

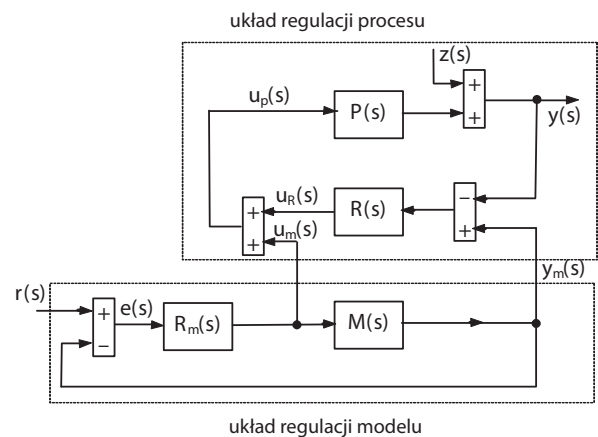
W niniejszym artykule przedstawiono zmodyfikowane struktury MFC opisane w [6] oraz przeprowadzono ich analize.

Z rys. 1 wynika, że proces $P(s)$ jest sterowany sumą dwóch sygnałów: $u_R(s)$ z regulatora procesu $R(s)$ oraz $u_m(s)$ z regulatora modelu $M(s)$. Oba regulatory – modelu i procesu powinny zawierać działanie całkujące (w przypadku procesu o charakterze inercyjnym), po to aby uzyskać $y_m(s) = r(s)$ oraz $y(s) = y_m(s)$.

Po wykonaniu nieskomplikowanych przekształceń można dla schematu z rys. 1 wyznaczyć transformatę odpowiedzi $y(s)$:

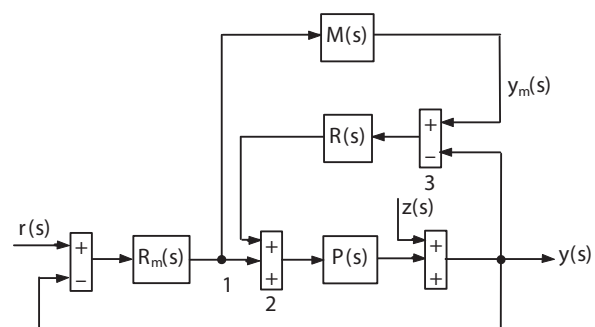
$$y(s) = \frac{R_m(s) P(s) (1 + R(s) M(s))}{(1 + R(s) P(s)) (1 + R_m(s) M(s))} r(s) + \frac{z(s)}{1 + R(s) P(s)} \quad (1)$$

Z zależności (1) wynika, że tłumienie zakłóceń prowadzi tylko regulator $R(s)$ – regulator $R_m(s)$ nie ma wpływu na działanie układu od strony zakłóceń. Natomiast na zmiany parametrów procesu oddziałuje zarówno regulator procesu, jak i regulator modelu.



Rys. 1. Schemat blokowy podstawowej struktury MFC. Oznaczenia transmittancji i transformat: $M(s)$ – model, $P(s)$ – proces, $R_m(s)$ – regulator modelu, $R(s)$ – regulator procesu, $r(s)$ – wartość zadana, $z(s)$ – zakłócenia, $y(s)$ – wielkość regulowana, $y_m(s)$ – wielkość wyjściowa z układu regulacji modelu

Poprawę tłumienia zakłóceń można uzyskać w zaproponowanej również w [6] strukturze MFC/IMC (*Internal Model Control*) – rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu MFC/IMC

W tym przypadku transformata odpowiedzi układu ma postać:

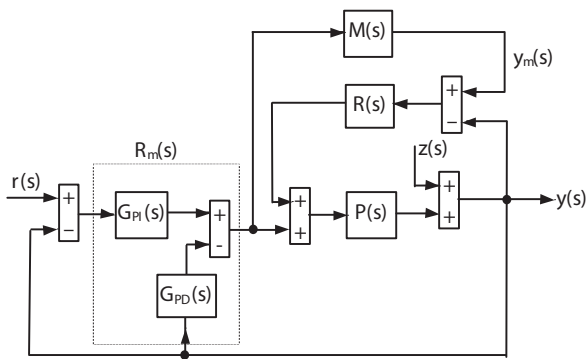
$$y(s) = \frac{R_m(s) P(s) (1 + R(s) M(s))}{1 + P(s) (R_m(s) + R(s) + R_m(s) R(s) M(s))} r(s) + \frac{z(s)}{1 + P(s) (R_m(s) + R(s) + R_m(s) R(s) M(s))} \quad (2)$$

Z zależności (2) wynika, że układ MFC/IMC ma dwa stopnie swobody zarówno w odniesieniu do zmian wartości zadanej, jak i do zakłóceń (śledzenie wartości zadanej i tłumienie zakłóceń realizują dwa regulatory). Ponadto regulator korekcyjny pracuje tylko wtedy, gdy $y_m(s) \neq y(s)$.

Struktury z rys. 1 i 2 różni tylko miejsce lokalizacji modelu i procesu, ale ta zamiana powoduje, że w układzie wg rys. 2 można uzyskać efektywniejsze tłumienie zakłóceń.

Propozycje nowych struktur układów regulacji z modelem

Jeżeli regulator procesu $R(s)$ jest typu PID, to w celu uniknięcia przesterowań od zakłóceń z w układzie pokazanym na rys. 2 można zastosować strukturę przedstawioną na rys. 3.

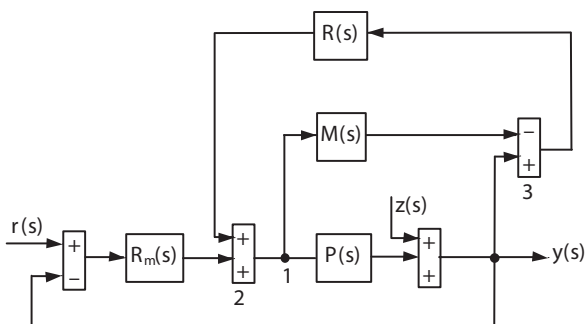


Rys. 3. Układ MFC/IMC z regulatorem PI/PID

W sytuacji przedstawionej na rys. 3 regulator $R_m(s)$ zachowuje się jak PID przy zmianach wielkości regulowanej y (lub zakłóceń z), natomiast jak PI przy zmianach wartości zadanej r .

Transformata odpowiedzi układu ma postać:

$$y(s) = \frac{G_{PI}(s) P(s) (1 + R(s) M(s))}{1 + P(s) (G_{PI}(s) + R(s) + G_{PI}(s) R(s) M(s)) + G_{PD}(s) P(s) (1 + R(s) M(s))} r(s) + \frac{z(s)}{1 + P(s) (G_{PI}(s) + R(s) + G_{PI}(s) R(s) M(s)) + G_{PD}(s) P(s) (1 + R(s) M(s))} \quad (3)$$



Rys. 4. Schemat blokowy układu 2DOF/IMC

Dla $G_{PD}(s) = 0$ oraz $G_{PI}(s) = R_m(s)$ zależność (3) przechodzi w zależność (2).

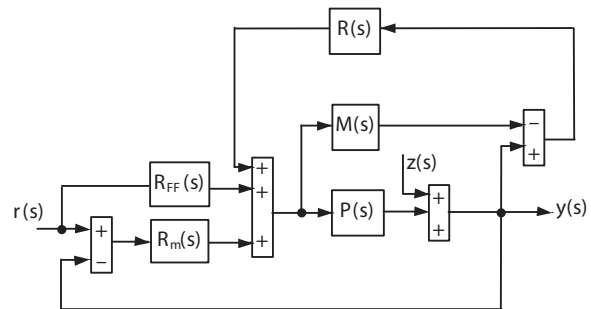
Regulator PI/PID można zastosować również w innych strukturach opisywanych w tym artykule.

Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy układu 2DOF/IMC [6], w którym w porównaniu ze schematem na rys. 2 są zamienione miejscami węzły sumujący (2) i informacyjny (1) w pętli regulacyjnej procesu.

Odpowiedź układu 2DOF/IMC ma postać:

$$y(s) = \frac{P(s) R_m(s)}{1 + R(s) M(s) + P(s) R_m(s) - P(s) R(s)} r(s) + \frac{1 - R(s) M(s)}{1 + R(s) M(s) + P(s) R_m(s) - P(s) R(s)} z(s) \quad (4)$$

Z zależności (4) wynika, że śledzenie wartości zadanej i tłumienie zakłóceń zależy od dwóch regulatorów: procesu i modelu. Uzupełniając schemat blokowy z rys. 4 sprzężeniem wyprzedzającym od wartości zadanej o transmitancję $R_{FF}(s)$ (rys. 5), uzyskuje się układ o trzech stopniach swobody dla wartości zadanej i dwóch stopniach swobody względem zakłóceń (2 1/2DOF/IMC).

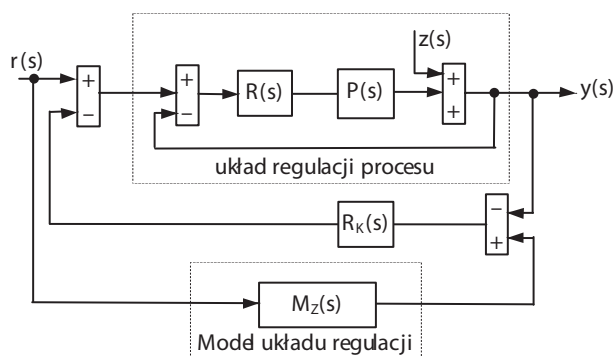


Rys. 5. Schemat blokowy układu 2 1/2DOF/IMC

Dla układu z rys. 5 transformata odpowiedzi układu ma postać:

$$y(s) = \frac{P(s) (R_m(s) + R_{FF}(s))}{1 + R(s) M(s) + P(s) R_m(s) - P(s) R(s)} r(s) + \frac{1 - R(s) M(s)}{1 + R(s) M(s) + P(s) R_m(s) - P(s) R(s)} z(s) \quad (5)$$

Gdy pierwszoplanowym zadaniem URA jest śledzenie wartości zadanej, wtedy można zaproponować strukturę przedstawioną na rys. 6, również z modelem, ale wykorzystującą model całego układu regulacji $M_Z(s)$ (a nie tylko procesu) w torze wartości zadanej – wielkość regulowana.



Rys. 6. Schemat blokowy URA z modelem układu regulacji ($R_K(s)$ – regulator korekcyjny)

Dla układu z rys. 6 transformata odpowiedzi układu ma postać:

$$y(s) = \frac{P(s)R(s)(1 - R_K(s)M_Z(s))}{1 + P(s)R(s) - P(s)R(s)R_K(s)} r(s) + \frac{1}{1 + P(s)R(s) - P(s)R(s)R_K(s)} z(s) \quad (6)$$

Układ dysponuje więc dwoma stopniami swobody zarówno pod względem wartości zadanej, jak i zakłóceń, a jego zaletą jest to, że należy określić transmitancję modelu układu regulacji zamiast dwóch transmitancji – modelu procesu i jego regulatora. Wadą tego układu jest to, że tłumienie zakłóceń jest niezależne od przyjętego modelu, podobnie jak zmiany parametrów procesu.

Porównanie właściwości układów

W analizie odpornych układów regulacji wykorzystuje się często tzw. funkcje wrażliwości: wejściowej $S_r(s)$ oraz zakłóceniewej $S_d(s)$ (S_d nazywa się też komplementarną funkcją wrażliwości).

W tabeli 1 zestawiono te funkcje dla rozpatrywanych układów oraz podano zależności między nimi.

Tabela 2 zawiera natomiast dopuszczalne perturbacje Δ dla poszczególnych układów. Przyjęto multiplikatywną postać perturbacji, tj.:

$$P(j\omega) = M(j\omega)[1 + \Delta(j\omega)]$$

gdzie: $P(j\omega)$ – transmitancja widmowa procesu,
 $M(j\omega)$ – transmitancja widmowa modelu,
 $\Delta(j\omega)$ – transmitancja widmowa perturbacji.

Perturbacje $\Delta(j\omega)$ są ograniczone i spełniają nierówność:

$$|\Delta(j\omega)| \leq \Delta < 1$$

gdzie Δ jest znana.

Ograniczone perturbacje spełniają zatem nierówność modułu wektora $|1 + \Delta(j\omega)|$

$$1 - \Delta \leq |1 + \Delta(j\omega)| < 1 + \Delta$$

Tabela 1

Układ wg rys.	S_r	
1	$\frac{R_m P(1 + RM)}{(1 + R_m M)(1 + RP)}$	
2	$\frac{R_m P(1 + RM)}{1 + P(R_m + R + R_m RM)}$	
3	$\frac{G_{PI} P(1 + RM)}{1 + P(G_{PI} + R + G_{PI} RM) + G_{PD} P(1 + RM)}$	
4	$\frac{R_m P}{1 + RM + PR_m - PR}$	
5	$\frac{P(R_m + R_{FF})}{1 + RM + PR_m - PR}$	
6	$\frac{PR(1 - R_K M_Z)}{1 + PR - PRR_K}$	

oraz fazy:

$$-A_\Delta \leq \varphi_\Delta(\omega) \leq A_\Delta$$

$$A_\Delta = \arctg \frac{\Delta}{\sqrt{1 - \Delta^2}}$$

W klasycznym układzie regulacji (tzn. jednopętlowym, czyli złożonym z modelu $M(j\omega)$ oraz regulatora $R_m(j\omega)$) przekroczenie dopuszczalnych perturbacji Δ_{KL} (7) oznacza utratę stabilności

$$\Delta_{KL} < \left| \frac{1 + R_m(j\omega)M(j\omega)}{R_m(j\omega)M(j\omega)} \right| \quad (7)$$

Przykład symulacyjny

Pierwszy przeprowadzony eksperyment symulacyjny (MATLAB®/Simulink®) miał na celu porównanie efektów tłumienia zakłóceń skokowych (działających na wyjściu procesu) w układzie z rys. 4 i w klasycznym układzie regulacji przy zmianach parametrów procesu. Jako kryterium przyjęto całkę z kwadratu błędu (ISE) i całkę z wartości bezwzględnej sygnału błędu (IAE). Przyjęto, że proces nominalny ma transmitancję

$$P(s) = \frac{1}{(3s + 1)^3}$$

a model transmitancję

$$M(s) = \frac{e^{-2s}}{6s + 1}$$

	S_d	Zależności i uwagi
	$\frac{1}{1+RP}$	$S_r + S_d = 1 - \frac{(R - R_m)P}{(1 + R_m M)(1 + RP)}$ Tłumienie zakłóceń jest tym lepsze im $(R - R_m)$ jest większe
	$\frac{1}{1 + P(R_m + R + R_m RM)}$	$S_r = 1 - (1 + RP)S_d$ Wrażliwość zakłócenia tej struktury jest mniejsza niż MFC
	$\frac{1}{1 + P(G_{PI} + R + G_{PI} RM) + G_{PD} P(1 + RM)}$	$S_r + S_d = 1 - \frac{P(G_{PD} + R + G_{PD} RM)}{1 + P(G_{PI} + R + G_{PI} RM) + G_{PD} P(1 + RM)}$
	$\frac{1 - RM}{1 + RM + PR_m - PR}$	$S_r + S_d = 1 - \frac{PR}{1 + RM + PR_m - PR}$ Dla $R = \frac{1}{M}$ $S_d = 0$ – układ jest niewrażliwy na zakłócenia; zachodzi idealne tłumienie zakłóceń
	$\frac{1 - RM}{1 + RM + PR_m - PR}$	$S_r + S_d = 1 - \frac{PR - PR_{FF}}{1 + RM + PR_m - PR}$
	$\frac{1}{1 + PR - PRR_K}$	$S_r + S_d = 1 - \frac{PRR_K M_Z - PRR_K}{1 + PR - PRR_K}$

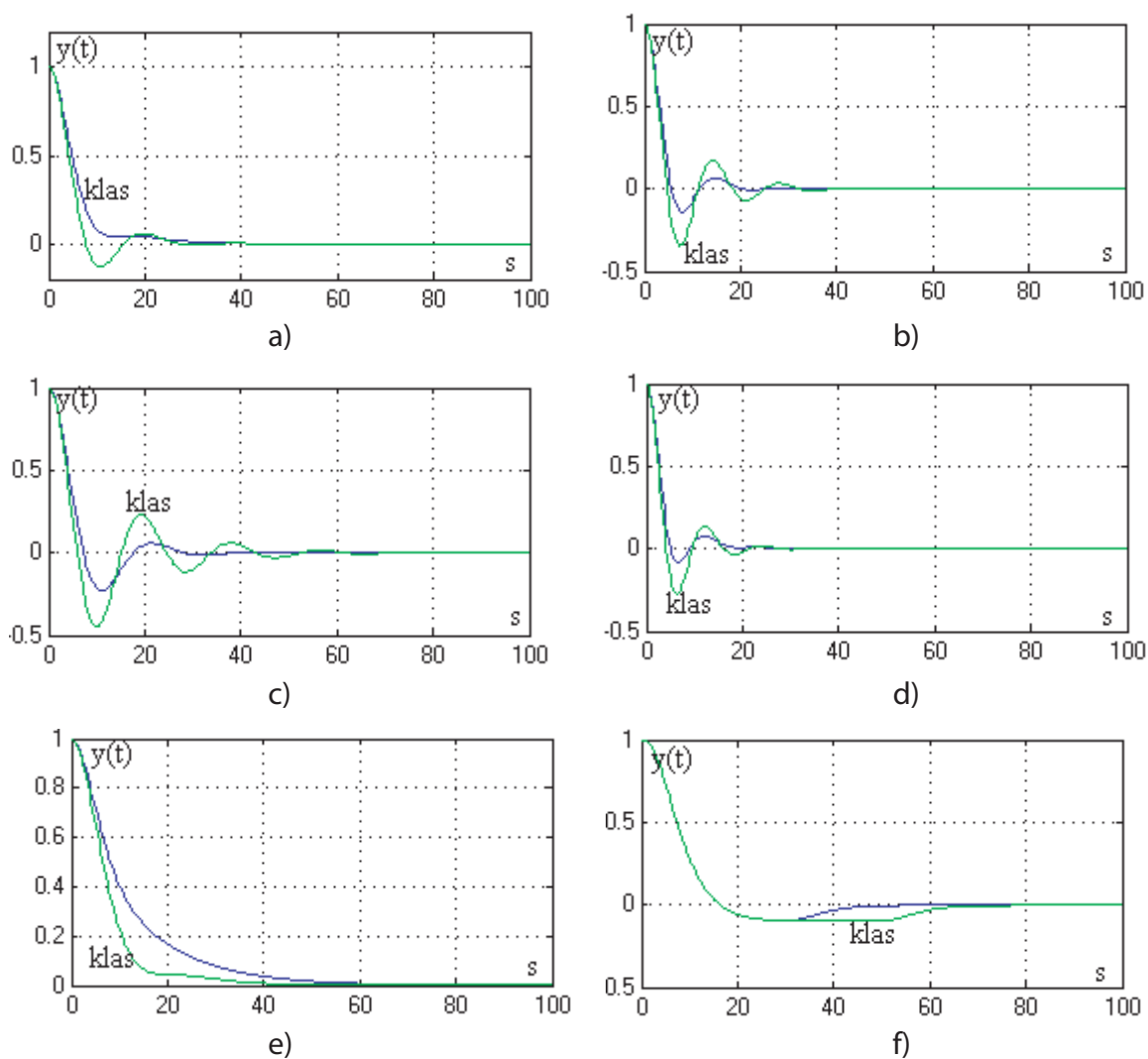
Tabela 2

Układ wg rys.	Dopuszczalne perturbacje	Zależności i uwagi
1	$\Delta_{MFC} < \left \frac{1+RM}{R_m M} \right $	$\Delta_{MFC} < \Delta_{KL} \left \frac{1+RM}{1+R_m M} \right $
2	$\Delta_{MFC/IMC} < \left \frac{(1+RM)(1+R_m M)}{R_m M} \right $	$\Delta_{MFC/IMC} < \Delta_{KL} 1+RM $, dopuszczalne perturbacje w MFC/IMC są $ 1+RM $ razy większe niż w układzie klasycznym $\Delta_{MFC/IMC} < \Delta_{MFC} 1+R_m M $, dopuszczalne perturbacje w MFC/IMC są $ 1+R_m M $ razy większe niż w układzie MFC
3	$\Delta_{MFC/PI_PID} < \left \frac{(1+RM)(1+R_m M)}{G_{PI} M} \right $ przy czym $R_m = G_{PI} + G_{PD}$	$\Delta_{MFC/PI_PID} < \Delta_{KL} \left (1+RM) \frac{R_m}{G_{PI}} \right $ $\Delta_{MFC/PI_PID} < \Delta_{MFC} \left (1+R_m M) \frac{R_m}{G_{PI}} \right $ z tych zależności wynika, że dopuszczalne perturbacje są nieco większe niż dla układu z rys. 2
4, 5	$\Delta < \left \frac{1+R_m M}{(R-R_m)M} \right $	$\Delta < \Delta_{KL} \left \frac{1}{1 - \frac{R}{R_m}} \right $ dopuszczalne perturbacje są większe niż w klasycznym układzie regulacji
6	$\Delta < \left 1 + \frac{1}{M_Z R(1-R_K)} \right $	

Nastawy regulatora PI/PID w klasycznym układzie regulacji dobrane dla modelu według metody Zieglera-Nicholsa miały następujące wartości: współczynnik wzmocnienia – 2, czas całkowania – 8 s, czas różniczkowania – 1 s (pasożytnicza inercyjna stała czasowa wynosiła 0,1 s). Regulator modelu $R_m(s)$ w układzie z rys. 4 był identyczny jak w układzie klasycznym, a regulator procesu $R(s)$ (rys. 4) był regulatorem proporcjonalnym

o wzmocnieniu 0,5. Przebiegi czasowe tego eksperymentu symulacyjnego przedstawiono na rys. 7, a wyznaczone wartości całek kryterialnych w tabeli 3.

Z porównania danych zestawionych w tabeli 3 wynika, że układ z rys. 4 efektywniej tłumí zakłócenia niż układ klasyczny, w przypadku wzrostu współczynnika wzmocnienia procesu, jego stałej czasowej i wystąpienia



Rys. 7. Przebiegi czasowe tłumienia zakłóceń skokowych w układzie MFC/IMC i w układzie klasycznym z regulatorem PI/PID

Tabela 3

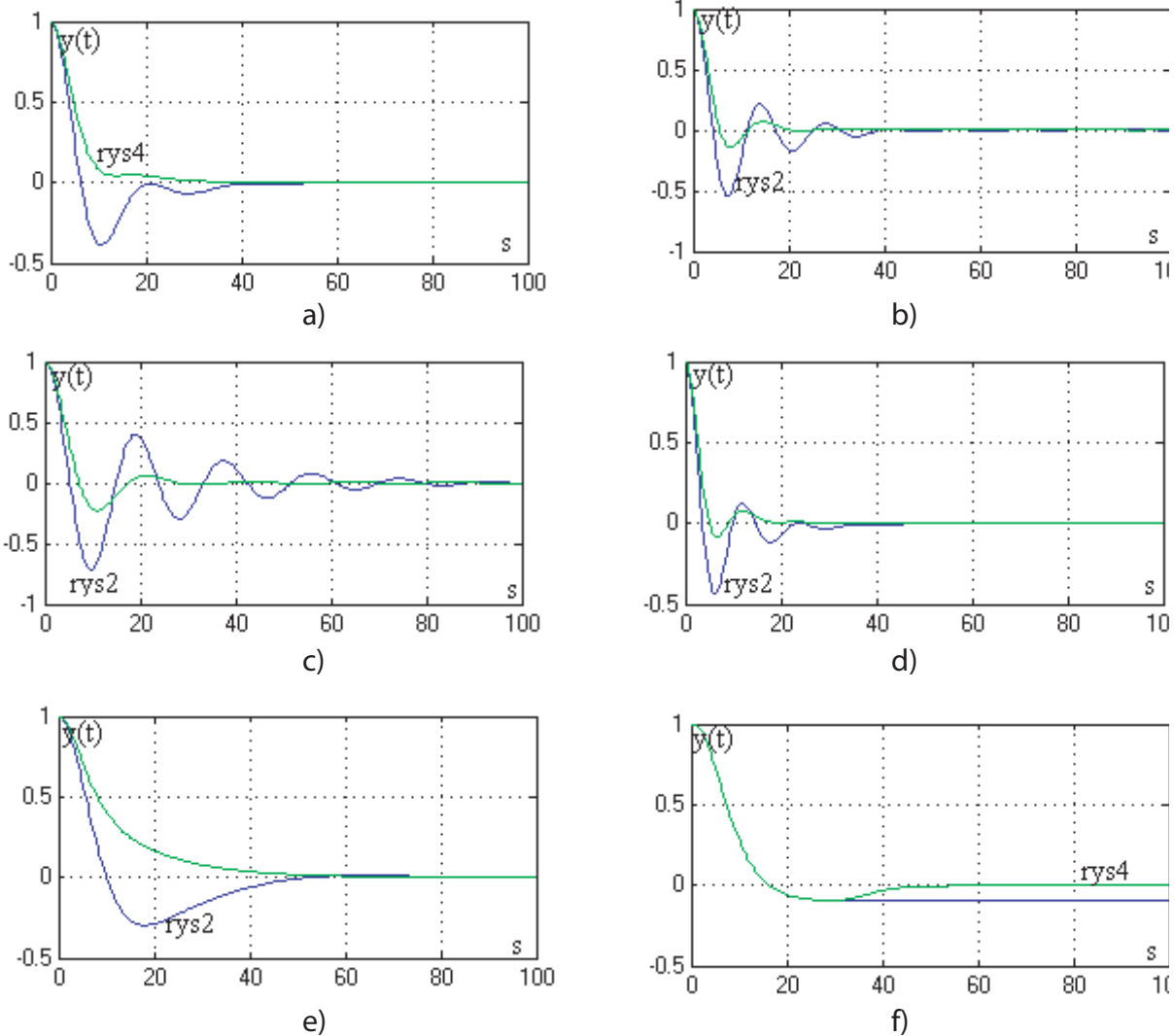
Kryterium parametry procesu	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE
	nominalne		wzmocnienie procesu 2				wzmocnienie procesu 0,5 stałe czasowe 3 s		nominalne; nieliniowość - nasycenie przed procesem (-1,1; 1,1)			
			-		jedna stała czasowa procesu 6 s		jedna stała czasowa 2 s					
Przebiegi czasowe	rys. 7a		rys. 7b		rys. 7c		rys. 7d		rys. 7e		rys. 7f	
Układ klasyczny	3,27	5,34	2,68	5,56	4,11	9,01	2,12	4,12	4,98	8,00	6,06	11,71
2DOF/IMC (rys. 4)	3,68	6,00	2,43	4,05	3,43	6,09	2,05	3,42	6,50	12,00	5,86	9,72

silnych nieliniowości, pomimo, że w stanie nominalnym działa gorzej niż układ klasyczny.

Drugi eksperyment symulacyjny miał na celu porównanie efektów tłumienia zakłóceń z rys. 2 i rys. 4. Układ z rys. 4 miał parametry identyczne jak poprzednio. Regulator $R_m(s)$ z rys. 2 miał parametry takie same jak regulator $R_m(s)$ w układzie z rys. 4. Regulator procesu $R(s)$ (rys.2) nastawiono następująco: współczynnik wzmoc-

nienia – 0,3, czas całkowania – 4 s, czas różniczkowania – 1 s (pasożytnicza inercyjna stała czasowa różniczkowania – 0,1 s).

Przebiegi czasowe uzyskane z symulacji przedstawiono na rys. 8, a wyznaczone wartości całek kryterialnych w tabeli 4.



Rys. 8. Przebiegi czasowe tłumienia zakłóceń skokowych w układzie w układzie MFC/IMC i w układzie 2DOF/IMC

Tabela 4

Kryterium parametry procesu	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE
	nominalne		wzmocnienie procesu 2						wzmocnienie procesu 0,5 stałe czasowe 3 s		nominalne; nielinio- wość - nasycenie przed procesem (-1,1; 1,1)	
			-		jedna stała cza- sowa procesu 6 s		jedna stała czasowa 2 s					
Przebiegi czasowe	rys. 8a		rys. 8b		rys. 8c		rys. 8d		rys. 8e		rys. 8f	
MFC/IMC (rys. 2)	3,77	7,51	3,31	7,32	6,53	14,82	2,39	5,20	5,50	11,84	6,51	15,82
2DOF/IMC (rys. 4)	3,68	6,00	2,43	4,05	3,43	6,09	2,05	3,42	6,50	12,00	5,86	9,72

Podsumowanie

W artykule przedstawiono nowe struktury układów regulacji z modelem oraz porównano ich właściwości z punktu widzenia śledzenia wartości zadanej i tłumienia zakłóceń oraz dopuszczalnych perturbacji procesu.

W wykonanym, przykładowym eksperymencie symulacyjnym porównano działanie (wykorzystując kryteria ISE i IAE) układu MFC/IMC z układem klasycznym (w obu układach zastosowano regulator PI/PID) oraz układu MFC/IMC z układem 2DOF/IMC przy oddziaływaniu skokowych zakłóceń na wyjściu procesu dla różnych jego parametrów.

Najlepszym okazał się układ 2DOF/IMC (rys. 4), który tylko w jednym przypadku (wzmocnienie procesu 0,5, stałe czasowe 3 s) działał gorzej niż układ klasyczny i MFC/IMC (rys. 2). Sugeruje to, że został przekroczony dopuszczalny zakres perturbacji. Układ 2DOF/IMC radzi też sobie najlepiej w porównaniu do innych symulowanych układów po pojawieniu się nieliniowości np. typu nasycenie.

Przedstawione układy można polecić szczególnie do tych procesów, które w czasie eksploatacji różnią się (nawet znacznie) od przyjętego modelu (np. w robotach).

Bibliografia

1. A. Bonarini, A. Danieli, M. Danieli, *Adaptive fuzzy model-following control: A robotic manipulator application*, Proc. EUFIT '94, ELITE Foundation, Aachen, Germany, pp. 13 – 18, 1994.
2. K.J. Latawiec, *The power of inverse systems in linear and nonlinear modeling and control*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2004, z. 167.
3. M. de la Sen, *Robustly stable model-following control of uncertain continuous time plant with use of correcting controller*, Cybernetics and Systems, Taylor and Francis Ltd., vol. 36, No. 1, pp. 65 – 84, 2005.
4. S. Skoczowski, *Robust model following-control with use of a plant model*, Int. J. of System Science, 2001, vol. 32, Nr 12, p. 1413 – 1427.
5. S. Skoczowski, *Deterministyczna identyfikacja i jej wykorzystanie w odpornej regulacji PID temperatury*, Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2001.
6. S. Skoczowski, R. Osypiuk, K. Pietruszewicz, *Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody*, PWN-MIKOM, Warszawa 2006. ■

REKLAMA ▼

Internetowy serwis dla specjalistów z branży wodno-ściekowej



Serwis www.woda-scieki.com umożliwia:

- promocję Państwa działalności
- uzyskiwanie informacji o poszukiwanych produktach lub usługach
- pozyskiwanie nowych klientów i zamówień
- składanie zapytań ofertowych
- sprzedaż lub nabycie używanych urządzeń i aparatury
- kontakt z szerokim audytorium z dziedziny ochrony środowiska

www.woda-scieki.com