

6.302 Sistemas de retroalimentación

Otoño 2002
Problema de diseño

Fecha de distribución: 25 de noviembre de 2002
Fecha de entrega: jueves, 5 de diciembre de 2002

Introducción

Esta práctica le da la oportunidad de evaluar la dinámica de un sistema de control de temperatura y de diseñar un compensador para dicho sistema. El sistema que va a examinar está modelado sobre uno desarrollado en el Laboratorio Lincoln con el objeto de controlar la temperatura de un diodo láser que forma parte de un experimento de comunicación óptica basado en el espacio.

El sistema del Laboratorio Lincoln ha demostrado una estabilidad de temperatura a largo plazo dentro de $100\mu\text{C}$. El sistema que usted utiliza tiene un piso de ruido superior, principalmente debido a que el sistema de circuitos de control es más simplificado, si lo comparamos con el sistema original.

Se puede utilizar este tipo de sistema para cualquier aplicación que precise de un control de temperatura exacto. Una posibilidad implicaría estabilizar la temperatura de funcionamiento de los componentes de la medida de inercia, como por ejemplo los giroscopios.

Para esta práctica, necesitará comprobar un protoboard, o plaqueta experimental, del mostrador de herramientas del 5º piso (38-501), así como la caja de piezas correspondiente al curso 6.002. Si ha perdido su caja de piezas (o nunca tuvo una), confeccione una lista de las piezas que necesita una vez diseñado el compensador y solicítelas en el mostrador de herramientas.

En esta práctica hay que realizar una cantidad de trabajo significativa, por lo que le pedimos que comience lo antes posible.

Configuración experimental

En la Figura 1 se muestran las características estructurales fundamentales del sistema térmico. A su vez, en la Figura 2, se muestra un diagrama de bloques del sistema de control de temperatura.

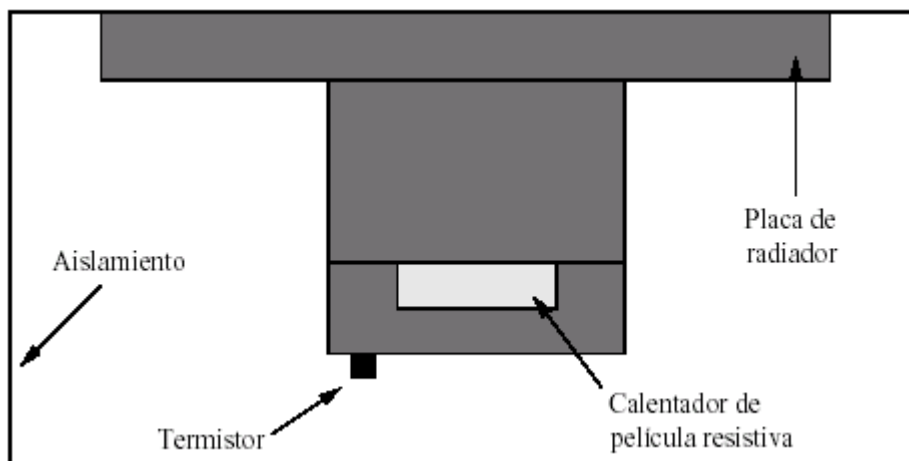


Figura 1: estructura térmica.

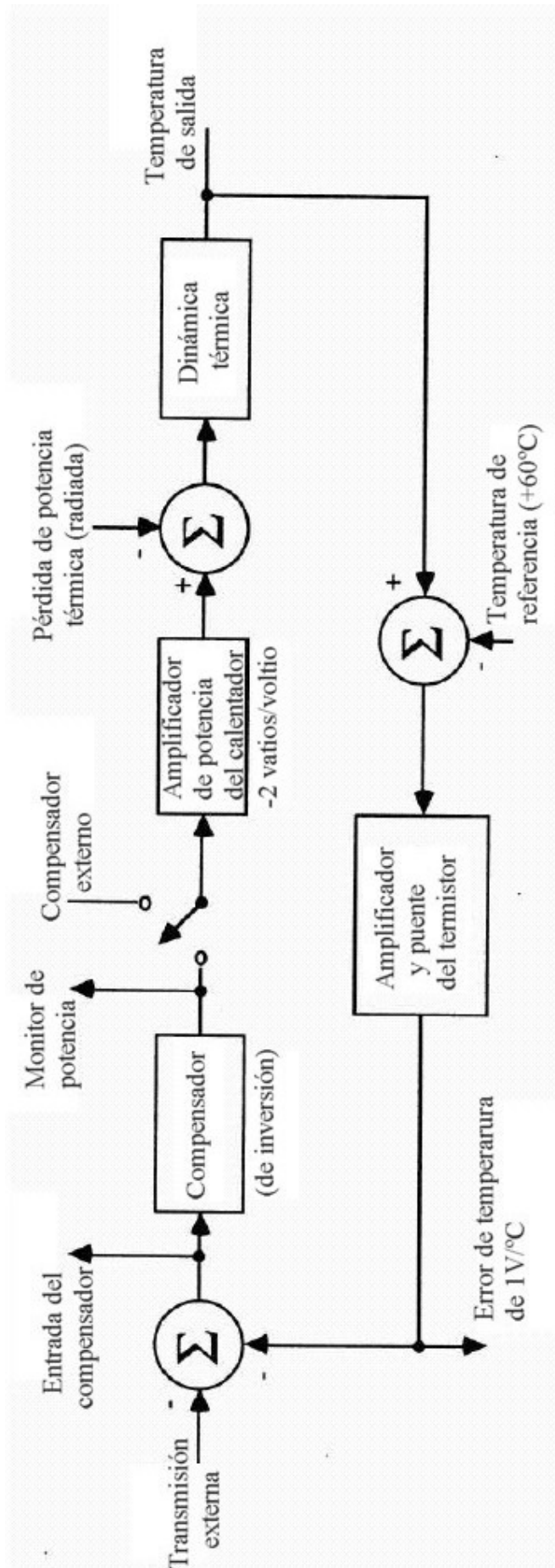


Figura 2: diagrama funcional de bloques.

La temperatura de la superficie controlada perteneciente a la estructura térmica se percibe con un dispositivo cuya resistencia es una función de la temperatura. Dicho dispositivo se denomina termistor y forma un tramo de un puente compuesto por 4 elementos. La temperatura nula del puente se fija en unos 60°C , valor referente de la temperatura del sistema. Un amplificador diferencial conectado al puente proporciona una salida linealizada de $1\text{V}/^{\circ}\text{C}$ de error de temperatura. Esta señal está disponible de forma externa a fin de permitirle que mida la dinámica del sistema térmico. También cabe la posibilidad de añadir una entrada a la señal de error. Esta entrada de prueba se utiliza, además, para evaluar la dinámica térmica.

La suma de las señales de error y de prueba proporcionan la entrada al amplificador de compensación del sistema. Los puntos de entrada y de salida del compensador están disponibles junto con un interruptor que desconecta el amplificador de compensación interno. Esta combinación le permite utilizar el compensador que ha diseñado para cerrar el bucle.

La salida del compensador se aplica a un amplificador de potencia que acciona un calentador que se encuentra ubicado en la superficie opuesta de la placa sobre la que está montado el termistor. El amplificador de potencia está diseñado de tal forma que la potencia del calentador sea linealmente proporcional a la tensión aplicada a su salida. Este tipo de amplificador es necesario, ya que la temperatura y la potencia están relacionadas linealmente en los sistemas térmicos.

La tensión en la entrada del amplificador de potencia está también disponible para ser utilizada en el proceso de evaluación de la dinámica del bucle. El factor de escala que relaciona la tensión monitorizada con la potencia del calentador es de -2 vatios/voltio. Observe que esta tensión de control es únicamente válida cuando se está utilizando la compensación interna. Sin embargo, el factor de escala de -2 vatios/voltio sigue siendo válido cuando se utiliza la compensación externa.

El sistema térmico pierde potencia constantemente a través de la placa del radiador que no está aislada. Dado que, tanto la temperatura ambiente como la temperatura de la estructura térmica permanecen básicamente constantes, la pérdida de calor es también constante. La potencia neta aplicada a la estructura térmica es la diferencia entre la potencia que reparte el calentador y la potencia que se pierde a través del radiador. Esta última permite, bien que el sistema aumente o que disminuya la temperatura utilizando únicamente un calentador controlado.

Pre-práctica

1. Explique por qué el compensador del diagrama de bloques de la siguiente página tiene que ser de inversión.
2. La respuesta en frecuencia medida correspondiente a un sistema distribuido de forma hipotética muestra el comportamiento de la función de transferencia siguiente:

$$G(j\omega) = (1 - j) \frac{e^{-0,001j\omega}}{\omega^{1,5}} \quad (5)$$

Compense este sistema con una ganancia y una red de adelanto, con un valor de α no superior a 10, de tal forma que consiga la máxima frecuencia de cruce posible, a condición de que el margen de fase sea 45° . Se recomienda utilizar MATLAB para completar esta sección.

3. Considere el circuito de la Figura 3.

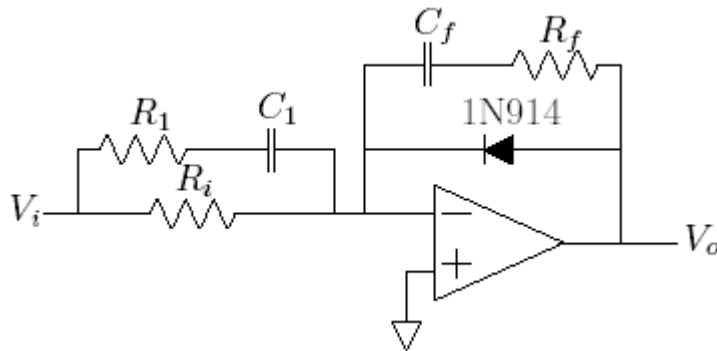


Figura 3: una posible topología para el compensador.

Ignore el diodo y determine la función de transferencia $\frac{V_o(s)}{V_i(s)}$. Utilice la forma $(\tau s + 1)$ para los polos y los ceros.
¿Cuál es el propósito del diodo?

4. Vaya al laboratorio y realice la sección “mediciones iniciales”, midiendo el comportamiento del bucle abierto del sistema térmico. Presente un diagrama de Bode en MATLAB con los datos recogidos.
5. (Opcional) Explique cómo diseñar un amplificador de potencia de un calentador, tal que la potencia de salida esté relacionada linealmente con la tensión de entrada. Si ha realizado el curso 6.301, dibuje el esquema del circuito.

Montaje de laboratorio

Nuestro objetivo será tratar de realizar al menos tres (3) sistemas térmicos idénticos completos que estén disponibles en el laboratorio en todo momento. Al menos dos de estos sistemas estarán conectados a un generador de señales y a un osciloscopio de almacenamiento, de tal forma que usted pueda medir la respuesta relativamente lenta de transiente del sistema. Un sistema aparte estará conectado de forma permanente a un analizador dinámico que le permitirá medir la función de transferencia del sistema térmico.

NOTA: no es recomendable que cambie ninguna de las conexiones de la configuración del analizador dinámico, así como las del montaje de la respuesta a escalón, hasta que esté preparado para probar su compensador.

El sistema térmico, una vez encendido, tarda unos 30 minutos en estabilizarse, por lo tanto, se dejará en funcionamiento durante las horas de prácticas. *¡No apague el sistema!* Si le preocupa que un sistema no esté estabilizado o no funcione adecuadamente, compruebe la tensión en el conector BCN del controlador de potencia. Si los valores de la tensión no están entre $-0,5$ y $5V$, quiere decir que algo no va bien.

Precauciones

La placa del radiador debe mirar hacia arriba durante el funcionamiento, y generalmente se encuentra a una temperatura de unos $+60^\circ$. A pesar de que esta temperatura no es tan elevada como para ser peligrosa cuando se da en pequeñas dosis, le recomendamos que no toque la placa por tiempo prolongado. Un funcionamiento anormal (como por ejemplo, colocar una tensión negativa de más de unos pocos voltios en un conector de compensación externo, o un fallo del circuito) puede resultar en un elevado y peligroso calentamiento de la placa. La placa estará ubicada hacia la parte posterior del banco del laboratorio y no existe ninguna razón por la que deba tocarse. *¡No coloque nada encima de la placa!*

Mediciones iniciales

Resulta difícil evaluar de forma experimental el funcionamiento del bucle abierto de este sistema. Esta es una complicación compartida por muchos sistemas de retroalimentación, ya que, por lo general, es difícil mantenerlos en la región lineal sin una retroalimentación. Hemos incluido la compensación en nuestra electrónica para que usted pueda realizar sus mediciones con el bucle cerrado. Mientras que la compensación estabiliza el sistema, el funcionamiento que consigue es extremadamente lento si se compara con la capacidad máxima del sistema.

En primer lugar, mida la respuesta a escalón del bucle cerrado entre la transmisión externa y los puntos de error de temperatura. Observe en el diagrama de bloques (Figura 2) que el bucle de retroalimentación correspondiente a esta medición tiene una ganancia unitaria en la cadena de retroalimentación. Sería conveniente que ajustase la amplitud de la onda cuadrada de baja frecuencia que proporciona los escalones, de tal forma que el sistema permanezca en la región lineal. Puede comprobar el funcionamiento del sistema observando el punto del control de potencia. Bajo condiciones normales, la tensión en estos puntos será de $-1,5$ a $-3V$, correspondiente a un valor de 3 a 6 vatios de potencia de calentador. Ajuste la amplitud de la onda cuadrada a fin de producir desviaciones de pico a partir de este punto de funcionamiento de unos $\pm 1V$ ($\pm 2W$). La tensión del control de potencia debe mantener un valor negativo en todo momento para asegurar un funcionamiento lineal. Su objetivo es obtener una señal lo suficientemente amplia como para permitirle realizar mediciones precisas, manteniendo la linealidad.

Suponga que la respuesta del sistema se puede representar con exactitud al igual que la de un par de polos complejo. Calcule los parámetros ω_n y ζ para el par de polos de aproximación.

Además, calcule el ancho de banda del bucle cerrado (ω_h) para esta configuración a partir de la medición de la respuesta a escalón.

A continuación, utilice al analizador dinámico HP 3562A para medir la función de transferencia desde la potencia del calentador al error de temperatura. Observe que esta función de transferencia incluye todos los elementos del bucle menos el compensador, por lo que contiene toda la información que necesita para diseñar con éxito el compensador.

Como ya mencionamos anteriormente, las conexiones entre el sistema térmico y el analizador dinámico están en el sitio que les corresponde y, por lo tanto, no deben modificarse. El canal 1 del analizador está conectado a la entrada del amplificador de potencia $P(t)$ y el canal 2 a la salida de error de temperatura $T(t)$. El analizador acciona el sistema desde la fuente interna y caracteriza a la función de transferencia entre los dos canales, considerando al canal 1 como entrada del sistema que se está analizando.

El analizador es un instrumento capaz y por consecuencia complejo. Para poder simplificar su uso en el laboratorio, hemos preprogramado los pasos de prueba necesarios. Existen dos opciones a la hora de probar la función de transferencia térmica: una utiliza ruido aleatorio para la señal de transmisión y la otra una onda sinusoidal barrida.

A estos dos programas se accede pulsando la tecla AUTO SEQ que se encuentra ubicada en la parte superior derecha del panel frontal. Una vez pulsada la tecla, aparecerán unas etiquetas junto a la fila de teclas programables a lo largo del borde derecho del analizador de tubo de rayos catódicos (CRT). Las dos teclas superiores están etiquetadas “6.302 RANDOM” (6.302 *aleatorio*) y “6.302 SWEEP” (6.302 *barrido*) y corresponden a la prueba de ruido aleatorio y a la de seno de barrido, respectivamente. Puede medir la función de transferencia utilizando una o las dos pruebas. La prueba comienza pulsando la tecla programable adecuada y cada una tarda aproximadamente dos minutos en completarse.

En el modelo aleatorio, se halla la media de dos muestras de funciones de transferencia para así reducir los efectos de ruido. No aparece ningún dato hasta que se completa la primera medición, en cuyo punto aparecerá un campo en la parte superior del CRT indicando 1 AVG (1 *media*). Una vez completada la segunda medición, el campo indicará 2 AVG (2 *medias*). En el modo de seno de barrido, el barrido comienza a frecuencias bajas y los puntos de datos se visualizan según se van midiendo. En ambos modos, se pueden observar las señales de prueba en los canales 1 y 2 del osciloscopio.

Las medidas cubren el margen de frecuencia de 0,1 Hz a 10 Hz, ya que ésta es la región que interesa. Dado que estamos midiendo el comportamiento de la frecuencia baja, es necesario emplear un mayor tiempo en las mediciones. En otras palabras, los varios minutos que se emplean no son debidos al tiempo de procesamiento en el analizador, si no a las constantes de tiempo prolongadas del sistema térmico. Para su interés, hemos incluido un diagrama en la Figura 4 que muestra la función de transferencia medida desde 0,01 Hz a 0,1 Hz. Son necesarias varias horas para completar esta prueba.

Una vez completada la medición de la función de transferencia, puede utilizar el cursor para tomar datos sobre la magnitud y la fase como función de la frecuencia. El cursor es el pequeño círculo que aparece en los dos diagramas y su posición se controla con el botón grande de la derecha del CRT. La frecuencia, la magnitud y la fase aparecen en campos en el CRT. En esta pantalla, la magnitud viene indicada en dB (definida como $20 \log_{10} \left| \frac{T(s)}{P(s)} \right|$). La fase se indica en grados. Observe que un valor de cero grados de desviación de fase adicional corresponde a $+180^\circ$ en los diagramas del analizador, debido a la inversión desde la entrada del amplificador de potencia al error de temperatura.

En ocasiones, el analizador entra en un ciclo de auto calibración que tarda aproximadamente un minuto en completarse. Durante este tiempo, la entrada del teclado queda invalidada y se indica el estado de auto calibración en el CRT.

Si está interesado en conocer más acerca del analizador, puede consultar la copia del manual introductorio del usuario que está disponible en el laboratorio. El manual detallado de funcionamiento está en la oficina del profesor y se puede consultar, pero no llevar.

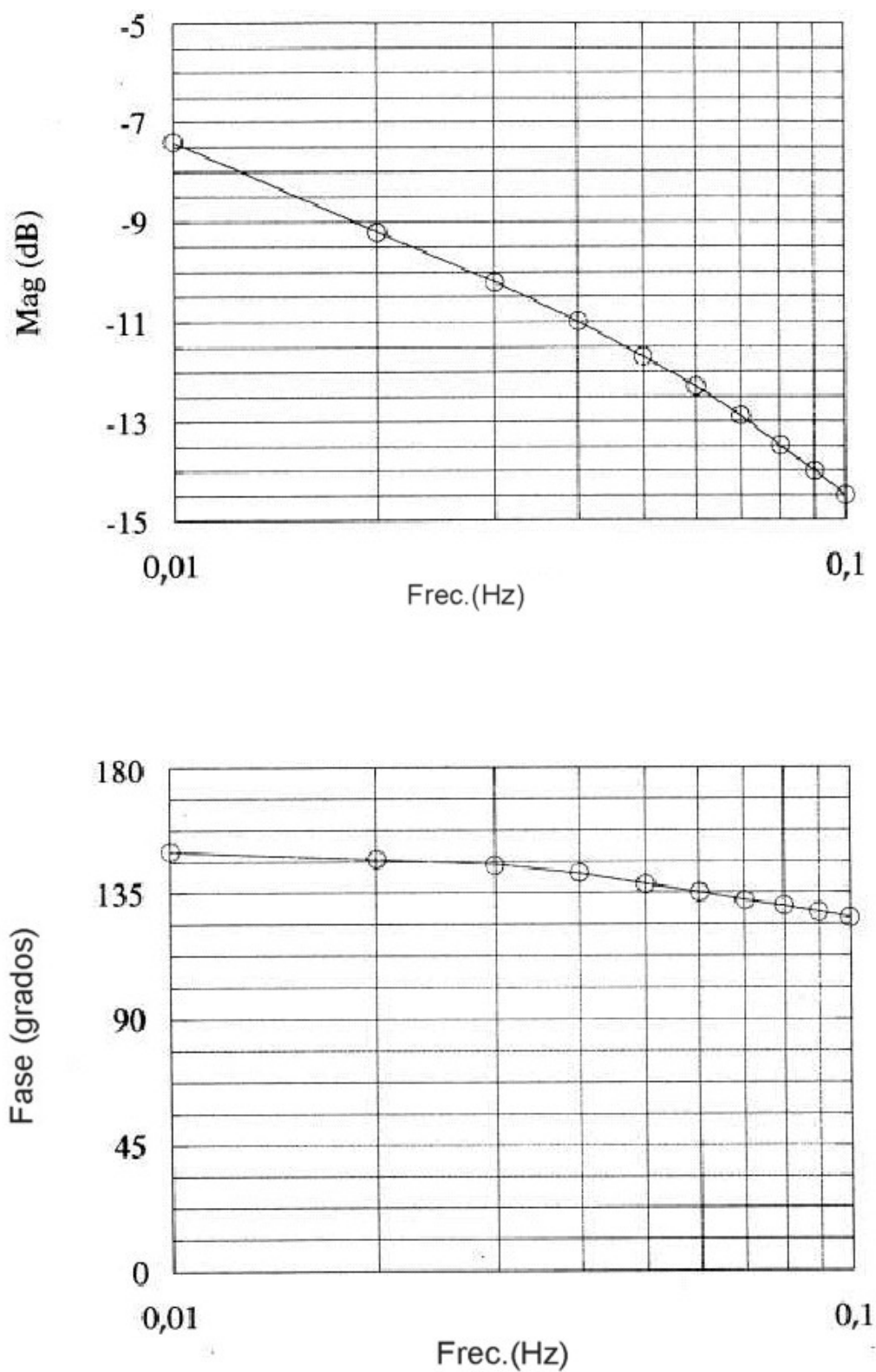


Figura 4: datos de la función de transferencia de frecuencia baja.

Discusión sobre la respuesta en frecuencia medida

Ciertos aspectos de esta función de transferencia se pueden calcular a partir de las propiedades de las estructuras térmicas. Considere una barra de sección cruzada constante semi infinita de un material termoconductor que está completamente aislado térmicamente, a excepción de un extremo. Se puede mostrar que la impedancia térmica o el ratio $\frac{T(s)}{P(s)}$ para las variables térmicas en el extremo de la barra son proporcionales a $\frac{1}{\sqrt{s}}$. A pesar de que existen diferencias muy significativas entre este modelo idealizado y nuestro sistema térmico, la función de transferencia muestra un margen bastante amplio en el que el ángulo se acerca a los -45° y en el que la magnitud es proporcional a $\frac{1}{\omega}$.

A frecuencias superiores, la función de transferencia presenta características de paso bajo de fase no mínima. Fase no mínima quiere decir que existen otras funciones de transferencia con idénticas características de magnitud que presentan una desviación de fase menos negativa. Un simple retardo de tiempo (e^{-sT}) es un ejemplo de un sistema de fase no mínima. Se pueden mostrar dichas características para ubicar los límites importantes en el funcionamiento final del sistema que se puede obtener. Esta parte de la función de transferencia refleja la difusión térmica del calentador al termistor y a través del propio termistor.

Diseño del compensador y evaluación

Dado que se pierde potencia continuamente a través de la placa del radiador, es necesario aplicar sucesivamente potencia de calefacción para compensar la pérdida. Con el objeto de suministrar la potencia necesaria con un error de temperatura nominalmente cero, su diseño del compensador debería incluir un polo en el origen. En la pre-práctica se analizó una sugerencia de topología para el compensador.

Diseñe un compensador que alcance un margen de fase del sistema de 50° y trate de maximizar la frecuencia de cruce para que sea consistente con el margen de fase. Es posible que su compensador utilice, o no utilice, todos los componentes que se mostraron en la pre-práctica. Use, si así lo desea, una topología de compensador diferente, pero procure que no sea más complicada que la actual. Si utiliza R_1 y C_1 , haga que $R_1 > \frac{R_i}{10}$. Encontrará que el comenzar con $C_F = 0,1\mu\text{F}$ tendrá como resultado unos valores de componente más razonables.

Construya el compensador en el protoboard y conéctelo a uno de los sistemas térmicos por medio de cables BNC. La entrada al compensador procede del cable BNC etiquetado como "Compensation In" (entrada de compensación) y la salida va dirigida a "External Compensation" (compensación externa). Para medir la respuesta a escalón del sistema final de bucle cerrado, puede que le resulte útil tomar prestados dos "cables BNC EZ-hook" del mostrador de componentes, con el objeto de conectar su circuito al sistema térmico en el laboratorio.

Observe que al contar su compensador con un polo en el origen, no se puede comprobar el funcionamiento en base a un bucle abierto.

Controle la tensión de salida del compensador y cambie el sistema de compensación interna a externa. Si la salida de tensión del compensador no se estabiliza en un margen de $-0,5$ a -5 voltios en unos segundos, vuelva a cambiar la posición a compensación interna y trate de averiguar qué es lo que hizo mal. (Periodos prolongados de tensiones negativas provocan que la placa del radiador se sobrecaliente). Una vez que el sistema funcione adecuadamente con la compensación que ha establecido, mida la respuesta a escalón de la región lineal. Compare el funcionamiento con el del sistema original para así mostrar la mejora del compensador.

A la hora de desconectar el compensador del sistema, vuelva a colocarlo, en primer lugar, en la posición de compensación interna. Si retira o desconecta el compensador cuando el sistema está aún funcionando en el modo de compensación externa, la temperatura del sistema se desestabilizará (algo que no le hará mucha gracia a la siguiente persona que vaya a utilizarlo).

Informe escrito

En el informe escrito de prácticas debe incluir la información que se detalla a continuación:

1. La respuesta a escalón del sistema con nuestra compensación, así como un cálculo aproximado de ω_n , ζ y ω_h basado en la aproximación de par dominante.
2. La función de transferencia que seleccionó de su compensador. Respalde su elección con el análisis y los diagramas de Bode para demostrar que obtuvo 50° de margen de fase.
3. El circuito que utilizó para implementar su compensador.
4. La respuesta a escalón y las cantidades calculadas que se pidieron para el sistema en la parte 1, así como la comparación que haya realizado.
5. Una comparación entre el funcionamiento real y el que se predijo.

A pesar de que no le pedimos que entregue un manuscrito a máquina, esperamos que éste sea neto. Tabule los datos en las tablas. A la hora de presentar los datos experimentales, deberá explicar claramente qué experimento está realizando exactamente, incluyendo un esquema claro de la entrada y de la salida del sistema (con etiquetas precisas) y de las cantidades medidas.

Comprobación

Asegúrese de no desarmar su compensador antes de la clase de comprobación, ya que los ayudantes técnicos querrán ver el circuito que ha construido.