

Aula 7: Sintonia de controladores PID

prof. Dr. Eduardo Bento Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei

ebento@ufsj.edu.br

2 de setembro de 2019.

- 1 Sintonia de Controladores PID
 - Introdução
 - Método de Ziegler-Nichols (Z&N)

Sintonia em malha fechada

A sintonia do controlador é um passo fundamental no projeto de sistemas de controle. Esta sintonia parte das especificações de desempenho. Os métodos de sintonia variam muito de um para o outro e a metodologia pode utilizar o sistema (real) ou um modelo do mesmo.

Figura 3.1 Sistema de controle em malha fechada.

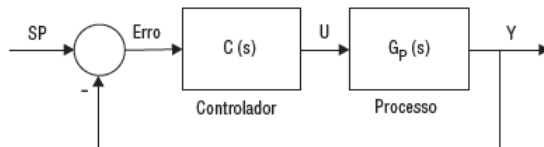


Figure: Diagrama em bloco de um sistema de malha fechada.

Figura retirada, com as devidas autorizações, do material de apoio ao professor.

Características necessárias/desejadas

Estabilidade

A principal característica desejada para um sistema de controle é a estabilidade.

Características necessárias/desejadas

Estabilidade

A principal característica desejada para um sistema de controle é a estabilidade.

Índices e coeficientes de desempenho

A segunda característica a ser levada em conta para a sintonia do controlador é a capacidade de permitir ao sistema de controle cumprir (respeitar) índices e coeficientes de desempenho ou outra figura de mérito desejada.

Características necessárias/desejadas

Estabilidade

A principal característica desejada para um sistema de controle é a estabilidade.

Índices e coeficientes de desempenho

A segunda característica a ser levada em conta para a sintonia do controlador é a capacidade de permitir ao sistema de controle cumprir (respeitar) índices e coeficientes de desempenho ou outra figura de mérito desejada.

Robustez

A robustez à incerteza no modelo ou variações paramétricas é a terceira característica desejada para uma sintonia satisfatória da malha de controle.

Método de Ziegler-Nichols (Z&N)

Método de Ziegler-Nichols (Z&N)

Ziegler e Nichols foram os primeiros a proporem um método prático de sintonia para o controlador PID. Foram propostas duas metodologias para sistemas SISO, sendo uma em malha fechada e outra em malha aberta.

Método de Ziegler-Nichols (Z&N)

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha fechada

Consiste no ajuste gradativo do ganho K_P e um ajuste para um PID série à razão de declínio de $1/4$. O método se baseia em:

- 1 Anular os ganhos K_I e K_D ;

Método de Ziegler-Nichols (Z&N)

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha fechada

Consiste no ajuste gradativo do ganho K_P e um ajuste para um PID série à razão de declínio de $1/4$. O método se baseia em:

- ① Anular os ganhos K_I e K_D ;
- ② Aumentar gradativamente o ganho K_P até se obter oscilações sustentadas (limite de estabilidade);

Método de Ziegler-Nichols (Z&N)

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha fechada

Consiste no ajuste gradativo do ganho K_P e um ajuste para um PID série à razão de declínio de $1/4$. O método se baseia em:

- 1 Anular os ganhos K_I e K_D ;
- 2 Aumentar gradativamente o ganho K_P até se obter oscilações sustentadas (limite de estabilidade);
- 3 Ao se obter as oscilações, utilizar o ganho obtido como sendo o K_U (ganho último) e o período último (P_U);

Método de Ziegler-Nichols (Z&N)

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha fechada

Consiste no ajuste gradativo do ganho K_P e um ajuste para um PID série à razão de declínio de $1/4$. O método se baseia em:

- 1 Anular os ganhos K_I e K_D ;
- 2 Aumentar gradativamente o ganho K_P até se obter oscilações sustentadas (limite de estabilidade);
- 3 Ao se obter as oscilações, utilizar o ganho obtido como sendo o K_U (ganho último) e o período último (P_U);
- 4 Utilizar a Tabela mostrada na Figura 2 para o cálculo dos ganhos do controlador.

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) em malha fechada

Tabela 3.2 Sintonia segundo [Ziegler e Nichols, 1942].

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_U$	–	–
PI	$0.45 K_U$	$P_U/1.2$	–
PID	$0.6 K_U$	$P_U/2$	$P_U/8$

Figure: 2 - Ajuste do controlador via método de Z&N em malha fechada.

Figura retirada, com as devidas autorizações, do material de apoio ao professor.

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) em malha fechada

Exemplo:

$$G(s) = \frac{0,5}{5s + 1} e^{-2s} \quad (1)$$

Figura 3.3 Resposta do processo durante o teste.

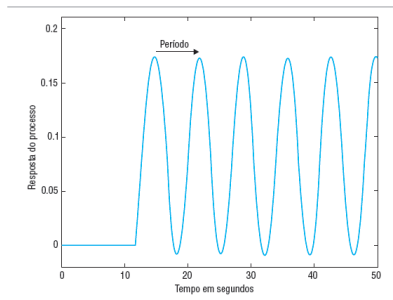


Figure: Método de Z&N em malha fechada, ganho último.

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

O método de sintonia em malha aberta consiste em:

- 1 mudar o controlador para modo manual;

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

O método de sintonia em malha aberta consiste em:

- ① mudar o controlador para modo manual;
- ② aplicar uma variação do tipo degrau na saída do controlador (Δu);

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

O método de sintonia em malha aberta consiste em:

- ① mudar o controlador para modo manual;
- ② aplicar uma variação do tipo degrau na saída do controlador (Δu);
- ③ calcular a taxa de variação R e o tempo morto L a partir da resposta y ;

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

O método de sintonia em malha aberta consiste em:

- ① mudar o controlador para modo manual;
- ② aplicar uma variação do tipo degrau na saída do controlador (Δu);
- ③ calcular a taxa de variação R e o tempo morto L a partir da resposta y ;
- ④ calcular P_U e K_U a partir das equações abaixo;

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

O método de sintonia em malha aberta consiste em:

- ① mudar o controlador para modo manual;
- ② aplicar uma variação do tipo degrau na saída do controlador (Δu);
- ③ calcular a taxa de variação R e o tempo morto L a partir da resposta y ;
- ④ calcular P_U e K_U a partir das equações abaixo;
- ⑤ utilizar a Tabela mostrada na Figura 2 para o cálculo dos ganhos do controlador.

$$K_U = \frac{2\Delta u}{RL} \quad (2)$$

$$P_U = 4L \quad (3)$$

Método de Ziegler-Nichols (Z&N) de malha aberta

Figura 3.4 Resposta do processo em malha aberta.

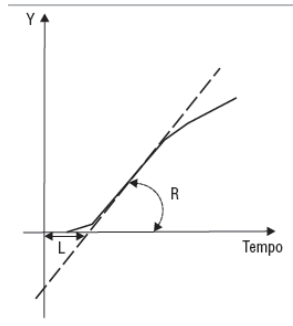


Figure: Método de Z&N em malha aberta.

Figura retirada, com as devidas autorizações, do material de apoio ao professor.

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Valores normalizados a partir das unidades em engenharia

$$\Delta y(\%) = \frac{\Delta y(\text{U.E.})}{\text{Range}} 100 \quad (4)$$

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Valores normalizados a partir das unidades em engenharia

$$\Delta y(\%) = \frac{\Delta y(\text{U.E.})}{\text{Range}} 100 \quad (4)$$

Considere o sistema abaixo:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (5)$$

$$K = \frac{\Delta y(\%)}{\Delta u(\%)} \quad (6)$$

Figura 3.5 Resposta do processo de primeira ordem em malha aberta

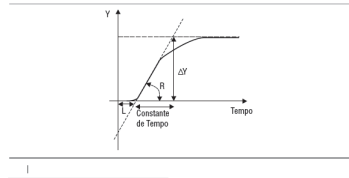


Figure: Método de Z&N em malha aberta.

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Equações para o sistema de primeira ordem

$$R = \frac{\Delta y}{\tau} \quad (7)$$

$$P_U = 4L = 4\theta \quad (8)$$

Cálculo do ganho último

$$K_U = \frac{2\Delta u}{RL} = \frac{2\Delta u \tau}{\Delta y L} = \frac{2\tau}{KL} \quad (9)$$

Tabela 3.3 Sintonia segundo [Ziegler e Nichols, 1943].

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\tau / (K \times \theta)$	—	—
PI	$0.9 \tau / (K \times \theta)$	$3.33 \times \theta$	—
PID	$1.2 \tau / (K \times \theta)$	$2 \times \theta$	$0.5 \times \theta$

Figure: Método de Z&N em malha aberta para um sistema de primeira ordem com tempo morto.

Figura retirada, com as devidas autorizações, do material de apoio ao professor.

Considerações a respeito da sintonia

Ganho proporcional

- O ganho K_p é inversamente proporcional ao ganho do sistema K ;
- o ganho K_p é inversamente proporcional ao fator de incontrolabilidade.

Considerações a respeito da sintonia

Ganho proporcional

- O ganho K_p é inversamente proporcional ao ganho do sistema K ;
- o ganho K_p é inversamente proporcional ao fator de incontrolabilidade.

Fator de incontrolabilidade

O fator de incontrolabilidade é definido como θ/τ . Quanto maior este maior, mais difícil controlar o sistema.

Considerações a respeito da sintonia

Ganho proporcional

- O ganho K_p é inversamente proporcional ao ganho do sistema K ;
- o ganho K_p é inversamente proporcional ao fator de incontrolabilidade.

Fator de incontrolabilidade

O fator de incontrolabilidade é definido como θ/τ . Quanto maior este maior, mais difícil controlar o sistema.

Tempo Integral T_I

Quanto maior o tempo morto, ou seja, maior o valor de θ , maior deve ser o ajuste do tempo morto.

Considerações a respeito da sintonia

Tempo derivativo (T_D)

- Quanto maior o tempo morto, maior deverá ser o ajuste do tempo derivativo;
- Ziegler e Nichols utilizaram a razão de $1/4$ entre T_D/T_I fazendo com que $T_I = 4T_D$.

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Considerações sobre a tabela (3.3) de ajuste de ganhos

- Acredita-se que foram usadas as equações do PID paralelo no desenvolvimento do método de Z&N.

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Considerações sobre a tabela (3.3) de ajuste de ganhos

- Acredita-se que foram usadas as equações do PID paralelo no desenvolvimento do método de Z&N.
- Os estudos de Corripio (1990) mostram que os métodos de Z&N são adequados para sistemas com fator de incontrolabilidade possuindo os seguintes valores $0, 1 \leq \theta/\tau \leq 0,3$;

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Considerações sobre a tabela (3.3) de ajuste de ganhos

- Acredita-se que foram usadas as equações do PID paralelo no desenvolvimento do método de Z&N.
- Os estudos de Corripio (1990) mostram que os métodos de Z&N são adequados para sistemas com fator de incontrolabilidade possuindo os seguintes valores $0,1 \leq \theta/\tau \leq 0,3$;
- Rivera (1986) considere o desemoenho "razoável" para valores $0,1 \leq \theta/\tau \leq 0,3$, mas a robustez só é boa para $\theta/\tau = 0,3$;

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Considerações sobre a tabela (3.3) de ajuste de ganhos

- Acredita-se que foram usadas as equações do PID paralelo no desenvolvimento do método de Z&N.
- Os estudos de Corripio (1990) mostram que os métodos de Z&N são adequados para sistemas com fator de incontrolabilidade possuindo os seguintes valores $0,1 \leq \theta/\tau \leq 0,3$;
- Rivera (1986) considere o desemoenho "razoável" para valores $0,1 \leq \theta/\tau \leq 0,3$, mas a robustez só é boa para $\theta/\tau = 0,3$;
- Para $\theta/\tau > 4$, o uso das regras de Z&N tornam o sistema instável;

Método de Z&N em malha fechada para valores normalizados

Considerações sobre a tabela (3.3) de ajuste de ganhos

- Acredita-se que foram usadas as equações do PID paralelo no desenvolvimento do método de Z&N.
- Os estudos de Corripio (1990) mostram que os métodos de Z&N são adequados para sistemas com fator de incontrolabilidade possuindo os seguintes valores $0, 1 \leq \theta/\tau \leq 0,3$;
- Rivera (1986) considere o desemoenho "razoável" para valores $0, 1 \leq \theta/\tau \leq 0,3$, mas a robustez só é boa para $\theta/\tau = 0,3$;
- Para $\theta/\tau > 4$, o uso das regras de Z&N tornam o sistema instável;
- Para a implementação da sintonia de Z&N, em sistemas digitais, utilizando-se a Tabela 3.3, deve-se fazer $\theta' = \theta/(TA/2)$, em que TA é o período de amostragem.

Método de Z&N e instabilidade

O uso do método de Z&N pode levar o sistema a instabilidade devido:

- aos erros de modelagem do sistema.

Método de Z&N e instabilidade

O uso do método de Z&N pode levar o sistema a instabilidade devido:

- aos erros de modelagem do sistema.
- a razão de declínio de $1/4$ não ter robustez em relação aos limites de estabilidade;

Método de Z&N e instabilidade

O uso do método de Z&N pode levar o sistema a instabilidade devido:

- aos erros de modelagem do sistema.
- a razão de declínio de $1/4$ não ter robustez em relação aos limites de estabilidade;
- aos controladores industriais serem digitais (o método foi desenvolvido para controladores analógicos);

Método de Z&N e instabilidade

O uso do método de Z&N pode levar o sistema a instabilidade devido:

- aos erros de modelagem do sistema.
- a razão de declínio de $1/4$ não ter robustez em relação aos limites de estabilidade;
- aos controladores industriais serem digitais (o método foi desenvolvido para controladores analógicos);
- Acoplamento entre as malhas de controle (sistemas industriais são, geralmente, MIMO).

Sugest ao para a implementação prática:

Começar a implementação prática com ganhos menores do que os obtidos nos cálculos e aumentar gradativamente.

IMPORTANTE: O método de Z&N NÃO garante estabilidade em malha fechada.

Praticando conceitos!

Exercícios conceituais em sala. Figuras de mérito para sistemas de

segunda ordem:

- $\tau = \frac{1}{\zeta\omega_n}$;
- $\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$;
- $t_r = \frac{1.8}{\omega_n}$ para 10% a 90% e $\zeta = 0.5$;
- $M_p = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\pi} \times 100\%$;
- $t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$;
- $t_s = 4\tau = \frac{4}{\zeta\omega_n}$.

References



Campos e Teixeira (2008)

Controle Típicos de equipamentos e processos industriais

Editora Blucher

The End