

Michał JAKUBOWSKI*
Krystian NOWAKOWSKI*
Krzysztof ZAWIRSKI*

ROZMYTY REGULATOR PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ ODPORNY NA ZMIANY BEZWŁADNOŚCI

W ramach niniejszej pracy zaprezentowane zostały rozmyte regulatory prędkości obrotowej odporne na zmiany bezwładności. Głównym celem pracy było zaprojektowanie oraz właściwe nastrojenie regulatorów rozmytych typu PD oraz PI. Opracowane regulatory zastosowano w układzie napędowym z silnikiem prądu stałego. Projektowanie przeprowadzono w taki sposób, aby badane układy napędowe wykazywały dobre właściwości regulacyjne w szerokim zakresie zmiany bezwładności obciążenia. Analizie poddano szereg badań symulacyjnych, w ramach których rozpatrywano wybrane wskaźniki jakości dla różnych wartości bezwładności oraz momentu obciążenia. Dokonano także analizy porównawczej badanych regulatorów rozmytych z klasycznym regulatorem PID. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdzono na gruncie praktyki.

SŁOWA KLUCZOWE: regulator rozmyty, sterowanie rozmyte, sterowanie odporne

1. WPROWADZENIE

1.1 Rozmyte układy sterowania

Klasyczne układy regulacji oparte są na liczbowej reprezentacji sygnałów wejściowych i wyjściowych. Alternatywą dla takiego podejścia mogą być układy sterowania oparte na logice rozmytej. W rozmytych układach sterowania sygnały reprezentowane są przy pomocy zmiennych lingwistycznych. Dzięki temu do sterowania obiektem wykorzystywany jest zbiór reguł w formie zdań warunkowych.

Pozornie odejście od ostrej reprezentacji wartości zmiennych procesu regulacji na rzecz rozmytej i niejasnej interpretacji lingwistycznej wydaje się być pozbawione celu. Jednak obserwacje otaczającego świata zmuszają do wyciągnięcia odmiennych wniosków. Jako dowód można podać zachowanie człowieka, którego działanie w życiu codziennym oparte jest na nieostrych przesłankach, a mimo to okazuje się ono być skutecznym [2].

* Politechnika Poznańska.

1.2 Metodologia prowadzonych badań

Rozmyty regulator prędkości obrotowej, opracowany w ramach niniejszej pracy, zastosowany został do sterowania układu napędowego z silnikiem prądu stałego. Silnik prądu stałego sterowany jest napięciowo, przy pomocy nawrotnego przekształtnika impulsowego. Do przeprowadzonych badań zastosowano silnik o następujących parametrach znamionowych: moc - 56 W, napięcie - 12 V, prąd - 7,3 A, prędkość - 3000 obr/min, moment - 0.15 Nm. Sygnałem zadanym są skoki prędkości obrotowej pomiędzy wartościami 0, 2000, -2000, -1000, 1000 obr/min.

W badanym układzie napędowym możliwa jest zmiana momentu obciążenia silnika oraz bezwładności. Zmianę momentu obciążenia zrealizowano przy użyciu drugiego silnika, połączonego z badanym silnikiem sprzęgłem sztywnym. Zadawano wartości momentu oporowego wynoszące 0, 0,1, -0,1 oraz -0,05 Nm. Zmianę bezwładności uzyskano natomiast przy użyciu krążków zakładanych na wał silnika. Badania przeprowadzono dla trzech różnych wartości bezwładności: małej - 180 gcm², średniej - 5110 gcm² oraz dużej - 6150 gcm².

Do obiektywnego porównania działania regulatorów zastosowano czasowe i całkowite wskaźniki jakości. Wskaźniki czasowe odnoszą się do chwilowych wartości prędkości przyjmowanych w czasie. Zastosowano następujące wskaźniki:

- t_n – czas narastania do 90% wartości zadanej,
- t_r – czas regulacji, po którym uchyb regulacji mieści się w zakresie $\pm 3\%$ wartości sygnału wyjściowego w stanie ustalonym,
- e_{max} – maksymalna wartość uchybu odnotowana w procesie regulacji.

Wskaźniki całkowite natomiast opisują proces regulacji w całej jego rozciągłości. Zastosowano następujące wskaźniki:

- $ISE = \int_{t_e}^{t_k} e^2 dt$ - całka z kwadratu uchybu,
- $ITSE = \int_{t_e}^{t_k} e^2 t dt$ - całka z iloczynu kwadratu uchybu i czasu,
- $FM = \int_{t_e}^{t_k} U_s I_s dt$ - zużycie energii.

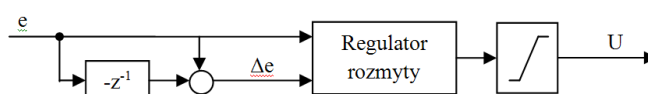
2. SYNTEZA REGULATORÓW

2.1. Rozmyty regulator prędkości typu PD

Przepływ informacji w systemie rozmytym można podzielić na trzy etapy: fuzyfikację, wnioskowanie na podstawie określonej bazy reguł oraz defuzyfikację. Fuzyfikacja jest to rozmywanie wejścia. Na podstawie ostrej wartości liczbowej

tworzona jest jej rozmyta reprezentacja. Wnioskowanie jest centralnym i najważniejszym elementem działania systemu rozmytego. Podstawą wnioskowania są utworzone reguły, na podstawie których wyciągane są wnioski. Ostatnim etapem działania systemu rozmytego jest defuzyfikacja, czyli wyostrzanie wyjścia. Na podstawie wyznaczonego rozkładu rozmytej zmiennej wyjściowej wyznaczana jest jej deterministyczna wartość [1] [2].

Regulator typu PD zaprojektowany został w strukturze Mamdaniego. Schemat rozmytego regulatora prędkości typu PD przedstawiony został na rys 2.1.



Rys. 2.1. Struktura regulatora rozmytego typu PD

Zaprezentowany regulator posiada dwa sygnały wejściowe: uchyb regulacji i zmianę uchybu oraz jeden sygnał wyjściowy, którym jest napięcie sterujące silnika prądu stałego.

Najważniejszym z punktu widzenia jakości pracy regulatora jest właściwe dobranie kształtu funkcji przynależności sygnałów wejściowych i wyjściowych oraz utworzenie właściwej bazy reguł. Dla regulatora typu PD zastosowano funkcje przynależności typu trójkątnego i trapezowego dla sygnałów wejściowych i wyjściowych. Obie te figury mają ramiona będące odcinkami prostymi, co upraszcza wyznaczanie wartości funkcji przynależności.

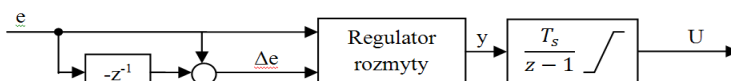
Baza reguł jest kluczowym elementem regulatora rozmytego. Na jej podstawie odbywa się centralny proces pracy regulatora jakim jest wnioskowanie. Baza reguł, utworzona na podstawie wiedzy eksperckiej, zawiera informacje o zachowaniu regulatora dla różnych kombinacji sygnałów wejściowych. Reguły dla regulatora rozmytego typu PD zebrano w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Baza reguł regulatora PD

Δe	e	duży-	średni-	mały-	zero	mały+	średni+	duży+
-		duży-	duży-	średni-	mały-	zero	mały+	duży+
zero		duży-	duży-	średni-	zero	średni+	duży+	duży+
+		duży-	mały-	zero	mały+	średni+	duży+	duży+

2.2. Rozmyty regulator prędkości typu PI

Regulator rozmyty typu PI stanowi rozwinięcie przedstawionej wcześniej struktury typu PD o dodanie całki sygnału wyjściowego. W przeciwieństwie do regulatora typu PD regulator typu PI bazuje na strukturze Takagi - Sugeno - Kanga. Schemat rozmytego regulatora typu PI przedstawia rys. 2.2.



Rys. 2.2. Struktura regulatora rozmytego typu PI

Ze względu na zastosowanie w strukturze TSK funkcji przynależności typu singleton, zmniejszono ich liczbę dla sygnału uchybu. Reguły dla regulatora rozmytego typu PD zebrano w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Baza reguł regulatora PI

Δe	e	duży-	mały-	zero	mały+	duży+
-		duży-	duży-	mały-	zero	duży+
zero		duży-	mały-	zero	mały+	duży+
+		duży-	zero	mały+	duży+	duży+

3. ANALIZA WYNIKÓW

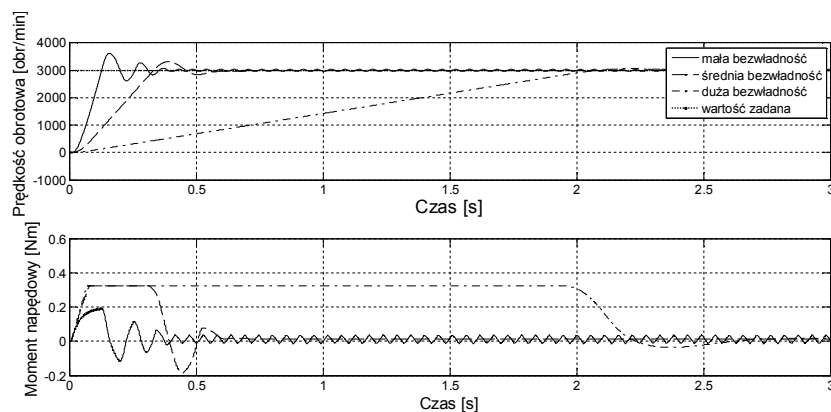
3.1. Analiza wyników symulacyjnych

Przeprowadzono dwa rodzaje badań symulacyjnych dla każdego z regulatorów: rozruchu od postoju do prędkości znamionowej bez obciążenia oraz pracę silnika pod obciążeniem. Oba badania przeprowadzono dla trzech różnych wartości bezwładności obciążenia. Na rys. 3.1 przedstawiono rozruch silnika dla regulatora rozmytego typu PI.

Analizę uzyskanych wyników badań symulacyjnych rozpoczęto od wyznaczenia wybranych wskaźników jakości. Wskaźniki jakości dla rozmytych regulatorów typu PD oraz PI przedstawia tabela 3.1.

Zaprojektowany regulator rozmyty typu PD wykazywał bardzo dobre właściwości regulacyjne dla układu o dużej bezwładności. Uzyskane przebiegi cechuje brak przeregulowań oraz krótki czas narastania dzięki długiej pracy w ograniczeniu. Właściwości regulacyjne dla układów o małej bezwładności nie były zadowalające, co stało się powodem opracowania rozmytej struktury typu PI.

Regulator typu PI posiada dobre właściwości regulacyjne dla układów zarówno z małą jak i dużą bezwładnością. W porównaniu do regulatora typu PD dla małych bezwładności oscylacje momentu mają znacznie mniejszą częstotliwość a całkowite wskaźniki jakości są nawet o rząd wielkości mniejsze. Natomiast dla dużej bezwładności obciążenia regulator rozmyty typu PI sprowadza uchyb ustalony do zera powodując jedynie niewielkie przeregulowanie.

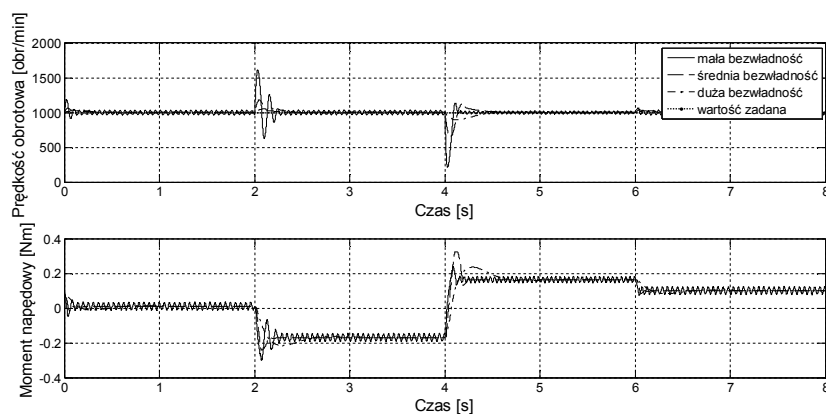


Rys. 3.1. Regulator rozmyty typu PI - rozruchy silnika

Tabela 3.1. Wskaźniki jakości – rozruchy

Regulator	Bezwładność	Wskaźniki jakości					
		czasowe			całkowe		
		t_n	t_r	c_{max}	ISE	ITSE	FM
Typu PD	Mała	0,05 s	-	200 obr/min	$4,017 \cdot 10^{-5}$	$3,12 \cdot 10^5$	240,5
	Średnia	0,27 s	0,4 s	200 obr/min	$9,588 \cdot 10^6$	$1,323 \cdot 10^5$	148,7
	Duża	1,83 s	2,07 s	0 obr/min	$6,126 \cdot 10^7$	$3,116 \cdot 10^6$	326,7
Typu PI	Mała	0,12 s	0,38 s	700 obr/min	$5,94 \cdot 10^{-5}$	$2,689 \cdot 10^4$	13,98
	Średnia	0,3 s	0,55 s	300 obr/min	$1,254 \cdot 10^6$	$1,117 \cdot 10^5$	53,12
	Duża	1,9 s	2,32 s	60 obr/min	$6,434 \cdot 10^6$	$3,326 \cdot 10^6$	342,1

Kolejnym etapem badań było przetestowanie pracy silnika pod obciążeniem. rys. 3.2 przedstawia pracę rozmytego regulatora typu PI dla zmiennego momentu obciążenia.



Rys. 3.2. Regulator rozmyty typu PI - praca pod obciążeniem

Tabela 3.2. Wskaźniki jakości - praca pod obciążeniem

Regulator	Bezwładność	Wskaźniki jakości			
		czasowe	całkowe		
		e_{\max}	ISE	ITSE	FM
Typu PD	Mała	200 obr/min	$7637 \cdot 10^5$	$3,236 \cdot 10^6$	859,8
	Średnia	200 obr/min	$7,856 \cdot 10^4$	$1,887 \cdot 10^4$	498,2
	Duża	0 obr/min	259,8	1311	152,6
Typu PI	Mała	800 obr/min	$5,266 \cdot 10^4$	$1,678 \cdot 10^5$	113,6
	Średnia	350 obr/min	$1,176 \cdot 10^4$	$4,304 \cdot 10^4$	116,4
	Duża	100 obr/min	3232	$1,116 \cdot 10^4$	117,5

Regulator rozmyty typu PD podczas pracy pod obciążeniem cechował się bardzo dobrą dynamiką. Niestety ta właściwość okazała się problemem dla układu o małej bezwładności ze względu na powstające niegasnące oscylacje wartości zadanej. Układ o średniej bezwładności prezentuje dobre właściwości regulacyjne wartości zadanej przy jednoczesnych dużych tętnieniach momentu. Dla dużej bezwładności uzyskano uchyb ustalony rzędu 0,8% wartości zadanej przy jednoczesnej dużej dynamice i braku oscylacji.

Lepsze właściwości regulacyjne uzyskano dla rozmytego regulatora typu PI. W układzie z małą bezwładnością pojawiały się jedynie niewielkie niegasnące oscylacje momentu i wartości zadanej. Dla wszystkich układów występowały przeregulowania wartości zadanej po skoku momentu obciążającego, które jednak były mocno tłumione. Najmniejsze przeregulowanie pojawiło się dla układu o dużej bezwładności.

3.2. Porównanie regulatorów rozmytych z klasycznym regulatorem PID

W celu porównania działania regulatorów rozmytych z klasycznym regulatorem PID stworzono implementację regulatora PID i wyznaczono dla niej analizowane wskaźniki jakości. Regulator PID nastrojono ręcznie. Uwzględniając znacznie mniejszą złożoność obliczeniową, regulator klasyczny działał z pięciokrotnie większą częstotliwością wykonywania pętli regulacji.

Tabela 3.3 przedstawia porównanie wskaźników jakości uzyskanych przez regulatory. Zapisano w niej nazwę regulatora, który uzyskał najkorzystniejszą wartość dla danego wskaźnika jakości.

Regulator rozmyty PD we wszystkich przypadkach cechował się najmniejszym czasem narastania t_n i przeregulowaniem e_{\max} . W przypadku badań dla układu z małą bezwładnością na skutek obecności przeregulowań najmniejsze wartości wskaźników ISE i ITSE osiągnął regulator klasyczny. W pozostałych przypadkach wszystkie regulatory osiągały wartości zbliżone, różniące się do 20%. Dla każdego procesu regulator rozmyty PI wykazał największą oszczędność energii.

Tabela 3.3. Porównanie wskaźników jakości regulatorów rozmytych z regulatorem PID

Praca	Bewładność	Wskaźniki jakości			
		czasowe	całkowe		
		e_{\max}	ISE	ITSE	FM
Rozruch	Mała	F.PD	PID	PID	F.PI
	Średnia	F.PD	PID	PID	F.PI
	Duża	F.PD	PID	F.PD	F.PI
Obciążenie	Mała	F.PD	PID	PID	F.PI
	Średnia	F.PD	F.PD	F.PD	F.PI
	Duża	F.PD	F.PD	F.PD	F.PI

Na podstawie zamieszczonego porównania widać wyraźnie, że regulator rozmyty PD cechował się największą dynamiką układu w sensie czasowych wskaźników jakości. Jego bardzo duże wzmocnienie pozwoliło wykorzystać maksymalną dynamikę obiektu. Niestety spowodowało zużycie energii kilkukrotnie większe niż w przypadku regulatora rozmytego PI oraz niedopuszczalne tętnienia w zakresie bliskim wartości zadanej. Regulator rozmyty PI natomiast cechował się znacznie mniejszą dynamiką, za to niepodważalnie najlepszą energooszczędnością.

Przedstawione badania bardzo źle świadczą o regulatorach rozmytych w sensie wskaźników całkowych ISE i ITSE. W tym jednak zakresie dobrze spisuje się regulator klasyczny PID. Należy podejrzewać, że powodem tego jest zastosowanie w nim fuzji członów całkującego i różniczkującego. Można więc spodziewać się, że stworzenie regulatora rozmytego PID pozwoliłoby uzyskać najlepsze parametry regulacji.

4. PODSUMOWANIE

Opracowane w trakcie badań symulacyjnych struktury rozmytych regulatorów poddano testom na obiekcie rzeczywistym. Do tego celu przygotowaną platformę sprzętową opartą na układzie mikroprocesorowym, która umożliwiła implementację różnorodnych struktur regulacji. Przeprowadzone testy na obiekcie fizycznym dały bardzo podobne rezultaty do badań symulacyjnych, co jednoznacznie potwierdziło poprawność syntezy regulatorów.

Uzyskane w trakcie badań wyniki nie świadczą jednoznacznie o wyższości regulatorów rozmytych nad klasycznym. Widać w nich jednak, że każdy z nich sprawdza się dobrze dla innego zadania regulacji – rozmyty PD pozwala wykorzystać pełną dynamikę redukując uchyb w najkrótszym możliwym czasie, rozmyty PI natomiast zapewnia stabilizację na poziomie wartości zadanej przy użyciu najmniejszej możliwie ilości energii.

Zaprezentowane regulatory sprawdziły się dobrze w poszczególnych obszarach badań, żaden z nich jednak nie był wyraźnie dobry w całej rozciągłości regulacji.

Połączenie ich działania w taki sposób, aby każdy z nich do układu regulacji wniósł swoje zalety, eliminując przy tym wady drugiego powinno więc dać poprawę we wszystkich prezentowanych parametrach regulacji. Powyższe stwierdzenie zachęca do przeprowadzenia badań struktury rozmytej, łączącej w sobie działanie zarówno różniczkowania jak i całkowania.

Zaprezentowane wyniki odnośnie wskaźnika zużycia energii pozwalają mieć nadzieję na znaczną minimalizację zużycia energii w potencjalnej aplikacji. Jest to kierunek rozwoju, który w obecnych realiach zdecydowanie zachęca do podjęcia dalszych prac badawczych nad rozmytymi strukturami sterowania.

LITERATURA

- [1] Rutkowska, D., Piliński, M., Rutkowski, L. *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Warszawa: Wydawnictwo PWN, 1997.
- [2] Piegat, A. *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2003.
- [3] Zhang X. M., Long S. Y., *Simulation study of fuzzy PID controller for DC motor based on DSP*, 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 978-0-7695-4792-3/13, 2012 IEEE, DOI 10.1109/ICICEE.2012.430.

FUZZY SPEED CONTROLLER ROBUST TO INERTIA CHANGES

This paper presents fuzzy speed controllers robust to inertia changes. The main purpose of this paper was to design and tune fuzzy PD and PI controllers. The fuzzy controller in drive system with DC motor were used. The project was performed so that drive systems were revealed good regulatory properties over a wide range of inertia changes. Analysis of series simulation studies including selected quality indicators for different values of inertia and load torque was considered. Furthermore, comparative analysis of fuzzy controller with classical PID controller was conducted. The simulation researches were confirmed on the basis of practice as well.