

Sterowanie silnikiem liniowym z wykorzystaniem adaptacyjnej struktury sterowania z regulatorem rozmytym typu PID

Streszczenie. Artykuł opisuje ideę działania wraz z genezą rozwiązania w postaci adaptacyjnego neuronowo-rozmytego regulatora o trzech wejściach z warstwą tranzycji Petriego. Układ z warstwą tranzycji i niepełnym oknem rozważań oferuje dobre właściwości regulacyjne oraz znaczne zmniejszenie złożoności numerycznej algorytmu w porównaniu do układu bez warstwy tranzycji. Działanie regulatora zweryfikowano w badaniach eksperymentalnych, regulator został użyty w pętli sterowania położeniem biegnika liniowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi.

Abstract. The article describes the concept together with the genesis of adaptive neuro-fuzzy controller with three inputs and Petri transition layer. System with transition layer and partial calculation window offers good control and a significant reduction in the complexity of numerical algorithm compared to the system without a transition layer. Operation of the controller is verified in experimental studies where the controller was used in the position control loop of mover of a linear permanent magnet synchronous motor. **Linear motor control using an adaptive structure of fuzzy logic control PID**

Słowa kluczowe: warstwy Petriego, neuronowo-rozmyty, regulator adaptacyjny, silnik liniowy, złożoność numeryczna
Keywords: Petri layers, neuro-fuzzy, adaptive controller, linear motor, numerical complexity

Wstęp

Sterowanie rozmyte jest jedną z najszybciej rozwijających się metod wiedzy. Jest ono rekomendowane do obiektów źle opisanych, o dużej niepewności dotyczącej jego rzędu i parametrów czy z różnymi typami nieliniowości. Jednym z podstawowych elementów regulatora rozmytego jest baza reguł. Jej większy rozmiar umożliwia zdefiniowanie dużej ilości (nie)zależnych praw sterowania a tym samym umożliwia uzyskanie lepszej jakości regulacji. Z drugiej strony zwiększenie liczby reguł powoduje wzrost kosztów obliczeniowych co w konsekwencji oznacza zżycie bardziej rozbudowanego układu mikroprocesorowego.

Jedną z możliwości ograniczania kosztów implementacji jest zmniejszenie bazy reguł przez zastosowanie różnych metod redukcji jej rozmiaru [11], [12]. Klasycznie przeprowadza się to przez łączenie poszczególnych obszarów. Prowadzi to jednakże do pogorszenia jakości regulacji. Innym rozwiązaniem, rozpatrywanym w niniejszej pracy, jest zastosowanie warstwy tranzycji Petriego. Jej implementacja powoduje znaczące obniżenie liczby operacji matematycznych koniecznych do wyznaczenia wartości wyjściowej, a tym samym skutkuje skróceniem czasu wykonania się pojedynczej iteracji algorytmu (nawet o 30%) szczególnie dla przypadków regulatora rozmytego o dużej liczbie reguł.

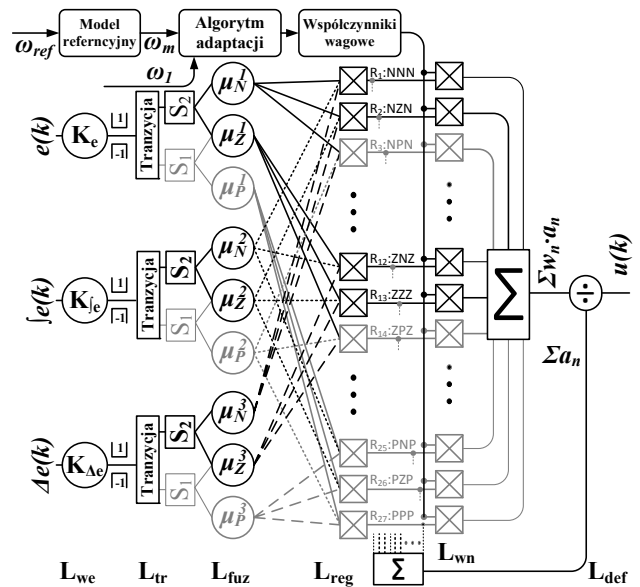
Artykuł składa się z pięciu części. Po krótkim wprowadzeniu przedstawiono regulator rozmyty typu PID. Następnie opisano warstwą tranzycji Petriego. Kolejno przedstawiono model matematyczny silnika liniowego. W punkcie czwartym zawarto wyniki badań eksperymentalnych obrazujących pracę regulatora rozmytego. Artykuł zakończono krótkim podsumowaniem.

Adaptacyjny neuronowo-rozmyty regulator typu PID

Schemat rozważanego regulatora rozmytego o trzech funkcjach przynależności przedstawiono na rys. 1. Jako sygnały wejściowe zastosowano sygnał uchybu położenia ($e(t)$), jego pochodnej ($\Delta e(t)$) i jego całkę ($\int e(t)$) [1]. Neuronowo rozmyty system wnioskowania składa się z 6 [2] warstw. Ich funkcje można opisać następująco:

L_{we} : warstwa wejściowa: W warstwie wejściowej następuje skalowanie oraz ograniczanie sygnałów wejściowych.

L_{tr} : warstwa tranzycji : W warstwie tranzycji następuje rozpoznanie sektora w jakim znajduje się w aktualnej chwili dane wejście, następnie na podstawie identyfikacji aktywowane są odpowiednie funkcje przynależności w warstwie kolejnej.



Rys. 1. Schemat regulatora

L_{fuz} : warstwa rozmywania: W warstwie fuzyfikacji następuje wyznaczenie wartości funkcji przynależności dla aktualnych wartości wejściowych. W niniejszej pracy wybrano gaussowskie funkcje przynależności równomiernie rozłożone na przestrzeni rozważań zgodnie z poniższym wyrażeniem:

$$(1) \quad \mu_{gauss} = e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

L_{reg} : warstwa reguł : Następuje w niej wyznaczenie poziomów aktywacji przesłanek poszczególnych reguł. W pracy użyto jednej z popularniejszych t -norm typu *prod*. Baza reguł składa się z wyrażen typu [3]:

$$R_n : \text{JEŻELI } e(k) \text{ JEST } \mu_{1j1}(e(k)) \text{ I } \dot{e}(k) \text{ JEST } \mu_{2j2}(\dot{e}(k)) \\ \text{ I } \Delta e(k) \text{ JEST } \mu_{3j3}(\Delta e(k)) \text{ TO } a_n = f_n(\mu_{1j1}, \mu_{2j2}, \mu_{3j3})$$

L_{wn} : warstwa wnioskowania: Wyliczone są w niej poziomy spełnienia następników poszczególnych reguł. Każdy z sygnałów poziomu aktywacji przesłanki mnożony jest z odpowiadającym jej współczynnikiem wagowym.

L_{def} : warstwa defuzyfikacji : W warstwie defuzyfikacji ma miejsce wyznaczenie wartości wyjściowej systemu

rozmytego. W niniejszym referacie użyto klasycznego algorytmu defuzyfikacji, jest on opisany wzorem (2).

$$(2) \quad u(k) = y_o = \sum_{n=1}^m w_n a_n / \sum_{n=1}^m a_n$$

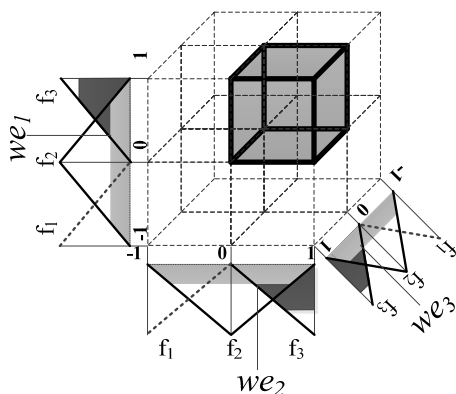
Algorytm adaptacji poszczególnych współczynników wagowych opisuje równanie (3).

$$(3) \quad w_n(k+1) = w_n(k) + (k_{em} \cdot e_m + k_{\Delta m} \cdot \Delta e_m + k_{\int m} \cdot \int e_m)$$

W każdym kroku obliczeniowym każdy z adaptowanych współczynników wagowych zmieniany jest o pewną wartość zależną od aktualnego błędu odtwarzania sygnału modelu. Należy pamiętać o konieczności ograniczenia wartości maksymalnych współczynników wagowych i/lub o uwzględnieniu możliwości ograniczenia wyjścia, w takim wypadku zalecanym rozwiązaniem jest zatrzymanie procesu adaptacji. Wagi powinny być ograniczone w taki sposób, aby ich wartości maksymalne odpowiadały maksymalnemu pożądanemu ograniczeniu wartości wyjściowej regulatora, tu $\max(w_i) = \mathcal{F}2$. W przypadku takiego ograniczenia maksymalna wartość wyjściowa regulatora zostaje ograniczona do wartości $\max(\sum_{ij} [\mu_{ij}]) \cdot \max(w_i)$. Szczegółowy opis struktury sterowania z modelem odniesienia znajduje się w [4-7].

Warstwa tranzyji Petriego

Wprowadzenie warstwy tranzyji pozwalającej na wybór sektora jest podyktowane chęcią zmniejszenia złożoności numerycznej algorytmu regulatora z dużą ilością reguł. Na rys. 2 pokazano przykładową przestrzeń sterowania i następstwa zastosowania warstwy tranzyji dla systemu neuronowo-rozmytego o trzech wejściach i trzech trójkątnych funkcjach przynależności dla każdego z wejść. Ponieważ tylko dwie funkcje (w każdym wejściu) mogą być aktywne, zamiast ośmiu obszarów przestrzeni sterowania można analizować jedynie jeden. Oznacza to, że w każdym kroku obliczeniowym rozważanych jest jedynie 8 (2^3) spośród 27 (3^3) reguł. Zwiększenie liczby zbiorów do 10 powoduje, że zamiast 1000 reguł wyliczenia przeprowadza się jedynie na ośmiu.



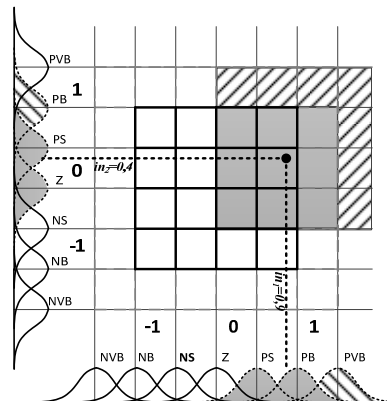
Rys.2. Przestrzeń sterowań dla 3 wejść i funkcji trójkątnych

Funkcje gaussowskie posiadają nieskończony nośnik co oznacza, że dla dowolnej wartości wejściowej, każda z nich jest spełniona w niezerowym stopniu. Zastosowanie warstwy Petriego powoduje uwzględnienie tylko najbardziej aktywowanych sygnałów.

W przypadku dużej ilości wejściowych zbiorów rozmytych można rozszerzyć aktywację większej ilości funkcji wejściowych przez odpowiedni dobór wartości tranzyji. Oznacza to poszerzenie wielkości aktywnego obszaru sterowania a tym samym adaptację konkluzji z nim

związanego – w dalszej części pracy rozszerzenie to będzie nazywane oknem.

Na rys. 3 przedstawiono płaszczyznę sterowania dla dwuwymiarowego systemu rozmytego. W celu przejrzystości przekazu rozważono system o dwóch wejściach. Reguły wypełnione kolorem szarym oznaczają rozważaną przestrzeń dla dwóch najbardziej aktywnych zbiorów wejściowych każdego wejścia. Ukośnym kreskowaniem zaznaczono reguły wynikające z poszerzenia okna rozważań na kolejne najbardziej aktywne zbiory wejściowe. Możliwe jest również ustalenie okna niesymetrycznego o różnym rozmiarze dla każdego z wejść.



Rys.3. Przykładowa powierzchnia sterowania dla układu o dwóch wejściach i rozszerzonym oknie rozważań N=3

Silnik liniowy – równania dynamiki

Pełny model matematyczny silnika liniowego (4)-(6) wraz z wyprowadzeniem przedstawiono w [8]. Opisany jest on z pomocą poniższych równań:

$$(4) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{F(i,x) - Dv}{m}$$

$$(5) \quad \frac{dx}{dt} = v$$

$$(6) \quad \frac{di}{dt} = \frac{u - Ri - \frac{d}{dx}(\psi(i,x)) \cdot v}{L_d(i,x)}$$

Powyższe wyrażenia zostały wyprowadzone przy założeniu wymuszenia napięciowego. W przypadku użycia falownika z wbudowanym regulatorem prądu rozważany układ daje się opisać za pomocą dwóch równań [9], [10]:

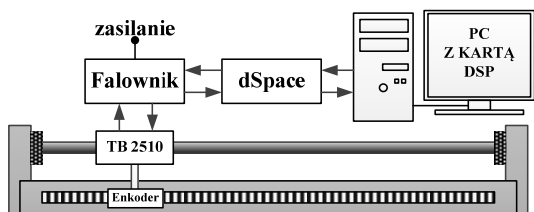
$$(7) \quad \frac{dx}{dt} = v$$

$$(8) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{F - T(v,x)}{m}$$

gdzie: x – położenie biegnika, v – prędkość biegnika, m – masa ulegająca przemieszczeniu, F – siła generowana przez twornik, T – tarcie wypadkowe, D – współczynnik tarcia, i – prąd twornika, ψ – strumień, u - napięcie twornika

Obiekt badawczy

Układ którego schemat przedstawiono na rysunku 6 składa się z silnika liniowego TrustTube TB2510 o maksymalnej sile 104N. Do silnika zamontowany na sztywno został enkoder liniowy o rozdzielczości 1µm. Silnik zasilany jest poprzez falownik Xenus XTL-230-18 z wbudowanym regulatorem prądu. Sygnał zadawany siły dla falownika, a także akwizycję danych do komputera PC zapewniono z użyciem karty dSpace DS1006. Zaproponowany regulator neuronowo-rozmyty użyto jako regulator położenia. Dodatkowa szyna mająca styczność z drewnianym blokiem zamocowanym do części ruchomej silnika umożliwia zmianę tarcia na drodze przejazdu.



Rys.4. Schemat układu rzeczywistego

Wyniki badań eksperymentalnych

W trakcie badań eksperymentalnych wykonane zostały serie pomiarowe dla regulatorów o różnej liczbie reguł oraz rozmiarze aktywnego okna obliczeniowego. Zastosowane trajektorie zadanego położenia mają kształt prostokątny oraz sinusoidalny. Amplituda położenia to $\pm 0,2$ metra względem punktu początkowego. Kryteria jakości sterowania określające właściwości układu to ISE , $ITSE$, IAE , $ITAE$, oraz średni czas wykonania iteracji zadań składających się na algorytm $MEAN(T1, T2)$.

$$(9) \quad ISE = \int e^2(t)$$

$$(10) \quad ITSE = \int t \cdot e^2(t)$$

$$(11) \quad IAE = \int |e(t)|$$

$$(12) \quad ITAE = \int t \cdot |e(t)|$$

Kryteria ilościowe zastosowano dla sygnału błędu odtworzenia położenia modelu ($e = x_m - x_s$) oraz wyjściowego sygnału regulatora, będącego wartością zadaną dla regulatora prądu (T_{ref}). Wskaźnik $ISE(T_{ref})$ określa zmiany energii zadanej natomiast $IAE(T_{zad})$ pozwala określić minimum wymuszanego prądu, a co za tym idzie mocy. Wielkością odniesienia dla tabeli z wartościami względnymi jest pierwsza kolumna będąca wartościami uzyskanymi dla regulatora o 3 funkcjach przynależności na każde z wejść. Należy podkreślić, że wartości początkowe konkluzji regulatora we wszystkich przypadkach były ustawione na zera.

Tabela 1 Zmiany względne kryteriów oceny dla przypadku trajektorii prostokątnej

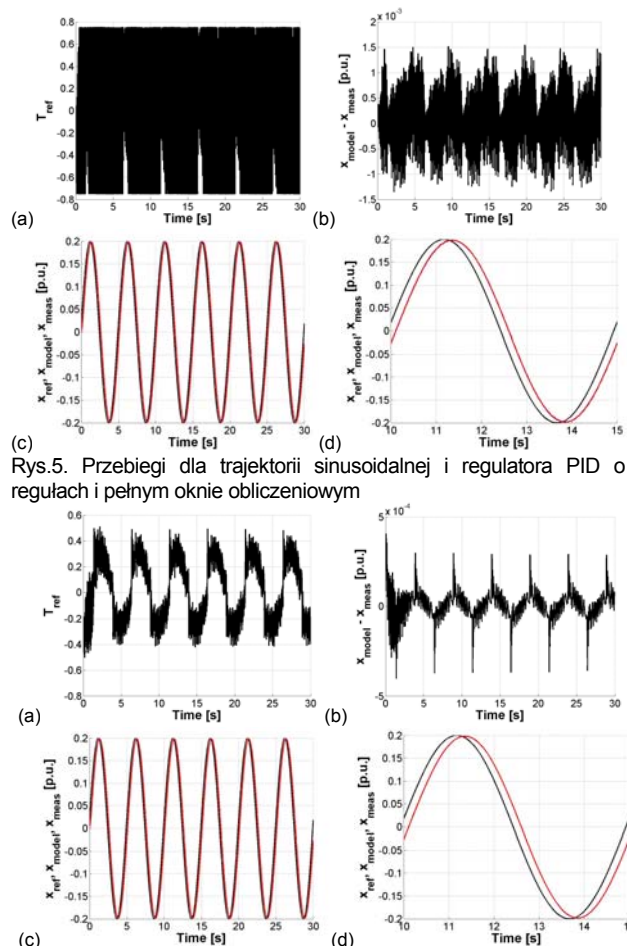
L. f. p.	3	5	7	3o2	5o2	7o2	5o3	7o3
ISE (e)	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98
ITSE (e)	1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98
IAE (e)	1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98
ITAE (e)	1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98
ISE (T_{zad})	1,00	0,74	0,72	0,98	0,80	0,77	0,80	0,77
IAE (T_{zad})	1,00	0,81	0,79	0,99	0,85	0,83	0,85	0,83
MEAN (T1) [s]	8,11	10,4	14,4	7,99	8,99	10,4	11,5	14,9
MEAN (T2) [s]	E-06	E-06	E-06	E-06	E-06	E-06	E-06	E-06

Na podstawie przedstawionych danych można wyciągnąć następujące wnioski. Każdy z regulatorów pracuje poprawnie. Wszystkie zaproponowane układy zapewniają lepsze (mniejsze) wartości wskaźników ilościowych w stosunku do wartości odniesienia. Uzyskana poprawa jest stosunkowo nieduża (rzędu pojedynczych procentów), wynika to z nieosiągalnych fizycznie zmian sygnału referencyjnego a tym samym wchodzenie w ograniczenie sygnału sterującego. Zwiększenie bazy reguł (do 5 lub 7) uwidacznia różnicę pomiędzy pełnym, a zmniejszonym oknem obliczeniowym. Zastosowanie warstwy Petriego powoduje na zmniejszenie złożoności obliczeniowej algorytmu. W przypadku regulatora o 3 regułach zmniejszeniu ulegają koszty sterowania. Regulatory o większej ilości reguł zapewniają lepsze właściwości dynamiczne niż układ podstawowy.

W przypadku trajektorii sinusoidalnej (praca struktury bez ograniczeń fizycznych) zwiększenie rozmiaru bazy reguł powodują znaczną poprawę wszystkich wskaźników jakości regulacji (Tabela 2). Układ o 7 zbiorach zapewni najlepsze przebiegi trajektorii układu jak również jest najmniej wymagający energetycznie. Wprowadzenie okna obliczeniowego dla regulatora o 3 regułach powoduje poprawę wskaźników jakości regulacji przy nieznacznym skróceniu czasu wykonania. Dla regulatorów o większej liczbie reguł okno obliczeniowe powoduje zmniejszenie złożoności obliczeniowej ale nieznacznie zwiększa wskaźniki jakości regulacji (w stosunku do regulatora o tej samej liczbie reguł).

Tabela 2 Zmiany względne kryteriów oceny dla przypadku trajektorii sinusoidalnej

L. f. p.	3	5	7	3o2	5o2	7o2	5o3	7o3
ISE (e)	1,00	0,04	0,01	0,90	0,44	0,04	0,37	0,04
ITSE (e)	1,00	0,02	0,01	0,90	0,38	0,03	0,35	0,02
IAE (e)	1,00	0,15	0,10	0,95	0,59	0,20	0,54	0,15
ITAE (e)	1,00	0,12	0,09	0,95	0,55	0,17	0,52	0,12
ISE (T_{zad})	1,00	0,16	0,13	0,99	0,64	0,15	0,59	0,17
IAE (T_{zad})	1,00	0,37	0,35	0,99	0,73	0,36	0,70	0,37
MEAN (T1) [s]	8,09	10,3E-06	14,4E-06	7,96E-06	8,93E-06	10,3E-06	11,5E-06	15,1E-06
MEAN (T2) [s]	8,14	10,6E-06	15,1E-06	8,00E-06	9,18E-06	11,1E-06	12,3E-06	16,6E-06

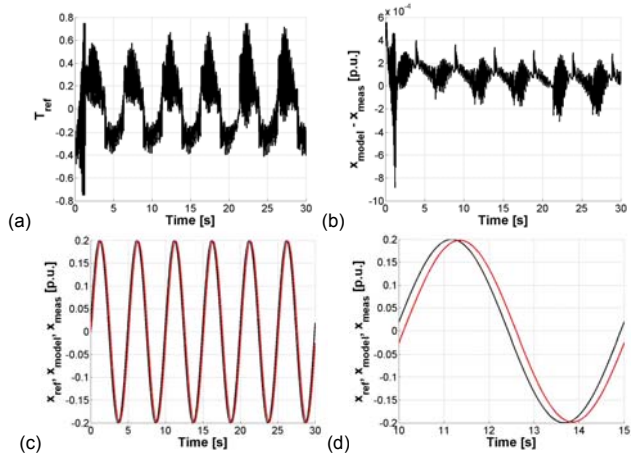


Rys.5. Przebiegi dla trajektorii sinusoidalnej i regulatora PID o 3 regułach i pełnym oknie obliczeniowym

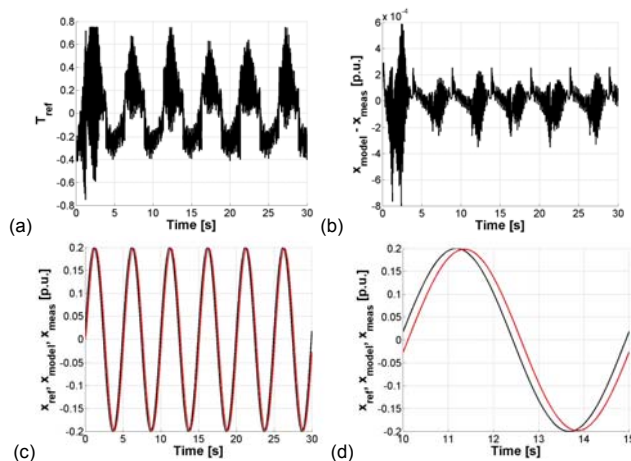
Przebiegi zmiennych układu dla regulatora o 3 funkcjach pokazano na rys. 5. Układ pracuje poprawnie. Należy jednak zwrócić uwagę na wysoki poziom szumów w sygnale sterującym (rys. 5a) i relatywnie duży błąd śledzenia (rys. 5b). Na rys. 5c,d pokazano przebieg sygnału zadanego oraz pokrywające się prędkości modelu i obiektu.

Na rys. 6-8 przedstawiono przykładowe przebiegi układu z regulatorem o 7 funkcjach przynależności i różnych oknach obliczeniowych (rys. 7 – okno 2, rys. 8 okno 3).

Położenie rzeczywiste (rys. 6-8 c, d) we wszystkich przypadkach śledzone jest z małym błędem (rys. 6-8 b). W odróżnieniu od układu z 3 regułami w sygnał sterujący zawiera mniejszy poziom szumów (rys 6-8a).



Rys.7. Przebiegi dla trajektorii trapezowej i regulatora PID o 7 regułach i oknie obliczeniowym o rozmiarze 2



Rys.8. Przebiegi dla trajektorii sinusoidalnej i regulatora PID o 7 funkcjach i oknie obliczeniowym o rozmiarze 3

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych potwierdzonych badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi można sformułować poniższe wnioski:

- Układ o większej ilości reguł szybciej adaptuje się do obiektu, szczególnie widoczne jest to w przypadku porównania układu o 3 zbiorach z systemem o 7 funkcjach gdzie błąd śledzenia modelu różni się o rząd wielkości.
- Zastosowanie warstwy Petriego znacząco redukuje złożoność obliczeniową algorytmu sterowania. Umożliwia implementację regulatorów o dużych rozmiarach bazy reguł, co prowadzi do poprawy jakości sterowania dla obiektów nie będących liniowymi. Czas konieczny na obliczenie regulatora o 7 regułach i zmniejszonym oknie rozważań jest około 30% krótszy niż w przypadku pełnego okna. Zysk ten rośnie w miarę zwiększania się rozmiarów bazy reguł.
- Z uwagi na złożoną konstrukcję samego algorytmu oraz zależność zysku od rozmiaru eliminowanej części bazy wiedzy, rozwiązanie to jest dedykowane obiektom wymagającym funkcji sterowania, która wymaga znacznej ilości reguł.

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

Praca współfinansowana w ramach stypendium współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

LITERATURA

- [1] Derugo P., Szabat K., Adaptive neuro-fuzzy PID controller for drive system with friction and backlash., *proceedings of Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits, EPNC Pilsen, Czech Republic, (2014)* 19-20.
- [2] Derugo P., Szabat K., Implementation of the Low Computational Cost Fuzzy PID Controller for Two-Mass Drive System, *proceedings of PEMC (2014)*, 661-665
- [3] Kabziński, J., Kacerka, J.. TSK Fuzzy Modeling with Nonlinear Consequences, *Artificial Intelligence Applications and Innovations, (2014)*, 498-507
- [4] Derugo P., Dybkowski M., Szabat K., Zastosowanie adaptacyjnego neuronowo-rozmytego regulatora prędkości z konkurencyjnymi warstwami Petriego do sterowania silnika elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny* 89 (2013): 64-67.
- [5] Derugo P., Dybkowski M., Szabat K., Analiza wpływu rozmieszczenia konkurencyjnej warstwy Petriego w neuronowo-rozmytym regulatorze adaptacyjnym na właściwości dynamiczne układu napędowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 6/ (2014), 35-39
- [6] Chen Y., Teng Ch., A model reference control structure using a fuzzy neural network, *Fuzzy Sets and Systems* 73.3 (1995): 291-312.
- [7] Szabat K.; Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprzężystym, *Oficina wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Wrocław (2008)*
- [8] Waindok A., Symulacja komputerowa i weryfikacja pomiarowa charakterystyk silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi, *praca doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, (2008)*
- [9] Jastrzębski M., Wykorzystanie rozmytego modelu siły oporu w adaptacyjnym sterowaniu silnikiem liniowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012): 93-97.
- [10] Jastrzębski M., Sterowanie adaptacyjne silnikiem liniowym z neuronowym kompensatorem tarcia strojonym on-line, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 6 (2014), 61-66
- [11] Setnes, Magne, et al. "Similarity measures in fuzzy rule base simplification." *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, IEEE Transactions on 28.3 (1998): 376-386.
- [12] Song, B. G., et al. "Adaptive membership function fusion and annihilation in fuzzy if-then rules." *Fuzzy Systems, 1993.*, Second IEEE International Conference on. IEEE, 1993.
- [13] Wai R., Liu Ch., 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, (2009), 2667-2683
- [14] Wai R., Liu Ch., Experimental Verification of Dynamic Petri Recurrent-Fuzzy-Neural-Network Path Tracking Control for Mobile Robot, *Int. Conf. on Control and Automation*, (2009), 1359-1364
- [15] Wai R., Chu Ch.; Motion Control of Linear Induction Motor via Petri Fuzzy Neural Network. *IEEE Transactions on industrial electronics*, VOL. 54, NO. 1, (2007), 281-295

Autorzy: mgr. inż. Piotr Derugo, dr hab. inż. Krzysztof Szabat prof. PWR, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: piotr.derugo@pwr.wroc.pl, krzysztof.szabat@pwr.wroc.pl
dr inż. Jarosław Kacerka, dr inż. Marcin Jastrzębski, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, Zakład Teorii Sterowania, 90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22 marcin.jastrzebski@p.lodz.pl, jaroslaw.kacerka@p.lodz.pl