

Krzysztof WIKTOROWICZ

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA INFORMATYKI I AUTOMATYKI, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Stabilny uczący się regulator rozmyty z modelem odniesienia dla obiektów z opóźnieniem

Dr inż. Krzysztof WIKTOROWICZ

Dyplom magistra inżyniera uzyskał w 1993 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej. Bezpośrednio po studiach rozpoczął pracę w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2001 roku w Instytucie Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Zajmuje się teorią sterowania, a w szczególności układami regulacji rozmytej.



e-mail: kwiktor@prz-rzeszow.pl

Streszczenie

W artykule zaproponowano metodę, zwaną *uczeniem on-line w sektorze*, która gwarantuje stabilność układu z uczącym się regulatorem rozmytym z modelem odniesienia FMRLC. Układ składa się z liniowego obiektu z opóźnieniem, regulatora rozmytego, modelu odniesienia i mechanizmu uczenia. Mechanizm uczenia modyfikuje reguły regulatora w taki sposób, aby odpowiedź układu zamkniętego była zbliżona do odpowiedzi modelu odniesienia. W artykule opracowano procedurę bezpiecznego projektowania układu wykorzystując częstotliwościowe kryteria stabilności. Dokonano ponadto uproszczenia regulatora FMRLC w celu zredukowania liczby jego parametrów. Zaproponowaną metodę zilustrowano przykładem projektowania układu z niestabilnym członem liniowym.

Słowa kluczowe: regulator rozmyty, uczenie, stabilność, twierdzenie koła, opóźnienie.

Stable fuzzy logic learning controller with reference model for plants with delay**Abstract**

The paper presents a method, called *on-line learning in sector*, that guarantees stability of a control system with fuzzy model reference learning controller (FMRLC) [5]. The system (Fig. 1) consists of a plant with delay time (Eq. (1)), the fuzzy logic controller (Eq. (8)), a reference model and a learning mechanism. The learning mechanism, described in Section 6, changes rules of the fuzzy controller so that the closed loop system behaves like the reference model. In the paper a design procedure that utilises frequency domain methods i.e. the Nyquist criterion and the so-called circle criterion is proposed. It is assumed that the function of the fuzzy controller is a nonlinearity described by a sector condition (Eqs. (2) and (3)). The condition means that the function lies between two lines passing the origin [10]. In the proposed method the function of the fuzzy controller is verified during on-line learning so it always stays within the allowed sector. Furthermore, the more effective Takagi-Sugeno controller instead of a Mamdani controller is used and a simplified way to calculate learning signal is proposed (Eq. (11)). The presented method is illustrated by an example of the design of a control system containing a non-stable plant with time delay.

Keywords: fuzzy controller, learning, stability, circle criterion, delay.

1. Wstęp

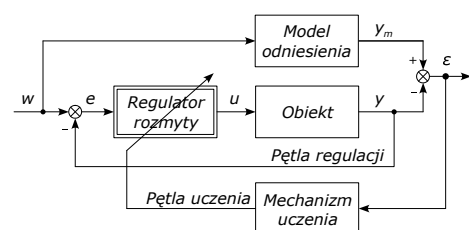
Regulator z logiką rozmytą (lub krótko *regulator rozmyty*) działa wykorzystując pewne algorytmy sterowania oparte na wiedzy. W odróżnieniu od regulatorów konwencjonalnych, w których prawo sterowania jest wyrażane analitycznie, w regulatorze rozmytym sterowanie wyznacza się poprzez wnioskowanie. Odbywa się ono w *mechanizmie wnioskowania*, który na podstawie *regul sterowania* znajdujących się w *bazie wiedzy*, przetwarza dane wejściowe na dane wyjściowe.

Dobór reguł sterowania jest zasadniczym zagadnieniem w syntezy regulatora rozmytego, gdyż decydują one o jakości pracy całego układu. Najczęściej korzysta się z wiedzy doświadczonych operatorów (ekspertów) lub stosuje się pewne rozwiązania szablonowe [1]. Najbardziej obiecujące wydają się jednak metody pozyskiwania reguł implementowane w uczących się i adaptacyjnych regulatorach rozmytych [2, 3, 4]. Jednym z nich jest uczący się regulator rozmyty z modelem odniesienia FMRLC (*Fuzzy Model Reference Learning Controller* [5]). Regulator FMRLC uczy się reguł sterowania pod wpływem błędu, który powstaje pomiędzy pożądaną odpowiedzią generowaną przed modelem odniesienia i odpowiedzią układu zamkniętego. Algorytm ten łączy w sobie cechy samoorganizującego się regulatora SOC (*Self-Organizing Controller* [6]), w którym modyfikowana jest macierz relacji oraz klasyczny regulator adaptacyjnego z modelem odniesienia MRAC (*Model Reference Adaptive Controller* [7]).

Mimo, że w literaturze można znaleźć różne propozycje zastosowań regulatora FMRLC [2, 8, 9], to jednak dotąd nie rozwiązano zagadnienia jego stabilności – co przyznają sami autorzy np. w pracach [2, 5]. Ponadto jego projektowanie jest utrudnione ze względu na dużą liczbę parametrów. W związku z powyższym w niniejszym artykule zostanie zaproponowana uproszczona struktura tego regulatora i przedstawiona metoda bezpiecznego projektowania.

2. Struktura układu

Rozpatrujemy zamknięty układ regulacji przedstawiony na rys. 1. W układzie wyróżniamy *obiekt*, który jest stacjonarnym, liniowym systemem dynamicznym z opóźnieniem oraz *regulator rozmyty*, który jest niestacjonarnym, statycznym członem nieliniowym. Ponadto w układzie mamy *mechanizm uczenia*, który modyfikuje bazę reguł regulatora oraz *model odniesienia*, który charakteryzuje pożądaną odpowiedź układu.



Rys. 1. Układ z uczącym się regulatorem rozmytym z modelem odniesienia
Fig. 1. System with a fuzzy learning controller with reference model

W kolejnych rozdziałach niniejszego artykułu będą podane: twierdzenia pozwalające badać stabilność omawianego układu, opis poszczególnych elementów schematu z rys. 1 oraz przykład projektowania uczącego się regulatora rozmytego.

3. Kryteria stabilności

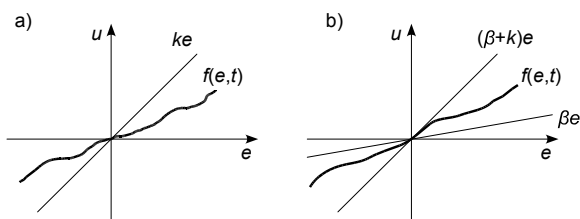
Rozważamy obiekt z opóźnieniem opisany transmitancją operatorową postaci

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-\tau s} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} e^{-\tau s}, \quad (1)$$

gdzie $n > m$. Zakładamy, że niestacjonarna charakterystyka $u(t) = f[e(t), t]$ regulatora rozmytego spełnia następujący warunek sektora [10]:

$$0 \leq \frac{f(e, t)}{e} \leq k, \quad \forall e \neq 0, e = 0 \Rightarrow u = 0, \quad (2)$$

czyli leży między prostymi $u = 0$, $u = ke$ (rys. 2a). Mówimy wówczas, że funkcja regulatora jest *nieliniowością sektorową* lub *leży w sektorze* $[0, k]$.



Rys. 2. Nieliniowości leżące w sektorach $[0, k]$ (a) oraz $[\beta, \beta + k]$ (b)

Fig. 2. Nonlinearities belonging to sectors $[0, k]$ (a) and $[\beta, \beta + k]$ (b)

Będziemy również rozpatrywać przypadek, w którym funkcja $f(e, t)$ leży w sektorze $[\beta, \beta + k]$, gdzie $\beta, k \geq 0$. Oznacza to, że jest spełniony warunek

$$\beta \leq \frac{f(e, t)}{e} \leq \beta + k, \quad \forall e \neq 0, e = 0 \Rightarrow u = 0, \quad (3)$$

czyli funkcja leży między prostymi $u = \beta e$, $u = (\beta + k)e$ co przedstawiono na rys. 2b. W tym przypadku, stosując metodę przesunięcia biegunów (por. np. [11]), korzystamy z podstawienia

$$u_1(t) = f_1(e, t) = f(e, t) - \beta e(t) \quad (4)$$

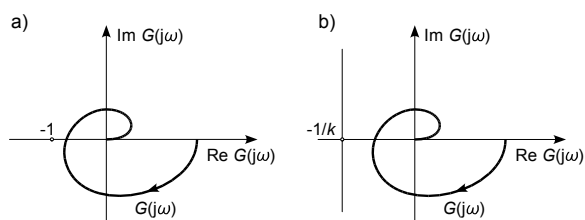
i otrzymujemy transmitancję zastępczą postaci

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + \beta G(s)}. \quad (5)$$

Po zastosowaniu tego przekształcenia funkcja $u_1(t) = f_1[e(t), t]$ leży w sektorze $[0, k]$, czyli jest spełniony warunek

$$0 \leq \frac{f_1(e, t)}{e} \leq k, \quad \forall e \neq 0, e = 0 \Rightarrow u_1 = 0. \quad (6)$$

Warto podkreślić, że metodę przesunięcia biegunów można zastosować dla układów, w których obiekt nie jest stabilny. Warunkiem stabilności układu zamkniętego jest wówczas istnienie takiej wartości β , aby transmitancja zastępcza (5) była stabilna.



Rys. 3. Ilustracja kryterium Nyquista (a) i kryterium koła (b)

Fig. 3. Illustration of the Nyquist criterion (a) and the circle criterion (b)

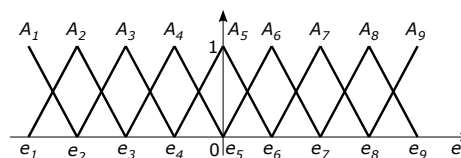
Do badania stabilności rozpatrywanego układu zostaną wykorzystane dwa twierdzenia – Nyquista [12] oraz koła [13] (w polskiej literaturze zwane kryterium Kudrewicza [14]). Obydwa kryteria są kryteriami graficznymi a ich stosowanie polega na analizie charakterystyki widmowej obiektu. Kryterium Nyquista pozwala badać układy liniowe z opóźnieniem, gdzie kryteria analityczne Routha lub Hurwita nie mogą być stosowane, gdyż transmitancja obiektu nie jest funkcją wymierną.

Ilustracje obydwu twierdzeń pokazano na rys. 3. Stabilność układu liniowego z regulatorem proporcjonalnym o wzmacnieniu r jest zapewniona, gdy charakterystyka amplitudowo-fazowa $G(j\omega)$ nie obejmuje punktu $(-1, j0)$ (rys. 3a). Zbiorowi wszystkich wzmacnień r gwarantujących stabilność odpowiada tzw. *sektor Hurwita*, wyznaczony przez charakterystyki $u = r \cdot e$. Z kolei układ nieliniowy spełniający warunek sektora leży na prawo od prostej przechodzącej przez punkt $-1/k$ (rys. 3b). Sektor wyznaczony przez to kryterium będziemy nazywać *sektorem koła*. Jeżeli nieliniowość spełnia warunek (3), wówczas przesuwa się bieguny członu liniowego i stosuje się kryterium koła dla charakterystyki zastępczej (5) z warunkiem (6).

Należy zauważyć, że w rozpatrywanym układzie nie można zastosować kryterium Popova [13], ponieważ, ze względu na uczenie *on-line*, funkcja regulatora rozmytego jest niestacjonarna.

4. Regulator rozmyty Takagi-Sugeno

Rozpatrujemy regulator rozmyty Takagi-Sugeno [15] o jednym wejściu i jednym wyjściu (rys. 1). Wejściem regulatora jest błąd regulacji $e(t) = w(t) - y(t)$, gdzie $w(t)$ oznacza wartość zadaną, zaś $y(t)$ zmienną procesową. Wyjściem regulatora jest sterowanie $u(t)$.



Rys. 4. Zbiory rozmyte dla wejścia regulatora

Fig. 4. Fuzzy sets for the controller input

Dla wejścia przyjmujemy 9 równomiernie rozmieszczonych zbiorów rozmytych A_i (rys. 4), których wierzchołki znajdują się w punktach e_i . W regulatorze mamy 9 reguł sterowania postaci

$$R_i : \text{Jeżeli } e \text{ jest } A_i, \text{ to } u \text{ jest } c_i, \quad (7)$$

gdzie c_i jest liczbą rzeczywistą. Przyjmujemy symetryczny zbiór uniwersalny (zakres zmian) dla wejścia $E = [-a, a]$, przy czym $a > 0$.

Wyjście regulatora jest dane zależnością

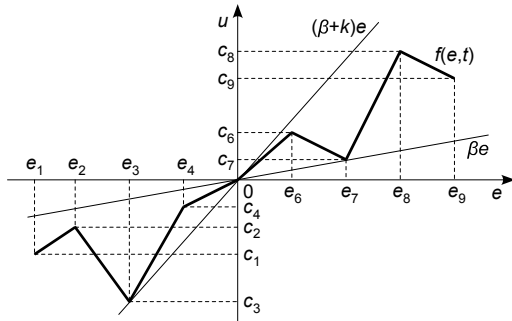
$$u = \frac{\sum_{i=1}^9 w_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^9 w_i}, \quad w_i = A_i(e), \quad (8)$$

przy czym $A_i(e)$ oznacza stopień przynależności wejścia e do zbioru A_i , natomiast w_i nazywamy *stopniem spełnienia reguły*. Regułę, której stopień spełnienia jest większy od zera nazywamy *regułą aktywną*.

Można wykazać [16, 17], że funkcja zdefiniowanego powyżej regulatora jest odcinkami liniowa i w punktach, gdzie znajdują się

wierzchołki zbiorów rozmytych przyjmuje wartości określone w następnikach reguł, tzn. dla $e = e_i$ mamy $u = c_i$ (rys. 5).

Przyjmujemy dalej następujące ograniczenia następników reguł: $c_5 = 0$, czyli regulator produkuje zerowe sterowanie dla zerowego błędu regulacji oraz $c_1, c_2, c_3, c_4 \leq 0$ i $c_6, c_7, c_8, c_9 \geq 0$, to znaczy nie zmieniamy znaku sprzężenia zwrotnego.



Rys. 5. Funkcja regulatora Takagi-Sugeno jako nieliniowość sektorowa
Fig. 5. Function of the Takagi-Sugeno controller as a sector nonlinearity

Widać, że w ten sposób otrzymujemy funkcję regulatora, która spełnia warunek sektora (3), przy czym ograniczenia sektora dane są zależnościami

$$\beta = \min(c_i/e_i), \quad \beta + k = \max(c_i/e_i), \quad (9)$$

gdzie $i \neq 5$.

5. Model odniesienia

Wejściem modelu odniesienia jest sygnał wymuszający $w(t)$, zaś wyjściem – oczekiwana odpowiedź $y_m(t)$. Na podstawie spodziewanej odpowiedzi i aktualnie uzyskiwanej jest liczony błąd uczenia

$$\varepsilon(t) = y_m(t) - y(t). \quad (10)$$

Stanowi on wejście mechanizmu uczenia, który modyfikuje reguły regulatora w taki sposób, aby błąd ε stawał się coraz mniejszy. Jeżeli wymagana jakość pracy jest zapewniona, wówczas błąd ε jest mały i zmiany reguł są niewielkie.

Model odniesienia może być dowolny – istotny jest jednak prawidłowy dobór jego parametrów w taki sposób, aby układ zamknięty był w stanie osiągnąć oczekiwaną jakość.

6. Mechanizm uczenia

Uczenie regulatora opiera się na błędzie uczenia ε i działa według następującego algorytmu [18]:

1. Wyznacz wartość sygnału uczącego ze wzoru

$$p(nT) = g_p \cdot \varepsilon(nT), \quad (11)$$

gdzie g_p – wzmacnienie uczenia, T – okres próbkowania.

2. Znajdź zbiór reguł aktywnych w poprzednim cyklu. Zbiór ten nazywamy *zbiorem aktywnym*. W rozpatrywanym regulatorze zbiór aktywny może zawierać jedną lub dwie reguły.
3. W regułach ze zbioru aktywnego, dla których $i \neq 5$ (dla $e = 0$ wymagamy $u = 0$):
 - a. zmień wartość następника c_i dodając do niego wartość sygnału uczącego:

$$c_i(nT) = c_i(nT - T) + p(nT), \quad (12)$$

- b. ogranicz otrzymany następnik w taki sposób, aby funkcja regulatora spełniała warunek sektora:

$$\begin{aligned} \text{Jeżeli } \frac{c_i(nT)}{e_i} < \beta, \text{ to } c_i(nT) &= \beta \cdot e_i. \\ \text{Jeżeli } \frac{c_i(nT)}{e_i} > \beta + k, \text{ to } c_i(nT) &= (\beta + k) \cdot e_i. \end{aligned} \quad (13)$$

Przedstawiony powyżej algorytm został zmodyfikowany w stosunku do tego, który przedstawiono w publikacjach [2, 5]. Sygnał uczący wyznacza się tutaj nie poprzez złożony model odwrotny, lecz jest on wprost proporcjonalny do błędu uczenia (wzór (11)). Ponadto, w punkcie 3b, dodano kontrolę procesu uczenia, dzięki czemu stabilność układu jest gwarantowana. Ze względu na sposób ograniczania funkcji regulatora, które ma miejsce w tym punkcie, proponuje się nazywanie podanego algorytmu *uczeniem on-line w sektorze*.

Należy podkreślić, że zmiany w bazie reguł są *lokalne*, tzn. modyfikowane są tylko te reguły, które znajdują się w zbiorze aktywnym. Dzięki temu regulator *pamięta* reguły, które zostały wcześniej nauczone i nie wymagają zmian.

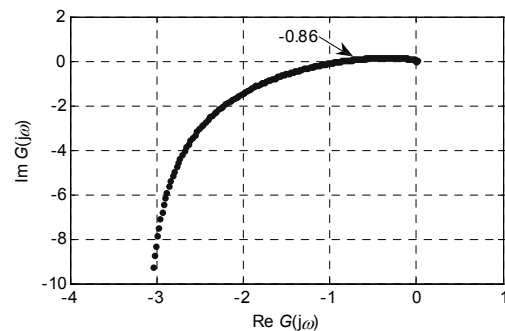
7. Przykład

Rozpatrujemy układ z uczącym się regulatorem rozmytym i obiektem o transmitancji

$$G(s) = \frac{e^{-0.2s}}{s(s+1)(2s+1)} = \frac{e^{-0.2s}}{2s^3 + 3s^2 + s}, \quad (14)$$

która ma dwa bieguny stabilne $s_1 = -1$, $s_2 = -0.5$ oraz jeden niestabilny $s_3 = 0$. Przyjmujemy okres próbkowania $T = 0.05$ s. Projektowanie regulatora dla rozpatrywanego obiektu zostanie pokazane w podanych niżej krokach.

1. Wyznaczenie sektora Hurwitza. Na rys. 6 pokazano fragment charakterystyki amplitudowo-fazowej obiektu dla pulsacji zmieniającej się w zakresie $\omega \in [0.1, 20]$ rad/s. Analizując charakterystykę w miejscach przecięcia jej z osią rzeczywistą otrzymujemy wzmacnienie krytyczne $r_{kr} = 1/0.86 = 1.16$, dla którego układ zamknięty z regulatorem liniowym jest na granicy stabilności. Jednocześnie, ze względu na niestabilny biegun $s_3 = 0$, wzmacnienie regulatora musi być większe od zera. Z podanych rozważań wynika, że sektor Hurwitza wyznaczają wzmacnienia z przedziału $r \in (0, 1.16)$.

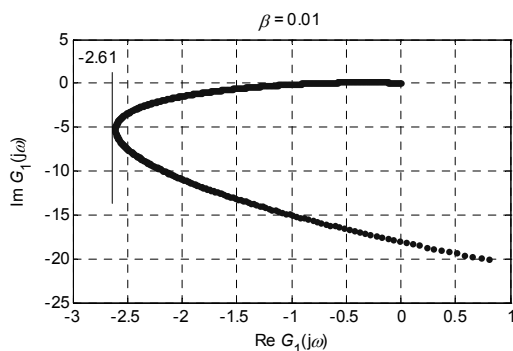


Rys. 6. Charakterystyka Nyquista $G(j\omega)$
Fig. 6. Nyquist plot of $G(j\omega)$

2. Wyznaczenie sektora koła. Na podstawie wyniku uzyskanego w poprzednim kroku widzimy, że dolne ograniczenie sektora koła musi leżeć w przedziale $(0, 1.16)$. Weźmy przykładowo $\beta = 0.01$. Otrzymujemy wówczas transmitancję zastępczą postaci

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + \beta G(s)} = \frac{e^{-0.2s}}{2s^3 + 3s^2 + s + 0.01e^{-0.2s}}. \quad (15)$$

Z charakterystyki amplitudowo-fazowej $G_1(j\omega)$ przedstawionej na rys. 7 otrzymujemy $k = 1/2.61 = 0.38$ i stąd sektor koła wynoszący $[\beta, \beta + k] = [0.01, 0.39]$. Wynika stąd, że jeżeli funkcja regulatora rozmytego będzie leżała między prostymi o nachyleniach 0.01 i 0.39, to układ zamknięty będzie stabilny.



Rys. 7. Charakterystyka Nyquista $G_1(j\omega)$ dla $\beta = 0.01$

Fig. 7. Nyquist plot of $G_1(j\omega)$ for $\beta = 0.01$

Postępując podobnie jak powyżej wyznaczono, dla wybranych wartości β , sektory koła zebrane w tab. 1.

Tab. 1. Sektory koła
Tab. 1. Circle sectors

β	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	1.1
$\beta + k$	0.39	0.43	0.49	0.57	0.67	0.88	1.02	1.14

Widzimy, że w ten sposób można otrzymać nieskończenie wiele warunków gwarantujących stabilność układu nieliniowego. Wybór odpowiedniego sektora pozostawia się projektantowi.

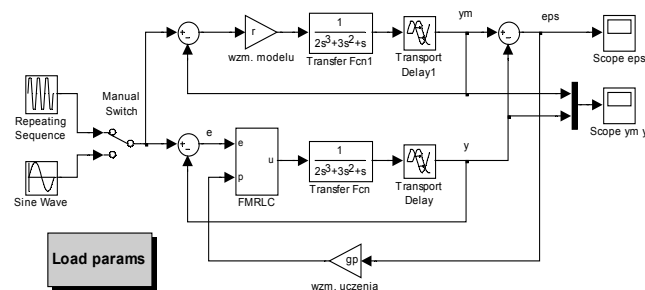
3. Dobór modelu odniesienia. Jak już wspomniano wcześniej, model odniesienia może być dowolny. Przy jego wyborze należy jednak pamiętać o tym, aby osiągnięcie jego odpowiedzi (minimalizowanie błędu uczenia) było w ogóle możliwe przez układ regulacji. Często model odniesienia ma postać transmitancji niskiego rzędu, na przykład członu inercyjnego z jedną lub dwiema stałymi czasowymi [2, 4]. Można także, znając strukturę obiektu, wziąć model zbliżony do transmitancji układu zamkniętego. Mówimy wówczas o sterowaniu ze śledzeniem modelu (*model-following control* [7]). W rozpatrywanym układzie przyjęto model postaci

$$G_m(s) = \frac{rG(s)}{1 + rG(s)} = \frac{re^{-0.2s}}{2s^3 + 3s^2 + s + re^{-0.2s}}, \quad (16)$$

który odpowiada układowi zamkniętemu z regulatorem liniowym o wzmacnieniu r . Przyjęto $r = 0.1$, dla którego odpowiedź skokowa jest aperiodyczna krytyczna z czasem ustalania wynoszącym około 30 s.

4. Implementacja. Układ regulacji z uczącym się regulatorem rozmytym zaprogramowano w środowisku Matlab/Simulink

a jego schemat przedstawiono na rys. 8. Zasadniczym elementem układu jest blok FMRLC, który zawiera zamaskowaną s -funkcję realizującą uczenie i obliczanie wyjścia regulatora rozmytego. Wejściami tego bloku są błąd regulacji e i sygnał uczenia p .

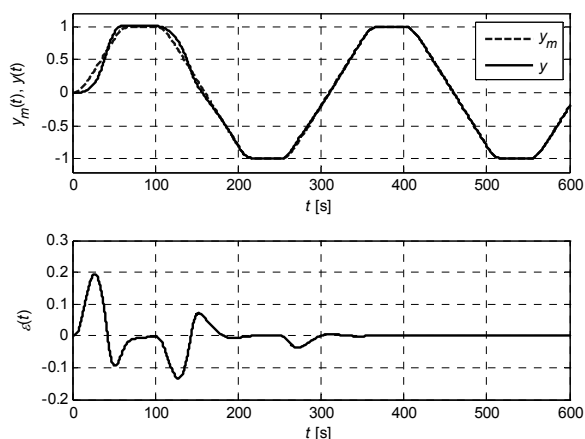


Rys. 8. Realizacja układu z uczącym się regulatorem rozmytym
Fig. 8. Realisation of the system with the fuzzy learning controller

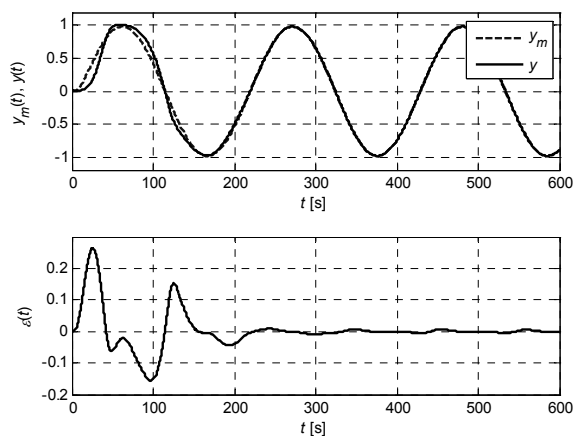
Pozostałymi elementami schematu są: zadajniki sygnału wymuszającego (bloki Repeating Sequence i Sine Wave), wzmacnienie uczenia (blok gp), model odniesienia realizowany w górnej części schematu oraz wyświetlacze sygnałów (bloki Scope). Przycisk Load params służy do załadowania parametrów układu z m-pliku Matlab.

5. Eksperymenty. Zaprojektowany układ poddano wymuszeniu trapezoidalnemu (rys. 9) i sinusoidalnemu (rys. 10). Przyjęto, że regulator rozmyty w czasie uczenia powinien pracować w sektorze $[\beta, \beta + k] = [0.01, 0.39]$. W obydwu przypadkach startował z regułami realizującymi funkcję liniową o nachyleniu β . Warto zwrócić uwagę, że możliwe są inne wybory następników reguł przed rozpoczęciem uczenia – np. regulator może wystartować z wartości zerowych lub losowych. Jeżeli jednak chcemy, aby funkcja regulatora spełniała warunek sektora w całym procesie sterowania, to powinien wystartować z regułami dowolnymi, ale w sektorze.

Wzmocnienie uczenia dobierano eksperymentalnie kierując się minimalizacją czasu zanikania błędu uczenia. Dość dobre przebiegi otrzymano dla $g_p = 5 \cdot 10^{-5}$. Należy podkreślić, że dobór wzmacnienia uczenia decyduje o jakości pracy układu i nie ma wpływu na jego stabilność. Jest to cecha pozytywna proponowanego algorytmu, w porównaniu z klasycznym regulatorem MRAC opartym na metodzie gradientu [7], gdzie duże wartości tego parametru mogą zdestabilizować układ.



Rys. 9. Odpowiedź układu i błąd uczenia dla sygnału trapezoidalnego
Fig. 9. System response and the learning error for a trapezoidal signal



Rys. 10. Odpowiedź układu i błąd uczenia dla sygnału sinusoidalnego
Fig. 10. System response and the learning error for a sinusoidal signal

Na podstawie otrzymanych przebiegów można zauważyć, że regulator nauczył się sterować w taki sposób, aby odpowiedź układu zamkniętego była zbliżona do odpowiedzi modelu odniesienia. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów otrzymano reguły sterowania regulatora rozmytego przedstawione w tab. 2.

Tab. 2. Reguły regulatora rozmytego po uczeniu
Tab. 2. Rules of the fuzzy controller after learning

	e	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
trapez	$u \cdot 10^{-2}$	-1	-0.75	-3.1	-2.5	0	2.5	4.3	0.75	1
sinus	$u \cdot 10^{-2}$	-1	-0.75	-4.7	-2.5	0	2.5	5.5	2.3	1

Wykorzystując zależności (9), w których $e_i = -1, -0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ łatwo można stwierdzić, że dla otrzymanych reguł funkcja regulatora rozmytego leży w dozwolonym sektorze $[0.01, 0.39]$.

8. Wnioski

W artykule zaproponowano metodę bezpiecznego projektowania uczącego się regulatora rozmytego z modelem odniesienia FMRLC dla obiektów z opóźnieniem. Metoda opiera się na częstotliwościowych kryteriach stabilności, które pozwalają określić warunki, jakie musi spełniać funkcja regulatora rozmytego, aby stabilność układu zamkniętego była gwarantowana. Odnosząc się do innych prac dotyczących regulatora FMRLC można wskazać

na następujące elementy, które są nowe w przedstawionym artykule: zastosowanie metod częstotliwościowych do projektowania uczącego się regulatora rozmytego dla obiektów z opóźnieniem, znaczące uproszczenie struktury regulatora i co za tym idzie zredukowanie liczby parametrów, zastąpienie regulatora Mamdaniego bardziej efektywnym regulatorem Takagi-Sugeno (por. także [4]) oraz realizację regulatora uczącego się w sektorze w postaci bloku Simulinka.

9. Literatura

- [1] MacVicar-Whelan P. J.: Fuzzy sets for man-machine interactions, International Journal of Man-Machine Studies, vol. 8, 687-697, 1976.
- [2] Passino K. M., Yurkovich S.: Fuzzy control, Addison-Wesley, 1998.
- [3] Wang L.-X.: Adaptive fuzzy systems and control: Design and stability analysis, Prentice-Hall, New Jersey, 1994.
- [4] Wiktorowicz K.: Uczący się regulator rozmyty z modelem odniesienia, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 54, nr 12, 887-891, 2008.
- [5] Layne J. R., Passino K. M.: Fuzzy model reference learning control, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, vol. 4, no. 1, 33-47, 1996.
- [6] Procyk T., Mamdani E.: A linguistic self-organizing process controller, Automatica, vol. 15, 15-30, 1979.
- [7] Åström K. J., Wittenmark B.: Adaptive control, Addison-Wesley, 1995.
- [8] Layne J. R., Passino K. M., Yurkovich S.: Fuzzy learning control for antiskid braking systems, IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 1, no. 2, 122-129, 1993.
- [9] Moudgal V. G., Kwong W. A., Passino K. M., Yurkovich S.: Fuzzy learning control for a flexible-link, IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 3, no. 2, 199-210, 1995.
- [10] Desoer C. A., Vidyasagar M.: Feedback systems: Input-output properties, Academic Press, New York, 1975.
- [11] Kaczorek T.: Teoria sterowania, Tom II, WNT, Warszawa, 1981.
- [12] Kaczorek T.: Teoria sterowania, Tom I, WNT, Warszawa, 1981.
- [13] Vidyasagar M.: Nonlinear systems analysis, Prentice-Hall, New Jersey, 1978.
- [14] Kudrewicz J.: Częstotliwościowe metody w teorii nieliniowych układów dynamicznych, WNT, Warszawa, 1970.
- [15] Takagi T., Sugeno M.: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, vol. 15, 116-132, 1985.
- [16] Kluska J.: Sterowanie z logiką rozmytą, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria Elektrotechnika, z. 12, nr 104, Rzeszów, 1992.
- [17] Wiktorowicz K.: Jakość regulacji rozmytej, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, 2001.
- [18] Wiktorowicz K.: Stabilny uczący się regulator rozmyty z modelem odniesienia, Inżyniera wiedzy i systemy ekspertowe, EXIT, 149-160, 2009.

otrzymano / received: 16.02.2010

przyjęto do druku / accepted: 04.05.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie Pomiary Automatyka Kontrola

WYDAWNICTWO PAK
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,
tel./fax: 22 827 25 40

REDAKCJA CZASOPISMA POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 32 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl