



Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
POLITECHNIKA OPOLSKA

MECHATRONIKA

Regulatory przemysłowe typu P, PI, PID

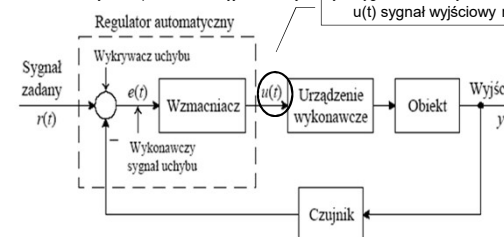
dr inż. Roland PAWLICZEK

1

Układ sterowania

Schemat blokowy układu sterowania

- Regulator automatyczny → sterowanie procesem, regulator wyznacza zadaną wartość wielkości sterującej na podstawie uchybu regulacji.
- Sygnał wyjściowy z regulatora podawany jest na urządzenie wykonawcze, takie jak zawór, silnik elektryczny, siłownik hydrauliczny lub pneumatyczny.
- Urządzenie wykonawcze dokonuje przestawienia punktu pracy obiektu, stosownie do sygnału sterującego po to aby sygnał wyjściowy pokrywał się z sygnałem zadanym.
- Czujnik lub element pomiarowy jest urządzeniem, które przetwarza zmienną wyjściową tak, aby mogła zostać użyta do porównania wyjścia z wejściowym sygnałem zadanym. Element ten znajduje się w $u(t)$ sygnał wyjściowy regulatora



2

Regulatory przemysłowe



3

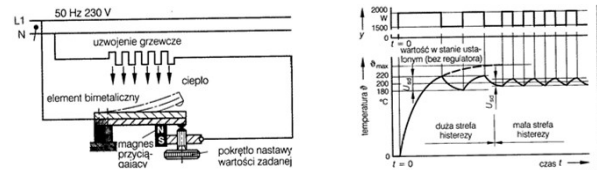
Klasyfikacja regulatorów przemysłowych

- ⚡ Regulator dwupołożeniowy
- ⚡ Regulator proporcjonalny **P**
- ⚡ Regulator całkujący **I**
- ⚡ Regulator proporcjonalno-całkujący **PI**
- ⚡ Regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący **PID**

4

Regulator dwupołożeniowy

Regulacja temperatury z sensorem bimetalicznym



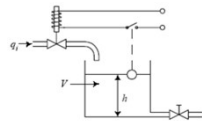
Sensor – element bimetaliczny

Aktor – elektromagnes (zapobiega tworzeniu się łuku elektrycznego)

Histeresa przełączania – różnica wartości temperatury załączania i rozłączania

Na podobnej zasadzie odbywa się regulacja:

- ciśnienia i poziomu napełnienia zbiorników
- wyłączniki (przełączniki) krańcowe
- klimatyzatory (regulacja wielopołożeniowa)



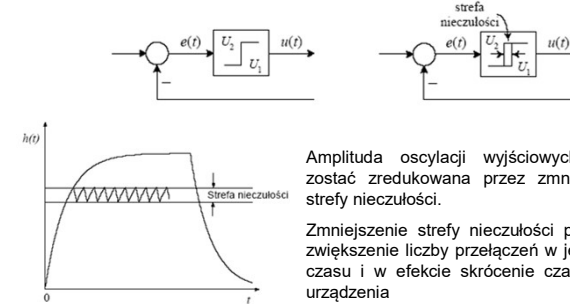
5

Regulator dwupołożeniowy

Regulator dwupołożeniowy przyjmuje tylko dwa stany:

$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{dla } e(t) < 0 \\ U_2 & \text{dla } e(t) > 0 \end{cases}$$

cechą charakterystyczną jest powstawanie strefy nieczułości



Amplituda oscylacji wyjściowych może zostać zredukowana przez zmniejszenie strefy nieczułości.

Zmniejszenie strefy nieczułości powoduje zwiększenie liczby przełączeń w jednostce czasu i w efekcie skrócenie czasu życia urządzenia

6

Układy regulacji ciągłej

Elektroniczny regulator proporcjonalny (P)

$$U_y = -K_p \cdot U_e$$

$$U_e = U_w - U_x$$

$$K_p = \frac{R_K}{R_e}$$

U_y – napięcie wyjściowe

U_e – napięcie odchyłka regulacji

U_w – napięcie wartości zadanej

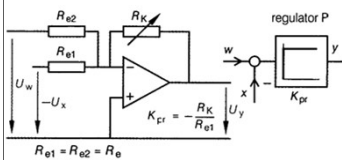
U_x – napięcie wartości rzeczywistej

K_p – wsp. wzmocnienia

R_K – oprór ujemnego sprzężenia zwrotnego

R_e – oprór wejściowy

Wzmacniacz operacyjny



Regulatory P wzmocniają odchyłkę regulacji ze wsp. K_p . Im większa wartość tego współczynnika, tym dokładniej pracuje układ, ale łatwiej ulega destabilizacji (praca niestabilna)

7

Układy regulacji ciągłej

Regulator proporcjonalny (P)

Dla regulatora proporcjonalnego, zależność pomiędzy wyjściem regulatora $u(t)$ i wykonawczym sygnałem uchybu $e(t)$

$$u(t) = K_p e(t)$$

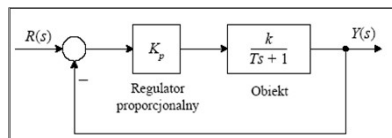
zaś funkcja transmitancji

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

8

Układ regulacji z regulatorem P

Uchylb w stanie ustalonym w odpowiedzi na sygnał zadany $R(s)$



transmitancja obiektu

$$G(s) = \frac{k}{Ts + 1}$$

transmitancja uchybu

$$G_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)}$$

stąd uchyb

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)} R(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_p k}{Ts + 1}} R(s)$$

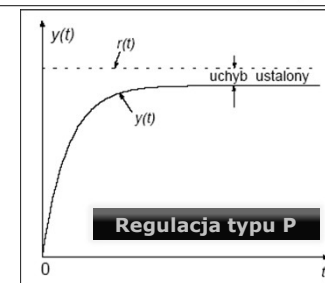
Układ regulacji z regulatorem P

uchylb dla zadanego wymuszenia skokowego $R(s) = R/s$ (dla skoku jednostkowego $R=1$):

$$E(s) = \frac{Ts + 1}{Ts + 1 + K_p k} \cdot \frac{R}{s}$$

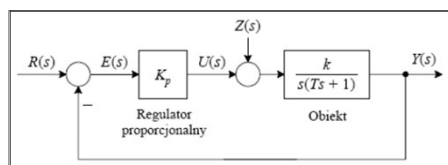
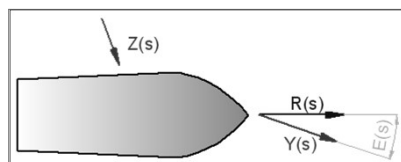
dla stanu ustalonego:

$$e_u = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{Ts + 1}{Ts + 1 + K_p k} \cdot \frac{R}{s} = \frac{R}{1 + K_p k}$$



Układ regulacji z regulatorem P

Uchylb w stanie ustalonym z zakłóceniem $Z(s)$: zadany kurs statku $R(s) \rightarrow$ wielkość zadana, zakłóceniem $Z(s)$ jest boczny wiatr, $Y(s)$ – kurs rzeczywisty $\rightarrow$ wielkość wyjściowa, wychylenie kursu $E(s) \rightarrow$ uchyb



Układ regulacji z regulatorem P

Uchylb w stanie ustalonym z zakłóceniem $Z(s)$: przyjmując sygnał zadany statku $R(s)=0$ transmitancja pomiędzy $Y(s)$ oraz $Z(s)$ jest

$$\frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{k}{Ts^2 + s + K_p k}$$

zaś transmitancja uchybu:

$$\frac{E(s)}{Z(s)} = -\frac{k}{Ts^2 + s + K_p k}$$

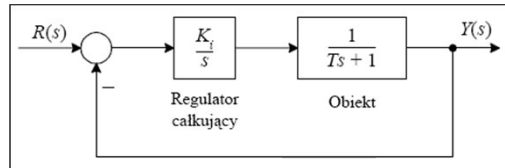
Uchylb w stanie ustalonym dla stałej wartości zakłócenia $Z(s)=Z$:

$$e_u = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{-k}{Ts^2 + s + K_p k} \cdot \frac{Z}{s} = -\frac{Z}{K_p}$$

Wpływ zakłócenia może być zmniejszony poprzez wzrost wartości wzmocnienia K_p , ale należy pamiętać o możliwości powstawania oscylacji w układzie.

Układ regulacji z regulatorem I

Uchylb w stanie ustalonym w odpowiedzi na sygnał zadany $R(s)$



transmitancja układu zamkniętego $\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_i}{s(Ts+1) + K_i}$

transmitancja uchybu $\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s(Ts+1)}{s(Ts+1) + K_i}$

Regulacja typu I

Układ regulacji z regulatorem I

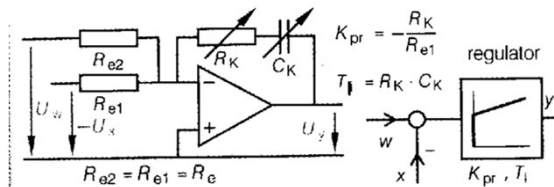
Uchylb w stanie ustalonym w odpowiedzi na sygnał zadany $R(s)$

$$e_u = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{s(Ts+1)}{s(Ts+1) + K_i} \cdot \frac{1}{s} = 0$$

Sterowanie całkujące eliminuje uchyb w stanie ustalonym pojawiający się w odpowiedzi na wymuszenie skokowe. Jest to ważne polepszenie jakości sterowania w stosunku do sterowania proporcjonalnego

Układy regulacji ciągłej

Elektroniczny regulator proporcjonalno - całkujący (PI)



$$U_y = -K_p \left(U_e + \frac{1}{T_i} \int U_e dt \right)$$

$$T_i = R_K \cdot C_K \quad K_p = \frac{R_K}{R_e}$$

- Regulatory PI wzmacniają i całkują odchyłkę regulacji.
- Działanie całkujące pozwala na wyregulowanie odchyłki prędkości do zera.
- Regulatory PI stosowane są w układach regulacji prędkości obrotowej.

15

Układy regulacji ciągłej

Regulator proporcjonalno - całkujący (PI)

W regulatorze ze sterowaniem proporcjonalno - całkującym, wartość wyjściowa regulatora $u(t)$ składa się z części proporcjonalnej do odchyłki regulacji oraz całki z odchyłki regulacji po czasie $e(t)$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

gdzie T_i jest czasem całkowania, zaś funkcja transmitancji

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

16

Układy regulacji ciągłej

Regulator proporcjonalno - różniczkujący (PD)

W regulatorze ze sterowaniem proporcjonalno - różniczkującym, wartość wyjściowa regulatora $u(t)$ składa się z części proporcjonalnej do odchyłki regulacji oraz różniczki z odchyłki regulacji po czasie $e(t)$

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

gdzie T_d jest czasem różniczkowania, zaś funkcja transmitancji

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

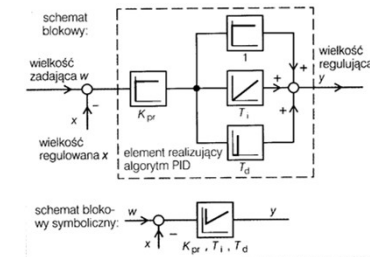
Wprowadzenie sterowania różniczkującego:

- regulator ma większą wrażliwość
- reaguje na przyrost zmian uchybu wykonawczego i wyznacza poprawkę na sterowanie
- zabezpiecza przed powstaniem zbyt dużej amplitudy oscylacji sygnału wykonawczego

17

Układy regulacji ciągłej

Elektroniczny regulator proporcjonalno - całkowo - różnicowy (PID)

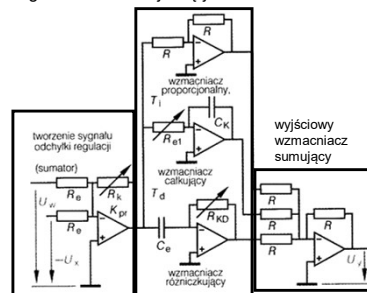


- Regulatory PID należą do najbardziej uniwersalnych.
- Człon P regulatora natychmiast wzmacnia odchyłkę regulacji tworząc sygnał sterujący.
- Człon I zmienia sygnał tak długo, aż odchyłka regulacji wyzeruje się.
- Człon D reaguje na zmiany wartości odchyłki w czasie (dla ustalonej wartości odchyłki człon D nie reaguje).

18

Układy regulacji ciągłej

Regulator PID buduje się jako układ wzmacniaczy operacyjnych



Dobór optymalnych warunków pracy regulatora PID wymaga określenia aż trzech nastaw: K_p , T_i , T_d .

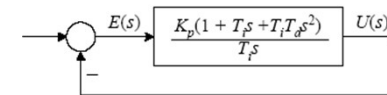
$$U_y = -K_p \left(U_e + \frac{1}{T_i} \int U_e dt + T_d \frac{dU_e}{dt} \right)$$

$$T_i = R_{ei} \cdot C_K \quad K_p = \frac{R_K}{R_e} \quad T_d = R_{KD} \cdot C_e$$

19

Układy regulacji ciągłej

Regulator proporcjonalno - całkujący - różniczkujący (PID)



Połączenie sterowania proporcjonalnego, całkującego i różniczkującego nosi nazwę sterowania PID. To połączenie ma zalety każdego z trzech składników. Równanie regulatora w postaci cząstkowej

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

i funkcja transmitancji

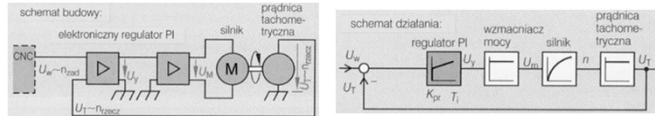
$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Regulacja typu PID

20

Zastosowania

Regulacja prędkości obrotowej

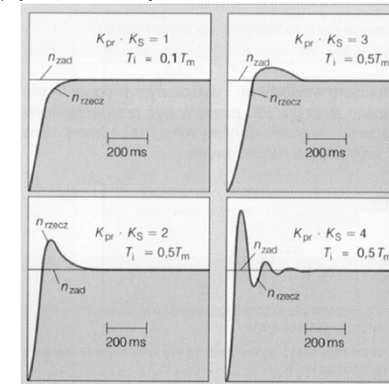


- ✓ liczba obrotów n_{rzecz} musi nadążać za n_{zad} (NC – sterowanie numeryczne, U_w – napięcie sterujące)
- ✓ układ regulacji: regulator PI, wzmacniacz mocy (człon P), silnik (człon PT₁), sensor → prądnica tachometryczna (człon P)
- ✓ zasada działania:
 - 1) po zmianie wielkości zadanej na wyjściu regulatora pojawi się sygnał działania proporcjonalnego regulatora $U_{yp} = K_P(n_{zad} - n_{rzecz})$ ysterowujący silnik. Jeżeli n_{rzecz} będzie się zbliżał do n_{zad} sygnał ten będzie się zmniejszał.
 - 2) jednocześnie działanie całkowe regulatora tworzy dodatkowy sygnał o wartości proporcjonalnej do całki po czasie z odchyłki $U_{yi} = K_i \int (n_{zad} - n_{rzecz}) dt$, do momentu, aż wartość odchyłki nie osiągnie zero.

21

Zastosowania

Regulacja prędkości obrotowej



Przebieg przejściowy procesu regulacji dla różnych nastaw regulatora PI: K_P , T_i

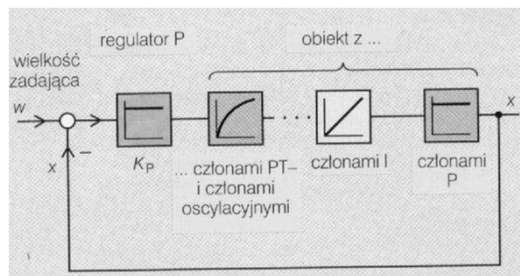
22

Zastosowania: obiekty astatyczne

Obiekty astatyczne – charakteryzują się właściwościami całkującymi, zawierają przynajmniej jeden człon typu I.

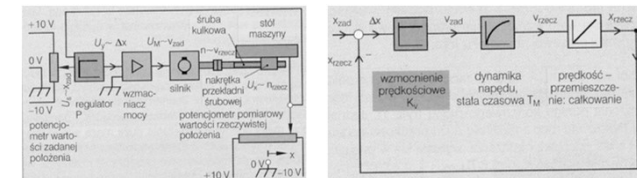
regulator P

stosuje się w układach **regulacji nadążnej**



Zastosowania: obiekty astatyczne

Układ regulacji położenia z regulatorem P



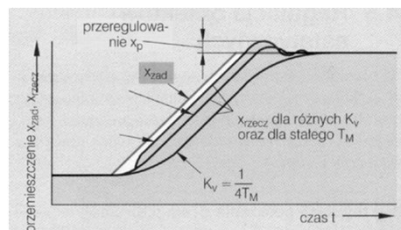
- Zmiana wartości zadanej powoduje powstanie odchyłki położenia $\Delta x = x_{zad} - x_{rzecz}$ jest wzmacniana i wpływa na zmniejszenie odchyłki.
- Prędkość posuwu v zależy od wzmocnienia regulatora K_P , wzmacniacza mocy K_A , obrotów silnika n_0 i skoku śruby kulkowej P_{Sp} . Wziąwszy po uwagę, że człony te są połączone szeregowo, ich wzmocnienie można oznaczyć ogólnie jako **wzmocnienie prędkościowe**.

$$K_v = v/\Delta x$$

- Silnik → człon inercyjny pierwszego rzędu o stałej czasowej T_M
- Śruba kulkowa – stół → człon całkujący (przetwarza prędkość posuwu na przemieszczenie stołu)

Zastosowania: obiekty astatyczne

Układ regulacji położenia z regulatorem P - przeregulowanie



- Im większe wzmocnienie prędkościowe K_v , tym mniejsza odchyłka położenia Δx .
- Zwiększanie wzmocnienia może się odbić na przekraczaniu wartości zadanej ze względu na bezwładność stołu, zwłaszcza dla dużych obrabiarek.

Dobór nastaw regulatora

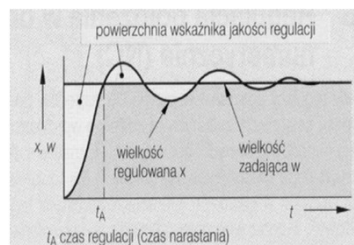
Wymagania regulacji:

- ⚡ jak najszybsze osiągnięcie nowej wartości zadanej przez wartość rzeczywistą sygnału.
- ⚡ niewielkie przeregulowanie,
- ⚡ krótkotrwałe oscylacje

26

Dobór nastaw regulatora

Przebieg przejściowy sygnału po zadziałaniu układu regulacji



czas narastania (regulacji) t_A – czas od chwili wymuszenia do chwili uzyskania wartości zadanej po raz pierwszy
 czas ustalania t_U – czas od chwili podania wymuszenia do chwili uzyskania uchybu o wartości 10% wielkości zadanej

powierzchnia wskaźnika jakości regulacji – jest miarą jakości regulacji

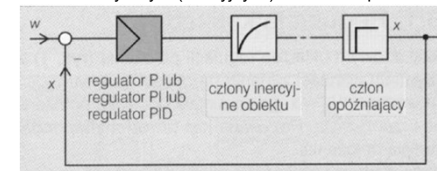
Należy tak dobrać parametry regulatorów, aby powierzchnia ta była jak najmniejsza.

Zbyt duże wartości wzmocnienia K_p i zbyt krótkie stałe czasowe całkowania T_i prowadzą do niestabilnej pracy układu regulacji.

27

Dobór nastaw regulatora

Obiekty o zachowaniu statycznym (inercyjnych) z czasem opóźnienia:



Stosuje się reguły doświadczalne nastaw regulatorów (reguły Zieglera-Nicholsa):

- 1) wybiera się regulator P i zmienia się wartość wzmocnienia K_p tak długo, aż wystąpią oscylacje niegasnące $\rightarrow K_{pkr}$
- 2) mierzy się okres tych oscylacji T_{osc}
- 3) oblicza się nastawy regulatora:

$$\text{regulator P} \quad K_p = 0,50 K_{pkr}$$

$$\text{regulator PI} \quad K_p = 0,45 K_{pkr} \quad T_i = 0,85 T_{osc}$$

$$\text{regulator PID} \quad K_p = 0,60 K_{pkr} \quad T_i = 0,50 T_{osc} \quad T_d = 0,12 T_{osc}$$

28

Dobór nastaw regulatora

Nastawy parametrów według zasad Zieglera-Nicholsa,

	Czas narastania	Przeregulowanie	Czas ustalania	Uchyb w stanie ustalonym
K_p	Zmniejszenie	Zwiększenie	Mała zmiana	Zmniejszenie
K_i	Zmniejszenie	Zwiększenie	Zwiększenie	Eliminacja
K_d	Mała zmiana	Zmniejszenie	Zmniejszenie	Mała zmiana

➤ Sterowanie proporcjonalne z nastawą K_p ma wpływ na zmniejszanie czasu narastania i będzie zmniejszało uchyb w stanie ustalonym, lecz nigdy nie będzie go eliminowało.

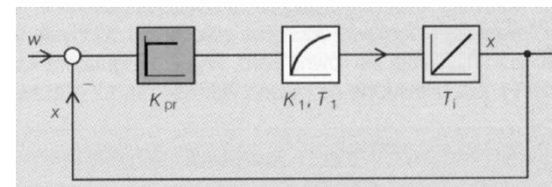
➤ Sterowanie całkujące z nastawą K_i ma wpływ na eliminowanie uchybu w stanie ustalonym, lecz pogarsza odpowiedź w stanie przejściowym.

➤ Sterowanie różniczkujące z nastawą K_d ma wpływ na zwiększenie stabilności układu, zmniejszając przeregulowanie i poprawiając odpowiedź przejściową.

29

Dobór nastaw regulatora

Obiekty o zachowaniu astatycznym (całkujących z inercyjnymi):



- wybiera się regulator P. Wstępna wartość wzmocnienia K_p dobierana jest jak wartość wzmocnienia układowego $\rightarrow K_0 = T_1 / T_i$
- zmienia się wartość wzmocnienia K_p do momentu uzyskaniażądanego zachowania się układu regulacji

Uwaga: zwykle symuluje się komputerowo układy regulacji w celu ich testowania i doboru nastaw regulatorów.

Symulacja układu sterowania prędkości obrotowej silnika prądu stałego

Model numeryczny układu ze sprzężeniem zwrotnym i regulacją PI (SIMULINK) i odpowiedź na wymuszenie skokowe

