Controle de Processos

Aula 05 - Sintonia de controladores PID: Método de C-C e método IMC

Apresentação

Na última aula, conhecemos dois métodos heurísticos para sintonia de controladores PID: os métodos de Ziegler-Nichols e o método CHR. Os métodos que estudaremos nesta aula serão: o Método de Cohen e Coon e o Método do Modelo Interno (IMC). Veremos que esses métodos necessitam de um modelo do processo o qual queremos controlar e que o IMC possui algumas particularidades e características específicas. Então, vamos lá?

Vídeo 01 - Apresentação

Objetivos

Ao final desta aula, os alunos deverão estar aptos a:

- Entender o método de Cohen e Coon e seus pressupostos;
- Aplicar o método heurístico de Cohen e Coon e do IMC em problemas de sintonia de controladores PID industriais.

Fator de Incontrolabilidade

Antes de falarmos do método de Cohen e Coon, falaremos sobre o fator de incontrolabilidade, que já conhecemos na Aula 04. Um sistema com tempo morto (θ-teta) muito grande é extremamente difícil de controlar. Isso acontece pelo fato de que, quando o controlador atua, os efeitos dessa atuação não refletem de imediato na saída da planta. Em se tratando de grandes tempos mortos, caso o controlador não seja bem projetado, o sistema pode tornar-se instável, o que não é desejável. Portanto, quanto maior for o tempo morto comparativamente à constante de tempo (τ-tau) do processo, mais difícil é de se controlar o sistema. O Fator de Incontrolabilidade relaciona o tempo morto com a constante de tempo. Considerando um sistema com constante de tempo τ e tempo morto θ, o fator de incontrolabilidade é dado por:

$$FI = \frac{\theta}{\tau}$$

As equações desenvolvidas por Ziegler e Nichols utilizam critério de razão de decaimento de ¼ e são adequadas para correção rápida de perturbações. No entanto, apresentam algumas limitações com relação a atrasos de tempo. A sintonia é apropriada para processos nos quais a razão entre o tempo morto e a constante de tempo do processo está entre 0.1 e 0.3 (Ziegler e Nichols, 1942). Em vista, novos métodos foram desenvolvidos para contornar essas limitações.

Vídeo 02 - Noções Básicas

Método de Cohen e Coon

O método de Cohen e Coon (Cohen e Coon, 1953) foi proposto para sintonia de plantas com tempos mortos mais elevados. Quando a planta possui fator de incontrolabilidade maior do que 0.3 recomenda-se o emprego deste método. Assim como os métodos de Ziegler-Nichols e CHR, pressupõe que o processo possa ser descrito por um modelo de primeira ordem com ganho K, constante de tempo τ e tempo morto θ. Obtêm-se essas informações da resposta experimental, de acordo com o mesmo procedimento de aplicação de um degrau em malha aberta na entrada do processo.

Critério de Desempenho: Continua sendo a razão de declínio igual a ¼.

Para relembrar, o procedimento em malha aberta onde o controlador não é utilizado consiste em aplicar um degrau na entrada do sistema, obtendo-se, assim, a curva de reação do processo, da qual se obtém as informações do tempo morto (diferença entre o tempo em que se inicia a resposta e o instante de tempo da aplicação do distúrbio/degrau), constante de tempo (diferença entre o tempo para o sistema alcançar 63% do seu valor final e o tempo do início da resposta) e o ganho do processo (razão entre a variação do degrau/entrada e a variação do sinal de saída/resposta).

Por sua vez, segundo o método de Cohen e Coon, os parâmetros do controlador são obtidos utilizando a Tabela 1, a qual indica as fórmulas que devem ser trabalhadas para o cálculo de tais parâmetros a partir do modelo do processo.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$(1.03 + 0.35 * (\frac{\theta}{\tau})) * \frac{\tau}{K*\theta}$	∞	0
PI	$(0.9 + 0.083 * (\frac{\theta}{\tau})) * \frac{\tau}{K*\theta}$	$\frac{(0.9+0.083*(\frac{\theta}{\tau}))}{(1.27+0.6*\frac{\theta}{\tau})} * \theta$	0

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$(1.35 + 0.25 * (\frac{\theta}{\tau})) * \frac{\tau}{K*\theta}$	$\frac{(1.35+0.25*(\frac{\theta}{\tau}))}{0.54+0.33*(\frac{\theta}{\tau})} * \theta$	$\frac{0.5*\theta}{(1.35+0.25*(\frac{\theta}{\tau}))}$

Tabela 1 - Tabela de sintonia segundo o método de Cohen e Coon.
Fonte: Campos e Teixeira (2010).

Vídeo 03 - Método de Cohen e Coon

Estudos de Rivera et al. (1986) apontam que esse método apresenta desempenho aceitável quando o fator de incontrolabilidade está na faixa de 0.6 até 4.5. Entretanto, o método pode produzir controladores com sintonia agressiva, ou seja, uma sintonia que pode produzir sinais de controle (OP) muito elevados, podendo até danificar os equipamentos do sistema. Dessa forma, sugere-se na prática diminuir inicialmente os ganhos obtidos pelo método e ir aumentando posteriormente estes ganhos em função da observação do comportamento do processo. Manipulá-los até obter uma resposta satisfatória.

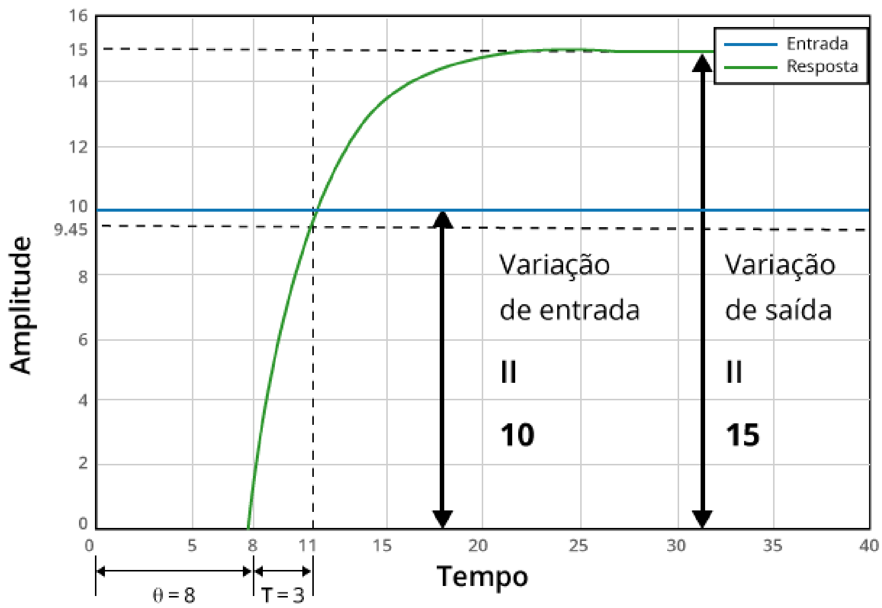
Nota: Como o método costuma apresentar sintonias agressivas, uma prática comum, em casos de dificuldade de controle, é diminuir o ganho proporcional e aumentar o tempo integral, no caso de um controlador PI. O mesmo procedimento anterior e diminuindo o tempo derivativo no caso de um PID, tornando o sistema estável ao custo de uma resposta lenta.

Como o objetivo do método de Cohen e Coon (C-C) é de obter sintonias para sistemas com tempos mortos elevados, ele não é robusto (Ser robusto, isto é, pouco sensível às variações nas condições do processo e perturbações. O sistema de controle deve ter um bom desempenho em toda a sua região de operação.), ou a robustez é ruim para razões de incontrolabilidade menores do que 2.

Os parâmetros da planta (K, τ e θ) identificados durante a resposta ao degrau, considerados constantes durante o projeto do controlador para a resposta transitória, para os erros em regime permanente e para a estabilidade, podem variar ao longo do tempo porque o sistema real está em constante funcionamento, ocorrendo a deterioração de alguns equipamentos. Assim, o desempenho do sistema também mudará ao longo do tempo, pois o controlador não será mais tão consistente. Em alguns casos, variações nos valores dos parâmetros identificados podem levar a pequenas ou grandes mudanças no desempenho, dependendo do ponto de operação nominal do sistema e do tipo de projeto do controlador utilizado. Assim, o profissional deseja criar um projeto robusto, de modo que o sistema não seja muito sensível a variações dos parâmetros da planta.

Como exemplo de aplicação do método C-C considere a resposta de um determinado processo mostrada na Figura 1, obtida pela aplicação de um degrau de 10 unidades na entrada em malha aberta.

Figura 01 - Resposta em malha aberta de um sistema a uma entrada em degrau.



Nota: É usual a existência de ruído no sinal de saída, o que torna difícil a obtenção de curvas “limpas”, como a apresentada na Figura 1, isso implica que os parâmetros das curvas resultem de uma média dos valores obtidos em vários ensaios.

Através da Figura 1, podemos encontrar todos os parâmetros necessários para a sintonia do controlador pelo método C-C. Tanto a entrada quanto a resposta estão no mesmo gráfico. Perceba que o sistema partiu do repouso, ou seja, sua saída no instante da aplicação do degrau (degrau aplicado no tempo = 0) é zero (0). Em uma planta de nível (variável de processo), isso equivale a ter um tanque totalmente vazio (nível nulo) e então aplica-se um comando (um degrau) na bomba, por exemplo, para que o encha. Certamente há uma perda de fluido do tanque para que haja o equilíbrio do nível (sistema estável em malha aberta). Portanto, para determinar a constante de tempo, encontra-se o instante em que a resposta atinge 63% do seu valor final e subtrai esse instante do momento em que o sistema começa a reagir.

Sendo assim,

$$\begin{cases} \text{Valor final da resposta} = 15 \\ 63\% \text{ do valor final} = 0.63 * 15 = 9.45 \\ \tau = 11 - 8 = 3 \end{cases}$$

$$\theta = 8$$

$$K = \frac{\text{Variação da Saída}}{\text{Variação da Entrada}} = \frac{15}{10} = 1.5$$

Com o conhecimento dos parâmetros do modelo do processo, podemos finalmente calcular o fator de incontrolabilidade:

$$FI = \frac{\theta}{\tau} = \frac{8}{3} \approx 2.67$$

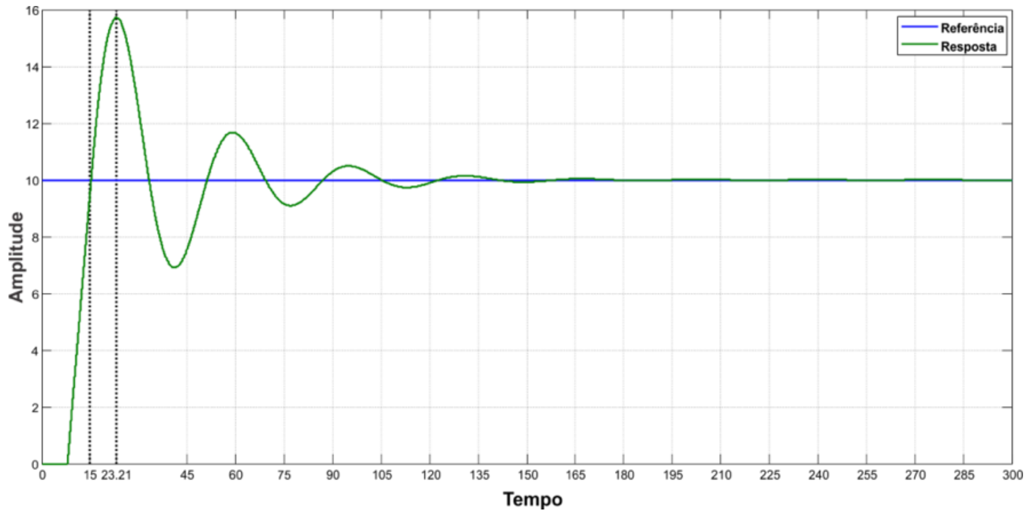
Como o FI ≈ 2.67, segundo a teoria estudada e utilizando um controlador sintonizado pelo método C-C, o sistema em malha fechada deverá apresentar um desempenho razoável. Calculemos os ganhos para um controlador PI:

$$K_p = (0.9 + 0.083 * (\frac{\theta}{\tau})) * \frac{\tau}{K * \theta} = (0.9 + 0.083 * (\frac{8}{3})) * \frac{3}{1.5 * 8} = 0.2803$$

$$T_i = \frac{(0.9 + 0.083 * \frac{\theta}{\tau})}{(1.27 + 0.6 * (\frac{theta}{\tau}))} * \theta = \frac{(0.9 + 0.083 * \frac{8}{3})}{1.27 + 0.6 * (\frac{8}{3})} * 8 = 3.1257$$

A Figura 2 apresenta o resultado da resposta do sistema para essa sintonia do controlador PI.

Figura 02 - Resposta da malha de controle com o controlador PI. Sintonia pelo método C-C.



A resposta da Figura 2 apresenta um sobrevalor alto (cerca de 60%) com um tempo de estabilização um pouco lento. Em alguns processos pode não ser muito interessante uma estabilização lenta demais, para outros, possa ser que seja (depende das características do processo), o mesmo valendo para o *overshoot* (em uma planta de nível o líquido poderia transbordar, por exemplo). Usaremos um controlador PID com o objetivo de deixar o sistema com um menor sobressinal e chegando mais rapidamente na estabilidade. Calculemos os ganhos para o controlador PID:

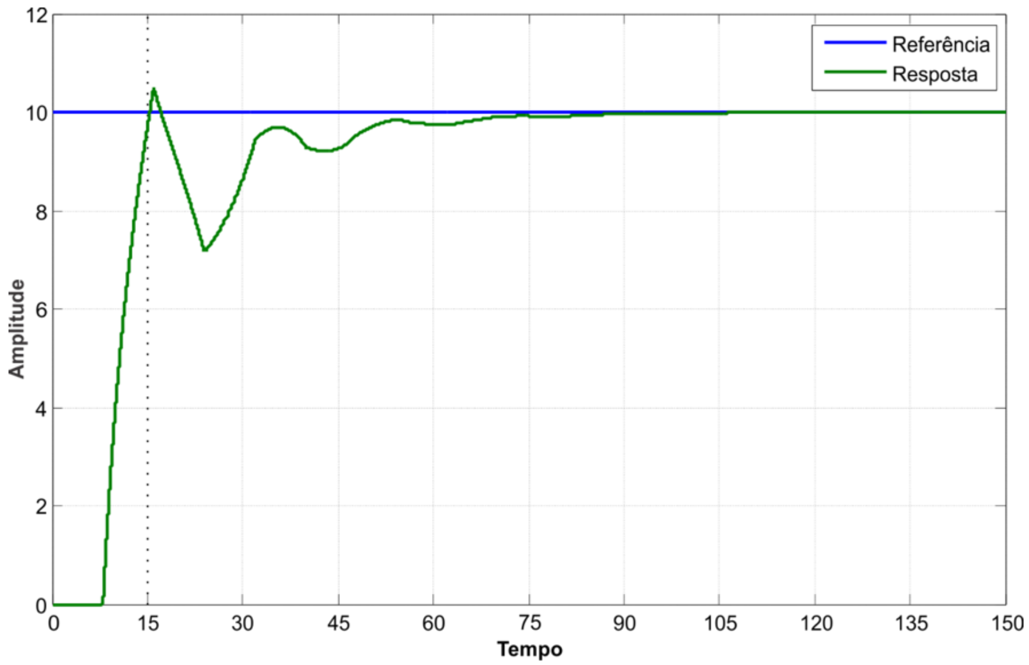
$$K_p = (1.35 + 0.25 * (\frac{\theta}{\tau})) * \frac{\tau}{K * \theta} = (1.35 + 0.25 * (\frac{8}{3})) * \frac{3}{1.5 * 8} = 0.5042$$

$$T_i = \frac{(1.35 + 0.25 * (\frac{\theta}{\tau}))}{(0.54 + 0.33 * (\frac{\theta}{\tau}))} * \theta = \frac{(1.35 + 0.25 * (\frac{8}{3}))}{(0.54 + 0.33 * (\frac{8}{3}))} * 8 = 11.3615$$

$$T_d = \frac{(0.5 * \theta)}{(1.35 + 0.25 * (\frac{\theta}{\tau}))} = \frac{(0.5 * 8)}{(1.35 + 0.25 * (\frac{8}{3}))} = 1.9835$$

A Figura 3 apresenta o resultado da resposta do sistema para essa sintonia do controlador PID.

Figura 03 - Resposta da malha de controle com o controlador PID. Sintonia pelo método C-C.



Analisando a Figura 3, constatamos que de fato o controlador PID diminuiu o *overshoot* e o tempo de estabilização, comparado com a resposta da Figura 2. Note que praticamente não foi alterado o tempo de subida (≈ 15 unidades de tempo).

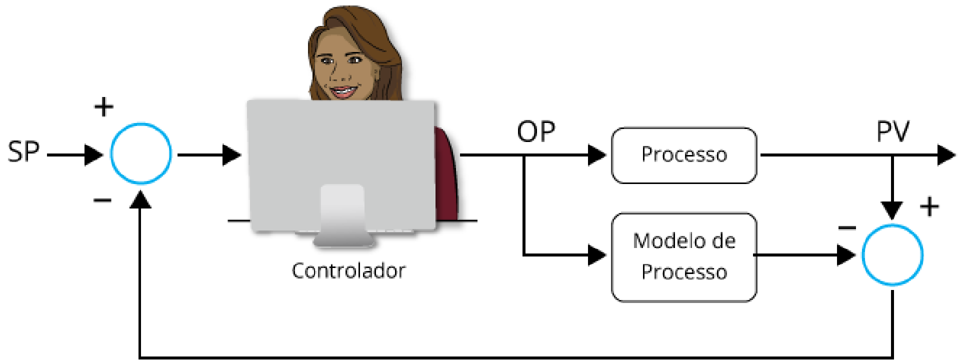
Atividade 01

1. Considerando um sistema com ganho estático igual a 3, constante de tempo de 30 segundos e tempo morto de 1 minuto, calcule seu fator de incontrolabilidade e projete um controlador PI e um PID para o mesmo.

Método do Modelo Interno IMC

O método do modelo interno, ou *Internal Model Control* (IMC), é um método em que, a partir do modelo matemático do processo (obtido pela curva de reação após um degrau na entrada em malha aberta) e de uma especificação de desempenho, se obtenha um controlador adequado. A Figura 4 ilustra a ideia do IMC.

Figura 04 - Diagrama de Blocos de um Sistema com Modelo Interno.



Pela Figura 4, verificamos que o controlador envia o mesmo sinal de controle tanto para o processo como para um modelo matemático desse processo. A diferença entre a saída do processo real e a saída do modelo é que será realimentada.

Nota: O controlador possui um modelo interno do processo que pode ser utilizado apenas na fase de projeto, ou que também pode ser usado durante a operação.

Usualmente, deseja-se que o *sistema em malha fechada* se comporte como um sistema de primeira ordem sem atraso, com ganho estático 1 e com constante de tempo λ - lambda (critério de desempenho do método IMC). Esse é o primeiro método em que se pode explicitar, através do parâmetro λ, qual o comportamento desejado para a resposta do processo. A Tabela 2 apresenta a sintonia do método IMC supondo um sistema que possa ser representado por uma dinâmica de primeira ordem com atraso, ou seja, um sistema com ganho K, constante de tempo τ e tempo morto θ.

Nota: Quando em malha aberta (sem controle) o processo (ou a planta) apresenta uma determinada dinâmica (comportamento), ao aplicarmos o controlador (malha fechada) essa dinâmica é alterada, uma vez que estaremos com o controlador e a planta.

Controlador	K_p	T_i	T_d	Sugestão para Desempenho
PI	$(\frac{2*\tau+\theta}{2*\lambda*K})$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	0	$\frac{\lambda}{\theta} > 1.7$
PID	$(\frac{2*\tau*\theta}{K*(2*\lambda+\theta)})$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$(\frac{\tau*\theta}{2*\tau+\theta})$	$\frac{\lambda}{\theta} > 0.8$

Tabela 2 - Tabela de parâmetros para o método do IMC.
Fonte: Campos e Teixeira (2010).

Vídeo 04 - Método do Modelo Interno (IMC)

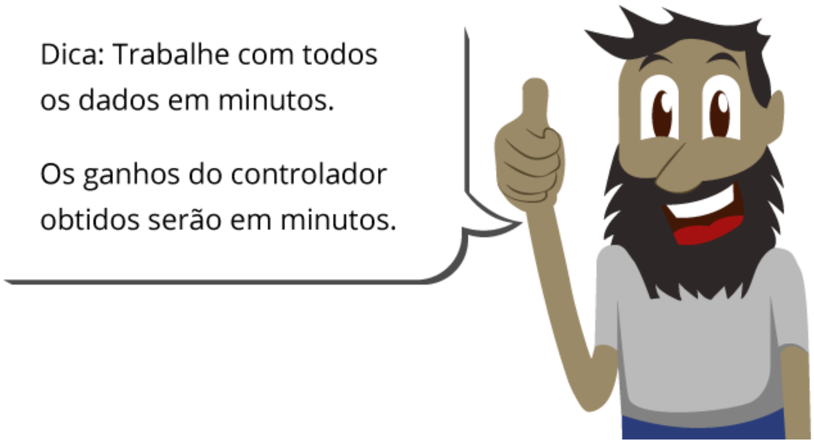
Nota: As sugestões para o desempenho na Tabela 2 servem como uma partida inicial, não significando que devem ser escolhidas sempre.

É importante observar que também nesse método é necessário se obter experimentalmente os parâmetros do processo que se deseja controlar. A escolha do desempenho desejado (parâmetro a ser ajustado - λ) também é muito importante. Em processos em que o tempo morto não é tão significativo, não faz sentido escolher, por exemplo, o valor de λ superior à constante de tempo do processo. Isso faria com que o sistema respondesse em malha fechada de forma mais lenta do que em malha aberta. De maneira conservativa o λ pode ser escolhido igual à constante de tempo dominante do processo (maior constante de tempo).

Escolher um valor de λ menor do que o tempo morto também não é uma boa escolha, visto que o controlador apresentaria resultado agressivo. Note, a partir da Tabela 2, que a sugestão de desempenho para o controlador é de que λ seja maior do que θ. Essa diferença de valores é mais acentuada no controlador PI, pois sem a parte derivativa ele não consegue ser tão robusto para processos com tempos mortos mais significativos.

Atividade 02

1. Considere um sistema com ganho 10, tempo morto igual a 10 minutos e constante de tempo de 1 hora. Deseja-se obter um controlador PI de forma que o desempenho desejado (λ) em malha fechada seja de 40 minutos.



Conclusão

Chegamos ao fim de nossa aula de hoje, no entanto, não hesite em fazer pesquisas sobre o que foi estudado, pois sempre é desejável ter um pouco mais de informação. Na próxima aula, veremos o Método da Integral do Erro e o Método do Relé, que são mais dois métodos de sintonia de controladores, porém este último é conhecido por ser um método de sintonia automática. Até lá!

Resumo

Nesta aula, foram apresentados os métodos de Cohen e Coon e do modelo interno. Aprendemos que o fator de incontrolabilidade é muito importante na escolha do método mais adequado. O método de Cohen e Coon, conforme vimos, é bem adequado para processos que tenham fator de incontrolabilidade maior do que 0.3. No método do IMC, aprendemos que é possível definir o critério de desempenho desejado, ou seja, definir o quão rápido se deseja que a saída do processo acompanhe o *setpoint*.

Autoavaliação

1. Considere um sistema de primeira ordem, atraso com ganho estático 2.5, constante de tempo 3 minutos e tempo morto 90 segundos.
    a. Qual o fator de incontrolabilidade desse sistema?
    b. O método de Cohen e Coon é adequado para encontrar uma sintonia de controlador para esse sistema? Justifique sua resposta.
    c. Encontre a sintonia de um controle PI e um PID para esse sistema.
2. Considere um sistema com ganho 7, tempo morto igual a 15 minutos e constante de tempo de 1 hora. Deseja-se obter um controlador PI e um controlador PID de forma que o desempenho desejado seja de 30 minutos.

Referências

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

COHEN, G. H.; COON, G. A. Theoretical Consideration of Retarded Control. **Transactions ASME**, v. 75, p. 827-834, 1953.

RIVERA, Daniel E.; MORARI, Manfred; SKOGESTAD, Skogestad. Internal model control, 4 PID controller design. **Industrial and engineering chemistry process design and development,** v. 25, p. 252-265, 1986.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Control Circuits. **Transactions ASME**, v. 64, p. 759-768, nov. 1942.