

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 708 994**

51 Int. Cl.:

G05B 6/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.05.2012 PCT/PL2012/000036**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.12.2012 WO12165980**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.05.2012 E 12755927 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.11.2018 EP 2715458**

54 Título: **Método de ajuste de parámetros de controladores PI y PID**

30 Prioridad:

27.05.2011 PL 39503311

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

12.04.2019

73 Titular/es:

**POLITECHNIKA SWIETOKRZYSKA (100.0%)
Al. Tysiaclecia Panstwa Polskiego 7
25-314 Kielce, PL**

72 Inventor/es:

**WCISLIK, MIROSLAW y
LASKAWSKI, MICHAL**

74 Agente/Representante:

CONTRERAS PÉREZ, Yahel

ES 2 708 994 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de ajuste de parámetros de controladores PI y PID

5 El objeto de la invención es el método de ajuste de parámetros de controladores PI y PID.

Existen muchos métodos de ajuste conocidos de los parámetros de controladores PI y PID recopilados en el libro de O'Dwyer: *Handbook of PI and PID Controller the Engine tuning Rules*, Imperial College Press, 2006. La metodología de ajuste de PI y PID se basa en procedimientos que han sido elaborados por Ziegler y Nichols (Ziegler J.G., Nichols N.B.: *The optimum Setting the odds Automatic Controllers*, ASME, Rochester, N. Y., 1942). Existen dos procedimientos: el primero se denomina método de respuesta en frecuencia y el segundo método de respuesta a escalón.

15 El método de frecuencia se basa en el análisis de propiedades del sistema de control de bucle cerrado (sistema de control accionado por error) que se encuentra en el límite de estabilidad. El controlador proporcional P se utiliza en la primera etapa de este procedimiento de ajuste. Su ganancia aumenta hasta lograr oscilaciones sostenidas de la señal controlada. Después se evalúa la ganancia del controlador proporcional y el período de oscilación del sistema de bucle cerrado. Estos valores se utilizan para determinar la configuración del controlador PI y PID.

20 El método de respuesta a escalón se basa en una estimación aproximada de los parámetros modelo del sistema controlado. El filtro de primer orden con tiempo muerto es el modelo de estimación. Los ajustes de los controladores PI o PID que funcionan en el sistema de control de realimentación se calculan en base a los valores estimados.

25 Se calcularon las propiedades del controlador para el controlador P. La sustitución del controlador P por los controladores PI o PID varía las características del sistema de control. Esto dificulta la selección de la configuración correcta del controlador que garantiza el correcto funcionamiento del sistema de control. Las primeras etapas de los procedimientos de ajuste no identifican con precisión la dinámica del sistema controlado. Es por esto que los ajustes propuestos por estos procedimientos no aseguran la forma de onda transitoria adecuada.

30 Existen también métodos conocidos que utilizan las partes proporcionales e integrales del controlador durante la etapa de identificación, por ejemplo. Utkal Mehta y otros "*On-line Identification and Control Methods for PID Controllers*", 2010 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, Singapur, 7-10 de diciembre de 2010, Luo y otros, "*System and method for closed loop auto-tuning of PID controllers*" US6081751, 27 de Jun. 2000. Éstos no proporcionan una calidad de control satisfactoria. Ello viene provocado por los procedimientos de identificación que no tienen en cuenta el criterio de calidad de control adecuado. Por lo tanto, es crucial utilizar el índice de calidad de control adecuado y formular las fórmulas que garanticen un proceso de control óptimo. Esto hace que estas fórmulas sean parte integral del procedimiento de ajuste del controlador. Existen también métodos conocidos que utilizan el controlador on-off para lograr una oscilación de la señal controlada durante una etapa de identificación (Wojsznis y otros, "*System and method for automatically tuning a process controller*", US5453925, 26 de Sep. 1995). Esto hace posible obtener una señal controlada oscilante para los sistemas controlados de orden inferior. Este enfoque tiene inconvenientes. En algunos aspectos, el controlador on-off tiene características similares a las del controlador proporcional, por lo que hace difícil encontrar parámetros apropiados que sean adecuados para el controlador final, como el controlador PI o PID. Otro inconveniente es la necesidad de desconectar el bucle del sistema de control para cambiar el controlador para pasar del controlador on-off al controlador final. Esto puede ser peligroso para el sistema controlado.

También se conocen los métodos de ajuste del controlador basados en el análisis de las características de frecuencia (Y. Iino, T. Shigemasa: *Control system and method for deterministic control parameters of plants*, US5172312). Esos métodos requieren una determinación más temprana de la característica de frecuencia, lo cual puede ser inconveniente y requerir mucho tiempo.

55 El progreso de la tecnología informática permite desarrollar un método numérico de parámetros de ajuste del controlador que sean óptimos en el sentido del criterio seleccionado. Los criterios pueden formularse mediante el uso de fórmulas analíticas conocidas y de uso frecuente, tales como el criterio ITAE (A. E. Awouda, R. B. Mamat: *New PID tuning rule using ITAE criteria*, IJE, 2010). El criterio de optimalidad también puede formularse mediante ecuaciones que sólo pueden resolverse mediante el uso de métodos de optimización numéricos (R. Toscano: *A Simple robust PI-PID controller design via numerical optimization approach*, JPC, 2005). El conocimiento exacto de la dinámica del sistema controlado es el requisito previo para obtener parámetros óptimos del controlador. Esa dinámica a menudo se aproxima mediante un filtro de primer orden con modelo de tiempo muerto. La principal ventaja del modelo es un conjunto limitado de parámetros, mientras que el inconveniente es una dinámica del sistema controlada excesivamente simplificada, especialmente para parámetros del modelo identificados incorrectamente. Los métodos de ajuste mencionados anteriormente no incluyen la etapa de identificación lo cual los hace inútiles.

De acuerdo con la invención, sólo el controlador integral se añade al sistema controlado en la primera etapa del procedimiento de ajuste del controlador PI o PID, que es el filtro de primer orden con tiempo muerto. Esto significa que solamente se desconectan las partes proporcionales y diferenciales del controlador PID. Éste es el rasgo distintivo de la invención. Se supone que la ganancia proporcional k del sistema controlado en estado estacionario es conocida. En la siguiente etapa, la ganancia del controlador integral k_i se aumenta para obtener una oscilación sostenida con período constante. Cuando el sistema de control de bucle cerrado se encuentra en el límite de estabilidad, se evalúa la ganancia máxima del controlador k_U y el periodo de oscilación T_{osc} . La fórmula: $T =$

$\frac{\sqrt{k_U^2 k^2 - \omega_{osc}^2}}{\omega_{osc}^2}$ donde $\omega_{osc} = 2\pi/T_{osc}$ permite calcular el retardo de primer orden T y el coeficiente $\theta = \frac{L}{T} = (\text{arcctg}(\omega_{osc}T))/(\omega_{osc}T)$ del modelo de aproximación donde L es tiempo muerto. Las fórmulas

$$k_o = 10^{-0,659+0,465/\sqrt{\theta}}$$

$$\tau = 0,88 + 0,37 \theta$$

definen las propiedades del modelo del controlador. Las propiedades del controlador se calculan a partir de

$$k_{pN} = \frac{k_o}{k}$$

$$T_{iN} = \tau \cdot T$$

donde k_{pN} es la ganancia del controlador proporcional y T_{iN} es la constante de tiempo del controlador integral.

Sólo se añade al sistema el controlador integral controlado en la primera etapa del procedimiento de ajuste de la invención para el controlador de tipo PID, que es el filtro de primer orden con tiempo muerto (la parte del controlador PID proporcional y derivada se desconectan, sólo la parte integral es activa). Se trata de una característica distintiva de esta invención. Se supone que se conoce la ganancia proporcional del sistema controlado en estado estable, se trata del coeficiente k . A continuación, la ganancia del controlador integral k_i se cambia para llevar el sistema al límite de estabilidad. Entonces se evalúa la máxima ganancia de controlador integral k_U y el periodo de oscilación T_{osc} . La

fórmula: $T = \frac{\sqrt{k_U^2 k^2 - \omega_{osc}^2}}{\omega_{osc}^2}$ donde $\omega_{osc} = 2\pi/T_{osc}$ permite calcular el retardo de primer orden T y el coeficiente $\theta = \frac{L}{T} = (\text{arcctg}(\omega_{osc}T))/(\omega_{osc}T)$ del modelo de aproximación donde L es tiempo muerto. Las fórmulas

$$k_o = 10^{-0,7847} \cdot 10^{-0,7942/\sqrt[3]{\theta}},$$

$$\tau = 0,99 + 0,389 \cdot \theta + 0,00115 \cdot \theta^2$$

$$\delta = -0,1467 + 0,4734\sqrt{\theta}$$

definen las propiedades del modelo del controlador. Los parámetros del controlador se calculan a partir de

$$k_{pN} = \frac{k_o}{k}$$

$$T_{iN} = \tau \cdot T$$

$$T_{dN} = \delta \cdot T$$

donde k_{pN} es la ganancia del controlador proporcional, T_{iN} es la constante de tiempo del controlador integral y T_{dN} es la constante de tiempo del controlador derivativo.

Los supuestos del método de ajuste de la invención son:

1. La ganancia proporcional del sistema controlado es conocida. Ésta puede determinarse fácilmente mediante el experimento de respuesta a escalón.
2. La dinámica del sistema controlado se aproxima de manera aceptable mediante el filtro de primer orden con tiempo muerto (modelo Kupfmuller): $G_{ob}(S) = \frac{ke^{-sL}}{1+sT}$, donde: k es la ganancia proporcional, T es el retardo de primer orden y L es tiempo muerto.

En la primera etapa del procedimiento de la invención, el sistema controlado se conecta en serie con el controlador de tipo integral con coeficiente de ganancia k_i . A continuación, se incrementa la ganancia del controlador integral para que el sistema de control de bucle cerrado alcance el límite de estabilidad. En ese punto, se describe y se almacena el período de oscilación sostenida del sistema de control T_{osc} y la ganancia máxima del controlador k_U .

ES 2 708 994 T3

El sistema consiste en el controlador integral conectado en serie y el filtro de primer orden con tiempo muerto. La constante de tiempo del filtro de primer orden del modelo del sistema controlado se estima utilizando la fórmula:

$$T = \frac{\sqrt{k_D^2 k^2 - \omega_{osc}^2}}{\omega_{osc}^2} \text{ donde } \omega_{osc} = 2\pi/T_{osc}.$$

5 El coeficiente $\theta = \frac{L}{T} = (\arccctg(\omega_{osc}T))/(\omega_{osc}T)$, definido como el cociente del retardo de primer orden T y el tiempo muerto L , se calcula a partir del cambio de fase del modelo de aproximación del sistema de control de bucle abierto.

10 El ajuste de los modelos de controladores de tipo PI y PID se calculó como óptimo según el criterio ITAE (integral del producto de tiempo y el error de control absoluto del sistema de bucle cerrado).

15 El ajuste óptimo de los controladores PI y PID se calculó en función del coeficiente θ . Introducción del coeficiente θ facilita el cálculo, debido a la disminución del número de variables de entrada. Los ajustes de tiempo de los controladores no tienen dimensiones y están relacionados con la constante de tiempo del filtro de primer orden del objeto de control T .

Las configuraciones óptimas (de acuerdo con el criterio ITAE) del controlador PID se aproximan mediante las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} k_o &= 10^{-0,7847} \cdot 10^{-0,7942/\sqrt[3]{\theta}} \\ \tau &= 0,99 + 0,389 \cdot \theta + 0,00115 \cdot \theta^2 \\ \delta &= -0,1467 + 0,4734\sqrt{\theta} \end{aligned}$$

20 Para el controlador PI, las configuraciones óptimas de acuerdo con el criterio ITAE se aproximan mediante fórmulas:

$$\begin{aligned} k_o &= 10^{-0,659+0,465/\sqrt{\theta}} \\ \tau &= 0,88 + 0,37 \theta \end{aligned}$$

25 Dado que las propiedades del modelo de controlador están relacionadas con los coeficientes del modelo del sistema controlado, la configuración real del controlador debe calcularse mediante las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} k_{pN} &= \frac{k_o}{k} \\ T_{iN} &= \tau \cdot T \\ T_{dN} &= \delta \cdot T \end{aligned}$$

30 donde k_{pN} es la ganancia del controlador proporcional, T_{iN} es la constante de tiempo del controlador integral y T_{dN} es la constante de tiempo del controlador derivado.

35 El objeto de esta invención se presenta en las siguientes seis figuras. La figura 1 muestra el diagrama de bloques del sistema de control. Las figuras 2 a 5 muestran las respuestas a escalón del sistema de control de bucle cerrado obtenidas para los métodos de la invención y de Ziegler-Nichols. La ganancia del sistema controlado es igual a 1. La figura 2 muestra las respuestas a escalón del sistema con el controlador PID y $\theta = 0,2$. La figura 3 muestra las respuestas a escalón del sistema con el controlador PID y $\theta = 2$. La figura 4 muestra las respuestas a escalón del sistema con el controlador PI y $\theta = 0,2$. La figura 5 muestra las respuestas a escalón del sistema con el controlador PI y $\theta = 0,2$.

40 La configuración del controlador PI se presenta en la Tabla 1. La configuración del controlador PID se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. La configuración del controlador PI, de acuerdo con ITAE

Propiedades del sistema controlado ($k = 1, T = 1$)	Configuración del controlador de acuerdo con la invención		Configuración del controlador Ziegler-Nichols estándar	
	k_o	τ	k_{pN}	T_{iN}
0,2	2,415	0,954	3-826	0,620
2	0,4683	1,62	0,684	4,575

Tabla 2. La configuración del controlador PID, de acuerdo con ITAE

Propiedades del sistema controlado ($k = 1, T = 1$)	Configuración del controlador de acuerdo con la invención			Configuración Ziegler-Nichols estándar		
	k_o	τ	δ	k_{rN}	T_{iN}	T_{dN}
0,2	3,744	1,062	0,065	5,10	0,372	0,093
2	0,701	1,78	0,523	0,912	2,745	0,686

- 5 El método de la invención genera un menor sobreimpulso y oscilación del valor controlado durante el transitorio (figura 2 a figura 5). Además, elimina el fenómeno adverso de una amortiguación excesiva del valor controlado para un mayor coeficiente θ y el controlador PI (figura 5).

REIVINDICACIONES

1. Métodos de ajuste de los parámetros de un controlador PI en el sistema de control de bucle cerrado de un objeto, cuya función de transferencia puede aproximarse como un filtro de primer orden con constante de tiempo T y tiempo muerto L , y ganancia conocida k , que comprende las etapas de:

a. conectar en serie la entrada del objeto controlado con la salida de la parte integral del controlador cuya parte proporcional está desconectada, estableciendo el menor valor de ganancia y cerrando el bucle de control,

b. aumentar la ganancia del controlador hasta el límite de estabilidad con oscilaciones estables de la variable controlada y describir el período de las oscilaciones T_{osc} y el valor fijo de la ganancia del controlador k_U ,

c. calcular el retardo de primer orden T del modelo del sistema controlado utilizando la siguiente

fórmula $T = \frac{\sqrt{k_U^2 k^2 - \omega_{osc}^2}}{\omega_{osc}^2}$ donde $\omega_{osc} = 2\pi/T_{osc}$ y el coeficiente $\theta = (\text{arcctg}(\omega_{osc}T))/(\omega_{osc}T) = \frac{L}{T}$ donde el

L es el tiempo muerto del modelo del sistema

d. calcular la configuración del controlador PI a partir de la siguiente fórmula

$$k_o = 10^{-0,659+0,465/\sqrt{\theta}}$$

$$\tau = 0,88 + 0,37 \theta$$

y determinar la configuración física del controlador PI real a partir de las relaciones

$$k_{pN} = \frac{k_o}{k}$$

$$T_{iN} = \tau \cdot T$$

donde k_{pN} es la ganancia del controlador proporcional y T_{iN} es la constante de tiempo del controlador integral.

2. Métodos de ajuste de los parámetros de un controlador PID en el sistema de control de bucle cerrado de un objeto, cuya función de transferencia puede aproximarse como un filtro de primer orden con constante de tiempo T y con tiempo muerto L , y ganancia conocida k , que comprende las etapas de:

a. conectar en serie la entrada del objeto controlado con la salida de la parte integral del controlador cuyas partes proporcionales y diferenciales están desconectadas, estableciendo el menor valor de ganancia y cerrando el bucle de control,

b. aumentar la ganancia del controlador hasta el límite de estabilidad con oscilaciones estables de la variable controlada y describir el período de las oscilaciones T_{osc} y el valor fijo de la ganancia del controlador k_U ,

c. calcular el retardo de primer orden T del modelo del sistema controlado utilizando la siguiente

fórmula $T = \frac{\sqrt{k_U^2 k^2 - \omega_{osc}^2}}{\omega_{osc}^2}$ donde $\omega_{osc} = 2\pi/T_{osc}$ y el coeficiente $\theta = (\text{arcctg}(\omega_{osc}T))/(\omega_{osc}T) = \frac{L}{T}$ donde L

es el tiempo muerto del modelo del sistema controlado,

d. calcular la configuración del controlador PI a partir de la siguiente fórmula

$$k_o = 10^{-0,7847} \cdot 10^{-0,7942/\sqrt[3]{\theta}},$$

$$\tau = 0,99 + 0,389 \cdot \theta + 0,00115 \cdot \theta^2$$

$$\delta = -0,1467 + 0,4734\sqrt{\theta}$$

y determinar la configuración física del controlador PID real a partir de las relaciones

$$k_{pN} = \frac{k_o}{k}$$

$$T_{iN} = \tau \cdot T$$

$$T_{dN} = \delta \cdot T$$

donde k_{pN} es la ganancia del controlador proporcional, T_{iN} es la constante de tiempo del controlador integral y T_{dN} es la constante de tiempo del controlador derivado.

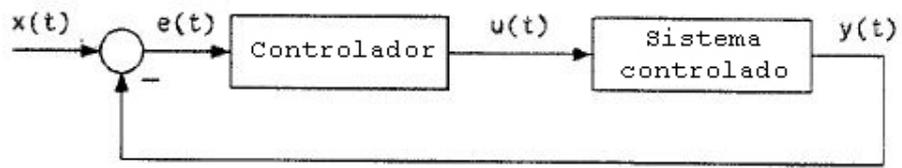


Fig.1

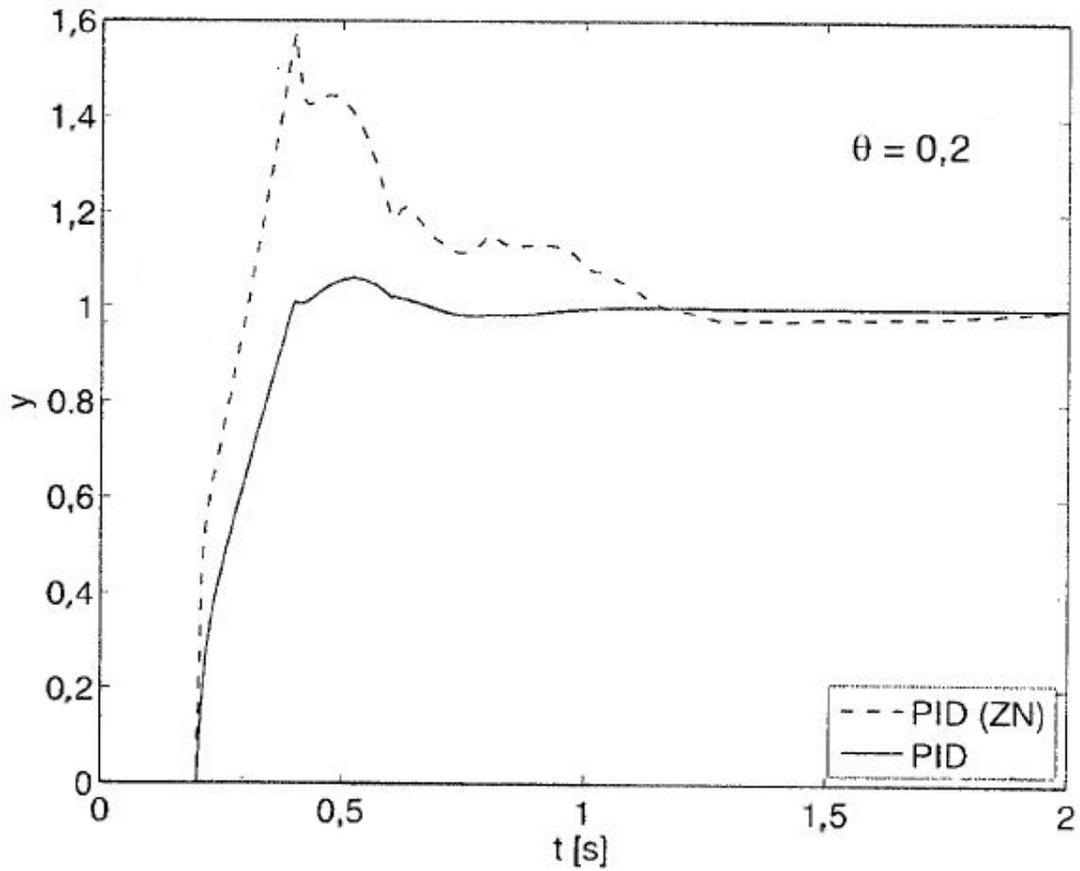


Fig. 2

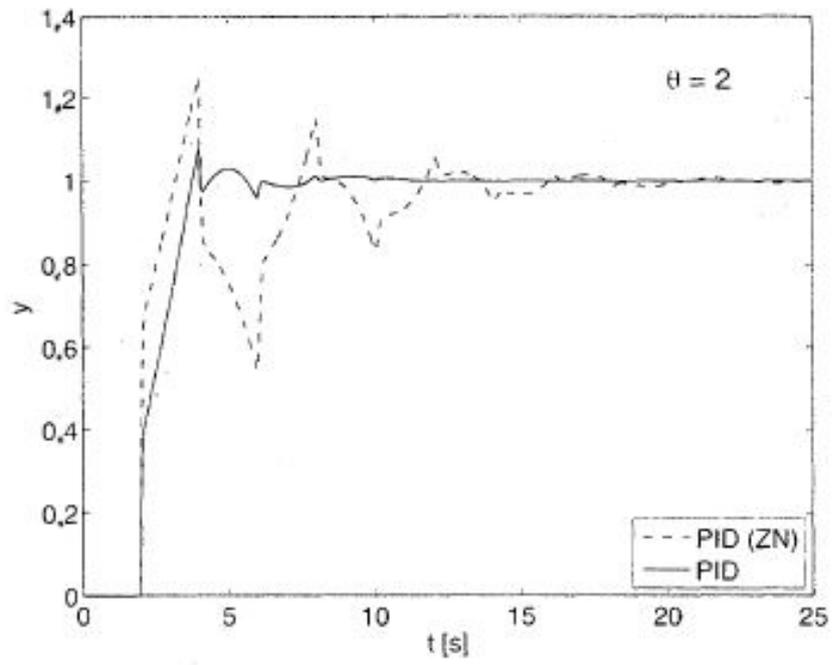


Fig. 3

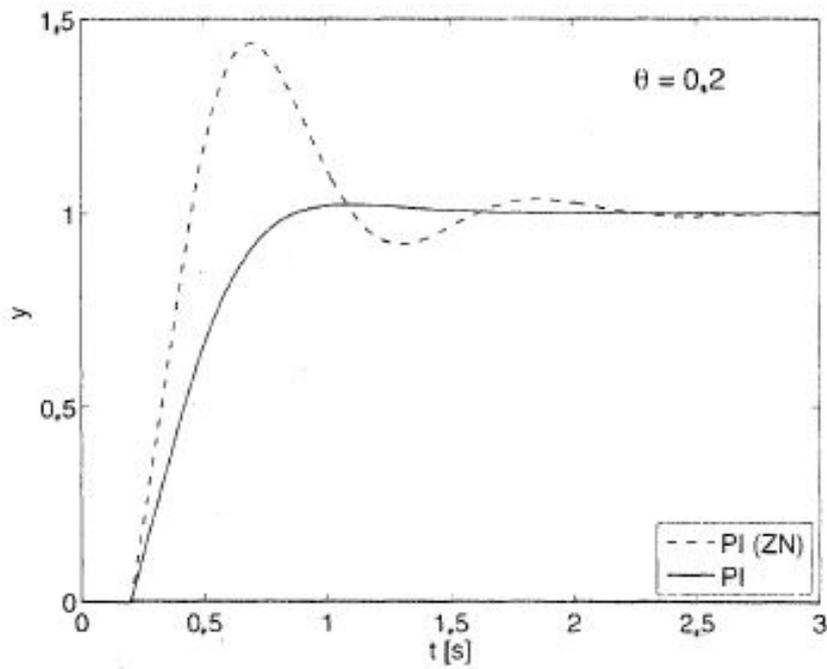


Fig. 4

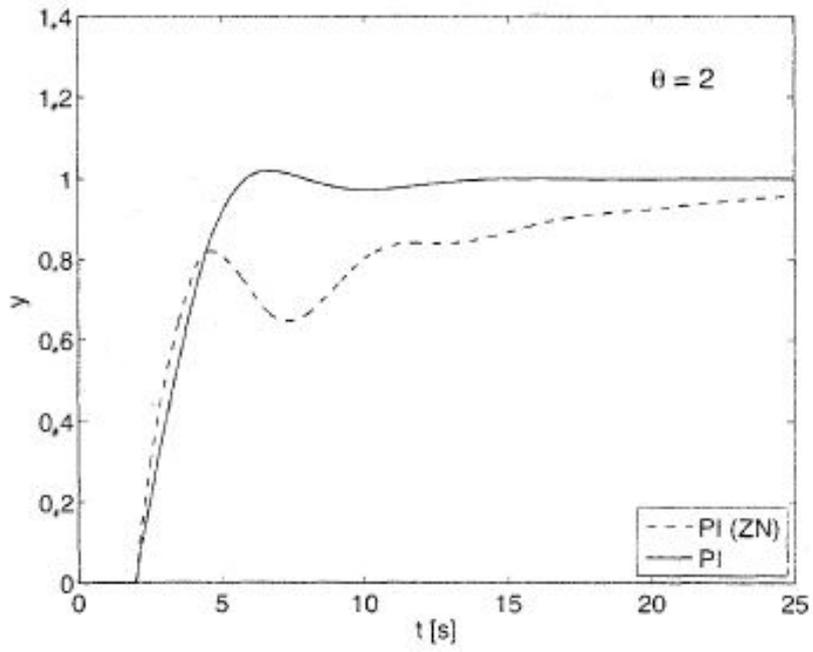


Fig. 5

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

5 *Esta lista de referencias citadas por el solicitante es únicamente para la comodidad del lector. No forma parte del documento de la patente europea. A pesar del cuidado tenido en la recopilación de las referencias, no se pueden excluir errores u omisiones y la EPO niega toda responsabilidad en este sentido.*

Documentos de patentes citados en la descripción

- 10 • US 6081751 A [0006] • US 5172312 A [0007]
• US 5453925 A [0006]

Literatura no de patentes citada en la descripción

- 15 • Libro de **O'DWYER**. *Handbook of PI and PID Controller the Engine tuning Rules*. Imperial College Press, 2006 [0002]
• **ZIEGLER J.G. ; NICHOLS N.B.** *The optimum Setting the odds Automatic Controllers*. ASME, 1942 [0002]
20 • **UTKAL MEHTA y otros**. *On-line Identification and Control Methods for PID Controllers*. 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision Singapore, 07 Diciembre 2010 [0006]
- **A. E. AWOUDA ; R. B. MAMAT**. *New PID tuning rule using ITAE criteria*. IJE, 2010 [0008]
• **R. TOSCANO**. *A Simple robust PI-PID controller design via numerical optimization approach*. JPC, 2005 [0008]