

Construcción de un Circuito Controlador de Movimiento del Motor de un Transductor Sectorial Mecánico Utilizado en Ecografía, mediante Control PID

Manuel Baquerizo A.⁽¹⁾, Miguel Yapur A.⁽²⁾
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación⁽¹⁾
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
abaqueri@fiec.espol.edu.ec⁽¹⁾
Profesor FIEC-ESPOL, myapur@fiec.espol.edu.ec⁽²⁾

Resumen

El proyecto busca controlar la posición del cristal piezoeléctrico de un transductor sectorial mecánico. Se propone un lazo de control con retroalimentación negativa mediante un controlador PID. Se utiliza como señal de referencia para la posición del cristal una onda triangular que indica el tipo de movimiento a realizar. Se elabora un modelo matemático para el motor del transductor y los parámetros del modelo son calculados a partir de su respuesta a una onda cuadrada. A continuación se determina una función de transferencia para el controlador PID apropiada al modelo matemático desarrollado usando la herramienta SISOTOOL de MATLAB. Mediante la ubicación de ceros en el plano S se minimiza el sobrenivel porcentual y tiempo de asentamiento de la respuesta del sistema a la señal escalón. Luego se implementa el circuito controlador con OPAMPS, calculando los valores para resistores y capacitores usados en los distintos bloques del controlador PID con MATLAB.

Palabras Claves: *Electrónica, Modelamiento Matemático, Control PID, SISOTOOL, MATLAB.*

Abstract

The project aims to control the position of the piezoelectric crystal of a mechanical sector transducer. A control loop with negative feedback is proposed by means of a PID controller. As a reference signal for the crystal's position a triangular wave is used indicating the type of movement to be performed. A mathematical model for the transducer's motor is developed and the model's parameters are calculated from its response to a square wave. Then a transfer function for the PID controller that is appropriate for the mathematical model developed is determined using SISOTOOL from MATLAB. By placing zeros in the S -plane the percentage overshoot and settling time of the system's response to the step signal is minimized. Afterwards the controller circuit is implemented using OPAMPS, calculating the values for resistors and capacitors used in the various blocks of the PID controller with MATLAB.

Keywords: *Electronics, Mathematical Modeling, PID Control, SISOTOOL, MATLAB.*

1. Introducción

En general los fabricantes de equipos de ecografía y de la industria médica son celosos de sus diseños. Los manuales de mantenimiento con información técnica del funcionamiento de los equipos son escasos y en nuestro medio existen muchos equipos de ecografía que son considerados antiguos, con más de 20 años de uso. En particular se considera complicado encontrar reemplazos de los transductores de estos equipos. Por lo tanto, es conveniente considerar la posibilidad de adaptar transductores de un equipo a otro.

En un transductor sectorial mecánico como los de los equipos usados en ecografía, la posición del cristal piezoeléctrico es de suma importancia, pues ellos emiten la señal ultrasónica y detectan el eco producto de ésta. Por ello es necesario tener un control de la posición del cristal, que se encuentra acoplado mecánicamente a un motor que permita minimizar el

error en estado estable, y así minimizar el tiempo de asentamiento del sistema. Con este proyecto se busca conseguir el control de posición del transductor sectorial mecánico de un equipo en particular: el ecógrafo KONTRON SIGMA1.

2. Descripción del transductor sectorial mecánico

El transductor sectorial mecánico utilizado pertenece al equipo de ecografía KONTRON, Modelo SIGMA1. Este transductor tiene un cristal piezoeléctrico que se encuentra acoplado mecánicamente a un pequeño motor DC y utiliza un sensor de efecto de Hall para determinar la posición del cristal. Este cristal piezoeléctrico tiene un doble propósito, pues se usa para enviar una señal ultrasónica y luego capturar el eco de ésta. Por lo

tanto, es necesario poder controlar de manera precisa la posición del cristal en todo momento.

Además, el movimiento de este cristal está restringido y solo puede moverse en un arco de 120° , en un barrido repetitivo, recorriendo en un sentido y luego en el otro.

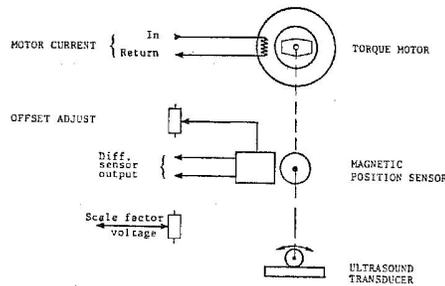


Figura 1. Diagrama Esquemático del Transductor

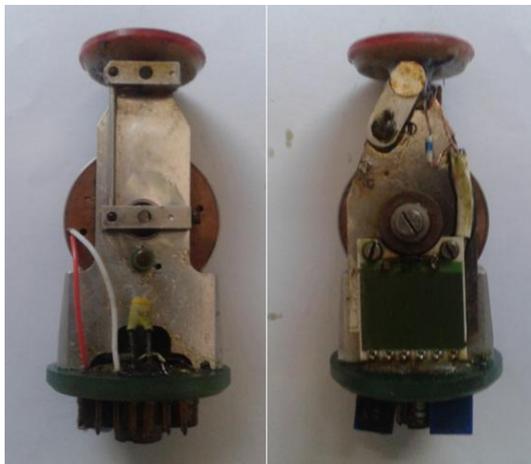


Figura 2. Vista Anterior y Posterior del Transductor

3. Cálculo de la constante de posición angular del sensor de efecto hall

Para que pueda funcionar el sensor de efecto Hall, es necesario energizarlo. Este se energiza con una fuente de $+12\text{ V}$ para poder medir una diferencia de voltaje entre los terminales del sensor. La Tabla 1 indica valores medidos, de diferencias de voltaje en el sensor para distintas posiciones del cristal. Se considera 0° cuando el cristal se encuentra en el centro; -60° cuando el cristal se encuentra en un extremo del arco; y 60° cuando el cristal se encuentra en el otro extremo del arco.

Se usa un script de Matlab con comandos que permiten generar una función lineal con los siguientes datos, para determinar la constante del sensor, tanto para grados como para radianes.

Tabla 1 Voltajes Vs. Grados y Radianes

Voltaje	Grados	Radianes
-2.13	-60	-1.0472
-0.964	-30	-0.5236
-0.237	0	0
1.344	30	0.5236
2.11	60	1.0472

Las constantes del sensor de posición son: $H_1=27.48^\circ/V$ y $H_2=0.489\text{rad}/V$, con estos resultados se obtienen estos gráficos

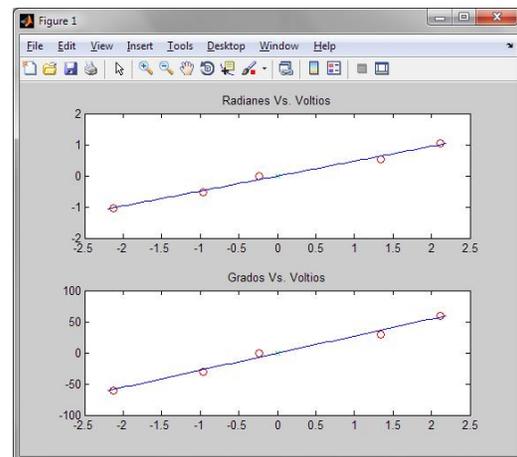


Figura 3 Curvas de Posición del Sensor de Efecto Hall

4. Modelo matemático del motor dc, de excitación separada, controlado por voltaje

El motor del transductor es un motor DC de excitación separada controlado por voltaje. El modelo matemático de este motor, para la posición del rotor en función del voltaje se encuentra en cualquier texto de teoría de Control Automático como el texto "Sistema de Control Moderno" de Dorf y Bishop, y está dado por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{s(Js + b)(L_f s + R_f)} \quad (1)$$

donde K_m es la constante de flujo magnético, J es la inercia rotacional del rotor, b es el coeficiente de amortiguamiento del rotor, L_f es la Inductancia del circuito del rotor y R_f es la Resistencia del circuito del rotor.

5. Modelado matemático del transductor sectorial mecánico

En el caso del transductor se procede a despreciar el valor de la inductancia L_f y la función de transferencia se reduce a

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{Km}{s(Js + b)Rf} \quad (2)$$

que es posible reescribirla como

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (3)$$

Para determinar el modelo matemático es necesario encontrar el valor de K y T . Es posible encontrar estos valores usando una entrada escalón. Si se despeja $\theta(s)$ y se utiliza como señal de entrada una señal escalón se tiene

$$\theta(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} \cdot \frac{1}{s} \quad (4)$$

al derivar $\theta(s)$ se obtiene

$$s\theta(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (5)$$

la respuesta en el dominio del tiempo de esta dada por

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = K \cdot (1 - e^{-t/T}) \quad (6)$$

Por lo tanto, para determinar K y T se necesita medir la amplitud de la respuesta al escalón y la constante de tiempo T de la función exponencial de respuesta.

Tabla 2 Valores para calcular K

Prueba	Amplitud (V)	
	Onda Cuadrada	Respuesta
1	6.56	23.2
2	6.56	25.6
3	8.72	24.4
4	8.4	23
5	8.5	25

Tabla 3 Valores para calcular T

Prueba	Tiempo(ms)	
	T	2T
1	40	72
2	40	76
3	40	72
4	48	86
5	40	72

Se realizan 5 mediciones distintas, para luego calcular valores promedios y usar estos en el modelo matemático. La respuesta pasa por un bloque de ganancia de 48.46. El valor promedio de K es 0.06568 y el valor promedio de T es 0.03955. Por lo tanto el modelo matemático del sistema es

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.06568}{s(0.03955s + 1)} \quad (7)$$

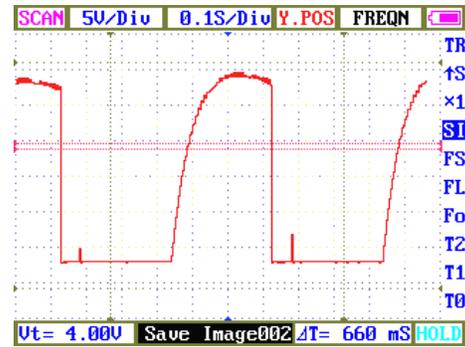


Figura 4 Respuesta a Onda Cuadrada del Circuito de Prueba

5. Uso de SISOTOOL de MATLAB para diseñar el controlador PID

La herramienta gráfica SISOTOOL, de MATLAB tiene la capacidad de mostrar el lugar geométrico de las raíces y, como al modificar la ganancia del controlador, varía la respuesta al escalón.

El controlador diseñado usando genera una función de transferencia expresada en función de ceros, polos y la ganancia. La función de transferencia del controlador PID

$$C(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (8)$$

puede ser reescrita como

$$C(s) = \frac{(K_i + sK_p + K_d s^2)}{s} \quad (9)$$

y también como

$$C(s) = K \cdot \frac{(s + z_1) \cdot (s + z_2)}{s} \quad (10)$$

Por lo tanto, para diseñar del controlador PID se necesita ubicar los ceros de la función de tal forma que se cumplan los siguientes 2 criterios de la respuesta del sistema al escalón: el Sobrenivel Porcentual menor al 5% y el Tiempo de Asentamiento de 5ms, que es 5% del valor del periodo de la señal que será usada para como referencia para el sistema.

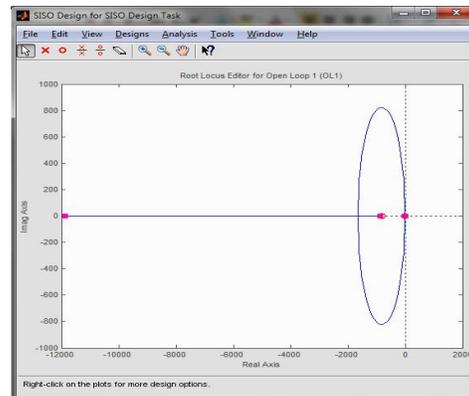


Figura 5 Lugar Geométrico de la Raíz del Sistema y Controlador

Ajustando los ceros se obtiene la siguiente función de transferencia para el controlador PID:

$$C(s) = 7674.9 \cdot \frac{(s + 824) \cdot (s + 25.3)}{s} \quad (11)$$

$$C(s) = \left(6.52 \times 10^6 + \frac{1.6 \times 10^8}{s} + 7576s \right) \quad (12)$$

Con este controlador se tiene un Sobrenivel Porcentual de 4.91% y se tiene un tiempo de asentamiento de 1.58 ms

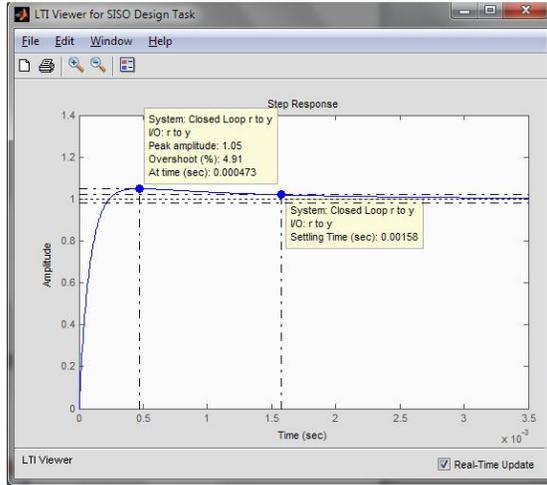


Figura 6 Respuesta al Escalón del Sistema y Controlador

6. Implementación del Circuito de Control

Para implementar el circuito de control se necesita asignar valores a los resistores y capacitores de todas las distintas etapas del sistema de control. El circuito controlador contiene todas las etapas que aparecen en el análisis del lazo de control. Estas etapas son:

- Generador de Onda Triangular (Señal de Referencia)
- Amplificador Diferencial (Señal del Sensor)
- Amplificador Sumador Inversor (Señal de Error)
- Controlador PID

6.1 Implementación del Controlador PID

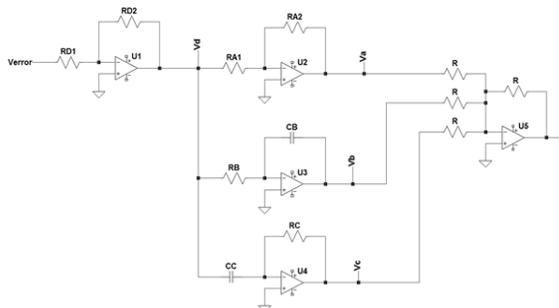


Figura 7 Diagrama Esquemático de Controlador PID

Donde los valores de resistores y capacitores están dados en la siguiente tabla:

Tabla 4.4 Valores de R y C para Controlador PID

Cálculo R y C para Controlador				
Asignados		Calculados		Real
Cc	1μF	R2a, Rc	4.1MΩ	4.2MΩ
Cb	10nF	R1a, Rb	1.18kΩ	1.2kΩ
R1d	1kΩ	R2d	1.88MΩ	2MΩ

11. Resultados

La señal de referencia, ésta tiene un Vpp de 3.04 V y un periodo de 123 ms o una frecuencia de 8.1 Hz. Mientras que la señal del sensor tiene un Vpp de 3.10 V y tiene un periodo de 123 ms o una frecuencia de 8.1 Hz.

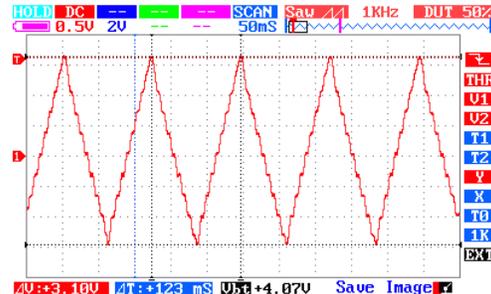


Figura 8 Señal del Sensor

Finalmente, la señal de error tiene un pico de negativo 204 mV y un pico de positivo de 180 mV. Utilizando la constante H1 del sensor de efecto Hall calculada, se puede conocer el error en grados. El pico máximo de error en grados representa 5.5°.

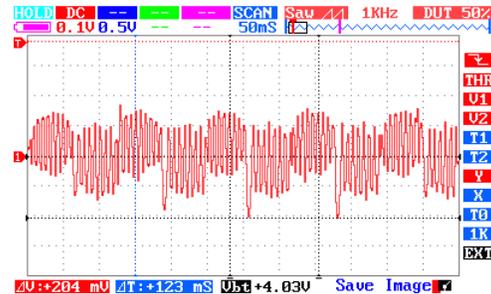


Figura 9 Señal de Error

Durante la prueba se intentó el uso de la compensación de adelanto como filtro de la señal de alta frecuencia, más el error no desapareció. También se intentó cambiar la constante del término derivativo, tanto incrementándola como disminuyéndola. Pero el error siempre se mantuvo en ese rango o incluso se incrementó. Este fue el error mínimo en esta configuración.

12. Conclusiones

1. El circuito de control diseñado permite el control de la posición del cristal del transductor con un error máximo de 204 mV y no pudo ser minimizado variando los parámetros del controlador PID. Se considera que este error se debe tanto a la vibración del transductor, que no se consideró durante el desarrollo del modelo matemático del sistema, como al uso de un modelo matemático aproximado.

2. La herramienta SISOTOOL facilitó el diseño del controlador al mostrar en tiempo real la respuesta del sistema al controlador y la facilidad de alterar tanto los ceros como los polos en el plano s.

3. El software MATLAB permitió el agilizar el cálculo de los distintos valores de resistores y capacitores para las etapas que forman parte del controlador PID, pues a la hora del diseño se tenían varios grados de libertad.

14. Referencias

- Dorf, R. y Bishop, R., *Sistemas de Control Moderno*, Pearson Prentice Hall 10ª Ed, 2005
- Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderna*, Pearson 3ª Ed, 1998
- Kuo, B., *Sistemas de Control Automático*, Prentice Hall 7ª Ed, 1996
- Coughlin, R. y Driscoll, F., *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*, Prentice Hall 4ª Ed, 1993
- Ramsden, E., *Hall-Effect Sensors Theory and Applications*, Newnes 2nd Ed, 2006