EA722 - Laboratório de Controle e Servomecanismos
Controle PID

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas

2º Semestre 2017

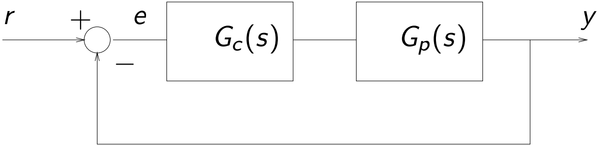
- Planta aproximada

$$G_p(s) = \frac{c_0}{s(s+c_1)}, \qquad c_1 \approx 0$$

- Controlador PI

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

sendo k_p o ganho proporcional e k_i o ganho integral.



- Ação de controle passa a ser proporcional à integral do erro.

- No caminho direto do sistema de controle

$$G_c(s)G_p(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} G_p(s).$$

o controlador PI introduz um zero em $s = -\frac{k_i}{k_p}$ e um pólo em $s = 0$.

- Erro em estado estacionário

$$e(\infty) = \lim_{s \to 0} sE(s) = \lim_{s \to 0} s \frac{R(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}.$$

Tipo da função de malha aberta I

- É o número de pólos que $G_c(s)G_p(s)$ apresenta em $s = 0$.

- Rastreamento de entrada:

Tipo 1 $\rightarrow$ o erro será:

- nulo para uma entrada degrau ($R(s) = 1/s$),
- constante para uma entrada rampa ($R(s) = 1/s^2$),
- infinito para entrada parábola ($R(s) = 1/s^3$)

Tipo 2 $\rightarrow$ o erro será:

- nulo para uma entrada degrau ($R(s) = 1/s$),
- nulo para uma entrada rampa ($R(s) = 1/s^2$),
- constante para entrada parábola ($R(s) = 1/s^3$)
- infinito para entradas $R(s) = 1/s^n$ com $n \geq 4$

Tipo da função de malha aberta II

- Genericamente, para que um sistema de controle exiba erro nulo para uma entrada de tipo n, o tipo do sistema deve ser no mínimo n.

- Exemplo

$$G_p(s) = \frac{c_0}{s(s+c_1)}, \quad G_c(s) \text{ controlador PI}$$

$G_c(s)$ e $G_p(s)$ são do tipo 1 $\rightarrow$ o tipo de $G_c(s)G_p(s)$ é 2

Características do controlador PI I

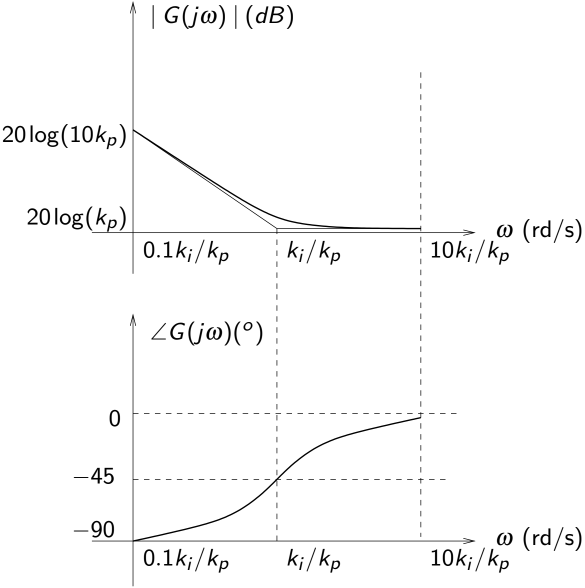
- A ação integral afeta positivamente o valor de regime da saída. Na resposta ao degrau, tem-se necessariamente que

$$\int_{t_0}^{t_1} e(t)\,dt = 0$$

em regime permanente, para qualquer t_0 e t_1

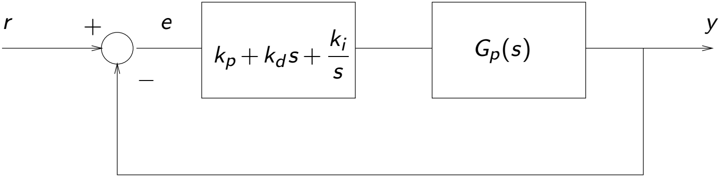
- O controlador PI introduz uma componente atraso da tendência do erro
- O efeito combinado das ações proporcional e integral é uma resposta mais lenta e mais oscilatória
- A resposta em frequência do controlador PI mostra que este controlador se comporta como um filtro passa-baixa

$$G_c(j\omega) = k_p + \frac{k_i}{j\omega} = \frac{k_i[(k_p/k_i)j\omega + 1]}{j\omega}.$$


$|\ G(j\omega)\ |\ (dB)$
$20\log(10k_p)$
$20\log(k_p)$
ω (rd/s)
$0.1k_i/k_p$
k_i/k_p
$10k_i/k_p$
$\angle G(j\omega)(^o)$
0
-45
-90
ω (rd/s)
$0.1k_i/k_p$
k_i/k_p
$10k_i/k_p$

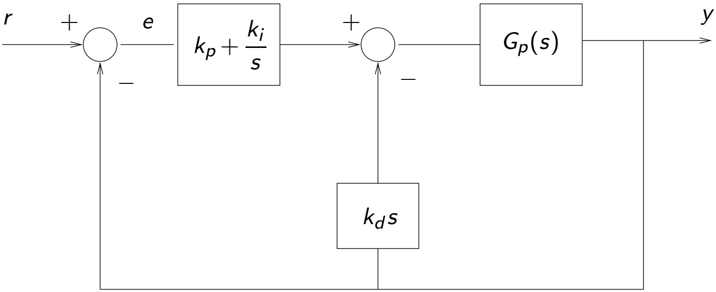
- Considere $G_p(s) = \dfrac{k_{hw}}{\alpha s^2}$

- Implementação clássica **PID**



$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{(k_{hw}/\alpha)(k_d s^2 + k_p s + k_i)}{s^3 + (k_{hw}/\alpha)(k_d s^2 + k_p s + k_i)}.$$

- Implementação com realimentação de velocidade **PI&D**



$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{(k_{hw}/\alpha)(k_p s + k_i)}{s^3 + (k_{hw}/\alpha)(k_d s^2 + k_p s + k_i)}.$$

2ª parte – Controle em cascata I

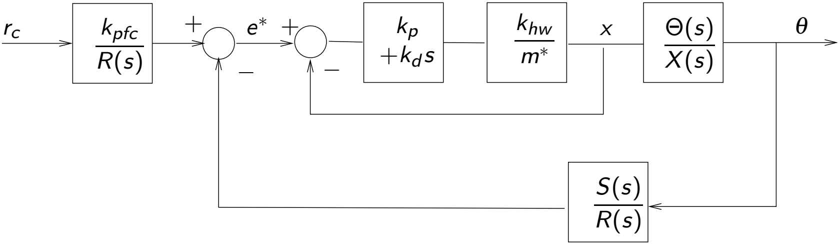
- Estratégia envolve duas malhas de controle:

Malha Interna

Trata o problema de gerar a posição linear x comandada pelo erro produzido entre o ângulo de referência especificado e o medido θ. A malha interna deve responder mais rapidamente do que a malha externa e sem oscilações.

Malha Externa

A posição linear produzida pela malha interna é transformada em posição angular, dado que se conhece a função de transferência $\Theta(s)/X(s)$.
A malha externa pode então ser fechada por um controlador que forneça um comportamento apropriado para a posição angular.



r_c
$\frac{k_{pfc}}{R(s)}$
$+$
e^*
$+$
$-$
$-$
k_p
$+k_d s$
$\frac{k_{hw}}{m^*}$
x
$\frac{\Theta(s)}{X(s)}$
θ
$\frac{S(s)}{R(s)}$

Projeto do controlador cascata

- Assuma que $\dfrac{X(s)}{E^*(s)} \approx 1$ na faixa de frequência de operação da malha externa.

Portanto a função de transferência em malha aberta é:

$$\frac{\Theta(s)}{E^*(s)} = \frac{X(s)}{E^*(s)}\frac{\Theta(s)}{X(s)} = \frac{\Theta(s)}{X(s)}$$

- Os pólos desejados do sistema de malha fechada p_1, p_2 e p_3 são especificados, definindo-se o polinômio

$$D_{cl}(s) = (s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)$$

- Escrevendo

$$\frac{\Theta(s)}{X(s)} := k^* \frac{N_{ax}(s)}{D_{ax}(s)}$$

deseja-se então determinar o controlador de malha externa $\dfrac{S(s)}{R(s)}$ de forma a satisfazer a identidade

$$D_{ax}(s)R(s) + k^* N_{ax}(s)S(s) = D_{cl}(s).$$

Matlab: dois eixos verticais no mesmo gráfico I

- Considere o desenho de dois sinais no mesmo gráfico, e que as escalas de magnitude dos gráficos são bem diferentes. Para evitar que um dos gráficos fique muito pequeno (ou até mesmo não apareça), é possível utilizar duas escalas diferentes usando o comando `plotyy` do Matlab. Exemplo: desenhar no mesmo gráfico $y_1(t) = 2\cos(t)\exp(-0.2t)$ e $y_2(t) = 100\text{sen}(t)\exp(-0.1t)$

```
t=0:0.01:10;
y1=2*cos(t).*exp(-0.2*t);
y2=100*sin(t).*exp(-0.1*t);
figure();
[AX,H1,H2] = plotyy(t,y1,t,y2);
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','2cos(t)exp(-0.2t)')
set(get(AX(1),'Xlabel'),'String','t')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','100sin(t)exp(-0.1t)')
grid;
```

- O resultado é mostrado no gráfico a seguir

Matlab: dois eixos verticais no mesmo gráfico II

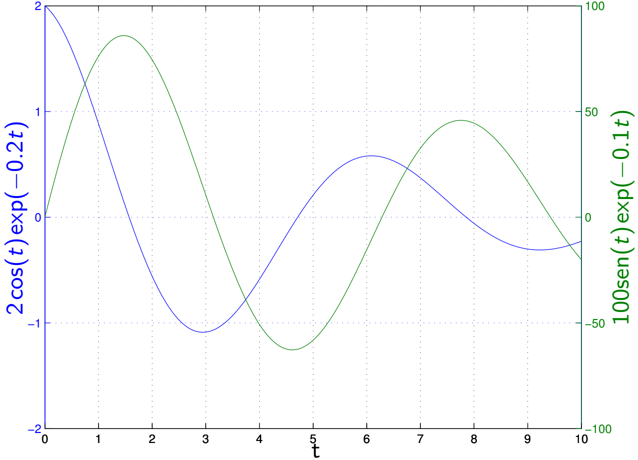


Gráfico com duas escalas diferentes no eixo vertical

Dicas gerais sobre a experiência

- Verifique se o seu roteiro **é o mesmo** que está no website da disciplina.
- Atenção ao roteiro: existem exercícios de demonstração **antes** do roteiro experimental. Sugestão: parte da equipe trabalha nas demonstrações e a outra parte na montagem e execução do roteiro experimental.
- Atenção: nossos projetos de controle estão sendo feitos em tempo contínuo. Cuidado ao selecionar `discrete-time` na tela de configuração do controlador (não vai funcionar).
- Os valores dos ganhos calculados nesta experiência devem ser anotados e trazidos para a próxima (serão usados).
- Não é necessário realizar o pré-relatório. Contudo, a sua elaboração pode acelerar a realização da experiência.

Referências Bibliográficas

- P. A. V. Ferreira. Introdução aos sistemas de controle. Notas de aula do Prof. Paulo Valente, FEEC-UNICAMP, 1999, `http://www.dt.fee.unicamp.br/~jbosco/ea722/rotaula0.pdf`.
- G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini. Feedback Control of Dynamic Systems. Pearson, Upper Saddle River, NJ, 6 edition, 2009.
- J. C. Geromel and A. G. B. Palhares. Análise Linear de Sistemas Dinâmicos: Teoria, Ensaios Práticos e Exercícios. Blucher, São Paulo, SP, 2004.
- K. Ogata. Engenharia de Controle Moderno. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 3 edition, 1998.