

WOJCIECH CZYŻYCKI*

BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU HYDRAULICZNEGO Z REGULATOREM ROZMYTYM O STRUKTURZE PI

SIMULATIONS OF HYDRAULIC SYSTEM WITH FUZZY LOGIC CONTROLLER BASED ON PI STRUCTURE

Streszczenie

W artykule przedstawiono proces projektowania i wyniki badań symulacyjnych regulatora rozmytego o strukturze PI. Regulator zaprojektowano dla sterowania wydajnością układu hydraulicznego. Uzyskane wyniki potwierdzają jakość sterowania nieco lepszą niż regulatorów typu PID. Wskazane zostały także możliwości dalszego rozwoju tej konstrukcji.

Słowa kluczowe: układ hydrauliczny, regulacja wydajności, regulator rozmyty

Abstract

The paper presents design and simulation results of fuzzy logic controller based on PI structure. The controller has been designed for controlling the performance of the hydraulic system. The results confirm, that the quality of control is slightly better than the PID controller. It was also indicated the potential for further development of this structure.

Keywords: hydraulic system, flow control, fuzzy logic controller

* Dr inż. Wojciech Czyżycki, Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

W wielu maszynach roboczych zachodzi potrzeba dopasowania wydajności pompy do określonego cyklu pracy. Może to być potrzebne na przykład przy sterowaniu prędkością ruchu roboczego. Zakładając stałą prędkość obrotową silnika, niezbędne jest zastosowanie w układzie pompy o zmiennej wydajności i odpowiedniego regulatora, który dostosuje wydajność pompy do zmiennego zapotrzebowania układu.

W Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Krakowskiej podjęto badania układów hydraulicznych z regulatorami opartymi na logice rozmytej [2, 3]. W pracy omówiono projektowanie regulatora i badania układu hydraulicznego, w którym zastosowano pompę łopatkową sterowaną elektrohydraulicznie przez zaproponowany regulator rozmyty.

2. Obiekt badań

Model układu hydraulicznego, dla którego przeprowadzono syntezę regulatorów wydajności, przedstawiono na rysunku 1. Model i schemat układu wykonano w programie 20-sim, przystosowanego do badań symulacyjnych elementów i układów hydraulicznych. W programie tym przy tworzeniu modelu można wykorzystywać bloki graficzne lub bloki równań, które są modelami pojedynczych elementów hydraulicznych. Budowanie modelu w programie 20-sim odbywa się przez wstawianie elementów z biblioteki programu, można również tworzyć własne bloki. Bloki można budować z uwzględnieniem przyczynowości i przepływu mocy, co ma istotne znaczenie dla modelowania układów hydraulicznych.

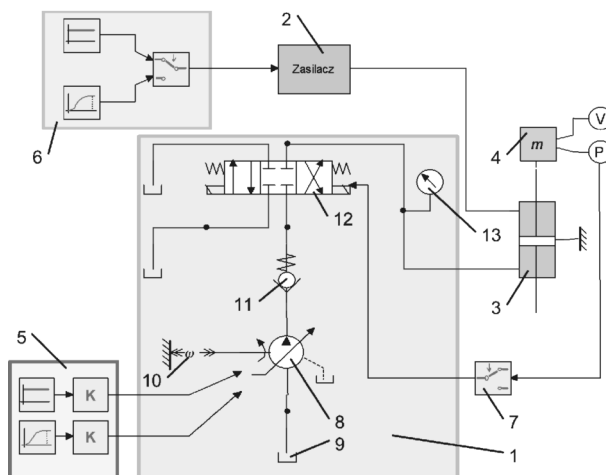
Układ przedstawiony na rysunku 1 zbudowany jest z bloku zasilania 1, dodatkowego zasilacza układu obciążającego 2, siłownika dwustronnego działania z dwustronnym tłoczyskiem 3, inercyjnego obciążenia siłownika 4, układu regulacji ciśnienia i wydajności pompy 5, układu sterowania ciśnieniem obciążenia 6, układu zmiany kierunku ruchu tłoczyska siłownika 7. Blok zasilania złożony jest z: pompy łopatkowej o zmiennej wydajności 8, zbiornika cieczy hydraulicznej 9, układu napędowego pompy 10 oraz zaworu zwrotnego 11. Typowe elementy hydrauliczne są zbudowane z elementów z biblioteki programu 20-sim, element opisujący chwilową wydajność pompy jest blokiem równań, zbudowanym z wykorzystaniem równań różniczkowych opisujących ruch statora pompy i tłoczków sterujących oraz bilansów przepływu z uwzględnieniem ściśliwości cieczy.

Dodatkowo w celach porównawczych zbudowano układy z liniowymi regulatorami PI i PID analogiczne do układów z regulatorem FLC. Parametry regulatorów liniowych uzyskano, korzystając z modułu optymalizacji programu 20-sim przez poszukiwanie minimum wskaźnika jakości sterowania I_{IAE} (ang. Integral of the Absolute Error), wyrażonego równaniem [4, 6]:

$$I_{IAE} = \int_{t_0}^{t_{\max}} |e(t)| dt. \quad (1)$$

Do porównania jakości regulacji stosowano również całkowity wskaźnik uwzględniający czas zanikania uchybu I_{ITAE} (ang. Integral of Time and Absolute Error) opisany równaniem:

$$I_{ITAE} = \int_{t_0}^{t_{\max}} t |e(t)| dt. \quad (2)$$



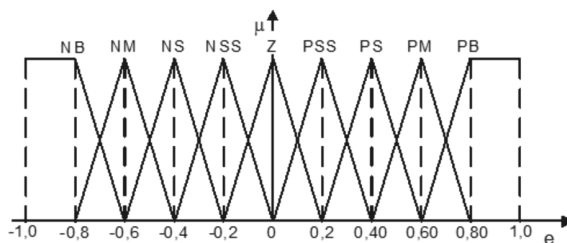
Rys. 1. Model układu roboczego w programie 20-sim w postaci blokowej
 Fig. 1. Model of the working system in 20-sim in the block system form

3. Budowa modelu sterowania opartego na logice rozmytej o strukturze regulatora PI

Proces budowy regulatora rozmytego o strukturze regulatora PI dla układu sterowania wydajnością zostanie przedstawiony w kolejnych podpunktach niniejszego rozdziału. Dla skrócenia zapisu, w dalszej części artykułu omawiany tu regulator będzie oznaczany Symbolem FLC1.

3.1. Rozmywanie

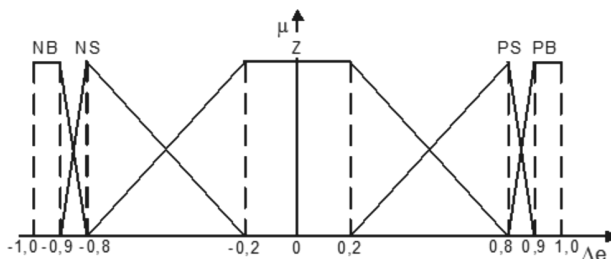
W bloku rozmywania przyjęto dwa sygnały wejściowe: znormalizowane do przedziału $[-1, 1]$ wartości uchybu wydajności pompy e oraz znormalizowane do takiego samego przedziału wartości przyrostu uchybu Δe . W bloku rozmywania sygnały wejściowe przekształcono w zbiory rozmyte za pomocą liniowych funkcji przynależności. Na podstawie literatury [1, 2, 3, 5, 7 i 8] i przyjętego modelu oraz wstępnych badań modelu przedział uchybu wydajności e podzielono pierwotnie na pięć przedziałów rozmytych. Wstępne badania symulacyjne wykazały nieco gorszą jakość sterowania w porównaniu z regulatorami PID. Aby uzyskać lepszą jakość sterowania, zwiększono liczbę przedziałów aż do dziewięciu, dla których stwierdzono jakość sterowania porównywalną ze zoptymalizowanym regulatorem PID. Przedziały nazwano odpowiednio: *Ujemny Duży* (ang. *Negative Big – NB*), *Ujemny Średni* (ang. *Negative Medium – NM*), *Ujemny Mały* (ang. *Negative Small – NS*), *Ujemny Bardzo Mały* (ang. *Negative Super Small – NSS*), *Zerowy* (ang. *Zero – Z*), *Dodatni Bardzo Mały* (ang. *Positive Super Small – PSS*), *Dodatni Mały* (ang. *Positive Small – PS*), *Dodatni Średni* (ang. *Positive Medium – PM*) i *Dodatni Duży* (ang. *Positive Big – PB*). Wartości krańcowe poszczególnych przedziałów wstępnie wyznaczono przez równomierny podział. Kończącą postać przedziałów rozmytych błędu wydajności przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Rozmyte przedziały uchybu wydajności e
Fig. 2. Fuzzy sets of flow error e

Znormalizowany do zakresu $[-1, 1]$ przyrost uchybu wydajności Δe podzielono na pięć przedziałów rozmytych, które nazwano odpowiednio: NB , NS , Z , PS i PB . Wartości krańcowe poszczególnych przedziałów wstępnie wyznaczono przez równomierny podział, a następnie korygowano podczas badań symulacyjnych minimalizując wartość wskaźnika I_{IAE} .

W wyniku przeprowadzonego procesu otrzymano dwie funkcje trapezowe niesymetryczne NB i PB , dwie trójkątne niesymetryczne NS i PS oraz jedną trapezową symetryczną Z . Środkowy zakres parametru Δe opisano funkcją trapezową symetryczną, ponieważ, zwłaszcza przy małych wartościach wydajności i obciążeniu badanego układu większymi masami, tłumienie oscylacji wydajności w układzie było powolne, i zastosowanie niewielkiego zakresu nieczułości powodowało szybsze ich zanikanie. Końcową postać przedziałów rozmytych przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Rozmyte przedziały przyrostu uchybu wydajności Δe
Fig. 3. Fuzzy sets of flow error increase e

3.2. Wnioskowanie

Nośniki zbiorów rozmytych e i Δe dobrano tak, aby zminimalizować wartość wskaźnika I_{IAE} , zapewniając możliwie dokładne utrzymywanie zadanej wydajności w układzie hydraulicznym przy eliminacji zjawiska oscylacji. W przypadku dużych wartości uchybu e (NB i PB) układ ma realizować duże przyrosty lub spadki sygnału sterującego wydajnością pompy u . W przypadku zmniejszenia wartości błędów następuje zmniejszenie zmian sygnału sterującego Δu w celu łagodnego ustawienia zadanej wydajności. W przypadku kiedy wartość uchybu wydajności i jego przyrostu jest bliska zeru, wartość zmiany sygnału sterującego Δu jest zerowa, a sygnał sterujący utrzymuje się na uprzednio wyznaczonym poziomie. W przypadku niezerowej, ale niskiej wartości Δe i zerowej war-

tości e nie następuje reakcja na zmianę wartości Δe . Ma to na celu łagodne wygaszenie oscylacji w układzie, które to występowały przy obciążeniu większą masą. W przypadku większych zmian Δe (NB , NS , PS i PB) następuje niewielki przyrost lub spadek wartości sygnału sterującego Δu , tak aby szybciej osiągnąć wartości bliskie zeru Δe oraz e . Kompletna baza reguł dla omawianego układu została przedstawiona w tabeli 1.

Tabela 1

Baza reguł sterowania wydajnością dla regulatora FLC1

		e								
		NB	NM	NS	NSS	Z	PSS	PS	PM	PB
Δe	NB	NB	NB	NB	NM	NS	NSS	Z	PSS	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	NSS	Z	PSS	PS	PM
	Z	NB	NM	NS	NSS	Z	PSS	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	NSS	Z	PSS	PS	PM	PB	PB
	PB	NS	NSS	Z	PSS	PS	PM	PB	PB	PB

Aby zrealizować sposób sterowania opisany bazą reguł przedstawioną w tabeli 1, niezbędne jest rozmycie wartości sygnału wyjściowego, reprezentującego przyrost wartości sygnału sterującego, na przedziały rozmyte. Przyjęto, że dla zastosowanego podziału na 9 przedziałów rozmytych maksymalny przyrost sygnału sterującego w jednym kroku (0,01 s) może wynosić około $\pm 3\%$ maksymalnej dopuszczalnej wartości sygnału. Podobnie jak przy rozmywaniu sygnałów błędów, podział rozpoczęto od podziału równomiernego, który modyfikowano w celu uzyskania jak najniższej wartości wskaźnika I_{IAE} . Wstępne testy wykazały konieczność zagęszczenia przedziałów w środkowej części zakresu Δu , czyli dla małych wartości. Powodować to będzie łagodny przebieg powierzchni sterowania dla małych wartości e i Δe oraz gwałtowniejszy dla dużych wartości e i Δe . W wyniku przeprowadzonego procesu otrzymano dwie funkcje trapezowe niesymetryczne NB i PB , jedną trójkątną symetryczną Z oraz sześć trójkątnych niesymetrycznych NM , NS , NSS , PSS , PS i PM . Kończącą postać uzyskanych przedziałów rozmytych przyrostu sygnału sterowania przedstawiono na rysunku 4.

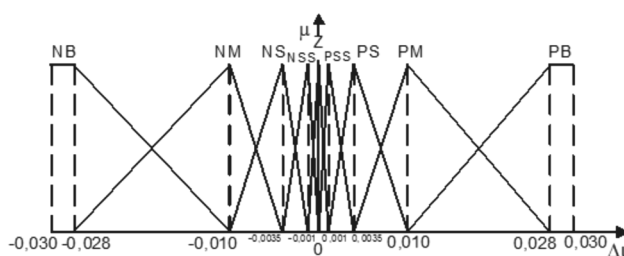
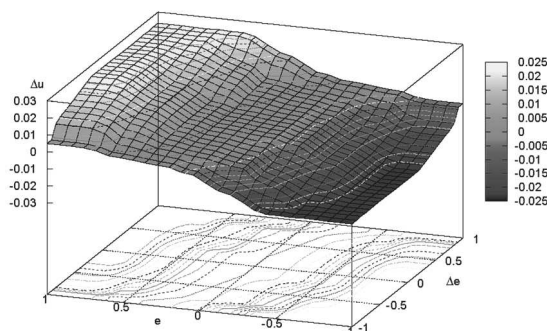
Rys. 4. Rozmyte przedziały przyrostu sygnału sterującego Δu dla regulatora FLC1

Fig. 4. Fuzzy sets of signal increase for the FLC1 controller

3.3. Wyostrzenie

W bloku wyostżenia następuje wyznaczenie numerycznych wartości sygnału wyjściowego sterownika. Zastosowano metodę środka ciężkości SC oraz operatory $PROD$ i $PROBOR$. Metoda środka ciężkości wraz z zastosowanymi operatorami zapewniły

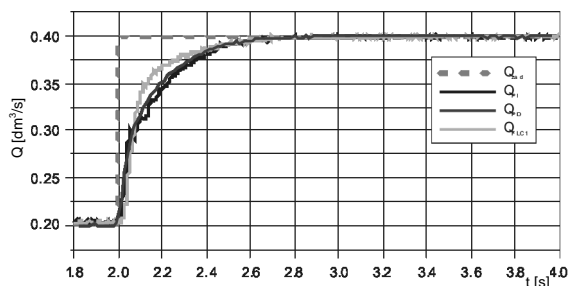
najbardziej gładki przebieg powierzchni sterowania, co dawało korzystniejsze wyniki niż powierzchnie z wyraźnymi stopniami, które uzyskiwano przy innych metodach wyostrzania albo przy zastosowaniu operatorów *MIN* i *MAX* [7]. Uzyskaną powierzchnię sterowania przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Powierzchnia sterowania wydajnością dla regulatora FLC1
Fig. 5. Flow control surface for the FLC1 controller

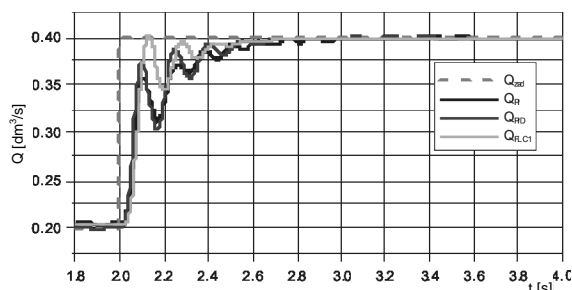
4. Wyniki badań

Przed przystąpieniem do badań przygotowano plan badań, korzystając ze schematu planu kompletnego. Następnie przeprowadzono badania symulacyjne układu regulacji wydajności przy wymuszeniach skokowych i trapezowym dla różnych mas obciążających siłownik oraz różnych ciśnień w układzie hydraulicznym. Przykładowy przebieg czasowy wydajności w układach z regulatorami PI, PID i FLC1 dla układu obciążonego masą 10 kg i ciśnieniem 4 MPa przedstawia rysunek 6, a masą 1500 kg i ciśnieniem 8 MPa rysunek 7.



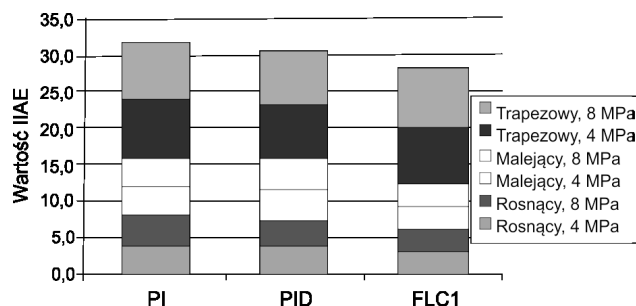
Rys. 6. Odpowiedź układu z regulacją wydajności na zadany skok wydajności z 0,2 do 0,4 dm³/s. Obciążenie masą 10 kg i ciśnieniem 4 MPa
Fig. 6. Response of system with flow control on a given flow step from 0,2 to 0,4 dm³/s. Mass load 10kg and pressure 8 MPa

We wszystkich badaniach symulacyjnych obliczane były wartości wybranych całkowitych wskaźników regulacji. Wybrane wartości wskaźnika I_{IAE} uzyskane dla różnych obciążeń zestawiono na rysunku 8, a wskaźnika I_{ITAE} na rysunku 9.



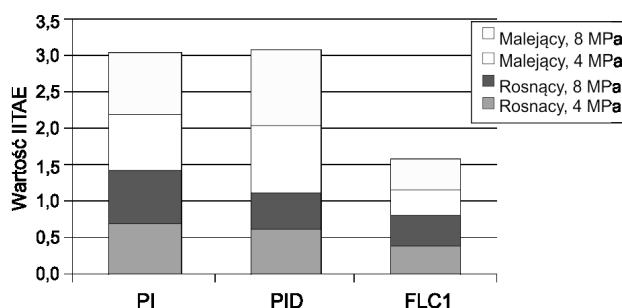
Rys. 7. Odpowiedź układu z regulacją wydajności na zadany skok wydajności na wymuszony skok wydajności z 0,2 do 0,4 dm³/s. Obciążenie masą 1500 kg i ciśnieniem 8 MPa

Fig. 7. Response of system with flow control on a given flow step from 0,2 to 0,4 dm³/s. Mass load 1500kg and pressure 8 MPa



Rys. 8. Porównanie wartości wskaźnika jakości sterowania I_{IAE} . Wymuszenie sygnałami: trapezowym, skokowym rosnącym i malejącym. Masa obciążenia 1500 kg i ciśnienia 4 i 8 MPa

Fig. 8. Comparison of I_{IAE} performance index. Input function by trapezoidal and step signal ascending and descending. Mass load 1500 kg and pressures 4 and 8 MPa



Rys. 9. Porównanie wartości wskaźnika jakości sterowania I_{ITAE} . Wymuszenie sygnałem skokowym rosnącym i malejącym. Masa obciążenia 1500 kg i ciśnieniami 4 i 8 MPa

Fig. 9. Comparison of I_{ITAE} performance index. Input function by step signal ascending and descending. Mass load 1500 kg and pressures 4 and 8 MPa

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wartości wskaźników I_{IAE} oraz I_{ITAE} wykazano możliwość uzyskania poprawy jakości sterowania przy zastosowaniu regulatorów opartych na logice rozmytej o strukturze PI. Szczególnie dla małych i średnich obciążeń układ z regulatorem FLC charakteryzuje się szybszym dojściem do wartości zadanej i szybszym zanikaniem oscylacji. W zakresie dużych obciążeń zachowanie regulatorów PI, PID i FLC było podobne. W większości przeprowadzonych symulacji zaobserwowano większą zdolność tłumienia oscylacji przez regulator FLC w porównaniu z układami liniowymi.

Dzięki możliwości zmiany struktury wejść regulatora FLC możliwe jest jego dalsze udoskonalanie. W ramach dalszych badań można uwzględnić zachowanie regulatora w zależności od wartości wydajności pompy lub ciśnienia w układzie, co pozwoli na poprawę jego właściwości, szczególnie w zakresie dużych obciążeń.

Literatura

- [1] Czogała E., Pedrycz W., *Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych*, PWN, Warszawa 1985.
- [2] Czyżycki W., Lisowski E., *Badania symulacyjne układu hydraulicznego stałej mocy z regulatorem rozmytym*, XX Konferencją Naukową Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane 2007.
- [3] Filo G., *Pressure control in band-saw hydraulic system using the fuzzy logic*, Przegląd Mechaniczny, 5, 2009.
- [4] Jędrzykiewicz Z., *Teoria sterowania układów jednowymiarowych*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2002.
- [5] Lachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [6] Kwaśniewski J., *Programowalne sterowniki przemysłowe w systemach sterowania*, ROMA-POL, Kraków 1999.
- [7] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
- [8] Yager R.R., Filew D.P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1995.