

Problemy optymalizacji struktur regulatora rozmytego w sterowaniu dwurotorowym systemem aerodynamicznym

Piotr Woźnica

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska

Streszczenie: W artykule przedstawiono propozycję metody optymalizacji struktur regulatora rozmytego w sterowaniu nieliniowym wielowymiarowym obiektem mechatronicznym. W procesie optymalizacji wykorzystano algorytmy genetyczne. Przeprowadzono badania symulacyjne układu regulacji z proponowanym algorytmem w środowisku MATLAB/Simulink. Analiza uzyskanych rezultatów potwierdza efektywność zastosowania zmodyfikowanego regulatora rozmytego do sterowania wybranym modelem nieliniowym.

Słowa kluczowe: optymalizacja struktur regulatora rozmytego, system aerodynamiczny, TRAS

Klasyczne metody automatycznej regulacji (PI, PID) w sterowaniu złożonymi obiektami typu MIMO o nieliniowym charakterze nie są wystarczająco efektywne pod względem jakości sterowania z kryterium regulacji w postaci czasu regulacji, uchybu statycznego oraz tłumienia dynamicznego. W artykule przedstawiono możliwości syntezy regulatora rozmytego w sterowaniu modelem laboratoryjnym śmigłowca. Ponadto dokonano optymalizacji struktury regulatora pod względem przyjętych wskaźników jakości sterowania.

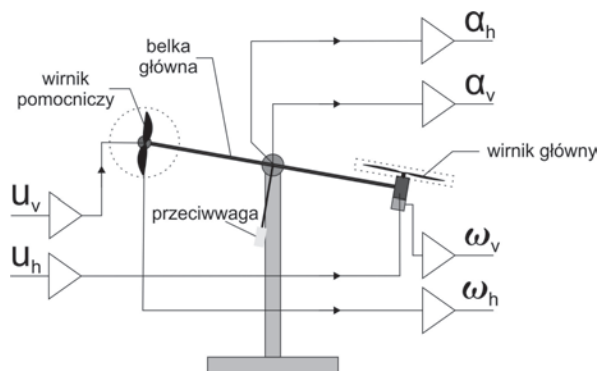
1. Wprowadzenie

Dwurotorowy system aerodynamiczny (ang. *Two Rotor Aerodynamical System*, TRAS) (rys. 1) [2] jest złożonym obiektem mechatronicznym o dwóch stopniach swobody ruchowej. Model będący na wyposażeniu Laboratorium Automatyki w Instytucie Automatyki i Informatyki w Politechnice Opolskiej stanowi odwzorowanie rzeczywistego śmigłowca w postaci modelu laboratoryjnego. Zespoły napędowe składają się z silników DC sprzęgniętych wspólnym wałem z wirnikiem (śmigłem) oraz enkoderem inkrementalnym. Sygnały sterujące oraz pomiarowe poprzez układ przetworników zostają znormalizowane do przestrzeni wartości $[-1,1]$.

System sterowania TRAS zrealizowano w konfiguracji centralnego komputera sterującego wyposażonego w kartę akwizycji danych oraz środowisko MATLAB/Simulink pełniące rolę obsługi karty pomiarowej i realizacji algorytmu sterowania w czasie rzeczywistym. Zadaniem układu automatycznej regulacji jest stabilizacja położenia kąтового belki głównej systemu.

2. Synteza sterowania rozmytego

Istotną cechą systemu TRAS jest nieliniowy charakter pracy oraz sprzężenia skrośne między sterowanymi torami obiektu. Nieliniowość obiektu jest wynikiem składo-



Rys. 1. Dwurotorowy system aerodynamiczny (u_h, u_v – napięcie silnika napędowego poziomego oraz pionowego; α_h, α_v – kąty orientacji belki systemu; ω_h, ω_v – prędkości obrotowe wirników)

Fig. 1. Two Rotor Aerodynamical System (TRAS) (u_h, u_v – voltage of the horizontal and vertical motors; α_h, α_v – orientation angles of the beam system; ω_h, ω_v – rotational speeds of rotors)

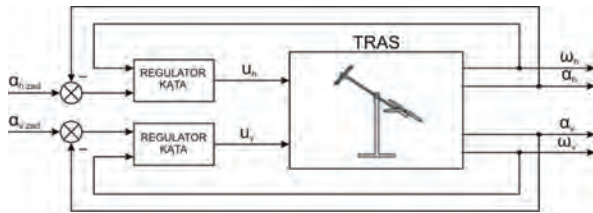
wych cech nieliniowej zależności siły ciągu od prędkości obrotowej wirników oraz całkowitego chwilowego momentu obrotowego działającego na belkę główną obiektu. Konwencjonalne układy regulacji oparte o algorytm PID nie zapewniają zadowalającej jakości sterowania pod względem czasu regulacji i uchybu średniokwadratowego. Dla modelu obiektu TRAS [2] zaprojektowano dyskretny regulator PD o nastawach zoptymalizowanych do wybranych obszarów pracy. Wybór regulatora o działaniu proporcjonalno-różniczkującym podyktowany został wymaganiami dobrego tłumienia dynamicznego. Nastawy poszczególnych regulatorów dobrano z wykorzystaniem metody gradientowej. Zaprojektowane regulatory działają w sposób zadowalający z wymaganą efektywnością w otoczeniach swoich punktów pracy, natomiast nie sprawdzają się w całym obszarze roboczym belki głównej obiektu. Zaproponowany układ regulacji położenia belki głównej systemu TRAS (rys. 2) opiera się na regulatorze rozmytym o strukturze Takagi-Sugeno ze sprzężeniem od stanu w konfiguracji PD (rys. 4) [1]. Istotną zaletą stosowania sterowania rozmytego jest brak potrzeby dysponowania modelem matematycznym obiektu, którego złożoność (nieliniowość) niekorzystnie wpływa na proces obliczeniowy podczas realizacji sterowania [5].

W bloku rozmywania przyjęto funkcje przynależności w postaci sigmoidalnej (rys. 3). W wyniku syntezy regulatora rozmytego powstały następujące reguły rozmyte o następnikach funkcyjnych:

$$R_{reg}^1 : IF \omega_v \text{ is } \Omega_1 THEN u^1(k) = k_{e1} * e(k) + k_{de1} * e(k-1)$$

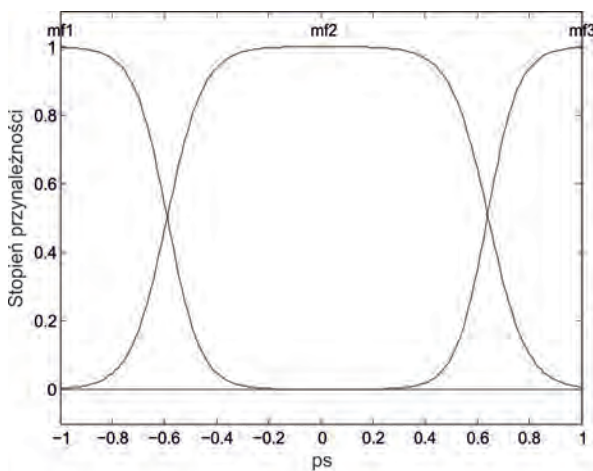
$$R_{reg}^2 : IF \omega_v \text{ is } \Omega_2 THEN u^2(k) = k_{e2} * e(k) + k_{de2} * e(k-1)$$

$$R_{reg}^3 : IF \omega_v \text{ is } \Omega_3 THEN u^3(k) = k_{e3} * e(k) + k_{de3} * e(k-1)$$



Rys. 2. Schemat strukturalny sterowania rozmytego dwurotorowym systemem aerodynamicznym ($\alpha_h \text{ zad}, \alpha_v \text{ zad}$ – wartości zadane kątów orientacji belki systemu; u_h, u_v – napięcie silnika napędowego poziomego oraz pionowego; α_h, α_v – kąty orientacji belki systemu; ω_h, ω_v – prędkości obrotowe wirników)

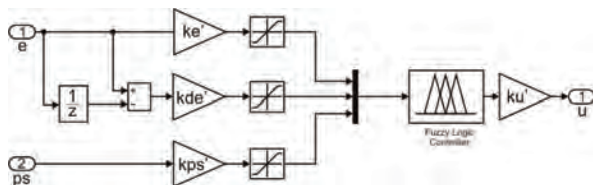
Fig. 2. Structural schematic of fuzzy control Two Rotor Aerodynamical System ($\alpha_h \text{ zad}, \alpha_v \text{ zad}$ – setpoints orientation angles of the beam system; u_h, u_v – voltage of the horizontal and vertical motors; α_h, α_v – orientation angles of the beam system; ω_h, ω_v – rotational speeds of rotors)



Rys. 3. Funkcje przynależności (ps – zmienna stanu)

Fig. 3. Membership functions (ps – state variable)

Dodatkowymi elementami korygującymi przestrzeń sterowań są wzmacniacze korekcyjne o współczynnikach ke' , kde' , kps' oraz ku' , których wartości dobrano eksperymentalnie.



Rys. 4. Regulator rozmyty ze sprzężeniem od stanu

Fig. 4. Fuzzy controller with coupled from the state

Projektowanie regulatorów rozmytych o strukturze Takagi-Sugeno jest złożonym zadaniem obliczeniowym

i analitycznym. Dobór właściwych przedziałów i kształtów funkcji przynależności może być skomplikowany i trudny, zwłaszcza w przypadku braku istotnej wiedzy eksperckiej o działaniu analizowanego obiektu. Zestawienie rozbudowanej bazy reguł stanowi podstawę do właściwej i efektywnej regulacji. Metoda Takagi-Sugeno pozwala na aproksymację odcinkową dowolnych nieliniowości, jednak właściwy dobór przedziałów liniowych dla wybranych punktów pracy wymaga głębokiej analizy i doświadczenia [4]. Proponuje się zatem wykorzystanie metod sztucznej inteligencji, w szczególności algorytmów genetycznych i ewolucyjnych w procesie optymalizującym strukturę systemu rozmytego, modyfikując parametry funkcji liniowych następników reguł rozmytych. Optymalizacja systemu sterowania polega na rozwiązaniu problemu optymalizacji parametrycznej związanej ze strukturą oraz parametrami regulatora. Do oceny efektywności przeprowadzonego procesu optymalizacji definiuje się wskaźnik efektywności ISE (1) (ang. *Integral Square Error*), często występujący w postaci funkcji o wielu zmiennych parametrach q_1, q_2, \dots, q_n . Do określenia optymalnych parametrów systemu warunkiem koniecznym jest minimalizacja wartości współczynnika jakości sterowania. Współczynnik jakości sterowania często określa się jako funkcję w dziedzinie uchybu regulacji $e(t) = w(t) - y(t)$, gdzie $e(t)$ jest uchybem regulacji, $w(t)$ wartością zadaną, $y(t)$ wartością rzeczywistą. Funkcja ta w przypadku systemów dyskretnych jest postaci sumy:

$$ISE = \text{Min} \sum_{k=0}^{k=\infty} e^2(k), \quad (1)$$

W strukturze regulatora zastosowano następniki funkcyjne w postaci wielomianu pierwszego rzędu:

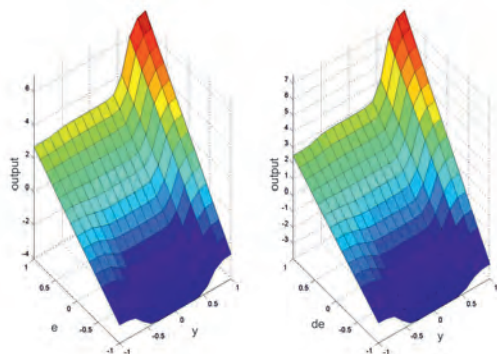
$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (2)$$

dokonując doboru wartości współczynników modyfikowanych za pomocą algorytmu genetycznego, gdzie a_0, a_1, \dots, a_n są parametrami.

Wnioskowanie rozmyte dokonuje się przez ważone, normowane zsumowanie wartości następników poszczególnych reguł. Sumowanie to przeprowadza się zgodnie z wzorem dla r reguł:

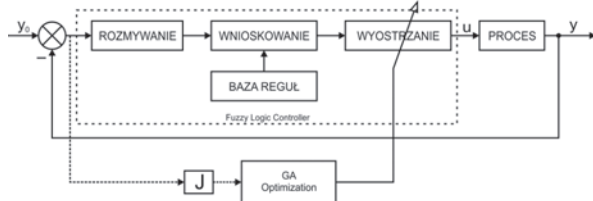
$$u_{h(v)} = \frac{\sum_{i=1}^r w^i(x) [a_0^i + \sum_{j=1}^n a_j^i x_j]}{\sum_{l=1}^r w^l(x)} \quad (3)$$

Użycie funkcyjnej postaci następników wystarcza do zadowalająco dokładnego modelowania nawet silnych nieliniowości przy odpowiednio dobranym położeniu funkcji przynależności i z reguły niezbyt dużej ilości zbiorów rozmytych poprzedników. Na rys. 5 przedstawiono powierzchnie sterowania ukształtowane na podstawie określonych reguł i funkcji następników. W procesie optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych dokonano stu iteracji symulacji układu sterowania z wykorzystaniem zbioru wartości z genomu dostarczonego z bieżącej iteracji, modyfikując funkcje następników regulatora rozmytego. Zbiór wartości inicjujących algorytm genetyczny stanowią parametry regulatorów klasycznych PD, zoptymalizowanych



Rys. 5. Powierzchnie sterowania regulatora rozmytego
Fig. 5. Control surfaces of fuzzy controller

w wybranych punktach pracy. Proces optymalizacji genetycznej struktury regulatora rozmytego przedstawiono schematycznie na rys. 6. Warunkiem zatrzymania algo-



Rys. 6. Proces optymalizacji genetycznej
Fig. 6. Operation of genetic optimization

rytmu genetycznego jest spełnienie jednego z kryteriów, tj. osiągnięcie wartości z ustalonego otoczenia ekstremum, w przypadku wskaźnika średniokwadratowego ekstremum przyjmuje wartość zero lub przyrost wartości współczynnika przystosowania chromosomu jest bliski zero. Przestrzeń poszukiwania rozwiązań określono empirycznie.

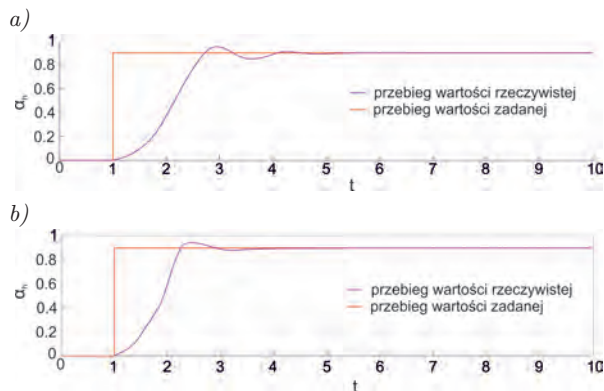
3. Badania symulacyjne

Badania eksperymentalne z wykorzystaniem logiki rozmytej przeprowadzono w środowisku MATLAB/Simulink. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę obiektu pod względem własności statycznych i dynamicznych. Dobrano obszary pracy dla klasycznych regulatorów PD oraz przeprowadzono ich optymalizację gradientową. Następnie z wykorzystaniem wstępnie dobranych parametrów regulatorów klasycznych przeprowadzono optymalizację struktury regulatora rozmytego. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano istotną poprawę jakości sterowania, która potwierdza skuteczność metod rozmytych w przypadku obiektów nieliniowych z wewnętrznymi sprzężeniami (rys. 7, 8).

Analiza przebiegów z rys. 7 i 8 potwierdza zasadność metody konstrukcji regulatora nieliniowego na bazie regulatorów liniowych dla wyznaczonych obszarów pracy.

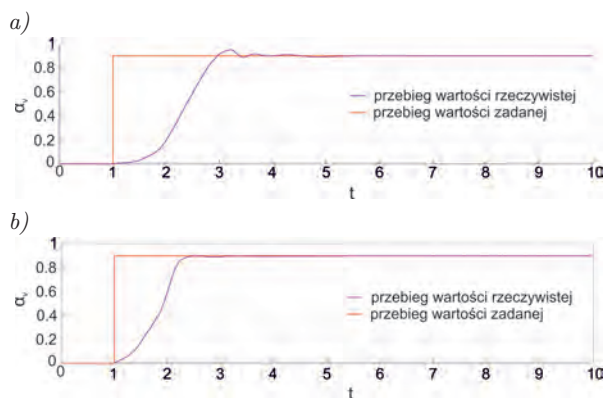
4. Uwagi końcowe

Przedstawiony w artykule zmodyfikowany algorytm rozmyty potwierdza efektywność jego zastosowania do sterowania rozpatrzonym nieliniowym wielowymiarowym modelem



Rys. 7. Przebiegi czasowe kąta orientacji belki systemu w osi poziomej: a) klasyczna regulacja PID, b) zoptymalizowane sterowanie rozmyte o strukturze Takagi-Sugeno

Fig. 7. Fuzzy vs. PID control: plots of the output and output reference signals in horizontal axis: a) classic PID control, b) optimized fuzzy control of the Takagi-Sugeno structure



Rys. 8. Przebiegi czasowe kąta orientacji belki systemu w osi pionowej: a) klasyczna regulacja PID, b) zoptymalizowane sterowanie rozmyte o strukturze Takagi-Sugeno

Fig. 8. Fuzzy vs. PID control: plots of the output and output reference signals in vertical axis: a) classic PID control, b) optimized fuzzy control of the Takagi-Sugeno structure

objektu. Zaletą takiego podejścia jest uzyskanie poprawnej efektywności sterowania przy stosunkowo niskim nakładzie obliczeniowym. Zastosowana metoda syntezy regulatorów w realizacji nieliniowego systemu sterowania wielowymiarowego wpływa na uzyskanie korzystnych rezultatów, wskazując na efektywność działania regulacji rozmytej o strukturze Takagi-Sugeno.

Bibliografia

1. Tatjewski P., *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*, EXIT, Warszawa 2002.
2. INTECO, Two Rotor Aerodynamical System. User's Manual, Polska 2008 <http://www.inteco.com.pl>.
3. Błachuta M. (red.), *Laboratorium teorii sterowania i podstaw automatyki, Skrypt 2082*, Politechnika Śląska, Gliwice 1998.
4. Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa 2005.
5. Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, EXIT, Warszawa 2003. ■



STEROWNIKI.PL

Optimization problems of the structures of fuzzy logic controller in control Two Rotor Aerodynamical System

Abstract: The paper presents a proposition of methods optimization structures of fuzzy logic controller in control nonlinear multivariable mechatronic plant. The control system simulation with proposed algorithm in MATLAB/Simulink environment was made. Analysis of obtained results confirms efficiency use of modified fuzzy logic controller for control selected nonlinear plant.

Keywords: optimization structures of fuzzy controller, aerodynamical system, TRAS

inż. Piotr Woźnica

Student II stopnia kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Zainteresowania: metody sztucznej inteligencji, sterowanie cyfrowe, automatyka przemysłowa.

e-mail: pp.woznica@gmail.com



Sterowanie w automatyce portal branżowy



- Aktualności z branży • Pliki • Giełda
- Katalog firm • Baza wiedzy • Praca
- Kalendarz imprez • Kursy • Forum

Wyślij zapytanie ofertowe



WYŚLIJ
ZAPYTANIE
OFERTOWE

**i wygraj
pendrive**

Reklama Twojej firmy od



**490 zł.
netto za rok**

ponad
2500 klientów
czekających na
Twoją ofertę