

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 659 546**

51 Int. Cl.:

G05D 19/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.05.2012** **E 12166776 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.11.2017** **EP 2520996**

54 Título: **Detección de inestabilidad de control inminente**

30 Prioridad:

05.05.2011 US 201113102043

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

16.03.2018

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-1596, US**

72 Inventor/es:

ENGLUND, NORMAN J.

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 659 546 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

Detección de inestabilidad de control inminente

Antecedentes

5 En sistemas de control, el término "inestabilidad" hace referencia habitualmente a la presencia de una oscilación con una amplitud continuamente creciente. Sin embargo, tal como se usa en el presente documento, el término "inestabilidad" hace referencia a la presencia de una amplitud no deseable de al menos un modo oscilatorio de un sistema. Esta amplitud no deseable puede ser intermitente, constante o continuamente creciente.

10 Las oscilaciones pueden ser el resultado de una diversidad de causas. Una oscilación puede ser el resultado de una resonancia, donde el modo se excita a su frecuencia natural en un sistema de bucle cerrado o abierto. El resultado es una inestabilidad lineal.

Una oscilación puede ser el resultado de una vibración libre con amortiguación negativa, donde la frecuencia de estímulo de controlador no está relacionada pero suministra potencia. El resultado es una vibración auto-excitada.

15 En un sistema de control que aplica un estímulo a un objeto, una oscilación puede estar provocada por una no linealidad, tal como una fricción o un retroceso. El resultado es una oscilación de ciclo límite. A diferencia de las oscilaciones provocadas por inestabilidades lineales, una oscilación de ciclo límite está saturada y no crece en amplitud. El retardo de fase total alrededor de un bucle de control que oscila en el ciclo límite es exactamente de 360 grados y la ganancia de bucle es la unidad.

20 El inicio de la inestabilidad debida a una oscilación de ciclo límite u otra oscilación es difícil de determinar en un sistema de control que tiene un solo canal. La dificultad es aún mayor en un sistema de control que tiene múltiples canales debido a la dificultad de identificar el canal que provocó la inestabilidad inicial. Además, un canal inestable puede hacer que numerosos canales se vuelvan inestables.

Hay una necesidad de detectar y controlar de manera rápida las inestabilidades provocadas por oscilaciones de ciclo límite y otras oscilaciones que tienen amplitudes no deseables.

25 La patente de Estados Unidos 6.876.099 desvela un sistema en el que se monitoriza la excesiva oscilación de una turbina eólica.

La patente de Estados Unidos US 2009/273488 desvela un proceso diseñado para detectar un caso de oscilación de ciclo límite en una aeronave de ala rotatoria.

La solicitud de patente internacional WO 98/35277 describe un sistema para discernir las oscilaciones que se han incluido por acciones del piloto.

30 El documento de bibliografía no de patente "Practical Aeroservoelasticity In-Flight Identification and Adaptive Control", XIAOHONG LI, describe el ajuste de ganancia de una ley de control longitudinal adaptada para una aeronave flexible, por lo que se detectan LCO usando un filtro de paso de banda estrecha.

Sumario

35 De acuerdo con un aspecto del presente documento, la inestabilidad de control inminente se detecta en un sistema que aplica un estímulo a un objeto. El sistema proporciona una señal de parámetro que representa un parámetro de sistema que indica la oscilación del objeto mientras el estímulo se aplica al objeto. El método comprende monitorizar la amplitud máxima de un tono dominante en una banda de frecuencia seleccionada de la señal de parámetro; y realizar una acción para evitar la inestabilidad de control inminente si la amplitud máxima persiste durante un período de tiempo especificado, en el que se suman la energía de los picos del tono dominante y de los armónicos del tono dominante, y la suma se compara con un umbral para determinar si la inestabilidad de control es inminente.

40 De acuerdo con otro aspecto del presente documento, un método comprende usar un efector para aplicar un estímulo a un objeto; generar una señal que representa un parámetro que indica la oscilación del objeto mientras el estímulo se aplica al objeto; monitorizar la amplitud máxima de un tono dominante en cada una de una pluralidad de bandas de frecuencia diferentes de la señal de parámetro; y ajustar selectivamente los parámetros de control que, de lo contrario, tenderían a activar los modos de oscilación a frecuencias específicas.

45 De acuerdo con otro aspecto del presente documento, un sistema comprende un efector para aplicar un estímulo a un objeto; un sensor para medir un parámetro que indica la oscilación del objeto mientras el estímulo se aplica al objeto; y un control para monitorizar la amplitud máxima de un tono dominante en una banda de frecuencia

5 seleccionada de la señal de parámetro, y realizar una acción para evitar la inestabilidad de control inminente si la amplitud máxima persiste durante un período de tiempo especificado, en el que se suman la energía de los picos del tono dominante y de los armónicos del tono dominante, y la suma se compara con un umbral para determinar si la inestabilidad de control es inminente. De acuerdo con otro aspecto del presente documento, un método comprende usar un efector para aplicar un estímulo a un objeto; un sensor para medir un parámetro que indica la oscilación del objeto mientras el estímulo se aplica al objeto; y un primer control que tiene parámetros ajustables que tienden a activar los modos de oscilación a frecuencias específicas. El sistema comprende además un segundo control, sensible al sensor, para determinar la amplitud máxima de un tono dominante en cada una de una pluralidad de bandas de frecuencia del parámetro medido; y ajustar automáticamente esos parámetros con el fin de no activar esos modos de oscilación a las frecuencias específicas.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una ilustración de un sistema que aplica un estímulo a un objeto.

Las figuras 2 y 3 son ilustraciones de la inestabilidad en un sistema de control.

15 La figura 4 es una ilustración de un método de detección de inestabilidad de control inminente en un sistema que aplica un estímulo a un objeto.

La figura 5 es una ilustración de un método para detectar y evitar una inestabilidad del control debida a oscilaciones de ciclo límite.

La figura 6 es una ilustración de un control derivativo integral proporcional.

La figura 7 es una ilustración de un control adaptativo de referencia modelo.

20 La figura 8 es una ilustración de una fresadora.

La figura 9 es una ilustración de un sistema de fuerza hidráulica para un ala de aeronave.

La figura 10 es una ilustración de una implementación de hardware de un control para detectar la inestabilidad de control inminente.

Descripción detallada

25 Se hace referencia a la figura 1, que ilustra un sistema 110 que incluye un efector 120 para aplicar un estímulo a un objeto 100. El estímulo podría ser una presión, fuerza, posición, temperatura, velocidad u otro, o una combinación de estímulos. Por ejemplo, el efector de estímulo 120 puede incluir al menos un accionador.

30 Un sensor 130 monitoriza la retroalimentación u otro parámetro que indica un comportamiento oscilatorio del objeto 100. El sensor 130 genera una señal de parámetro OSC. En algunas realizaciones, la señal OSC puede retroalimentarse para un sistema de bucle cerrado. En otras realizaciones, la señal OSC puede representar otro parámetro que se monitoriza para una oscilación (por ejemplo, una vibración en un sistema de control de presión, donde la señal de presión era la retroalimentación real).

35 El sistema 110 incluye además un control 140 para controlar el efector de estímulo 120. El control 140, que podría ser un bucle abierto o un bucle cerrado, genera una señal de control CS que controla el estímulo en respuesta a la señal de parámetro OSC.

Durante el funcionamiento del sistema 110, los estímulos externos también pueden aplicarse al objeto 100. Por ejemplo, el aire que fluye sobre el objeto 100 puede aplicar fuerzas aerodinámicas al objeto 100. Estos estímulos externos no se aplican por el efector de estímulo 120.

40 El sistema 110 podría ser simple o complejo. Un sistema simple podría incluir un solo canal con un control de bucle abierto. Un sistema complejo, tal como un sistema de accionador de ala de aeronave, podría tener múltiples canales con controles de bucle cerrado.

45 Las figuras 2 y 3 son representaciones de dominio de tiempo y de dominio de frecuencia de un único ciclo de una fuerza sinusoidal aplicada al objeto 100 a lo largo del tiempo. La representación de dominio de frecuencia muestra un componente de amplitud superior 310 aplicado a 2,5 Hz. Este componente de amplitud superior 310 corresponde a una condición operativa.

ES 2 659 546 T3

La representación de dominio de frecuencia también muestra un componente de amplitud inferior 320 a aproximadamente 80 Hz. La flecha 330 indica que el componente 320 varía (por ejemplo, ± 10 Hz) en un rango espectral. Esta variación puede ser el resultado de parámetros de cambio, tales como la carrera posicional de un accionador hidráulico que cambia la frecuencia de resonancia del sistema.

- 5 Este componente de amplitud inferior 320 podría ser una resonancia. Si su amplitud es lo suficientemente alta, la resonancia podría indicar el inicio de una inestabilidad.

10 Para este ejemplo específico, sin embargo, el componente de amplitud inferior 320 representa la inestabilidad debida a una oscilación de ciclo límite. Las oscilaciones de ciclo límite son habitualmente sinusoidales. Sin embargo, las oscilaciones de ciclo límite podrían ser no sinusoidales. Por ejemplo, las inestabilidades debidas a la fricción estática y de coulomb producen oscilaciones de ciclo límite que son de forma característicamente triangular con una frecuencia inferior. Cuando se mueve por debajo de una velocidad crítica, la forma de onda de oscilación será de dientes de sierra. Las no linealidades de retroceso pueden provocar oscilaciones de ciclo límite que tienen una forma similar a ondas cuadradas.

15 En algunos casos, una oscilación de ciclo límite puede tener un contenido de frecuencia errática y puede parecer una onda cuadrada con múltiples armónicos. Las contribuciones de energía de los armónicos en estas formas de onda pueden ser mayores que la fundamental.

20 Ahora se hace referencia adicional a la figura 4, que ilustra un método, implementado en el control 140, para detectar y evitar una inestabilidad de control debida a oscilaciones de ciclo límite y otras oscilaciones que tienen amplitudes no deseables. En el bloque 410 se genera la señal de parámetro OSC. La señal de parámetro OSC representa un parámetro que indica la oscilación del objeto 100 mientras se aplica un estímulo al objeto 100.

En el bloque 420, el control 140 monitoriza la amplitud máxima de un tono dominante en una banda de frecuencia seleccionada de la señal de parámetro OSC. Si la amplitud máxima persiste (por ejemplo, supera un umbral) durante un período de tiempo especificado, entonces se supone la inestabilidad del control inminente.

25 La amplitud puede persistir a lo largo de un rango espectral. Por lo tanto, se monitoriza la banda espectral, no una frecuencia específica.

30 El tono dominante puede encontrarse analizando la representación de dominio de frecuencia de la señal de parámetro OSC. Como ejemplo, cuando se analiza la señal de parámetro OSC realizando una FFT, puede construirse una matriz, siendo la primera columna la frecuencia y siendo la segunda columna la amplitud para la frecuencia correspondiente. Para la representación de la figura 3, si se buscaran en la matriz amplitudes superiores a 10 lbs, por ejemplo, se encontraría una amplitud de 2,5 Hz (270 lbs) y se encontraría otra amplitud de 80 Hz (50 lbs). Puesto que el sistema 110 se está accionando a 2,5 Hz, se ignoraría esa frecuencia/amplitud.

35 En el bloque 430, se realiza una acción para evitar la inestabilidad de control inminente si la amplitud máxima supera un umbral durante un período de tiempo especificado. Los ejemplos de acciones incluyen, pero no se limitan a, apagar el sistema 110, proporcionar una advertencia para la intervención del operador y variar la ganancia del control 140 con el fin de evitar la inestabilidad. Como un ejemplo de variación de la ganancia, se monitoriza la frecuencia de accionamiento y, si se supera el límite de error, se reduce la ganancia proporcional del control 140. Esto sería beneficioso, por ejemplo, cuando se requiere que el sistema 110 se accione en o cerca de su frecuencia de resonancia.

40 El método de la figura 4 ofrece un enfoque sencillo y rápido para evitar una inestabilidad de control, tal como las oscilaciones de ciclo límite. No es necesaria la correlación de los picos espectrales. No es necesario el análisis de la información de fase. Se ignoran las oscilaciones por debajo de un valor de amplitud específico. Solo se monitorizan la amplitud máxima y el contenido de frecuencia correspondiente para determinar si la inestabilidad de control es inminente. Puede detectarse la oscilación de activación y se recurre a la acción deseada después de un solo ciclo de oscilación.

45 El método de la figura 4 puede detectar oscilaciones en un área espectral delimitada que es marginalmente igual a, menor que o mayor que una frecuencia objetivo. El método también detecta si las oscilaciones están ausentes de un área espectral delimitada. Por ejemplo, el control 140 tiene una condición predeterminada en la que una oscilación está en un área espectral delimitada. Los factores ambientales no deseables u otros factores pueden hacer que la frecuencia de esta oscilación se salga del área delimitada, activando la acción apropiada especificada por el control 140.

50 La detección de solo el tono dominante es adecuada para oscilaciones que son sinusoidales. Sin embargo, un método del presente documento no es tan limitado. Un método del presente documento también puede detectar inestabilidad en una señal oscilatoria que tiene armónicos. Al monitorizar la energía del tono dominante más los

5 harmónicos de este tono, puede detectarse y evitarse la inestabilidad de control inminente debida a las oscilaciones de ciclo límite no sinusoidales. En ciertos sistemas, la oscilación de la frecuencia fundamental puede ser de baja amplitud, pero puede existir energía dañina en los harmónicos. El control 140 puede evaluar el contenido de energía a través del espectro. Un ejemplo sería una oscilación de ciclo límite que da como resultado una forma de onda de tipo onda cuadrada donde las contribuciones son los harmónicos impares de la frecuencia fundamental. El control 140 puede encontrar los picos a través del rango espectral e identificarlos como harmónicos, y sumarlos a las amplitudes para obtener un total.

10 Un método del presente documento no se limita a oscilaciones de ciclo límite. También puede detectar una inestabilidad inminente debida a excitaciones de resonancia y oscilaciones con amortiguación negativa (vibraciones auto-excitadas).

15 Un método del presente documento puede aplicarse a sistemas lentos, tales como el procesamiento por lotes y el tratamiento térmico. Un método del presente documento puede aplicarse a sistemas más rápidos, tales como la navegación marítima, y sistemas incluso más rápidos, tales como la fuerza hidráulica y eléctrica y los accionadores de posición. Ejemplos de estos sistemas más rápidos incluyen la maquinaria y robótica industrial y médica, ensayos de laboratorio automotrices y de aeronaves, y controles de vuelo.

Ahora se hace referencia a la figura 5, que ilustra una realización de un método para detectar y evitar una inestabilidad de control debida a oscilaciones detectadas en un parámetro medido. En el bloque 510, el sistema evaluado aplica un estímulo a un objeto. El estímulo puede aplicarse en respuesta a una señal de control o el estímulo puede ser una entrada de energía indirecta tal como la velocidad y la alimentación en una fresadora.

20 En el bloque 520, la señalización y adquisición del sensor se realiza para producir datos de dominio de tiempo del comportamiento oscilatorio del objeto. Los datos pueden adquirirse en modo digital o analógico. Estos datos de dominio de tiempo se actualizan periódicamente.

25 En el bloque 530, los datos de dominio de tiempo se transforman en una representación de dominio de frecuencia. Puede usarse un método de transformación como la transformada rápida de Fourier (FFT), el cruce por cero/intervalo de tiempo/pico a pico, el filtrado de Goertzel optimizado o la conversión de frecuencia a tensión.

30 Los datos de dominio de tiempo pueden convertirse al dominio de frecuencia a través de la FFT. Los valores en cada celda serán las amplitudes a diferentes frecuencias. La FFT puede realizarse cada vez que se adquieren datos. Las frecuencias dominantes pueden cambiar a lo largo del tiempo. Además, las frecuencias dominantes pueden aparecer intermitentemente, dependiendo de factores independientes. Por estas razones, en la mayoría de los sistemas físicos, pueden buscarse todas las frecuencias en cada conjunto subsiguiente de datos de dominio de tiempo.

La banda espectral puede estar bien definida, mientras que el tono dominante varía dentro de la banda.

35 Para algunos sistemas, puede omitirse por completo la transformación de dominio de frecuencia. Por ejemplo, las oscilaciones pueden calcularse directamente en el dominio de tiempo determinando el cruce por cero acoplado de CA de las oscilaciones en una banda de paso y sus valores pico.

En el bloque 540, se encuentran la amplitud máxima y la frecuencia correspondiente (es decir, la frecuencia a la amplitud máxima). En el bloque 550, la amplitud máxima y la frecuencia correspondiente se evalúan para los límites.

40 Si la amplitud máxima no supera un umbral (bloque 560), se procesa un nuevo conjunto de datos de dominio de tiempo (bloques 520 a 550). Si la amplitud máxima supera el umbral y la frecuencia correspondiente está dentro de la banda espectral, se evalúa la persistencia de los datos (bloque 570). Si todavía no se cumplen los criterios de persistencia (bloque 580), se procesa un nuevo conjunto de datos de dominio de tiempo (bloques 520 a 550).

45 Si se han cumplido los criterios de persistencia (bloque 580), se detecta un suceso oscilatorio no aceptable y/o se supone una inestabilidad inminente. Por lo tanto, se realiza una acción para reducir la amplitud de la oscilación. En el ejemplo de la figura 5, se ajusta la ganancia de control (bloque 590). La oscilación no deseable se detecta tan rápidamente que hay tiempo suficiente para ajustar la ganancia antes de tener que apagar el sistema.

50 El ajuste de ganancia puede ser un modo de funcionamiento de "disparo único" o "reactivación" o "continuo". Si la acción de evitación implica reducir la ganancia, entonces, en el modo de disparo único, la ganancia se reduce cuando se produce la inestabilidad, pero no aumenta cuando el sistema está estable. En el modo de reactivación, la ganancia puede aumentarse cuando el sistema ha logrado un funcionamiento estable y reducirse al inicio de la inestabilidad (lo que implica una histéresis).

En el modo continuo, se monitoriza el tono dominante del parámetro medido (por ejemplo, la vibración de la muestra de ensayo, cuando se controla la presión hidráulica) y se ajusta la ganancia en función de la amplitud de este parámetro. La ganancia puede tener límites máximos y mínimos. La ganancia puede variarse constantemente de manera que se mantenga un margen de ganancia (véase la figura 6). Este modo continuo permite que el sistema funcione con la máxima respuesta incluso si los parámetros de sistema (planta) pueden cambiar.

En algunas realizaciones de un método del presente documento, solo puede monitorizarse una única banda espectral durante el funcionamiento del sistema. En otras realizaciones, pueden monitorizarse múltiples bandas espectrales simultáneamente. Pueden analizarse diferentes partes del espectro para ajustar los diferentes parámetros de control. Cualquier control que tenga parámetros ajustables, tales como ajustes de ganancia, niveles de inserción, factores de coerción, etc., que tiendan a activar modos de oscilación a frecuencias específicas podría beneficiarse de la detección selectiva del rango de frecuencia. Por ejemplo, pueden analizarse múltiples bandas simultáneamente en un control derivativo integral proporcional (PID) o un control adaptativo de referencia modelo.

Ahora se hace referencia a la figura 6, que ilustra un control PID simplificado que ajusta la ganancia de acuerdo con un método del presente documento. Aunque una ganancia derivativa integral proporcional excesiva puede tener diferentes efectos en diferentes sistemas, en este control simplificado, el aumento de ganancia del integrador provocará oscilaciones de baja frecuencia, una ganancia proporcional excesiva provocará oscilaciones de frecuencia relativamente media, y una ganancia derivativa excesiva excitará los modos de frecuencia más altos.

Durante la operación, una orden u otra señal de referencia (CMD) se resta del parámetro medido OSC en el punto de unión sumador 610, para crear una señal de error (ERR). El parámetro medido OSC también se convierte en una representación de dominio de frecuencia y se analiza para el contenido y la magnitud de frecuencia en los bloques 620 y 630.

El bloque 640 determina los criterios espectrales para la programación. Si el pico de frecuencia está dentro de los criterios espectrales (componente de alta frecuencia) para el ajuste de ganancia derivativa, la ganancia derivativa se ajusta automáticamente. Este ajuste puede realizarse seleccionando una tasa en un programa de ganancia 641 y multiplicando la señal de error por la tasa seleccionada (bloque 642). Por lo tanto, se reduce un pico persistente de un componente de alta frecuencia de la señal de parámetro.

Si el pico de frecuencia está dentro de criterios espectrales (componente de baja frecuencia) para el ajuste de ganancia integral, la ganancia integral y la contribución porcentual se ajustan automáticamente. Este ajuste puede realizarse seleccionando un término de ganancia de un programa 644 y multiplicando el error acumulado por el término de ganancia (bloque 646). Aunque no se muestra, el porcentaje de la señal de orden total que puede aportarse a partir de la función de integración de error también puede ajustarse mediante este mismo método. Por lo tanto, se reduce un pico persistente de un componente de baja frecuencia de la señal de parámetro.

Si el pico de frecuencia está dentro de los criterios espectrales (componente intermedio) para el ajuste de ganancia proporcional, la ganancia proporcional se ajusta automáticamente. Por ejemplo, los ajustes proporcionales a la ganancia se basan en los valores absolutos de las oscilaciones de señal de retroalimentación (dentro de los criterios espectrales) en tiempo real (bloques 648-649).

Los componentes ajustados se suman en el punto de unión 650 y se amplifican en el amplificador 660. Una salida del amplificador 660 produce una señal de control (CS), que se suministra al efector de estímulo.

Las ganancias derivativa, integral y proporcional a menudo dan como resultado la excitación de diferentes áreas del espectro cuando los márgenes de ganancia y de fase se reducen a cero. Como ejemplo, la frecuencia operativa puede ser de CC a 1 Hz con inestabilidades debidas a una ganancia integral excesiva de aproximadamente 5 Hz, mientras que una ganancia proporcional excesiva puede provocar oscilaciones en la zona de 12 Hz y la ganancia derivativa puede provocar oscilaciones en la zona de 40 Hz.

Ahora se hace referencia a la figura 7, que ilustra un método del presente documento con respecto a un control adaptativo de referencia modelo 710 (se ilustra una implementación habitual). Una implementación del control adaptativo de referencia modelo 710 se conoce como "síntesis de control integral mínima de entrada múltiple" (MIMICS). Una interfaz para el control 710 incluye parámetros que pueden establecerse o ajustarse. Estos parámetros incluyen un factor de convergencia 720, una frecuencia de corte 730 y un bloqueo de ganancia/puesta a cero 740. La frecuencia de corte 730 se usa para obtener un modelo 711 que representa los componentes más dominantes de la planta 712. El factor de convergencia 720 indica la tasa a la que la retroalimentación debe lograr la señal de orden una vez que se activa el bloque adaptativo 713. Los controles de ganancia 740 están activados o desactivados.

Un control 750 que opera de acuerdo con un método del presente documento interactúa con el control adaptativo de referencia modelo 710 controlando la convergencia, la frecuencia de ruptura, y los controles de ganancia 720, 730 y

740. Si la convergencia se establece demasiado alta, habrá oscilaciones. El control 750 puede detectar estas oscilaciones y reducir la tasa de convergencia.

5 El control 750 también puede hacer que se ajusten varias ganancias K y Ku. Estas ganancias K y Ku pueden establecerse en cero, de manera que la fase de aprendizaje se reinicie en un nuevo valor de convergencia. En el control 710 de la figura 7, las ganancias K y Ku se controlan por el bloque adaptativo 713, pero pueden volver a ponerse a cero o bloquearse por el control 750 a través del bloqueo de ganancia/puesta a cero 740.

10 Algunas realizaciones de un control del presente documento pueden usar un filtro de compensación para ajustar el desplazamiento o atenuación de fase en una banda específica. La inestabilidad puede producirse cuando el margen de fase es bajo (por ejemplo, la fase de retroalimentación se aproxima a -180 grados desde la orden). El ajuste de fase puede ser de disparo único, de reactivación o continuo. En el ajuste de fase continuo, la fase puede variarse constantemente, de manera que se mantenga el margen de fase, operando de este modo a la respuesta máxima, aunque los parámetros de sistema (planta) pueden cambiar. Por el contrario, los sistemas convencionales establecen la compensación estáticamente.

15 Un método del presente documento puede usarse con un controlador "bang-bang". Si la histéresis del controlador bang-bang es demasiado pequeña, habrá sobrepulsos e infrapulsos constantes de una frecuencia más alta. Se puede usar un método en este documento para aumentar la configuración de histéresis.

Un método del presente documento puede aplicarse a un sistema simple de un solo canal. Un sistema como este es un eje único en una fresadora.

20 Ahora se hace referencia a la figura 8, que ilustra una fresadora 800 para el mecanizado de una pieza 805. La fresadora 800 incluye una mesa 810 para soportar la pieza 805, una fuente de alimentación 820, una cuchilla 830, un motor de cuchilla 840, y un primer control de bucle abierto 850 para controlar la velocidad de rotación de la cuchilla 830. La fresadora 800 incluye además un segundo control de bucle abierto 860 para controlar la velocidad de traslación de la mesa 810 (a través de un motor de alimentación 870) con el fin de controlar la alimentación de la pieza 805 en la cuchilla 830. Un sensor 880 mide la oscilación de la pieza 805. El sensor 880 puede ser, por ejemplo, un acelerómetro que mide la vibración de la pieza 805 cuando se está mecanizando la pieza 805.

La temperatura, el aire arrastrado, la posición del accionador, etc., pueden afectar a los parámetros en el control hidráulico y neumático. El tamaño de la pieza 805 y la posición de la cuchilla 830 pueden afectar a los parámetros en una operación de mecanizado cuando se está mecanizando la pieza 805. La alimentación y la velocidad pueden ejecutarse en bucle abierto, y la pieza 805 puede comenzar a oscilar en su resonancia, provocando vibración.

30 En el presente documento, la fresadora 800 incluye además un control 890 para analizar la salida del sensor 880 de acuerdo con un método del presente documento. El control 890 detecta una inestabilidad de control inminente y realiza una acción para evitar cualquier inestabilidad. Por ejemplo, el control 890 puede ajustar apropiadamente la potencia a los motores de cuchilla y de alimentación 840 y 870. Aunque la fresadora 800 no se vuelva inestable, las oscilaciones de la pieza 805 pueden usarse para controlar la orden de bucle abierto para la cuchilla 830 y el motor de cuchilla 840.

Un método del presente documento es especialmente ventajoso para un sistema que tiene múltiples canales. Un ejemplo es un sistema para controlar fuerzas en la superficie de control de aeronave de una aeronave en un ensayo de laboratorio.

40 Ahora se hace referencia a la figura 9, que ilustra un sistema de fuerza hidráulica 900 para una superficie de control de un ala de aeronave 910. El sistema 900 puede usarse, por ejemplo, para realizar ensayos de fatiga de fuerzas de control de aeronaves que simulan su funcionamiento o valores máximos basados en un recubrimiento de diseño. El sistema 900 incluye múltiples canales, incluyendo cada canal un accionador de fuerza 920 y un control (no mostrado) que ejecuta un método en el presente documento. Durante el ensayo de fatiga, los accionadores de fuerza 920 ejercen cargas sobre una parte del ala 910. Por ejemplo, treinta accionadores de fuerza independientes 920 pueden aplicar fuerzas simultáneamente al ala 910.

La carrera del accionador (representada por las flechas 930) varía a medida que la fuerza se aplica al ala 910. Los modos de frecuencia cambian de localización espectral y de amplitud a medida que cambia la carrera. Como el sistema de fuerza hidráulica 900 tiene un margen de ganancia finito, es posible que un canal se vuelva inestable y haga que los otros canales también se vuelvan inestables. Pueden producirse oscilaciones de fuerza no deseables.

50 Los sensores de fuerza 950 miden las fuerzas dinámicas y estáticas en el ala 910 de cada canal. El ala 910 puede unirse a un contrafuerte 940 u otro elemento estructural tal como el fuselaje de una aeronave. Los accionadores de fuerza 920 reaccionan contra una referencia de tierra u otro enlace de reacción.

ES 2 659 546 T3

5 La frecuencia de ciclo de ensayo puede ser de aproximadamente 1 Hz. Las frecuencias de resonancia hidráulica, en este ejemplo, están asociadas con la masa del ala 910 y la rigidez del fluido hidráulico. Se espera que se produzcan oscilaciones en los sistemas hidráulicos habituales de 10 a 200 Hz. Un barrido de frecuencia o un análisis pueden revelar los modos esperados de oscilación en una serie de frecuencias. Estas resonancias varían en su tendencia a oscilar y provocar inestabilidad.

Todos los canales funcionan simultáneamente. Cada control puede responder automáticamente y reducir inmediatamente las ganancias en el canal inestable antes de que comiencen a oscilar otros canales.

10 El sistema de control de fuerza 900 puede ahorrar dinero al evitar daños en los costosos equipos de ensayo. El coste del ensayo puede reducirse aumentando la velocidad de ciclo. La capacidad de controlar las ganancias dentro de una banda de frecuencia permite que las frecuencias de ensayo más lentas se ejecuten mientras se monitorizan las oscilaciones de otros modos.

15 Ahora se hace referencia a la figura 10. Un control del presente documento no se limita a ninguna implementación específica. Por ejemplo, el control 1010 puede basarse en microprocesador. Un control basado en microprocesador 1010 incluye un procesador 1020, una memoria 1030 y unos datos 1040 almacenados en la memoria 1030. Cuando se ejecutan, los datos 1040 hacen que el procesador 1020 realice un método en el presente documento.

REIVINDICACIONES

1. Un método de detección de la inestabilidad de control inminente en un sistema (110) que comprende un efector, comprendiendo el método:
- aplicar, usando el efector, un estímulo a un objeto (100);
- 5 proporcionar una señal que representa un parámetro que indica la oscilación del objeto (100) mientras que el estímulo se aplica al objeto (100); y
- monitorizar la amplitud de un tono dominante en una banda de frecuencia seleccionada de la señal, siendo el tono dominante la frecuencia de amplitud máxima en la banda de frecuencia seleccionada;
- caracterizado por que el método comprende además
- 10 realizar una acción para evitar la inestabilidad de control inminente si la amplitud del tono dominante supera de manera persistente un umbral durante un período de tiempo especificado, en el que se suman la energía de los picos del tono dominante y de los armónicos del tono dominante, y la suma se compara con un umbral para determinar si la inestabilidad de control es inminente.
- 15 2. El método de la reivindicación 1, que comprende, además, analizar simultáneamente diferentes bandas espectrales, y ajustar selectivamente los parámetros de control que, de lo contrario, tenderían a activar los modos de oscilación a frecuencias específicas.
- 20 3. El método de la reivindicación 2, en el que el control es un control derivativo integral proporcional (PID); y en el que la ganancia derivativa del control se ajusta automáticamente en respuesta a un pico persistente de un componente de alta frecuencia de la señal de control, la ganancia integral y la contribución porcentual se ajustan automáticamente en respuesta a un pico persistente de un componente de baja frecuencia de la señal de control, y la ganancia proporcional se ajusta en respuesta a componentes de frecuencia intermedia.
4. El método de la reivindicación 3, en el que el ajuste de la ganancia proporcional se basa en los valores absolutos de las oscilaciones de señal de control en tiempo real.
- 25 5. El método de la reivindicación 2, en el que el control es un control adaptativo de referencia modelo que tiene parámetros que incluyen una tasa de convergencia; y en el que la tasa de convergencia se reduce si se detecta la inestabilidad inminente.
6. El método de la reivindicación 1, en el que realizar la acción incluye controlar la potencia para cortar y alimentar motores para evitar inestabilidades durante el mecanizado de una pieza.
- 30 7. El método de la reivindicación 1, en el que se aplica una fuerza a diferentes zonas del objeto (100) mediante una pluralidad de accionadores de fuerza (920); en el que se generan señales de parámetro para las diferentes zonas; y en el que cada accionador (920) se controla de manera independiente monitorizando la amplitud máxima en una banda de frecuencia seleccionada de la señal correspondiente, definiendo la amplitud máxima un tono dominante.
- 35 8. El método de la reivindicación 3, en el que el objeto (100) es un ala de aeronave (910) que tiene una superficie de control, en el que los accionadores de fuerza (920) aplican una fuerza al ala durante el ensayo, y en el que realizar una acción sobre un accionador defectuoso (920) incluye reducir las ganancias de control antes de que comiencen a oscilar otros accionadores (920).
9. El método de la reivindicación 1 que comprende además:
- monitorizar las amplitudes de los tonos dominantes en cada una de una pluralidad de diferentes bandas de frecuencia de la señal de parámetro, siendo cada tono dominante la frecuencia de amplitud máxima en su banda de frecuencia seleccionada; y
- 40 ajustar selectivamente los parámetros de control que, de lo contrario, tenderían a activar los modos de oscilación a frecuencias específicas.
10. Un sistema que comprende:
- un efector (120) adaptado para aplicar un estímulo a un objeto;

un sensor (130) adaptado para medir una señal que representa un parámetro que indica la oscilación del objeto (100) mientras que el estímulo se aplica al objeto (100); y

5 un control (140) adaptado para monitorizar la amplitud de un tono dominante en una banda de frecuencia seleccionada de la señal, siendo el tono dominante una frecuencia de amplitud máxima en la banda de frecuencia seleccionada,

caracterizado por que

10 el control (140) está adaptado además para realizar una acción que evite la inestabilidad de control inminente si la amplitud del tono dominante supera de manera persistente el umbral durante un período de tiempo especificado, en el que el control está adaptado para sumar la energía de los picos del tono dominante y de los armónicos del tono dominante, y comparar la suma con un umbral para determinar si la inestabilidad de control es inminente.

15 11. El sistema de la reivindicación 10, en el que el efector (120) y el control (140) comprenden una pluralidad de canales, incluyendo cada canal un accionador de fuerza (920) y un control de accionador; en el que el efector (120) está adaptado para aplicar una fuerza a diferentes zonas del objeto (100) mediante los canales; en el que se generan señales de parámetro para las diferentes zonas, y en el que el control (140) está adaptado para controlar cada canal de manera independiente monitorizando la amplitud máxima en una banda de frecuencia seleccionada de la señal de parámetro correspondiente, definiendo la amplitud máxima un tono dominante.

20 12. El sistema de la reivindicación 11, en el que el objeto (100) es un ala de aeronave (910) o una superficie de control, en el que los accionadores de fuerza (920) están adaptados para operar en diferentes zonas del ala (910) o la superficie de control durante el ensayo, y en el que la ganancia se reduce en un control de accionador de un canal defectuoso antes de que comiencen a oscilar los otros canales.

13. El sistema de la reivindicación 10, en el que el control (140) comprende:

un primer control que tiene unos parámetros ajustables que tienden a activar los modos de oscilación a frecuencias específicas; y

25 un segundo control, sensible al sensor, adaptado para determinar las amplitudes de los tonos dominantes en cada una de una pluralidad de bandas de frecuencia de la señal, siendo cada tono dominante una frecuencia de amplitud máxima en su banda de frecuencia; y ajustar automáticamente esos parámetros con el fin de no activar esos modos de oscilación a frecuencias específicas.

FIG. 1

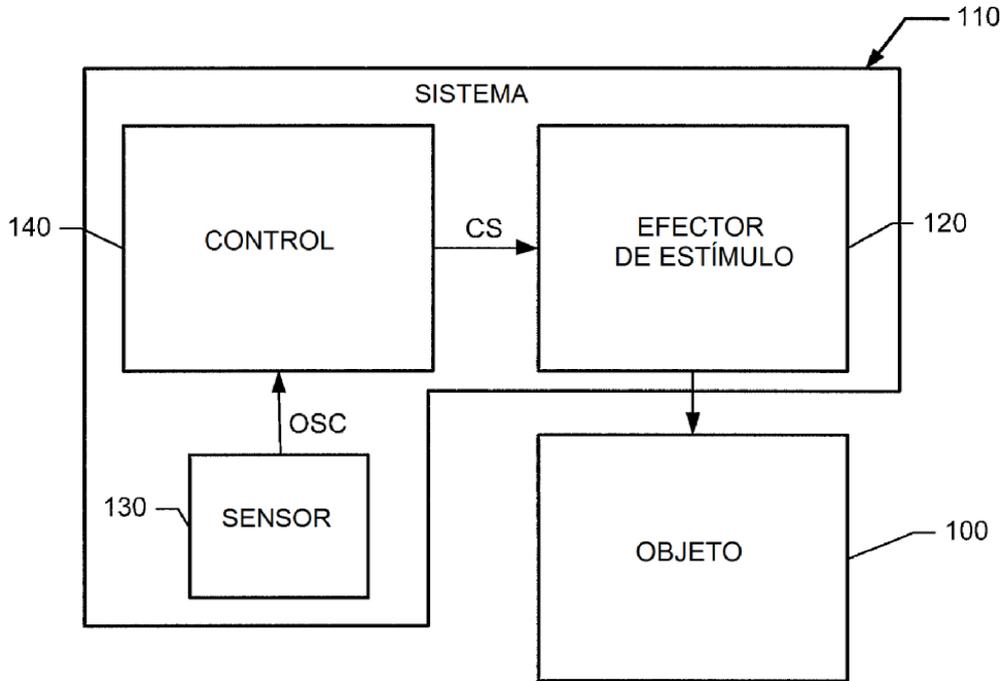


FIG. 4

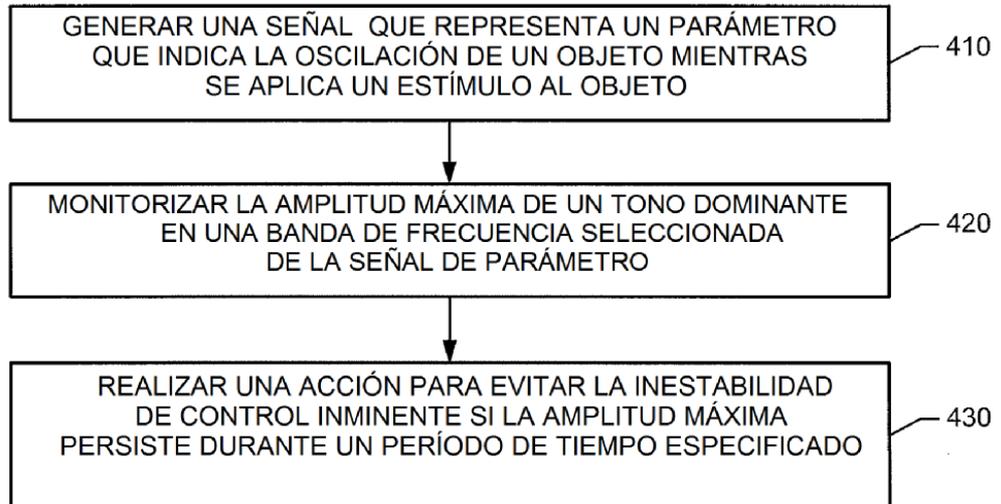


FIG. 2

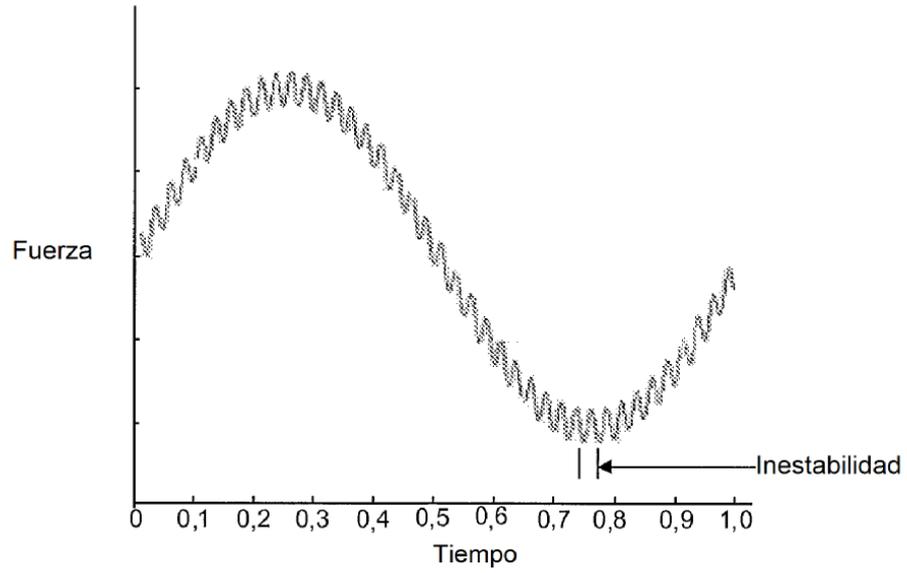


FIG. 3

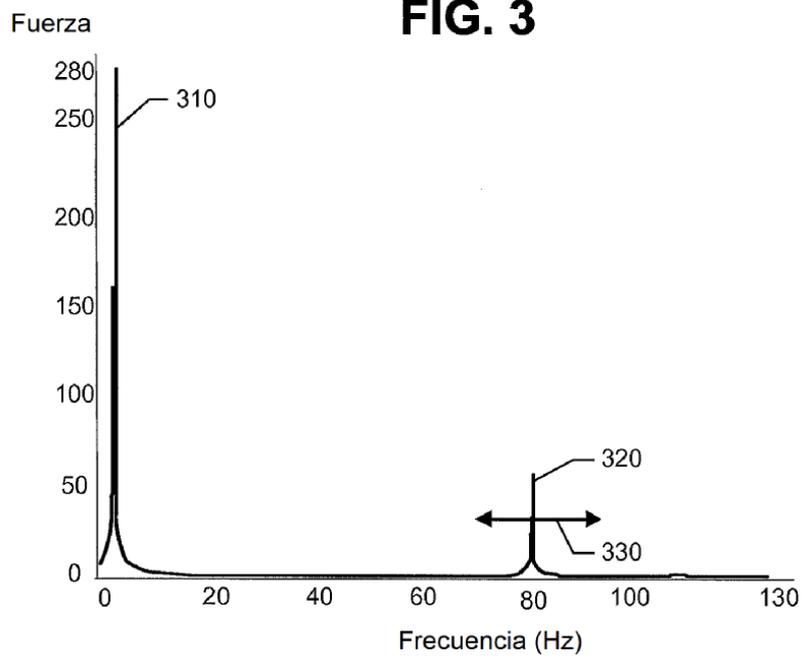


FIG. 5

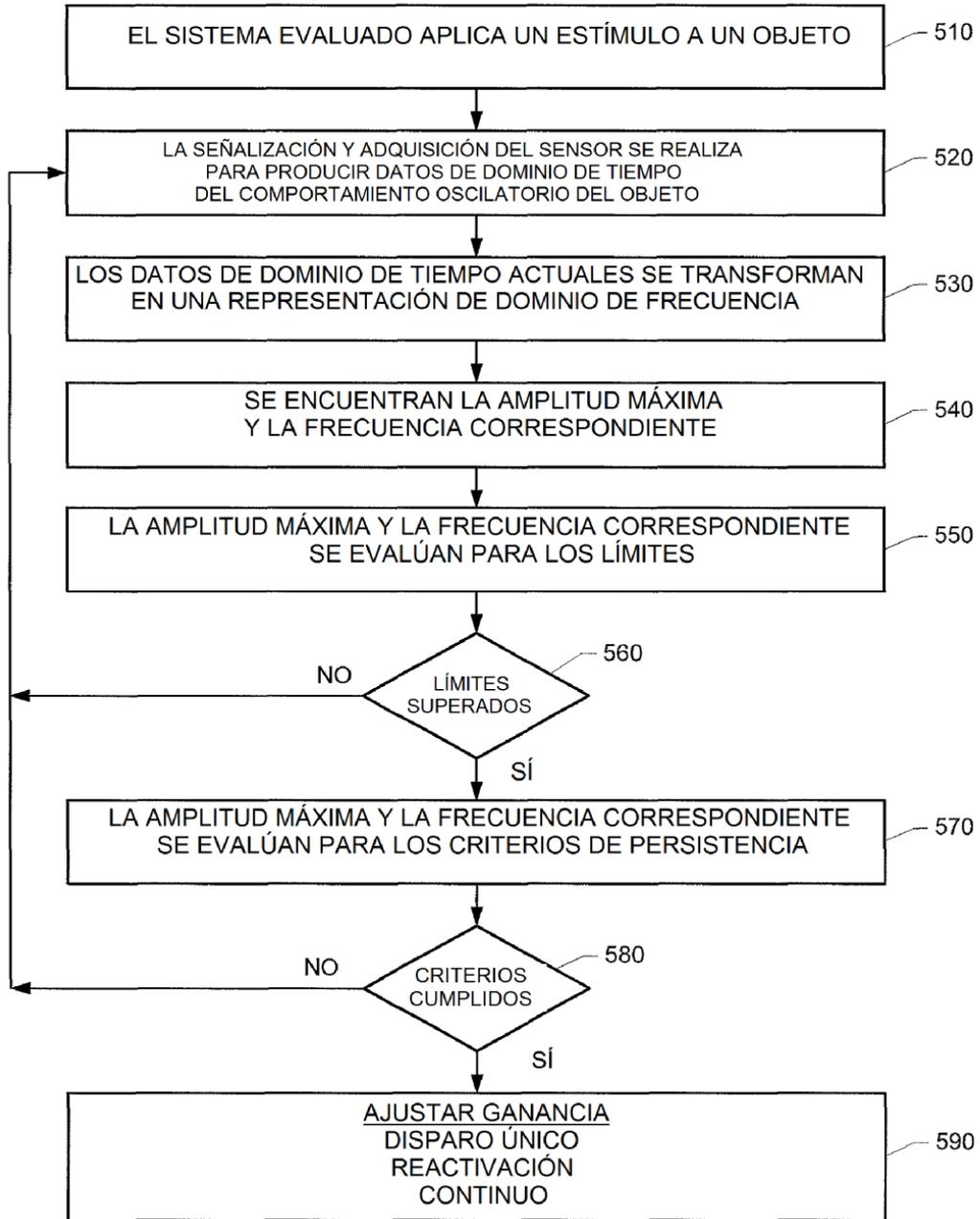


FIG. 6

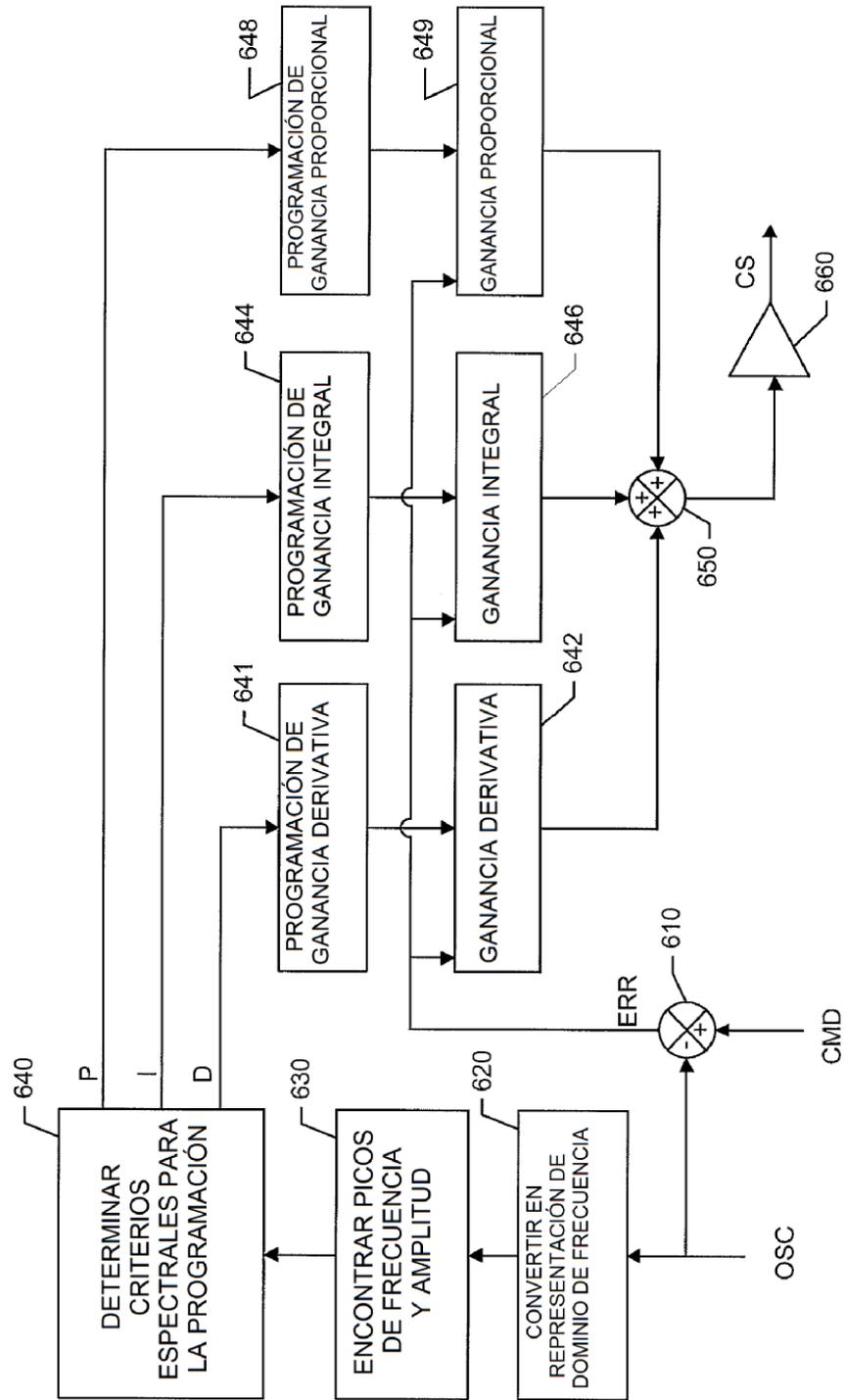


FIG. 7

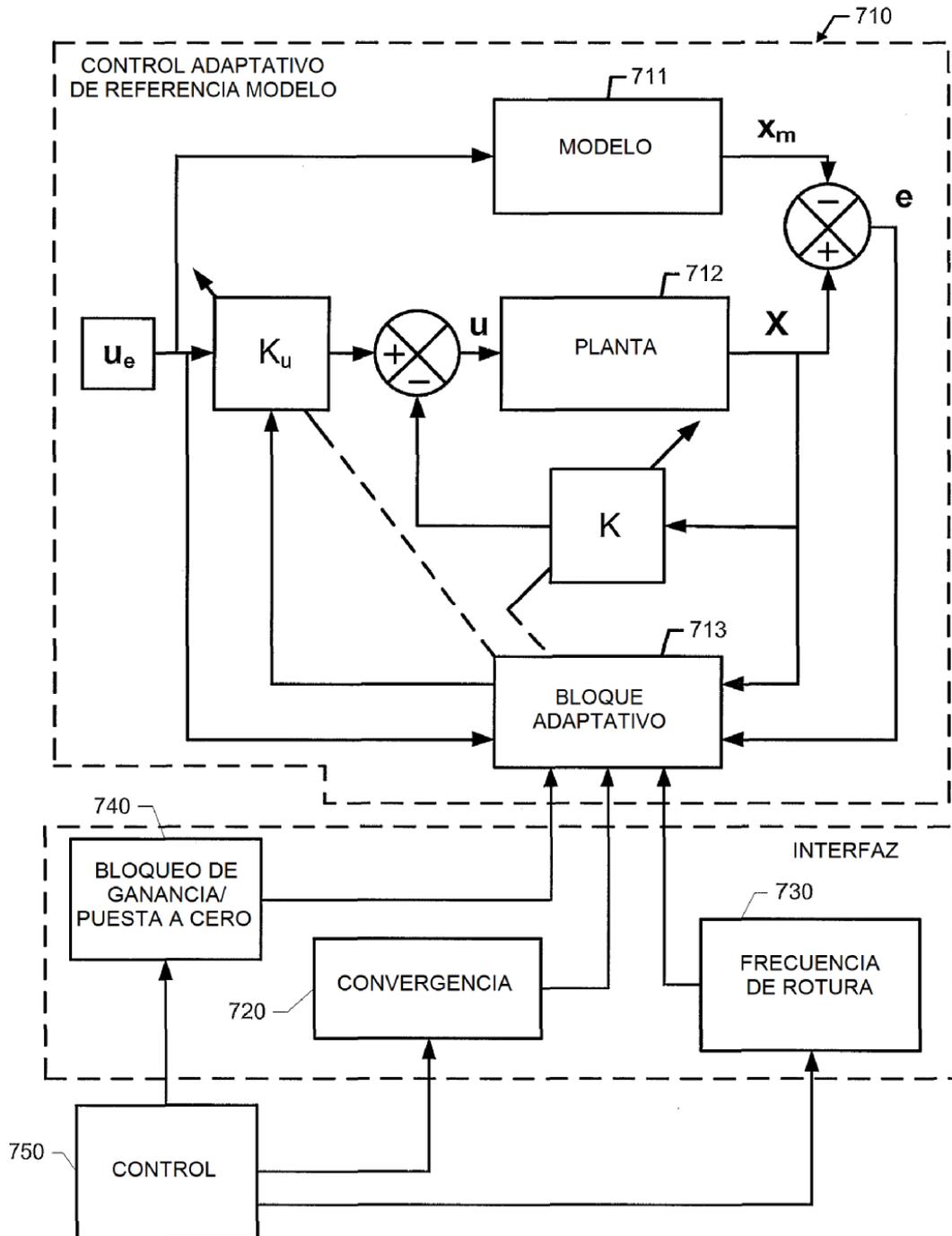


FIG. 8

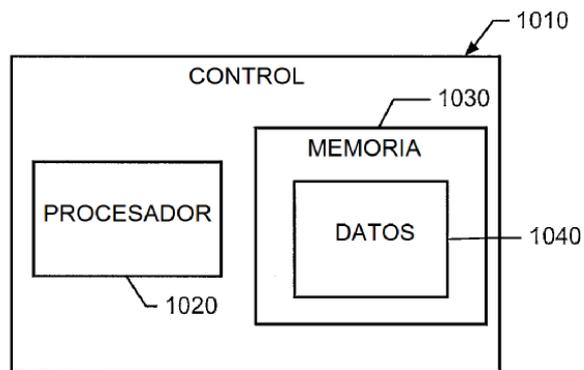
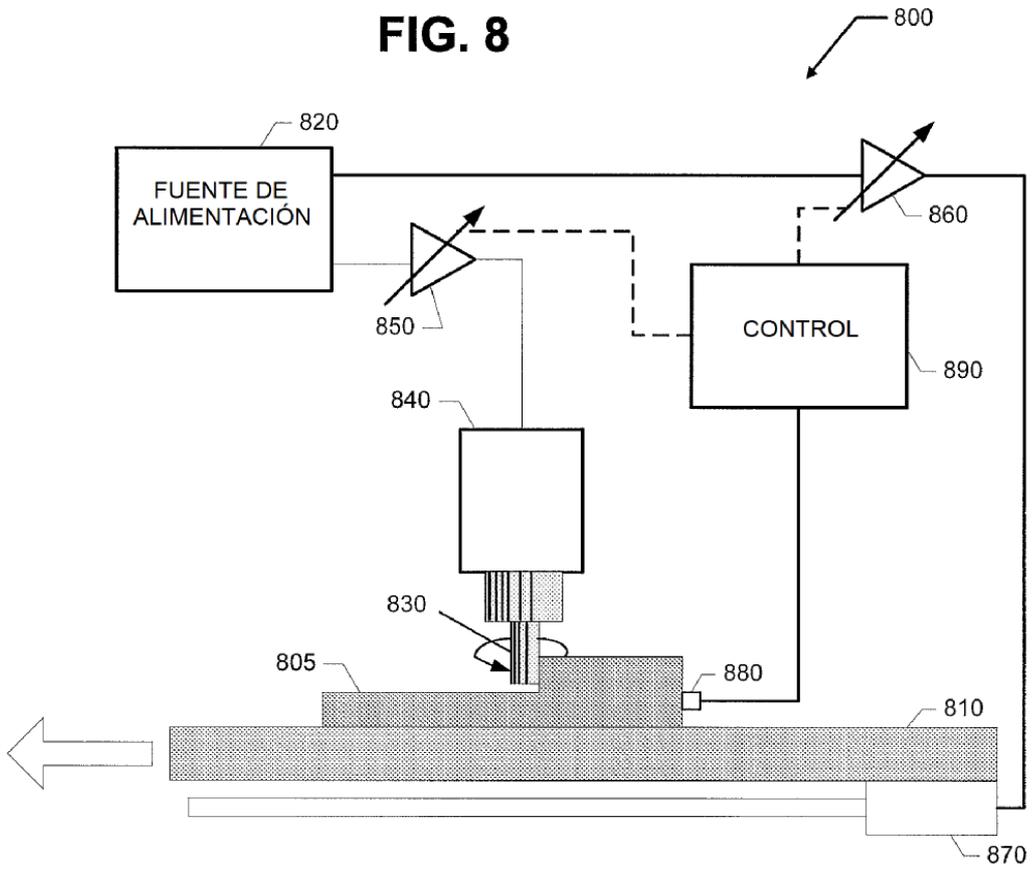


FIG. 10

FIG. 9

