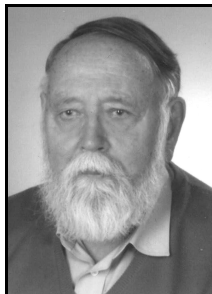


Adam ŻUCHOWSKIZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE,
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, KATEDRA STEROWANIA I POMIARÓW**Model dynamiki obiektu o stałych czasowych tworzących postępowanie geometryczne i jego wybrane aplikacje**

Prof. dr hab. inż. Adam ŻUCHOWSKI

Profesor zwyczajny zatrudniony w Instytucie Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej. Ze szkolnictwem wyższym związany zawodowo od 1955 roku (Politechnika Wroclawska, Politechnika Szczecińska). Jest współtwórcą polskiej szkoły miernictwa dynamicznego, posiada w dorobku ponad 300 publikacji. W kwietniu 2008 roku upłynęły 53 lata jego działalności naukowej.



e-mail: chlod@ps.pl

Streszczenie

Do uproszczonego opisu własności dynamicznych obiektów wieloinercyjnych o transmitancji (1) wykorzystuje się często trójparametrowy model Strejca. Dokładniejszy opis można uzyskać przyjmując model czteroparametrowy $K_q(s)$, w którym stałe czasowe tworzą postępowanie geometryczne [2, 3]. Przy zachowaniu zgodności rzędu dynamiki tego modelu (5) z rzędem dynamiki modelu (1) można wyznaczyć jego parametry albo wykorzystując zależności (6) i (7) oraz wykres z rys. 1 jeśli znane są wartości stałych czasowych modelu (1), albo wykorzystując eksperymenty identyfikacyjne jak w metodach [2, 3, 4, 6, 7]. Dla proponowanego modelu $K_q(s)$ określono reguły doboru nastaw regulatora PID przy przeregulowaniu $S=5\%$ (wzory 12). Symulowany eksperyment potwierdza (rys. 2), że model $K_q(s)$ jest lepszy od modelu Strejca. Istnieje możliwość utworzenia reguł doboru nastaw regulatorów innego typu dla modelu $K_q(s)$ także przy innych, arbitralnych założeniach.

Słowa kluczowe: obiekty wieloinercyjne, model dynamiki, nastawy regulatora.

The plant dynamics model with time constants forming the geometrical progression and its chosen applications**Abstract**

The Strejc's models defined by means of 3 parameters are usually used for simplified representation of dynamical properties of multi-inertia plants of type (1). The proposed model $K_q(s)$ defined by 4 parameters [2, 3] can be more accurate than Strejc's model. The time-constants of model (1) and identical orders of dynamics of both models (5) and (1) one can determine parameters of $K_q(s)$ using (6), (7) and curve in Fig. 1. Alternatively, the parameters of $K_q(s)$ can be determined on the basis of results of identification experiments similar to those associated with methods [2, 3, 4, 6, 7]. The method of choice of PID controller setting for $K_q(s)$ (formula (12)) has been proposed in the paper. The setting of controller according to (12) guarantees, that overshoot is less than 5%. The simulation experiments confirm, that considered model $K_q(s)$ is better than widely known Strejc's model. After modification of assumptions and requirements for controller design one can formulate other rules determining choice of controller parameters if plant under control can be represented by $K_q(s)$.

Keywords: model of plant dynamics, multi-inertia plants, controller setting.

1. Wstęp

Dynamikę liniowych obiektów wieloinercyjnych o transmitancji

$$K(s) = \frac{k}{(1+sT_1)(1+sT_2)\cdots(1+sT_n)} \quad (1)$$

opisuje $n+1$ parametrow: n stałych czasowych T_1, T_2, \dots, T_n i współczynnik statycznego wzmocnienia k . W przypadku istnienia niewielkiego opóźnienia rzeczywistego $\exp(-st_0)$ można uzupełnić mianownik transmitancji o dodatkowy człon postaci $(1+st_0/2)^2$ pomijając ten efekt, co wprowadzi pewne błędy, najprawdopodobniej nie istotne. Znaczna liczba parametrów utrudnia wykorzystanie takiego modelu do wyznaczania nastaw regulatora, a nie znany na ogół a priori rząd dynamiki n dodatkowo utrudnia identyfikację. Z tych powodów korzysta się w praktyce chętnie z tak zwanych modeli uproszczonych Kűpfmüllera lub Strejca [4, 5]. Trójparametrowy model Strejca jest zwykle od modelu Kűpfmüllera dokładniejszy, ale i on nie gwarantuje wysokiej dokładności przy obliczeniu odpowiedzi obiektu na podbudzenie w jej fazie początkowej, to jest dla krótkiego horyzontu czasowego. Ponieważ transmitancja modelu Strejca ma postać:

$$K_m(s) = \frac{k}{(1+sT)^m} \quad (2)$$

dla zapewnienia zgodności zachowań tego modelu z modelem (1) należałoby spełnić warunki:

$$T^m = T_1 \cdot T_2 \cdots T_n; \quad mT = T_1 + T_2 + \cdots + T_n; \quad m = n \quad (3)$$

przy zachowaniu jednakowej wartości współczynnika wzmocnienia, co daje się urzeczywistnić tylko w wyjątkowych przypadkach. Właściwym rozwiązaniem może być przyjęcie modelu uproszczonego o stałych czasowych tworzących postępowanie geometryczne:

$$T_1 = T; \quad T_i = Tq^{i-1}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

i rzędzie dynamiki n . Model taki ma cztery parametry, wolno się więc spodziewać, że będzie od modelu Strejca dokładniejszy, jeśli parametry te wyznaczymy w odpowiedni sposób [2, 3]. Jego transmitancję oznaczmy w skrócie symbolem $K_q(s)$:

$$K_q(s) = \frac{k}{(1+sT)(1+sqT)(1+sq^2T)\cdots(1+sq^{n-1}T)} \quad (5)$$

Omówimy inną niż [2, 3] metodę wyznaczania parametrów k, T, q, n oraz niektóre aplikacje modelu.

2. Wyznaczenie parametrów modelu $K_q(s)$

Należy jak się wydaje rozgraniczyć dwa przypadki. W pierwszym znana jest postać modelu $K(s)$ określona wzorem (1). Jeśli tak – to w modelu $K_q(s)$ należy zachować identyczny współczynnik wzmocnienia k , oraz rząd dynamiki, a wyznaczyć parametry T i q . Ponieważ stałe czasowe modelu $K_q(s)$ tworzą postępowanie geometryczne, zatem obowiązują zależności:

$$T_0 = T_1 + T_2 + \dots + T_n = T \frac{q^{n-1} - 1}{q - 1} \quad (6)$$

$$T_p^n = T_1 \cdot T_2 \cdots T_n = T^n q^{\frac{n(n-1)}{2}}$$

z których można wyznaczyć parametry T i q spełniając jednocześnie warunki (3). Można w tym celu wykorzystać np. rodzinę wykresów zależności:

$$\frac{T_0}{T_p} = \frac{q^n - 1}{q - 1} q^{\frac{1-n}{2}} \quad (7)$$

pokazanych na rysunku (1) i utworzonych dla różnych n całkowitych i dodatnich. Po odczycie wartości q wyznacza się T z jednej z zależności (6).

W drugim przypadku parametry transmitancji (1) nie są znane, należy więc wyznaczyć parametry k , T_0 , T_p i n eksperymentalnie. Łatwo zauważyć, że parametry k , T_0 są tak zwanymi momentami charakterystyki impulsowej zerowego i pierwszego rzędu [1]:

$$k = m_0; \quad T_0 = m_1 \quad (8)$$

i można je wyznaczyć znanymi metodami [4, 7], natomiast charakterystyka skokowa w początkowej fazie określona jest wzorem:

$$h(t) = k \cdot \frac{t^n}{n! T_p^n} \quad (9)$$

a parametry n i T_p można wyznaczyć np. w oparciu o tak zwaną „metodę pierwszych próbek” [2]. Tym samym problem identyfikacji nie wymaga specjalnych, nowych metod.

3. Dobór nastaw regulatora PID

Rozpatrzmy tutaj przypadek zastosowania w procesie regulacji regulatora PID z uwagi na możliwość uzyskania najkorzystniejszych efektów. Transmitancja otwartej pętli z uwzględnieniem modelu $K_q(s)$ ma postać:

$$K_{z0}(s) = \frac{Vk(1 + sT_c + s^2T_rT_c)}{sT_c(1 + sT) \cdots (1 + sTq^{n-2})(1 + sTq^{n-1})} \quad (10)$$

gdzie symbolami V , T_r , T_c oznaczono parametry regulatora, które należy tak dobrać, by uzyskać korzystne zachowanie się układu regulacji. Przyjmijmy, że jego miarą jest określone przeregulowanie $S\%$, oraz możliwie krótki czas regulacji t_r . Nie wykluczając innych arbitralnie ustalonych założeń przyjmijmy, że przeregulowanie nie powinno przekraczać 5%, a czas regulacji t_{r5} określimy jako czas, po którym przy podaniu na wejście układu skokowego sygnału odniesienia sygnał regulowany nie będzie się odchyłał od ustalonej wartości bardziej niż o 5%.

Dla skrócenia tego czasu można parametry regulatora T_r i T_c dobrać w taki sposób, by we wzorze (10) uzyskać redukcję zer i biegunów transmitancji dla dwóch biegunów dominujących, to jest przy $q \geq 1$, przyjmując:

$$T = Tq^{n-2}(1 + q); \quad T_rT_c = T^2q^{2n-3} \quad (11)$$

W tych warunkach pozostaje np. eksperymentalnie dobrać dla danego q taką wartość iloczynu Vk , by przeregulowanie wyniosło właśnie 5%, wyznaczyć t_{r5}/T i sporządzić wykresy zależności $kV(n, q)$, $t_{r5}/T(n, q)$, lub podać odpowiednie wzory interpolujące takie wykresy. Odpowiednie zależności uzyskane metodą symulacji komputerowej dla $n=4, 5, 6$ i 7 oraz przy zmianach q w zakresie od 1...2,2 podają wzory:

$$T_c/T = q^{n-2}(1 + q); \quad T_r/T = q^{n-1}/(1 + q); \quad V(q)/V(1) \cong q^a \left(\frac{q+1}{2} \right)^b$$

$$V(1)k \cong \frac{1 \cdot 0,2}{n-2}; \quad T_{r5}(q)/T_r(1) \cong 1 + c(q-1) + d(q-1)^2 + e(q-1)^3$$

$$T_{r5}(1)/T \cong 3,96(n-2) - 0,45(n-3) \quad (12)$$

a wartości współczynników a , b , c , d i e w zależności od rzędu dynamiki obiektu n zestawiono w tabeli 1.

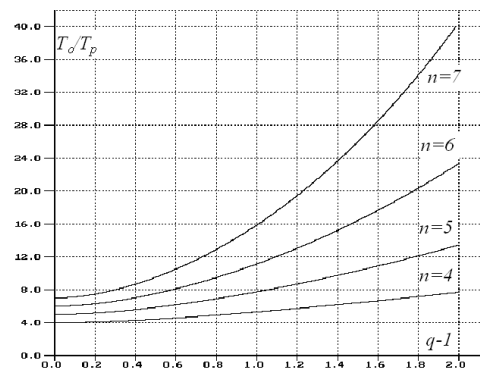
Należy zwrócić uwagę na następujące fakty: w przypadku obiektu o dynamice rzędu drugiego redukcja zer i biegunów transmitancji otwartej pętli obejmuje wszystkie stałe czasowe, w układzie regulacji nie występuje przeregulowanie, a czas regulacji można teoretycznie dowolnie skrócić zwiększając parametr V . Wzory (12) stanowią aproksymacje zależności uzyskanych metodą symulacji komputerowej. Zakres zmian q jest niezbyt wielki, ale – zwłaszcza przy wysokim rzędzie dynamiki n duże q oznacza, że najmniejsza stała czasowa T obiektu jest pomijalnie mała w porównaniu z największą i praktycznie tylko minimalnie wpływa na własności układu regulacji. Z tych powodów można maksymalną wartość q ograniczyć dość znacznie, praktycznie do $q \leq 2,5$.

Tab. 1. Zestawienie wartości współczynników we wzorach (12)
Tab. 1. Tabulation of coefficient values for formula (12)

n	3	4	5	6	7
a	1,00	1,70	3,27	4,59	6,14
b	1,00	0,51	-1,53	-3,28	-5,44
c	0	0,51	0,85	1,50	2,26
d	0	0	0,68	1,13	1,50
e	0	0	-0,15	0,26	1,70

4. Przykład

Załóżmy, że obiekt ma stałe czasowe $T_1 = T_2 = 0,5$ s, $T_3 = 2$ s, $T_4 = 3$ s, o wartościach nie tworzących postępu geometrycznego. Ponieważ $n=4$ oraz $T_0=6$ s, $T_p=1,107$ s, przy wykorzystaniu wykresu z rys. 1 otrzymuje się $q=2,06$ i zastępcze stałe czasowe o wartościach $T=0,374$ s, $T_1=0,77$ s, $T_2=1,59$ s oraz $T_3=3,27$ s. Wykorzystując wzory (12) przy założeniu, że $k=1$ otrzymuje się: $T_c=4,86$ s, $T_r=1,07$ s, $V=2,16$, $T_{r5}=4,85$ s, i z założenia $S = 5\%$.



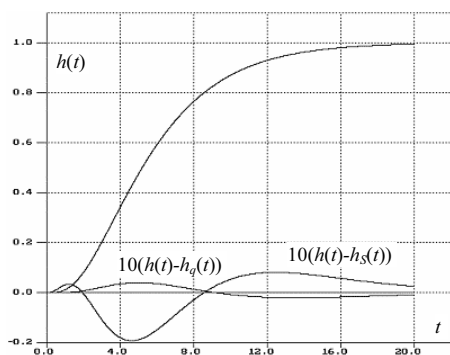
Rys. 1. Rodzina charakterystyk pomocniczych do wyznaczenia parametru q
Fig. 1. The auxiliary characteristics for determining of parameter q

W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej dla tak dobranych nastaw regulatora PID i dla obiektu prawdziwego otrzymuje się przeregulowanie $S = 5,2\%$ i czas regulacji $t_{r5}=4,4$ s, z pominięciem niewielkiego przekroczenia granicy dopuszczalnej (5,2% w stosunku do założonej wartości 5%). W tej sytuacji wolno uznać poprawność wykorzystanej metody.

Model Strejca uzyskany w oparciu o metodę [6] ma tu postać:

$$K_m(s) = \frac{1}{(1 + 2s)^3}$$

i wprowadza błędy charakterystyki skokowej większe od błędów modelu $K_q(s)$, co ilustrują wykresy na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka skokowa transmitancji obiektu i błędy popełniane przy korzystaniu z zastępujących ją modeli Strejca oraz modelu $K_q(s)$
Fig. 2. The step response for plant transfer function and errors caused by its substitution with responses of Strejc's model and $K_q(s)$ respectively

Dobierając dla takiego modelu Strejca parametry regulatora PID w identyczny sposób jak w omawianej metodzie otrzyma się $T_c=4$ s, $T_f=1$ s, $V=1,05$, a po zastosowaniu tak dobranego regulatora do rzeczywistego obiektu – przeregulowanie $S=3,9\%$ oraz czas regulacji $t_s=8,2$ s. Wyniki te są gorsze.

5. Podsumowanie

Proponowana metoda wydaje się spełniać pokładane w niej nadzieje, a po wykonaniu odpowiednich symulacji komputerowych można ustalić zasady doboru nastaw regulatora dla innych kryte-

riów, to jest innego przeregulowania (np. dla $S=0\%$) i inaczej zdefiniowanego czasu regulacji. Można także ograniczyć się do regulatora PI, lub PD, choć nie wydaje się to uzasadnione. Należy też pamiętać, że w przypadku identyfikacji parametrów obiektu opartej o eksperymenty – należy wykluczyć przypadki, w których charakterystyka skokowa obiektu ma ekstrema, lub wykazuje opóźnienie rzeczywiste.

6. Literatura

- [1] Halawa J.: Metoda wyznaczania transmitancji uproszczonych i ich zastosowania w automatyce i elektroenergetyce. Pol. Wroc., Instytut Cybernetyki Technicznej. Prace naukowe 1991, seria Monografie Nr 21.
- [2] Skoczowski S.: Uniwersalny model uproszczony procesów aperiodycznych z opóźnieniem. Mat. XIV Symp. Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych. Krynica, 19-23 września 2004. Wyd. Katedry Metrologii AGH Kraków.
- [3] Skoczowski S.: Praktyczne aspekty identyfikacji modeli uproszczonych dla autotuning regulatorów PID. Symp. Naukowe: Perspektywy i prognozy rozwojowe badań na styku automatyki i metrologii. 15-17 kwietnia 2006. Szczecin-Niechorze, Wyd. Pol. Szcz.
- [4] Zielonko R.: Ogólne zasady projektowania kształtu sygnałów pomiarowych. Metrologia i Systemy Pomiarowe, 1988 r. Vol 1.
- [5] Strejc V.: Naherungsverfahren für aperiodische Übertragungs – charakteristiken. Regelungstechnik 1959. H. 4.
- [6] Żuchowski A.: Modele dynamiki i identyfikacja. Wyd. Pol. Szcz., seria Tempus, Szczecin 2003.
- [7] Żuchowski A.: Identyfikacja dynamiki obiektów z wykorzystaniem momentów charakterystyki impulsowej. Mat. XVII Symp. „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”, Krynica, wrzesień 2009 r. AGH Kraków.

otrzymano / received: 09.02.2010

przyjęto do druku / accepted: 15.03.2010

artykuł recenzowany

RECENZJE

Technika laserowa i jej zastosowania

Romuald Józwicki

Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009, ISBN 978-83-7207-850-6



Książka ma charakter podręcznika akademickiego. Autor podręcznika jest profesorem w Politechnice Warszawskiej. Treść podręcznika oparta jest na cyklu wykładów prowadzonych przez autora dla studentów Wydziału Mechatroniki. Podręcznik był opiniowany przez profesorów Annę Sycewską-Sobusiak oraz Krzysztofa Abramskiego.

W części pierwszej podręcznika autor omawia podstawy techniki laserowej, zasadę działania laserów, charakterystyki wiązki światła laserowego i przekształcanie jej

w układach optycznych, zjawisko selekcji modów, lasery impulsowe, półprzewodnikowe, światłowodowe oraz przestrajalne. Zapoznaje także czytelnika ze zjawiskami nieliniowymi w ośrod-

kach, w których propaguje się wiązka laserowa. W części tej autor także omawia podstawowe zasady BHP przy pracy z laserami. Odwołuje się tu do aktualnie obowiązujących norm w tym zakresie.

W części drugiej autor omawia różne zastosowania praktyczne laserów, m.in. w technice pomiarowej, holografii, monitorowaniu środowiska naturalnego, a także w technologii obróbki materiałów, technice jądrowej i w medycynie.

Każdy z podrozdziałów podręcznika zawiera obszerny spis pozycji bibliograficznych. Podręcznik jest bogato ilustrowany rysunkami poglądowymi, schematami oraz fotografiami urządzeń laserowych. Cenne praktyczne informacje dotyczące parametrów laserów dostępnych w handlu autor zamieścił w dodatku.

Podręcznik jest w przystępny sposób podany kompendium wiedzy na temat techniki laserowej. Może być pomocny studentom optoelektroniki, mechatroniki oraz praktykom zajmującym się wykorzystaniem laserów i ich systemów.

Opracowanie: Dr hab. inż. Marian URBAŃCZYK