ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: ELEKTRYKA z. 170 Nr kol. 1426

Abdelmouttaleb DOULEN
Kazimierz GIERLOTKA

ZASTOSOWANIE METOD LOGIKI ROZMYTEJ DO STEROWANIA NAPĘDU Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM

Streszczenie. W referacie przedstawiono zagadnienie zastosowania metod logiki rozmytej (fuzzy logic) do sterowania napędem z połączeniami sprężystymi. Szczególny nacisk został położony na zagadnienie wrażliwości układu regulacji na zmiany parametrów elektromechanicznych napędu. Porównano wyniki badań symulacyjnych napędu sprężystego pracującego rozmytym i klasycznym regulatorem prędkości.

CONTROL SYSTEM OF DRIVE WITH ELASTIC JOINT USING FUZZY LOGIC METHOD

Summary. The paper describes the problem of fuzzy-logic controller application to the drives with elastic joints. The objective of the paper is to discuss the sensitivity of the mentioned control system to variables of the electromechanical system parameters. Results of comparative simulation tests of the drive with elastic joint with fuzzy and classical speed controllers are presented.

1. WPROWADZENIE

Skończona sztywność połączeń mechanicznych może być przyczyną powstania drgań układu napędowego i w konsekwencji powodować wzrost naprężeń układu mechanicznego, skrócenie żywotności napędu, pogorszenie jego niezawodności oraz pogorszenie przebiegu procesu technologicznego. Te niekorzystne skutki można w znacznym stopniu ograniczyć przez zastosowanie w tego typu napędach specjalnych struktur układów regulacji oraz metod doboru ich parametrów. Znane układy sterowania napędów z połączeniami sprężystymi, np. przedstawione w publikacjach [5, 11, 15], bazują na klasycznych regulatorach PID i wykorzystują dodatkowe, w porównaniu z układami o sztywnych połączeniach mechanicznych, obwody sprzężeń zwrotnych. Umożliwiają one uzyskanie dużego tłumienia drgań układu napędowego, a w przypadku zastosowania jednocześnie dwóch dodatkowych sprzężeń zwrotnych również krótkiego czasu regulacji.

Pewnym problemem w klasycznych strukturach układu regulacji napędów z połączeniem sprężystym jest dość duża wrażliwość na zmianę parametrów układu elektromechanicznego [15]. Jedną z możliwości zwiększenia odporności układu na wahania parametrów, niepewność modelu i działające na obiekt regulacji zakłócenia jest zastosowanie układów regulacji wykorzystujących logikę rozmytą, których synteza nie wymaga precyzyjnej znajomości mo-

delu obiektu regulacji. Zaleta ta stała się jednym z powodów zainteresowania zastosowaniami regulatorów rozmytych w układach napędowych. W ostatnich latach ukazało się wiele publikacji dotyczących układów regulacji typu fuzzy logic w energoelektronice oraz napędach prądu stałego i przemiennego [2, 4, 6, 8]. Bogatą literaturę ma również problem zastosowań tej metody regulacji do ograniczenia niekorzystnych zjawisk w układach elektromechanicznych - można tu np. wymienić prace dotyczące sterowania napędów dźwignic z eliminacją kołysania ładunku [10, 12]. Wszystko to stanowiło przesłankę do sprawdzenia możliwości zastosowania układu regulacji wykorzystującego logikę rozmytą w napędzie ze sprężystymi więzami mechanicznymi. Istotne wydaje się szczególnie porównanie czasów regulacji oraz skuteczności tłumienia drgań spowodowanych elastycznością więzów mechanicznych w klasycznych i rozmytych układach regulacji napędów z połączeniami sprężystymi. W niniejszej pracy zamieszczono również wyniki badań napędu zawierającego luzy w układzie mechanicznym pracującego z tymi dwoma rodzajami układu regulacji.

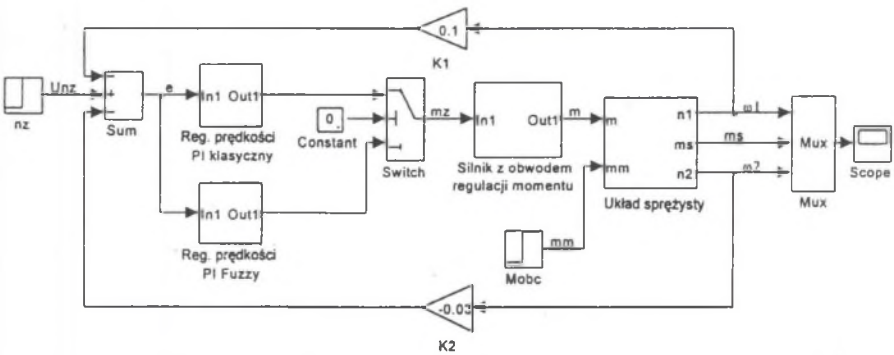
2. STEROWANIE ROZMYTE NAPĘDU Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM

2.1. Struktura układu regulacji

Tematem rozważań jest układ napędowy, w którym między silnikiem a organem wykonawczym napędzanego urządzenia znajdują się elementy o skończonej sztywności. W wyniku działających sił w układzie mechanicznym mogą zostać wzbudzone drgania spowodowane sprężystością połączeń mechanicznych oraz ewentualnie występującymi w układzie luzami.

Układ sterowania napędu (rys. 1) składa się z wewnętrznego obwodu regulacji momentu elektromagnetycznego silnika (w przypadku silnika obcowzbudnego może to być obwód regulacji prądu wirnika) i nadrzędnego obwodu regulacji prędkości. Wewnętrzny obwód regulacji momentu z klasycznym regulatorem zoptymalizowano wg kryterium optimum modułu. W celu polepszenia skuteczności tłumienia drgań w obwodzie regulacji prędkości zastosowano oprócz podstawowego sprzężenia zwrotnego od prędkości silnika Ω_1 sprzężenie dodatkowe od prędkości Ω_2 mechanizmu za połączeniem sprężystym. Układ umożliwia badanie właściwości napędu dla dwóch realizacji regulatora prędkości:

- klasycznego regulatora typu PI o nastawach zapewniających skuteczne tłumienie drgań spowodowanych sprężystością połączeń mechanicznych [5],
- regulatora rozmytego typu PI.



Rys.1. Schemat układu regulacji napędu z połączeniem sprężystym w notacji Simulinka
Fig. 1. Control system of the drive with elastic joint in Simulink notation

2.2. Model układu mechanicznego

Opisu matematycznego układu dokonano w wielkościach względnych. Dla wielkości obwodu głównego jako wielkości odniesienia przyjęto znamionowe wartości prędkości i momentu silnika, a dla wielkości w obwodach regulacji odpowiednie ich wartości wypływające z wielkości odniesienia dla obwodu głównego. Wielkość odniesienia dla drogi kątowej (kąta skręcenia elementu sprężystego) zdefiniowano jako:

$$\Phi_{odn} = \frac{c}{M_N}, \tag{1}$$

gdzie c jest współczynnikiem sztywności elementy sprężystego, a M_N znamionową wartością momentu silnika.

Przyjęto następujące założenia dotyczące układu mechanicznego:

- rozważane są tylko drgania skrętne: pomija się drgania poprzeczne i podłużne,
- rozważa się układ dwumasowy, w którym skupione masy sztywne o momentach bezwładności J_1 i J_2 względem osi obrotu połączone są elementem sprężystym sztywności c, tłumieniu wewnętrznym μ i pomijalnej wartości momentu bezwładności,
- w układzie mechanicznym może wystąpić luz.

Sprężysty układ mechaniczny opisany jest wówczas układem równań:

$$\frac{d\omega_1(t)}{dt} = \frac{1}{T_{m1}}\left(m(t) - m_s(t)\right), \tag{2}$$

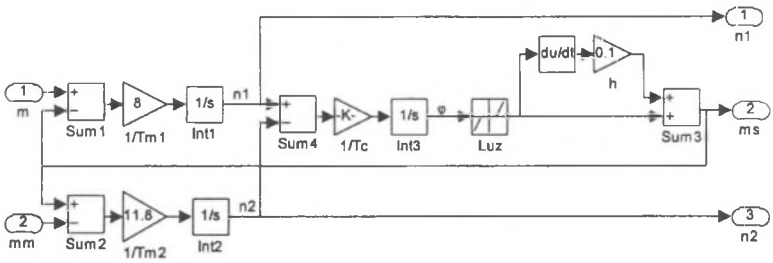
$$\frac{d\omega_2(t)}{dt} = \frac{1}{T_{m2}}\left(m_s(t) - m_m(t)\right), \tag{3}$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{T_c}\left(\omega_1(t) - \omega_2(t)\right), \tag{4}$$

$$m_s(t) = \begin{cases} \left(\varphi(t) - \frac{\varepsilon}{2}\operatorname{sgn}(\varphi)\right) + h\frac{d}{dt}\left(\varphi(t) - \frac{\varepsilon}{2}\operatorname{sgn}(\varphi)\right) & \text{dla } \varphi > \frac{\varepsilon}{2}, \\ 0 & \text{dla } \varphi \le \frac{\varepsilon}{2}, \end{cases} \tag{5}$$

gdzie: m, m_s, m_m - względne wartości momentu silnika, momentu skręcającego w elemencie sprężystym, momentu obciążenia,
ω_1, ω_2 - względne prędkości silnika i mechanizmu za połączeniem sprężystym,
φ - względna wartość kąta skręcenia elementu sprężystego,
ε - wartość luzu w wielkościach względnych,
T_{m1}, T_{m2},- mechaniczne stałe czasowe silnika i mechanizmu za elementem sprężystym,
T_c - stała czasowa sprężystości,
h - względna wartość współczynnika tłumienia elementu sprężystego.

Schemat układu mechanicznego z elementem sprężystym i luzem przedstawia rys.2.

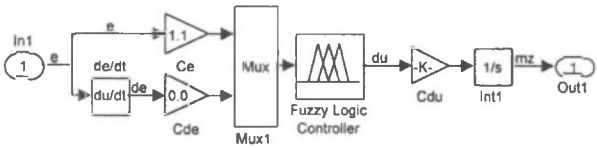


Rys. 2. Schemat blokowy układu mechanicznego z elementem sprężystym i luzem
Fig. 2. Block diagram of the elastic mechanical system with backlash

2.3. Rozmyty regulator prędkości

Schemat rozmytego regulatora prędkości przedstawiony jest na rys. 3. Zmiennymi wejściowymi regulatora jest błąd regulacji prędkości e(t) oraz jego pochodna względem czasu de(t). Wielkością wyjściową jest wartość zadana momentu elektromagnetycznego silnika mz(t). Ponieważ projektowany regulator rozmyty, bazujący na implikacji Mamdamiego, jest równoważny konwencjonalnemu regulatorowi typu PI, więc jego baza reguł składa się z reguł postaci:

JEŻELI *e* jest <zmienna lingwistyczna> I *de* jest <zmienna lingwistyczna> TO *du* jest <zmienna lingwistyczna >.

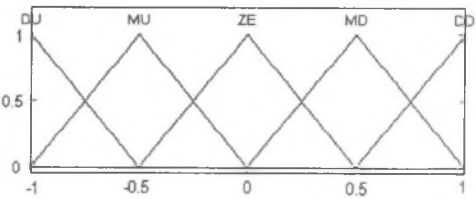


Rys.3. Schemat blokowy rozmytego regulatora prędkości
Fig.3. Block diagram of the fuzzy speed controller

Badania przeprowadzono dla baz o rozmiarach od 9 do 49 reguł, kształtach funkcji przynależności typu trójkąt i defuzyfikacji metodą środka obszaru. Dla przedstawionej na rys. 4a bazy reguł o rozmiarze 5×5 kształt funkcji przynależności przedstawiony jest na rys. 4b, a powierzchnia sterowania na rys. 5.

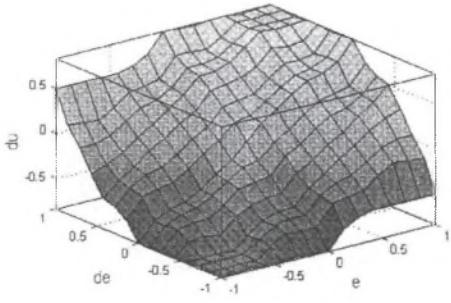
		e				
		DU	**MU**	**ZE**	**MD**	**DD**
de	**DU**	DU	DU	DU	MU	MU
	MU	DU	DU	MU	ZE	MD
	ZE	DU	MU	ZE	MD	DD
	MD	MU	ZE	MD	DD	DD
	DD	MD	MD	DD	DD	DD

a)



b)

Rys. 4. Baza reguł (a) oraz funkcje przynależności dla zmiennych wejściowych *e* i *de* oraz zmiennej wyjściowej *du* (b)
Fig. 4. The rules base (a) and membership functions for input and output variables (b)



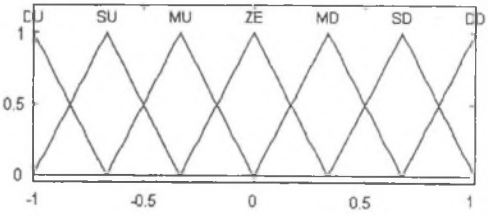
Rys. 5. Powierzchnia sterowania *du=f(e,de)* dla regulatora rozmytego o 25 regułach
Fig. 5. The control surface *du = f(e,de)* for fuzzy controller with 25 rules

Właściwości rozmytego regulatora prędkości o bazie zawierającej 49 reguł i trójkątnym kształcie funkcji przynależności zobrazowane są charakterystykami oraz zależnościami przedstawionymi na rys. 6 i rys. 7.

Wartości współczynników skalujących Ce i Cde dla wielkości wejściowych oraz Cdu dla wielkości wyjściowej zostały dobrane doświadczalnie tak, by osiągnąć zadowalające właściwości dynamiczne napędu, tj. krótki czas regulacji i silne tłumienie drgań napędu.

		e						
		DU	**SU**	**MU**	**ZE**	**MD**	**SD**	**DD**
de	**DU**	DU	DU	DU	DU	SU	MU	ZE
	SU	DU	DU	DU	SU	MU	ZE	MD
	MU	DU	DU	SU	MU	ZE	MD	SD
	ZE	DU	SU	MU	ZE	MD	SD	DD
	MD	SU	MU	ZE	MD	SD	DD	DD
	SD	MU	ZE	MD	SD	DD	DD	DD
	DD	ZE	MD	SD	DD	DD	DD	DD

a)



b)

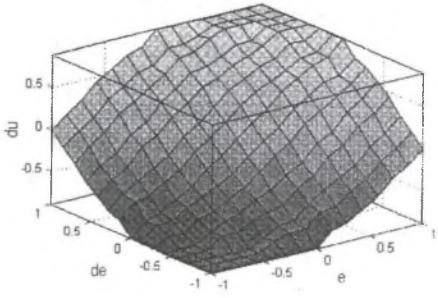
Rys. 6. Baza reguł o wymiarze 7×7 (a) oraz funkcje przynależności dla zmiennych wejściowych *e* i *de* oraz zmiennej wyjściowej *du* (b)
Fig. 6. 7×7 dimension rules base (a) and membership functions for input and output variables (b)

3. BADANIA SYMULACYJNE

Badania symulacyjne przeprowadzone w programie MATLAB za pomocą nakładki graficznej Simulink i Fuzzy Logic Toolbox obejmowały konfigurację regulatora rozmytego z pięcio- oraz siedemiowymiarową tabelą reguł.

Przyjęto następujące podstawowe dane układu mechanicznego:

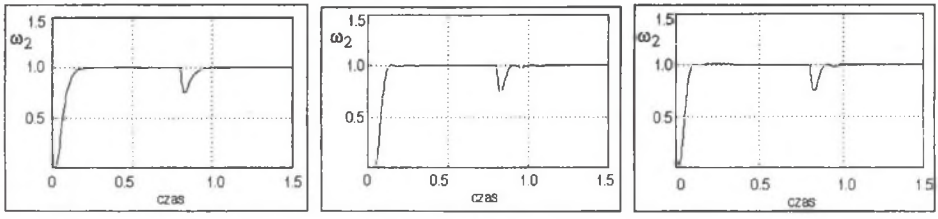
- silnik: $P_N = 2{,}2$ kW, $n_N = 1000$ obr/min, $M_N = 21$ N·m,
- moment bezwładności silnika $J_1 = 0{,}025$ kg·m^2,



Rys. 7. Powierzchnia sterowania *du=f(e,de)* dla regulatora rozmytego o 49 regułach
Fig. 7. The control surface *du = f(e,de)* for fuzzy controller with 49 rules

- moment bezwładności mechanizmu za połączeniem sprężystym $J_2 = 0{,}17$ kg·m^2,
- współczynnik sztywności elementu sprężystego c = 100 N·m/rad,
- współczynnik tłumienia elementu sprężystego $\mu = 0{,}033$ N·m·s/rad.

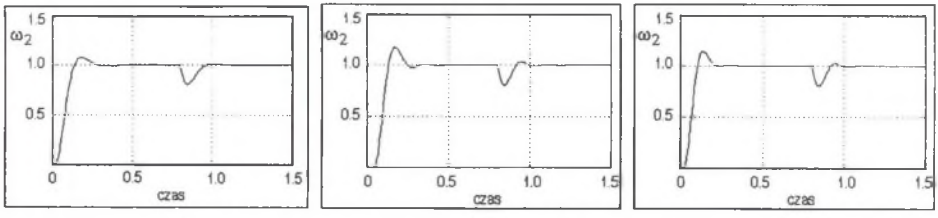
Wynikające stąd wartości współczynników modelu napędu wyrażonego w wielkościach względnych przyjmują wartości: $T_{m1} = 0{,}125$ s, $T_{m2} = 0{,}085$ s, $T_c = 0{,}0020$ s, h = 0,165. Wybrane wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunkach 8 - 12.



a) b) c)

Rys. 8. Przebiegi prędkości mechanizmu za połączeniem sprężystym w klasycznym układzie regulacji (a) i z regulatorem rozmytym o bazie zawierającej 25 reguł (b) i 49 reguł (c)

Fig. 8. The load speed courses in the classical control system (a) and in the system with fuzzy speed controller containing 25 rules (b) and 49 rules (c)

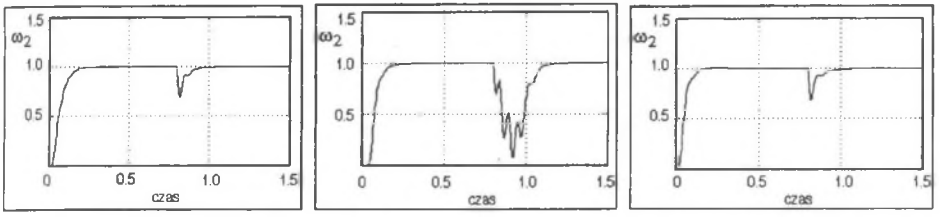


a) b) c)

Rys. 9. Przebiegi prędkości mechanizmu za połączeniem sprężystym w klasycznym układzie regulacji (a) i z regulatorem rozmytym o bazie zawierającej 25 reguł (b) i 49 reguł (c) dla dwukrotnie większej wartości momentu bezwładności J_2 mechanizmu za połączeniem sprężystym

Fig. 9. The load speed waveforms in the classical control system (a) and in the system with fuzzy speed controller containing 25 rules (b) and 49 rules (c) for twice as large moment of inertia J_2 value

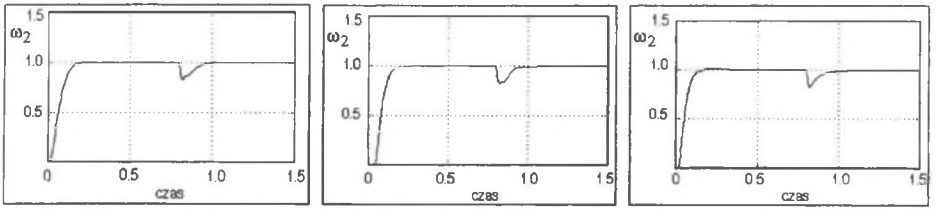
Na rys. 8 przedstawiono przebiegi prędkości ω_2 mechanizmu za połączeniem sprężystym w odpowiedzi na skok jednostkowy prędkości zadanej, a następnie skokową zmianę momentu obciążenia o 0,7 M_N. We wszystkich trzech układach regulacji otrzymano silne tłumienie drgań napędu. W porównaniu z klasycznym rozmyty układ regulacji umożliwia uzyskanie nieco krótszego czasu regulacji zarówno w przypadku bazy zawierającej 25, jak i 49 reguł. Szybsza jest także reakcja układu z regulatorem rozmytym na zmianę momentu obciążenia napędu.



a) b) c)

Rys. 10. Przebiegi prędkości mechanizmu za połączeniem sprężystym w klasycznym układzie regulacji (a) i z regulatorem rozmytym o bazie zawierającej 25 reguł (b) i 49 reguł (c) dla dwukrotnie mniejszej wartości momentu bezwładności J_2 mechanizmu za połączeniem sprężystym

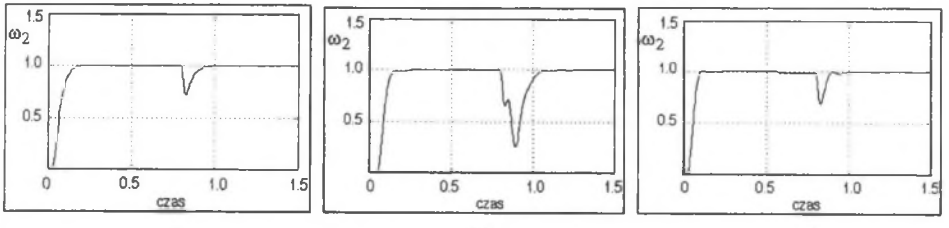
Fig. 10. The load speed waveforms in the classical control system (a) and in the system with fuzzy speed controller containing 25 rules (b) and 49 rules (c) for twice as small moment of inertia J_2 value



a) b) c)

Rys. 11. Przebiegi prędkości mechanizmu za połączeniem sprężystym w klasycznym układzie regulacji (a) i z regulatorem rozmytym o bazie zawierającej 25 reguł (b) i 49 reguł (c) dla dwukrotnego wzrostu współczynnika sztywności c połączenia sprężystego

Fig. 11. The load speed waveforms in the classical control system (a) and in the system with fuzzy speed controller containing 25 rules (b) and 49 rules (c) for twice as large elastic constant c value



a) b) c)

Rys. 12. Przebiegi prędkości mechanizmu za połączeniem sprężystym w klasycznym układzie regulacji (a) i z regulatorem rozmytym o bazie zawierającej 25 reguł (b) i 49 reguł (c) dla układu z luzem o długości względnej $\varepsilon = 1$

Fig. 12. The load speed waveforms in the classical control system (a) and in the system with fuzzy speed controller containing 25 rules (b) and 49 rules (c) for system with backlash of relative length $\varepsilon = 1$

Wrażliwość klasycznego i rozmytego układu regulacji na zmianę parametrów sprężystego układu mechanicznego zobrazowana jest na rysunkach 9 - 11. Można zauważyć, że zwiększenie rozmiaru bazy reguł z 25 do 49 korzystnie wpływa na zmniejszenie wrażliwości rozmytego układu sterowania napędu z połączeniem sprężystym. Również przedstawione na rys. 12 przebiegi w układzie mechanicznym z luzem dla bazy zawierającej 49 reguł są znacznie korzystniejsze aniżeli dla 25 reguł. Porównując klasyczny i rozmyty układ regulacji z bazą zawierającą 49 reguł można stwierdzić, że cechują się one zbliżonym poziomem wrażliwości na zmianę parametrów napędu z połączeniem sprężystym, z tym że układ regulacji rozmyty zapewnia krótszy czas trwania stanów nieustalonych.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym pracującego w układzie sterowania z rozmytym regulatorem prędkości. Porównywano je z wynikami symulacji dla układu z klasycznym regulatorem prędkości typu PI. Porównanie dotyczyło wartości tłumienia drgań spowodowanych elastycznością więzów mechanicznych, czasu regulacji oraz wrażliwości układu regulacji na zmiany parametrów układu mechanicznego.

Na podstawie wstępnych badań symulacyjnych można potwierdzić przydatność regulatorów rozmytych w układach sterowania napędów z połączeniami sprężystymi. Uzyskano silne tłumienie drgań spowodowanych elastycznością więzów mechanicznych oraz skrócenie czasu regulacji w porównaniu z klasycznym regulatorem prędkości typu PI.

Nie wszystkie właściwości takiego napędu są jednak w pełni zadowalające. W szczególności nie uzyskano widocznego zmniejszenia wrażliwości napędu na zmianę jego parametrów. Obecnie prowadzone są prace nad zastosowaniem algorytmów adaptacji parametrów i struktury rozmytych regulatorów przy wykorzystaniu metody ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Metoda ta, łącząca w sobie zalety sieci neuronowych i logiki rozmytej, umożliwia zmniejszenie wrażliwości na zmiany parametrów obiektu regulacji.

LITERATURA

1. Asplund Ch., Fukuda A.: Fuzzy Logic Control of a Knuckle Boom Crane for Forestry Machines. Rep. Forestry and Forest Product Resaerch Institute, Tsukuba 1994.
2. Donescu V., Neascu D. O., Griva G.: Design of a fuzzy logic speed controller for brushless DC motor drives. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics ISIE'99, vol. 1, pp. 404 – 408.
3. Driankov D., Helendoorn H., Reifrank M.: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. WNT, Warszawa 1996.
4. Dzieniakowski M. A., Grabowski P. Z.: Fuzzy logic controller with state recognition for three phase PWM-VSI. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics ISIE'99, vol. 1, pp. 438 – 443.
5. Gierlotka K. : Układy sterowania napędów elektrycznych z elementami sprężystymi. ZN Politechniki Śląskiej, ser. Elektryka, z 129, Gliwice 1992.
6. Goureau P., Markens C., Ibaliden A.: Robustness of classical and fuzzy controllers for an A.C. Drive. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics ISIE'99, vol. 1, pp. 421 – 426.

7. Jang J.-S., Gulley N.: – Fuzzy logic Toolbox for use with MATLAB. The Math Works Inc., 1995.
8. Jaszczak K., Orłowska-Kowalska T.: Analiza wrażliwości regulatorów rozmytych na zmiany parametrów napędu prądu stałego. VIII Sympozjum PPEE'99, Ustroń 1999, s. 509-515.
9. Mrozek B., Mrozek Z. MATLAB 5.x. Simulink 2.x. Poradnik użytkownika, PLJ, Warszawa 1998.
10. Nowacki Z., Owczarz D.: Hybrid Adaptive and Fuzzy Controller for the Roof Crane. Mat. II Konferencji Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'95, Łódź 1995, s. 432-438.
11. Ohmae T., Matsuda T., Kanno M., Saito K., Sukegawa T.: A mikroprocesor-Based Motor Speed Regulator Using Fast Response State Observer for Reduction of Torsional Vibration. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-23, No. 5, 1987, p. 863-867.
12. Palis F., Lehnert M.: Steuerung und Regelung von Kranen mit Fuzzy Logic. Seminar Neue Trends bei automatisierten Kranen, Magdeburg 1993.
13. Pedrycz W.: Fuzzy control and fuzzy systems. J. Wiley & Sons Inc. New York 1995.
14. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN, Warszawa-Łódź 1997.
15. Zaleśny P.: Układy napędowe z połączeniami sprężystymi o ulepszonych właściwościach dynamicznych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Kazimierz Buczek, prof. Pol. Rzeszowskiej

Wpłynęło do Redakcji 31 maja 1999 r.

Abstract

Using classical control systems with PID type speed controller and with additional feedback loops it is possible to obtain strong vibrations damping of the drive with elastic joints [5, 11, 15]. The certain problem in these control systems is rather large sensitivity to the electromechanical system parameters variations.

The alternative control system of the drive with elastic joint containing fuzzy-logic speed controller is presented in the paper. The backlash is considered in the mathematical model of the elastic mechanical system described by Eqs. (2) - (5) and presented in Fig. 2. The fuzzy-logic speed controller basing on Mamdami implication for base with 25 rules (Figs. 4 and 5) and with 49 rules (Figs. 6 and 7) presented in Fig.3 was used in simulation tests.

Results of the comparative tests of the classical control system and fuzzy-logic control system of the drive with elastic joint are presented in Figs. 8 - 12. The strong vibration damping is obtained in both control systems but the setting time in the system with fuzzy-logic controller is shorter (Fig. 8). Sensitivity of the fuzzy-logic control system containing 49 rules to the load moment of inertia J_2 and elastic constant c variations is similar to that of the classical control system.