

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS N° 2

Sistemas de control en lazo cerrado: Análisis de régimen estacionario y transitorio, rechazo de perturbaciones, variación paramétrica y análisis de estabilidad.

Objetivos:

- Obtener el modelo que caracteriza a la planta a través de la función de transferencia para cada uno de los sistemas físicos especificados.
- Reconocer e interpretar los diferentes parámetros de la respuesta transitoria en sistemas dinámicos, a fin de evaluar su desempeño en régimen transitorio y permanente.
- Comprender los efectos y mejoras introducidas por los controladores lineales P, PI, PD, PID y PI-D, comparando la operación a lazo cerrado, con y sin compensación.
- Establecer los errores de posición, de velocidad y de aceleración para diferentes sistemas.
- Simular mediante Matlab o PSIM las diferentes respuestas y evaluar el desempeño del sistema.

Ejercicio N°1:

Considerar un modelo mecánico rotacional, donde los elementos son una inercia de $J = 0,12 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$ y una fricción viscosa $b = 0,09 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$; seleccionar como entrada al torque $T(s)$ y como salida la posición angular $\Theta(s)$. Obtener la función de transferencia $G_p(s) = \frac{\Theta(s)}{T(s)}$. Colocar el sistema

en lazo cerrado sin compensador. Realizar un diagrama de bloques para esquematizar el problema con un controlador $G_c(s) = 1$.

A) Obtener los errores de posición, velocidad y aceleración, aclarando qué **tipo de sistema** es la FTLA. Obtener la respuesta al escalón unitario, la rampa unitaria y la cuadrática del sistema en LC y verificar los errores calculados.

B) Realizar un análisis de la planta en LC con variaciones paramétricas:

- 1 – Producir cambios de carga J de 0,12; 0,5; 0,75; 1 y 1,5 $\text{N m s}^2/\text{rad}$ y obtener la respuesta al escalón **en un mismo gráfico**, además obtener el diagrama de polos y ceros (**también en un solo gráfico**) y generar una tabla para comparar los valores de t_p , t_s , M_p , t_r y e_{ssp} .
- 2 – Realizar cambios en la fricción (b) manteniendo constante a $J = 0,12 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$. Obtener para b igual a 0,01; 0,1; 0,5; 0,6928 y 1,05 $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$. Confeccionar gráficos y la tabla como se menciona en el punto anterior.
- 3 – Evaluar que sucede en cada caso con la respuesta en lazo cerrado y con los parámetros

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

característicos de un sistema de 2do orden (ω_n , σ , ξ). A la FT de la planta del sistema rotacional

$$\text{se la puede definir como } G_p(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}.$$

C) Incorporar un controlador al sistema original ($J = 0,12 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$ y $b = 0,09 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$) y realizar variaciones de los parámetros del mismo. Para todos los casos expresar los controladores y la planta en la **forma zpk**.

- 1 – Incluir un compensador proporcional y obtener la **respuesta al escalón, acción de control** y el **diagrama de polos y ceros** variando K_p en 0,2; 0,5; 1; 2,5 y 5.
- 2 – Evaluar la necesidad de incluir una acción integral al sistema de control en LC.
- 3 – Luego, incorporar un controlador del tipo derivativo $G_c(s) = K_p T_d s$ con $K_p = 1$ y evaluar, como en el punto anterior, cómo responde el sistema con T_d igual a 0,5; 1 y 2 s.
- 4 – Finalmente, emplear un controlador PD expresado como $G_c(s) = K_p(1 + T_d s)$. Modificar únicamente T_d a 0,5; 1 y 1,5 con K_p igual a 1. Realizar la misma evaluación como los casos anteriores.

Ejercicio N°2:

Se tiene la dinámica de un motor CC y se lo conecta en lazo cerrado como se muestra en la Figura 1. La función de transferencia del mismo, cuya salida es la velocidad angular y la entrada la tensión de armadura, está dada por la siguiente expresión: $G_p(s) = \frac{750}{(s+4)(s+50)}$. La velocidad nominal del eje del motor es de 250 rad/s.

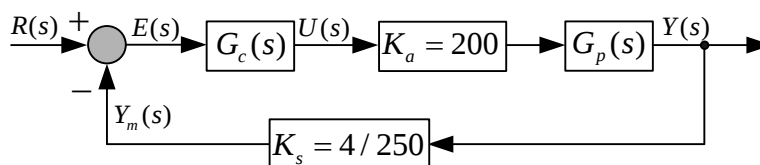


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.

A) Obtener: **1)** la función de transferencia de lazo abierto para diseño del compensador y **2)** la función de transferencia de lazo cerrado. Indicar el valor de referencia $R(s)$, para que la velocidad $Y(s)$ a la salida sea la nominal. Utilizando el valor de referencia obtenido, graficar la respuesta al escalón que muestre la salida del sensor, $Y_m(s)$. Determinar el sobrepaso de la respuesta y el porcentaje de error de posición que posee el sistema de LC.

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

B) Diseñar un controlador PI cuya función de transferencia está dada por $G_c(s) = K_c \frac{(s+a)}{s}$.

Obtener el cero por cancelación polo-cero de tal forma que permita incrementar la estabilidad del sistema en lazo cerrado y no afecte el error de posición. Calcular la ganancia del controlador para que el sobrepaso de la respuesta resulte menor al 1%. Con el controlador diseñado, presentar la respuesta al escalón para el valor de $R(s)$ calculado en el punto A, que muestre la salida $Y(s)$, y obtener el tiempo de asentamiento, el sobrepaso y el error de posición. Presentar las respuestas al escalón de la acción de control y del error.

C) Trazar el mapa de polos y ceros del sistema de LC sin compensar del punto A y del sistema compensado y analice tanto cuantitativamente como cualitativamente ambas constelaciones.

D) Trazar la respuesta en frecuencia que permita analizar los márgenes de estabilidad conseguidos con el compensador PI diseñado. Presentar las conclusiones obtenidas.

Ejercicio N°3:

En la Figura 2 se presenta un Convertidor CC-CC *Buck*, el cual posee una inductancia L como filtro de salida. Se desea controlar la corriente de un LED de potencia de manera que circule en forma constante el valor de 2 A.

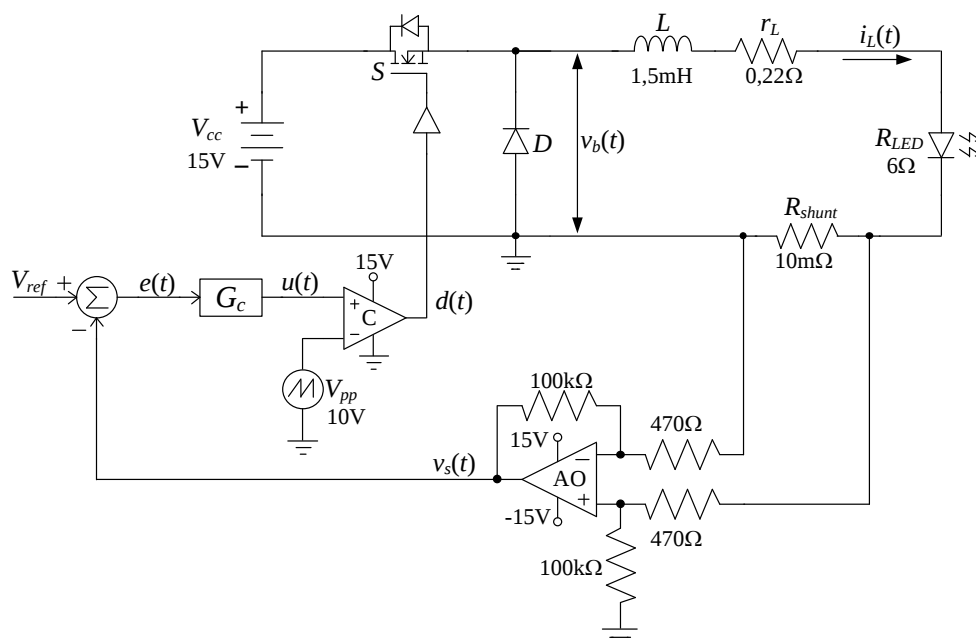


Figura 2. Circuito de control de un Convertidor CC-CC *Buck*.

Considerar que el LED posee una resistencia interna $R_{LED} = 6 \Omega$ y no tiene caída de tensión en conducción, la inductancia L posee un valor de 1,5 mH y la resistencia equivalente serie $r_L = 0,22 \Omega$.

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

La fuente de alimentación se supone ideal y su valor es $V_{cc} = 15$ V. El sensor de corriente utilizado es un *shunt* de $10\text{ m}\Omega$ y la corriente que pasa a través del mismo se acondiciona mediante un amplificador diferencial, cuyos resistores se muestran en el esquema eléctrico. La señal de activación de la llave S proviene de un circuito generador de señal PWM, que utiliza la fuente de tensión diente de sierra de tensión pico a pico $V_{pp} = 10$ V y una frecuencia de 20 kHz.

La función de transferencia de la planta está definida en la siguiente expresión:

$$\frac{I_L(s)}{V_b(s)} = \frac{1}{sL + r_L + R_{LED} + R_{shunt}}$$

Las respectivas ganancias del actuador y del sensor, están dadas por las siguientes relaciones:

$$K_a = \frac{V_{cc}}{V_{pp}}, \quad K_s = \frac{V_s(s)}{I(s)}$$

- A) Realizar un esquema en bloques completo del sistema en lazo cerrado empleando un controlador genérico. Obtener la FT de lazo abierto no compensada $G_{LANC}(s)$ incluyendo las ganancias del actuador y del sensor. Obtener la FT de lazo cerrado no compensada $G_{LCNC}(s)$. A continuación, obtener las siguientes respuestas: **1)** respuesta al escalón de la FT de lazo abierto para el valor de tensión que produce la corriente nominal de 2 A. **2)** respuesta al escalón de la FT de lazo cerrado para la referencia V_{ref} que produzca la corriente indicada.
- B) Se desea controlar la corriente considerando que las especificaciones de la respuesta transitoria al escalón son las siguientes: $e_{ssp} = 0$; $M_p \approx 0$ y $t_s \leq 1,9$ ms. Obtener la FT del controlador $G_c(s)$ necesario para cumplir con la especificación de régimen permanente y la ganancia K_c necesaria para cumplir con el tiempo de asentamiento. Calcular el par de polos dominantes de la FT de LC resultante que determinan la respuesta de la corriente en el LED y cumplen con las especificaciones de desempeño transitorio. Realizar el diseño y la primera comprobación mediante simulación en Matlab para la referencia V_{ref} que produzca la corriente indicada, presentando los siguientes gráficos: **1)** la salida y la referencia; **2)** la acción de control y **3)** el error de control.

Nota: Verificar que la acción de control obtenida no supere la tensión de alimentación del amplificador operacional y tampoco supere el pico de la señal diente de sierra.

- C) Obtener el diagrama de Bode de LA y analizar la estabilidad del sistema compensado. Obtener el diagrama de Bode de LC y analizar el ancho de banda, pico de resonancia y error de régimen permanente.
- D) Verificar la simulación en PSIM utilizando el circuito de la Figura 2, presentando en gráficos

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

diferentes las siguientes variables: la salida y la referencia; la acción de control; el error de control; la corriente en el LED; la señal triangular con la acción de control y la señal PWM aplicada a la planta. Evaluar el desempeño y obtener conclusiones.

Nota: Para el controlador G_c indicado en la Figura 2, utilizar el bloque de FT denominado “*s-domain Transfer Function*”.

- E) Realizar una variación de parámetros para observar cómo afectan los mismos en la respuesta transitoria de la corriente controlada. **1)** variar la resistencia del LED del valor nominal de 6Ω hasta los 9Ω con un incremento de 1Ω y graficar la respuesta de la corriente y de la acción de control. **2)** variar la inductancia desde el valor $0,25 \text{ mH}$ con incrementos de $0,5 \text{ mH}$ hasta el valor de $2,5 \text{ mH}$ y graficar la respuesta de la corriente y de la acción de control. Evaluar el desempeño para ambos casos y presentar conclusiones.

Nota: Para este inciso pueden utilizar el bloque “*Parameter Sweep*” de PSIM.

Ejercicio N°4:

Se posee un proceso definido como $G_p(s) = \frac{1}{(s+2)(s+0,045)}$, al cual se quiere operar en lazo cerrado. El esquema en lazo cerrado se presenta en la Figura 3.

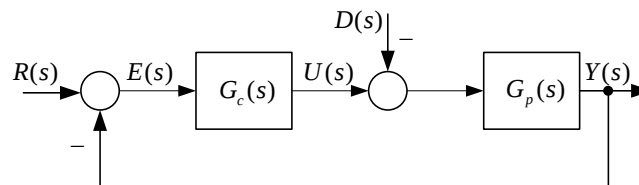


Figura 3. Diagrama de bloques de análisis.

- A)** Determinar la función de transferencia reducida de primer orden que represente con buena aproximación la dinámica de la planta original $G_p(s)$. Trazar en un mismo gráfico, las respuestas al escalón de ambas plantas, identificándolas correctamente.
- B)** Se busca agregar un controlador para **eliminar el error en régimen permanente**, cuando la entrada es un escalón. Analizar si se cumple la especificación de error nulo simplemente con un controlador proporcional o un controlador derivativo.
- C)** Definir el controlador $G_c(s)$ en función de los datos mencionados anteriormente. Mediante PSIM graficar la respuesta al escalón unitario de la salida $Y(s)$ respecto a la entrada $R(s)$. Definir qué tipo de respuesta dinámica posee, detallando las características de la curva (desempeño en régimen transitorio y permanente).

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

- D) Agregar otro parámetro al controlador anterior para obtener un sobrepaso nulo y graficar junto a la curva del punto anterior.
- E) Ahora, ¿qué sucede si se aplica un disturbio $D(s)$? Obtener con PSIM la respuesta al escalón unitario de $Y(s)$ respecto a $R(s)$ y aplicar, cuando el sistema se encuentra en régimen permanente, una perturbación del tipo escalón unitario y evaluar el desempeño transitorio y permanente del sistema en LC (**Considerar el signo ‘-’ de la Figura 3**).
- F) Obtener el diagrama de Bode (**en un mismo gráfico**) en LA sin compensar y compensada, para analizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado.
- G) Obtener el diagrama de Bode (**en un mismo gráfico**) en LC sin compensar y compensada, y analizar las similitudes con la respuesta al escalón y las ecuaciones del sistema en LC (evaluación del desempeño del sistema).