

CONTROL DE TRES TÉRMINOS

Marco Antonio Pérez Cisneros* y Elke Laubwald⁺

*División de Electrónica y Computación, CUCEI, Universidad de Guadalajara, México.

⁺Consultor “Control Systems Principles”

RESUMEN. Este es uno de una serie de manuales sobre modelado de sistemas, análisis y control preparados por Control Systems Principles.co.uk para dar una introducción a los importantes principios y procesos en control. En los sistemas de control hay un número de métodos y sistemas genéricos los cuales son encontrados en todas las áreas de la industria y la tecnología. Estos manuales sirven para explicar esos importantes sistemas y métodos en sencillos términos. El manual describe lo que hace un tipo particular de método/sistema, cómo trabaja y luego demuestra cómo controlarlo. Las demostraciones del control están realizadas usando modelos de sistemas reales designados por nuestro fundador Peter Wellstead y desarrollado por hechura de TQ Education and Training Ltd en su rango de equipamiento CE. Este manual trata acerca del controlador más ampliamente usado, el three term o controlador PID. El manual explica el controlador three term usando la herramienta de programa de control CE2000 y da tips sobre prácticos trucos que son usados para trabajar mejor con los controles PID.

1. ¿Por qué es popular el controlador de tres términos?

El controlador de tres términos es un método de control asombroso. Aunque fue desarrollado en el primer cuarto del siglo pasado, es todavía el sistema de control más ampliamente usado en el mundo. Antes de los sistemas de control electrónico existían versiones mecánicas, hidráulicas y neumáticas del controlador de tres términos. Usted puede mirar esos maravillosos mecanismos si usted visita el *Deutsches Museum* en Munich. Desde luego que en muchos otros museos hay también colecciones y muchos departamentos de universidades tienen colecciones de esos viejos controladores. Vale la pena inspeccionarlos y entender los principios de instrumentos prácticos de control. Aunque el control digital ha remplazado a los controladores electrónicos, es el controlador de tres términos el más ampliamente usado, aunque una computadora pueda hacer mucho más sofisticado el control. Sistemas naturales también usan formas de control de tres terminos, y puede ser encontrado también en psicología médica como la acción de control proporcional e integral.

¿Por qué es usado un controlador viejo y tan simple? Claramente, porque es simple y funciona bien. Mi jefe en sistemas de control siempre me recuerda que una solución KISS para una solución técnica es la mejor solución. KISS significa “Mantenerlo Simple, Estúpido” y el controlador de tres términos es una solución KISS.

La preparación y abilitación en técnicas de fábrica puede ser totalmente equivocado. También ellos tienen tiempos limitados por lo que los controladores podría no ser totalmente atinado. Después de graduarme yo era un empleado en una compañía de productos lácteos. Mi primer trabajo fue un control de circuito de supervisión de todas las plantas de la compañía. Este fue un trabajo sucio en una cantidad de fábricas y yo quería mucho salir de la ciudad y regresar a mi hogar. Este fue un gran examen para una

nueva ingeniera, pero yo estuve en la compañía y supervisé todos los circuitos de control en todas las fábricas de la compañía. En algunos circuitos de control los sensores y activadores tenían problemas, pero fue sorprendente para mí encontrar que todos los controladores no trabajaban o se activaban para los valores que venían de la fábrica. El ajuste de los sistemas de control en la fábrica fue un gran trabajo, pero nosotros lo hicimos y aprendí mucho acerca de los controladores de tres términos. Para pagar la especial atención para las ideas de este manual Elke trabajó duro para aprender estos tips por lo que tu tienes que trabajar también.

2. ¿Qué es el Controlador de Tres Términos?

La idea básica del controlador de tres términos es maravillosamente simple y la explicaré a los ingenieros como sigue. Esto tiene que ver con el conocimiento del pasado, presente y predecir el futuro. Considera cómo tú tomas tus decisiones en tu vida y verás que las experiencias pasadas, conocimientos del presente y una suposición sobre el futuro son los componentes de información que usamos en las decisiones humanas.

El controlador de tres términos es maravillosos porque hace exactamente lo mismo para control automático en forma elegante. Da tres partes para la señal de control:

- Una parte proporcional a la ocurrencia de error (acción de control dada por la información de hoy).
- Una parte proporcional a la integral de error pasado (acción de control dada por toda la información pasada).
- Una parte proporcional a el tipo de cambio o derivada del error (acción de control dada la dirección de cambios en el futuro).

Podemos hacer una versión matemática de esta descripción. Un controlador de tres términos en forma básica tiene la señal de error $e(t)=r(t)-y(t)$ como su entrada y produce la señal de error $u(t)$ como su salida. Esto se define en la ecuación:

$$u(t)=k_p e(t)+k_i \int_0^t e(\tau) d\tau +k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde K_p es conocida como la ganancia proporcional, k_i es la ganancia integral y k_d es la ganancia de derivada. El primer término en la Ecuación (1) es el bloque proporcional del controlador, el segundo término es el bloque integral y el tercero es el bloque de derivada. Un diagrama bloque de una implementación básica es mostrado en la figura 1.

La ecuación 1 es la forma en que los ingenieros escriben la ecuación del controlador. Yo soy de la dirección química de la ingeniería de control y usamos una versión diferente:

$$u(t) = K \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (2)$$

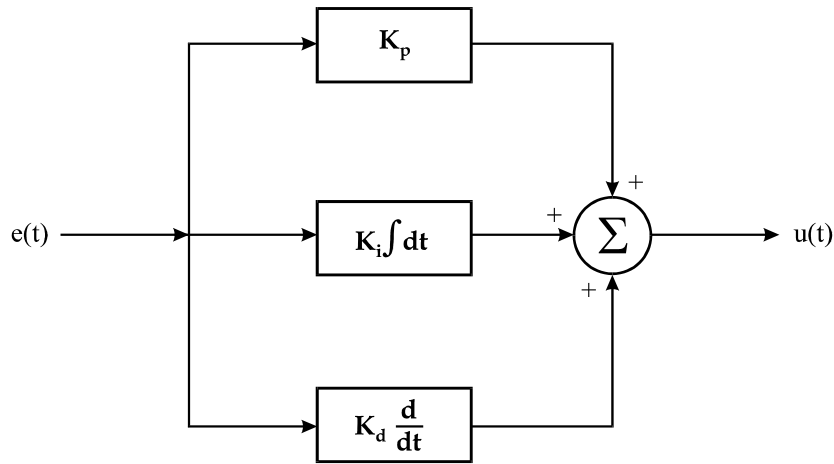


Figura 1. Diagrama bloque del Controlador de tres Términos.

En esta forma la ganancia K opera sobre todos los términos. El parámetro T_i es la integral de tiempo en segundos y el parámetro T_d es el tiempo de la derivada en segundos.

Algunas veces la ganancia proporcional k es incluida en los términos individuales y se usa la siguiente definición:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Comparando esta forma con la ecuación 1 es claro que la ganancia integral k_i es el inverso del tiempo integral T_i , y la ganancia de derivada k_d es igual a la derivada de tiempo T_d . Esta forma del controlador es mostrada en la Figura 2.

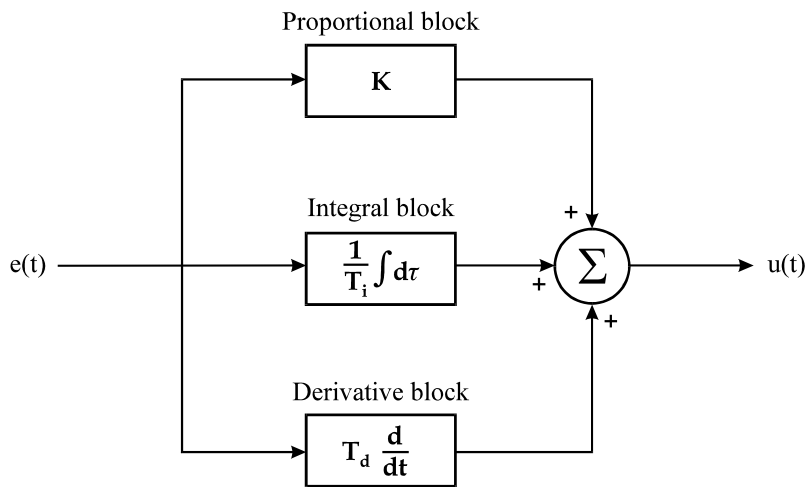


Figura 2. Diagrama bloques del Controlador de tres términos.

Algunas compañías de controladores no usan el nombre de ganancia proporcional, usan el de banda proporcional, PB es usado como sigue:

$$PB = \frac{100\%}{K_p} \quad (4)$$

Nosotros usaremos la forma de ganancia proporcional.

Usted puede ver que hay algunas variantes en la terminología para el controlador por lo que debe ser cuidadoso y asegurarse que todos los de su equipo tienen la misma definición. Yo trabajé en un proyecto para un departamento de control alguna vez. Fue caótico, los sistemas de control no estaban documentados y diferentes ingenieros usaban diferentes formas de control. Yo había sido muy estricto con ellos e insistí sobre una forma única.

El fracaso de la Derivada.

Un problema con las derivadas es que la salida de un diferenciador incrementa en proporción al índice del cambio de la señal de error. El más rápido, el índice de cambio de error, después el más largo, la salida de la derivada será. Esto es actualmente una de las funciones de los términos de la derivada. De cualquier forma, tiene un efecto negativo de amplificación de ruido no deseado contenido en la señal de error. Esto causa grandes dificultades porque esto crea rápidamente cambios de señal sobre los actores y los hace vibrar y causar daños. Esto puede ser evitado si un **wash-out-filter** es incluido en el término de la derivada. La salida del bloque diferenciador de tiempo continuo está dada por:

$$u_d(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Con el wash-out-filter, el término de la derivada es:

$$\frac{T_d}{G} \frac{du_d(t)}{dt} + u_d(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

El coeficiente G es el término wash-out y es el más alto límite de la ganancia que la salida del diferenciador puede tener así como la frecuencia de la señal de entrada se incrementa. Por ejemplo, el bloque diferencial básico tiene la función de transferencia:

$$\frac{u_d}{e} = j\omega T_d$$

Así como la frecuencia $\omega = 2\pi f$ de una onda de señal de entrada se incrementa, luego la ganancia del bloque diferencial se incrementa en forma directamente proporcional a la frecuencia. Esto causa rápidamente cambios de los componentes de ruido del diferenciador de la señal de entrada para ser amplificada. Con el término wash-out la máxima ganancia que el bloque derivador puede tener es G. Específicamente, si consideramos la función de transferencia del bloque derivador con el filtro wash-out para ser:

$$\frac{u_d}{e} = \frac{j\omega T_d}{1 + j\omega \frac{T_d}{G}}$$

Del cual podemos ver que el término wash-out se ha introducido en primer término, acción con la cual limita las ganancias de los bloques de altas frecuencias. Como la frecuencia $\omega = 2\pi f$ de la entrada se hace más grande la función de transferencia viene a ser:

$$\frac{u_d}{e} = G$$

La ganancia G del wash-out puede ser la idea de cómo la ganancia máxima del bloque diferencial para altas frecuencias de las señales de entrada. Casi todos los instrumentos de los controladores tienen un término wash-out, pero esto es activado en la fábrica y usted no necesita cambiarlo.

3. Forma Digital del Controlador de Tres Términos.

Algunas veces usted deseará hacer un controlador digital de tres términos y esta es la forma de hacerlo. El bloque proporcional mantiene el mismo nombre en la forma digital. El error de secuencia muestreado $e(n)$ en el paso n proporciona la componente proporcional de la secuencia de acción $u_p(n)$:

$$u_p(n) = k_p e(n) \quad (5)$$

El bloque de integración discreto es la forma derivada de la versión de tiempo continuo para aproximarla con una equivalente discreta para la integración. La salida de el bloque integrador de tiempo continuo $u_i(t)$, es

$$u_i(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (6)$$

Donde el parámetro T_i es la integral de tiempo. Reemplazando la integral por una sumatoria resulta la equivalente discreta con un intervalo de muestreo de T segundos nos da:

$$u_i(n) = \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^n e(j) = u_i(n-1) + \frac{T}{T_i} e(n) \quad (7)$$

Un error constante de 1 volt causa el incremento de la señal de control por T/T_i o $K_i T$ volts en varios T segundos del intervalo de muestra.

El diferenciador de tiempo discreto con wash-out es discretizado como sigue:

$$u_d(n) = \frac{T_d}{T_d + GT} u_d(n-1) + \frac{T_d G}{T_d + GT} [e(n) - e(n-1)] \quad (8)$$

donde $e(n)$ es el valor del error en el intervalo de muestreo n ; $e(n-1)$ es el valor del error en el intervalo de muestreo $n-1$; T_d es el tiempo de derivada; T es el intervalo de muestreo; G es el filtro de ganancia wash-out.

La ventaja del wash-out es para reducir las señales agresivas de control. Un bloque básico de derivada da un paso dentro de una rápida y larga señal de impulso que podría quebrar un accionador de control o dañar el circuito conductor. De cualquier forma, a causa del término wash-out la señal de salida será una serie de pequeños decrementos exponenciales. El rastreador de la diferencial será más grande que lo que la ganancia G de wash-out disminuye. Como la ganancia wash-out se incrementa. Así como la ganancia wash-out se incrementa, la caída exponencial vendrá a ser como impulsos y así pues, más como un bloque derivador ideal. Mira las figuras 3 y 4. Ellas muestran el amortiguamiento de la respuesta para una onda cuadrada en un diferenciador con diferentes ganancias de wash-out.

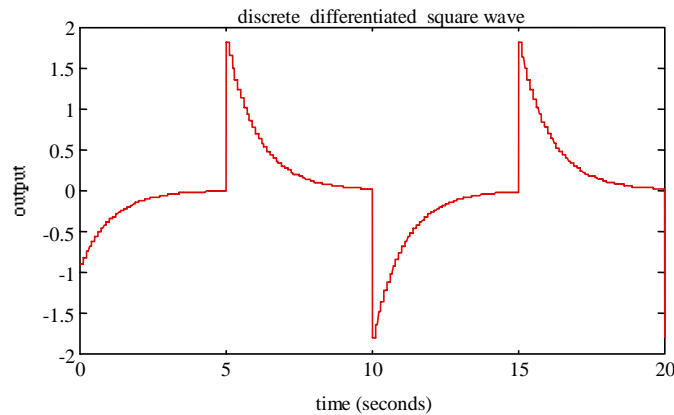


Figura 3. Acción diferencial sobre una onda cuadrada con ganancia wash-out $G=1$

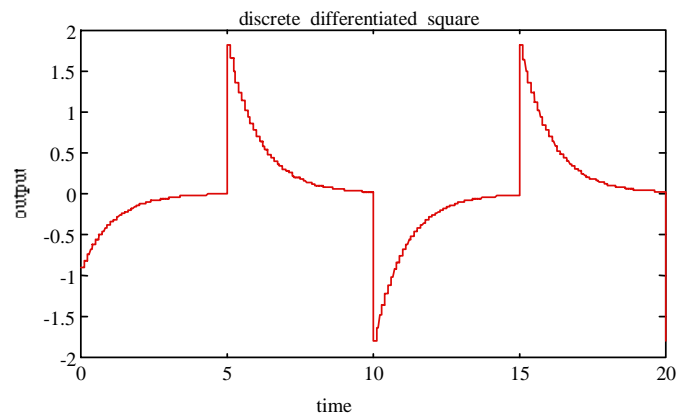


Figura 4. Acción diferencial sobre ondas cuadradas con ganancia $G=10$

4. Características prácticas de los controladores de tres términos.

La forma teórica del controlador de tres términos tiene que ser cambiada en una aplicación real: hacerlo trabajar apropiadamente. Yo tengo que describir el filtro wash-out para la acción de derivada. Esto es usualmente invisible en instrumentos de control comercial. Existen también otras características importantes:

1. Controladores integrales “wind-up” cuando el sistema siendo controlado tiene señales de acción limitadas. Existen formas de evitar esto en un sistema práctico.
2. Controlador derivado “kick”, el actor cuando pasan rápidos cambios, el filtro wash-out ayuda pero un cambio en la estructura del controlador puede ayudar también.

3. La respuesta a la señal de referencia (también llamado setpoint) puede ser dada una prima especial para improvisar la respuesta de salida.

Integral final.

Todos los sistemas tienen límites sobre el control máximo y mínimo que el actor puede aceptar. Esto es normal, pero la mayoría de los sistemas de control diseñan métodos que ignoran esto. Felizmente, en el control de tres términos la saturación puede ser compensada en una forma simple. Por ejemplo, cuando la acción integral es usada en un sistema con saturación un fenómeno de “wind-up” ocurrirá. Cuando la señal de salida del integrador es más grande que el nivel de saturación, entonces la salida del sistema es también limitada y la señal de error que maneja el controlador no puede reducir. El integrador cree necesario hacer necesario hacer más y continuar para incrementar, o wind-up, sin límites sobre qué tan grande se puede convertir la señal de control. Esto puede continuar por un gran tiempo y causa que el controlador funcione mal. Una forma de parar esto es reiniciando la salida del integrador a cero durante tiempos periódicos. La mayoría de los controladores comerciales tendrán un reiniciador integral para esto, la otra forma es usar un antiwind-up. Mira la figura 5 para ver que el windup puede hacer en un controlador integral extra (PI) aplicado a un sistema el cual tiene un actor de saturación. Tú puedes ver el bloque de saturación en la simulación del CE200 entre el bloque proporcional y el bloque simulado del sistema de segundo orden. La saturación limita la máxima entrada al sistema de entre 10 volts y 10 volts. Entre esos límites, el actor supe una salida la cual es proporcional al voltaje de entrada. La salida de acción máxima es alcanzada por una entrada de voltaje de 10 volts y para entradas mayores a 10 volts la salida del accionador la reduce a 10 volts. La salida del mínimo accionador es -10V. Así, para entradas menores a -10 V la salida del accionador las ajusta a -10V. limitando el accionador o la entrada de saturación ocurre en todo sistema de control porque hay siempre un límite máximo y uno mínimo sobre señales de control. El problema es común en sistemas de procesos como un nivel de fluido y control de flujo donde válvulas y flujos son una forma, pero también electromecánicamente Servo Systems tiene este problema.

¿Cuál es el problema en la figura 5? Los límites de la salida de un accionador de saturación introduce una no linealidad dentro del sistema de control por lo que cuando el error de control incrementa y él y la salida del accionador alcanza el límite de operación más alto, luego cambia en la señal de error no tiene efecto sobre la señal de control y la salida del integrador continuará creciendo. Debido a que la saturación continuará creciendo, ésta no alimentará al sistema y por lo tanto el controlador no puede suplir una acción correctiva. El crecimiento en la salida del bloque integral es llamado “wind-up” y es un problema porque la salida del bloque integral puede hacerse más grande antes que el error cambie. En algunos casos el error debe ser negativo por mucho tiempo para “unwind” el integrador y el tiempo activo del sistema es grande.

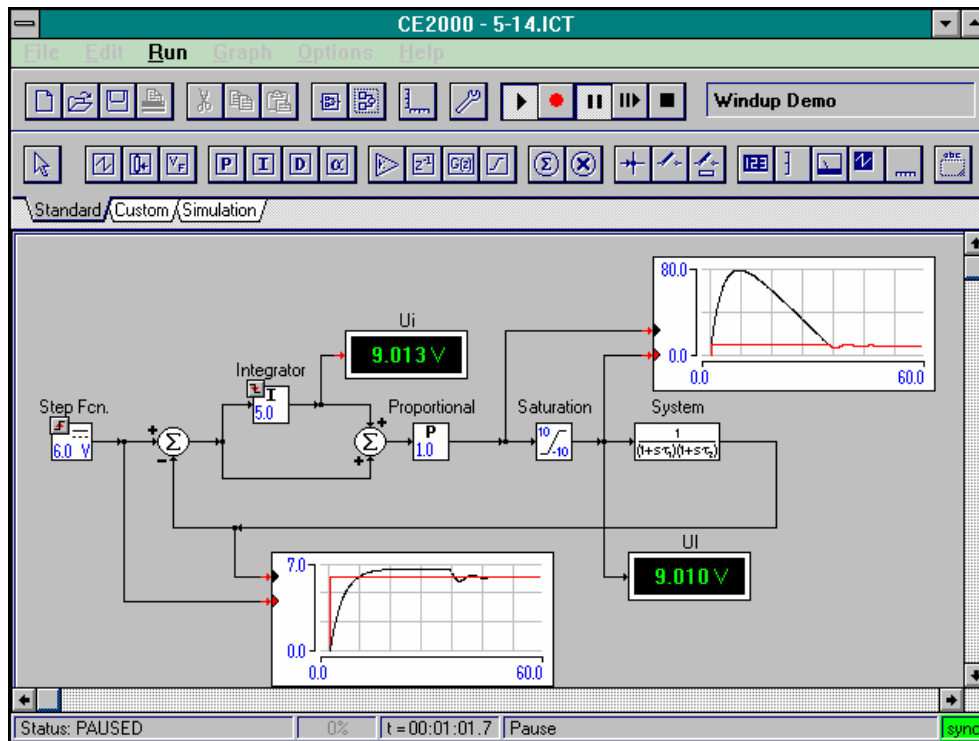


Figura 5. Wind-up en un sistema de control PI.

El integrador windup puede ser evitado con límites sobre la salida del integrador directamente con el bloque integrador y algunas instrucciones lógicas en el algoritmo del integrador.

Para un integrador digital esto es hecho de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } \{u_i(n-1) > u_{\max}\} \text{O} \{u_i(n-1) < u_{\min}\} \\
 & \text{THEN } u_i(n) = u_i(n-1) \\
 & \text{ELSE } u_i(n) = u_i(n-1) + \frac{T}{T_i} e(n)
 \end{aligned}$$

Esto no previene completamente wind-up, porque solo influye la parte ntegral de la salida del controlador. La alternativa es el sistema de anti-wind-up que describiré luego.

En la simulación del diagrama bloques (figura 6) tengo agregado un lazo anti-wind-up para un controlador PI. El lazo anti-wind-up usa un bloque de saturación con los mismos límites que la saturación en el sistema real y genera una señal e_{sat} . La función de e_{sat} es para prevenir el incremento del integrador cuando el accionador está saturado. Cuando el accionador no está saturado la señal e_{sat} es cero y no afecta el controlador. Cuando el accionador está saturado entonces e_{sat} no es cero y es alimentado en cierta forma para reducir la entrada a el integrador hasta que e_{sat} es cero, esto reduce la salida del controlador hasta que este es igual al límite de saturación y detiene el wind-up. El responsable del lazo anti-wind-up está determinado por el valor de la ganancia en el bloque nivelador **anti-w/u** en la figura 6.

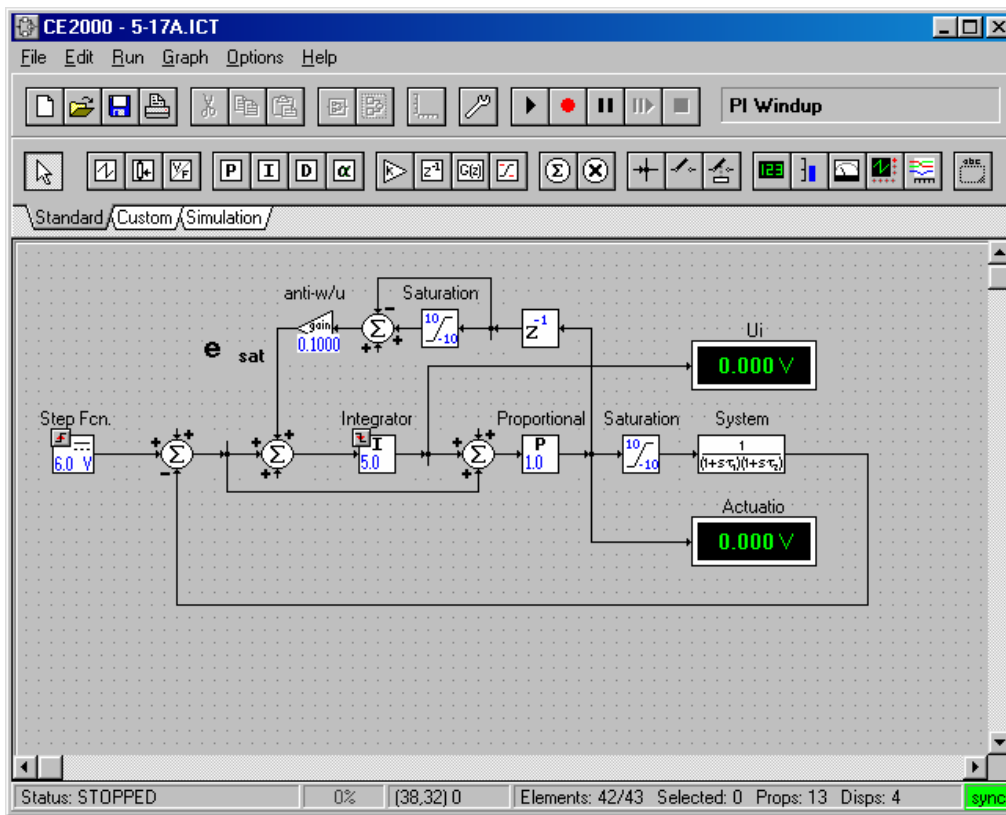


Figura 6. Un sistema de control PI con lazo anti-wind-up.

La figura 7 muestra la respuesta de la simulación de la figura 6 con una ganancia anti-wind-up de 0.1. Sin anti-wind-up la salida del controlador “wind-up” a casi 80 (ver el diagrama en la esquina superior derecha de la figura 5) y la salida alcanza la referencia solo después de 40 a 50 segundos. En la figura 7 la señal de control máximo es 30 y la salida alcanza el valor de referencia entre 10 y 15 segundos.

Tú puedes ver que los problemas de wind-up son reducidos por este mecanismo. El lazo anti-wind-up improvisa el funcionamiento del controlador para reducir la cantidad de wind-up en el integrador. Para incrementar el valor de la ganancia anti-wind-up es posible reducir el wind-up un poco más. Ten cuidado de una ganancia grande de anti-wind-up porque la estabilidad puede ser influenciada, trata de usar el más pequeño valor que da una respuesta razonable.

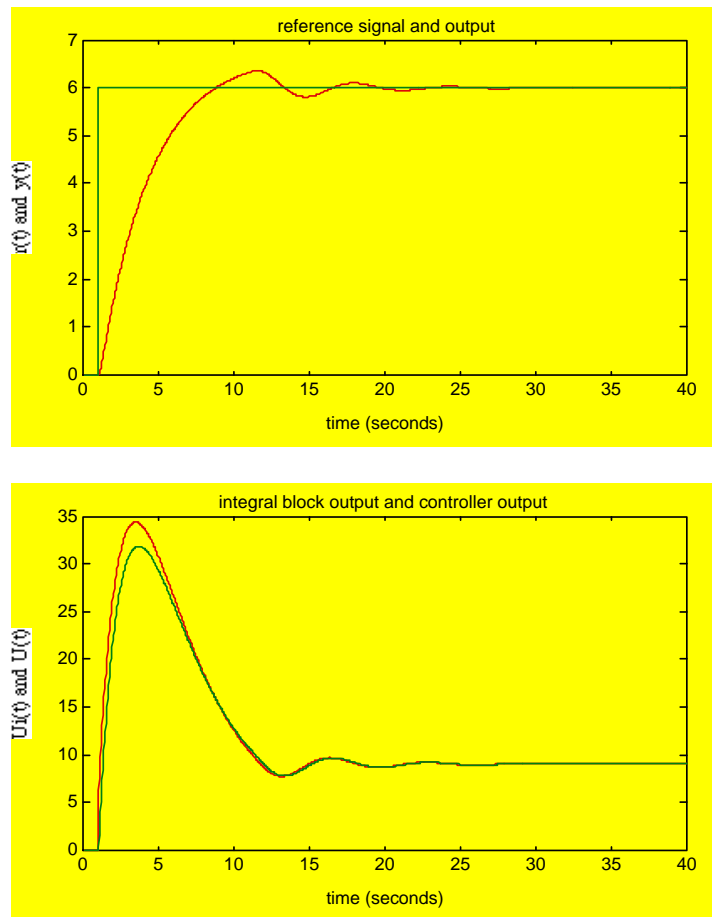


Figura 7. Anti-wind-up para un controlador PI con ganancia anti-wind-up de 0.1.

La Derivada en Acción.

Yo he dicho que la acción derivativa amplifica altas frecuencias. El filtro wash-out es una buena idea para reducirlo y es un instrumento de control más comercial. Otra idea para reducir la acción de control rápido de la entada de referencia es para modificar la forma en que el controlador de tres términos está conectado. Este es hecho para evitar el fenómeno de derivative-kick causado por cambios rápidos en la señal de referencia $r(t)$ los cuales son magnificados por la acción derivativa y se convierte en un componente transitorio de gran amplitud en la señal de control. La forma simple de detener la derivative-kick es para colocar de otra forma el controlador por lo que el bloque derivativo tiene la señal $y(t)$ en su entrada, no el error de señal. Esto previene cambios rápidos en la referencia o que señales de setpoint vengan a la acción de la derivada, pero no cambia la estabilidad de lazo cerrado del sistema de control.

La figura 8 muestra un controlador derivador acomodado en forma normal, donde una onda cuadrada es aplicado a un control PD de un integrador doble, (el famoso sistema Ball y Beam puede ser modelado por un integrador doble, por lo que este es un buen ejemplo, checar para Bell y Beam, transferido a nuestro sitio). La señal de control está a la derecha del botón del diagrama de simulación y la referencia es el trazo azul en argumento ubicado en la mitad del botón. Observe que el diagrama de la salida del controlador de $U(t)$ muestra la gran señal de control cuando la onda cuadrada de referencia cambia de signo. Esas grandes señales de control son las “kicks” en la acción derivativa. Yo he escuchado que les llaman puntas derivativas en algunas aplicaciones de control.

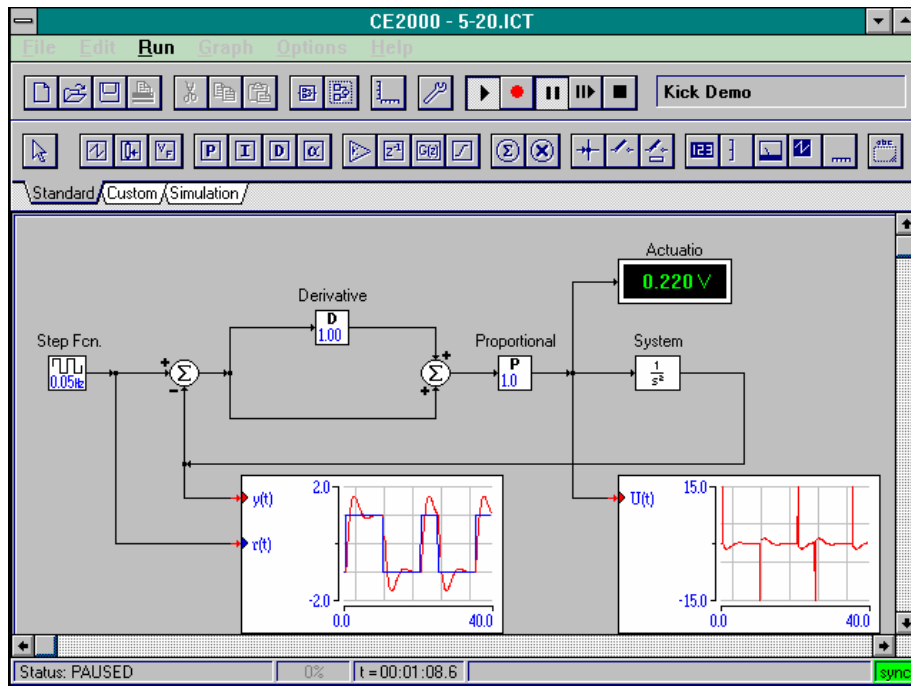


Figura 8. Control PD de un integrador doble con derivador kick.

En la figura 9, el sistema PD está alterado para permitir la derivada kick. En esta configuración solamente la señal de salida es usada en el bloque derivador y los cambios rápidos en la referencia no aparecen en la señal de control, (mira el argumento de $U(t)$ a la derecha del botón del argumento de la simulación). Alterando el sistema de esta manera no influye en la estabilidad del sistema, para prevenir esto es necesario escribir la función de transferencia de lazo cerrado y ver que la ecuación característica de lazo cerrado no es alterada.

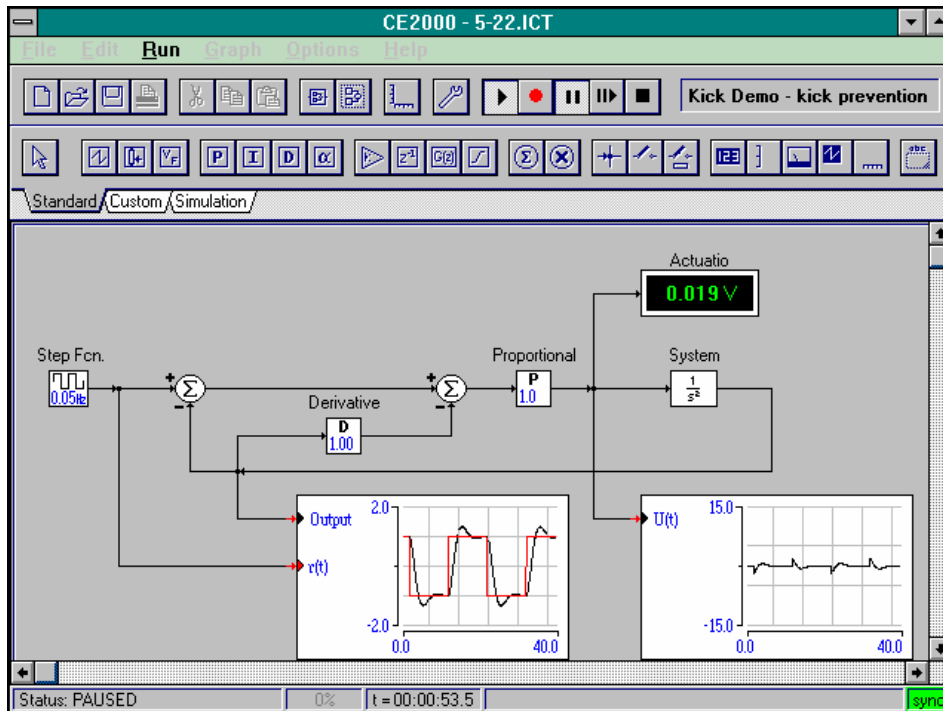


Figura 9. Control de un integrador doble con prevención de derivadora kick.

Todo instrumento controlador de tres términos que uso tiene prevención derivadora kick construida para el hardware pero checa las especificaciones.

¿Por qué usar acción derivadora? ¿Recuerda mi primera descripción del control de tres términos? Yo dije que la acción derivadora es acerca de poner los conocimientos del futuro en un controlador. Esto es llamado predicción y proporciona una fase avanzada la cual estabiliza un sistema de control que no sea muy estable o que tiene tiempo de espera. El tip práctico de ELE sobre acción derivadora es este, sólo use acciones derivadoras cuando la fase de avance y predicción es necesaria en el controlador. Esto pasa en sistemas que tienen oscilaciones en sus respuestas de lazo abierto o son inestables (como el Sistema Ball y Beam) o sistemas de tiempo de espera.

Reference/Setpoint Weighting

Un buen tip para mejorar la respuesta de referencia es usar feedforward de la señal de referencia. En el control de tres términos esto es llamado reference/setpoint-weighting. En setpoint weighting la entrada al bloque proporcional es la señal de error modificada $e_w(t)$:

$$e_w(t) = K_r r(t) - y(t)$$

La ganancia K_y es un weighting sobre el setpoint el cual puede improvisar la respuesta de los sistemas de control para las señales de referencia pero no altera la estabilidad del sistema o la forma en la que distorsiones en el lazo feedback son tratados. Técnicamente es llamado feedforward y altera la respuesta transitoria a la referencia para cambiar los ceros del sistema de lazo cerrado. La figura 10 muestra la referencia weighing en un sistema con un controlador integral proporcional (PI).

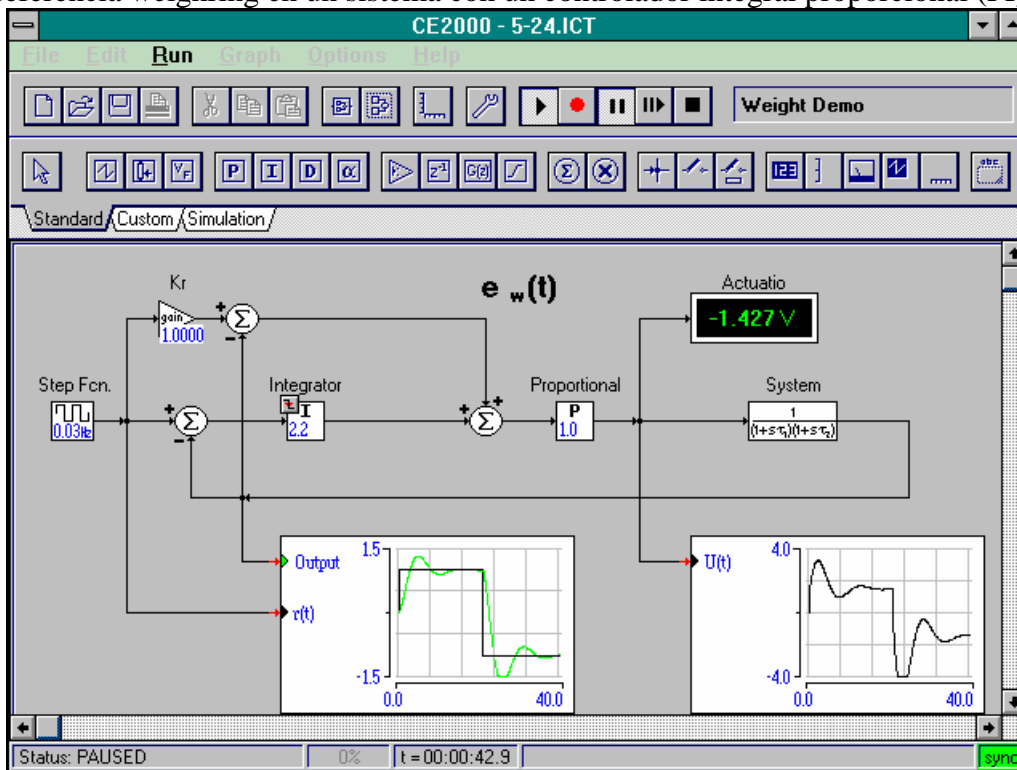


Figura 10. Controlador PI con referencia-weighting

El comportamiento del sistema de control mostrado en la figura 10 está dado por la ganancia de setpoint-weighting (K_y) en la figura 11 y 12. La principal idea de esas imágenes es para incrementos K_y la salida alcanza el setpoint más rápidamente, pero sin cambios en la ganancia de lazo.

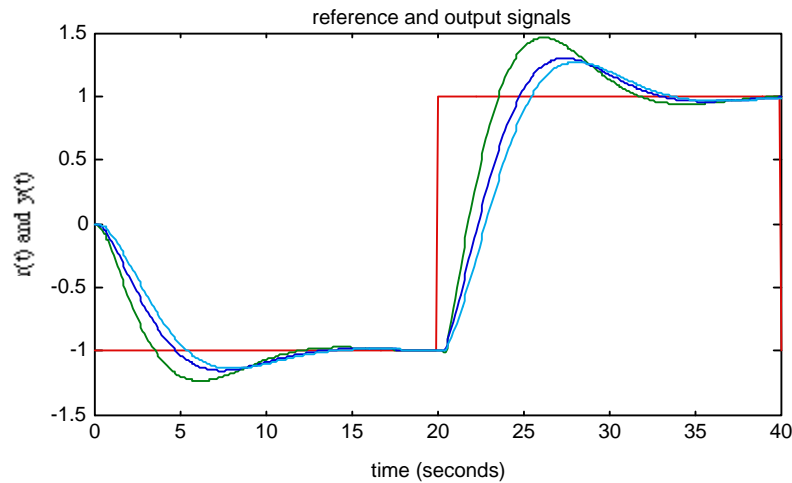


Figura 11. Referencia y salida de un controlador PI con referencia weighting para valores de $K_r=2$ (trazo verde), 1(trazo azul marino), 0.5(trazo azul cielo).

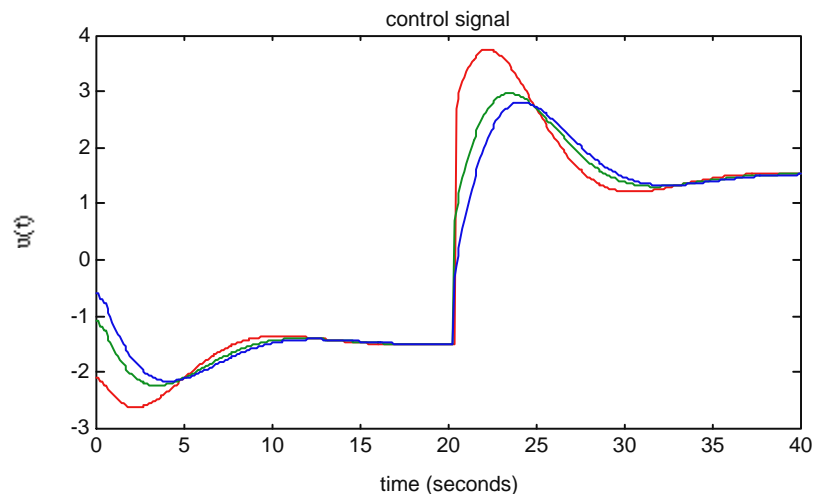


Figura 12. Señal de Control de un controlador PI con referencia weighting para valores de $K_r=2$ (trazo rojo), 1(trazo verde), 0.5(trazo azul).

Yo no he visto muchos controladores de tres términos con referencia weighting en ellos, y no los uso con frecuencia en programas de control que yo construyo. La principal idea de los instrumentos de control y software es reducir el número de controles de uso. Esta es por la razón que yo dije: ingenierías en técnicas de control son algunas veces mal tratadas y muy ocupadas en una gran planta. Lo más simple es lo mejor. Como mi jefe dijo: ¡todos quieren un controlador KISS!

5. Comentarios finales.

Las modificaciones a los controladores de tres términos básicos pueden ser usadas juntas en un controlador general, pero todos los términos serán necesarios para resolver un problema de control.

Muchos de mis controladores operan con un controlador del bloque derivador, yo sólo uso acción derivadora como el último recurso cuando el sistema es oscilatorio o tiene tiempo de espera. Los controladores que requieren acciones derivadoras para improvisar la estabilidad del sistema podría tener también un bloque integrador. Si hay mucho tiempo de espera en un sistema controlador podría no ser la mejor solución, algunos de las predicciones de control podría ser requerida si la inversión en tiempo, complejidad y dinero son aceptables.

Yo no he escrito acerca de controladores sintonizados porque este es un *Teufelskreis* (un círculo vicioso). Permítame explicarle, hay muchas técnicas diferentes para controladores sintonizados y gente que no está de acuerdo con lo mejor porque cada aplicación requiere diferentes sintonías. Yo examiné muchos métodos en mi planta y encontré ventajas y desventajas con todos los métodos. Solo si el sistema de control es difícil yo uso reglas especiales. Normalmente, mi hábito es usar una laptop con una simulación de un modelo aproximado del objetivo de la planta. Yo manejo un simulador de planta, controladores y checo los niveles de señal y problemas de saturación en la simulación. Yo transfiero esto a la planta real para el examen final. Finalmente, los ingenieros en la planta son tratados para usar el modelo de la simulación por lo que ellos pueden hacer manual la sintonización también.

6. Palabras finales de Eleke

Yo espero que tú tengas alguna idea acerca de la importancia del controlador de tres términos de este manual. Yo siento decir que no es posible responder preguntas acerca del contenido de nuestro manual, a menos que tengamos un contrato con tu organización. Para más información acerca del controlador de tres términos y las características de la simulación de control de CE2000 Control Software ir a el TQ Education and Training web site usando el la liga sobre nuestro sitio web www.control-systems-principles.co.uk o usa nuestro correo electrónico info@tq.com.

Yo he implementado muchos controladores, y pienso que este manual es una buena vista sobre el control de tres términos. Hay muchos libros de texto sobre el control de tres términos, pero el libro de Tore Hagglund y Kart Astrom es muy bueno y no muy extenso.

Aufwiedersehen!

Elke Laubwald