

JERZY KUŹNIK

Katedra Urządzeń i Układów Automatyki

ZAGADNIENIE DOKŁADNOŚCI REGULATORA
JAKO CZŁONU UKŁADU REGULACYJNEGO

Streszczenie: W artykule podano definicję błędu dynamicznego regulatora. Dla konkretnego regulatora pneumatycznego PJ podano dokładny schemat blokowy. Ze schematu tego obliczono funkcję przejścia regulatora i porównano z funkcją przejścia regulatora idealnego. Opisano wyniki praktycznych pomiarów czasowej funkcji przejścia i modelowania regulatora na maszynie analogowej.

Przy rozpatrywaniu układów automatycznej regulacji może zająć pytanie, jak dokładnie musi być obliczona funkcja przejścia regulatora, by przy jej pomocy w wystarczający sposób określić zachowanie się układu i jaki błąd popełnia się przy posługiwaniu idealną funkcją przejścia zamiast dokładną.

Działanie idealnego regulatora można przedstawić przy pomocy równania:

$$y^{(N)} = B_0 \cdot x_0 + B_1 \cdot \dot{x}_0 + \dots + B_n x^{(n)}, \quad (1)$$

gdzie:

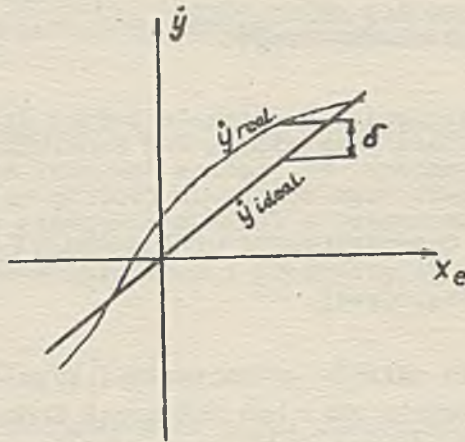
- y - wielkość wyjściowa regulatora,
- x - wielkość wyjściowa (różnica między wielkością zadaną a wielkością regulowaną).

Błąd dynamiczny musi ująć wszystkie odchyłki rzeczywistej funkcji przejścia regulatora od idealnej. Błąd ten składa się z:

1. Odchyłki współczynników $B_0, B_1 \dots B_n$ od wartości danych w równaniu (1) i nastawianych w regulatorze. Jest to więc błąd

nastaw regulatora. Np. dla regulatora J błąd ten (rys. 1) będzie zdefiniowany jako:

$$\delta = (\dot{y}_{\text{real}} - \dot{y}_{\text{ideal}})_{\text{max}}, \quad (2)$$



Rys. 1

gdzie:

\dot{y}_{real} - rzeczywista wartość pochodnej sygnału wyjściowego,

\dot{y}_{ideal} - wartość pochodnej sygnału wyjściowego obliczona ze wzoru $\dot{y} = B_0 \cdot X_0$.

2. Wystąpienie dodatkowych członów dynamicznych w funkcji przejścia regulatora. Np. idealny regulator PJ będzie opisany równaniem:

$$\dot{y} = T_1 \cdot x_0 + k_r \cdot \dot{x}_0. \quad (3)$$

Natomiast regulator PJ z inercją

$$\dot{y} + T\ddot{y} = T_1 \cdot x_0 + k_r \cdot \dot{x}_0. \quad (4)$$

Po przekształceniu równania (4) otrzymuje się

$$Y(p) = K_{ideal}(p) \cdot K_{kor}(p) \cdot X_0(p), \quad (5)$$

gdzie:

$K_{ideal}(p)$ - funkcja przejścia regulatora idealnego,

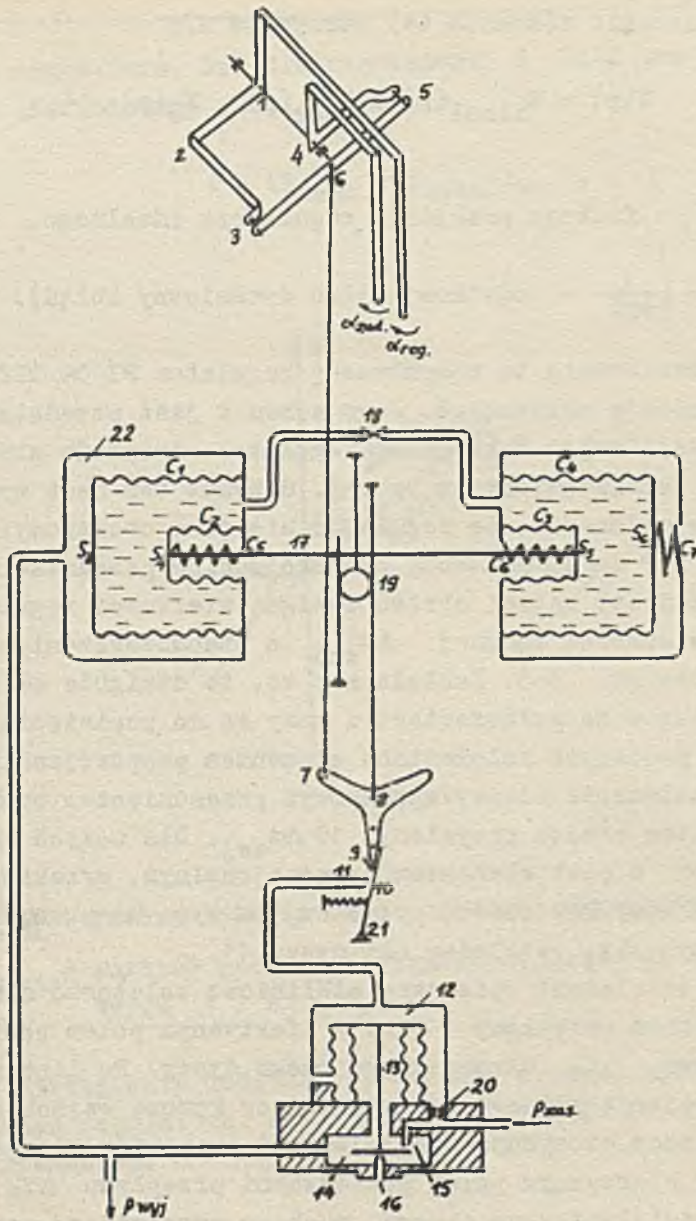
$K_{kor}(p) = \frac{1}{1+pT}$ - dodatkowy człon dynamiczny (błąd).

Przykładowo będzie tu rozpatrzony regulator PI 04 TIZ PRI-BOR z kompensacją przesunięć. Jego schemat jest przedstawiony na rys. 2. Analizując dokładniej regulator otrzymuje się schemat blokowy przedstawiony na rys. 3. Schemat ten jest wyrowadzony przy założeniu, że regulator nie jest obciążony.

Człony 1 i 2 są to elementy proporcjonalne przedstawiające zależność pomiędzy kątami obrotu dźwigni wielkości regulowanej

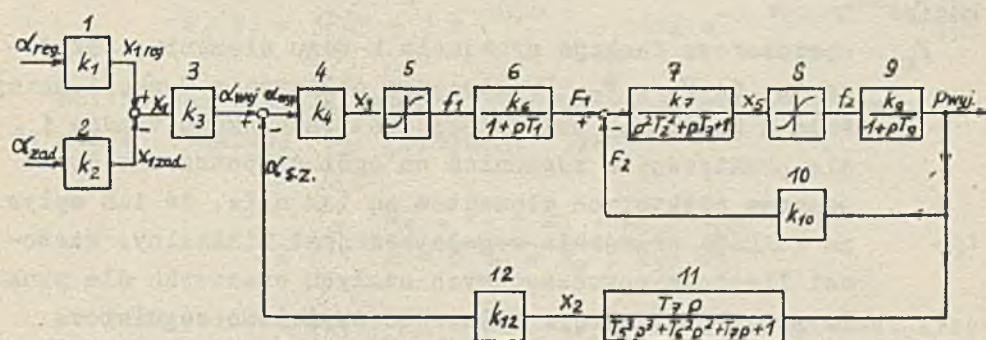
$\Delta\alpha_{reg}$ i wielkości zadanej $\Delta\alpha_{zad}$ a przemieszczeniem Δx_1 punktu 6 dźwigni 3-5. Zakłada się tu, że dźwignie są sztywne, nie ma luzów na połączeniach i masy są do pominięcia. Człon 3 jest przy podobnych założeniach elementem proporcjonalnym, opisującym zależność między wypadkowym przesunięciem punktu 6 Δx_1 a kątem obrotu przysłony 10 $\Delta\alpha_{wej}$. Dla małych kątów obrotu człon 4 jest elementem proporcjonalnym, przekształcającym wypadkowy kąt obrotu przysłony $\Delta\alpha$ wyp. na przemieszczenie przysłony Δx_3 względem osi dyszy 11.

Człon 5, to element opisujący nieliniową zależność między przemieszczeniem przysłony Δx_3 , a efektywnym polem powierzchni przepływu Δf_1 otworu wyjściowego dyszy. Po linearyzacji równań opisujących człon 6 stanowiący komorę wejściową 12 wzmacniacza mocy, otrzymuje się zależność inercyjną pierwszego rzędu między efektywnym polem powierzchni przepływu Δf_1 a siłą ΔF_1 działającą na element ruchomy wzmacniacza mocy. Element 7 opisuje dynamikę ruchu części ruchomej wzmacniacza mocy przy uwzględnieniu masy poruszających się części, tarcia, oraz sprężystości układu. Na jego wyjściu otrzymujemy przemieszczenie ΔX_5 elementu ruchomego wzmacniacza. Człon 8 jest to



Rys. 2

element nieliniowy przedstawiający zależność efektywnego pola powierzchni przepływu ΔF_2 wzmacniacza mocy od przesunięcia elementu ruchomego wzmacniacza mocy ΔX_5 . Człon 9 opisuje dynamikę wypełniania się komory wyjściowej wzmacniacza mocy. Na jego wyjściu otrzymuje się ciśnienie wyjściowe regulatora. Człon 10 przedstawia działanie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza mocy, czyli zależność siły ΔF_2 działającej na element ruchomy wzmacniacza pochodzącej od ciśnienia wyjściowego, od tegoż ciśnienia wyjściowego p_{wyj} .



Rys. 3

Człon 11 opisuje własności dynamiczne elementu sprzężenia zwrotnego regulatora, zapewniającego jego proporcjonalno-całkujące działanie. Czas całkowania można tu zmieniać przez zmianę stopnia otwarcia zaworu 18. Przy uwzględnieniu masy poruszających się części tarcia i sprężystości jest to element różniczkujący z funkcją 3- rzędu w mianowniku. Człon 11 jest systemem dźwigni sprzężenia zwrotnego, przy pomocy którego można zmieniać zakres proporcjonalności regulatora. Jest to element proporcjonalny.

Funkcję przejścia regulatora ze względu na to, że występują tu elementy nieliniowe można obliczyć tylko dla małych przyrostów. Ogólnie funkcja przejścia:

$$\frac{\Delta p_{wyj}(p)}{\Delta \alpha_{reg}(p) - \Delta \alpha_{zad}(p)} = \frac{F_1 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \cdot F_6 \cdot \frac{F_7 \cdot F_8 \cdot F_9}{1 + F_7 \cdot F_8 \cdot F_9 \cdot F_{10}}}{1 + F_4 \cdot F_5 \cdot F_6 \cdot \frac{F_7 \cdot F_8 \cdot F_9}{1 + F_7 \cdot F_8 \cdot F_9 \cdot F_{10}} \cdot F_{11} \cdot F_{12}}, \quad (6)$$

gdzie:

F_k - operatorowa funkcja przejścia k-tego elementu. Założono tu, że $F_1 = F_2$. Praktycznie obliczanie funkcji przejścia z powyższej zależności jest rachunkowo trudne i dla praktycznych zagadnień na ogół niepotrzebne. Stałe czasowe niektórych elementów są tak małe, że ich wpływ na funkcję przejścia regulatora jest minimalny. Wartości liczbowe poszczególnych stałych czasowych dla punktu pracy przy którym ciśnienie wyjściowe regulatora jest 0,5 atn. wynoszą:

$$T_1 = 1 \text{ sek}; \quad T_2^2 = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ sek}^2; \quad T_3 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ sek}; \quad T_4 = 0,6 \text{ sek}$$

$T_5^3 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ sek}^3; \quad T_6^2 = 10^{-3} \text{ sek}^2; \quad T_7 = 10-1000 \text{ sek}$ (czas całkowania).

Widać więc, że wartość stałych czasowych oprócz T_1 , T_4 i oczywiście T_7 są bardzo małe i praktycznie pomijalne. Mają one jedynie wpływ na zapas stabilności regulatora, ponieważ zwiększają one rząd równania opisującego działanie regulatora.

Przy uwzględnieniu tylko stałych czasowych T_1 i T_7 otrzymuje się schemat blokowy regulatora przedstawiony na rys.4.

Wartości liczbowe współczynników dla punktu pracy 0,5 atn na wyjściu dla nastaw zakresu proporcjonalności 100% i czasu całkowania 30 sek wynoszą:

$$k_1 = 0,467; \quad k_2 = 3,561 \cdot 10^3; \quad k_3 = 0,470.$$

Operatorowa funkcja przejścia regulatora wg schematu bokowego z rys. 3 jest następująca:

$$K_1(p) = k_1 \cdot \frac{\frac{k_2}{1+pT_1}}{1 + \frac{k_2 \cdot k_3 \cdot pT_7}{(1+pT_7)(1+pT_1)}} = \frac{k_1 \cdot k_2 + k_1 \cdot k_2 \cdot pT_7}{1+p(T_1+T_7+k_2 \cdot k_3 \cdot T_7)+p^2 T_1 T_7} \quad (7)$$

Po przedstawieniu wartości liczbowych i przejściu na postać czasową

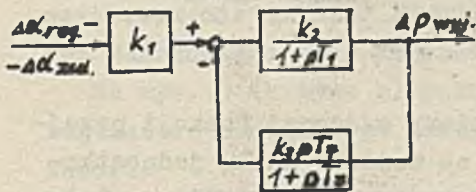
$$k_1(t) = .1663 - 1 e^{-1674 t} - 1662 e^{-0,199 \cdot 10^{-4} t} \quad (8)$$

Obliczając funkcję przejścia regulatora przy pominięciu także stałej czasowej T_1 otrzymuje się:

$$K_2(p) = \frac{k_1 \cdot k_2 + k_1 \cdot k_2 \cdot T_7 p}{1 + p(T_7 + k_2 \cdot k_3 \cdot T_7)} \quad (9)$$

Po przejściu na postać czasową i podstawieniu wartości liczbowych otrzymuje się:

$$k_2(t) = 1663 - 1662 e^{-0,199 \cdot 10^{-4} t} \quad (10)$$



Rys. 4

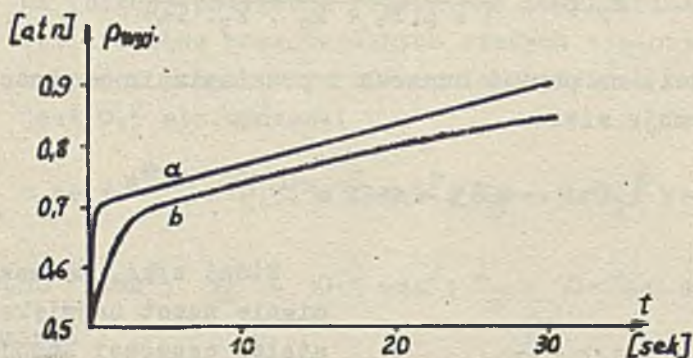
Widać więc, że uwzględnienie nawet największej stałej czasowej znajdującej się w torze głównym regulatora powoduje minimalną zmianę czasowej funkcji przejścia. Wynika to stąd, że stała czasowa elementu inercyjnego znajduje się w torze głównym zamkniętego układu maleje $1 + k_2 \cdot k_3$ razy,

gdzie $k_2 \cdot k_3$ - wzmacnienie układu otwartego. Chcąc znaleźć funkcję przejścia idealnego regulatora PJ trzeba obliczyć liniową aproksymację funkcji $k_2(t)$

$$k_{21}(t) = k_2(0) + \left. \frac{dk_2}{dt} \right|_{t=0} \cdot t = 1 + \frac{1663}{50200} \cdot t = 1 + \frac{1}{30,2} \cdot t \quad (11)$$

Zależność ta odbiega bardzo mało od zależności $k_1(t)$ (równ. 8). Dla czasu $t = 1000$ sek różnica między $k_{21}(t)$ i $k_1(t)$ odniesiona od wartości $k_{21}(t)$ jest jeszcze mniejsza od 1%.

Błąd dynamiczny regulatora jest więc bardzo mały i do przedstawienia czasowej funkcji przejścia regulatora wystarczająca jest zależność (11), a więc forma normalnie używana do opisu regulatora PJ.



Rys. 5

Przeprowadzono praktycznie pomiary czasowej funkcji przejścia regulatora metodą podawania na wejście skoku jednostkowego. Przykładowo na rys. 5 przedstawiono odpowiedź regulatora na skok wartości wielkości wejściowej o 10% pełnego zakresu zmiany tej wielkości przy nastawach $X_p = 50\%$ i $T_7 = 30$ sek.

Na początku przebiegu widoczna jest mała energii. Składa się jednak na nią nie tylko inercja regulatora, lecz także inercja wynikająca z wypełnienia się przewodów łączących i ko-

mory pomiarowej rejestratora, inercja spowodowana bezwładnością części ruchomej rejestratora, a także fakt, że skok jednostkowy podawany na wejściu regulatora nie jest idealny, lecz czas jego trwania wynosi pewną skończoną wartość.

Widać więc stąd też, że działanie regulatora można praktycznie wystarczająco dokładnie przy pomocy funkcji przejścia $k_{21}(t)$.

Przeprowadzono także próbę zamodelowania regulatora na elektronicznej maszynie analogowej. Nie można było zamodelować wszystkich inercji występujących w schemacie blokowym z rys.2 ze względu na dużą rozpiętość wartości ich stałych czasowych. Uwzględniono tylko stałe czasowe T_7 , T_1 i T_2 .

Przebiegi czasowe tu otrzymane są jeszcze bardziej zbliżone do czasowej funkcji przejścia idealnego regulatora PJ, ponieważ w układzie elektrycznym można uzyskać skok jednostkowy bardziej zbliżony do idealnego i nie występował tu odpowiednik stałej czasowej wypełnienia się komory rejestratora.

Powyższe uwagi odnoszą się tylko do przypadku, gdy regulator nie jest na wyjściu obciążony. Przeprowadzono pomiary czasowej funkcji przejścia regulatora po podłączeniu na jego wyjściu linii pneumatycznej długości 100 m i średnicy wewnętrznej 4,1 mm i zmiennej objętości komory zaworu. W tym przypadku otrzymane przebiegi ciśnienia bardzo różniły się od idealnej funkcji przejścia regulatora PJ. Szczególnie przy małych zakresach proporcjonalności i małych czasach całkowania kształt przebiegu nie zależał od nastaw, lecz od maksymalnej wydajności wzmacniacza mocy regulatora.

Na rys. 5 (krzywa b) przedstawiono czasową funkcję przejścia regulatora obciążonego na wyjściu linią pneumatyczną i komorą zaworu.

LITERATURA

- [1] Ehrlich H.: Beitrag zur Analyse des dynamisches Verhaltens PJD-Regler" ... msr 2, 1967.
- [2] Brack G.C.: Überlegungen zur Fehler definition bei Einheits regler. msr 7. 1965.
- [3] Brack G.C.: Zur Definition der dynamischen Fehler von Re- glern msr 12. 1965.
- [4] Abdulajew A.A., Wajser J.W., Nadzafow E.M.: urawienia pneumaticzeskiego regulatora O4. Awtomatika i telemechani- ka nr 5. 1955.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 23.I.1968r.

ПРОБЛЕМА ТОЧНОСТИ РЕГУЛЯТОРА КАК ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Р е з ю м е

В статье подано дефиницію динамической ошибки регулятора. Для пневматического регулятора ПИ подано точную блоковую схему. С этой схемы вычислено с передаточную функцию регулятора и сравнено с передаточной функцию идеального регулятора. Описа- но результаты практических измерений временной передаточной функции и моделирования регулятора.

THE PROBLEM OF GOVERNER EXACTNESS AS A MEMBER OF CONTROL SYSTEM

S u m m a r y

This article gives the definition of the dynamic error of a controller and for pneumatic controller of the PI type there is an exact blok-diagram. The transfer function of the controller described was calculated and comparison was made with an ideal controller. This paper presents also the results of practical measurements of the controller time transfer function and simulation of the controller on an analogue computer.