Controle de um Sistema de Levitação Magnética no Espaço de Estados (T4)

Neste trabalho final vamos exercitar a aplicação de técnicas de controle moderno baseadas em Espaço de Estados para estabilização e regulação do processo de levitação magnética modelado no trabalho anterior. Antes de iniciar esta atividade, é fundamental que o grupo tenha previamente finalizado todas as etapas do T3, isto é:

- Representação do modelo da planta no padrão do Espaço de Estados

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A\,x(t) + B\,u(t) \\ y(t) = C\,x(t) + D\,u(t) \end{cases} ;$$

- Construção de um ambiente de simulação virtual para o sistema dentro do software `MATLAB/Simulink`;
- Análise da estabilidade interna do sistema em malha-aberta;
- Análise da controlabilidade e observabilidade do sistema.

Na sequência são apresentadas duas novas etapas relativas ao projeto de controle. Para avaliação, seu grupo deverá elaborar um relatório contendo todos os desenvolvimentos e manipulações algébricas realizadas, bem como discussões sobre os resultados obtidos.

Etapa I - Projeto de uma Realimentação de Estados

Assumindo por enquanto que todos os estados internos da planta são medidos (posição, velocidade e corrente), deve-se projetar uma lei de controle de realimentação de estados na forma

$$u(t) = -K\,x(t) + \alpha\,r(t) \ ,$$

onde $r(t)$ denota o valor de referência (*setpoint*) para a variável $\Delta p(t)$. Nesse contexto, os seguintes passos devem ser seguidos.

(a) Especifique os autovalores desejados para o sistema de controle em malha-fechada de modo que todos os estados internos do processo acomodem-se de forma estável em praticamente meio segundo.

(b) Calcule a matriz de ganhos K que assegura a alocação dos autovalores do sistema em malha-fechada nas posições especificadas no item anterior. *Importante: Não será aceito como justificativa de desenvolvimento o uso de funções prontas de projeto no Espaço de Estados, como as funções* `place` *e* `acker` *do* `MATLAB`.

(c) Calcule o parâmetro α do controle de forma que o erro $e(t) = r(t) - y(t)$ em regime permanente seja zero para qualquer referência $r(t)$ do formato degrau.

(d) Implemente e simule a lei de controle projetada no seu ambiente virtual do `MATLAB/Simulink` que foi elaborado no trabalho anterior. Tal simulação deve ser configurada conforme indicado abaixo.

- Tempo total de 2 segundos para simulação;
- Condições iniciais $\Delta p(0) = 0.005$, $\Delta \dot{p}(0) = 0$ e $\Delta i(0) = 0$;
- Sinal de referencia $r(t)$ inicia igual a zero e salta para o valor de 0.01 na metade do tempo de simulação.

(e) Apresente suas conclusões pessoais:

- A lei de controle utilizada foi capaz de estabilizar o sistema?
- O desempenho transitório do sistema encontra-se de acordo com o esperado?
- O controle implementado assegura o correto seguimento do *set-point* de referência?

Etapa II - Projeto de um Observador de Estados

Nesta etapa final vamos considerar um cenário mais realista, onde apenas a variável de saída $y(t)$ da planta representa a informação sensoreada pelo controle (no caso, apenas a posição $\Delta p(t)$). Neste contexto, seu grupo deverá modificar a lei de controle conforme

$$u(t) = -K\,\hat{x}(t) + \alpha\, r(t) \ ,$$

onde $\hat{x}(t)$ aqui representa a estimativa do estado real $x(t)$ do sistema, a qual deve ser produzida por um observador de estados na forma:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) &= A\,\hat{x}(t) + B\,u(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\,\hat{x}(t) + D\,u(t) \end{cases} .$$

Para realizar o projeto deste observador, siga os seguintes passos.

(a) Especifique os autovalores desejados para a dinâmica do erro de observação, de modo que as estimativas estejam praticamente sincronizadas na metade do tempo de acomodação imposto pelo controle.

(b) Com base nos autovalores de alvo especificados no item (a), calcule a matriz de ganhos L para implementar a componente de correção do observador de estados. *Importante: Novamente não será aceito aqui o uso de funções prontas de projeto no Espaço de Estados, como as funções* `place` *e* `acker`.

(c) Implemente e simule o sistema de controle completo incluindo o observador de estados projetado no seu ambiente do `MATLAB/Simulink`. Pede-se que os seguintes cenários sejam testados:

- Condições iniciais do observador $\hat{x}(0)$ idênticas às condições iniciais da planta $x(0)$, seguindo os mesmos valores indicados no item (d) da etapa anterior;
- Condições iniciais do observador $\hat{x}(0)$ iguais a zero, mantendo as mesmas condições iniciais anteriores para a planta.

Neste último caso, apresente o gráfico de erro entre o vetor de estado real $x(t)$ e o vetor de estado estimado $\hat{x}(t)$.

(d) Com base nos resultados obtidos, apresente suas conclusões pessoais:

- A inclusão do observador de estados causou alguma perda de desempenho na resposta do sistema de controle em relação à etapa anterior?
- O que aconteceu nos casos em que o observador de estados apresentava uma condição inicial equivocada?
- Quais as vantagens práticas que o observador de estados proporciona?