

## Analiza porównawcza pracy układów regulacji z regulatorami PID o zmodyfikowanej strukturze

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki porównania pracy dwóch układów regulacji. Jednym z nich był układ składający się z obiektu i opracowanego przez autora uniwersalnego regulatora PID o zmiennej strukturze. Drugi układ, to struktura dwupętlowa Model-Following Control (MFC) wyposażona oprócz obiektu także w jego model. Badania przeprowadzono dla rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej, pracy stabilizacyjnej oraz pracy programowej. Dokonywano w obu układach perturbacji struktury i parametrów obiektu.

**Abstract.** In the paper comparison test results for two control systems are presented. One of them comprises a control plant and a universal PID controller of variable structure developed by the Author. The other is a two-loop Model-Following Control structure, which includes also a plant model beside the plant itself. The tests have been carried out for the start-up and stepwise set-point changes, programmed and fixed set-point control. The control structure and plant parameters have been perturbed in both systems. (*Comparative analysis of control systems with PID controllers of modified structure*).

**Słowa kluczowe:** regulatory PID, Model-Following Control, statyczne procesy regulacji, regulatory o zmiennej strukturze.

**Keywords:** PID controllers, Model-Following Control, control processes with self-regulation, variable structure controllers.

### Wstęp

W przemysłowych systemach automatyki większość układów regulacji stanowią układy jednoobwodowe z regulatorami realizującymi algorytmy P, I, D. Nie zawsze jednak tradycyjny regulator PID potrafi zapewnić wymaganą jakość regulacji. Uzyskanie dobrej jakości regulacji jest szczególnie trudne jeśli jednocześnie trzeba ją zapewnić dla różnych rodzajów pracy, takich jak rozruch, praca programowa i praca stabilizacyjna. Dodatkową trudność mogą stwarzać perturbacje struktury i parametrów obiektu. Dlatego czynione są próby syntezy nowych algorytmów działania regulatorów. Przedmiotem prezentowanych w artykule badań są dwa układy regulacji. Jednym z nich jest układ składający się z obiektu i opracowanego przez autora uniwersalnego regulatora PID o zmiennej strukturze (ZS) [1-3]. Drugi układ to struktura dwupętlowa Model-Following Control (MFC) wyposażona oprócz obiektu także w jego model [4-6]. We wcześniejszych publikacjach autorzy przedstawiali już sposób działania i właściwości obydwu układów regulacji. Publikowano również wyniki ich badań. Każdy z układów badany był jednak oddzielnie i wyniki badań każdego z nich porównywano zwykle z klasycznym układem regulacji PID [1-6]. Dotychczas nie były prowadzone badania porównawcze obydwu tych układów. Prezentowane badania miały na celu wypełnić tę lukę. W badaniach porównana została jakość regulacji układu z regulatorem o zmiennej strukturze z jakością pracy układu MFC. W szczególności badane było zachowanie się obydwu układów w czasie rozruchu, pracy stabilizacyjnej oraz programowej. Badana była również ich odporność na perturbacje obiektu.

Do badań użyto regulatorów rzeczywistych tzn. takich, w których istnieje ograniczenie sygnału sterującego.

### **Wymagania stawiane regulatorom**

W czasie rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej regulator z ograniczeniem sygnału wyjściowego powinien zapewnić osiągnięcie przez wielkość regulowaną  $X$  wartości zadanej  $X_o$  w najkrótszym czasie bez przeregulowania.

Dla pracy programowej, przyjmując model obiektu w postaci

$$(1) \quad K(s) = \frac{X_m e^{-s\tau}}{1 + sT}$$

gdzie:  $X_m$  – wzmacnienie modelu obiektu,  $\tau$  – zastępcze opóźnienie modelu,  $T$  – zastępcza stała czasowa modelu, optymalnym przebiegiem wielkości regulowanej jest przebieg powtarzający program wartości zadanej  $X_o(t)$  z opóźnieniem równym opóźnieniu modelu obiektu.

Dla pracy stabilizacyjnej mogą być stosowane dowolne kryteria oceny jakości regulacji.

Do oceny jakości regulacji obydwu regulatorów dla różnych rodzajów pracy i różnych perturbacji obiektu zastosowano dwa całkowite wskaźniki w postaci

$$(2) \quad I = \int |e(t)| dt$$

$$(3) \quad I_\tau = \int |X_o(t - \tau) - X(t)| dt$$

Wskaźnik  $I$  zastosowano do oceny pracy w czasie rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej, a także dla pracy stabilizacyjnej.

Wskaźnik  $I_\tau$  zastosowano do oceny pracy programowej. Jest to typowy wskaźnik, w którym opóźniono wartość zadaną  $X_o(t)$  o czas  $\tau$  w celu zapewnienia jego zerowej wartości, w czasie pracy programowej dla optymalnego przebiegu wielkości regulowanej.

### **Regulator o zmiennej strukturze [1,2]**

Podstawą działania regulatora o zmiennej strukturze jest algorytm PID.

- Od momentu uruchomienia układu regulacji, skokowej zmiany wartości zadanej lub podczas regulacji programowej od rozpoczęcia zmian wartości zadanej nastawy zakresu proporcjonalności  $P = P_1$  (4), stałej całkowania  $T_i = T_{i1}$  (5) i stałej różniczkowania  $T_d = T_{d1}$  (6) regulatora powinny być następujące [7].

$$(4) \quad P_1 = \frac{T}{T + 0,5\tau} \frac{\tau}{T} X_m$$

$$(5) \quad T_{i1} = T + 0,5\tau$$

$$(6) \quad T_{d1} = (0,5 \div 1) \frac{T}{T + 0,5\tau} \tau$$

- Po zakończeniu zmian wartości zadanej jeszcze przez czas całkowania sygnału błędu

**VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

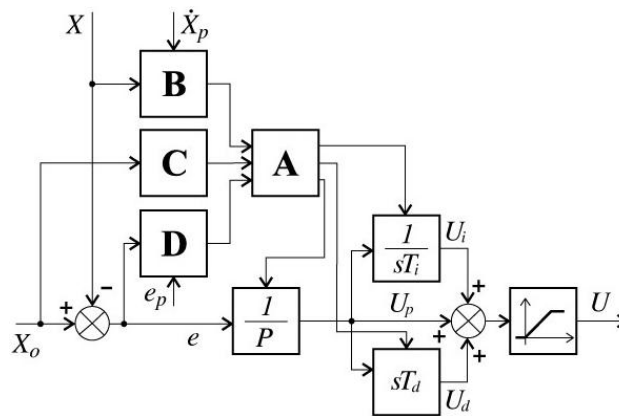
(7)  $t_c = \tau$

nastawy regulatora nie ulegają zmianie. Po upływie czasu  $t_c$  całkowanie jest blokowane tzn.  $T_i = \infty$ . Regulator staje się regulatorem PD z podsterowaniem.

- Po zablokowaniu całkowania w momencie zakończenia procesu przejściowego, gdy bezwzględna wartość pochodnej wielkości regulowanej  $dX/dt$  nie przekracza zadanego progu  $\dot{X}_p$  lub bezwzględna wartość błędu regulacji  $e$  jest mniejsza od zadanego progu  $e_p$ , całkowanie jest odblokowane i przywracana jest stała całkowania  $T_{i1}$ .
- Po czasie

(8)  $t_{c1} = 3\tau$

dokonywana jest zmiana nastaw na nastawy dla pracy stabilizacyjnej  $P = P_2$ ,  $T_i = T_{i2}$ ,  $T_d = T_{d2}$ .

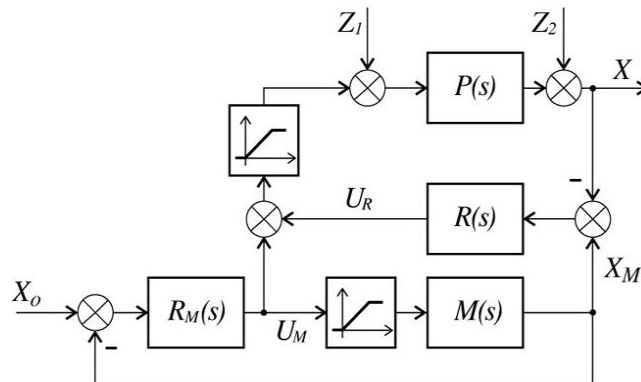


Rys.1. Schemat blokowy regulatora PID o zmiennej strukturze

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy regulatora PID z ograniczeniem sygnału wyjściowego i z wyżej opisanym sposobem zmiany struktury. Na schemacie zaznaczono oprócz typowych bloków regulatora PID bloki **A**, **B**, **C** i **D** służące do zmiany jego struktury:

**Model-Following Control (MFC) [4-6]**

Układ MFC przedstawiony na rysunku 2 po raz pierwszy opisany został w [4]. Składa się on z dwóch obwodów regulacyjnych. Pierwszy z nich to układ regulacji modelu z modelem obiektu  $M(s)$  i regulatorem modelu  $R_M(s)$ . Sygnał wyjściowy z tego regulatora  $U_M$  jest nie tylko sygnałem sterującym modelem ale również podstawowym sygnałem sterującym obiektem w postaci rzeczywistego procesu  $P(s)$ .



Rys.2. Schemat blokowy układu MFC

Drugi to układ korekcyjny z obiektem  $P(s)$  i regulatorem korekcyjnym  $R(s)$ . Zadaniem tego układu jest przeciwdziałanie powstawaniu różnic pomiędzy sygnałem wyjściowym z modelu  $X_M$  i sygnałem wyjściowym obiektu  $X$ . W ten sposób może on przeciwdziałać efektom niedoskonałości przyjętego modelu procesu i możliwym perturbacjom procesu w postaci zmian jego struktury czy też parametrów. Układ ten jest także odpowiedzialny za zregulowanie zakłóceń działających na obiekt.

Regulator korekcyjny swoje zadania może w pełni wykonać pod warunkiem liniowości układu regulacji. Do badań użyto regulatorów rzeczywistych tzn. takich, w których istnieje ograniczenie sygnału sterującego. Dlatego też w pewnych sytuacjach, gdy sygnał wyjściowy z regulatora modelu jest nasycony lub bliski nasyceniu, działanie w tym czasie regulatora korekcyjnego może być niemożliwe lub ograniczone.

### Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono w środowisku MATLAB z obiektami w postaci: Obiekt 1 – inercja pierwszego rzędu z opóźnieniem transportowym,  $T_1 = 12,21s$ ,  $\tau_1 = 4,009s$ ,  $X_m = 1$ ; Obiekt 2 – inercja czwartego rzędu o różnych stałych czasowych z opóźnieniem transportowym,  $T_1 = 10s$ ,  $T_2 = 3s$ ,  $T_3 = 1s$ ,  $T_4 = 0,5s$ ,  $\tau_1 = 1,222s$ ,  $X_m = 1$ ; Obiekt 3 – inercja trzeciego rzędu o jednakowych stałych czasowych  $T_1 = T_2 = T_3 = 4,977s$ ,  $X_m = 1$ . Obiekty te można było aproksymować wspólnym modelem (1) o parametrach:  $T = 12,21s$ ,  $\tau = 4,009s$ ,  $X_m = 1$ . Zastosowanie wspólnego modelu pozwoliło oceniać układy regulacji z obiektami o różnych strukturach przy pomocy całkowitych wskaźników jakości.

Wspólny model pozwolił również częściowo ujednoczyć nastawy regulatorów dla wszystkich obiektów.

Regulator ZS ze zmienną strukturą posiadał następujące nastawy dla rozruchu zmian wartości zadanej i pracy programowej:  $P_1 = 28,21\%$ ,  $T_{i1} = 14,21s$ ,  $t_c = 4,009s$  oraz  $t_{c1} = 12,03s$  dobrane zgodnie z (4), (5), (7), (8) – jednakowe dla wszystkich obiektów. Nastawę stałej różniczkowania oszacowano na podstawie (6) i następnie doświadczalnie skorygowano minimalizując wskaźnik (3). Wynosiła ona odpowiednio dla Obiektu 1 –  $T_{d1} = 1,785s$ , Obiektu 2 –  $T_{d1} = 2,90s$ , Obiektu 3 –  $T_{d1} = 3,80s$ . Nastawy dla pracy stabilizacyjnej dla Obiektu 1 dobrano z kryterium całki modułu błędu regulacji (IAS) dla skokowego zakłócenia na wejściu obiektu i modelu (1) [8]:  $P_2 = 24,99\%$ ,  $T_{i2} = 6,04s$ ,  $T_{d2} = 1,66s$ . Powyższe nastawy dla pozostałych dwóch obiektów nie zapewniały zadawalającej jakości regulacji i dlatego dobrano je doświadczalnie, tak aby odpowiedzi na zakłócenia skokowe i impulsowe miały charakter aperiodyczny i ich amplituda była

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

możliwie mała. Nastawy te wynosiły dla Obiektu 2:  $P_2 = 20,00\%$ ,  $T_{i2} = 7,69$  s,  $T_{d2} = 3,00$  s a dla Obiektu 3:  $P_2 = 15,87\%$ ,  $T_{i2} = 8,70$  s,  $T_{d2} = 3,00$  s.

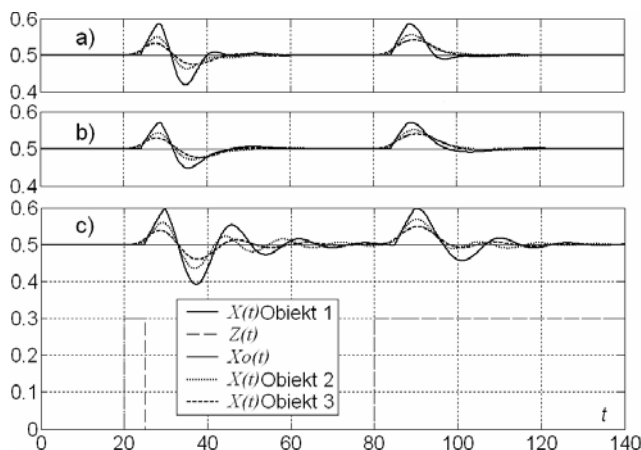
W strukturze MFC przyjęto model obiektu  $M(s)$  w postaci (1). Regulator modelu  $R_M(s)$  miał następujące nastawy:  $P_M = 32,26\%$ ,  $T_{i1} = 24,10$  s,  $T_{dM} = 1,60$  s. Nastawy te dobrano doświadczalnie tak aby w czasie rozruchu dla wartości zadanej  $X_o = 0,5$  uzyskać przebieg aperiodyczny z najkrótszym czasem regulacji. Badano również tę strukturę z nastawami regulatora modelu identycznymi jak w regulatorze ZS dla pracy programowej (struktura MFC1). Z uwagi na to, że często głównym zadaniem regulatora korekcyjnego jest zregulowanie zakłóceń, przyjęto dla poszczególnych obiektów jego nastawy identyczne jak w regulatorze ZS dla pracy stabilizacyjnej.

Sygnaly sterujące były ograniczone od 0 do 1.

Eksperymenty przeprowadzono wprowadzając perturbacje parametrów obiektu o +20% lub -20%. Podstawą do wyliczenia perturbacji opóźnienia było zastępcze opóźnienie modelu obiektu  $\tau$ . W danym eksperymencie perturbowano tylko jeden parametr. Wyjątek stanowiły stałe czasowe obiektu, które perturbowano jednocześnie wszystkie. Dla Obiektu 3 nie wykonywano perturbacji polegającej na zmniejszeniu opóźnienia, bo w jego strukturze nie było opóźnienia.

Tabela 1. Wskaźniki jakości  $I$  układów regulacji dla zakłóceń podawanych na wejście obiektu - jednakowe dla układów ZS i MFC

Perturbacje 2	Obiekt 1	Perturbacje 1	
		Obiekt 2	Obiekt 3
brak	1,451	1,071	0,839
$X_m \times 1,2$	1,960	1,148	0,842
$X_m \times 0,8$	1,355	1,051	0,853
$T \times 1,2$	1,462	1,191	1,175
$T \times 0,8$	2,121	1,033	0,791
$+ 0,2 \times \tau$	2,719	1,670	1,192
$- 0,2 \times \tau$	1,194	0,974	-

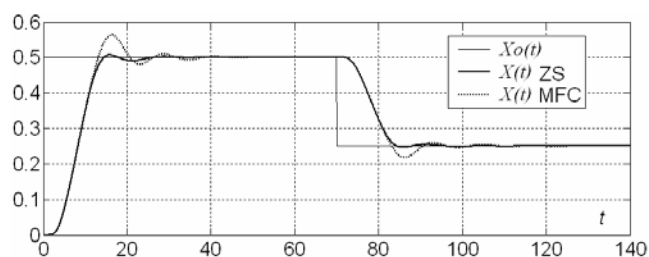


Rys.3. Przykładowe odpowiedzi wielkości regulowanej na zakłócenia impulsowe i skokowe; dla trzech obiektów a) bez perturbacji, b) dla perturbacji  $X_m \times 0,8$ , c) dla perturbacji  $+ 0,2 \times \tau$  - jednakowe dla układów ZS i MFC

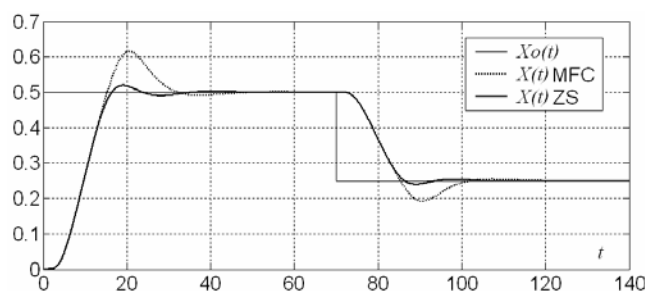
Dla oceny pracy regulatora ZS i układu MFC przeprowadzono trzy rodzaje eksperymentów. Pierwszym z nich było podanie w obydwu układach ZS i MFC impulsowego i skokowego zakłócenia na wejście obiektu – tabela 1 i przykładowy rysunek 3. W drugim dokonywano rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej – tabela 2 i przykładowe rysunki 4 - 6. W trzecim dokonywano programowych zmian wartości zadanej  $X_o(t)$  – tabela 3 i przykładowe rysunki 7 - 9. W eksperymencie tym badano dodatkowo układ MFC – z nastawami regulatora modelu dla pracy programowej (MFC1). Wpływ zastosowania tych nastaw na jakość regulacji dla rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej obrazują tabela 4 i rysunek 10.

Tabela 2. Wskaźniki jakości / układów regulacji dla rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej

Perturbacje 2	UKŁAD	Obiekt 1	Perturbacje 1	
			Obiekt 2	Obiekt 3
brak	ZS	6,076	6,361	6,624
	MFC	5,943	6,860	7,226
$X_m \times 1,2$	ZS	6,270	6,187	6,300
	MFC	6,246	6,592	6,898
$X_m \times 0,8$	ZS	7,145	7,643	7,905
	MFC	7,184	7,720	8,003
$T \times 1,2$	ZS	6,495	7,557	8,186
	MFC	7,110	8,925	9,976
$T \times 0,8$	ZS	6,143	5,475	5,568
	MFC	6,477	5,921	5,872
$+ 0,2 \times \tau$	ZS	7,314	7,349	7,428
	MFC	8,032	8,676	8,789
$- 0,2 \times \tau$	ZS	5,403	5,864	-
	MFC	5,966	5,983	-



Rys.4. Odpowiedzi Obiektu 2 bez perturbacji na skokowe zmiany  $X_o$  w układach ZS i MFC

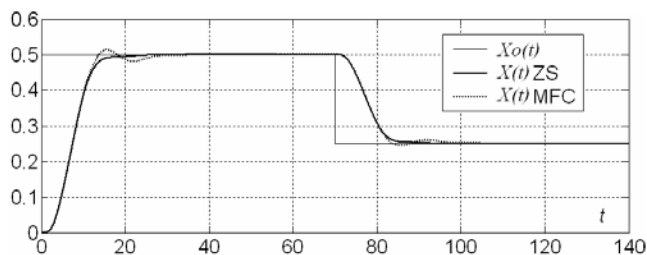


Rys.5. Odpowiedzi Obiektu 2 na skokowe zmiany  $X_o$  w układach ZS i MFC dla perturbacji  $T \times 1,2$

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Regulator ZS posiada taką właściwość, że uzyskiwany charakter przebiegów dla różnych wartości zadanych jest podobny – jego nastawy nie zależą od wartości zadanej.

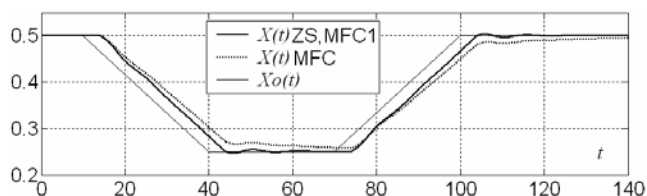
Ostatnim etapem badań było porównanie układów ZS i MFC pod względem wpływu wielkości skokowych zmian wartości zadanej na jakość regulacji. Wpływ ten obrazują wskaźniki zebrane w tabeli 5 i rysunek 11.



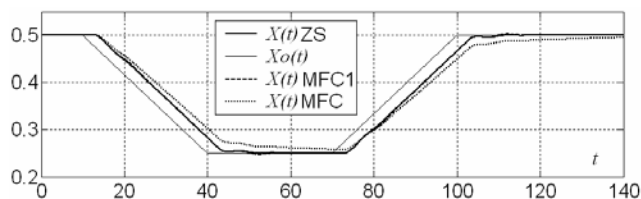
Rys.6. Odpowiedzi Obiektu 2 na skokowe zmiany  $X_o$  w układach ZS i MFC dla perturbacji  $- 0,2 \times \tau$

Tabela 3. Wskaźniki jakości  $I_r$  układów regulacji dla pracy programowej

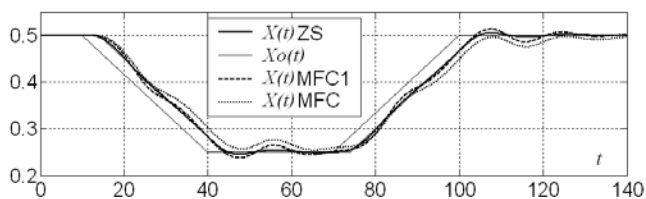
Perturbacje 2	UKŁAD	Obiekt 1	Perturbacje 1	
			Obiekt 2	Obiekt 3
Brak	ZS	0,141	0,095	0,165
	MFC	1,409	1,416	1,425
	MFC1	0,141	0,332	0,373
$X_m \times 1,2$	ZS	0,499	0,408	0,435
	MFC	1,367	1,330	1,348
	MFC1	0,424	0,422	0,407
$X_m \times 0,8$	ZS	0,506	0,515	0,542
	MFC	1,589	1,599	1,583
	MFC1	0,311	0,367	0,449
$T \times 1,2$	ZS	0,260	0,309	0,372
	MFC	1,408	1,412	1,405
	MFC1	0,168	0,501	0,822
$T \times 0,8$	ZS	0,380	0,381	0,492
	MFC	1,476	1,457	1,459
	MFC1	0,451	0,262	0,251
$+ 0,2 \times \tau$	ZS	0,434	0,279	0,242
	MFC	1,426	1,476	1,454
	MFC1	0,525	0,769	0,748
$- 0,2 \times \tau$	ZS	0,115	0,165	-
	MFC	1,460	1,437	-
	MFC1	0,137	0,169	-



Rys. 7. Odpowiedzi Obiektu 1 bez perturbacji na programowe zmiany  $X_o$  w układach ZS, MFC i MFC1 (dla ZS i MFC1 wykresy się pokrywają)



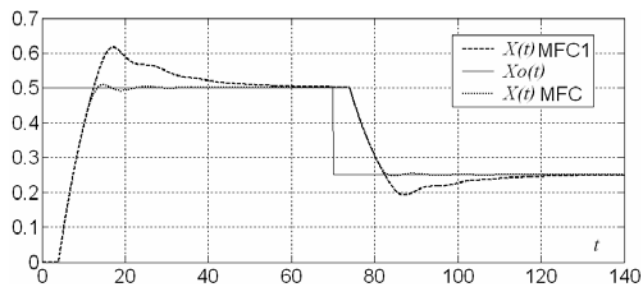
Rys.8. Odpowiedzi Obiektu 1 na programowe zmiany  $X_o$  w układach ZS, MFC i MFC1 dla perturbacji  $- 0,2 \times \tau$



Rys.9. Odpowiedzi Obiektu 3 na programowe zmiany  $X_o$  w układach ZS, MFC i MFC1 dla perturbacji  $+ 0,2 \times \tau$

Tabela 4. Wpływ kryterium doboru nastaw regulatora modelu struktury MFC - MFC1 na wskaźniki jakości  $I$  dla rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej

Perturbacje 2	UKŁAD	Obiekt 1	Perturbacje 1	
			Obiekt 2	Obiekt 3
brak	MFC	5,943	6,860	7,226
	MFC1	8,599	8,706	9,520



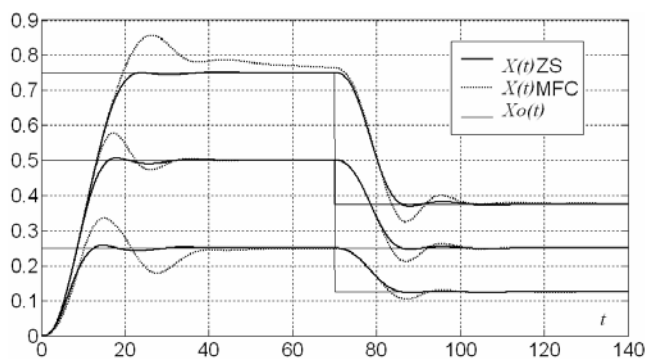
Rys.10. Odpowiedzi Obiektu 1 bez perturbacji na skokowe zmiany  $X_o$  w układach MFC i MFC1

Tabela 5. Wpływ wartości zadanej na wskaźniki jakości  $I$  dla rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej ( $\Delta I / I$  – iloraz różnicy pomiędzy wskaźnikami dla MFC a dla ZS do wskaźnika dla ZS).

$X_o$	UKŁAD	Obiekt 1	Perturbacje 1	
			Obiekt 2	Obiekt 3
0_0,25_0,125	ZS	2,786	2,741	2,895
	MFC	2,954	3,727	4,330
	$\Delta I / I$	6,03%	35,97%	49,56%
0_0,5_0,25	ZS	6,076	6,361	6,624
	MFC	5,943	6,860	7,226
	$\Delta I / I$	-2,19%	7,84%	9,10%
0_0,75_0,375	ZS	11,050	11,418	11,697
	MFC	12,921	13,754	14,015
	$\Delta I / I$	16,93%	20,46%	19,81%



## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010



Rys.11. Odpowiedzi Obiektu 3 bez perturbacji na skokowe zmiany  $X_0$  w układach ZS i MFC (nastawy  $R_M(s)$  dobrane dla  $X_0 = 0,5$ )

### Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że jakość regulacji dla pracy stabilizacyjnej jest identyczna dla układów ZS i MFC dla każdej perturbacji. Dla rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej na przeprowadzonych 20 eksperymentów z perturbacjami obiektu w układzie ZS dla 18 uzyskano lepsze wskaźniki regulacji (tab.2). Uzyskanie w dwóch pozostałych eksperymentach rezultatu odwrotnego wyniku z faktu, że w układzie ZS doboru nastaw dokonano na podstawie wzorów teoretycznych a w układzie MFC nastawy regulatora  $R_M(s)$  były dobrane eksperymentalnie. Dla pracy programowej we wszystkich 20 eksperymentach z perturbacjami wskaźniki jakości były korzystniejsze dla ZS w porównaniu z MFC. Po zastosowaniu w regulatorze modelu nastaw dla pracy programowej ZS była nadal lepsza w 11 eksperymentach, struktura MFC1 w 8 i w jednym uzyskano identyczną jakość regulacji (tab.3). Zastosowanie tych nastaw spowodowało wyraźne pogorszenie jakości regulacji dla rozruchu i skokowych zmian wartości zadanej (rys.10 i tab.4). Badania potwierdziły zdolność układu ZS do uzyskiwania dobrej jakości regulacji niezależnie od wartości zadanej i wykazały, że własności tej nie posiada układ MFC (tab.5 i rys.11).

### LITERATURA

- [1] Misztal H., Uniwersalny regulator PID o zmiennej strukturze przeznaczony dla rozruchu, pracy programowej i stabilizacyjnej. *Przegląd Elektrotechniczny*, 83 (2007), nr.3, 60 – 62.
- [2] Misztal H., Badania układu regulacji z obiektem cieplnym i uniwersalnym regulatorem PID o zmiennej strukturze przeznaczonym dla rozruchu, pracy programowej i stabilizacyjnej. *Przegląd Elektrotechniczny*, (przygotowany do w druku 2010, nr 3).
- [3] Misztal H., Sposób ograniczenia akcji całkującej regulatora PID. *Patent PL 180842 B1, Wiadomości Urzędu Patentowego*, (2001), nr 04/01.
- [4] Skoczowski S., Odporny układ regulacji z wykorzystaniem modelu obiektu. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, (1999), nr 9.
- [5] Skoczowski S., Osypisk R., Pietruszewicz K., Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody. *Warszawa, PWN* (2006).

- [6] Skoczowski S., Misztal H., Odporna regulacja temperatury z wykorzystaniem modelu. *VIII konferencja "Badania naukowe w elektrotermii"*, Międzybrodzie Żywieckie, (2000), 35-41.
- [7] Misztal H., Sposób doboru nastaw regulatorów PID dla regulacji programowej. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 1986, nr 9, 214 – 216.
- [8] Skoczowski S., Technika regulacji temperatury. *Warszawa Zielona Góra, Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola*, (2000).

**Autorzy:** dr inż. Henryk Misztal, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin, E-mail: [henryk.misztal@zut.edu.pl](mailto:henryk.misztal@zut.edu.pl)