	2015
8	Referat	Dodds Stephen Pedersen Jacob L. Derugo Piotr S. Szabat Krzysztof	Polynomial speed control of electric drive with flexible coupling: preliminary experiments.	2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics, CYBCONF 2015 [Dokument elektroniczny] : Gdynia, Poland, 24-26 June 2015 / eds. Piotr Jędrzejowicz [i in.].Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2015. s. 460-466.	2015
9	Artykuł	Derugo Piotr S	Analiza wykorzystania regulatora neuronowo-rozmytego z warstwą tranzycji w sterowaniu silnikiem prądu stałego w zakresie prędkości ultra niskich.	Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały = Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements of the Wrocław University of Technology. Studies and Research. 2014, nr 34, s. 233-245.	2014

10	Artykuł	Derugo Piotr S. Szabat Krzysztof	Algorytm implementacji regulatora rozmytego o niskim koszcie numerycznym.	Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 11, s. 235-238.	2014
11	Referat	Derugo Piotr S. Szabat Krzysztof	Implementation of the low computational cost fuzzy PID controller for two-mass drive system.	16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014 (previous EPE-PEMC) [Dokument elektroniczny] : 21-24 September 2014, Antalya, Turkey. [Piscataway, NJ] : IEEE, 2014. s. 661-665.	2014
12	Referat	Derugo Piotr S. Szabat Krzysztof	Adaptive neuro-fuzzy PID controller for drive system with friction and backlash.	Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits, EPNC 2014 : XXIII symposium : proceedings, Pilsen, Czech Republic, July 2 - 4, 2014. Pilsen : Univeristy of West Bohemia ; Poznań : Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, 2014. s. 19-20.	2014
13	Artykuł	Derugo Piotr S. Dybkowski Mateusz Szabat Krzysztof	Analiza wpływu rozmieszczenia warstwy konkurencyjnej Petriego w neuronowo-rozmytym regulatorze adaptacyjnym na właściwości dynamiczne układu napędowego.	Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 6, s. 35-39.	2014
14	Referat	Knychas Sebastian Derugo Piotr S. Szabat Krzysztof	Damping of the torsional vibration using adaptive fuzzy control system with different recurrences.	2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) [Dokument elektroniczny] : USB proceedings, Istambul, Turkey, 01-04 June, 2014.[Piscataway, NJ] : IEEE, cop. 2014. s. 1526-1531.	2014
15	Referat	Derugo Piotr S. Dybkowski Mateusz	Analiza pracy adaptacyjnego bezczujnikowego napędu indukcyjnego.	XI [Krajowa] Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2013 [Dokument elektroniczny] : Łódź, 20-22 listopada 2013.[Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2013]. s. 1-5.	2013
16	Artykuł	Derugo Piotr S Dybkowski Mateusz	Analiza wpływu wartości początkowych wektora wag na pracę bezczujnikowego układu adaptacyjnego sterowania DTC-SVM.	Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2013, nr 33, s. 120-131.	2013
17	Artykuł	Derugo Piotr S Szabat Krzysztof	Zastosowanie adaptacyjnej sieci falkowej do regulacji prędkości silnika prądu stałego.	Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2013, nr 33, s. 111-119.	2013
18	Artykuł	Derugo Piotr S.	Analiza wpływu konkurencyjnych warstw Petriego na działanie regulatora neuronowo-rozmytego.	Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2013, nr 33, s. 97-110.	2013

19	Rozdział w książce	Derugo Piotr S. Szabat Krzysztof	Analysis of adaptive neuro-fuzzy PD controller with competitive Petri layers in speed control system for DC motor.	Computer applications in electrical engineering. Vol. 11 / ed. by Ryszard Nawrowski. Poznan : Publishing House of Poznan University of Technology, 2013. s. 267-280.	2013
20	Artykuł	Derugo Piotr S. Dybkowski Mateusz Szabat Krzysztof	Zastosowanie adaptacyjnego neuronowo-rozmytego regulatora prędkości z konkurencyjnymi warstwami Petriego do sterowania silnika elektrycznego.	Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 12, s. 64-67.	2013
21	Referat	Derugo Piotr S. Dybkowski Mateusz. Szabat Krzysztof.	Zastosowanie adaptacyjnego regulatora rozmytego z warstwami Petriego do sterowania prędkością silnika elektrycznego.	XI [Krajowa] Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2013 [Dokument elektroniczny] : Łódź, 20-22 listopada 2013.[Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2013]. s. 1-5.	2013
22	Rozdział w książce	Derugo Piotr S	Analiza wpływu kształtu funkcji przynależności na działanie regulatora rozmytego.	Interdyscyplinarność badań naukowych 2013 [Dokument elektroniczny] : praca zbiorowa / pod red. Jarosława Szreka. Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013. s. 212-217.	2013
23	Artykuł	Derugo Piotr S. Dybkowski Mateusz. Szabat Krzysztof.	Analiza adaptacyjnego neuronowo rozmytego regulatora z wykorzystaniem konkurencyjnych warstw typu Petriego w sterowaniu silnikiem prądu stałego.	Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. 2013, nr 75, s. 85-92.	2013
24	Referat	Derugo Piotr S.	Wykorzystanie adaptacyjnych regulatorów rozmytych, jako kompensatorów regulatorów klasycznych.	Młodzi naukowcy dla polskiej nauki : materiały Konferencji Młodych Naukowców nt. Wpływ młodych naukowców na osiągnięcia polskiej nauki - Nowe trendy w naukach inżynierskich, III edycja, Łódź, 24.11.2012, Wrocław, 25.11.2012 i 2.12.2012. Cz. 7, Nauki inżynierskie. T. 5 / pod red. Marcin Kuczera. Kraków : Creativetime, 2012. s. 173-182.	2012
25	Rozdział w książce	Derugo Piotr S.	Logika rozmyta i jej potencjał w zastosowaniach sterowania, diagnostyki oraz projektowania napędów elektrycznych.	Nowe trendy w naukach inżynierskich 3. T. 2 / pod red.: Marcin Kuczera. Kraków : Creativetime, 2012. s. 198-205.	2012
26	Artykuł	Derugo Piotr S. Dybkowski Mateusz Szabat Krzysztof.	Adaptacyjne wektorowe sterowanie układem napędowym z połączeniem sprzężystym.	Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2012, nr 32, s. 67-76.	2012