

*regulatory neuronowo-rozmyte TSK,  
adaptacyjna struktura sterowania,  
minimalizacja drgań skrętnych napędu dwumasowego*

Sebastian KNYCHAS\*

## **TŁUMIENIE DRGAŃ SKRĘTNYCH DWUMASOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO PRACUJĄCEGO W ADAPTACYJNEJ STRUKTURZE STEROWANIA Z NEURONOWO-ROZMYTYMI REGULATORAMI TYPU TSK**

W niniejszej pracy przedstawiono adaptacyjną strukturę sterowania układu dwumasowego z połączeniem sprężystym z neuronowo-rozmytym regulatorem prędkości typu TSK. Zadaniem regulatora jest minimalizacja wrażliwości struktury sterowania na zmiany parametrów oraz niepewności pomiarowe a także niepewności wynikające z nieprecyzyjnej wiedzy o obiekcie przy jednoczesnej minimalizacji drgań skrętnych układu dwumasowego. Badania przeprowadzono dla regulatorów z wejściowymi zbiorami rozmytymi typu-1 (T1) i przedziałowymi typu-2 (IT2) dla różnych wartości elektromechanicznej stałej czasowej układu oraz przy zakłóceniach pomiarowych.

### **1. WPROWADZENIE**

Ciągły wzrost wymagań stawianych układom regulacji przyczynia się do zaangażowania środowisk naukowych w prace nad zastosowaniem metod sztucznej inteligencji (AI) w zaawansowanych strukturach sterowania. Metody te wykorzystuje się w procesach modelowania, identyfikacji, diagnostyce oraz regulacji. W układach regulacji znaczną popularnością zastosowań systemów AI, oprócz sieci neuronowych, cieszą się systemy rozmyte i neuronowo-rozmyte. Ze względu na nieliniowe powierzchnie sterowania charakteryzują się one większą odpornością na zakłócenia w porównaniu do układów klasycznych [9].

Logikę rozmytą opartą na zbiorach rozmytych wprowadził L.A. Zadeh w 1965 roku [12] umożliwiając przetwarzanie nieprecyzyjnych danych. Umożliwiło to ma-

---

\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, sebastian.knychas@pwr.wroc.pl.

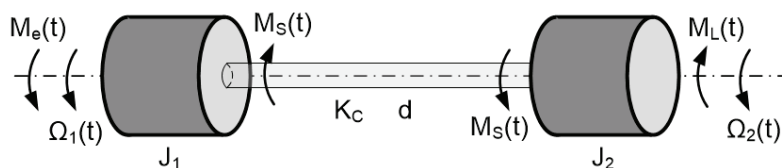
tematyczną reprezentację niedokładności wynikających z zakłóceń pomiarowych i parametrycznych. Konieczność dokładnego określenia postaci zbiorów rozmytych celem wykonania operacji matematycznych przyczyniła się do wprowadzenia przez Zadeh'a [13] zbiorów typu-2 (T2). Teorię zbiorów typu-2 rozszerzyli Mendel i Karnik [3]–[6], a w odpowiedzi na ich wysoką złożoność obliczeniową opracowali koncepcję zbiorów przedziałowych (IT2). Ich zaletą jest niska złożoność obliczeniowa przy zachowaniu możliwości określenia przedziału niepewności wyznaczenia zbioru rozmytego typu-1.

Jednym z głównych powodów pogorszenia właściwości dynamicznych układu napędowego jest nieliniowa charakterystyka zastosowanego sprzęgła mechanicznego. W celu efektywnego tłumienia drgań skrętnych opracowano szereg struktur sterowania, których przegląd jest zamieszczony w [9]. Zaawansowane struktury sterowania posiadają szereg sprzężeń zwrotnych od zmiennych stanu obiektu, co zmusza do zastosowania odpowiedniego estymatora zmiennych stanu. Alternatywą jest zastosowanie adaptacyjnej struktury sterowania opartej tylko na dostępnym pomiarowo sygnale prędkości silnika [6], [7].

W pracy przedstawiono wyniki obrazujące pracę adaptacyjnej struktury sterowania z adaptacyjnym regulatorem rozmytym. W odróżnieniu od [6],[7], gdzie zastosowano prosty system Mamdaniego ze zbiorami typu-1, w niniejszej pracy przedstawiono badania porównawcze układu z regulatorami TSK ze zbiorami typu-1 i 2.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY

W układach dwumasowych, w których moment bezwładności elementu sprzężystego jest wielokrotnie mniejszy od momentów bezwładności silnika napędowego i maszyny roboczej najczęściej stosuje się model układu z bezinercyjnym elementem sprzężystym [9].



Rys. 1. Schemat części mechanicznej układu napędowego z bezinercyjnym elementem sprzężystym (wielkości fizyczne)

Równanie stanu dla rozważanego układu w jednostkach względnych przyjmuje postać:

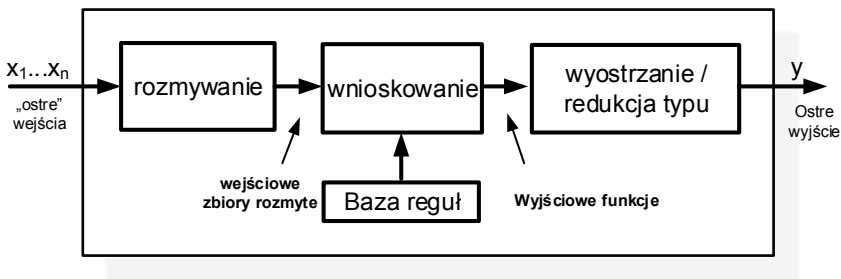
$$\begin{aligned}
 T_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= m_e - m_s - m_{f(\omega_1)}, \\
 T_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= m_s - m_L - m_{f(\omega_2)}, \\
 T_c \frac{dm_s}{dt} &= \omega_1 - \omega_2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

gdzie:

- $m_e$  – moment elektromagnetyczny,
- $\omega_1$  – prędkość silnika,
- $\omega_2$  – prędkość maszyny obciążającej,
- $m_s$  – moment skrętny,
- $m_L$  – moment obciążenia,
- $m_f$  – moment wypadkowy tarcia,
- $T_1$  – mechaniczna stała czasowa silnika,
- $T_2$  – mechaniczna stała czasowa maszyny obciążającej,
- $T_c$  – stała czasowa elementu sprężystego.

### 3. ADAPTACYJNE REGULATORY NEURONOWO-ROZMYTE TSK

Regulatory rozmyte posiadają strukturę kaskadową – sygnały przetwarzane są w następujących po sobie blokach.



Rys. 2. Kaskadowa struktura rozmytego systemu MISO

Systemy te składają się z następujących bloków: rozmywania, wnioskowania oraz wyostrzenia. Zasada działania regulatora rozmytego wynika z syntezy działań kolejnych bloków.

Proces wnioskowania realizowany jest w oparciu o bazę reguł będącą podstawową częścią układu rozmytego. Stopnie spełnienia przesłanek określają wagę danej reguły w sygnale wyjściowym regulatora. W konkluzjach mogą znajdować się zbiory roz-

myte (regulatory Mamdaniego) bądź funkcje wielomianowe (regulatory TSK). Ze względu postać charakterystyki zależności wyjść od wejść regulatory TSK są w stanie zapewnić lepsze właściwości dynamiczne niż regulatory Mamdaniego [9]. Reguły systemów TSK mają następującą postać:

$$R_i = \text{Jeżeli } x_1 \text{ jest } \tilde{A}_{i1} \text{ i } x_2 \text{ jest } \tilde{A}_{i2} \text{ i } \dots x_j \text{ jest } \tilde{A}_{ij} \text{ to } y_i = a_{i0} + \sum_{j=1}^N a_{ij}x_j \quad (2)$$

gdzie:

- $i$  – liczba reguł,
- $j$  – liczba przesłanek w regule.

#### A. Rozmywanie i przesłanki reguł.

Zadanie rozmywania polega na wprowadzeniu zmiennej wejściowej do systemu rozmytego poprzez określenie wartości jej funkcji przynależności do określonego zbioru rozmytego. W literaturze powszechnie wykorzystuje się zbiory rozmyte w kształcie krzywej Gaussa (por. [1], [4], [5], [11]) bądź trójkątnej [2], [6]–[10]. Zaletą funkcji Gaussa jest bardziej naturalna reprezentacja rozkładu funkcji przynależności oraz dostępność wzorów relacji matematycznych dla wszystkich typów zbiorów rozmytych [1], [4], [5], [11]. Badania porównawcze zastosowania obu postaci funkcji przynależności w procesie rozmywania regulatora potwierdzają zalety funkcji Gaussa [2], [3]. Rozmycie zmiennej wejściowej regulatora zależne jest od typu regulatora. Funkcje przynależności postaci krzywej Gaussa w regulatorach rozmytych typu-1 przyjmują postać:

$$\mu_j^i(x) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_j - m_j^i}{\sigma_j^i} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Dla regulatora przedziałowego typu-2 określa się dwie funkcje przynależności, dolną i górną, według zależności:

$$\underline{\mu}_j^i(x) = N(m_{j1}^i, \sigma_j^i; x), \quad (4)$$

$$\overline{\mu}_j^i(x) = N(m_{j2}^i, \sigma_j^i; x). \quad (5)$$

Przedział pomiędzy powyższymi funkcjami (4), (5), a więc wszystkie funkcje z zakresu

$$\mu_j^i(x) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_j - m_j^i}{\sigma_j^i} \right)^2 \right], \quad \sigma_j^i \in [\sigma_{j1}^i, \sigma_{j2}^i] \quad (6)$$

nazywany jest przedziałem niepewności, określanym jako

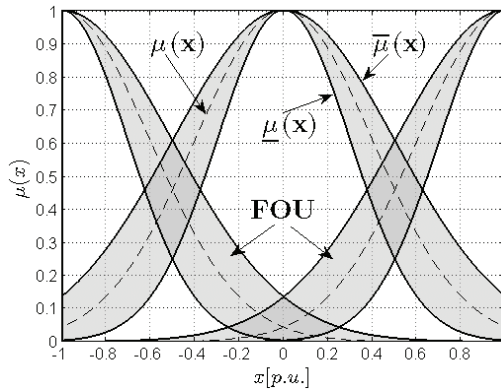
$$FOU(\tilde{A}) \triangleq \bigcup_{x \in X} J_x \quad (7)$$

gdzie  $\tilde{A}$  jest przedziałowym zbiorem rozmytym określonym przez:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in [\underline{\mu}_A(x), \overline{\mu}_A(x)]} 1/u(x, u) J_x \subseteq [0, 1] \quad (8)$$

a  $J_x$  nośnikiem tego zbioru.

Rozkład funkcji przynależności wraz z zakresem FOU wykorzystany w rozmywaniu zmiennych wejściowych regulatora przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Funkcje przynależności procesu rozmywania.

Stopnie spełnienia kolejnych przesłanek reguły określają stopień zapłonu reguły dla regulatorów typu-1

$$f_i(x) = \mu_{\tilde{A}_{i1}}(x_1) * \mu_{\tilde{A}_{i2}}(x_2) * \dots * \mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_j) \quad (9)$$

i typu-2

$$\underline{f}_i(x) = \underline{\mu}_{\tilde{A}_{i1}}(x_1) * \underline{\mu}_{\tilde{A}_{i2}}(x_2) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{A}_{ij}}(x_j), \quad (10)$$

$$\overline{f}_i(x) = \overline{\mu}_{\tilde{A}_{i1}}(x_1) * \overline{\mu}_{\tilde{A}_{i2}}(x_2) * \dots * \overline{\mu}_{\tilde{A}_{ij}}(x_j) \quad (11)$$

gdzie \* oznacza t-normę w praktyce najczęściej realizowaną za pomocą funkcji *prod.*

### B. Konkluzje reguł i wyostrzenie wartości wyjściowej

W wyniku operacji (9)–(11) wykonanych na konkluzjach reguł otrzymuje się kolejno dla typu-1 i przedziałowego typu-2 rozmyte zbiory wartości wyjściowych  $y_i$ .

(por. (2)), które po przejściu przez proces wyostrzania określają wartość wyjściową regulatora.

Przyjmując stałe wartości współczynników  $a$  funkcji  $y_i$  w konkluzjach obu typów regulatorów, proces wyostrzania z wykorzystaniem metody środka sum [5] określa wyjście systemu jako:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^M f_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^M f_i}, \quad (12)$$

natomiast w przedziałowych regulatorach typu-2:

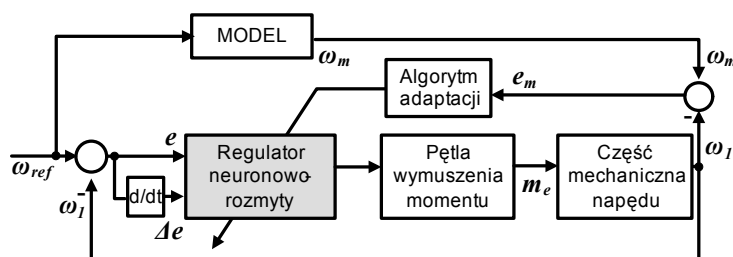
$$y_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{\sum_{i=1}^M \underline{f}_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^M \underline{f}_i} + \frac{\sum_{i=1}^M \overline{f}_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^M \overline{f}_i} \right). \quad (13)$$

### C. Adaptacja parametrów regulatora

Algorytm adaptacji realizuje zadanie zmiany parametrów regulatora zgodnie z algorytmem adaptacji:

$$J = \frac{1}{2} (\omega_1 - \omega_m)^2 = \frac{1}{2} e_m^2 \quad (14)$$

gdzie  $e_m$  jest wartością błędu śledzenia zadanego modelu obiektu. Schemat struktury sterowania przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Adaptacyjna struktura sterowania

Za model obiektu obrano układ inercyjny drugiego rzędu o transmitancji:

$$G_m(s) = \frac{\omega_r^2}{s^2 + 2\xi_r\omega_r s + \omega_r^2} \quad (15)$$

gdzie  $\omega_r$  oznacza pulsację rezonansową obiektu a  $\xi_r$  współczynnik tłumienia.

Zmiana wag następuje zgodnie z zależnością:

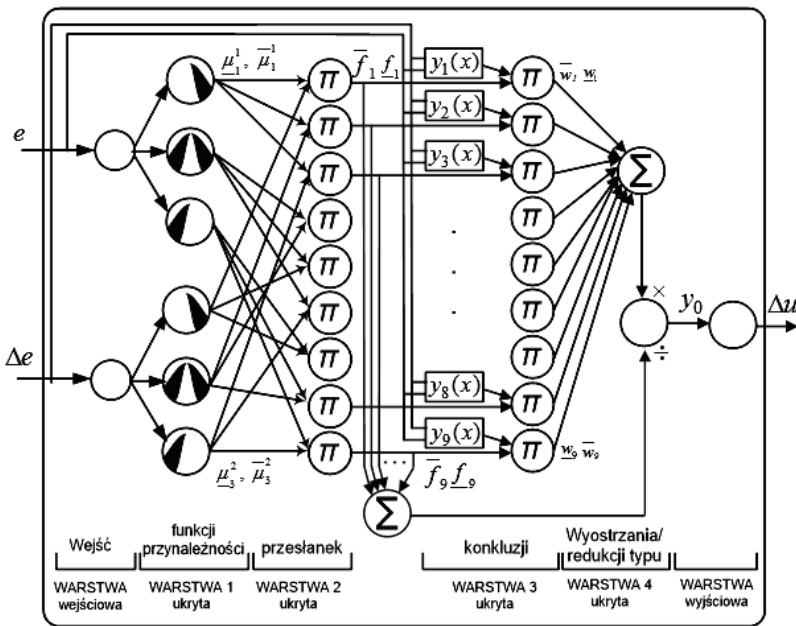
$$w_i(k+1) \cong w_i(k) + f_i(k_p e_m + k_d \Delta e_m) \quad (16)$$

gdzie  $k_p$  i  $k_d$  są współczynnikami adaptacji (por. 7).

*D. Regulatory neuronowo-rozmyte.*

Sieć neuronowo-rozmyta podzielona jest na warstwy realizujące kolejno zadania systemu rozmytego. Na rysunku nr 5 przedstawiono wybrany regulator neuronowo-rozmyty TSK o dwóch wejściach (błąd  $e$  i jego pochodna  $\Delta e$ ) oraz jednym wyjściu (zmiana momentu elektromagnetycznego  $\Delta m_e$ ). Liczba neuronów systemu sieci uzależniona jest od liczby wejść, liczby reguł oraz liczby wyjść. Dla wybranego regulatora reguły przyjmują postać:

$$R_i = \text{Jeżeli } x_1 \text{ jest } \tilde{A}_{i1} \text{ i } x_2 \text{ jest } \tilde{A}_{i2} \text{ to } y_i = w_i \left( a_{i0} + \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \right). \quad (17)$$



Rys. 5. Neuronowo-rozmyty regulator TSK

## 4. BADANIA SYMULACYJNE

Struktura sterowania w postaci kaskadowej (rys. 4) zawiera kolejno neuronowo-rozmyty regulator prędkości, zoptymalizowaną kryterium modułu pętli wymuszenia momentu elektromagnetycznego, model odniesienia (15), mechanizm adaptacji (16) oraz model układu napędowego z połączeniem sprzężystym (1). Parametry konkluzji regulatora prędkości dobierane są w czasie pracy układu tak, aby minimalizować uchyb pomiędzy wyjściem modelu wzorcowego a obiektem rzeczywistym zgodnie z (14). Parametry  $k_p$  i  $k_d$  algorytmu adaptacji dobrano z wykorzystaniem algorytmów genetycznych minimalizując wskaźnik:

$$I_{ITSE} = \int_0^{\infty} t(e_{12}^2(t) + e_m^2(t))dt \quad (18)$$

gdzie  $e_{12}$  i  $e_m$  oznaczają kolejno błędy śledzenia prędkości silnika przez maszynę roboczą i modelu przez silnik.

Za pomocą algorytmów genetycznych dobrano również wektor parametrów  $a$  funkcji  $y_i$  minimalizując współczynnik jakości regulacji:

$$I_{ITSE} = \int_0^{\infty} t \cdot e_{12}^2(t)dt. \quad (19)$$

Minimalizacja błędu śledzenia prędkości silnika przez maszynę roboczą zapewnia minimalizację drgań skrętnych połączenia podatnego.

W trakcie pracy układ obciążano znamionowym momentem obciążenia  $m_L$ . Zmianę parametrów obiektu symulowano zmianą momentu bezwładności – stałej czasowej  $T_2$  maszyny roboczej w zakresie  $0,5 \div 2$  wartości znamionowej  $T_{2N}$ . W części mechanicznej silników uwzględniono wypadkową nieliniową charakterystykę momentów tarcia.

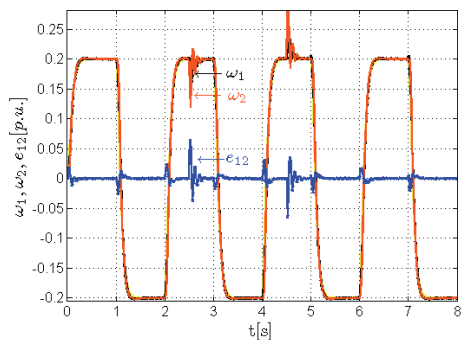
Układ przebadano przy braku zakłóceń pomiarowych prędkości oraz przy zakłóceniach na poziomie 0.5% i 2%. W tabeli 1 przedstawiono wartości wskaźnika jakości regulacji (19) dla przebadanych regulatorów.

Tabela 1. Porównanie układów bez i z zakłóceniami prędkości silnika

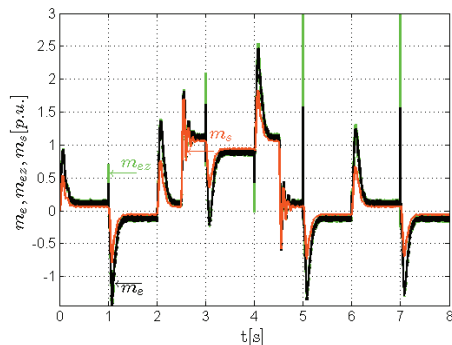
	Typ regulatora	$ITSE E_{12}$		
		$T_2 = 0.5 T_{2N}$	$T_2 = T_{2N}$	$T_2 = 2T_{2N}$
brak zakłóceń	IT2 TSK	2,50 E-3	1,63 E-3	3,81 E-3
	T1 TSK	2,42 E-3	1,56 E-3	2,75 E-3
zakł. 0.5%	IT2 TSK	2,57 E-3	1,70 E-3	3,08 E-3
	T1 TSK	2,53 E-3	1,72 E-3	3,07 E-3
zakł. 2%	IT2 TSK	3,50 E-3	2,62 E-3	3,83 E-3
	T1 TSK	4,48 E-3	3,96 E-3	5,39 E-3



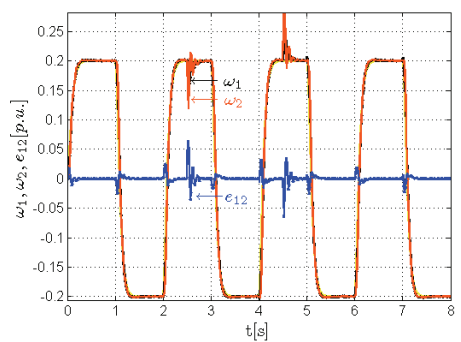
a)



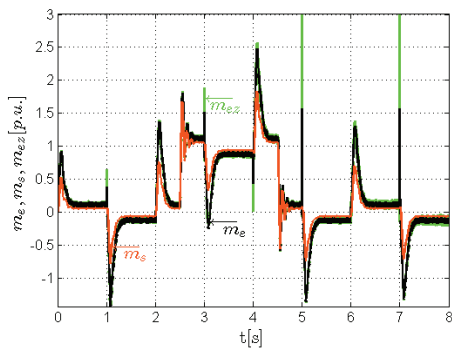
b)



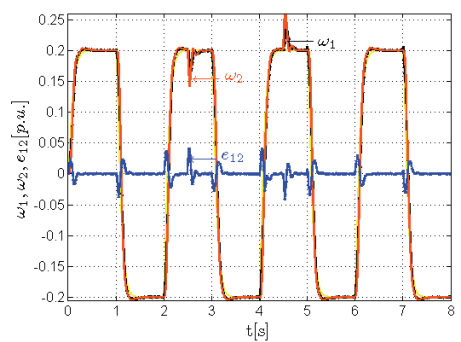
c)



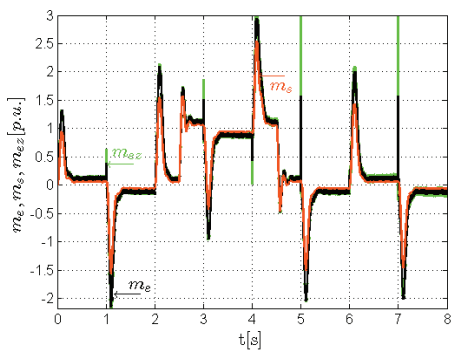
d)



e)



f)



Rys. 6. Przebiegi prędkości silnika i maszyny roboczej (a, c, e) oraz momentów elektromagnetycznego i skrętnego (b, d, f) dla układu z 0.5% zakłóceniami prędkości  $\omega_1$ : regulator T1 TSK T2 = 0,5 TN (a, b), regulator IT2 TSK T2 = 0,5 TN (c, d), regulator IT2 TSK T2 = 2TN (e, f)

Dla układu bez zakłóceń prędkości regulatory z funkcjami typu-1 posiadają lepsze właściwości regulacyjne od regulatorów przedziałowych. Wynika to z faktu, iż wybrana szerokość nośnika wejściowych funkcji przynależności dla regulatora typu-1 lepiej aproksymuje optymalną charakterystykę regulatora niż uśrednienie wynikające z zastosowania przedziałów niepewności. Dokładne dobranie funkcji przynależności regulatorów typu-1 wymaga jednak większej znajomości charakterystyki pracy regulatora i obiektu, i w wielu praktycznych zastosowaniach jest zadaniem stosunkowo trudnym. Regulatory przedziałowe typu-2 umożliwiają określenie przedziału, w którym postać funkcji może się zmieniać (np. ze względu na błędy pomiarowe, bądź gdy parametry funkcji nie są dokładnie znane, czy możliwe do wyznaczenia). Właściwość tę potwierdza wzrost jakości pracy regulatorów przedziałowych w odniesieniu do regulatorów typu-1 przy wzroście występujących niepewności w układzie (tab. 1). Zależność ta zachodzi zarówno dla niepewności pochodzących z błędów pomiarowych jak i zakłóceń parametrycznych.

Oba typy regulatorów w zakresie zmian stałej czasowej  $T_2$  maszyny roboczej zachowały odporność, a zatem wprowadzenie rozmycia na parametry wejściowych funkcji przynależności nie wpływa znacząco na jakość pracy algorytmu adaptacji.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi prędkości i momentów napędu dwumasowego. Prędkość silnika z dużą dokładnością śledzi przebieg modelu a maszyna robocza z dużą dokładnością nadąża za prędkością silnika. Wprowadzenie obciążenia zakłóca nieznacznie proces regulacji jednak algorytm adaptacyjny szybko kompensuje powstałe oscylacje zarówno prędkości jak i momentu skrętnego dla wszystkich badanych regulatorów.

## 5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie regulatorów neuronowo-rozmytych TSK w układach dwumasowych do regulacji prędkości umożliwia nie tylko minimalizację drgań skrętnych ale również uniewrażliwia układ na zmianę parametrów obiektu i występowanie niepewności pomiarowych i probabilistycznych. Regulatory przedziałowe posiadają lepsze właściwości tłumienia drgań skrętnych – oscylacji momentu skrętnego dla  $T_2 < T_{2N}$ , oraz amplitudy drgań dla  $T_2 > T_{2N}$ , szczególnie dla obiektów o nieznanach zakłóceniach.

W dalszych pracach planuje się przeprowadzić badania nad zastosowaniem regulatorów TSK z niepewnościami w konkluzjach reguł, oraz przeprowadzenie analizy minimalizacji liczby współczynników a funkcji  $y_i$ .

## LITERATURA

- [1] KARNIK N.N., MENDEL J.M., *Type-2 Fuzzy Logic Systems*, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 7, nr 6, 1999, 648–658.
- [2] KNYCHAS S., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu-2 do sterowania prędkością układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, Nr 4, 2011.

- [3] KNYCHAS.S., *Adaptacyjne sterowanie układu dwumasowego z połączeniem sprężystym z wykorzystaniem regulatorów neuronowo-rozmytych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 65, 2011.
- [4] LIANG Q., MENDEL J.M., *Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design*, IEEE Transactions Fuzzy Systems, Vol. 8, 2000, 535–550.
- [5] MENDEL J.M., JOHN R.I., LIU F., *Interval type-2 fuzzy logic systems made simple*, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 14, 2006, 808–821
- [6] ORLOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Damping of Torsional Vibrations in Two-Mass System Using Adaptive Sliding Neuro-Fuzzy Approach*, IEEE Trans. Ind. Informatics, Vol. 4, No. 1, 2008, 47–57
- [7] ORLOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Control of the Drive System With Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach*, IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. 54, No. 1, 2007, 228–240.
- [8] SERKIES P., SZABAT K., *Predykcyjny regulator prędkości napędu dwumasowego z rozmytą adaptacją ograniczeń*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, No. 4, 2012, 209–2012.
- [9] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [10] TRAN VAN T., KAMIŃSKI M., SZABAT K., *Estymacja mechanicznych zmiennych stanu układu napędowego za pomocą systemów neuronowo-rozmytych*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, No. 6, 2012, 166–169.
- [11] WU H., MENDEL J.M., *Uncertainty bounds and their use in the design of interval type-2 fuzzy logic systems*, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 10, 2002, 622–639.
- [12] ZADEH L.A., *Fuzzy sets*, Information and Control, Vol. 8, 1965, 338–353.
- [13] ZADEH L.A. *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning–1*, Information Sciences, Vol. 8, 1975, 199–249.

DAMPING OF THE TORSIONAL VIBRATIONS  
OF THE TWO-MASS DRIVE SYSTEM WORKING IN ADAPTIVE CONTROL STRUCTURE  
WITH TSK NEURO-FUZZY CONTROLLER.

In this paper speed adaptive control structure of two-mass system is introduced. A neuro-fuzzy TSK controller is presented. Main goal of fuzzy controller is to reduce all kind of uncertainties and to minimize vibrations of flexible connection of two-mass system. Two kind of fuzzy systems are tested: Type-1 and Interval Type-2.