

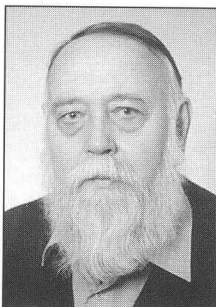
Adam ŻUCHOWSKI

POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ

Metoda doboru nastaw regulatora PID dla liniowych obiektów z opóźnieniem rzeczywistym i o monotonicznie rosnącej charakterystyce skokowej

Prof. dr hab. inż. Adam ŻUCHOWSKI

Profesor zwyczajny zatrudniony w Instytucie Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej. Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej odbył w latach 1951-1956 specjalizując się w budowie elektrycznych przyrządów pomiarowych, w późniejszym etapie w metrologii i automatyce. Ze szkolnictwem wyższym związany zawodowo od 1955 roku (Politechnika Wrocławska, Politechnika Szczecińska). Jest współtwórcą polskiej szkoły miernictwa dynamicznego; posiada w dorobku około 300 publikacji. W kwietniu 2005 roku upłynęło 50 lat jego działalności naukowej, w tym 47 lat publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie Pomiary Automatyka Kontrola. Szczegółowa charakterystyka działalności Profesora zamieszczona jest w PAK 4/2005, str. 3.



Streszczenie

Wśród wielu metod doboru nastaw regulatora PID na wyróżnienie zasługuje metoda S. Skoczowskiego dostosowana do obiektów z opóźnieniem rzeczywistym i inercją drugiego rzędu. Zaproponowano rozszerzenie tej metody dla obiektów o bardziej złożonych modelach dynamiki.

Abstract

The Skoczowski's method of setting of PID-controller deserves to be the favorable one. The method is adjusted to plants represented by second order inertia models with real delays. The proposal of adopting of this method to more complicated models of plant dynamic is presented.

1. Wstęp

W miesięczniku PAK 7-8/2004 [1] zaprezentowano prostą i elegancką metodę S. Skoczowskiego dla doboru nastaw regulatora PID opartą o redukcję zer i biegunów transmitancji. Autor przyjmuje w bardziej złożonym przypadku, że transmitancja obiektu posiada postać:

$$K_0(s) = \frac{k \cdot \exp(-sT)}{(1+sT_1)(1+sT_2)} \quad (1)$$

opóźnienie rzeczywiste aproksymuje zależnością:

$$\exp(-sT) = \frac{1-s\frac{T}{2}}{1+s\frac{T}{2}} \quad (2)$$

a parametry regulatora V , T_i , T_d przyjmuje w postaci: $T_i = T_1 + T_2$, $T_d = T_1 \cdot T_2$ dobierając V w taki sposób, by mianownik „resztkowy” transmitancji wiążącej sygnał odniesienia z sygnałem regulowanym posiadał taką postać, jak w przypadku elementu oscylacyjnego o określonym, zadanym przeregulowaniu. Postać transmitancji (1) to wynik identyfikacji dynamiki obiektu o charakterystyce skokowej rosnącej monotonicznie z pewnym rzeczywistym opóźnieniem. Obiekt może posiadać inną transmitancję i wtedy postać (1) stanowi wynik pewnego przybliżenia. Jeśli tak - to mając na uwadze postulat najkrótszego czasu regulacji należałoby transmitancję obiektu przybliżać w taki sposób, by nie tracąc na dokładności modelu uzyskać maksymalne czasy T_1 i T_2 , a minimalne opóźnienie T . W skrajnym przypadku obiektu z czystym opóźnieniem rzeczywistym $\exp(-sT)$ należałoby to opóźnienie aproksymować transmitancją o jakimś mianowniku

$$M(s) = (1+sT_1)(1+sT_2) \text{ lub } M(s) = 1 + 2\beta \cdot \frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}$$

i odpowiednio dobranym licznikiem, znów po to, by przez redukcję zer i biegunów zminimalizować czas regulacji zachowując określone przeregulowanie.

Jak widać problem doboru parametrów regulatora PID zostaje niejako zastąpiony problemem doboru najwłaściwszej transmitancji modelu dynamiki obiektu nie powodującej utraty dokładności tegoż modelu. Nie jest to problem łatwy.

2. Propozycja rozszerzenia metody

Zalety proponowanej metody S. Skoczowskiego - jej prostota i elegancja składają się jednak nie tylko do tego, by ją stosować wtedy, gdy dynamika obiektu odpowiada zależności (1) przy małym opóźnieniu T , ale także do tego, by wykorzystując metody symulacji komputerowej rozszerzyć założenia dotyczące dopuszczalnej transmitancji obiektu. Można w tym celu przyjąć, że w wyniku identyfikacji dynamiki obiektu zostanie wyznaczony dostatecznie dokładny jej model o postaci:

$$K_0(s) = \frac{k \cdot \exp(-st_0)}{(1+sT)^m \cdot (1+2\beta sT + s^2T^2)} \quad (3)$$

który można wyznaczyć jedną z klasycznych metod opartych o pomiar charakterystyki skokowej obiektu i zastąpienia członu $(1+sT_0)^n$ przy ułamkowym n członem jak we wzorze (3) z m będącym liczbą naturalną, mniejszą od n. Odpowiednią metodę obliczeniową zaprezentujemy w dalszej części pracy. Przyjmując dla regulatora $T_i T_d = T^2$, oraz $T_i = 2\beta T$ otrzymuje się zastępczą transmitancję $K_z(s)$ wiążącą sygnał regulowany z sygnałem odniesienia o postaci:

$$K_z(s) = \frac{\exp(-st_0)}{s \cdot T_c (1+sT)^m + \exp(-st_0)} \quad (4)$$

gdzie

$$T_c = \frac{2 \cdot \beta \cdot T}{k \cdot V}$$

Tu przypadek szczególny $m=1$ odpowiada metodzie S. Skoczowskiego z tym jednak, że człon $\exp(-st_0)$ nie będzie zastępowany żadnym wzorem przybliżonym, natomiast metodą symulacji komputerowej zostaną dobrane wartości T_c w taki sposób, by przy danym m , T i t_0 zapewnić odpowiednie przeregulowanie $S\%$ w układzie. Jednocześnie w wyniku tych samych symulacji można wyznaczyć czas regulacji $t_{r,S}$ tj. czas przy określonym pasie tolerancji takim, jak dopuszczalne $S\%$.

Wyniki odpowiednich eksperymentów symulacyjnych można zestawiać w tabeli, lub zaprezentować w postaci podanych niżej zależności przybliżonych:

$$\begin{aligned} T_c &= T(0.73 + 2.57 \cdot m) + 2.48 \cdot t_0 & \text{dla } S &= 0.1\% \\ &T(0.40 + 2.33 \cdot m) + 2.27 \cdot t_0 & S &= 1\% \\ &T(0.23 + 2.21 \cdot m) + 2.15 \cdot t_0 & S &= 2\% \\ &T(-0.06 + 1.97 \cdot m) + 1.95 \cdot t_0 & S &= 5\% \\ &T(-0.32 + 1.72 \cdot m) + 1.72 \cdot t_0 & S &= 10\% \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} t_{r,S} &= T(2.0 + 5.0 \cdot m) + 4.4 \cdot t_0 & \text{dla } S &= 1\% \\ &T(1.4 + 4.3 \cdot m) + 3.9 \cdot t_0 & S &= 2\% \\ &T(0.5 + 3.5 \cdot m) + 3.2 \cdot t_0 & S &= 5\% \\ &T(-0.2 + 2.9 \cdot m) + 2.7 \cdot t_0 & S &= 10\% \end{aligned} \quad (6)$$

rezygnując z wysokiej dokładności wzorów (zestawienie tabelaryczne jest oczywiście znacznie dokładniejsze). Wzory (3), (4), (5) i (6) pozwalają dobrać parametry regulatora przy zadanym przeregulowaniu $S\%$ i zorientować się w rzędzie długości czasu regulacji pod warunkiem, że znane są już parametry modelu dynamiki obiektu (3).

Tab. 1. Wartości T_c przy $T = 1$, $k = 1$ w funkcji $q = t_0/T$ dla różnych m

	q S%	0	1	2	3	4	5	6
m = 0	0.1		2.479	4.959	7.437	9.916		
	1.0		2.268	4.536	6.804	9.072		
	2.0		2.154	4.308	6.462	8.616		
	5.0		1.954	3.890	5.835	7.780		
	10.		1.723	3.447	5.170	6.893		
m = 1	0.1	3.300	5.480	7.800	10.19	12.60		
	1.0	2.730	4.824	7.012	9.930	11.48		
	2.0	2.432	4.490	6.600	8.726	10.86		
	5.0	1.905	3.886	5.846	7.793	9.740		
	10.	1.398	3.285	5.072	6.827	8.569		
m = 2	0.1	5.846	8.100	10.43	12.81	15.23	17.66	
	1.0	5.082	7.201	9.383	11.60	13.83	16.07	
	2.0	4.672	6.734	8.838	10.95	13.09	15.22	
	5.0	3.935	5.877	7.819	9.761	11.71	13.65	
	10.	3.193	5.003	6.774	8.511	10.27	12.11	
m = 3	0.1	8.373	10.65	13.00	15.40	17.80	20.23	22.66
	1.0	7.380	9.538	11.72	13.93	16.16	18.39	20.64
	2.0	6.868	8.940	11.04	13.15	15.29	17.42	19.55
	5.0	5.917	7.849	9.786	11.72	13.67	15.61	17.54
	10.	4.951	6.731	8.499	10.24	11.97	13.72	15.45
m = 4	0.1	10.89	13.19	15.55	17.94	20.35		
	1.0	9.667	11.84	14.04	16.24	18.47		
	2.0	9.042	11.13	13.24	15.34	17.46		
	5.0	7.883	9.820	11.75	13.68	15.62		
	10.	6.696	8.466	10.22	11.95	13.70		

3. Wyznaczenie parametrów modelu dynamiki obiektu

Tylko w nielicznych przypadkach znana jest dokładna postać transmitancji obiektu $K_0(s)$. Jeśli odbiega ona od (1) - można wykorzystać jedną z metod opisanych np. w [2], [3] lub [5] i wyznaczyć parametry k , t_0 , T_0 oraz n modelu Strejca o postaci:

$$K_0(s) = \frac{k \cdot \exp(-st_0)}{(1 + sT_0)^n}$$

zakładając, że zdjęta eksperymentalnie skokowa charakterystyka obiektu rośnie monotonicznie w przedziale $(0, k)$ i model Strejca jest wystarczająco dokładny. Parametr n jest zwykle ułamkiem niewłaściwym, to też należy mianownik transmitancji $(1 + sT_0)^n$ przybliżyć zależnością

$$(1 + sT_0)^n \cong (1 + sT)^m \cdot (1 + 2\beta sT + s^2T^2) \quad (7)$$

Dla zachowania zgodności wzorów w zakresie małych s trzeba przyjąć:

$$n \cdot T_0 = m \cdot T + 2\beta T \quad (8)$$

natomiast minimalizując błąd w obszarze największej czułości wzoru na zmiany n [4] należy spełnić warunek:

$$\left(1 + \frac{2}{n}\right)^n = \left(1 + \frac{2}{m + 2\beta}\right)^m \cdot \left(1 + \frac{4\beta}{m + 2\beta} + \frac{4}{(m + 2\beta)^2}\right) \quad (9)$$

oznaczający równość obu stron przybliżenia (7) dla

$$s = \frac{2}{n \cdot T_0}$$

Po wprowadzeniu oznaczenia:

$$\frac{2}{m + 2\beta} = x, \quad 2\beta = \frac{2}{x} - m \quad (10)$$

otrzymuje się równanie:

$$\left(1 + \frac{2}{n}\right)^n = (1 + x)^m \cdot (\beta - m \cdot x + x^2) \quad (11)$$

pozwalające przy przyjętym m wyznaczyć x i tym samym pozostałe parametry transmitancji. Warto zauważyć, że zawsze $\left(1 + \frac{2}{n}\right)^n < e^2$

gdzie e jest podstawą logarytmów naturalnych, a z warunku stabilności modelu $\beta > 0$ wynika, że dopuszczalne jest przyjęcie takich m , dla których $x < \frac{2}{m}$.

Ponieważ

$$M = \left(1 + \frac{2}{n}\right)^n < 7.4$$

zatem dla często spotykanych M (zwykle $M > 3$) wartości x są mniejsze od jedności i równanie (11) można zastąpić prostym równaniem kwadratowym:

$$\frac{M}{3} = 1 + \frac{2}{3} \cdot m \cdot x + \frac{1}{6} \cdot (m-1) \cdot (m-2) \cdot x^2 \quad (12)$$

którego wyróżnik jest dodatni przy każdym, arbitralnie przyjętym m .

Przyjmując jako uproszczenie:

$$x = \frac{M-3}{2 \cdot m} \quad (13)$$

z postulatu stabilności modelu otrzymuje się warunek $M < 7$ praktycznie zawsze spełniony ($n < 35$), oraz wzór:

$$T = T_0 \cdot n \cdot \frac{M-3}{4 \cdot m} \quad (14)$$

Uwzględniając wzory (6) w ogólnej postaci:

$$T_{rs} = T \cdot (A + B \cdot m) + C \cdot t_0 \quad (15)$$

po uwzględnieniu (14) otrzymuje się:

$$T_{rs} = T_0 \cdot n \cdot \frac{M-3}{4 \cdot m} (A + B \cdot m) + C \cdot t_0 \quad (16)$$

skąd wynika postulat przyjmowania możliwie dużych wartości m dla uzyskania krótkiego czasu regulacji. Wobec:

$$2\beta = m \cdot \left(\frac{4}{M-3} - 1\right) \quad (17)$$

oznacza to także wprowadzenie do modelu dynamiki obiektu najlepiej dużych wartości β .

W praktyce, przy wyznaczaniu modelu o parametrach k , t_0 , T_0 i n można dokonywać pewnych manipulacji wartością t_0 zwłaszcza wtedy, gdy pomiar obarczony jest zakłóceniami i t_0 trudno wyznaczyć dokładnie. Zmienia to wartości T_0 , n i podane relacje dotyczące doboru m i β prowadząc znów do problemu najważniejszego wyboru modelu dynamiki obiektu, ale już w złagodzonej formie. Należy podkreślić, że niewłaściwy wybór parametrów tego modelu prowadzi do odchyłek przeregulowania $S\%$ w rzeczywistym układzie od wartości przyjętej w projekcie - zarówno w metodzie S. Skoczowskiego, jak i w proponowanym jej uzupełnieniu. Podobny wniosek dotyczy oszacowania czasu regulacji.

4. Przykład

Założmy, że obiekt posiada rzeczywistą transmitancję o postaci:

$$K_0(s) = \frac{e^{-s}}{(1+s)^3 \cdot (1+4 \cdot s + s^2)}$$

odpowiadającą dokładnie postaci (3), lecz inną, niż w przypadku (1). Wykorzystując wzory (3), (4), (5) i (6) po przyjęciu przeregulowania $S = 2\%$ można wyznaczyć parametry i transmitancję regulatora:

$$K_0(s) = \frac{0.444(1+4 \cdot s + s^2)}{4 \cdot s}$$

oraz spodziewany czas regulacji $t_{r2\%} = 18.2$ s. Badania symulacyjne prowadzą w tym przypadku do wyników $S = 1.9\%$, oraz $t_{r2\%} = 18$ s bardzo zbliżonych.

Załóżmy teraz, że transmitancja obiektu nie jest znana i zostanie wyznaczona w postaci (1) w oparciu o pomiar charakterystyki skokowej. Wykorzystując metodę podaną w [2] i manipulując czasem opóźnienia T w taki sposób, by uzyskać rząd mianownika transmitancji $n = 2$, a więc dwie jednakowe stałe czasowe $T_1 = T_2$ otrzymuje się w efekcie model dynamiki obiektu:

$$K_0(s) = \frac{e^{-2.43 \cdot s}}{(1 + 3.05 \cdot s)^2}$$

inny, niż model prawdziwy i zgodnie z metodą S. Skoczowskiego parametry i transmitancję regulatora w postaci:

$$K_r(s) = \frac{0.60(1 + 3.05 \cdot s)^2}{3.05 \cdot s}$$

Badanie symulacyjne układu z tak dobranym regulatorem i obiektem rzeczywistym dały w wyniku przeregulowanie $S = 0\%$, oraz czas regulacji $t_{2\%} = 16$ s, a więc wyniki bardzo zbliżone, a nawet nieco lepsze, choć nie można tego było przewidzieć.

Nie można też wykluczyć uzyskania wyników jeszcze lepszych poprzez dobór innej wartości czasu opóźnienia T . Pod tym względem proponowane rozszerzenie metody S. Skoczowskiego wydaje się bardziej bezpieczne i przewidywalne.

5. Podsumowanie

Wyniki badań symulacyjnych jednego tylko przypadku nie dają wystarczająco mocnych podstaw do wnioskowania o większej przydatności praktycznej którejs z omawianych metod, wolno jednak sądzić, że wiarygodność metody będzie tym większa im model

dynamiki obiektu będzie lepiej „dopasowany“ do założeń, co w przypadku tzw. obiektów „trudnych“ może przemawiać za metodą rozszerzoną. Istotne wydaje się także wykorzystanie właściwej metody identyfikacji dynamiki obiektu, zwłaszcza przy obecności zakłóceń.

6. Literatura

- [1] Skoczowski S. - Projektowanie odpornego regulatora PID, oparte o przybliżoną identyfikację modelu dla procesów z opóźnieniem. PAK 7-8/2004.
- [2] Skoczowski S. - Eine Bemerkungen zur Approximierung von Regelstrecken mit Ausgleich. Regelungstechnik 1983 H.7.
- [3] Żuchowski A. - O pewnej metodzie wyznaczania parametrów modelu Strejca. PAK 10/ 1993.
- [4] Papiński J. - Wykorzystanie modelu Strejca dla tworzenia pochodnych modeli dynamiki liniowych obiektów. Rozprawa doktorska. Politechnika Szczecińska, Wydział Elektryczny, Szczecin, 1996r.
- [5] Żuchowski A. - On methods of evaluation parameters of Strejcs model with the use of measurement data representing system step response. Metrology and Measurement Systems, Vol. XI Number 4/2004

Title: The method of setting of PID - controller for linear plants with real delay and monotonically growing step response.

Artykuł recenzowany

NOMINACJE PROFESORSKIE

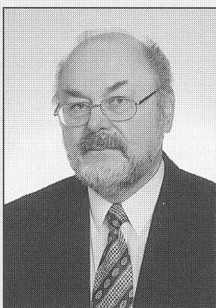
Tadeusz SKUBIS

Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS

urodził się w Olkuszu w roku 1946. Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej ukończył z wyróżnieniem w roku 1970. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał z wyróżnieniem w roku 1975, a stopień doktora habilitowanego w roku 1995 w dyscyplinie Elektrotechnika. Od roku 1998 jest profesorem Politechnik Śląskiej i Opolskiej. W kadencji 1996 - 1999 był prodziekanem do spraw nauki i organizacji Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Od roku 2003 kieruje Instytutem Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechniki Śląskiej.

Specjalizuje się w elektrycznych pomiarach dokładnych wielkości fizycznych, zwłaszcza składowych impedancji. Jego prace dotyczą nowych układów pomiarowych o skrajnie dużych wymaganiach metrologicznych. W tym obszarze ma osiągnięcia na skalę światową. Jest autorem unikatowych układów komparacyjnych wzorców impedancji, wdrożonych do stosowania w krajowych instytucjach metrologicznych (GUM, PTB). Kieruje badaniami naukowymi prowadzonymi w zorganizowanym przez niego zespole pomiarów precyzyjnych, realizowanymi dla przemysłu i służby miar. 6 - krotnie był kierownikiem grantów finansowanych przez Komitet Badań Naukowych.

Odbył staże naukowe w Wielkiej Brytanii oraz Niemczech, prowadził wykłady na Uniwersytecie Arystotelesa w Tessalonikach (Grecja). Współpracuje z Physikalisch-Technische Bundesanstalt w Braunschweigu (RFN). Prowadzi wykłady z teorii pomiaru, elektrycznych pomiarów dokładnych, kompatybilności elektromagnetycznej oraz pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi. Wypromował 4 doktorów nauk technicznych, recenzował prace doktorskie 9 - krotnie i habilitacyjne 4 - krotnie. Jest autorem ponad 100 prac nau-



kowych z dziedziny metrologii, opublikowanych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych, dwu monografiach (w tym: *Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiarów*), podręczników akademickich (w tym: *Opracowanie wyników pomiarów*), 12 skryptów, autorem referatów konferencyjnych prezentowanych m.in. na konferencjach o zasięgu światowym (*IEEE Conference on Precision Electromagnetic Measurements, IEEE Instrumentation and Measurements Technology Conference, IMEKO*). Jest autorem lub współautorem 5 patentów. Był organizatorem kilku konferencji naukowych z dziedziny metrologii, przewodniczącym lub członkiem ich Komitetów Naukowych lub Organizacyjnych (m.in. *Podstawowe Problemy Metrologii, Międzynarodowe Konferencje Metrologów, Metrologia Wspomagana Komputerowo, Czujniki Optyczne i Elektroniczne, Sympozja Pomiarów Magnetycznych, Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle, Elektryczne Pomiarów Dokładne*). Był recenzentem wielu artykułów naukowych do czasopiśmie zagranicznych i krajowych, m.in. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IEE Proceedings, Metrology and Measurement Systems*.

Jest członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, przewodniczącym sekcji Podstawowych Problemów Metrologii tego Komitetu, członkiem Komisji Metrologii PAN (oddział Katowice) oraz członkiem Międzynarodowego Komitetu Programowego kwartalnika *Metrology and Measurement Systems (PAN)*. Jest członkiem SEP, PTETiS, PTTS. Czterokrotnie uzyskał nagrody Ministra Edukacji za działalność naukową. Za opracowanie i wdrożenie do stosowania w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie oraz w Physikalisch Technische Bundesanstalt w Braunschweigu unikatowego precyzyjnego komparatora wzorców indukcyjności, w roku 2003 zespół pod jego kierownictwem otrzymał Nagrodę Siemens. W roku 2003 został odznaczony Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski. W dniu 11 maja 2005 r. prezydent RP nadał mu tytuł profesora nauk technicznych.