

Ryszard DINDORF, Jakub TAKOSOGLU

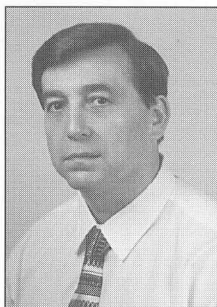
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI I BUDOWY MASZYN, ZAKŁAD MECHATRONIKI

Regulacja serwonapędu pneumatycznego z zastosowaniem logiki rozmytej

Dr hab. inż. Ryszard DINDORF

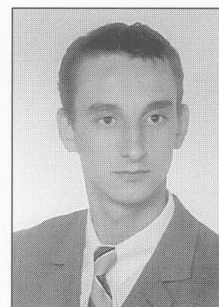
jest profesorem i kierownikiem Zakładu Mechatroniki na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Specjalizuje się w napędach i sterowaniach hydraulicznych i pneumatycznych stosowanych w automatyzacji i robotyzacji produkcji. Jest wykonawcą wielu prac badawczych i autorem licznych publikacji (książek, monografii, podręczników, skryptów, artykułów i referatów) w zakresie modelowania i symulacji, analizy i syntezy, badania i diagnostyki napędów hydraulicznych i pneumatycznych. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się obecnie na systemach mechatronicznych w zwłaszcza w zakresie integracji układów hydraulicznych i pneumatycznych z elektroniką i informatyką oraz zastosowaniem sztucznej inteligencji w układach hydraulicznych i pneumatycznych.

e-mail: dindorf@tu.kielce.pl



Mgr Jakub TAKOSOGLU

jest absolwentem Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego, Akademii Świętokrzyskiej w Kielcach oraz doktorantem w Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. W swoich pracach naukowych zajmuje się wykorzystaniem logiki rozmytej w sterowaniu napędami płynowymi. Jest autorem i współautorem 15 publikacji prezentowanych w czasopiśmie i na konferencjach krajowych i zagranicznych. Obecnie przygotowuje rozprawę doktorską poświęconą analizie i syntezie wieloosiowego serwonapędu pneumatycznego z regulacją rozmytą.



e-mail: qba@asystem.tu.kielce.pl

Streszczenie

Zastosowanie regulatora rozmytego (FLC) poprawiło dynamikę i dokładność pozycjonowania serwonapędu pneumatycznego oraz wyeliminowało zakłócenia w jego układzie regulacji. W procesie przetwarzania rozmytego zastosowano wyznaczanie poziomu zapłonu typu min, implikacji rozmytej typu min oraz agregacji poszczególnych wyjść reguły typu max. W celu uzyskania ostrej wartości wyjścia zastosowano metodę środka obszaru COA. Analizowano przebiegi procesu regulacji rozmytej serwonapędu pneumatycznego z regulacją przestawną, regulacją nadążną oraz regulacją kontroli trajektorii ruchu. Badania wykazały, że logika rozmyta może być stosowana w regulacji serwopneumatycznych manipulatorów o różnej strukturze kinematycznej. Przedstawione badania są podstawą do zastosowania logiki rozmytej w regulacji pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod.

Abstract

Application of fuzzy logic controller (FLC) improved dynamics and positioning accuracy of pneumatic servo-drive and eliminated disturbances in its control system. In fuzzyfication process conditionally firing rules of type min, implication operator of type min and aggregation of output rules of type max were employed. To obtain fuzzy output value the center of area function (COA) was used. Transpose control, follow-up control and trajectory motion control of pneumatic servo-drive with different input signals were carried out. The research proves applicability of fuzzy logic in control of servo-pneumatic manipulators with different kinematic chain structure. On the basis of the research the control of pneumatic tripod parallel manipulator using fuzzy logic can be established.

Słowa kluczowe: logika rozmyta, regulator rozmyty, serwonapęd pneumatyczny.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy logic controller, pneumatic servo-drive.

1. Wstęp

Dzięki rozwojowi automatyzacji i robotyzacji produkcji zwiększa się zainteresowanie wieloosiowymi serwonapędami pneumatycznymi, które charakteryzują się niskim kosztem wykonania, wysoką dynamiką działania i niezawodnością w pracy. Niezadowalająca dokładność pozycjonowania serwonapędów pneumatycznych ogranicza ich zastosowanie w wieloosiowych manipulatorach i robotach [1]. Serwonapędy pneumatyczne stosowane w wieloosiowych systemach elektropneumatycznych, nazywane także osiami pneumatycznymi, spełniają zadania elementów wykonawczych (aktuatorów), jak i konstrukcji nośnej. Ponieważ w manipulatorach kartezyjskich osie pneumatyczne połączone są szeregowo, dlatego odkształcenia sprężyste występujące na poszczególnych osiach pneumatycznych kumulują się i powodują pogorszenie dokładności pozycjonowania manipulatorów pneumatycznych. Sterowanie manipulatorów pneumatycznych o strukturze kinematycznej szeregowej wymaga więc wprowadzania nowych metod opartych na sztucznej inteligencji, np. logice rozmytej (ang.

Fuzzy Logic), sztucznych sieciach neuronowych (ang. Artificial Neural Network), systemach eksperckich (ang. Experts Systems). Zastosowanie regulatorów wykorzystujących logikę rozmytą (ang. Fuzzy Logic) umożliwia przejście z ilościowej do jakościowej regulacji serwonapędów pneumatycznych. W tradycyjnych układach sterowania algorytmy regulacji opracowywane są przez operatorów w sposób intuicyjny na podstawie ich własnego doświadczenia. Stosując metodę logiki rozmytej można wiedzę operatorów, dotyczącą sterowania obiektami regulacji, zapisać logiką słowną przetworzoną na działania matematyczne. Układy z logiką rozmytą są metodami sterowania inteligentnego, w których wiedza zakodowana w bazie reguł wynika z doświadczenia i intuicji oraz teoretycznego i praktycznego zrozumienia dynamiki układu regulacji, w tym przypadku dynamiki serwonapędów pneumatycznych [2].

2. Stanowisko badawcze serwonapędów pneumatycznych

Schemat stanowiska badawczego serwonapędów pneumatycznych z regulacją rozmytą przedstawiono na rys.1. Stanowisko to zbudowane zostało z następujących elementów: siłownika bez tłoczyskowego DGPIŁ-25-400 zintegrowanego z magnetostrykcyjnym bezstykowym pomiarem położenia Temposonic (wyjście analogowe 0-10V), zaworu proporcjonalnego MPYE-5-1/8-HF-010-B (sterowanego napięciowo 0-10V), karty pomiarowej I/O PCI-DAS1602/16, komputerów klasy PC (HOST i TARGET). W komputerze oznaczonym jako HOST zainstalowano oprogramowanie MATLAB z przybornikiem SIMULINK oraz xPC TARGET służącym do szybkiego prototypowania i sterowania w czasie rzeczywistym. Komputer oznaczony jako TARGET posiada zainstalowaną kartę pomiarową oraz system Real-Time xPC TARGET, który komunikuje się z serwonapędem elektropneumatycznym. Komputery HOST i TARGET komunikują się za pomocą protokołu TCP/IP. Schemat działania aplikacji xPC TARGET z komunikacją między HOST i TARGET przedstawiono na rys. 2. Praca z pakietem do szybkiego prototypowania polega na zbudowaniu modelu dynamicznego serwonapędu pneumatycznego w SIMULINK'u. Następnym krokiem jest skompilowanie tego modelu oraz wysłanie go do komputera TARGET, który wraz z kartą wejść/wyjść analogowych i systemem Real-Time xPC TARGET pełni rolę fizycznego sterownika serwonapędu pneumatycznego. Dzięki oprogramowaniu xPC TARGET w komputerach HOST i TARGET możliwa jest wizualizacja procesu regulacji serwonapędu pneumatycznego. W sytuacji, gdy potrzebne jest bardzo dokładne sterowanie osiami pneumatycznymi, najlepsze rezultaty daje zastosowanie w pełni zintegrowanego systemu opartego na cyfrowym przetwarzaniu sygnału. Ponieważ stanowisko badawcze zbudowane zostało z serwonapędu pneumatycznego z analogowym sterowaniem, dlatego w badaniach dokładności pozycjonowania te-

go serwonapedu użyto regulatora rozmytego FLC (ang. Fuzzy Logic Controller). Schemat serwonapedu pneumatycznego z regulatorem FLC przedstawiono na rys. 3. Zastosowany regulator rozmyty FLC (wykorzystujący metodę Mamdaniego) ma dwa wejścia: e (uchyb regulacji) i Δe (zmiana uchybu regulacji) oraz jedno wyjście u (napięcie w cewce serwozaworu). Regulator rozmyty FLC opisuje zbieżność między zmianą sygnału wyjściowego $\Delta u(k)=u(k)-u(k-1)$, a zmianami sygnałów wejściowych: uchybu $e(k)$ oraz zmiany uchybu $\Delta e(k)=e(k)-e(k-1)$. Zależność tą można zapisać następująco:

$$\Delta u(k)=F(e(k),\Delta e(k)) \quad (1)$$

Rzeczywiste wyjście $u(k)$ z regulatora FLC otrzymuje się z poprzedniej wartości sterowania $u(k-1)$ i z jej aktualizacji wartości $\Delta u(k)$:

$$u(k)=u(k-1)+\Delta u(k) \quad (2)$$

Wartości sygnałów wejściowych i wyjściowych wyznaczono na podstawie analogii do wcześniej zbudowanego regulatora PID [3]. Sygnały wejściowe i wyjściowe regulatora poddano procesowi rozmywania z rozmieszczeniem zbiorów rozmytych typu trójkąt i trapez o funkcjach przynależności jak na rys. 4, 5 i 6. Wykorzystano bazę 25 reguł Mac Vicara-Whelena opisanej w tablicy decyzyjnej (patrz Tablica 1). Zbiory rozmyte nazwane zostały od angielskojęzycznych skrótów: NB - negativ big (duży ujemny), NM - negativ medium (średni ujemny), NS - negativ small (mały ujemny), Z - zero (zerowy), PS - positiv small (mały dodatni), PM - positiv medium (mały dodatni), PB - positiv big (duży dodatni). Na rys. 7 przedstawiono powierzchnie przetwarzania reguł regulatora FLC. W procesie przetwarzania rozmytego zastosowano wyznaczanie poziomu zapłonu typu *min*, implikacji rozmytej typu *min* oraz agregacji poszczególnych wyjść reguły typu *max*. W celu uzyskania ostrej wartości wyjścia zastosowano metodę środka obszaru COA (*Center of Area*).

3. Wyniki badań eksperymentalnych

Przeprowadzono badania eksperymentalne serwonapedu pneumatycznego z regulatorem rozmytym FLC stosując różne metody regulacji: regulację przestawną, regulację nadążną oraz regulację z kontrolą trajektorii ruchu. W badaniach serwonapedu pneumatycznego analizowano dokładność pozycjonowania suwaka siłownika beztlóczykowego: w przypadku regulacji przestawnej i nadążnej w zakresie od 0 do 197 mm, a w przypadku kontroli trajektorii ruchu w zakresie od 37 do 197 mm. Jakość regulacji serwonapedu elektropneumatycznego porównano przy użyciu podstawowych wskaźników jakości takich jak: czas regulacji T_R , przeregulowanie $\delta_p=y_m-y_0$, uchyb regulacji $e=y(t)-y_0$ (gdzie: y_m - maksymalna wartość sygnału regulowanego, y_0 - wartość sygnału wymuszającego, $y(t)$ - sygnał regulowany) oraz ogólnie stosowanych całkowitych kryteriów jakości: IAE (ang. Integral of Absolute Error), ISE (ang. Integral of Square Error), ITAE (ang. Integral of Time and Absolut Error), ITSE (ang. Integral of Time and Square Error). W regulacji nadążnej uwzględniono także bezwzględne odchyłki sygnału położenia e_s i sygnału prędkości e_v [4]. W tablicy 2 zestawiono średnie wartości wskaźników jakości otrzymane podczas badań eksperymentalnych z zastosowaniem różnych metod regulacji: regulacji nadążnej, regulacji przestawnej i regulacji z kontrolą trajektorii ruchu [5]. Podczas prowadzonych badań serwonapedu pneumatycznego z regulatorem rozmytym FLC analizowano charakterystyki dynamiczne położenia i prędkości suwaka siłownika beztlóczykowego oraz ciśnienia w jego komorach. Przykładowe przebiegi procesu regulacji rozmytej serwonapedu pneumatycznego z regulacją przestawną dla sygnału wejściowego typu „step“, regulacją nadążną dla sygnału wejściowego typu „ramp“ i regulacją z kontrolą trajektorii ruchu dla sygnału wejściowego typu „sin“ przedstawiono na rys. 8-10. Z analizy tych charakterystyk wynika wniosek, że regulator rozmyty FLC dobrze regulu-

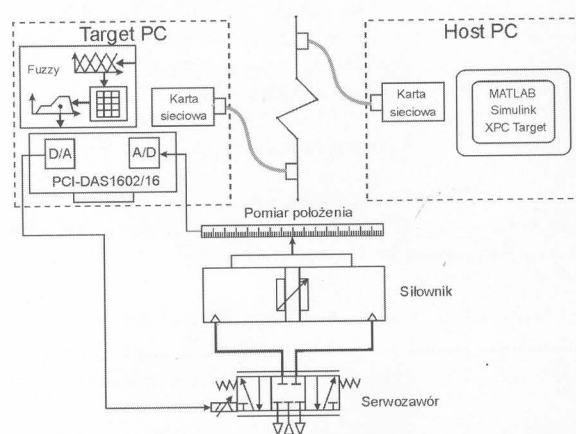
je takim obiektem jak serwonaped pneumatyczny, który ma trudne do identyfikacji i silnie nieliniowe własności dynamiczne. Regulatory rozmyte FLC mogą realizować zadania regulacji przestawnej i regulacji nadążnej, spełniane przez sterowniki przemysłowe, a także mogą sterować trajektorią ruchu siłownika pneumatycznego. W porównaniu z dotychczas stosowanymi sterownikami przemysłowymi (w badaniach wykorzystano sterownik SPC 200 firmy Festo) regulatory rozmyte pozwalają na uzyskanie większych dokładności pozycjonowania serwonapedów pneumatycznych. Z tego wynika, że sterowniki z logiką rozmytą mogą być przydatne w regulacji serwonapedów pneumatycznych zastosowanych w wielosiowych urządzeniach automatyzacji oraz w manipulatorach i robotach. Regulator rozmyty FLC zostanie wykorzystany w badaniach serwonapedu pneumatycznego manipulatora równoległego o strukturze kinematycznej tripoda, który został zbudowany w Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

Tab. 1. Tablica decyzyjna

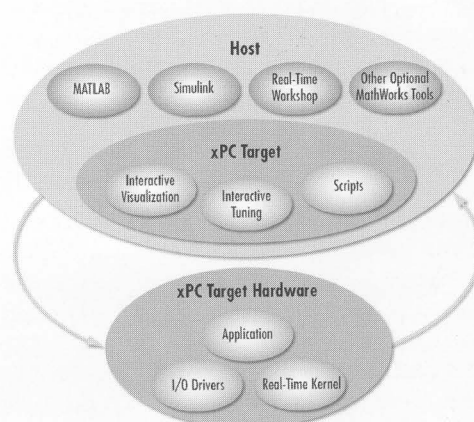
$\Delta e/e$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NS	Z	PS	PB
NS	NB	NS	Z	PS	PB
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	PS	PS	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

Tab. 2. Zestawienie wartości wskaźników jakości

T_R [s]	δ_p [mm]	IAE	ISE	ITAE	ITSE	e_s mm	e_v mm/s
Regulacja przestawna							
0,32	0,5	22,4	3301	3,8	490,1	-	-
Regulacja nadążna							
0,17	0,6	7,2	343,7	0,7	26,43	9,5	230,1
Regulacja z kontrolą trajektorii ruchu							
-	-	23,5	64,2	116,3	320,8	2,4	62,6



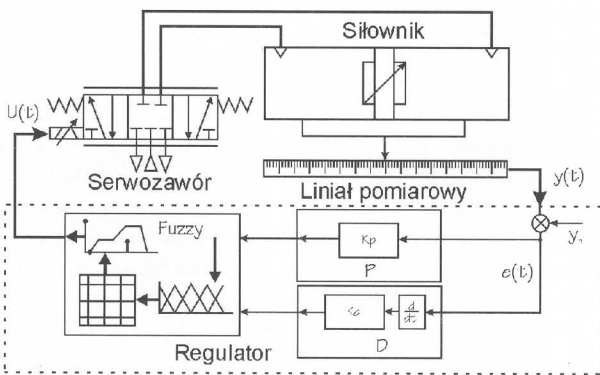
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego serwonapedu pneumatycznego z regulacją rozmytą



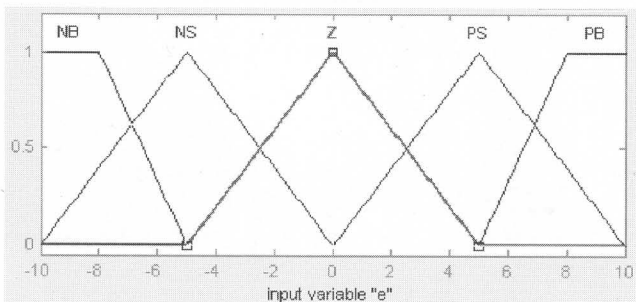
Rys. 2. Schemat połączenia HOST - TARGET (MathWorks)

4. Podsumowanie

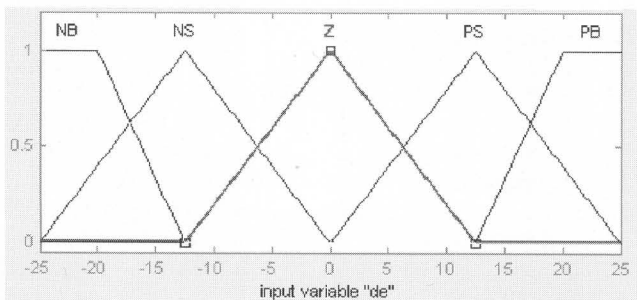
W artykule przedstawiono badania eksperymentalne serwonapędu pneumatycznego z regulacją rozmytą. Przedstawiono stanowisko badawcze oraz oprogramowanie wykorzystano do szybkiego prototypowania i sterowania serwonapędem elektropneumatycznym w czasie rzeczywistym. Przeprowadzono badania z regulacją przestawną, nadążną oraz z kontrolą trajektorii ruchu. Zastosowanie regulatora rozmytego FLC poprawiło dynamikę i dokładność pozycjonowania serwonapędu pneumatycznego oraz wyeliminowało zakłócenia w jego układzie regulacji. Dalsze badania będą zmierzały do wykazania przydatności logiki rozmytej w regulacji serwopneumatycznego manipulatora równoległego o kinematyce tripod.



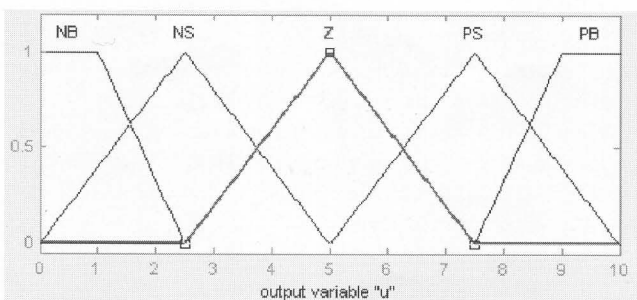
Rys. 3. Schemat sterowania serwonapędu pneumatycznego regulatorem FLC



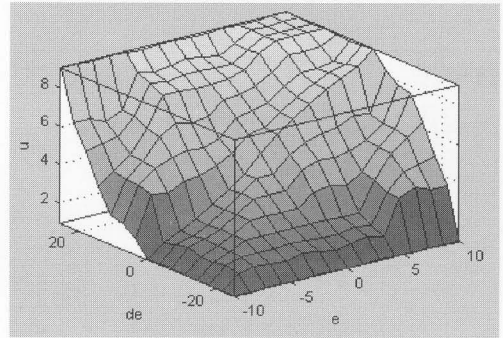
Rys. 4. Rozmywanie wejścia $e(t)$



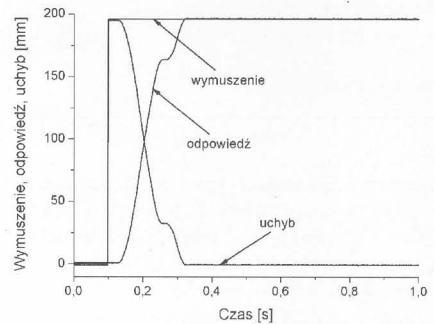
Rys. 5. Rozmywanie wejścia $\Delta e(t)$



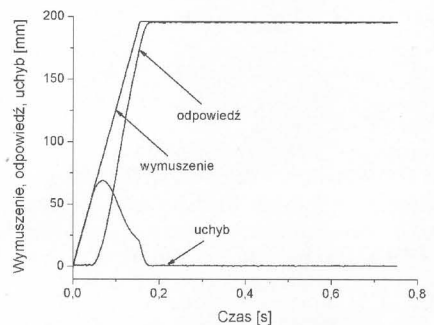
Rys. 6. Rozmywanie wyjścia $u(t)$



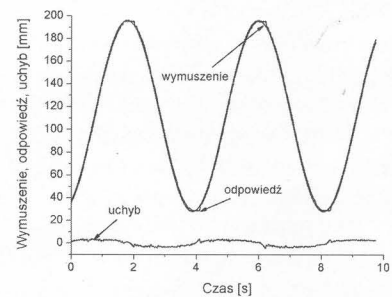
Rys. 7. Powierzchnia przetwarzania w regulatorze FLC.



Rys. 8. Przebieg procesu regulacji przestawnej



Rys. 9. Przebieg regulacji nadążnej



Rys. 10. Przebieg regulacji z trajektorią ruchu typu sinusoidalnego

5. Literatura

- [1] J. Takosoglu, T. Gawor, P. Łaski: Manipulator elektropneumatyczny typu tripod ze sterowaniem logiką rozmytą. *Pneumatyka* 2004, nr 3.
- [2] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. WNT, Warszawa 1996.
- [3] J. Takosoglu, R. Dindorf: Sterowanie serwonapędem elektropneumatycznym za pomocą regulatora rozmytego typu PD. *Projektowanie mechatroniczne. Zagadnienia wybrane*. KBM PAN, Kraków 2004.
- [4] K. Janiszowski: Identyfikacja modeli parametrycznych w przykładach. Exit Warszawa, 2002.
- [5] R. Dindorf, J. Takosoglu: Analiza serwonapędu pneumatycznego z regulatorami rozmytymi. *Pneumatyka*, 1, 2005.

Title: Control of pneumatic servo-drive using fuzzy logic

Artykuł recenzowany