



MECHATRONIKA UKŁADY REGULACJI

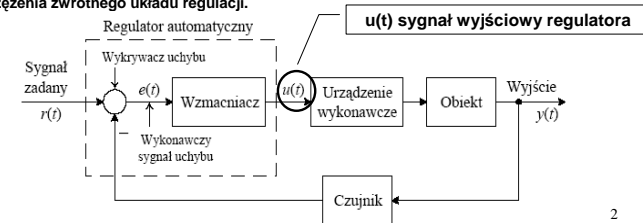
dr inż. Roland PAWLICZEK

1

Regulacja - definicje

Schemat blokowy układu sterowania

- Regulator automatyczny jest urządzeniem, którego zadaniem jest sterowanie procesem .
W układach z ujemnym sprzężeniem zwrotnym regulator wyznacza zadaną wartość wielkości sterującej na podstawie uchybu regulacji, czyli różnicy pomiędzy wartością pomierzoną a wartością zadaną tej wielkości
- 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 na inną odpowiednią zmienną, taką jak przesunięcie, ciśnienie lub napięcie, które może zostać użyte do porównania wyjścia z wejściowym sygnałem zadanym. Element ten znajduje się w pętli sprzężenia zwrotnego układu regulacji.

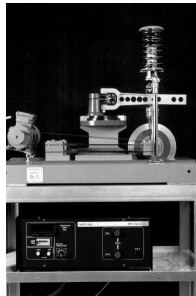


2

Regulacja - definicje

Rodzaje regulacji

- ręczna – regulacja wykonywana ręcznie przez człowieka
- automatyczna – bez ingerencji człowieka, wymaga jedynie wprowadzenie wartości zadanej
- stałowartościowa – utrzymywanie wartości rzeczywistej wielkości regulowanej na pewnym poziomie, układ regulacji koryguje chwilowe i przejściowe odchylenia od wartości zadanej
- nadążna – regulator zapewnia zmianę wartości regulowanej zgodnie z przyjętym programem zmian wartości zadanej.



3

Układy regulacji

- ⚡ Regulatory o działaniu nieciągłym (przerywanym, wielonastawne): zmieniają wartość wielkości sterującej obiektem w sposób przełączny, tzn. sygnał sterujący może przyjmować dwa lub kilka stanów (układy stykowe, przekaźnikowe) → *układy regulacji temperatury*
- ⚡ Regulatory o działaniu ciągłym (analogowym): zmieniają wartość sygnału sterującego w sposób ciągły, tzn. sygnał sterujący może przyjmować dowolne wartości z pewnego przedziału
- ⚡ Regulatory o działaniu dyskretnym (cyfrowe): zmieniają wartość sygnału sterującego w sposób quasiciągły, tzn. zmiana wartości sygnału wejściowego odbywa się w określonych chwilach czasowych, zaś duża częstotliwość próbkowania czyni ten proces niezauważalny dla obiektu sterowania.

4

Klasyfikacja regulatorów przemysłowych

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

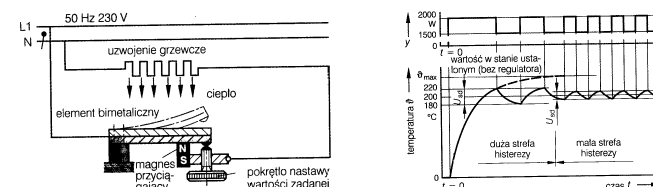
W większości regulatorów przemysłowych jako źródła mocy wykorzystywane są: napięcie, olej lub gaz. W zależności od rodzaju źródła mocy regulatory mogą być klasyfikowane jako

- ⚡ pneumatyczne
- ⚡ hydrauliczne
- ⚡ elektroniczne

5

Regulator dwupołożeniowy

Regulacja temperatury z sensorem bimetalicznym



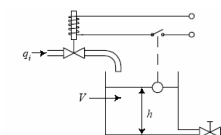
Sensor – element bimetaliczny

Aktor – elektromagnes (zapobiega tworzeniu się łuku elektrycznego)

Histereza przełączania – różnica wartości temperatury załączenia i rozłączenia

Na podobnej zasadzie odbywa się regulacja:

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



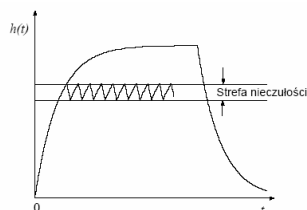
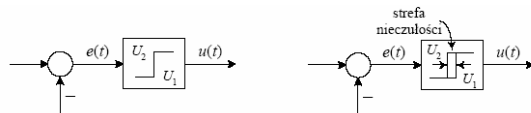
6

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

7

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 odchyłki regulacji

U_w – napięcie wartości zadanej

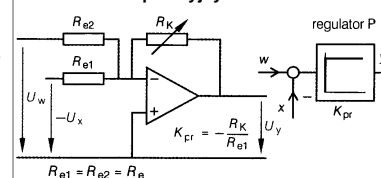
U_x – napięcie wartości rzeczywistej

K_p – wsp. wzmocnienia

R_K – oprór ujemnego sprzężenia zwrotnego

R_e – oprór wejściowy

Wzmacniacz operacyjny



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

8

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

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

9

Układy regulacji ciągłej

Regulator całkujący (I)

W regulatorze ze sterowaniem całkującym, wartość wyjściowa regulatora $u(t)$ jest przyrostem proporcjonalnym do wykonawczego sygnału uchybu $e(t)$

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

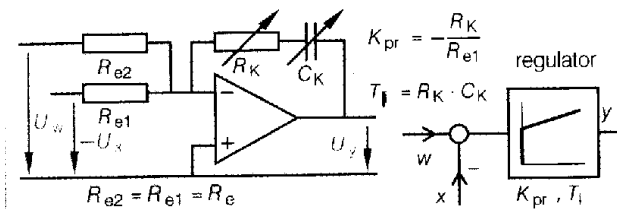
gdzie K_i jest przestrajalną stałą, zaś funkcja transmitancji

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

10

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.

11

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

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

12

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

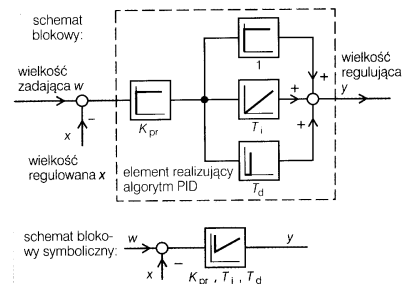
$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

Sterowanie różniczkujące dodane do regulatora proporcjonalnego powoduje, że regulator ma większą wrażliwość. Zaletą użycia sterowania różniczkującego jest to, że reaguje ono na przyrost zmian uchybu wykonawczego i wyznacza odpowiednią poprawkę na sterowanie, która zabezpiecza przed powstaniem zbyt dużej amplitudy oscylacji sygnału wykonawczego uchybu. Sterowanie różniczkujące uprzedza sygnał wykonawczy uchybu, inicjuje wcześniejszą akcję korekcyjną co powoduje wzrost stabilności układu. Chociaż sterowanie różniczkujące nie wpływa bezpośrednio na uchyb w stanie ustalonym, to wprowadza tłumienie do układu i pozwala na użycie większej wartości wzmocnienia K , którego zwiększenie poprawia dokładność w stanie ustalonym.

13

Układy regulacji ciągłej

Elektroniczny regulator proporcjonalno - całkowo - różnicowy (PID)

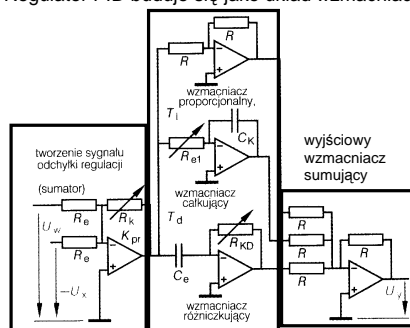


- ⚡ Regulatory PID należą do najbardziej uniwersalnych.
- ⚡ Człon P regulatora natychmiast wzmacnia odchyłkę regulacji tworząc sygnał sterujący.
- ⚡ Człon I zmienia sygnał tak długo, aż odchyłka regulacji wyzeruje się.
- ⚡ Człon D reaguje na zmiany wartości odchyłki w czasie (dla ustalonej wartości odchyłki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

14

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 .

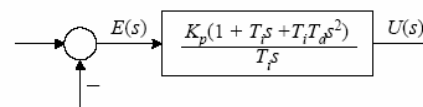
$$U_y = -K_p \left(U_e + \frac{1}{T_i} \int U_e dt + T_d \frac{dU_e}{dt} \right)$$

$$T_i = R_{e1} \cdot C_K \quad K_p = \frac{R_K}{R_e} \quad T_d = R_{KD} \cdot C_e$$

15

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 czasowej

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

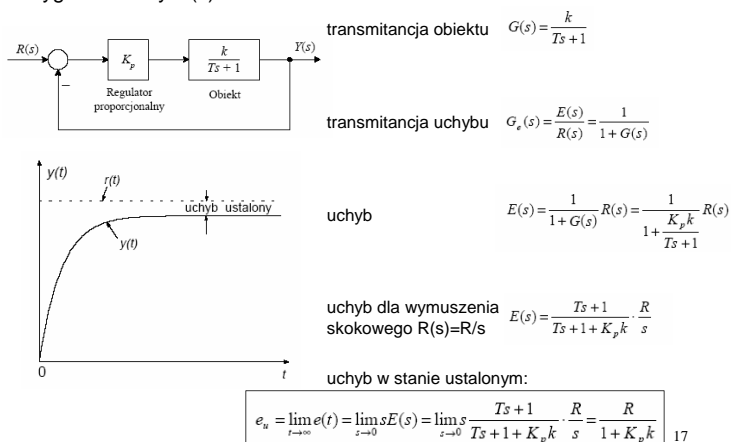
i funkcja transmitancji

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

16

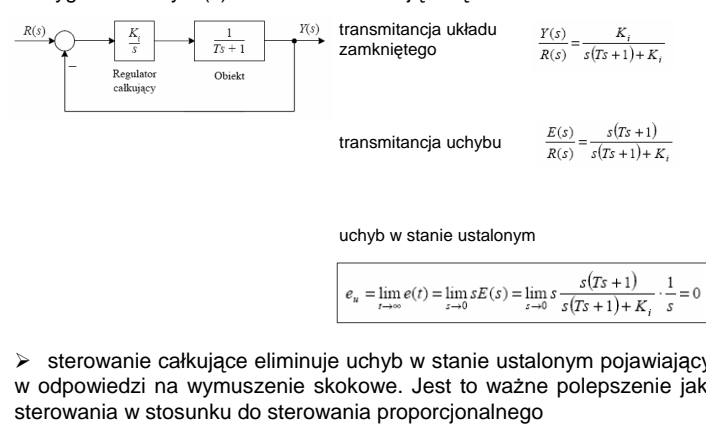
Układy regulacji ciągłej

Układ regulacji z regulatorem P: Uchyb w stanie ustalonym w odpowiedzi na sygnał zadany R(s)



Układy regulacji ciągłej

Układ regulacji z regulatorem I: Uchyb w stanie ustalonym w odpowiedzi na sygnał zadany R(s) dla obiektu z inercją I rzędu



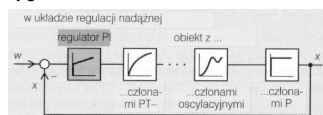
Zastosowania: obiekty statyczne

Obiekty statyczne – cechują się właściwościami inercyjnymi pierwszego lub wyższych rzędów:

⚡ regulator PI

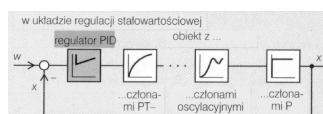
stosuje się w przypadku szybkich zmian wartości zadanej → **regulacja nadążna**

Zastosowanie reg. PID nie ma sensu, gdyż człon D niepotrzebnie reaguje na celowo zadane zmiany wartości sygnału.



⚡ regulator PID

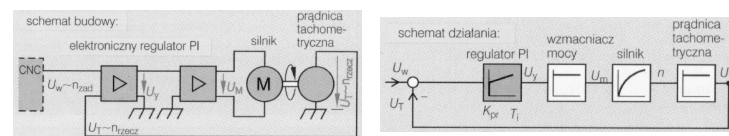
stosuje się w przypadku stałej wartości wielkości zadanej (np. regulacja temperatury) → **regulacja stałowartościowa**



19

Zastosowania: obiekty statyczne

Regulacja liczby obrotów



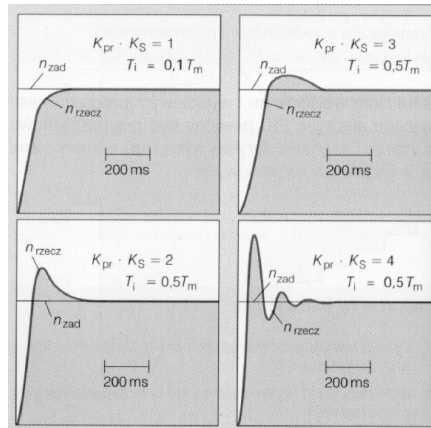
- ✓ liczba obrotów n_{rzecz} musi nadążać za n_{zad} (NC – sterowanie numeryczne, U_w – napięcie sterujące)
- ✓ układ regulacji: regulator PI, wzmacniacz mocy (człon P), silnik (człon PT₁), sensor → prądnica tachometryczna (człon P)
- ✓ zasada działania:

- 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.

20

Zastosowania: obiekty statyczne

Regulacja liczby obrotów

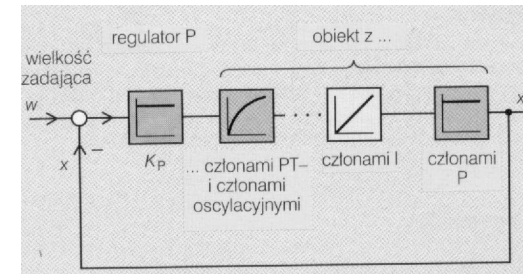


Przebieg przejściowy procesu regulacji dla różnych nastaw regulatora PI: K_P , T_i 21

Zastosowania: obiekty astatyczne

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

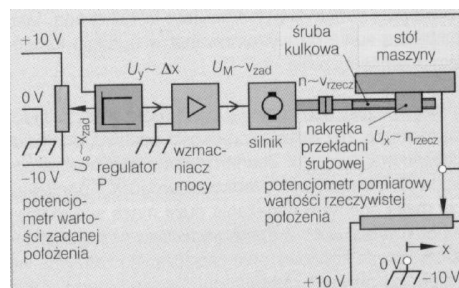
⚡ regulator P
stosuje się w układach **regulacji nadążnej**



22

Zastosowania: obiekty astatyczne

Układ regulacji położenia z regulatorem P

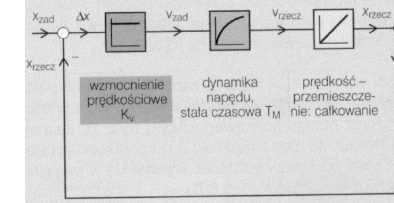


Położenie sań maszynowych obrabiarki → sensor analogowy + wzmacniacz operacyjny

23

Zastosowania: obiekty astatyczne

Układ regulacji położenia z regulatorem P (schemat blokowy)



Położenie sań maszynowych obrabiarki → analogowy sensor położenia + wzmacniacz operacyjny.

- 1) Zmiana wartości zadanej powoduje powstanie odchyłki położenia $\Delta x = x_{zad} - x_{rzecz}$ jest wzmacniana i wpływa na zmniejszenie odchyłki.
- 2) Prędkość posuwu v zależy od wzmacnienia 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 wzmacnienie można oznaczyć ogólnie jako **wzmacnienie prędkościowe**.

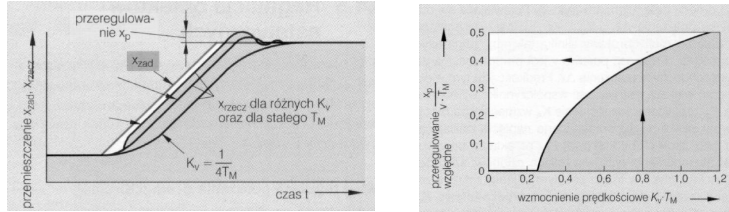
$$K_v = v/\Delta x$$

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

24

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.
- Dla urządzeń o małych masach bezwładnych i dużych, wydajnych silnikach można dobrać większe wartości wzmocnienia zależnie od stałej czasowej T_M . Zwykle $K_v = 0,8/T_M$. Pozwala to uzyskać bardzo szybkie zmiany wartości rzeczywistej za wartością zadaną w układach regulacji nadążnej.

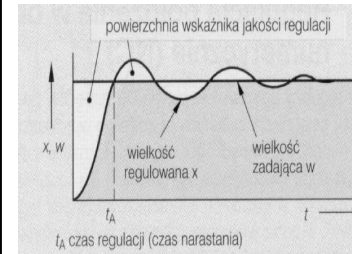
25

Dobór nastaw regulatora

Wymagania regulacji:

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

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

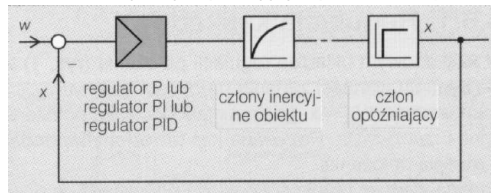
Należy tak dobrać parametry regulatorów, aby powierzchnia ta była jak najmniejsza.

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

26

Dobór nastaw regulatora

Obiekty o zachowaniu statycznym (inercyjnych) z czasem opóźnienia:



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

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

$$\begin{aligned} \text{regulator P} & K_p = 0,50 K_{pkr} \\ \text{regulator PI} & K_p = 0,45 K_{pkr} \quad T_i = 0,85 T_{osc} \\ \text{regulator PID} & K_p = 0,60 K_{pkr} \quad T_i = 0,50 T_{osc} \quad T_d = 0,12 T_{osc} \end{aligned}$$

27

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.

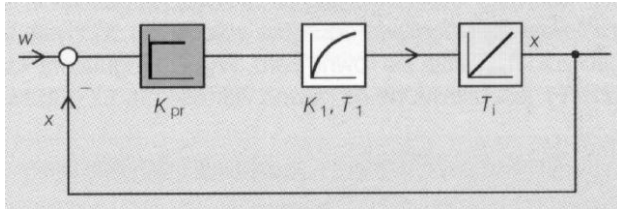
> Sterowanie całkujące z nastawą K_i ma wpływ na eliminowanie uchybu w stanie ustalonym, lecz pogarsza odpowiedź w stanie przejściowym.

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

28

Dobór nastaw regulatora

Obiekty o zachowaniu astatycznym (całkujących z inercyjnymi):



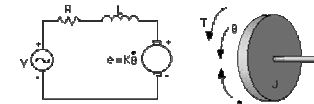
- wybiera się regulator P. Wstępna wartość wzmocnienia K_p dobierana jest jak wartość wzmocnienia układowego $\rightarrow K_0 = T_1 / T_i$
- zmienia się wartość wzmocnienia K_p do momentu uzyskaniażądanego zachowania się układu regulacji

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

29

Symulacja układu sterowania prędkości obrotowej silnika prądu stałego

Model fizyczny silnika prądu stałego i równania układu



J: moment bezwładności wirnika

b: współczynnik tłumienia układu mechanicznego

K: stała silnika

R: opór elektryczny

L: indukcyjność

V: napięcie źródła (wejście)

θ : kat obrotu wałka silnika (wyjście)

założono, że stojan i wirnik są ciałami sztywnymi

równania różniczkowe:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K \frac{d\theta}{dt}$$

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = Ki$$

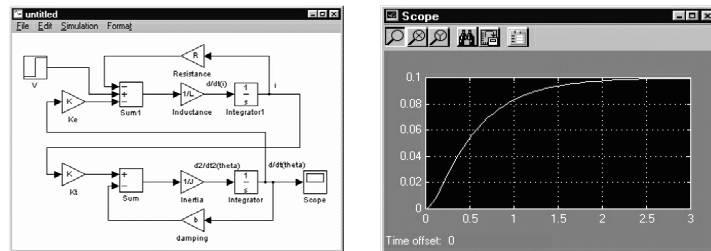
funkcja transmitancji układu:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2}$$

30

Symulacja układu sterowania prędkości obrotowej silnika prądu stałego

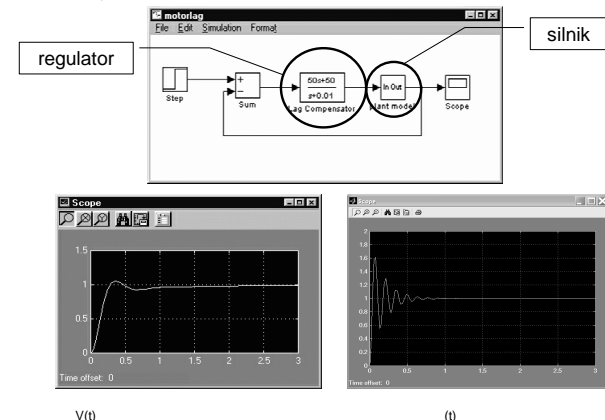
Model numeryczny układu (SIMULINK) i odpowiedź na wymuszenie skokowe



31

Symulacja układu sterowania prędkości obrotowej silnika prądu stałego

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



32