

*sterowanie adaptacyjne,
regulatory neuronowo-rozmyte,
Matlab Genetic Algorithm Tool*

Sebastian KNYCHAS*

PARAMETRYZACJA NEURONOWO-ROZMYTYCH REGULATORÓW TYPU TSK PRACUJĄCYCH W ADAPTACYJNEJ STRUKTURZE STEROWANIA PRĘDKOŚCIĄ UKŁADU NAPĘDOWEGO

W pracy przedstawiono badania neuronowo-rozmytych regulatorów prędkości układu napędowego pracujących w adaptacyjnej strukturze sterowania. Celem badań było określenie metody doboru parametrów funkcji konkluzji regulatorów TSK pozwalających zachować odporność struktury sterowania na zmiany parametrów dynamicznych układu napędowego w szerokim zakresie zmian pozostałych parametrów regulatora. Przebadano regulatory różnych typów o zmiennych parametrach wejściowych funkcji przynależności dążąc do minimalizacji błędów doboru parametrów odpowiednich dla wszystkich badanych regulatorów. Do doboru parametrów zastosowano narzędzie Matlab Genetic Algorithm Toolbox.

1. WPROWADZENIE

Logika rozmyta z założenia ma w sposób bardziej dokładny opisywać zjawiska rzeczywiste. Z tego też powodu znalazła szereg zastosowań w wielu dziedzinach nauki. W naukach technicznych logika rozmyta najczęściej wykorzystywana jest w układach regulacji systemów sterowania. W literaturze spotkać można liczne prace dokumentujące zalety stosowania regulatorów rozmytych (por. [1]–[6]). Niejednokrotnie regulatory te uzupełniane są o różnego rodzaju modyfikacje. Jedną z często spotykanych jest reprezentacja regulatora rozmytego w postaci sieci neuronowej (tzw. regulatory neuronowo-rozmyte). W innych przypadkach znaleźć można różnego rodzaju rekurencje poprawiające dynamikę pracy regulatora. Ze względu na typ systemy

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wrocławska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-327 Wrocław, sebastian.knychas@pwr.wroc.pl.

rozmyte dzieli się na typu pierwszego i drugiego oraz tak zwane przedziałowe regulatory typu drugiego. Te ostatnie optymalizują eliminację błędów wynikających z niedokładności pomiarowych jak i czas poświęcony na projektowanie struktury regulatora przy zachowaniu stosunkowo niskiej złożoności obliczeniowej.

Regulatory rozmyte składają się z bloków funkcyjnych pełniących kolejno zadanie rozmywania zmiennej wejściowej regulatora, wnioskowania na podstawie reguł tworzących strukturę regulatora oraz przekształcenia (wyostrzenia) wyjścia regulatora do postaci nierozmytej. Ze względu na postać reguł w literaturze najczęściej spotykanymi są dwa rodzaje regulatorów: Takagi–Sugeno–Kanga oraz Mamdaniego. Pierwszy rodzaj regulatorów składa się z reguł postaci:

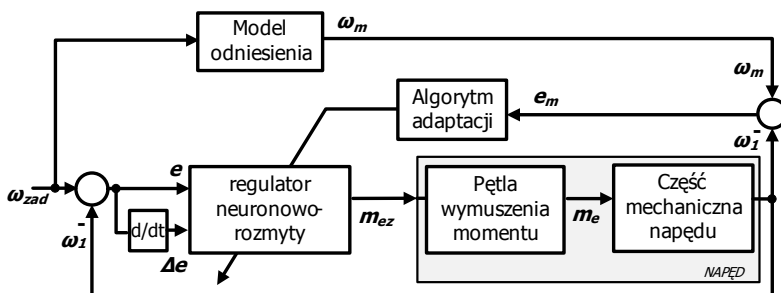
$$R_i : \text{JEŻELI } x_1 \text{ jest } \tilde{A}_{j1} \text{ i } x_2 \text{ jest } \tilde{A}_{j2} \dots \text{ TO } y_i \text{ jest } g_i \quad (1)$$

gdzie $R_{i=1\dots M}$ jest daną regułą, $\tilde{A}_{j=1\dots N}$ wejściowym zbiorem rozmytym, $g_i = a_{i0} + a_{i1} \cdot x_1 + a_{i2} \cdot x_2$ funkcją zmiennych wejściowych, M liczbą reguł a N liczbą zbiorów rozmytych na wejściu regulatora.

Dla regulatorów Mamdaniego wyjście odwzorowane jest w postaci zbioru rozmytego:

$$R_i : \text{JEŻELI } x_1 \text{ jest } \tilde{A}_{i1} \text{ i } x_2 \text{ jest } \tilde{A}_{i2} \dots \text{ TO } y_i \text{ jest } \tilde{B}_i \quad (2)$$

Stosowanie regulatorów rozmytych umożliwia czytelne określenie nieliniowej charakterystyki regulacji, co jest znaczną zaletą w przypadku sterowania prędkością układu napędowego. Statyczna charakterystyka, mimo wspomnianych zalet, przy wysokich wymaganiach dynamiki pracy nie zapewnia jednak odporności struktury na zmiany parametrów napędu. Z tego względu w pracach badawczych często spotyka się zaawansowane struktury sterowania. W niniejszej pracy zastosowano adaptacyjną strukturę sterowania umożliwiającą dynamiczne kształtowanie charakterystyki regulacji. Schemat blokowy struktury sterowania z neuronowo-rozmytym regulatorem prędkości przedstawia poniższy rysunek.



Rys. 1. Adaptacyjna struktura sterowania prędkością układu napędowego

Fig. 1. Adaptive speed control structure of drive system

Algorytm adaptacji aktualizuje parametry wyjściowych funkcji regulatora neuronowo-rozmytego minimalizując gradient błędu śledzenia modelu układu napędowego. Dla regulatora Mamdaniego przy założeniu wyjściowych zbiorów rozmytych postaci singletona reguły przyjmują postać:

$$R_i : \text{JEŻELI } x_1 \text{ jest } \tilde{A}_{i1} \text{ i } x_2 \text{ jest } \tilde{A}_{i2} \dots \text{ TO } y_i \text{ jest } w_i \quad (3)$$

gdzie w_i jest wartością wagi aktualizowaną przez algorytm adaptacji zgodnie z zależnością

$$w_i(k+1) = w_i(k) + f_i(k_p e_m + k_d \Delta e_m) \quad (4)$$

Wybór wyjściowego zbioru rozmytego postaci singletona upraszcza złożoność obliczeniową regulatora nie obniżając jakości pracy, gdyż reprezentuje położenie składowych nierozmytej (wyostrzonej) wartości wyjścia regulatora aktualizowane przez algorytm adaptacji (eliminując konieczność formowania złożonych wyjściowych zbiorów rozmytych).

Dla regulatorów TSK reguły uzupełnione o wagi przedstawiają się następująco:

$$R_i : \text{JEŻELI } x_1 \text{ jest } \tilde{A}_{i1} \text{ i } x_2 \text{ jest } \tilde{A}_{i2} \dots \text{ TO } y_i \text{ jest } w_i g_i \quad (5)$$

Parametryzacja regulatorów uwzględnia zmiany kształtu i położenia wejściowych zbiorów rozmytych oraz liczby reguł. Wpływ zmian tych parametrów na jakość pracy regulatora został przebadany w pracach [2]–[4]. O ile przygotowanie regulatorów Mamdaniego do badań porównawczych nie nastręcza problemów o tyle regulatory TSK wymagają apriorycznego określenia parametrów a funkcji składowych g_i .

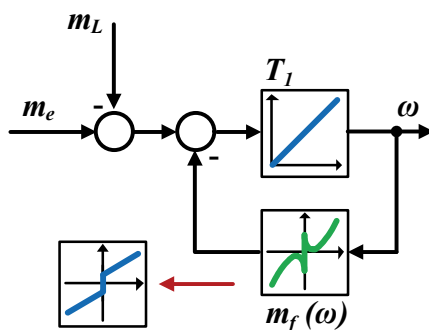
W pracy przedstawiono badania nad doбором parametrów a funkcji g_i z wykorzystaniem zaawansowanych metod optymalizacji. Do doboru parametrów a wybrano dostępne z poziomu środowiska Matlab narzędzie globalnej optymalizacji pracujące na bazie algorytmów genetycznych.

Praca została podzielona na cztery sekcje. Po wprowadzeniu w tematykę artykułu przedstawiono model matematyczny obiektu badań. Następnie omówiono badany neuronowo-rozmyty regulator prędkości oraz przedstawiono wybrane narzędzie doboru parametrów. Dalej przedstawiono badania symulacyjne analizowanej struktury sterowania. Wyniki poparto przykładowymi testami eksperymentalnymi. Artykuł zakończono krótkim podsumowaniem.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU

Obiektem badań jest układ napędowy z obcowzbudnym silnikiem prądu stałego uwzględniający powszechnie stosowane uproszczenia.

Badana struktura sterowania zakłada zoptymalizowaną pętlę wymuszenia momentu elektromagnetycznego dostrojoną na bazie kryterium modułu. Część mechaniczna silnika uwzględnia nieliniową charakterystykę tarcia. Schemat blokowy części mechanicznej przedstawiono na rysunku nr 2.

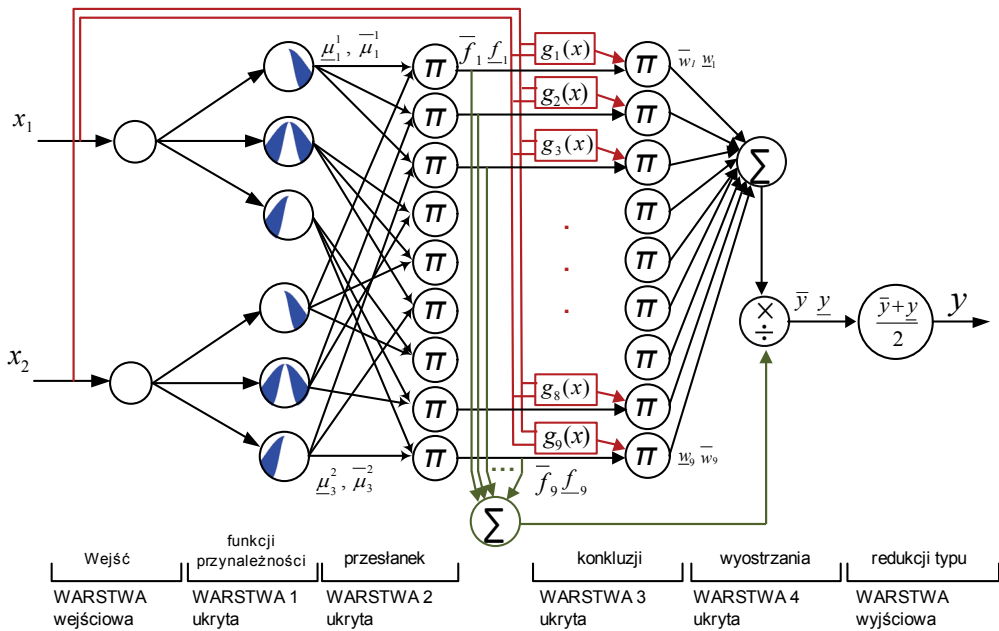


Rys. 2. Część mechaniczna układu napędowego
Fig. 2. Mechanical part of drive system

3. REGULATORY NEURONOWO-ROZMYTE TSK

Badana struktura sterowania (por. rys. 1.) zawiera neuronowo-rozmyty regulator prędkości typu MISO o dwóch wejściach: błędzie regulacji oraz jego pochodnej. Sygnał wyjściowy jest zadanym momentem elektromagnetycznym. Baza reguł zawiera wszystkie kombinacje wejść regulatora. Przykładowy regulator (przedziałowy typu-2) TSK, zrealizowany na bazie sieci neuronowej przedstawiono na rysunku nr 3. Regulator składa się z sześciu warstw, gdzie pierwsza i ostatnia kolejno wprowadzają i wyprowadzają zmienne regulatora. Pierwsza warstwa ukryta realizuje zadanie rozmycia zmiennych wejściowych na wyznaczonych funkcjach przynależności. Postać funkcji przynależności określa typ regulatora (typu-1 bądź przedziałowe typu-2). Druga warstwa realizuje zadanie określenia stopnia spełnienia przesłanki reguł. Kolejna warstwa wyznacza stopień spełnienia konkluzji (określając kolejne składowe wyjścia regulatora). Ostatnia warstwa ukryta wyznacza wyjście regulatora za pomocą określonej funkcji wyostrażania. Dla przedziałowych regulatorów neuronowo-rozmytych typu-2 warstwa wyjściowa dodatkowo uzupełniona jest o funkcję redukcji typu.

Dla określonego regulatora o dziewięciu regułach macierz parametrów $a_{j,k}$ funkcji g_i ma rozmiar równy $j \times k = 27$, gdzie j jest liczbą parametrów składowych funkcji g_i , a k liczbą reguł.



Rys. 3. Przedziałowy regulator neuronowo-rozmyty TSK

Fig. 3. Interval Type-2 neuro-fuzzy TSK controller

4. DOBÓR PARAMETRÓW REGULATORA TSK

Jednym z najbardziej powszechnych algorytmów optymalizacji globalnej dostępnych w środowisku Matlab jest narzędzie *Genetic Algorithm Optimization Tool*. Narzędzie to umożliwia dobór parametrów nieliniowych funkcji przy założonej dokładności otrzymanego rozwiązania. Algorytmy genetyczne są powszechnie stosowane w zadaniach identyfikacji parametrów układów napędowych [7]–[12], w tym określeniu parametrów regulatora.

Narzędzie *Genetic Algorithm Optimization Tool* składa się w dwóch części: problemu optymalizacji i opcji pracy algorytmu. Dostęp do narzędzia możliwy jest z poziomu wiersza poleceń środowiska Matlab, za pomocą funkcji *gatool*.

Celem minimalizacji złożoności doboru algorytmów obrano domyślnie opcje algorytmu podając jedynie wielkość populacji w licznie większej niż liczba parametrów. Parametry wyznaczono w czterech seriach (celem porównania jakości optymalizacji) dla najpowszechniej spotykanych w literaturze przykładów regulatorów: regulatora typu-1 i przedziałowego typu-2 z wejściowymi funkcjami przynależności postaci krzywej gaussa i trójkątnej. Dodatkowo wyznaczono parametry łącznie dla

wszystkich czterech regulatorów. Sumarycznie uzyskano dwadzieścia zestawów parametrów.

5. BADANIA SYMULACYJNE I EKSPERYMENTALNE

Badania symulacyjne wykonano dla siedemdziesięciu dwóch regulatorów: typu-1 (T1) i przedziałowych typu-2 (IT2), o różnych kształtach i nośnikach wejściowych funkcji przynależności. Parametry funkcji przynależności zmieniano w szerokim zakresie uwzględniającym graniczne wartości logicznie umożliwiające kształtowanie charakterystyki regulatora przez algorytm adaptacji.

Jakość pracy regulatora wyznaczano całkowym wskaźnikiem jakości odwzorowującym jakość śledzenia modelu prędkości przez układ napędowy:

$$I_{ITSE} = \int_0^{\infty} t \cdot e_m^2(t) dt \quad (6)$$

Regulatory pracowały w układzie przy zmiennym momencie bezwładności układu napędowego (w zakresie 0.3–3.0 T_1) oraz przy zmiennym obciążeniu.

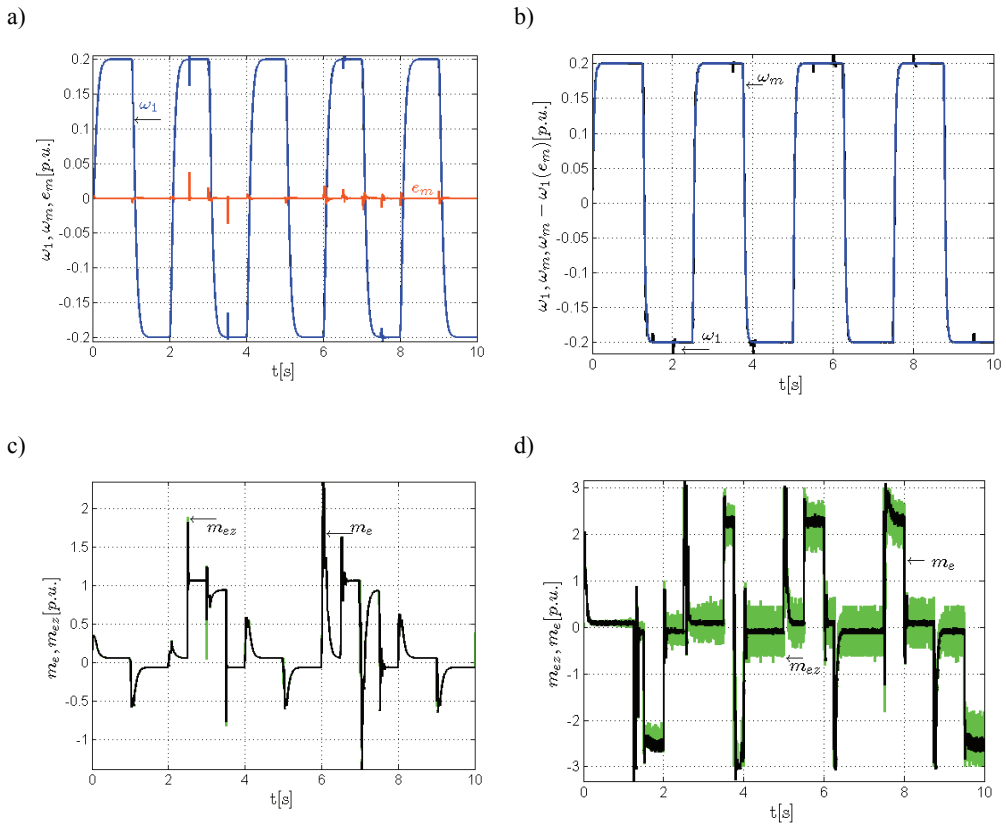
Tabela 1. Podsumowanie wyników badań

Table 1. Summary results

		Badany regulator			
		T1 trójkąt	T1 gauss	IT2 trójkąt	IT2 gauss
Źródło doboru parametrów	T1 trójkąt	S1, S4, S2 (4)	S1 (5)	S1, S4 (4)	S4, S1 (4)
	T1 gauss	S4, S3, S2 (3)	S1, S4, S3, S2 (2)	S4, S2, S3, S1 (3)	S4, S2, S3, S1 (3)
	IT2 trójkąt	S4, S3 (5)	S4, S3 (4)	S4, S3 (5)	S4, S3 (5)
	IT2 gauss	S2, S3, S4, S1 (2)	S1, S2, S3, S4 (3)	S2, S1, S3, S4 (2)	S1, S2, S3, S4 (1)
	Łącznie	S1, S3, S4, S2 (1)	S1, S3, S4, S2 (1)	S4, S3, S2, S1 (1)	S4, S3, S2, S1 (2)

Wyniki badań podsumowane w tabeli 1 przedstawiają uporządkowany wykaz serii parametrów konkluzji regulatorów TSK, wygenerowanych przez algorytm genetyczny dla określonych typów regulatorów. Kryterium akceptacji zestawu parametrów było zachowanie odporności struktury sterowania na zmianę parametrów obiektu oraz regulatora w ponad 96% przypadków. Serie uporządkowane są według jakości regulacji regulatora (od najlepszych do najgorszych), dodatkowo, w nawiasach umieszczono

pozycję określającą przydatność parametrów wygenerowanych z wykorzystaniem danego regulatora.



Rys. 4. Przebiegi symulacyjne (a, c) oraz eksperymentalne (b, d) prędkości modelu i napędu (a, b) oraz momentów elektromagnetycznych (c, d) układu z przedziałowym regulatorem typu-2 o gaussowskich funkcjach przynależności

Fig. 4. Simulation (a, b) and experimental (c, d) transients of the drive system: speeds of the motors (a, c) and torques (b, d) for controller with gaussian membership

Dobór parametrów konkluzji regulatorów TSK z wykorzystaniem wyników regulacji wszystkich typów regulatorów jest najkorzystniejszy. Badanie zestawu wszystkich regulatorów jest dość kłopotliwy. Jak widać z tabeli, dobór parametrów dla regulatorów z wejściowymi funkcjami przynależności postaci krzywej Gaussa, szczególnie z wykorzystaniem przedziałowych regulatorów daje również bardzo dobre wyniki i może być wykorzystany do generowania parametrów dla różnych typów regulatorów o różnych kształtach funkcji przynależności.

Na rysunku nr 4 przedstawiono przykładowe przebiegi symulacyjne i eksperymentalne dla regulatora przedziałowego typu-2 z trójkątnymi funkcjami przynależności o parametrach funkcji g_i wygenerowanych w serii drugiej dla regulatora typu-1 o gaussowskich funkcjach przynależności. Dla wybranego zestawu parametrów konkluzji zmiana pozostałych współczynników regulatora nie wpływała na utratę odporności struktury sterowania. Układ napędowy z bardzo dużą dokładnością śledzi prędkość zadaną przez model. Wpływ zmian momentu bezwładności układu napędowego oraz obciążenia jest szybko kompensowany przez algorytm adaptacji.

LITERATURA

- [1] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 61, Wrocław 2008
- [2] KNYCHAS S., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu II do sterowania prędkością układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, nr 7, 2011, s. 160–163.
- [3] KNYCHAS S., *Adaptacyjne sterowanie układu dwumasowego z połączeniem sprężystym z wykorzystaniem regulatorów neuronowo-rozmytych*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 65, 2011.
- [4] KNYCHAS S., *Analiza porównawcza rekurencyjnych regulatorów neuronowo-rozmytych pracujących w adaptacyjnej strukturze sterowania prędkością układu napędowego*, SENE 2011.
- [5] LIN F., CHOU P., *Adaptive Control of Two-Axis Motion Control System Using Interval Type-2 Fuzzy Neural Network*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2009, Vol. 56, No. 1, pp. 178–193.
- [6] LIN F.J., CHEN S.Y., CHOU P.H., SHIEH P.H., *Interval type-2 fuzzy neural network control for X-Y-Theta motion control stage using linear ultrasonic motors*, Neurocomputing, 2009, Vol. 72, No. 4–6, pp. 1138–1151.
- [7] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Optimization of Fuzzy-Logic Speed Controller for DC Drive System With Elastic Joints*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2004, Vol. 40, No. 4, pp. 1138–1144.
- [8] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Performance Improvement of Industrial Drives With Mechanical Elasticity Using Nonlinear Adaptive Kalman Filter*, IEEE Trans. Ind. Electron. March 2008, Vol. 55, No. 3, pp. 1075–1084.
- [9] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Control of the Drive System with Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach*, IEEE Trans. Ind. Electronics, 2007, Vol. 54, No. 1, pp. 228–240.
- [10] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Application of the Extended Kalman Filter in Advanced Control Structure of a Drive System with Elastic Joint*, IEEE Industrial Technology ICIT 2008.
- [11] ZHAO L., *Design for TSK-Type Fuzzy Neural Networks Based on MSC-GA and BP*, IEEE Chinese Control and Decisions Conference, CCDC, 2010, pp. 2247–2254.
- [12] GAMA C.A., EVSUKOFF A.G., WEBER P., EBECKEN N.F.F., *Parameter identification of Recurrent Fuzzy Systems With Fuzzy Finite-State Automata Representation*, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2008, Vol. 16, No. 1, pp. 213–224.

PARAMETRIZATION OF NEURO-FUZZY TSK CONTROLLER
WORKING IN ADAPTIVE SPEED CONTROL STRUCTURE OF DRIVE SYSTEM

In the paper issues related to the application of the adaptive control structure with a neuro-fuzzy TSK controllers with different parameters are presented. After a short introduction the mathematical model of plant and the structure of TSK neuro-fuzzy controller is featured. For identification TSK conclusions parameters the Genetic Algorithm Toolbox is taken. Proposed control structure with various neuro-fuzzy TSK controller is tested in simulation study. The obtained results allows to choose one set of TSK conclusion parameters witch have good properties for all researched controllers.