

# **XV Krajowa Konferencja Automatyki**

**Tom II**



**Redaktorzy:  
Zdzisław Bubnicki  
Roman Kulikowski  
Janusz Kacprzyk**

# XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom II



Redaktorzy:  
Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK

**ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

**WSPÓLORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

## **WSPÓLORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **KOMITET PROGRAMOWY**

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

## **CZŁONKOWIE**

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFczyk
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

## **KOMITET ORGANIZACYJNY**

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowci	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

**ISBN 83-89475-01-4**

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk  
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

METODY STOCHASTYCZNE  
– PROBLEMY NIEDETERMINISTYCZNE

## ZMIENNOSTRUKTURALNE STEROWANIE ROZMYTE UKŁADEM DYNAMICZNYM O WŁAŚCIWOŚCIACH OSCYLACYJNYCH

Tadeusz WACŁAWSKI

Politechnika Krakowska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Automatyki  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: twaclaw@usk.pk.edu.pl

**Streszczenie:** Obiektem sterowania jest układ dwóch mas wirujących rozdzielonych sprężystością i luzem kątowym. Zastosowano sterowanie zmiennostrukturalne w układzie regulacji prędkości i pozycyjnym z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego. Sterowanie to w odpowiedni sposób zmodyfikowano, przez wprowadzenie regulatora rozmytego typu Mamdaniego z odpowiednio dobranymi funkcjami przynależności. W taki sposób poprawiono jakość procesów regulacji, które mogą niekiedy być procesami poślizgowymi. Badania symulacyjne tego układu regulacji przeprowadzono w środowisku MATLAB.

**Słowa kluczowe:** Sterowanie zmiennostrukturalne, sterowanie rozmyte, procesy elektromechaniczne.

### 1. WPROWADZENIE

Współcześnie stosuje się różne algorytmy sterowania i regulacji w układach napędowych. W układzie napędowym składającym się z silnika obcowzbudnego mocy ułamkowej i mechanizmu pozycyjnego lub regulacji prędkości stosuje się zmiennostrukturalne układy regulacji. Zastosowanie takich algorytmów sterowania nawiązuje do popularnej w przeszłości koncepcji regulacji przekąźnikowej, stosowanej na przykład w serwomechanizmach.

Działanie zmiennostrukturalnego układu regulacji można zmodyfikować wprowadzając sterowanie rozmyte, aby polepszyć jakość procesu regulacji przez wprowadzenie także pośrednich wartości sterowań w miejsce tylko dwóch wartości sterowania stosowanych w klasycznych układach regulacji zmiennostrukturalnej. Zależnie od odległości od powierzchni przełączeń, po zastosowaniu regulatora rozmytego, uzyskuje się wartości pośrednie tego sterowania.

Najprostszym modelem matematycznym, który jeszcze umożliwia analizę złożonych nieliniowych zjawisk elektromechanicznych w takim układzie napędowym, jest opis matematyczny modelu fizycznego, składającego się z dwóch mas wirujących rozdzielonych sprężystością i luzem kątowym [1]. W identyfikacji parametrów tego modelu uwzględniono w sposób typowy drgania elektromechaniczne dominujące podczas pracy napędu.

### 2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU DYNAMICZNEGO

Model matematyczny układu dynamicznego (elektromechanicznego) ma postać

$$\dot{i} = F(U, i, \omega_1) \quad (1)$$

$$\dot{\phi}_1 = \omega_1 \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_1 = i - f(\Delta\phi) \quad (3)$$

$$\dot{\phi}_2 = \omega_2 \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_2 = f(\omega_2) + f(\Delta\phi) \quad (5)$$

Wszystkie zmienne wyrażone są w jednostkach względnych, przy czym  $\phi_1, \omega_1, \phi_2, \omega_2$  - odpowiednio, położenia i prędkości kątowe pierwszej i drugiej masy wirującej;  $F$  - jest funkcją zmiennych  $U, i, \omega_1$ ;  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ ;  $i$  - prąd twornika (moment elektryczny) silnika prądu stałego;  $U$  - napięcia twornika silnika. Moment sprężystości  $f(\Delta\phi)$  modulowany luzem kątowym  $L(\Delta\phi)$  i nieciągły moment obciążenia  $f(\omega_2)$  przyjmują odpowiednio postać:

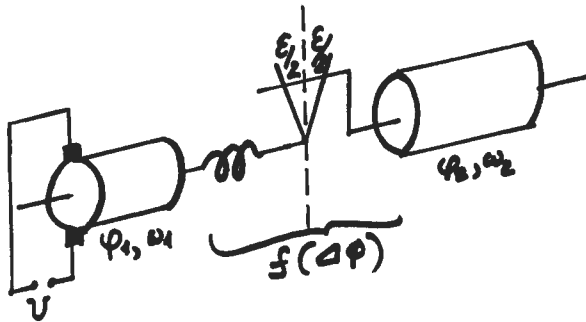
$$f(\Delta\phi) = k \Delta\phi L(\Delta\phi) \quad (6)$$

$$f(\omega_2) = -A \text{sign}(\omega_2) \quad (7)$$

$$\text{sign}(\omega_2) = \begin{cases} 1 & \text{for } \omega_2 > 0 \\ [-1, 1] & \text{for } \omega_2 = 0 \\ -1 & \text{for } \omega_2 < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$L(\Delta\phi) = \begin{cases} 0 & \text{for } |\Delta\phi| \leq \varepsilon/2 \\ 1 & \text{for } |\Delta\phi| > \varepsilon/2 \end{cases} \quad (9)$$

gdzie  $k$  - współczynnik sprężystości,  $\varepsilon$  - wartość szczeliny kątovej,  $A$  - stała dodatnia. Równania (1)–(9) nazwano modelem  $\{i, \phi_1, \omega_1, \phi_2, \omega_2\}$ . Ten model uwzględnia układy regulacji prędkości i pozycyjne. Z drugiej strony uwzględnienie jedynie dwóch mas wirujących, umożliwiające również uwzględnienie luzu kątovej (szczeliny kątovej) i sprężystości kątovej, jest maksymalnym uproszczeniem, które pozwala jeszcze analizować dynamikę układu sterowania. Taki model jest więc odpowiedni w syntezy sterowania (np. zamkniętego sterowania suboptymalnego wg przyjętego wskaźnika jakości, odpowiedniego dla układów nieliniowych). Układ napędowy został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat dwumasowego układu napędowego ze sprężystością modulowaną luzem kątowym.

### 3. BADANIE ZMIENNOSTRUKTURALNO-ROZMYTEGO UKŁADU REGULACJI ORAZ NIEKTÓRE WNIOSKI

Założono, że zamknięty suboptymalny układ sterowania  $S$  posiada strukturę dwuwarstwową  $S = \{S^{v.s.}, S^{ddc}\}$ ,

gdzie  $S^{ddc}$  - warstwa bezpośredniego sterowania cyfrowego z typowym kaskadowym układem regulacji prędkości,  $S^{v.s.}$  - warstwa zmiennostrukturalnego sterowania rozmytego. Po wprowadzeniu regulatorów PI oraz przeprowadzeniu optymalizacji parametrycznej warstwy  $S^{ddc}$  jej model uległ uproszczeniu (sterowanie  $u(t) = i(t)$ ) to jest model  $\{i, \phi_1, \omega_1, \phi_2, \omega_2\}$  przyjął postać

$$\dot{\phi}_1 = \omega_1 \quad (10)$$

$$\dot{\omega}_1 = u - f(\Delta\phi) \quad (11)$$

$$\dot{\phi}_2 = \omega_2 \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_2 = f(\omega_2) + f(\Delta\phi) \quad (13)$$

Równania (10) – (13) nazwano modelem (matematycznym)  $\{\phi_1, \omega_1, \phi_2, \omega_2\}$ . Ten model opisuje oscylator nieliniowy z dwoma stopniami swobody. W takim oscylatorze (nieautonomicznym, z kawałkami ciągłą prawą

stroną) występują tłumione, samowzbudne, parametryczne oscylacje zmiennych stanu  $\phi_1, \omega_1, \phi_2, \omega_2$ . Mogą to być drgania stabilne lub niestabilne. Tak więc ostateczny ruch układu może być bardzo skomplikowany. Do uzyskania suboptymalnego procesu sterowania warstwa rozmytego sterowania zmiennostrukturalnego  $S^{v.s.}$ , generuje rozmyte sterowanie zmiennostrukturalne  $u$ . Ponieważ z punktu widzenia zastosowań napędu istotny jest ruch drugiej masy wirującej, dlatego sterowanie zmiennostrukturalne  $u$ , będzie funkcją dwóch zmiennych stanu: położenia kątovej  $\phi_2$  oraz prędkości kątovej  $\omega_2$  drugiej masy wirującej. To jest

$$u = m(\phi_2, \omega_2) \quad (14)$$

oraz

$$m(\phi_2, \omega_2) = \begin{cases} m_1 & \text{for } \phi_2^2 + \omega_2^2 < R^2 \\ m_2 & \text{for } \phi_2^2 + \omega_2^2 \geq R^2 \end{cases} \quad (15)$$

gdzie  $R$  - promień okręgu na płaszczyźnie  $(\phi_2, \omega_2)$ , jego promień odpowiada maksymalnej dopuszczalnej amplitudzie drgań wielkości regulowanych,  $m_1, m_2$  - parametry minimalne i maksymalne w „twardym” prawie sterowania zmiennostrukturalnego. Założono, że  $|m_1| = |m_2|$ . Wiadomo, że w takim układzie sterowania zamkniętego mogą powstawać nie tylko sztuczne cykle graniczne, ale nawet proces poślizgowy w pewnych obszarach płaszczyzny  $(\phi_2, \omega_2)$ . Ten układ zasymulowano biorąc  $|m_1| = |m_2| = 1.1$ . Istotne są więc dwa przypadki:

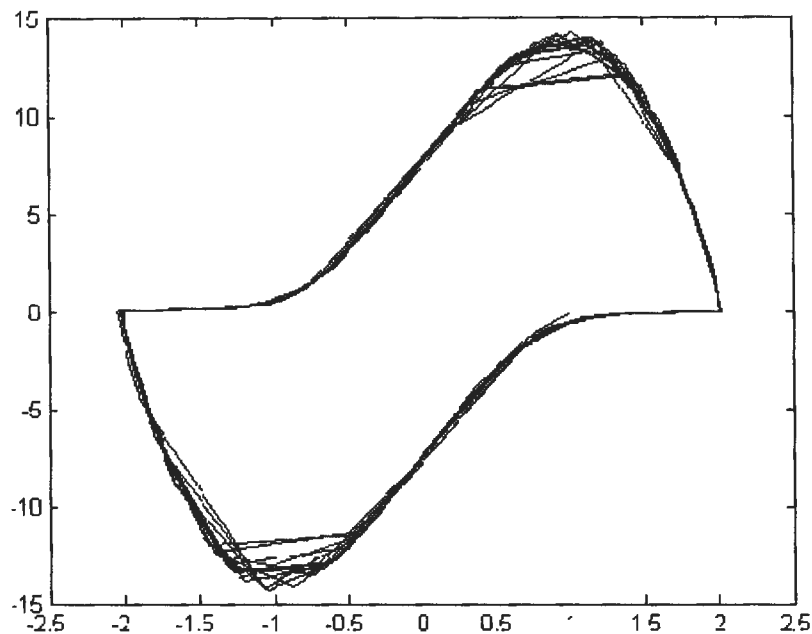
$$m_1 = 1.1; m_2 = -1.1 \text{ lub } m_1 = -1.1; m_2 = 1.1.$$

Następnie zastosowano sterowanie rozmyte, aby polepszyć jakość regulacji przez dodanie także pośrednich wartości sterowań zamiast tylko dwóch wartości  $m_1, m_2$ . Zastosowano regulator typu Mamdaniego [2] z dwoma wejściami  $\phi_2$  oraz  $\omega_2$ . Każde wejście jest rozmywane, zastosowano tu po trzy funkcje przynależności typu trójkątnego; ich nośnikami są dwa odcinki promienia okręgu  $R$  oraz otoczenie kołowe punktu dla punktów  $(\phi_2, \omega_2)$  leżących wewnątrz okręgu  $R$ . Dla punktów  $(\phi_2, \omega_2)$  leżących na zewnątrz tego okręgu są to trzy odcinki zawarte w trzech współśrodkowych pierścieniach. Oczywiście, sterowania wewnątrz okręgu są dodatnie („rozpędzanie”), na zewnątrz ujemne („rozpędzanie”). Jednoczłonowych reguł sterowania jest sześć. Defuzyfikację przeprowadzono metodą środka ciężkości.

Ekspertymy symulacyjne dla sprawdzenia poprawności doboru sześciu funkcji przynależności, czyli przyjętej koncepcji systemu sterowania, zostały przeprowadzone w środowisku MATLAB/SIMULINK z użyciem

edytora Fuzzy Tipper oraz pakietu Fuzzy Logic Toolbox, między innymi dla przypadku gdy  $k = 2$  (elastyczność w modelu duża) oraz  $\varepsilon = 2^\circ$  i  $A = 0,5$ .

Rys. 2 przedstawia przebieg trajektorii stanu na płaszczyźnie  $(\phi_2, \omega_2)$  dla tego przypadku.



Rys. 2. Trajektoria stanu.

Jak widać, w tym przypadku uzyskano stabilny cykl graniczny z maksymalną amplitudą równą ok. 14.

Rozwiązania numeryczne są po prostu aproksymacjami klasycznych rozwiązań zwyczajnych równań różniczkowych z kawałkami ciągłymi prawymi stronami, zszywanymi na granicach obszarów nieciągłości prawej strony.

Przedstawiona koncepcja regulacji polepsza jakość procesu sterowania w przypadku niektórych układów regulacji prędkości (szczególnie stabilizacji), a z drugiej strony nawiązuje do popularnej w przeszłości klasycznej regulacji impulsowej czy przekaźnikowej, zmiennostrukturalnej lub w szczególności poślizgowej.

#### VARIABLE STRUCTURE FUZZY CONTROL OF NONLINEAR SYSTEM WITH ELASTICITY

**Abstract:** In this paper there has been presented variable structure control system, which was modified with the use of Mamdani type regulator to find the quality of velocity and position control. The D. C. drive contains two rotating masses coupled by elasticity and an angular gap.

#### Literatura

- [1] Piegat A. (1999) *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. EXIT, Warszawa.
- [2] Szklarski L., Jaracz K., Horodecki A. (1990) *Electric Drive Systems Dynamics. Selected Problems*. Elsevier, Amsterdam.



Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4