

Sterowanie obiektu wysokiego rzędu z wykorzystaniem regulatora redukcyjnego

Krzysztof Oprzędkiewicz

W pracy przedstawiono propozycję syntezy regulatora redukcyjnego obiektu wysokiego rzędu, opisanego transmitancją operatorową. Zasadniczą ideą konstrukcji regulatora jest redukcja słabo tłumionej części transmitancji obiektu. Pełna redukcja tej części transmitancji jest możliwa wyłącznie przy dokładnej znajomości jej parametrów, natomiast wyniki badań symulacyjnych wskazują, że nawet w przypadku niepewności parametrów regulator redukcyjny zapewnia dobrą jakość regulacji.

W wielu sytuacjach praktycznych stosowanie typowych algorytmów regulacyjnych nie zapewnia dobrej jakości regulacji czy odporności układu sterowania na niepewność parametrów obiektu. W takich sytuacjach uzasadnione jest stosowanie algorytmów specjalnych, bazujących na znajomości modelu obiektu w postaci równania stanu lub transmitancji operatorowej. Dodatkowym atutem uzasadniającym stosowanie takich algorytmów jest ich względnie prosta implementacja w typowych przemysłowych urządzeniach sterujących, m.in. w sterownikach PLC (np. [8]).

W pracy przedstawiono propozycję konstrukcji prostego regulatora redukcyjnego dla obiektu opisanego transmitancją operatorową, przy założeniu, że w transmitancji tej można wyróżnić część oscylacyjną lub słabo tłumioną. Okazuje się, że redukcja za pomocą regulatora tylko tej słabo tłumionej części zapewnia dobrą jakość regulacji w układzie. Dodatkowo wyniki badań symulacyjnych wskazują, że proponowany układ zapewnia także dobrą odporność układu regulacji na niepewność parametrów obiektu regulacji.

Opis rozważanych obiektów regulacji

Jako obiekt regulacji rozważmy obiekt wysokiego rzędu bez zer, w którego transmitancji operatorowej można wyróżnić dwie części, z których pierwsza ma niekorzystny wpływ na dynamikę obiektu (np. jest słabo tłumiona lub oscylacyjna), a druga tego niekorzystnego wpływu nie ma. Transmitancja obiektu może być zapisana następująco:

$$G(s) = \frac{k}{M_p(s)M_r(s)} \quad (1)$$

W (1) k oznacza wzmocnienie statyczne obiektu, czynnik $M_p(s)$ opisuje słabo tłumioną lub oscylacyjną część transmitancji obiektu, która może być wyrażona następująco:

$$M_p(s) = a_p s^p + \dots + a_1 s + a_0 \quad (2)$$

Czynnik $M_r(s)$ opisuje pozostałą część transmitancji obiektu, którą można zapisać następująco:

$$M_r(s) = b_r s^r + \dots + b_1 s + b_0 \quad (3)$$

Założmy, że stopień mianownika transmitancji obiektu jest równy n :

$$n = p + r \quad (4)$$

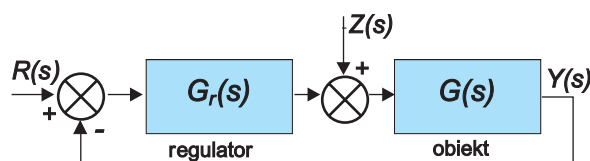
Model (1) – (4) opisuje bardzo dużą klasę rzeczywistych obiektów dynamicznych.

Regulator redukcyjny dla rozważanej klasy obiektów

Dla obiektu opisanego przez (1) rozważmy zamknięty układ sterowania (rys. 1). Założmy, że dynamika regulatora w układzie ma zastąpić dynamikę słabo tłumionej części obiektu regulacji, opisaną wielomianem $M_p(s)$. To założenie może być spełnione, jeżeli regulator będzie regulatorem redukcyjnym, zbudowanym w oparciu o znajomość dynamiki obiektu. Zagadnienia syntezy regulatorów redukcyjnych (ang. *cancellation controllers*) bazujące na znajomości transmitancji obiektu regulacji były omawiane w licznych pracach: [4, 5, 8]. Problemy syntezy regulatora kompensującego najslabiej tłumioną część dynamiki obiektu opisanego równaniem stanu są omówione w pracach: [6, 7].

Założmy, że rozważany regulator redukcyjny ma postać uogólnionego regulatora liniowego z całkowaniem o transmitancji:

$$G_r(s) = \frac{I_c(s)}{M_c(s)} \quad (5)$$



Rys. 1. Zamknięty układ regulacji

dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz
– Katedra Automatyki, AGH w Krakowie

$L_c(s)$ oraz $M_c(s)$ są wielomianami zmiennej zespolonej s następującej postaci:

$$L_c(s) = v_1 s^l + \dots + v_1 s + v_0 \quad (6)$$

$$M_c(s) = w_m s^m + \dots + w_1 s \quad (7)$$

Całkowanie w regulatorze (5) jest niezbędne do wyeliminowania uchybu ustalonego w układzie regulacji.

Założmy, że w modelu obiektu regulacji w postaci (1) znamy dokładnie parametry jego słabo tłumionej lub oscylacyjnej części, opisaną przez (2). W takiej sytuacji można założyć, że licznik transmitancji regulatora $L_c(s)$ jest równy wprost części transmitancji obiektu, opisaną przez wielomian (2):

$$L_c(s) = M_p(s) \quad (8)$$

Po uwzględnieniu (8) transmitancja regulatora linowego (5) przyjmie postać:

$$G_r(s) = \frac{M_p(s)}{M_c(s)} \quad (9)$$

W przypadku, gdy regulator ma postać (9), stopień mianownika transmitancji regulatora m musi spełniać założenie wynikające z fizycznej realizowalności regulatora:

$$m \geq p \quad (10)$$

Jeżeli transmitancja regulatora ma postać (9), a transmitancja obiektu regulacji ma postać (1), to transmitancja układu otwartego, zawierającego i obiekt, i regulator, ma postać następującą:

$$G_o(s) = G(s) \cdot G_r(s) = \frac{k}{M_c(s)M_r(s)} \quad (11)$$

Transmitancja wymuszeniowa zamkniętego układu regulacji (rys. 1) ma postać:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k}{M_c(s)M_r(s) + k} \quad (12)$$

Na podstawie (12) można stwierdzić, że w przypadku dokładnej znajomości wielomianu $M_p(s)$, część dynamiki obiektu reprezentowana przez $M_p(s)$ została w układzie zamkniętym zastąpiona przez dynamikę regulatora, a rozkład biegunów transmitancji (12) jest zdeterminowany przez wartość wzmacnienia obiektu oraz parametry regulatora opisane współczynnikami $w_m \dots w_1$. Przy odpowiednim doborze tych współczynników możliwe jest otrzymanie założonego rozkładu i typu biegunów układu zamkniętego, przy czym założeniem fundamentalnym jest asymptotyczna stabilność zamkniętego układu regulacji.

Dobór współczynników $w_m \dots w_1$ regulatora może być w szczególnych przypadkach wykonany analitycznie, a w przypadku ogólnym – metodami symulacyjnymi, np. z wykorzystaniem środowiska MATLAB. Zagadnienie symulacyjnego dostrajania specjalnych al-

gorytmów sterowania cyfrowego jest omówione np. w pracy [9].

W tym momencie pojawia się pytanie, jakie są właściwości przedstawionego układu sterowania w sytuacji, gdy parametry części transmitancji obiektu, opisane wielomianem $M_p(s)$, nie są dokładnie znane? Taka sytuacja najczęściej występuje w praktyce. Ogólna analiza właściwości układu regulacji dla takich przypadków jest znacznie bardziej złożona, natomiast omówione w dalszej części pracy wyniki badań symulacyjnych wykazują, że jakość regulacji jest wtedy również wysoka.

Z kolei transmitancja zakłócenieniowa może być wyznaczona przy założeniu, że wartość zadana na wejściu układu $r(t) = 0$. Ma ona postać:

$$G_z(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{kM_c(s)}{M_p(s)(M_r(s)M_c(s) + k)} \quad (13)$$

Transmitancja (13) może być użyta do analizy zachowania się rozważanego układu regulacji podczas realizacji zadania stabilizacji.

Przedstawiona powyżej metoda syntezy regulatora redukcyjnego zostanie zilustrowana przykładami.

Przykład 1

Jako pierwszy przykład rozważmy obiekt oscylacyjny II rzędu, którego transmitancja operatorowa zawiera jedną parę biegunów zespolonych sprzężonych i może być zapisana następująco:

$$G(s) = \frac{k}{s^2 + \zeta s + \omega^2} \quad (14)$$

Na wartości współczynników ζ oraz ω transmitancji (14) nałożony jest następujący warunek, wynikający z założenia o oscylacyjności obiektu:

$$\zeta < 2\omega \quad (15)$$

Transmitancja (14) opisuje dużą klasę rzeczywistych obiektów dynamicznych, na przykład są to elementy drgające typu mechanicznego lub elektryczne obwody RLC. Jest ona przypadkiem szczególnym transmitancji (1), dla której:

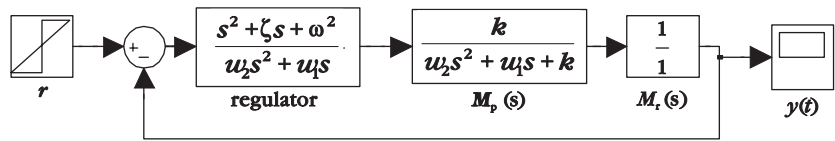
$$\begin{aligned} M_p(s) &= s^2 + \zeta s + \omega^2 \\ M_r(s) &= 1 \end{aligned} \quad (16)$$

Po uwzględnieniu (16) regulator redukcyjny (9) dla obiektu (14) przyjmie następującą postać:

$$G_r(s) = \frac{v_2 s^2 + v_1 s + v_0}{w_2 s^2 + w_1 s} \quad (17)$$

Jeżeli założymy, że współczynniki transmitancji obiektu ζ oraz ω są dokładnie znane, to współczynniki licznika transmitancji regulatora (17) można przyjąć następująco:

$$\begin{cases} v_2 = 1 \\ v_1 = \zeta \\ v_0 = \omega^2 \end{cases} \quad (18)$$



Rys. 2. Model do badań symulacyjnych dla przykładu 1

Tab. 1. Liczbowe wartości parametrów obiektu i regulatora do testów symulacyjnych dla przykładu 1

Nr testu	Parametry obiektu		Parametry regulatora					Komentarz
			$L_c(s)$			$M_c(s)$		
	ζ	ω	v_2	v_1	v_0	w_2	w_1	
1	0,05	1,0	1	0,05	1	1	2	Regulator dostrojony przy założeniu dokładnej znajomości parametrów obiektu
2	0,09	1,0	1	0,05	1	1	2	Parametry regulatora z testu (1), zmienione parametry obiektu
3	0,05	1,1						
4	0,03	1,1						

Po uwzględnieniu (18) transmitancja regulatora $G_r(s)$ (17) przyjmie następującą postać:

$$G_r(s) = \frac{s^2 + \zeta s + \omega^2}{w_2 s^2 + w_1 s} \quad (19)$$

Jeżeli obiekt regulacji jest opisany transmitancją (14) a regulator transmitancją (19), transmitancja wymuszeniowa zamkniętego układu regulacji (12) jest równa:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k}{w_2 s^2 + w_1 s + k} \quad (20)$$

Transmitancja (20) opisuje zachowanie się układu regulacji w odpowiedzi na zmiany wartości zadanej na wejściu (zadanie przestawienia, ang. *servo problem*). Na podstawie (20) można stwierdzić, że dla rozważanego przypadku dynamika obiektu regulacji została całkowicie zastąpiona przez dynamikę regulatora opisaną współczynnikami w_1 oraz w_2 . Odpowiedni dobór tych współczynników pozwala na otrzymanie założonych właściwości dynamicznych układu regulacji. Zauważmy, że zamknięty układ regulacji opisany transmitancją (20) jest asymptotycznie stabilny dla każdej dodatniej wartości współczynników w_1 oraz w_2 .

Żałujemy, że rozważany układ regulacji z obiektem (14) i regulatorem redukcyjnym (17) ma realizować zadanie przestawienia. Z punktu widzenia realizacji tego zadania sterowania najbardziej korzystna jest sytuacja, gdy transmitancja układu zamkniętego (20) ma jeden podwójny biegun rzeczywisty ujemny, gdyż gwarantuje to krótki czas regulacji przy braku przeregulowań. W rozważanym wypadku spełnienie tego warunku implikuje natychmiast następujący warunek na współczynniki w_1 oraz w_2 regulatora:

$$w_1 = 2\sqrt{k w_2} \quad (21)$$

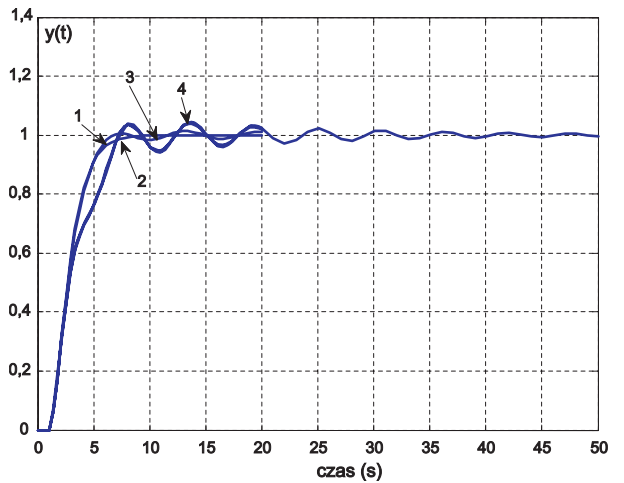
Dla współczynników (21) i przy założeniu, że parametry transmitancji obiektu regulacji są dokładnie znane, transmitancja układu zamkniętego (20) na jeden podwójny biegun równy $-\sqrt{k}$.

Dla lepszej ilustracji powyższych rozważań wykonano również badania symulacyjne z użyciem środowiska MATLAB/SIMULINK. Model SIMULINK-owy do testów jest pokazany na rys. 2.

Wykorzystując układ z rys. 2 wykonano badania symulacyjne regulatora redukcyjnego zbudowanego zgodnie z wzorami (17) – (20). Zbadano przypadki:

gdy parametry obiektu regulacji (14) są dokładnie znane (dla tego przypadku został zbudowany regulator) oraz gdy parametry obiektu regulacji ζ oraz ω są znane w przybliżeniu, a dokładnie znane jest tylko wzmocnienie statyczne obiektu k . Wartości liczbowe parametrów obiektu i regulatora są podane w tab. 1. Podczas wszystkich testów wartość wzmocnienia statycznego obiektu k była równa 1.

Przebiegi wielkości regulowanej $y(t)$ w funkcji czasu przy skokowej zmianie wartości zadanej r z wartości $r=0$ na wartość $r=1$ są pokazane na rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi wielkości regulowanej $y(t)$ w układzie regulacji dla przykładu 1

Dla przebiegów z rys. 3 można obliczyć wartości bezpośrednich wskaźników jakości regulacji: prze-regulowanie w procentach wartości ustalonej i czas regulacji liczony jako czas, po którym wartość uchybu regulacji jest w sposób trwały mniejsza od 5 %.

Tab. 2. Wartości bezpośrednich wskaźników jakości regulacji dla przebiegów z rys. 3

Nr testu	Przeregulowanie [% wartości ustalonej]	Czas regulacji [s]
1	0,0000	5,9332
2	1,4009	5,5876
3	3,6333	11,1175
4	4,1493	11,3479

Wartości tych wskaźników dla wszystkich testów są podane w tab. 2.

Na podstawie analizy przebiegów z rys. 3 oraz wartości wskaźników jakości regulacji przedstawionych w tab. 2 można stwierdzić, że w przypadku rozważanego przykładowego obiektu regulacji proponowany regulator redukcyjny zapewnia bardzo dobrą jakość regulacji oraz odporność na niepewność parametrów obiektu.

Przykład 2

Jako drugi przykład rozważmy syntezę regulatora redukcyjnego dla obiektu III rzędu, którego transmitancja zawiera jedną parę biegunów zespolonych sprzężonych oraz jeden stabilny biegun rzeczywisty:

$$G(s) = \frac{k}{(s^2 + \zeta s + \omega^2)(s + \lambda)} \quad (22)$$

Odpowiedź skokowa samego obiektu regulacji opisanego transmitancją (22) dla wartości parametrów: $k = 1$, $\zeta = 0,05$, $\omega = 1$, $\lambda = 1$ pokazana jest na rys. 4.

Transmitancja (22) również opisuje dużą klasę rzeczywistych obiektów dynamicznych. Załóżmy, że regulator redukcyjny dla rozważanego obiektu jest budowany w celu eliminacji wpływu części oscylacyjnej na układ regulacji. W tej sytuacji można przyjąć, że:

$$\begin{aligned} M_p(s) &= s^2 + \zeta s + \omega^2 \\ M_r(s) &= s + \lambda \end{aligned} \quad (23)$$

Regulator redukcyjny w rozważanym przypadku może mieć identyczną postać, jak w przykładzie 1 i jest on opisany przez (17) – (19).

Przy założeniu, że współczynniki wielomianu $M_p(s)$ opisującego oscylacyjną część dynamiki obiektu są dokładnie znane, transmitancja wymuszeniowa całego układu regulacji ma w rozważanym przypadku następującą postać:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k}{w_2 s^3 + (w_2 \lambda + w_1) s^2 + w_1 \lambda s + k} \quad (24)$$

W rozważanym wypadku syntezę regulatora redukcyjnego rozpoczynamy od wyznaczenia obszarów stabilności na płaszczyźnie parametrów regulatora w_1 oraz w_2 . Zagadnienie wyznaczania obszarów stabilności układu regulacji na płaszczyźnie parametrów regulatora ma fundamentalne znaczenie dla poprawności działania układu regulacji i jest przedstawione między innymi w pracy [1].

Warunkiem koniecznym stabilności asymptotycznej układu opisanego przez (24) jest, aby obydwa parametry regulatora redukcyjnego w_1 oraz w_2 były dodatnie. Wynika to bezpośrednio z warunku koniecznego stabilności układu liniowego ciągłego opisanego transmitancją operatorową (zob. np. [7]).

$$\begin{aligned} w_1 &> 0 \\ w_2 &> 0 \end{aligned} \quad (25)$$

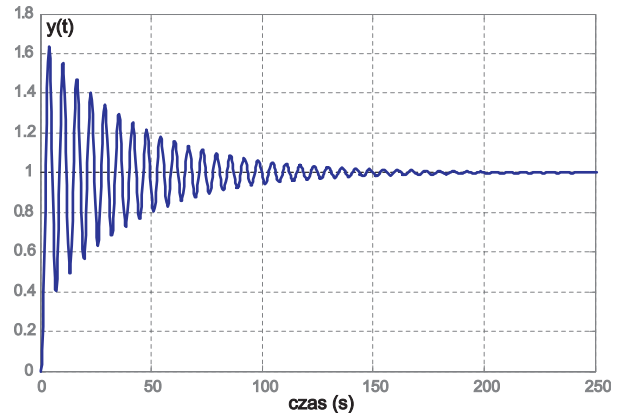
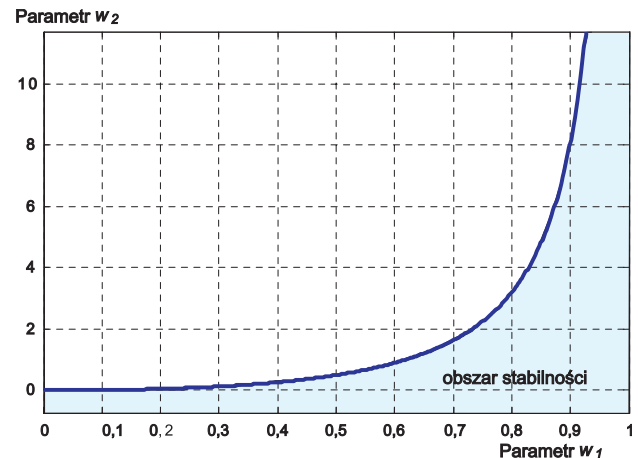
Dla parametrów spełniających (25) należy następnie wyznaczyć obszary stabilności. Do rozwiązania tego problemu można zastosować np. kryterium Hurwitza. Po jego zastosowaniu otrzymujemy następujący warunek na współczynniki regulatora w_1 oraz w_2 .

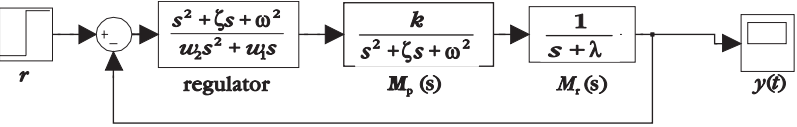
$$w_2 < \frac{w_1^2 \lambda}{k - w_1 \lambda^2} \quad (26)$$

W nierówności (26) można zauważyć natychmiast, że funkcja rozgraniczająca obszary stabilności ma asymptotę pionową dla granicznej wartości parametru w_{1g} równej:

$$w_{1g} = \frac{k}{\lambda^2} \quad (27)$$

Obszar stabilności na płaszczyźnie parametrów w_1 oraz w_2 musi jednocześnie spełniać warunki (25) oraz

**Rys. 4.** Odpowiedź skokowa obiektu regulacji z przykładu 2**Rys. 5.** Przykładowy obszar stabilności na płaszczyźnie parametrów regulatora dla przykładu 2 i wartości parametrów: $\lambda = 1$, $k = 1$



Rys. 6. Model do badań symulacyjnych dla przykładu 2

Tab. 3. Liczbowe wartości parametrów obiektu i regulatora do testów symulacyjnych dla przykładu 2

Nr testu	Parametry obiektu			Parametry regulatora					Komentarz
				$L_c(s)$			$M_c(s)$		
	ζ	ω		λ	v_2	v_1	v_0	w_2	
1	0,05	1,0	1	1	0,05	1	1	0,9	Regulator dostrojony przy założeniu dokładnej znajomości parametrów obiektu
2	0,09	1,0	1,0	1	0,05	1	1,0	0,9	Parametry regulatora z testu (1), zmienione parametry obiektu
3	0,05	1,1	1,0						
4	0,03	1,1	1,0						
5	0,05	1,0	1,2						
6	0,05	1,0	0,9						

(26). Przykładowy obszar stabilności dla wzmocnienia statycznego obiektu $k = 1$ oraz bieguna rzeczywistego równego $\lambda = 1$ jest przedstawiony na rys. 5. Obszar stabilności znajduje się pod krzywą rozgraniczającą.

Dla rozważanego układu regulacji przeprowadzono testy symulacyjne analogicznie, jak w poprzednim przykładzie, z użyciem modelu przedstawionego na rys. 6, przy założeniu, że regulator redukcyjny jest opisany transmitancją (17) – (19), a obiekt regulacji jest opisany transmitancją (22). Dodatkowym ograniczeniem jest w rozważanym wypadku konieczność spełnienia warunków stabilności (25) i (26) przez parametry regulatora.

Podobnie, jak w przykładzie 1, testy symulacyjne wykonano dla sytuacji, gdy znane są dokładne wartości parametrów transmitancji obiektu oraz dla sytuacji, gdy te parametry znane są jedynie w przybliżeniu. Zbadano następujące sytuacje: gdy w przybliżeniu znane są parametry części oscylacyjnej obiektu: ζ i ω , oraz gdy w przybliżeniu znany jest parametr l części aperiodycznej transmitancji obiektu. Podczas wszystkich testów wartość wzmocnienia statycznego obiektu k była równa 1. Wartości liczbowe parametrów obiektu i regulatora są podane w tab. 3, przebiegi wielkości regulowanej $y(t)$ dla wszystkich testów są podane na rys. 7.

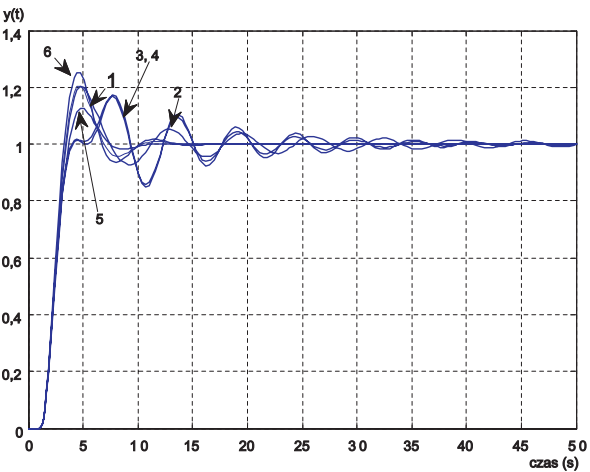
Analogicznie jak w przykładzie 1, dla przebiegów z rys. 6. można obliczyć bezpośrednie wskaźniki jakości regulacji: przeregulowanie w procentach wartości ustalonej i czas regulacji liczony jako czas, po którym wartość uchybu regulacji jest w sposób trwały mniejsza od 5 %. Wartości tych wskaźników dla wszystkich testów są podane w tab. 4.

Na podstawie analizy przebiegów pokazanych na rys. 7 oraz bezpośrednich wskaźników jakości regulacji podanych w tab. 4 można stwierdzić, że propo-

nowany regulator redukcyjny zapewnia dobrą jakość regulacji w układzie i dodatkowo zapewnia zadowalającą odporność układu na niepewność parametrów obiektu regulacji.

W celu porównania jakości regulacji w rozważanym układzie z proponowanym regulatorem redukcyjnym, dla rozważanego obiektu regulacji przeprowadzono także testy z wykorzystaniem typowego regulatora PID dostrojonego na podstawie wzmocnienia krytycznego z użyciem reguł Zieglera–Nicholsa. Model zastosowany do testów pokazany jest na rys. 8, wzmocnienie krytyczne i okres oscylacji nietyłumionych obiektu oraz wyznaczona na ich podstawie nastawy regulatora są podane w tab. 5. Wszystkie testy zostały wykonane dla parametrów obiektu opisanych w tab. 3, przebiegi odpowiedzi

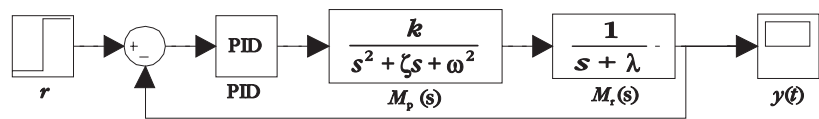
skokowych układu regulacji podczas testów są podane na rys. 9, a wartości bezpośrednich wskaźników jakości regulacji dla wszystkich testów z rys. 9 są podane w tab. 6.



Rys. 7. Przebiegi wielkości regulowanej $y(t)$ w układzie regulacji z regulatorem redukcyjnym dla przykładu 2

Tab. 4. Wartości bezpośrednich wskaźników jakości regulacji dla przebiegów z rys. 7

Nr testu	Przeregulowanie [% wartości ustalonej]	Czas regulacji [s]
1	20,56	6,3940
2	19,74	13,4217
3	16,46	17,1083
4	16,87	19,5276
5	12,37	6,3940
6	25,06	8,9286

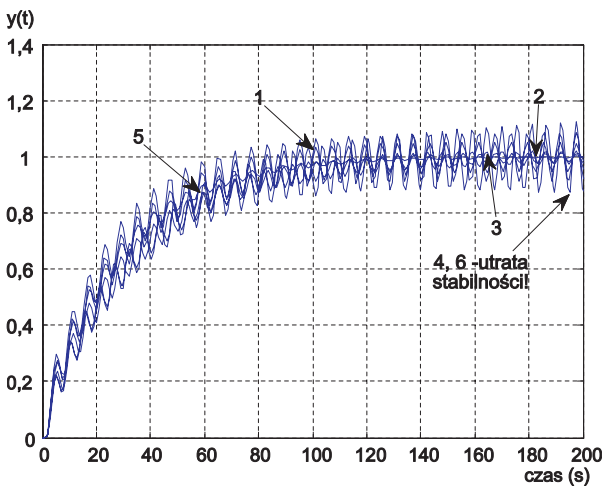


Rys. 8. Model do badań symulacyjnych z regulatorem PID dla przykładu 2

Tab. 5. Nastawy regulatora PID do przykładu 2

Wzmocnienie krytyczne obiektu k_{kr}	0,1888
Okres oscylacji nietłumionych T_{osc} [s]	5,9908
Wzmocnienie regulatora k_r	0,1128
Czas całkowania T_i [s]	2,9954
Czas różniczkowania T_d [s]	0,7488

Na podstawie porównania przebiegów z rys. 7 i rys. 9 oraz tab. 4 i tab. 6 można stwierdzić natychmiast, że proponowany w pracy regulator redukcyjny zapewnia znacznie lepszą jakość regulacji w sensie rozważanych bezpośrednich wskaźników, niż regulator PID dostrojony wg reguł Zieglera–Nicholsa. Dodatkowo układ z regulatorem redukcyjnym jest znacznie mniej wrażliwy na niepewność parametrów obiektu regulacji, niż układ z regulatorem PID, gdzie przy zaburzeniu wartości parametrów obiektu w dwóch przypadkach nastąpiła utrata stabilności układu.



Rys. 9. Przebiegi wielkości regulowanej $y(t)$ w układzie regulacji z regulatorem PID dla przykładu 2

Tab. 6. Wartości bezpośrednich wskaźników jakości regulacji dla przebiegów z rys. 9

Nr testu	Przeregulowanie [% wartości ustalonej]	Czas regulacji [s]
1	5,0	>200 (granica stabilności)
2	0,0	92,3963
3	3,0	145,8525
4	Utrata stabilności	
5	1,5	134,7926
6	Utrata stabilności	

Uwagi końcowe

Uwagi końcowe mogą być sformułowane następująco:

- Wyniki badań symulacyjnych pozwalają wnioskować, że proponowany regulator redukcyjny zbudowany w oparciu o znajomość modelu obiektu w postaci transmitancji operatorowej, może zapewnić dobrą jakość regulacji w układzie oraz zapewnia zadowalającą odporność układu na niepewność parametrów obiektu regulacji.
- Struktura proponowanego regulatora jest łatwa do realizacji na typowych przemysłowych cyfrowych urządzeniach sterujących, np. na sterownikach PLC.
- Przedmiotem dalszych prac będzie uzasadnienie teoretyczne otrzymanych wyników symulacyjnych z wykorzystaniem metod analizy systemów o niepewnych parametrach, omawianych przykładowo w pracach [2], [3] lub [11] oraz praktyczna implementacja omawianego algorytmu na sterownikach PLC z wykorzystaniem podejścia zaprezentowanego w pracy [10].

Bibliografia

1. Byrski W.: *Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych* Wyd. AGH 2007.
2. Busłowicz M.: *Stabilność układów liniowych stacjonarnych o niepewnych parametrach*. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 1997.
3. Busłowicz M.: *Robust Stability analysis of linear electrical circuits with uncertain parameters*. Przegląd Elektrotechniczny nr 82 (11), 2006, s. 112–116.
4. Górecki R.: *Regulator redukcyjny*. Zeszyty Naukowe AGH Elektrotechnika Tom 15 (1996) Zeszyt 3, s. 267–279.
5. Isermann R.: *Digital Control Systems* vol.1 Springer, 1989.
6. Mitkowski W.: *Stabilizacja liniowego systemu parabolicznego za pomocą dyskretnego kompensatora dynamicznego*. Kwart. AGH „Elektrotechnika” T. 4, (1985) Z. 2, s. 189–197.
7. Mitkowski W.: *Stabilizacja systemów dynamicznych*, WNT, Warszawa 1991.
8. Oprędkiewicz K.: *Dyskretny regulator redukcyjny i jego praktyczna implementacja* Pomiary, Automatyka, Robotyka (PAR) nr 11/2001, s. 8–15.
9. Oprędkiewicz K.: *Symulacyjne dostrajanie specjalnych regulatorów cyfrowych*. Automatyka 2003 t. 7, z. 1–2 s. 205–220.
10. Oprędkiewicz K.: *Problemy implementacji specjalnych algorytmów regulacji ciągłej na platformach sprzętowo-programowych PLC*. W: *Sterowanie i Automatyzacja: aktualne problemy i ich rozwiązania*, pod redakcją K. Malinowskiego i L. Rutkowskiego, 2008, s. 622–632.
11. Palmor Z. J.: *Time – delay Compensation*. Int. Journal of Control, vol. 36, 1980, pp. 937 – 949.