

*układ dwumasowy, sterowanie adaptacyjne,
regulatory neuronowo-rozmyte*

Sebastian KNYCHAS*

ADAPTACYJNE STEROWANIE UKŁADU DWUMASOWEGO Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM Z WYKORZYSTANIEM REGULATORÓW NEURONOWO-ROZMYTYCH

W pracy przedstawiono badania związane z zastosowaniem adaptacyjnej struktury sterowania typu MRAS z neuronowo-rozmytym regulatorem prędkości do układu dwumasowego z połączeniem sprężystym o zmiennym momencie bezwładności. Badania obejmują parametryzację regulatorów prędkości w przypadku obiektu o zmiennych parametrach. Po krótkim wprowadzeniu omówiono model matematyczny układu dwumasowego i przedstawiono systemy neuronowo-rozmyte pracujące w strukturze sterowania. Następnie podano przykładowe wyniki badań symulacyjnych obrazujących pracę układu przy zmiennym momencie bezwładności. Otrzymane wyniki potwierdzają odporność analizowanej struktury na zmianę parametrów układu napędowego.

1. WPROWADZENIE

W układach napędowych z połączeniem sprężystym eliminacja drań mechanicznych jest jednym z podstawowych zadań struktury sterowania [1]–[8]. Pierwotną przyczyną pojawiania się oscylacji mechanicznych zmiennych stanu układu napędowego jest skończona sztywność wału mechanicznego. Drgania skrętne ujawniają się z powodu: zmienności momentu bezwładności maszyny roboczej, zmian momentu obciążenia, zmian prędkości zadanej oraz pulsacji i ograniczeń momentu elektromagnetycznego. Powstające oscylacje wpływają negatywnie na trwałość wału mechanicznego, obniżają jakość wytwarzanych produktów, a w szczególnych przypadkach mogą nawet doprowadzić do utraty stabilności układu regulacji [5]–[14]. Sterownie układem napędowym z połączeniem sprężystym komplikuje się w przypadku zmiany parametrów obiektu w czasie pracy. W takim przypadku należy zastosować jedną z zaawansowanych struktur sterowania. Może to być struktura

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów I Pomiarów Elektrycznych, 50-327 Wroclaw, ul. Smoluchowskiego 19, e-mail: sebastian.knychas@pwr.wroc.pl.

sterowania bazująca na prawach sterowania odpornego, nieliniowego czy też adaptacyjnego [13]–[18].

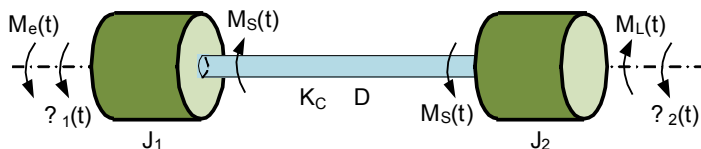
W ostatnich latach można zauważyć wzrost zainteresowania zastosowaniem różnego typu regulatorów rozmytych w napędzie elektrycznym [17]–[21]. W większości przypadków prace te dotyczą układu napędowego z połączeniem sztywnym, nieliczne odnoszą się do układu dwumasowego [17]. Zastosowanie zbiorów rozmytych w układach regulacji umożliwia wzrost odporności układu na zakłócenia pomiarowe i parametryczne [20]–[21]. W przypadku obiektu o stałych parametrach dobór struktury regulatora jest dość prosty. Problematyczny jest jednak układ, w którym utrudniona jest interpretacja zasad (reguł) regulacji ze względu na ich zależność od zmiennych parametrów obiektu. Minimalizację wpływu błędnego doboru reguł sterowania, bądź ich zmienności w trakcie pracy układu, umożliwia zamiana tradycyjnych zbiorów rozmytych (typu-1) na tzw. przedziałowe zbiory (typu-2) [20]–[21].

W pracy przedstawiono wstępne badania nad wykorzystaniem tradycyjnych i przedziałowych zbiorów rozmytych w układach regulacji prędkości układu dwumasowego. Ze względu na porównawczy charakter pracy, badania przeprowadzono dla szerokiego zakresu zmian parametrów regulatorów. Oprócz typu zbiorów rozmytych (typu-1 i przedziałowych typu-2) zmieniano również ich kształt (krzywa Gaussa i postać trójkątna), szerokość nośnika funkcji przynależności, oraz przedział niepewności dla przedziałowych zbiorów typu-2.

Praca została podzielona na pięć sekcji. Po krótkim wprowadzeniu w tematykę artykułu przedstawiono model matematyczny obiektu badań. Następnie omówiono podstawowe zależności z zakresu regulatorów neuronowo-rozmytych. Dalej przedstawiono badania symulacyjne analizowanej struktury sterowania. Artykuł zakończono krótkim podsumowaniem.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU

W literaturze istnieje szereg modeli które można stosować do odwzorowywania zjawisk występujących w układzie rzeczywistym. Wybór jednego z nich jest kompromisem pomiędzy komplikacją modelu a jego złożonością obliczeniową. W przypadku konieczności dokładnego odwzorowywania zjawisk fizycznych w każdym elemencie napędu stosuje się modele skomplikowane np. połowe. Jeśli opracowany model ma być wykorzystywany w strukturze sterowania musi być relatywnie prosty (szybki). Model z bezinercyjnym połączeniem sprzężystym stosuje się w przypadku napędów gdzie bezwładność wału mechanicznego jest wielokrotnie mniejsza od bezwładności silnika napędowego i maszyny roboczej [1]. Schemat ideowy układu z bezinercyjnym połączeniem sprzężystym przedstawiono na rysunku nr 1.



Rys. 1. Schemat części mechanicznej układu napędowego z bezinercyjnym elementem sprężystym
Fig. 1. Mechanical part of electrical drive system with elastic joint

Równanie stanu rozpatrywanego modelu przyjmuje następującą postać (przy pominięciu współczynnika tłumienia wewnętrznego d):

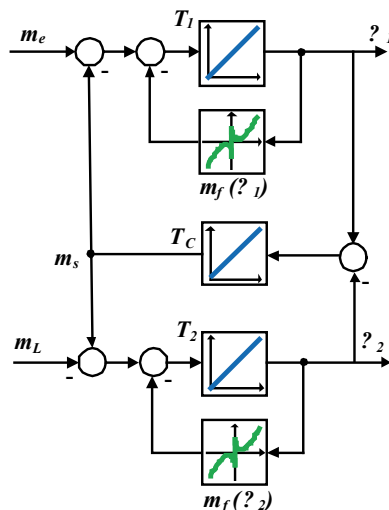
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & \frac{-1}{T_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_e \\ m_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

T_1 , T_2 i T_c są kolejno stałymi czasowymi maszyny napędzającej, maszyny roboczej oraz elementu sprężystego,

ω_1 , ω_2 – prędkościami silnika i maszyny roboczej,

m_e , m_L , m_s – momentami: elektromagnetycznym, obciążenia i skrętnym.



Rys. 2. Schemat blokowy części mechanicznej układu dwumasowego

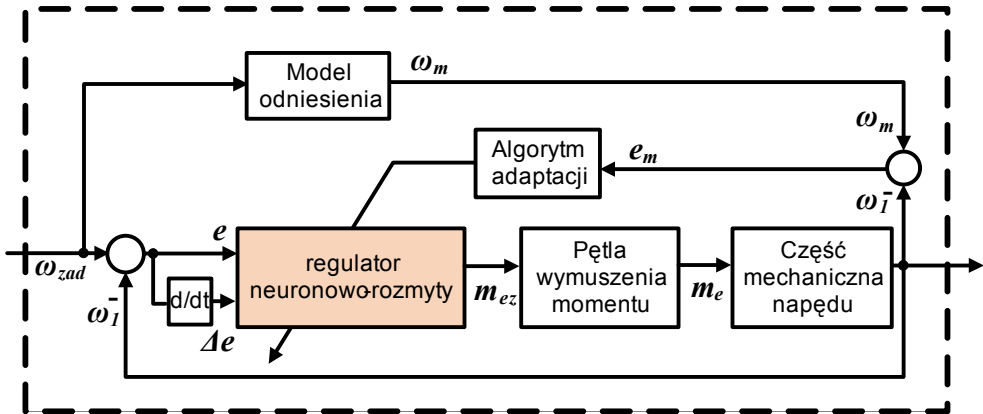
Fig. 2. The block diagram of the mechanical part of system

Praca układu dwumasowego przy niskich prędkościach wymaga uwzględnienia nieliniowości związanych z tarcie mechanicznym występujących w obu maszynach.

W niniejszej pracy przyjęto model tarcia uwzględniający: składową tarcia statycznego, tarcie Coulomba, tarcie wiskotyczne oraz tarcie wentylatorowe. Schemat blokowy części mechanicznej układu dwumasowego przedstawiono na rys. 2.

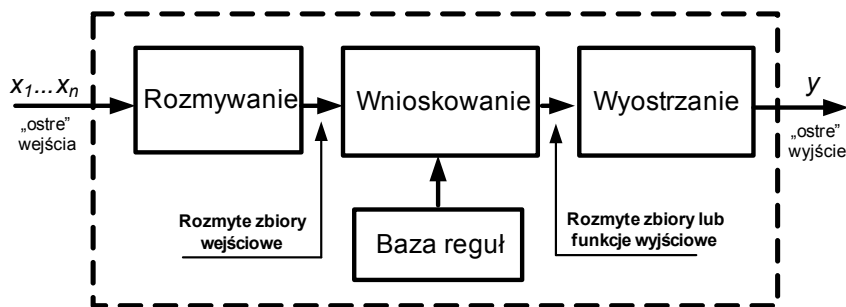
3. REGULATORY NEURONOWO-ROZMYTE

Adaptacyjna struktura regulacji z modelem odniesienia (MRAS) jest dość często spotykaną strukturą w przypadku zmienności parametrów obiektu. Może ona być stosowana w układzie regulacji położenia bądź prędkości. Jej popularność wynika z faktu odporności układu regulacji na zakłócenia parametryczne oraz łatwości implementacji praktycznej. Struktura sterowania składa się z klasycznego układu regulacji obejmującego przestrajalny regulator rozmyty, z pętli wymuszania momentu elektromagnetycznego, oraz części mechanicznej obiektu. Dodatkowo zawiera ona model referencyjny określający żądaną dynamikę obiektu oraz algorytmu adaptacji, który z kolei na podstawie błędu między modelem a obiektem zmienia parametry neuronowo-rozmytego regulatora prędkości.



Rys. 3. Struktura sterowania MRAS z neuronowo-rozmytym regulatorem
Fig. 3. MRAS with neuro-fuzzy controller

Adaptacja polega na zmianie wag wyjściowych w_i regulatora celem minimalizacji błędu pomiędzy obiektem a modelem referencyjnym. Wejściem regulatora jest wektor składający się z dwóch zmiennych: błędu regulacji e oraz jego pochodnej Δe . Wyjściem regulatora jest sygnał sterujący (sygnał zadanego momentu elektromagnetycznego). Z tego powodu użyty regulator może być określony jako ślizgowy regulator rozmyty [1]. Regulator rozmyty składa się z czterech podstawowych bloków funkcyjnych: rozmywania, wnioskowania, bazy reguł oraz wyostrzania (rys. 4).



Rys. 4. Schemat blokowy systemu rozmytego

Fig. 4. Scheme of fuzzy system

Podstawowym elementem regulatora jest baza reguł zawierająca wiedzę zawartą w szeregu reguł lingwistycznych. Proces przetwarzania informacji zaczyna się w bloku rozmywania gdzie określone są stopnie przynależności sygnałów wejściowych do poszczególnych reguł. Kolejno wyznacza się stopnie spełnienia przesłanek w kolejnych regułach. Następnie na podstawie określonego typu wnioskowania wyznaczane są rozmyte wartości wyjść regulatora, które w procesie wyostrzania otrzymują postać nierozmytą. Ze względu na typ stosowanych w bloku rozmywania funkcji przynależności można rozróżnić regulatory neuronowo-rozmyte typu-1 i przedziałowe typu-2. Zbiory typu-1 mają ściśle określone parametry (co może być ich wadą). Zaletą przedziałowych zbiorów typu-2 jest uwzględnienie niepewności informacji. Ze względu na postać konkluzji reguł rozróżnia się dwa najpowszechniej stosowane i badane rodzaje regulatorów: Mamdaniego oraz TSK (Takagi–Sugeno–Kanga).

W przypadku systemu Mamdaniego w konkluzjach znajdują się pojedyncze zbiory rozmyte. Dla układu TSK konkluzje mają postać złożoną i składają się funkcji (liniowej bądź nieliniowej) bezpośrednio zależnej od wektora wejściowego. W regulatorze typu Mamdaniego reguły przyjmują postać:

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

gdzie:

i jest liczbą reguł,

\tilde{A} bazą wejściowych zbiorów rozmytych (określonego typu i o założonych funkcjach przynależności),

y wyjściowym zbiorem rozmytym postaci singletonu o zmiennej wartości wyznaczonego przez algorytm adaptacji.

Dla systemu typu TSK reguły przyjmują postać:

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

gdzie g_i jest funkcją zmiennych wejściowych x_i :

$$g_i = a_{i0} + a_{i1} \cdot x_1 + a_{i2} \cdot x_2 \quad (4)$$

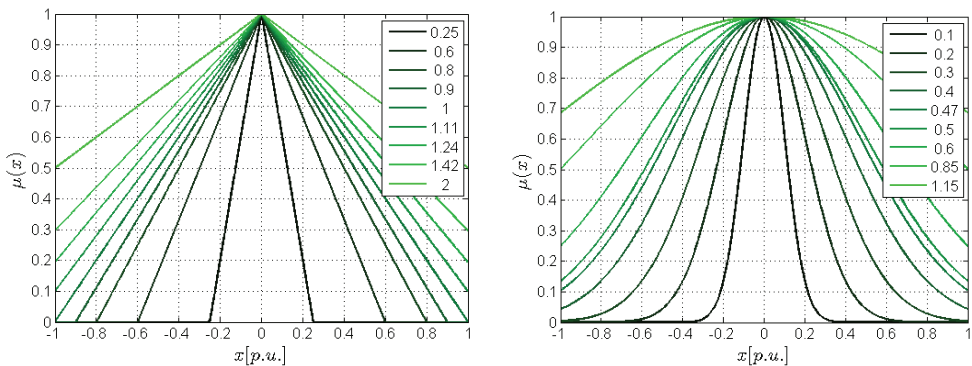
a współczynniki a parametrami regulatora TSK.

Proces wyostżniania zmiennej wyjściowej opiera się na metodzie wysokości. Dla regulatora opartego na zbiorach przedziałowych typu-2 wyostżnianie musi zostać uzupełnione przez blok redukcji typu. Ze względu na charakter przedziałowych zbiorów rozmytych typu-2 najczęściej stosowaną w literaturze metodą jest średnia arytmetyczna:

$$y = \frac{y_i + \bar{y}_i}{2} \quad (5)$$

4. BADANIA SYMULACYJNE

Badania symulacyjne wykonano dla 180 regulatorów neuronowo-rozmytych, zmieniając typ regulatora (typu-1 i typu-2), kształt funkcji przynależności (trójkątna i o krzywej Gaussa), rodzaj wnioskowania (Mamdaniego i TSK), wartość nośnika funkcji przynależności oraz dla regulatorów typu-2 przedział niepewności, dla trzech wartości stałej czasowej maszyny roboczej (zmiana T_2). Zakres zmian wejściowych funkcji przynależności przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zmiana parametrów wejściowych funkcji przynależności regulatora
Fig. 5. Range of Membership functions parametres changes

Regulatory pracowały w układzie przy zmiennym momencie bezwładności oraz przy zmiennym obciążeniu. Układ zaczyna pracę bez przyłożonego momentu obciążenia. Po czasie 2.5 s jest on załączany na czas wynoszący jedną sekundę. Taki sam cykl powtarza się po czasie 6.5 s. Parametry regulatorów TSK zakładają takie same wartości dla wszystkich czynników funkcji g . Założenie to z jednej strony utrudnia

uzasadnienie lepszych właściwości tych regulatorów, jednak upraszcza procedurę ich projektowania. Znamionowe stałe czasowe obu maszyn wynoszą $T_1, T_2 = 203$ ms a stała elementu sprężystego $T_c = 1,2$ ms. Zmiana T_2 obejmuje trzy wartości $T_2 = 101$ ms ($R = 0,5$), $T_2 = 203$ ms ($R = 1$) oraz $T_2 = 406$ ($R = 2$). Pulsację rezonansową modelu przyjęto jako $\omega_r = 20$ s⁻¹. Układ napędowy pracuje w trybie pracy nawrotnej przy prędkości zadanej $\omega_{ref} = 0.2$ p.u. Celem ukazania właściwości struktury adaptacyjnej założono brak znajomości wartości początkowych wag regulatorów (wagi równe zero). Badania wykonano przy założonym kroku próbkowania 0,5 ms.

Za kryterium jakości testowanych regulatorów przyjęto wskaźnik całkowity ISTE (*Integral of Time Squared Error*) dla błędu śledzenia modelu przez maszynę napędzającą. Dodatkowo obserwowano błąd śledzenia maszyny napędzającej przez maszynę roboczą, ilość oscylacji momentu elektromagnetycznego, momentu skrętnego i prędkości obciążenia (ω_2).

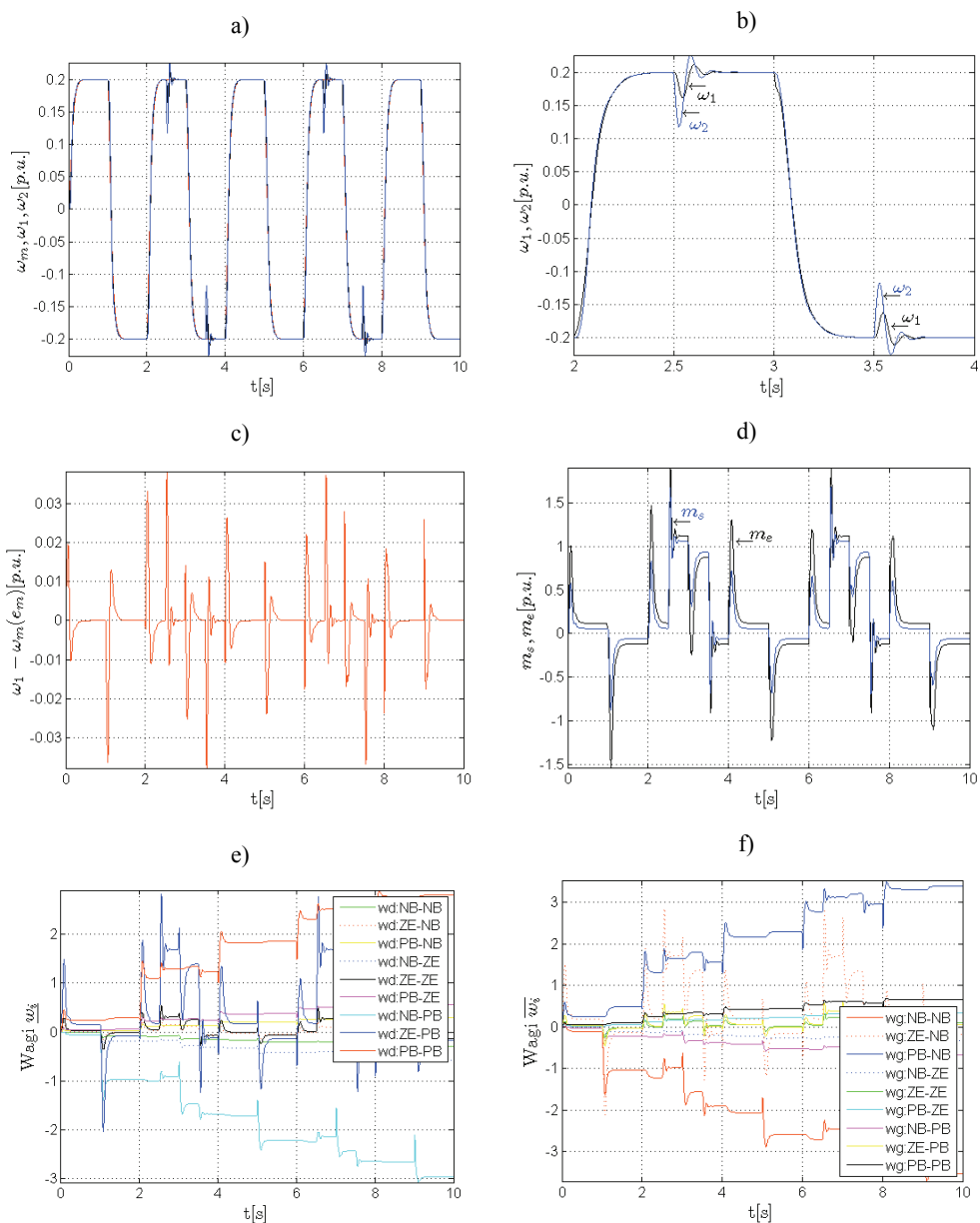
Wskaźnik ITSE jest opisany następującym wyrażeniem:

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

Liczbę oscylacji należy rozumieć jako liczbę zmian znaku w przebiegu wartości mierzonej. Układ przebadano przy symulowanych zakłóceniach prędkości na poziomie 2% i dla układu bez zakłóceń. Ze względu na czytelność przebiegów przedstawiono wyniki badań dla układów bez zakłóceń przy różnych stałych T_2 oraz, dla porównania, przykład ze znamionową wartością T_2 przy zakłóceniach.

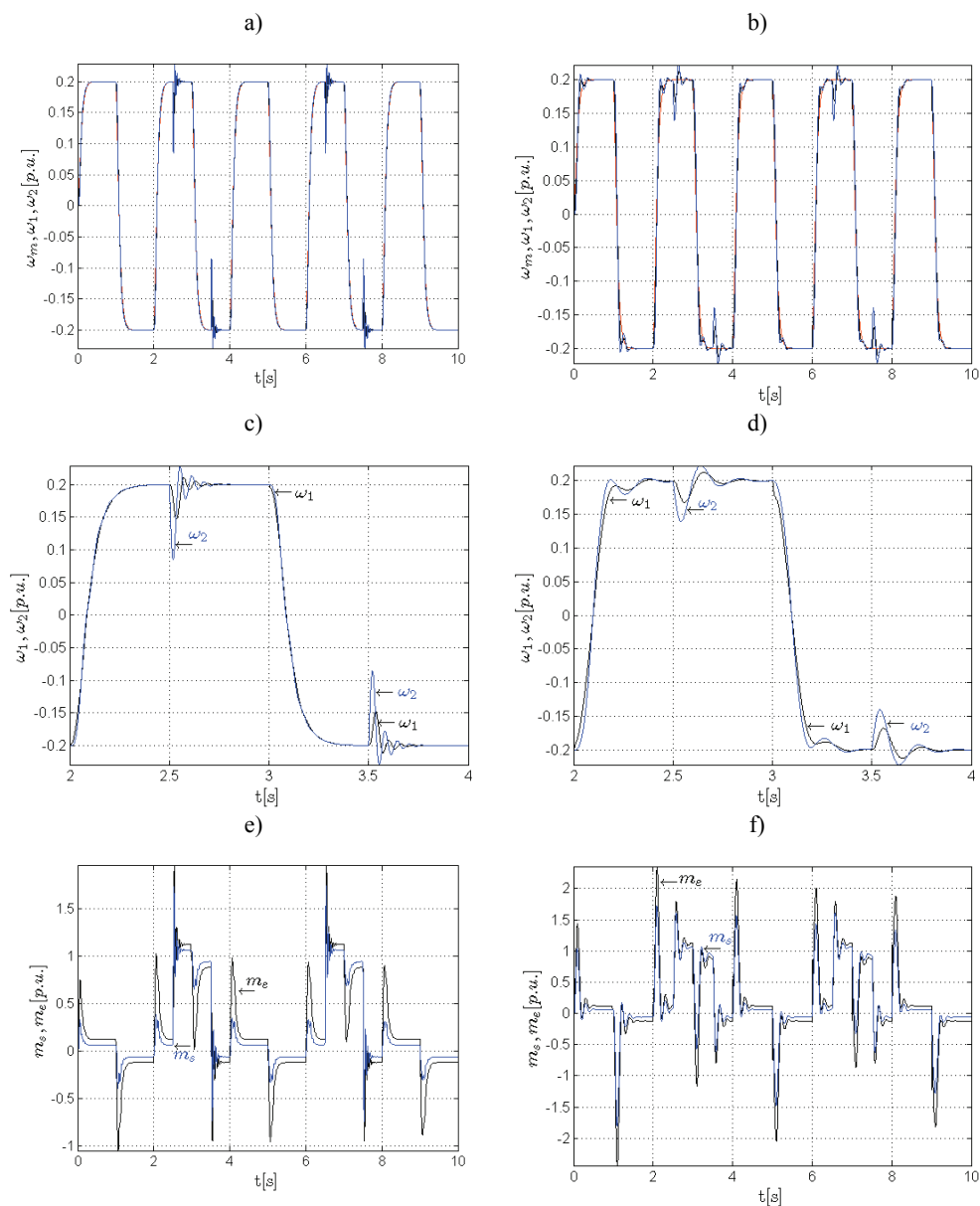
Regulatory z wnioskowaniem TSK ze względu na parametryzację posiadają lepsze właściwości dynamiczne. Badania wykazały jednak, iż projektowanie tych regulatorów wymaga doboru parametrów funkcji g z wykorzystaniem zaawansowanych algorytmów (np. genetycznych). Regulatory z wnioskowaniem Mamdaniego posiadają dość dobre właściwości dynamiczne i odpornościowe do większości praktycznych zastosowań. Jakość regulacji dla układów typu-1 wzrasta wraz ze wzrostem nośnika funkcji przynależności. Dla regulatorów przedziałowych typu-2 zależność ta odnosi się do dolnej funkcji przynależności. Dla tych regulatorów jakość regulacji wzrasta dodatkowo wraz ze wzrostem przedziału niepewności. Zależność ta ma jednak ograniczenie dla wyższych wartości górnych funkcji przynależności. Nie zauważono znaczącej różnicy między regulatorami z wejściowymi funkcjami przynależności o różnym kształcie.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi zmiennych stanu układu napędowego; kolejno prędkości (modelu, silnika napędowego i obciążenia), błędu śledzenia prędkości silnika przez maszynę roboczą, momentów: skrętnego, elektromagnetycznego oraz obciążenia, a także wartości przykładowych wag dla regulatora z pierwszej trzdziesiątki najlepszych z badanych regulatorów (dla układu ze znamionową stałą T_2). Ponad 90 procent regulatorów zachowała wysoką jakość śledzenia prędkości modelu przez silnik. Obciążenie silnika zauważalne jest na przebiegach w postaci spadku obu prędkości. Są one jednak szybko doprowadzane do wartości zadanej.



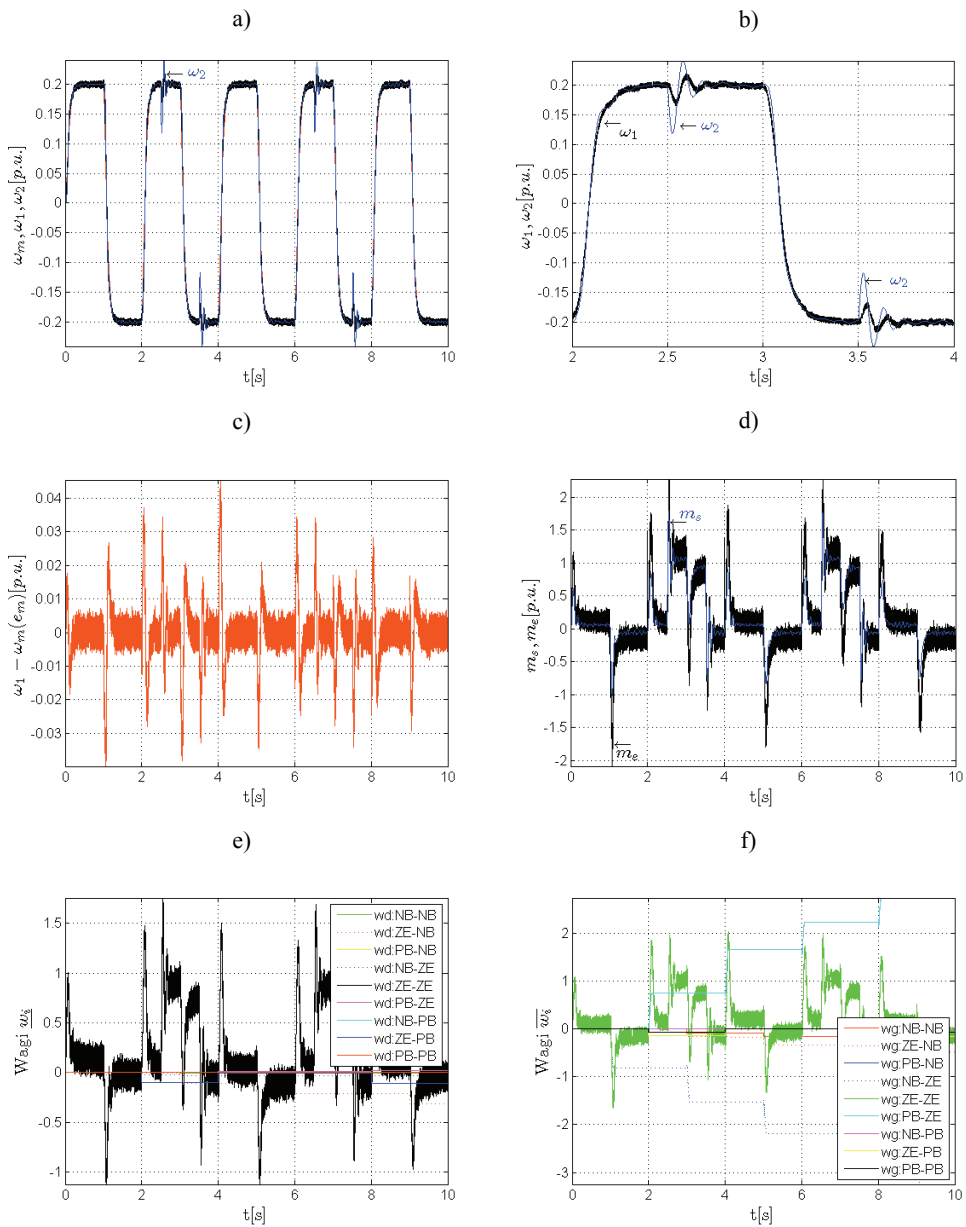
Rys. 6. Przebiegi zmiennych układu: prędkości silników (a, b), błędów regulacji (b), momentów elektromagnetycznego i skrętnego (d), wybranych wag w_i regulatora (e, f) dla regulatora przedziałowego z wnioskowaniem Mamdaniego i funkcją trójkątną dla zakresu 1.11–1,24 przy znamionowej stałej stałej czasowej $T_2 = 203$ ms

Fig. 6. Transients of the drive system: speeds of the motors (a, b), tracking error (b), torques (c), weights (e, f), for Mamdani controller with triangle membership time constant $T_2 = 203$ ms (d)



Rys. 7. Przebiegi zmiennych układu: prędkości silników (a, b, c, d) oraz momentów elektromagnetycznego i skrętnego (d,e) dla regulatora przedziałowego z wnioskowaniem TSK i funkcją trójkątną dla zakresu 0.6–0.8 przy stałej czasowej $T_2 = 102$ ms (a, c, e) oraz $T_2 = 406$ ms (b, d, f)

Fig. 7. Transients of the drive system: speeds of the motors (a, b, c, d) and torques (e, f), for TSK controller with triangle membership and time constant $T_2 = 102$ ms (a, c, e) oraz $T_2 = 406$ ms (b, d, f)



Rys. 8. Przebiegi zmiennych układu: prędkości silników (a, b), błędów regulacji (b), momentów elektromagnetycznego i skrętnego (d), wybranych wag w_i regulatora (e, f) dla regulatora przedziałowego z wnioskowaniem TSK i funkcją trójkątną dla zakresu 0.6–0.8 przy stałej czasowej $T_2 = 203$ ms
 Fig. 8. Transients of the drive system: speeds of the motors (a, b), tracking error (b), torques (c), weights (e, f), for TSK controller with triangle membership time constant $T_2 = 203$ ms (d)

Wszystkie regulatory oparte na zbiorach typu-2 pracowały poprawnie. Mimo, iż układy te nie zawsze są w stanie zapewnić najlepszej wartości wskaźnika jakości regulacji przy parametrach znamionowych, zapewniają jednak stabilność przebiegów. Przy szerokiej zakresie zmian parametrów zarówno regulatora jak i obiektu. Tym samym potwierdzono założenie odporności zbiorów typu-2 na zakłócenia. Wadą jednak stosowania regulatorów opartych na zbiorach przedziałowych jest większe skomplikowanie obliczeniowe układu. W porównaniu z układami ze zbiorami typu-1 czas obliczeń jest dłuższy o około 30%.

Sprężystość połączenia mechanicznego nie wpływa na zwiększenie oscylacji momentów elektromagnetycznego oraz skrętnego co świadczy o bardzo dobrych właściwościach tłumienia drgań skrętnych. Oscylacje pojawiają się w przypadku niepoprawnego doboru parametrów regulatora. Przebieg wag regulatora wskazuje na poziom aktywacji sektorów regulatora rozmytego w analizowanym trybie pracy.

Przebiegi zmiennych stanu układu przy zmianie stałej czasowej T_2 przedstawiono na rys. 6 i rys. 7. Jak wynika z ich analizy wprowadzone zakłócenie nie wpływało znacząco na zachowanie układu. Dla $T_2 = 203$ ms układ przy małych wartościach nośnika funkcji przynależności szybciej tracił stabilność. Dodatkowo zwiększyły się oscylacje zarówno w przebiegach prędkości jak i momentów. Jednakże czas tłumienia tych oscylacji nie wzrósł. Wzrost stałej czasowej maszyny roboczej spowodował pogorszenie śledzenia zarówno prędkości modelu przez silnik, jak również silnika przez maszynę roboczą.

Dodanie do układu zakłóceń prędkości (rys. 8) zwiększyło zakłócenia w przebiegu momentu elektromagnetycznego. Jednakże skuteczność tłumienia drgań w przebiegach prędkości nie zmieniła się. Zależności sformułowane dla układu bez zakłóceń prędkości potwierdziły się w tym przypadku.

Wyniki badań ukazują również konieczność wyboru właściwego, bądź właściwych wskaźników jakości celem wykonania poprawnej analizy porównawczej jakości pracy neuronowo-rozmytych regulatorów. Sam wskaźnik ITSE błędu śledzenia prędkości zadanej przez silnik nie uwzględnia oscylacji momentów elektromagnetycznego i skrętnego, których liczba w niektórych przypadkach nie jest uzależniona od wartości tegoż błędu.

5. PODSUMOWANIE

Praca przedstawia zagadnienia związane z porównaniem regulatorów neuronowo-rozmytych pracujących w adaptacyjnej strukturze sterowania układem napędowym z połączeniem sprężystym. Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski. Rozważana adaptacyjna struktura sterowania zapewnia efektywne tłumienie drgań skrętnych. Badana struktura jest odporna na zmianę parametrów obiektu. Wyniki prac potwierdzają zachowanie odporności układu z przedziałowymi

regulatorami neuronowo-rozmytymi w szerszym zakresie zmian parametrów tych regulatorów niż dla regulatorów opartych na zbiorach typu-1. Dalsze prace obejmować będą testy eksperymentalne potwierdzające wyniki przeprowadzonych badań. Wniosku szczegółowe zawarto w opisie sekcji czwartej.

BIBLIOGRAFIA

- [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] VALENZUELA M.A., BENTLEY J.M., LORENZ, R.D., *Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections*, IEEE Trans. Ind. Appl., March–April 2005, Vol. 41, No. 2, pp. 493–501.
- [3] DHAOUADI R., KUBO K., TOBISE M., *Two-degree-of-freedom robust speed controller for high-performance rolling mill drivers*, IEEE Trans. Ind. Appl., Sep.–Oct. 1993, Vol. 29, No. 5, pp. 919–925.
- [4] SZABAT K, ORLOWSKA-KOWALSKA T., *Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, pp. 1193–1206.
- [5] KAMIŃSKI M., *Implementacja neuronowego estymatora prędkości napędu dwumasowego w układzie FPGA*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 2, pp. 225–230.
- [6] MUSZYŃSKI R., DESKUR J., *Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 2, pp. 544–552.
- [7] HACE A., JEZERNIK K., SABANOVIC A., *SMC with disturbance observer for a linear belt drive*, IEEE Trans. Ind. Electron., Dec. 2007, Vol. 54, No. 6, pp. 3402–3412.
- [8] HORI Y., SAWADA H., CHUN Y., *Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system*, IEEE Trans. on Ind. Electronics, 1999, Vol. 46, No. 1, pp. 162–168.
- [9] SZABAT K., ORLOWSKA-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.
- [10] SERKIES P.J., SZABAT K., *Przybliżone sterowanie pozycją w napędzie elektrycznym z połączeniem sprężystym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, No. 2, pp. 276–279.
- [11] CYCHOWSKI M., SZABAT K., *Efficient real-time model predictive control of the drive system with elastic transmission*, Control Theory & Applications, IET, 2010, Vol. 4, No. 1.
- [12] SZABAT K., SERKIES P. J., *Zastosowanie sterowania predykcyjnego w napędzie elektrycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 2, pp. 380–383.
- [13] BROCK S., *Sterowanie ślizgowe napędem bezpośrednim z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, R. 86, No. 4, pp. 134–137.
- [14] ORLOWSKA-KOWALSKA T., KAMINSKI M., SZABAT K., *Implementation of the Sliding Mode Controller with an Integral Function and Fuzzy Gain Value for Electrical Drive with Elastic Joint*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 4, pp. 1309–1317.
- [15] PAJCHROWSKI T., *Zastosowanie struktury MFC do odpornej regulacji prędkości obrotowej*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, R. 86, No. 2, pp. 319–324.
- [16] JANG J.-S.R., SUN C.-T., MIZUTANI E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, 1997.
- [17] ORLOWSKA-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.

- [18] WAI R., LIU CH., *Design of Dynamic Petri Recurrent-Fuzzy-Neural-Network and its application to Path-Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robot*, IEEE, 2009, Vol. 56, No. 7.
- [19] 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.
- [20] KNYCHAS S., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu II do sterowania prędkością układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, No. 7, pp. 160–163.
- [21] 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.

DAMPING OF THE TORSIONAL VIBRATION USING NEURO-FUZZY CONTROLLERS

In the paper issues related to the application of the adaptive control structure with a neuro-fuzzy controllers with different parameters are presented. After a short introduction the mathematical model of plant is described. Then the MRAS structure with neuro-fuzzy controller is introduced. Next the proposed control structure is tested in simulation study. The obtained results confirm very good properties of the analyzed structure. The application of the second type of the fuzzy sets increase the robustness of the control structure to the parameter variation of the drive.