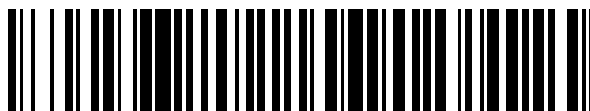


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 601 491**

51 Int. Cl.:

F16F 15/00 (2006.01)

G05D 19/02 (2006.01)

G05B 13/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.11.2011** **PCT/FR2011/052656**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.05.2012** **WO12066233**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.11.2011** **E 11794820 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.06.2016** **EP 2641134**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de control activo de vibraciones mecánicas mediante la aplicación de una ley de control constituida por un corrector central y por un parámetro de Youla**

30 Prioridad:

16.11.2010 FR 1059419

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.02.2017

73 Titular/es:

IXBLUE (100.0%)
34, rue de la Croix de Fer
78100 Saint-Germain-en-Laye, FR

72 Inventor/es:

VAU, BERNARD

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 601 491 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

Procedimiento y dispositivo de control activo de vibraciones mecánicas mediante la aplicación de una ley de control constituida por un corrector central y por un parámetro de Youla.

La presente invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo de control activo de vibraciones mecánicas mediante la aplicación de una ley de control constituida por un corrector central y por un parámetro de Youla.

Existen numerosos casos industriales de utilización de máquinas giratorias. Estas máquinas producen siempre vibraciones que son transmitidas a las estructuras materiales a las cuales están fijadas por medio de soportes de fijación que unen la máquina giratoria a su estructura material. El carácter giratorio de las máquinas antes citadas conduce a que el espectro de vibraciones transmitidas presente picos a frecuencias proporcionales a la velocidad de rotación del eje giratorio. Estas vibraciones son generadas frecuentemente por el desequilibrio del eje giratorio, es decir, un defecto de equilibrio del eje giratorio. En el dominio frecuencial, los picos observados en el espectro de las vibraciones transmitidas tienen unas frecuencias en hertzios iguales a la velocidad de rotación del eje en revolución/segundo o a sus múltiplos (armónicos).

La reducción de las vibraciones se ha obtenido durante largo tiempo por la aplicación de métodos pasivos. Es por ello que, en general, la máquina giratoria está fijada a la estructura material por medio de un soporte que comprende uno/unos tacos elásticos que tienen un efecto de amortiguación pasiva. No obstante, por razones de solidez de la fijación, no es posible hacer que estos tacos sean muy flexibles y, por tanto, muy amortiguadores, lo que conlleva necesariamente una limitación del aislamiento producido por estos tacos frecuentemente contruidos de elastómero.

El documento "Atténuation des ondulations de couple sur simulateurs de mouvements" de Sophie Glévarec (Ponchaud) y Bernard Vau, Conferencia Mecatrónica, SupMéca, Saint-Ouen, 15 de diciembre de 2009, presenta un medio de controlar vibraciones mecánicas.

La presente invención describe una aplicación particular de control activo en el marco del aislamiento vibratorio de las máquinas giratorias, siendo conocida o pudiendo ser determinada o variar la velocidad de rotación del eje de la máquina.

Un ejemplo de utilización típica es el del aislamiento de una carlinga de avión con respecto a las vibraciones generadas por los desequilibrios de los motores. No obstante, se puede utilizar la invención en cualquier otro campo en el que una máquina giratoria cree perturbaciones mecánicas vibratorias que pueden transmitirse a una estructura material a la que está unida la máquina giratoria y que se desea atenuar o suprimir.

Existen dos grandes esquemas de principio de estructuras de control activo de sistemas materiales.

En primer lugar, la estructura de precompensación ("feedforward"). Esta estructura necesita un accionador, un sensor de error a nivel del cual se busca anular la vibración, un controlador y una señal de referencia, correlacionada con la señal a anular. Esta estructura ha dado lugar particularmente a una serie de algoritmos basados en los mínimos cuadrados (LMS o "least mean square"): Fx LMS, FR-LMS cuyo objetivo es minimizar en el sentido de los mínimos cuadrados la señal procedente del sensor de error, y esto en función de la señal de referencia.

En segundo lugar, la estructura de retroacción ("feedback"). Esta estructura no necesita una señal de referencia tal como para la estructura de precompensación. Se encuentra uno entonces en una estructura de retroacción clásica y se pueden utilizar todas las herramientas de la automática clásica (medición de la robustez, análisis de la estabilidad, prestaciones). En particular, se puede efectuar un análisis de robustez del sistema en bucle con respecto a la variación de función de transferencia de los elementos del sistema mecánico. Se puede estudiar asimismo el comportamiento frecuencial del sistema, no sólo a la frecuencia de rechazo de la perturbación, sino también a las otras frecuencias. Es esta estructura de retroacción la que es la base de la presente invención.

Para más información sobre estos dos tipos de control activo, se puede mencionar la obra de referencia "Signal processing for active control" de S-J. Elliott, Academic Press, San Diego (2001).

Por tanto, en el marco de un aislamiento vibratorio activo motor-estructura material se propone utilizar un control activo con un accionador destinado a combatir las vibraciones producidas por la máquina giratoria y que está instalada en relación con el soporte de fijación de la máquina giratoria a la estructura material sobre la cual está instalada, pudiendo este accionador ser colocado en serie o en paralelo con el soporte. Preferentemente, el accionador es electromecánico y la señal de control del accionador es eléctrica, y existen varias tecnologías, incluidas las electrodinámicas o las piezoeléctricas, entre otras. En otras modalidades, el accionador aplica un fluido, como un aceite, del cual se hace variar la presión en función de una señal de control. En todo caso, un ordenador produce inicialmente una señal de control que es eléctrica, del tipo digital o analógica, y que, por tanto, será transmitida directamente al accionador o convertida en señal de fluido por unos convertidores de señal eléctrica hacia fluido (oleo/hidro). Se comprende que, en este último caso, la modelización y estimulación/cálculos que se verán tendrán en cuenta esta conversión. Se utiliza asimismo un sensor destinado a medir las vibraciones y a nivel

del cual las vibraciones se reducirán por la aplicación del corrector activo. Este sensor es en general un acelerómetro. La posición particular del sensor podrá ser optimizada en función del contexto y, en particular, del comportamiento mecánico de todos los elementos materiales en cuestión. Si bien la mayor parte del tiempo el sensor estará en relación directa con el soporte de fijación, sobre éste o, preferentemente, sobre la estructura material, en otros casos es colocado en otras posiciones sobre la máquina giratoria o a más distancia sobre la estructura material. Finalmente, el objetivo del aislamiento vibratorio activo propuesto es reducir la intensidad de las vibraciones a nivel de la estructura material a la que está fijada la máquina giratoria por medio de soportes.

Por tanto, la invención se refiere a un procedimiento de control activo de vibraciones mecánicas mediante la aplicación de una ley de control constituida por un corrector central y por un parámetro de Youla que permite la atenuación de perturbaciones vibratorias mecánicas esencialmente monofrecuenciales creadas en una estructura material de un sistema material por lo menos por una máquina giratoria fijada por un soporte a dicha estructura material y que gira a una velocidad de rotación determinable, estando la frecuencia de la perturbación vibratoria relacionada con la velocidad de rotación de la máquina giratoria y variando en función de las variaciones de dicha velocidad de rotación, estando por lo menos un accionador mecánico dispuesto entre la máquina giratoria y la estructura material, así como por lo menos un sensor de vibración que produce unas señales $y(t)$ o $Y(t)$, según un caso monovariable o multivariable, respectivamente, correspondiendo la utilización de un sensor a un caso monovariable y correspondiendo la utilización de varios sensores a un caso multivariable, pudiendo el/los accionadores estar en serie en el soporte o en paralelo con el soporte, estando el/los sensores unidos a por lo menos un ordenador que controla el/los accionadores, comprendiendo el ordenador unos medios de cálculo de corrección que producen unas señales de control $u(t)$ o $U(t)$, según el caso monovariable o multivariable, respectivamente, para el/los accionadores en función, por una parte, de mediciones del/de los sensores y, por otra parte, de un parámetro de frecuencia de perturbación vibratoria, estando los medios de cálculo configurados según una ley de control de corrección correspondiente a una modelización por bloques del sistema, siendo dichos bloques, por una parte, los del corrector central y, por otra parte, un bloque de parámetro de Youla, siendo tal la modelización que sólo el parámetro de Youla tenga coeficientes dependientes de la frecuencia de perturbación vibratoria en dicha ley de control de corrección, teniendo el corrector central unos coeficientes fijos, teniendo el parámetro de Youla la forma de un filtro de respuesta impulsional infinita, y cuando tiene lugar una fase previa de concepción, se determinan y se calculan, por una parte, los parámetros del modelo de la parte del sistema material que comprende el/los accionadores, soportes y sensores por estimulación del/de los accionadores y mediciones por el/los sensores, y, por otra parte, la ley de control de corrección en función de frecuencias determinadas de perturbaciones vibratorias, y se almacenan en una memoria del ordenador por lo menos los coeficientes variables del parámetro de Youla, preferentemente en una tabla,

y cuando tiene lugar una fase de utilización en tiempo real:

- se determina la frecuencia de la perturbación vibratoria corriente,
- se calcula la ley de control de corrección, que comprende el corrector central con el parámetro de Youla, con el ordenador utilizando para el parámetro de Youla los coeficientes memorizados de una frecuencia de perturbación determinada correspondiente a la frecuencia de perturbación corriente.

En diversos modos de realización de la invención, se emplean los medios siguientes, que se pueden utilizar solos o según todas las combinaciones técnicas posibles:

- el ordenador es un ordenador digital, en particular de procesador de señales digitales (DSP),
- los parámetros del corrector central se almacenan asimismo en una memoria del ordenador cuando tiene lugar la fase previa de concepción,
- el sensor de vibraciones está sobre la estructura material,
- el sensor de vibraciones está en la interfaz entre el soporte de fijación y la estructura material,
- el sensor de vibraciones está sobre la estructura material en relación directa con el soporte,
- el sensor de vibraciones está sobre el soporte,
- se utiliza un ordenador para cada máquina giratoria,
- se utiliza un ordenador para varias máquinas giratorias, siendo los cálculos de corrección para cada máquina giratoria (cálculos paralelos independientes) independientes unos de otros,
- la estructura material comprende más de una máquina giratoria,
- cada una de las máquinas giratorias comprende su corrector, accionador(es) y sensor(es),

- el accionador mecánico es un accionador electromecánico, siendo eléctrico el control del accionador,
- el accionador mecánico es un accionador hidromecánico, siendo hidráulico el control del accionador, estando un convertidor que produce una orden eléctrica dispuesto entre el accionador y el ordenador,
- el sistema material es una aeronave,
- la máquina giratoria es un motor de aeronave,
- el motor de aeronave es un motor de propulsión,
- el motor de aeronave es un motor de generación de energía, incluida la eléctrica,
- la aeronave es un avión, un helicóptero,
- la estructura material es una célula de aeronave,
- la estructura material es un ala de avión,
- el sensor es un acelerómetro,
- el soporte comprende un aislador vibratorio,
- el aislador vibratorio es del tipo "silentbloc",
- en el caso monovariable, en la fase de concepción:
 - a) - en un primer tiempo se utiliza un modelo lineal del sistema material en forma de una función de transferencia racional discreta, y se determina y se calcula dicha función de transferencia por estimulación del sistema material por el(los) accionador(es) y mediciones por el sensor y después aplicación de un procedimiento de identificación de sistema lineal con las mediciones y el modelo,
 - b) - en un segundo tiempo se aplica un corrector central aplicado al modelo del sistema material determinado y calculado en el primer tiempo, teniendo el corrector central la forma de un corrector RS de dos bloques $1/So(q^{-1})$ y $Ro(q^{-1})$, en el corrector central, produciendo el bloque $1/So(q^{-1})$ la señal $u(t)$ y recibiendo como entrada la señal de salida invertida del bloque $Ro(q^{-1})$, recibiendo dicho bloque $Ro(q^{-1})$ como entrada la señal $y(t)$ correspondiente a la suma de la perturbación vibratoria $p(t)$ y la salida de la función de transferencia del modelo del sistema material, y se determina y se calcula el corrector central,
 - c) - en un tercer tiempo se añade un parámetro de Youla al corrector central para formar la ley de control de corrección, teniendo el parámetro de Youla la forma de un bloque $Q(q^{-1})$, un filtro de respuesta impulsional infinita, siendo $Q(q^{-1}) = \frac{\beta(q^{-1})}{\alpha(q^{-1})}$, siendo α , β unos polinomios en q^{-1} añadidos al corrector central RS, recibiendo dicho bloque $Q(q^{-1})$ de Youla una estimación de perturbación obtenida por cálculo a partir de las señales $u(t)$ y $y(t)$ y en función de la función de transferencia del modelo del sistema material y siendo la señal de salida de dicho bloque $Q(q^{-1})$ de Youla sustraída de la señal invertida de $Ro(q^{-1})$ enviada a la entrada del bloque $1/So(q^{-1})$ del corrector central RS, y se determina y se calcula el parámetro de Youla en la ley de control de corrección que comprende el corrector central al que está asociado el parámetro de Youla por lo menos por una frecuencia de perturbación vibratoria $p(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de la perturbación vibratoria a atenuar,

y en la fase de utilización, en tiempo real:

- se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar,
- se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, que comprende el corrector RS con el parámetro de Youla, utilizando para el parámetro de Youla los coeficientes que se han calculado para una frecuencia de perturbación vibratoria correspondiente a la frecuencia corriente de perturbación vibratoria a atenuar, siendo fijos los coeficientes $Ro(q^{-1})$ y $So(q^{-1})$,
- en la fase de concepción se efectúan las operaciones siguientes:
 - a) - en el primer tiempo se excita el sistema material aplicando al accionador o accionadores una señal de excitación cuya densidad espectral es sustancialmente uniforme sobre una banda de frecuencia útil,

b) - en el segundo tiempo se determinan y se calculan los polinomios $Ro(q^{-1})$ y $So(q^{-1})$ del corrector central de manera que dicho corrector central sea equivalente a un corrector calculado por colocación de los polos del bucle cerrado en la aplicación del corrector central a la función de transferencia del modelo del sistema material,

c) - en el tercer tiempo se determinan y se calculan el numerador y el denominador del bloque $Q(q^{-1})$ de Youla en el seno de la ley de control de corrección por lo menos por una frecuencia de perturbación vibratoria $p(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de perturbación vibratoria a atenuar, y esto en función de un criterio de atenuación, expresándose el bloque $Q(q^{-1})$ en forma de una relación $\beta(q^{-1})/\alpha(q^{-1})$, siendo α, β unos polinomios en q^{-1} , con el fin de obtener unos valores de coeficientes de polinomios $\alpha(q^{-1})$ y $\beta(q^{-1})$ para la/cada una de las frecuencias, realizándose el cálculo de $\beta(q^{-1})$ y $\alpha(q^{-1})$ por la obtención de una función de transferencia discreta $Hs(q^{-1})/\alpha(q^{-1})$ resultante de la discretización de una célula del segundo orden continuo, calculándose el polinomio $\beta(q^{-1})$ por la resolución de una ecuación de Bézout,

y en la fase de utilización, en tiempo real, se efectúan las operaciones siguientes: se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar y se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, corrector central de coeficientes fijos con un parámetro de Youla de coeficientes variables, para producir la señal $u(t)$ enviada al/a los accionadores en función de las mediciones $y(t)$ del sensor y utilizando para el bloque $Q(q^{-1})$ de Youla los valores de los coeficientes de los polinomios $\alpha(q^{-1})$ y $\beta(q^{-1})$ determinados y calculados para una frecuencia determinada correspondiente a la frecuencia corriente,

- se utiliza para el modelo del sistema material una función de transferencia de la forma:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

en la que d es el número de periodos de muestreo de retardo del sistema, B y A son polinomios en q^{-1} de la forma:

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 \cdot q^{-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb}$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na}$$

siendo b_i y a_i unos escalares, y siendo q^{-1} el operador retardo de un periodo de muestreo, y el cálculo de la estimación de perturbación vibratoria se obtiene mediante la aplicación de la función $q^{-d}B(q^{-1})$ a $u(t)$ y sustracción del resultado de la aplicación de $y(t)$ a la función $A(q^{-1})$,

- para el tiempo b) se determinan y se calculan los polinomios $Ro(q^{-1})$ y $So(q^{-1})$ del corrector central por un método de colocación de los polos del bucle cerrado,

- en el caso mono y multivariable, en la fase de concepción:

a) - en un primer tiempo se utiliza un modelo lineal del sistema material en forma de representación de estado de bloques matriciales H, W, G y $q^{-1} \cdot I$, siendo G una matriz de transición, siendo H una matriz de entrada, siendo W una matriz de salida e I la matriz identidad, pudiendo expresarse dicha representación de estado por una ecuación de recurrencia:

$$X(t+Te) = G \cdot X(t) + H \cdot U(t)$$

$$Y(t) = W \cdot X(t)$$

siendo $X(t)$: vector de estado, $U(t)$: vector de entradas, $Y(t)$: vector de salidas,

y se determina y se calcula dicho modelo del sistema material por estimulación del sistema material por el o los accionadores y mediciones por los sensores, y después aplicación de un procedimiento de identificación de sistema lineal con las mediciones y el modelo,

b) - en un segundo tiempo se aplica un corrector central aplicado al modelo del sistema material determinado y calculado en el primer tiempo, teniendo el corrector central la forma de observador de estado y retorno de estado estimado que expresa $\hat{X}$, un vector de estado del observador iterativamente en función de K_f , una ganancia del observador, K_c , un vector de retorno sobre el estado estimado, así como del modelo del sistema material determinado y calculado en el primer tiempo, o sea:

$$\hat{X}(t+Te) = (G - K_f \cdot W) \cdot \hat{X}(t) + H \cdot U(k) + K_f \cdot (Y(t+Te))$$

con una orden $U(t) = -K_c \cdot \hat{X}(t)$, y se determina y se calcula dicho corrector central,

- c) - en un tercer tiempo se añade un parámetro de Youla al corrector central para formar la ley de control de corrección, teniendo el parámetro de Youla la forma de un bloque Q mono o multivariable, de matrices de estado A_Q , B_Q , C_Q , añadido al corrector central expresado asimismo en forma de representación de estado, bloque Q, cuya salida sustraída de la salida del corrector central produce la señal $U(t)$ y cuya entrada recibe la señal $Y(t)$ a la que se sustrae la señal $w \cdot \hat{X}(t)$, y se determina y se calcula el parámetro de Youla en la ley de control de corrección que comprende el corrector central al que está asociado el parámetro de Youla por lo menos por una frecuencia de perturbación vibratoria $P(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de perturbación vibratoria a atenuar,

y en la fase de utilización, en tiempo real:

- se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar,
- se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, que comprende el corrector central de coeficientes fijos con el parámetro de Youla de coeficientes variables, utilizando para el parámetro de Youla los coeficientes que se han calculado para una frecuencia de perturbación vibratoria correspondiente a la frecuencia corriente de perturbación vibratoria a atenuar,

es el vector de estado del parámetro de Youla en el instante t ,

- en la fase de concepción se efectúan las operaciones siguientes:
 - a) - en el primer tiempo se excita el sistema material aplicando a los accionadores unas señales de excitación cuya densidad espectral es sustancialmente uniforme sobre una banda de frecuencia útil, estando las señales de excitación no correlacionadas entre ellas,
 - b) - en el segundo tiempo se determina y se calcula el corrector central de manera que sea equivalente a un corrector con observador de estado y retorno sobre el estado, obteniéndose K_f por optimización cuadrática (LQ) y eligiéndose la ganancia de retorno de estado K_c para asegurar la robustez de la ley de control provista del parámetro de Youla, por medio de una optimización cuadrática (LQ),
 - c) - en el tercer tiempo se determinan y se calculan los coeficientes del bloque Q de Youla en el seno de la ley de control de corrección para por lo menos una frecuencia de perturbación vibratoria $P(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de perturbación vibratoria a atenuar en función de un criterio de atenuación, con el fin de obtener unos valores de coeficientes del parámetro de Youla para la/cada una de las frecuencias, y

en la fase de utilización, en tiempo real, se efectúan las operaciones siguientes:

- se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar y se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, corrector central de coeficientes fijos con parámetro de Youla de coeficientes variables, para producir la señal $U(t)$ enviada a los accionadores, en función de las mediciones $Y(t)$ de los sensores y utilizando para el parámetro de Youla los valores de los coeficientes determinados y calculados para una frecuencia determinada correspondiente a la frecuencia corriente,
- la aplicación está adaptada a un conjunto de frecuencias determinadas de perturbaciones vibratorias a atenuar y se repite el tiempo c) para cada una de las frecuencias determinadas y, en la fase de utilización, cuando ninguna de las frecuencias corresponde a la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar, se hace una interpolación a dicha frecuencia corriente para los valores de los coeficientes del bloque Q de Youla a partir de los valores de coeficientes de dicho bloque Q de Youla conocidos para las frecuencias determinadas,
- las señales son muestreadas a una frecuencia F_e y en el tiempo a) se utiliza una banda de frecuencia útil de la señal de excitación que es sustancialmente $[0, F_e/2]$,
- antes de la fase de utilización, se añade a la fase de concepción un cuarto tiempo d) de verificación de la estabilidad y la robustez del modelo del sistema material y de la ley de control de corrección, corrector central con parámetro de Youla, obtenidos anteriormente en los tiempos a) a c), haciendo una simulación de la ley de control de corrección obtenida en los tiempos b) y c) aplicada al modelo del sistema material obtenido en el tiempo a) para la/las frecuencias determinadas, y cuando no se respeta un criterio predeterminado de estabilidad y/o robustez, se reitera por lo menos el tiempo c) modificando el criterio de atenuación,

- la fase de concepción es una fase previa y se efectúa una vez, previamente a la fase de utilización, con memorización de los resultados de las determinaciones y cálculos para su utilización en la fase de utilización,
- la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar se determina a partir de la medición de la velocidad de rotación de la máquina giratoria,
- el procedimiento se utiliza para la atenuación de una sola frecuencia de perturbación vibratoria mecánica a la vez,
- el procedimiento se utiliza para la atenuación de dos o más frecuencias de perturbaciones vibratorias mecánicas a la vez.

El ordenador es un ordenador programable y la invención se refiere asimismo a un soporte de instrucciones que permite controlar directa o indirectamente el ordenador para que funcione según la invención y, en particular, en tiempo real en la fase de utilización.

La invención se refiere asimismo a una aplicación de un sistema corrector activo con corrector central y parámetro de Youla a la atenuación de perturbaciones vibratorias mecánicas basado en los métodos presentados.

La invención se refiere asimismo a un dispositivo de atenuación de perturbaciones vibratorias que comprende unos medios materiales específicamente estructurados y configurados para la realización del procedimiento presentado. Más precisamente, la invención se refiere en particular a un dispositivo que comprende unos medios de control activo de vibraciones mecánicas mediante la aplicación de una ley de control constituida por un corrector central y por un parámetro de Youla, que permite la realización del procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores para la atenuación de perturbaciones vibratorias mecánicas esencialmente monofrecuenciales creadas en una estructura material de un sistema material por lo menos por una máquina giratoria fijada por un soporte a dicha estructura material y que gira a una velocidad de rotación determinable, estando la frecuencia de la perturbación vibratoria relacionada con la velocidad de rotación de la máquina giratoria y variando en función de las variaciones de dicha velocidad de rotación, comprendiendo el dispositivo además por lo menos un accionador mecánico dispuesto entre la máquina giratoria y la estructura material, así como por lo menos un sensor de vibración que produce señales $y(t)$ o $Y(t)$, según un caso monovisible o multivariable, respectivamente, correspondiendo la utilización de un sensor a un caso monovisible y correspondiendo la utilización de varios sensores a un caso multivariable, pudiendo el/los accionadores estar en serie en el soporte o en paralelo con el soporte, estando el/los sensores unidos a por lo menos un ordenador del dispositivo que controla el/los accionadores, comprendiendo el ordenador unos medios de cálculo de corrección que producen unas señales de control $u(t)$ o $U(t)$, según el caso monovisible o multivariable, respectivamente, para el/los accionadores en función, por una parte, de mediciones del/de los sensores y, por otra parte, de un parámetro de frecuencia de perturbación vibratoria, comprendiendo el ordenador unos medios de cálculo configurados según una ley de control de corrección correspondiente a una modelización por bloques del sistema, siendo dichos bloques, por una parte, los del corrector central y, por otra parte, un bloque de parámetro de Youla, siendo tal la modelización que sólo el parámetro de Youla tiene coeficientes dependientes de la frecuencia de perturbación vibratoria en dicha ley de control de corrección, teniendo el corrector central unos coeficientes fijos, teniendo el parámetro de Youla la forma de un filtro de respuesta impulsional infinita, habiéndose determinado y calculado en una fase previa de concepción, por una parte, los parámetros del modelo de la parte del sistema material que comprende el/los accionadores, soportes y sensores por estimulación del/de los accionadores y mediciones por el/los sensores, y, por otra parte, la ley de control de corrección en función de frecuencias determinadas de perturbaciones vibratorias, y se almacenan en una memoria del ordenador por lo menos los coeficientes variables del parámetro de Youla, preferentemente en una tabla, permitiendo el dispositivo cuando tiene lugar una fase de utilización, en tiempo real, la determinación de la frecuencia de la perturbación vibratoria corriente y el cálculo de la ley de control de corrección, que comprende el corrector central con el parámetro de Youla, con el ordenador utilizando para el parámetro de Youla los coeficientes memorizados de una frecuencia de perturbación determinada correspondiente a la frecuencia de perturbación corriente.

El dispositivo comprende esencialmente unos medios de control activo de vibraciones mecánicas, por lo menos un accionador mecánico, por lo menos un sensor de vibración y por lo menos un ordenador.

La presente invención, sin que esté limitada por ello, se ejemplificará ahora con la descripción que sigue en relación con:

la figura 1, que representa esquemáticamente una primera posibilidad de montaje en serie del accionador con respecto al soporte de la máquina giratoria,

la figura 2, que representa esquemáticamente una segunda posibilidad de montaje en paralelo del accionador con respecto al soporte de la máquina giratoria,

la figura 3, que representa la aplicación de la ley de control con formación de bucle entre accionador y sensor en

relación con una máquina giratoria unida por un soporte a una estructura material,

la figura 4, que representa esquemáticamente el tiempo de la estimulación del sistema material real destinado a determinar y calcular el modelo en forma de una función de transferencia, enviándose al accionador una señal $u(t)$ de excitación de espectro que se aproxima a un ruido blanco,

la figura 5, que representa un sistema RST en bucle sobre el modelo del sistema material con $T=0$ y en el caso monovariable,

la figura 6, que representa un caso monovariable de corrector RST con $T=0$ y al que se ha añadido un parámetro de Youla, en bucle sobre el modelo del sistema material,

la figura 7, que representa un esquema completo de la ley de control de corrección con un corrector central de tipo RS al que se ha añadido un parámetro de Youla y que permite cálculos en tiempo real en la fase de utilización para la atenuación de perturbaciones vibratorias,

la figura 8, que representa un esquema de la transferencia sobre un sistema de 2 accionadores y dos sensores, es decir, en el caso multivariable,

la figura 9, que representa en forma de esquema de bloques el sistema a controlar, es decir, el modelo del sistema material de máquina giratoria en el caso multivariable,

la figura 10, que representa en forma de esquema de bloques el corrector central en el caso multivariable,

la figura 11, que representa en forma de esquema de bloques el corrector central aplicado al modelo del sistema material en el caso multivariable,

la figura 12, que representa en forma de esquema de bloques la ley de control de corrección, corrector central + parámetro de Youla, aplicado al modelo del sistema material en el caso multivariable, y

la figura 13, que representa en forma de esquema de bloques la ley de control de corrección, corrector central + parámetro de Youla, tal como se utiliza en tiempo real para la atenuación de la perturbación vibratoria, en el caso multivariable.

En la continuación de la descripción se presenta un dispositivo de control activo de vibración para el aislamiento activo de máquinas giratorias. La máquina giratoria 1 está unida a una estructura material 5 por medio de uno o varios soportes 2 de fijación que comprenden o no unos medios de amortiguación mecánica de las vibraciones de tipo "silentbloc" u otro. El dispositivo está constituido por lo menos por un sensor 4 y por uno o varios accionadores 3 integrados en el/los soportes de la máquina giratoria, véase el montaje en serie de la figura 1, o en paralelo con el/los soportes de la máquina giratoria, véase el montaje paralelo de la figura 2.

En las figuras 1 y 2, el esquema se ha simplificado con un solo accionador y un solo sensor para el soporte único representado. En la práctica, la máquina giratoria puede estar unida a la estructura material por varios soportes y cada soporte puede comprender uno o varios accionadores. Preferentemente, se utiliza un sensor por soporte, sensor que está sobre la estructura material, pero en relación directa con el soporte, por ejemplo sobre el medio de fijación del soporte a la estructura material. El soporte es en general un taco pasivo amortiguador. En unas variantes se utiliza un montaje serie-paralelo de accionadores sobre un mismo soporte.

Los accionadores son controlados por un ordenador configurado con una ley de control que elabora señales de control a partir de la señal recibida del/de los sensores y en función de la frecuencia de la perturbación vibratoria que se busca reducir o suprimir y que está en relación con la velocidad de rotación de la máquina giratoria. Se tomará el caso de un ordenador digital con muestreo de señales analógicas adquiridas y conversiones hacia el estado analógico, funcionando los sensores y accionadores habitualmente en analógico, pudiendo la información de frecuencia de la perturbación vibratoria y/o de velocidad de rotación de la máquina giratoria ser inicialmente analógica o digital.

Se debe observar que en algunas figuras se ha utilizado el término "conjunto (electro)mecánico" para significar que el sistema material con la máquina giratoria, el/lo soportes de fijación a la estructura material y el sensor, comprende un accionador preferentemente de control eléctrico, pero este control puede ser como variante de tipo fluídico.

Se explicará ahora la manera en la que se ha llegado a la ley de control propuesta y su aplicación a diversos casos. En particular, se describirá la estructura de la ley de control, así como la metodología destinada a regular esta ley de control.

El esquema de aplicación de la ley de control que vuelve a establecer una formación de bucle entre accionador(es) y sensor(es) en relación con una máquina giratoria unida por un soporte a una estructura material está representado

en la figura 3. La señal de control del accionador se designa $u(t)$ y la señal procedente del sensor se denomina $y(t)$. El soporte puede ser más o menos complejo y corresponder a una o varias uniones mecánicas entre la máquina giratoria y el soporte.

5 El objetivo es rechazar una perturbación vibratoria monofrecuencial cuya frecuencia se supone conocida gracias a la información sobre la velocidad de rotación de la máquina giratoria, por ejemplo dada por un taquímetro. En efecto, la frecuencia de la perturbación vibratoria corresponde a la frecuencia de rotación de la máquina giratoria o a un múltiplo de ésta.

10 Con el fin de sintetizar una ley de control se debe disponer de un modelo del sistema material constituido por los diversos elementos que lo conforman, es decir, de la máquina giratoria montada sobre la estructura material por medio de uno/varios soportes de fijación y los accionadores y sensores asociados. Este modelo debe presentarse en forma de una función de transferencia racional (es decir, un filtro de respuesta impulsional infinita) discreta, funcionando el ordenador en el periodo T_e (en segundos) y a la frecuencia $F_e=1/T_e$ (en hertzios). La aproximación
15 lineal del sistema se justifica habida cuenta del nivel de las señales en juego. La orden de la función de transferencia del modelo es de dimensión suficientemente reducida para no dar lugar a un volumen de cálculos demasiado grande, pero suficientemente grande para aproximar correctamente el modelo. Para ello, se debe evitar el sobremuestreo.

20 Esta función de transferencia describe el comportamiento del sistema material entre los puntos $u(t)$ señal de control del accionador e $y(t)$ señal medida por el sensor fuera de cualquier formación de bucle.

Si se plantea q^{-1} , el operador retardo, la función de transferencia buscada es de la forma:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

25 La identificación que permite calcular la función de transferencia para el sistema material considerado se realiza estimulando el sistema con una señal $u(t)$ cuyo espectro se aproxima al de una vibración de tipo ruido blanco sobre el intervalo de frecuencias $[0, F_e/2]$, siendo $F_e/2$ la frecuencia de Nyquist.

30 Una señal de excitación de este tipo puede ser producida, por ejemplo, por una SBPA (secuencia binaria pseudoaleatoria). En la práctica, se excita el accionador con una señal $u(t)$ próxima a un ruido blanco, como se representa en la figura 4.

35 Esta estimulación se debe efectuar en ausencia de vibración exterior perturbadora, es decir que la máquina giratoria debe estar parada. Todos los datos del ensayo $u(t)$ e $y(t)$ durante el tiempo de la prueba son registrados con el fin de ser explotados fuera de línea para el cálculo de la función de transferencia.

Los algoritmos de identificación de los sistemas lineales son numerosos en la literatura. Con el fin de tener una idea general de las metodologías utilizables, se puede hacer referencia, por ejemplo, a la obra de I.D. Landau:
40 "Commande des systèmes" (2002). Después de la obtención de la función de transferencia racional, la identificación debe ser validada con el fin de asegurarse de que el modelo obtenido es correcto. Existen diversos métodos de validación en función de las hipótesis emitidas sobre las perturbaciones que afectan al modelo (por ejemplo, prueba de la blancura del error de predicción). Se recomienda también validar el modelo por comparaciones entre resultados de simulación y el sistema real sometido a excitaciones monofrecuenciales (comparación sobre la
45 amplitud y la fase de las señales) en un intervalo de frecuencias correspondiente al intervalo de interés para el rechazo de las perturbaciones.

Después de la obtención de una función de transferencia correspondiente al modelo del sistema material y de la validación de ésta por medio de los útiles apropiados, se trata de sintetizar la ley de control que permite el rechazo
50 de una perturbación de frecuencia f variable.

La caracterización del nivel de rechazo de la perturbación mecánica, vibración, que actúa sobre el sistema se hace por medio de la función de sensibilidad directa del sistema en bucle designada S_{yp} .

55 Se supone que la ley de control es del tipo RST con $T=0$, que es la forma de implantación más general de un corrector monovariante. Se puede entonces esquematizar el sistema en bucle por el bloque del diagrama de la figura 5. En esta figura, el bloque

$$\frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

60 corresponde a la función de transferencia del sistema material descrita más arriba.

La señal $p(t)$ es el equivalente de la perturbación vibratoria que se ha desviado a la salida del sistema, sin pérdida de generalidad.

5 Se puede definir la función de sensibilidad directa S_{yp} como la función de transferencia entre la señal $p(t)$ e $y(t)$ señal de sensor. Esta función de transferencia describe el comportamiento del bucle cerrado que se refiere al rechazo de la perturbación mecánica vibratoria.

10 En particular, la obtención de esta función de transferencia permite conocer a cualquier frecuencia la calidad de rechazo de perturbación.

Se muestra que esta función de transferencia se escribe:

$$S_{yp} = \frac{A(q^{-1})S(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1})} \quad (1)$$

15 Dado que el objetivo de la ley de control es permitir el rechazo de la perturbación a una frecuencia f_{pert} , es necesario que a dicha frecuencia el módulo de S_{yp} sea pequeño, en la práctica muy por debajo de 0 dB.

20 En el caso ideal, sería deseable que S_{yp} fuera la más baja posible a todas las frecuencias, pero este objetivo no es alcanzable debido al teorema de Bode-Freudenberg-Looze, que muestra que, si bien el sistema en bucle cerrado es asintóticamente estable y estable en bucle abierto, se tiene:

$$\int_0^{0.5 \cdot Fe} \log |S_{yp}(e^{-j2\pi f \cdot Fe})| df = 0$$

25 Esta ecuación significa que la suma de las áreas entre la curva del módulo de sensibilidad y el eje 0 dB tomadas con su signo es nula. Esto implica que la atenuación de la perturbación en una zona determinada de frecuencia conllevará necesariamente la amplificación de las perturbaciones en otras zonas de frecuencia.

30 Se ha visto más arriba que el denominador de S_{yp} se escribe $A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1})$. Los ceros de este denominador constituyen los polos del bucle cerrado.

35 El cálculo de los coeficientes de los polinomios $R(q^{-1})$ y $S(q^{-1})$ se puede realizar en particular por una técnica de colocación de polos. Esta técnica no es ni de lejos la única utilizable con el fin de sintetizar un corrector lineal. Se la emplea aquí. Vuelve a calcular los coeficientes de R y S especificando los polos del bucle cerrado, que son los ceros del polinomio P , o sea:

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1}). \quad (2)$$

40 Después de haber elegido estos polos, se calcula P y se resuelve la ecuación (2), que es una ecuación de Bézout.

La elección de los polos puede hacerse según diversas estrategias. Una de estas estrategias se propone más abajo.

La anulación del efecto de las perturbaciones $p(t)$ sobre la salida se obtiene a las frecuencias en las que

$$A(e^{-j2\pi f / Fe})S(e^{-j2\pi f / Fe}) = 0 \quad (3)$$

45 Asimismo, con el fin de calcular un corrector que rechace una perturbación a la frecuencia f_{pert} , se especifica a priori una parte de S imponiendo en la ecuación (2) que S sea factorizado por H_s polinomio de orden 2 para una perturbación monofrecuencial. Es decir:

$$H_s = 1 + h_1 \cdot q^{-1} + h_2 \cdot q^{-2} \quad (4)$$

Si se tiene

$$\begin{aligned} h_1 &= -2 \cos(2\pi \cdot f_{pert} / Fe) \\ h_2 &= 1 \end{aligned},$$

se introduce un par de ceros complejos no amortiguados a la frecuencia f_{pert} .

Eligiendo $h_2 \neq 1$ se introducen un par de ceros complejos de amortiguación no nula en S, amortiguación elegida en función de la atenuación deseada a una cierta frecuencia.

5 La ecuación de Bézout a resolver es entonces:

$$S'(q^{-1}) \cdot Hs(q^{-1}) \cdot A(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (5)$$

10 No obstante, la frecuencia de vibración a rechazar es en general variable, función particularmente de la velocidad de rotación del árbol motor. Esto da como resultado que el bloque Hs debería variar asimismo en función de la frecuencia de la perturbación vibratoria. En consecuencia, se tendría que resolver asimismo una ecuación de Bézout de la forma (5) y esto para cada frecuencia a rechazar.

15 Se ve que esto conduciría a un gran volumen de cálculos si fuera necesario implementar en tiempo real la resolución de esta ecuación. Por otra parte, se requeriría que todos los coeficientes S y R del corrector variaran durante un cambio de frecuencia. Esto lleva a un algoritmo muy pesado y no realizable industrialmente.

20 Con el fin de resolver este problema, se va a proponer a continuación una solución basada en el concepto de parametrización de Youla-Kucera.

Un sistema monovariante pilotado por un corrector de tipo RS al que se ha añadido el parámetro de Youla se presenta en la forma representada en la figura 6.

25 Un corrector de este tipo está basado en un corrector RS denominado central constituido por bloques $Ro(q^{-1})$ y $So(q^{-1})$. El parámetro de Youla es el bloque

$$Q(q^{-1}) = \frac{\beta(q^{-1})}{\alpha(q^{-1})},$$

30 siendo α, β unos polinomios en q^{-1} . Los bloques $q^{-d}B(q^{-1})$ y $A(q^{-1})$ son el numerador y el denominador de la función de transferencia del sistema a controlar y del cual se ha visto la forma de determinar y calcular los parámetros de la función de transferencia por estimulación e identificación.

El conjunto del corrector al que se ha llegado es equivalente a un corrector de tipo (R,S) cuyos bloques R y S son iguales a:

$$\begin{aligned} R(q^{-1}) &= Ro(q^{-1}) \cdot \alpha(q^{-1}) + A(q^{-1}) \cdot \beta(q^{-1}) \\ S(q^{-1}) &= So(q^{-1}) \cdot \alpha(q^{-1}) - q^{-d}B(q^{-1}) \cdot \beta(q^{-1}) \end{aligned} \quad (6)$$

Se supone que se ha constituido un corrector central y que éste estabiliza el sistema.

40 Sin parametrización de Youla, el polinomio característica Po del sistema, como se ve más arriba, se escribe:

$$Po(q^{-1}) = A(q^{-1}) \cdot So(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1}) \cdot Ro(q^{-1}) \quad (7)$$

Dotando al corrector del parámetro de Youla, el polinomio característico del sistema se escribe:

$$\begin{aligned} P(q^{-1}) &= A(q^{-1}) \cdot (So(q^{-1}) \cdot \alpha(q^{-1}) - q^{-d}B(q^{-1}) \cdot \beta(q^{-1})) + q^{-d}B(q^{-1}) \cdot (Ro(q^{-1}) \cdot \alpha(q^{-1}) + A(q^{-1}) \cdot \beta(q^{-1})) = Po(q^{-1}) \alpha(q^{-1}) \\ P(q^{-1}) &= Po(q^{-1}) \alpha(q^{-1}) \end{aligned}$$

Por tanto, se ve que los polos de Q (ceros de α) vienen a añadirse a los polos del bucle equipado solamente con el corrector centro cuyo polinomio característico es Po .

50 Por otra parte, se puede uno servir de la ecuación:

$$S(q^{-1}) = So(q^{-1}) \cdot \alpha(q^{-1}) - q^{-d}B(q^{-1}) \beta(q^{-1}) \quad (8)$$

con el fin de especificar el bloque S con un bloque de preespecificación Hs, es decir:

$$S'(q^{-1}) \cdot Hs(q^{-1}) = So(q^{-1}) \cdot \alpha(q^{-1}) - q^{-d}B(q^{-1}) \beta(q^{-1})$$

O bien:

$$S'(q^{-1}).Hs(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})\beta(q^{-1}) = So(q^{-1}).\alpha(q^{-1}) \quad (9)$$

que es asimismo una ecuación de Bézout que permite en particular encontrar β si α y Hs están definidos.

Se puede observar que la parametrización de Youla ya se ha utilizado con fines de rechazo de una perturbación sinusoidal: se trata del control de las vibraciones de una suspensión activa. El artículo correspondiente es: "Adaptive narrow disturbance applied to an active suspension - an internal model approach" (Automatica 2005), cuyos autores son I.D. Landau et al. En este último dispositivo, el parámetro de Youla tiene la forma de un filtro de respuesta impulsional finita (función de transferencia con un solo numerador), mientras que en la presente invención se verá que este parámetro de Youla tiene la forma de un filtro de respuesta impulsional infinita (función de transferencia con un numerador y un denominador). Además, en este artículo el cálculo de los coeficientes del parámetro de Youla se hace por medio de un dispositivo adaptativo, es decir que la información sobre la frecuencia de perturbación no es conocida, a diferencia de la presente invención en la que se conoce esta frecuencia a partir de mediciones, por ejemplo a partir de un cuentarrevoluciones, y en la que los coeficientes del parámetro de Youla están almacenados en tablas para su utilización en tiempo real. El dispositivo y el procedimiento utilizados en la invención permiten una robustez mucho más grande de la ley de control. En el caso de la presente invención, esto corresponde a una insensibilidad de la ley de control a las variaciones paramétricas del modelo del sistema, lo que, desde un punto de vista industrial, es un elemento capital.

Volviendo al corrector propuesto, sea S_{yp} la función de sensibilidad directa del sistema en bucle con el corrector central. La función de sensibilidad directa del sistema en bucle con un corrector provisto del parámetro de Youla se escribe:

$$S_{yp} = S_{ypo} - \frac{q^{-d}B(q^{-1})}{P(q^{-1})}Q(q^{-1}) \quad (10)$$

Así, a partir de un sistema en bucle que comprenda un corrector central que no tenga vocación de rechazar una perturbación sinusoidal a una frecuencia f_{pert} en particular, se puede añadir al corrector central el parámetro de Youla que modificará la función de sensibilidad S_{yp} , a la vez que se mantienen los polos del bucle cerrado provisto del corrector central, a los que se añadirán los polos de Q .

Se puede crear así una muesca en S_{yp} a la frecuencia f_{pert} .

Para ello, se calculan Hs y α de tal manera que la función de transferencia

$$\frac{Hs(q^{-1})}{\alpha(q^{-1})}$$

resulte de la discretización (método de Tustin con "prewarping") de un bloque continuo del segundo orden:

$$\frac{\frac{s^2}{(2\pi.f_{pert})^2} + \frac{\zeta_1.s}{(2\pi.f_{pert})} + 1}{\frac{s^2}{(2\pi.f_{pert})^2} + \frac{\zeta_2.s}{(2\pi.f_{pert})} + 1}$$

Se muestra que la atenuación M a la frecuencia f_{pert} viene dada por la relación:

$$M = 20 \log\left(\frac{\zeta_1}{\zeta_2}\right) \text{ siendo } \zeta_1 < \zeta_2 \quad (11)$$

Por otra parte, para una relación igual de

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2}$$

se muestra que la muesca en la función de sensibilidad Syp es tanto más cuanto mayor sea ζ_2 . No obstante, cuanto más grande es esta muesca, más deformada se encuentra |Syp| a las frecuencias distintas de f_{pert} . Asimismo, se tiene que encontrar un compromiso con el fin de crear una atenuación suficientemente grande alrededor de f_{pert} sin provocar una remontada demasiado importante de |Syp| a las otras frecuencias.

Se puede calcular a continuación β por resolución de la ecuación de Bézout (9).

Se muestra que esta elección de H_s y α crea una muesca en la función de sensibilidad Syp, al tiempo que ello mientras tiene un efecto casi despreciable a las otras frecuencias con respecto a Syp_o, aunque, por supuesto, se aplica el teorema de Bode Freudenberg Looze, lo que conduce fatalmente a una remontada del módulo de Syp con respecto a Syp_o a otras frecuencias distintas de f_{pert} .

Esta remontada de la función de sensibilidad puede disminuir la robustez del bucle cerrado mensurable por el margen de módulo (distancia al punto -1 del lugar del bucle abierto corregido en el plano de Nyquist) igual a la inversa del máximo de |Syp| sobre el intervalo de frecuencia $[0; F_e/2]$.

La ventaja principal de la utilización de la parametrización de Youla es que α es de orden 2:

$$\alpha(q^{-1}) = 1 + \alpha_1 \cdot q^{-1} + \alpha_2 \cdot q^{-2} \quad (12)$$

además, β es de orden 1

$$\beta(q^{-1}) = \beta_1 \cdot q^{-1} + \beta_2 \cdot q^{-2} \quad (13)$$

Así, el número de parámetros variantes en función de la frecuencia en la ley de control no es más que de 4. El cálculo de estos parámetros en función de la frecuencia vibratoria a rechazar puede efectuarse fuera de línea (resolución de la ecuación de Bézout (9)), cuando tiene lugar la fase previa de concepción de la ley de control, pudiendo memorizarse los parámetros en unas tablas del ordenador y recuperarse, en el curso del funcionamiento en tiempo real, en función de la frecuencia de la perturbación vibratoria y, por tanto, de la velocidad de rotación de la máquina giratoria, que puede obtenerse a partir de un cuentarrevoluciones.

La figura 7 proporciona el esquema completo de la ley de control obtenida.

Se explicará ahora una metodología destinada a la síntesis de la ley de control.

Se sintetiza el corrector central de tal modo que garantice unos márgenes de ganancia de por lo menos 10 dB y un margen de fase suficientemente importante.

Esto se puede obtener, por ejemplo, por una técnica de colocación de polos. Se han desarrollado diversas metodologías por investigadores tales como Philippe de Larminat en "Automática aplicada", 2ª edición, Hermès 2009, o Ioan Doré Landau en "Control de sistemas", Hermès 2002.

La colocación de los polos del bucle cerrado se hace colocando n polos dominantes mediante la utilización de, por ejemplo, la estrategia "ppa" descrita en la obra de Philippe de Larminat antes citada.

Se coloca asimismo cierto número de polos auxiliares en "alta frecuencia". Estos polos auxiliares tienen como papel aumentar la robustez de la ley de control. Esto puede hacerse por la estrategia "ppb" descrita en la obra de Philippe de Larminat antes citada.

Después de haber elegido así los polos del bucle cerrado, se expresa $P_o(q^{-1})$ y se resuelve la ecuación:

$$S_o(q^{-1}) \cdot A(q^{-1}) + q^{-d} B(q^{-1}) \cdot H_r(q^{-1}) \cdot R'_o(q^{-1}) = P_o(q^{-1}) \quad (14)$$

de incógnitas S_o y R'_o .

En la ecuación (14), H_r es un polinomio de preespecificación del polinomio R_o :

$$R_o = H_r \cdot R'_o$$

siendo $H_r = (1+q^{-1}) \cdot (1-q^{-1})$ con el fin de abrir el bucle de subordinación a la frecuencia 0 y a la frecuencia $F_e/2$.

Se ha obtenido así el corrector central.

Se calculan a continuación los polos del parámetro de Youla Q.

Para cada una de las velocidades de rotación f_{pert} de la perturbación a rechazar, se elige ζ_1, ζ_2 de la ecuación (11) de tal manera que se regule la profundidad de atenuación de Syp a dicha frecuencia, así como la anchura de la muesca a la frecuencia f_{pert} en Syp.

Se calculan Hs y α como se explica más arriba por discretización de una célula del segundo orden y se resuelve la ecuación de Bézout (9) con el fin de determinar β .

Este cálculo, que lleva a la determinación de α y β en función de f_{pert} , se efectúa sobre todo el intervalo de la gama de frecuencias de la perturbación vibratoria que es susceptible de reencontrarse y que se pretende rechazar. Por ejemplo, se pueden calcular α y β para frecuencias de perturbación vibratorias que varían de 2 Hz en 2 Hz cuando el periodo de muestreo es del orden de 500 Hz. Se comprende que la elección del paso de velocidad, fijo o diferente según la posición en la gama considerada, puede optimizarse en función de la amplitud de la atenuación.

El conjunto de los coeficientes de α y β en función de f_{pert} se memoriza a continuación en una tabla del ordenador.

Cuando el ordenador funciona en tiempo real, estos coeficientes se recuperan en función de la información sobre la velocidad de rotación de la máquina giratoria, y la frecuencia de la perturbación vibratoria corriente se deriva del valor de la velocidad de rotación corriente. A este fin, puede efectuarse una medición taquimétrica del eje de la máquina giratoria. Para valores de f_{pert} que no corresponden directamente a las frecuencias introducidas en la tabla, (f_{pert} entre dos valores de la tabla), se puede proceder a una estimación de los coeficientes de α y β procediendo a una interpolación entre dos valores conocidos, siempre que el paso de mallado frecuencial no sea demasiado grande.

Habiéndose sintetizado la ley de control, se pueden verificar la estabilidad y el nivel de robustez (margen de módulo $>0,5$) como una simulación del sistema en bucle así determinado y calculado con tentativa de rechazo de perturbación sobre toda la gama de frecuencias considerada. Si los resultados del rechazo no son aceptables, se vuelve sobre la concepción de la ley de control jugando sobre los coeficientes ζ_1, ζ_2 (profundidad y amplitud frecuencial del rechazo).

En lo que precede, se ha considerado un sistema provisto de un solo sensor y de un accionador o de un grupo de accionadores excitados por la misma señal de control. Una configuración de este tipo correspondería a un sistema denominado monovisible.

En la práctica, las máquinas giratorias están soportadas por varios soportes de fijación. Es entonces deseable reducir la intensidad de las vibraciones de cada uno de los soportes de fijación y colocar tantos sensores como soportes de fijación haya y controlar específicamente cada uno de los accionadores o grupos de accionadores de cada soporte de fijación.

Así, en lo que sigue se va a considerar el problema en el que el sistema está equipado con varios sensores y varios accionadores (o varios grupos de accionadores controlados por una misma señal de control).

Una primera solución sería utilizar el esquema de control anteriormente establecido para el canos monovisible y hacer un rebucle accionador-sensor uno a uno. Esta solución tiene el riesgo de proporcionar muy malos resultados, e incluso también una inestabilidad. En efecto, un accionador tendrá una influencia sobre todos los sensores.

Desde el punto de vista del experto en automatización, se encuentra uno en presencia de un problema multivariable (varias entradas y varias salidas acopladas).

Se pueden esquematizar y modelizar dichos sistemas multivariables y se proporciona en la figura 8, a título de ejemplo, un esquema de transferencia sobre un sistema 2×2 (2 accionadores, 2 sensores).

En este ejemplo de la figura 8, el sensor 1 es sensible a los efectos mecánicos del accionador 1 (AC1) y del accionador 2 (AC2).

Este sistema dado a título de ejemplo puede modelizarse por la matriz de funciones de transferencia siguiente:

$$\begin{bmatrix} y1(t) \\ y2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H11 & H12 \\ H21 & H22 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u1(t) \\ u2(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

O incluso, siempre en el caso (2×2)

$$\begin{bmatrix} y1(t) \\ y2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B11(q^{-1})}{A11(q^{-1})} & \frac{B12(q^{-1})}{A12(q^{-1})} \\ \frac{B21(q^{-1})}{A21(q^{-1})} & \frac{B22(q^{-1})}{A22(q^{-1})} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u1(t) \\ u2(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

La representación de un sistema multivariable por función de transferencia es de hecho poco práctica, prefiriéndose la representación de estado del mismo, que es una representación universal de los sistemas lineales (multivariables o no).

Sea

nu: el número de entradas del sistema (o sea, el número de accionadores o grupos de accionadores unidos conjuntamente)

ny: el número de salidas del sistema (o sea, el número de sensores)

n: el orden del sistema.

En lo que sigue se considera nu=ny, aunque esto no sea restrictivo, pudiendo aplicarse todo lo que sigue al caso nu>ny.

La representación de estado del sistema se escribe:

$$\begin{aligned} X(t+Te) &= G \cdot X(t) + H \cdot U(t) \\ Y(t) &= W \cdot X(t) \end{aligned} \quad (17)$$

X: vector de estado del sistema de tamaño (n*1)

U: vector de las entradas del sistema de tamaño (nu*1)

Y: vector de las salidas de tamaño (ny*1)

X(t): significa vector X en el instante t

X(t+Te): significa vector X en el instante t+Te (o decalaje de un periodo de muestreo Te).

Siendo:

G denominada matriz de transición de tamaño (n*n)

H matriz de entrada del sistema de tamaño (n*nu)

W matriz de salida del sistema de tamaño (ny*n)

Los coeficientes de las matrices G, H, W definen el sistema lineal multivariable.

La ley de control se basa en esta representación de estado; también es necesario disponer de un modelo del sistema material (máquina giratoria, soporte de fijación, accionadores, sensores, montados sobre la estructura material) a controlar, es decir, los coeficientes de las matrices G, H, W. La representación en esquema de bloques del modelo del sistema material a controlar se da en la figura 9.

Se obtienen estos coeficientes por un procedimiento de identificación, es decir, por estimulación del sistema material con vibraciones de espectro de tipo ruido blanco o que se aproximan a ellas, siendo excitados los nu accionadores por señales descorrelacionadas entre ellas.

Los datos obtenidos a nivel de los sensores son memorizados y explotados con miras a obtener una representación de estado del sistema utilizando unos algoritmos de identificación dedicados a los sistemas multivariables. Estos algoritmos son proporcionados, por ejemplo, en cajas de útiles de lógicos especializados en el dominio de la automática y lo mismo ocurre con los medios de validación del modelo.

Se supone que se ha obtenido ahora un modelo entradas-salidas del sistema en forma de representación de estado y que este modelo se ha validado. Se debe sintetizar ahora una ley de control que permita rechazar a nivel de cada uno de los sensores una perturbación vibratoria de frecuencia fpert.

Para ello, se van a generalizar el concepto de corrector central y el concepto de parametrización de Youla al caso multivariable en forma de estado.

Sea el sistema descrito por la representación de estado (17).

El corrector central se presenta en una forma observador de estado + retorno sobre el estado estimado, que puede expresarse por:

$$\hat{X}(t+Te) = G \cdot \hat{X}(t) + H \cdot U(t) + K_f \cdot (Y(t) - W \cdot \hat{X}(t)) \quad (18)$$

donde:

$\hat{X}$ es el vector de estado del observador de tamaño ($n \times 1$)
 K_f es la ganancia del observador de tamaño ($n \times n_y$)

Por tanto, se tiene

$$\hat{X}(t+Te) = (G - K_f \cdot W) \cdot \hat{X}(t+Te) + H \cdot U(k) + K_f \cdot (Y(t+Te)) \quad (19)$$

y el control se escribe:

$$U(t) = -K_c \cdot \hat{X}(t) \quad (20)$$

siendo K_c el vector de retorno sobre el estado estimado del sistema de tamaño ($n_u \times n$).

La representación en esquema de bloques del corrector central (observador y retorno de estado) se da en la figura 10.

Por analogía con el caso monovariable, P es el vector de las perturbaciones en las salidas, o sea:

$$P(t) = \begin{pmatrix} p_1(t) \\ \vdots \\ p_{n_y}(t) \end{pmatrix}$$

siendo p_i la perturbación en la salida i .

La representación en esquema de bloques del sistema provisto del corrector central se da en la figura 11.

Una estructura de corrección de este tipo es clásica en automática. En virtud de un principio denominado "principio de separación", los polos del bucle cerrado están constituidos por valores propios de $G - K_f \cdot W$ y valores propios de $G - H \cdot K_c$, o sea:

$$\text{eig}(G - K_f \cdot W) \cup \text{eig}(G - H \cdot K_c).$$

$\text{eig}(G - K_f \cdot W)$ se denominan: polos de filtrado y
 $\text{eig}(G - H \cdot K_c)$ se denominan: polos de control.

Así, la colocación de los polos del bucle cerrado provisto del corrector central puede hacerse eligiendo los coeficientes de K_f y K_c , que son los parámetros de regulación de esta estructura de corrección. El número de polos a colocar es de $2 \times n$.

Por tanto, se elige como corrector central este conjunto observador y retorno de estado estimado.

En el caso multivariable, se calcula K_t por una estrategia, por ejemplo, basada en la optimización cuadrática, denominada LQ, por ejemplo la estrategia "lq" de Philippe de Larminat desarrollada en la obra antes citada.

Así, la ecuación del corrector central (cálculo de recurrencia) deviene:

$$\hat{X}(t+Te) = (G - K_f \cdot W) \cdot \hat{X}(t) + H \cdot U(t) + K_f \cdot Y(t) \quad (22)$$

Quedan n polos por colocar (los polos de control $\text{eig}(G - H \cdot K_c)$). Siguiendo con lo que se ha hecho para el corrector monovariable, se elegirán estos polos como un conjunto de polos de alta frecuencia destinados a asegurar la robustez de la ley de control. Con el fin de calcular K_c , puede uno basarse asimismo en una optimización cuadrática, denominada LQ, por ejemplo la estrategia "lqb" desarrollada por Philippe de Larminat en la obra antes citada.

Una vez que se ha regulado el corrector central, queda por ver cómo se integra el parámetro de Youla en la ley de control, siendo siempre el objetivo rechazar las perturbaciones sinusoidales de frecuencia conocida f_{pert} a nivel de cada sensor, actuando para ello de modo que sólo varíen los coeficientes del parámetro de Youla cuando varía f_{pert} .

Se muestra que el parámetro de Youla se incorpora en la ley de control tal como se presenta en el esquema de la figura 12 (se puede hacer referencia, por ejemplo, al artículo siguiente: "From Youla-Kucera to identification, adaptive and nonlinear control", de Brian D.O. Anderson, Automatica, 1998).

El parámetro de Youla, Q , es a su vez un bloqueo multivariable cuya representación de estado puede escribirse:

$$X_Q(t + Te) = A_Q X(t) + B_Q (Y(t) - W \cdot \hat{X}(t)) \quad (23)$$

La ley de control se escribe entonces:

$$U(t) = -K_c \cdot X(t) - C_Q \cdot X_Q(t) \quad (24)$$

Vamos a mostrar ahora la manera de determinar y calcular los parámetros de Q con el fin de asegurar un rechazo de perturbaciones vibratorias de frecuencia conocida. En efecto, en el marco multivariable se puede expresar asimismo el parámetro de Youla en forma de estado, o sea:

$$X_Q(t + Te) = A_Q \cdot X_Q(t) + B_Q \cdot (Y(t) - W \cdot \hat{X}(t)) \quad (25)$$

Aquí $X_Q(t)$ es el vector del parámetro de Youla en el instante t .

Por otra parte, se sabe que la propiedad fundamental de la parametrización de Youla es que los polos del bucle cerrado se conservan por la adición del parámetro de Youla, polos a los cuales se añaden los polos del parámetro de Youla.

Lo que se quiere decir que los polos del bucle cerrado serán:

$$\text{eig}(G - K_f \cdot W) \cup \text{eig}(G - H \cdot K_c) \cup \text{eig}(A_Q)$$

Se puede buscar expresar A_Q de tal manera que ésta sea una diagonal por bloques, por ejemplo de la forma

$$A_Q = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (26)$$

Es decir que A_Q está constituida por n_y bloques

$$A_{Q_i} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 \\ -\alpha_2 & 0 \end{bmatrix}$$

puestos en diagonal.

Queda claro entonces que los valores propios de A_Q son las raíces del polinomio $\alpha(q^{-1}) = 1 + \alpha_1 \cdot q^{-1} + \alpha_2 \cdot q^{-2}$ con una multiplicidad igual a n_y .

Se puede elegir:

$$C_Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (27)$$

Es decir que C_Q está constituida por n_y bloques $C_{Qi} = [1 \ 0]$ puestos en diagonal.

5 Y, finalmente, la matriz B_Q es de tamaño $2 \times n_y \times n_y$.

Por tanto, quedan por determinar los coeficientes de B_Q .

10 Apoyándose en la publicación "From Youla-Kucera to identification, adaptive and nonlinear control" antes citada, y planteando:

$$Q(z) = C_Q (z \cdot I - A_Q)^{-1} B_Q \quad (28)$$

15 I, matriz unidad y z, la variable de la transformada en Z,

$$\begin{aligned} XX(z) &= K_c \cdot (zI - G + H \cdot K_c)^{-1} \cdot K_f \\ YY(z) &= W \cdot (zI - G + H \cdot K_c)^{-1} \cdot K_f \\ NN(z) &= W \cdot (zI - G + H \cdot K_c)^{-1} \cdot H \\ DD(z) &= -K_c \cdot (zI - G + H \cdot K_c)^{-1} \cdot H \end{aligned} \quad (29)$$

Se tiene la relación:

$$20 \quad U(t) = -[XX(z) + DD(z) \cdot Q(z)] \cdot [YY(z) - NN(z) \cdot Q(z)]^{-1} \cdot Y(t) \quad (30)$$

Según el principio de modelo interno de Wonham (véase, por ejemplo, "The internal model principle for linear multivariate regulators" de B.A Francis y W.M. Wonham in Applied mathematics and optimization, volumen 2, nº2), parece que el rechazo teóricamente perfecto de una perturbación se obtendrá a la frecuencia f_{pert} si a esta frecuencia es infinita la ganancia de bucle abierto, es decir, puesto que $z = e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e}$, se tiene que:

$$YY(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e}) - NN(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e}) \cdot Q(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e}) = 0_{nu \times ny} \quad (31)$$

30 Pero $Q(z)$ puede descomponerse en dos partes:

$$Q(z) = Q_1(z) \cdot B_Q \quad (32)$$

35 Este carácter afín de los coeficientes B_Q en la ecuación (32) permite así una resolución fácil. Para ello, basta expresar las ecuaciones siguientes efectuando una separación entre las partes real e imaginaria de la ecuación (31), o sea:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(YY(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e})) - \operatorname{Re}(NN(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e}) \cdot Q_1(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e})) \cdot B_Q &= 0_{nu \times ny} \\ \operatorname{Im}(YY(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e})) - \operatorname{Im}(NN(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e}) \cdot Q_1(e^{j \cdot 2\pi \cdot f_{pert} \cdot T_e})) \cdot B_Q &= 0_{nu \times ny} \end{aligned} \quad (33)$$

40 Se encuentra uno entonces delante de la resolución de un sistema lineal cuyo número de ecuaciones es $2 \times n_y$, lo que es exactamente el número de coeficientes de B_Q . La resolución de este sistema lineal es entonces fácil y permite obtener los valores de los coeficientes del bloqueo del parámetro de Youla que proporcionan un rechazo teóricamente perfecto.

45 No obstante, es preferible que, en ciertos casos, el rechazo de la perturbación no sea teóricamente perfecto. Se puede así, por ejemplo, calcular los coeficientes de B_Q resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(YY(z_1)) - \operatorname{Re}(NN(z_1) \cdot Q_1(z_1)) \cdot B_Q &= 0_{nu*ny} \\ \operatorname{Im}(YY(z_1)) - \operatorname{Im}(NN(z_1) \cdot Q_1(z_1)) \cdot B_Q &= 0_{nu*ny} \end{aligned} \quad (34)$$

En donde z_1 es una, a elección, de las dos raíces del polinomio $\beta(z) = z^2 + \delta_1 z + \delta_2$ y los coeficientes δ_1, δ_2 , al igual que α_1, α_2 , pueden determinarse a partir de la función de transferencia

$$\frac{1 + \delta_1 \cdot q^{-1} + \delta_2 \cdot q^{-2}}{1 + \alpha_1 \cdot q^{-1} + \alpha_2 \cdot q^{-2}}$$

resultante de la discretización de una célula del segundo orden idéntica a la utilizada en el caso monovariable:

$$\frac{\frac{s^2}{(2\pi \cdot fpert)^2} + \frac{\zeta_1 \cdot s}{(2\pi \cdot fpert)} + 1}{\frac{s^2}{(2\pi \cdot fpert)^2} + \frac{\zeta_2 \cdot s}{(2\pi \cdot fpert)} + 1} \quad (35)$$

Enteramente como en el caso monovariable, ζ_1 determina la profundidad de las muescas de rechazo en Syp, y una vez fijado este valor, la elección de ζ_2 permite regular la anchura de dichas muescas.

Así, en una etapa previa los coeficientes A_Q, B_Q, C_Q pueden calcularse durante la regulación de la ley de control, para cada frecuencia de perturbación, y pueden ponerse en tablas, con el fin de ser recuperados en función de $fpert$ en el ordenador en tiempo real para el rechazo en tiempo real de la perturbación vibratoria.

La estructura de la ley de control a aplicar para el rechazo en tiempo real de la perturbación vibratoria está representada en la figura 13.

Los parámetros de regulación de la ley de control residen en la elección de los polos del sistema en bucle por el corrector central solo (por los parámetros de K_c y de K_f , que tienen una influencia sobre la robustez de la ley de control). Para cada frecuencia, se dispone de la elección de los ζ_1, ζ_2 de las células del segundo orden continuas, que influyen en las amplitudes frecuenciales y en la profundidad de los rechazos de las perturbaciones a la frecuencia $fpert$.

Estas posibilidades de regulación generalizan las posibilidades de regulación del caso monovariable.

Para resumir, la ley de control multivariable se obtiene efectuando las operaciones siguientes en el curso de una etapa previa:

- Obtención de un modelo lineal multivariable en forma de representación de estado por estimulación e identificación.
- Síntesis de un corrector central en forma de observador de estado y retorno de estado estimado.

Las ganancias K_c y K_f se calculan, por ejemplo, por optimización cuadrática.

- Elección de ζ_1, ζ_2 para un mallado de frecuencias de perturbación a rechazar.
- Cálculo de los coeficientes del parámetro de Youla, que se ponen en tablas del ordenador en tiempo real.

A continuación, la ley de control multivariable así obtenida y calculada puede aplicarse en tiempo real en un ordenador para controlar efectores, efectuándose los cálculos en tiempo real en función de la frecuencia de perturbación vibratoria, obteniéndose esta última directa o indirectamente a partir de la velocidad de rotación de la máquina giratoria.

Se comprende que la invención se refiere también a un ordenador o a unos medios materiales de programación especialmente configurados para la realización del procedimiento de atenuación de perturbaciones vibratorias mecánicas.

En las explicaciones que se han dado hasta el momento, se ha considerado el rechazo de una frecuencia a la vez por razones de simplificación. No obstante, la invención permite el rechazo de varias frecuencias de perturbación vibratoria a la vez, siendo cada una de ellas esencialmente monofrecuencial y, por tanto, de banda estrecha. Así, ya sea en el caso monovariable o en el caso multivariable, es posible rechazar simultáneamente más de una frecuencia. Esto conduce a introducir una segunda e incluso una tercera muesca en la función de sensibilidad Syp.

No obstante, no hay que perder de vista que, habida cuenta del teorema de Bode Freudenberg Looze, la realización de una o varias muescas suplementarias en la función de sensibilidad conlleva necesariamente una remontada [Syp] a las otras frecuencias y de ahí una amortiguación de la robustez.

5 En lo que sigue se va a suponer que se rechazan dos frecuencias, pero esto no es limitativo y se da únicamente a título de ejemplo. Estas dos frecuencias son:

- la frecuencia corriente f_{pert} (para retomar las notaciones utilizadas anteriormente),

10 - una segunda frecuencia proporcional a f_{pert} que se denominará $\eta \cdot f_{pert}$, siendo η constante, pero no necesariamente un número entero.

En el caso monovisible, se tiene siempre la ecuación de Bézout (9), o sea:

$$15 \quad S'(q^{-1}) \cdot Hs(q^{-1}) + q^{-d} B(q^{-1}) \beta(q^{-1}) = So(q^{-1}) \cdot \alpha(q^{-1})$$

cuyas incógnitas son siempre $S'(q^{-1})$ y $\beta(q^{-1})$, pero esta vez Hs y α son tales que la función de transferencia

$$\frac{Hs(q^{-1})}{\alpha(q^{-1})}$$

20 resulta de la discretización de un bloque continuo por el método de Tustin constituido por un producto de dos células del segundo orden continuas:

$$\frac{\frac{s^2}{(2\pi \cdot f_{pert})^2} + \frac{2 \cdot \zeta_{11} \cdot s}{(2\pi \cdot f_{pert})} + 1}{\frac{s^2}{(2\pi \cdot f_{pert})^2} + \frac{2 \cdot \zeta_{21} \cdot s}{(2\pi \cdot f_{pert})} + 1} \cdot \frac{\frac{s^2}{(2\pi \eta \cdot f_{pert})^2} + \frac{2 \cdot \zeta_{12} \cdot s}{(2\pi \eta \cdot f_{pert})} + 1}{\frac{s^2}{(2\pi \eta \cdot f_{pert})^2} + \frac{2 \cdot \zeta_{22} \cdot s}{(2\pi \eta \cdot f_{pert})} + 1}$$

25 Hs y α son aquí polinomios en q^{-1} de grado 4 y $\zeta_{11} \zeta_{12} \zeta_{21} \zeta_{22}$ son factores de amortiguación que permiten, enteramente como en el caso del rechazo monofrecuencial, regular la anchura y la profundidad de la muesca de atenuación en la curva representativa del módulo de Syp.

30 Aquí, $\alpha(q^{-1})$ es un polinomio de orden 4 y $\beta(q^{-1})$ es un polinomio de orden 3. El número de coeficiente variable en la ley de control es, por tanto, más elevado: hay 4 coeficientes suplementarios a hacer variar en función de f_{pert} . La resolución de dicho sistema se realiza de una manera equivalente a lo que se ha presentado en el caso de una sola frecuencia.

35 En el caso multivariable, se puede buscar expresar A_Q de tal manera que ésta sea una diagonal por bloques, por ejemplo de la forma

$$A_Q = \begin{bmatrix} A_{QI} & 0_{4,4} & 0_{4,4} \\ 0_{4,4} & A_{QI} & 0_{4,4} \\ 0_{4,4} & 0_{4,4} & \ddots \end{bmatrix}$$

Es decir que A_Q está constituida por n_y bloques

$$40 \quad A_{QI} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 \\ -\alpha_2 & 0 \end{bmatrix}$$

puestos en diagonal.

45 Queda claro entonces que los valores propios de A_Q son las raíces del polinomio $\alpha(q^{-1}) = (1 + \alpha_1 \cdot q^{-1} + \alpha_2 \cdot q^{-2}) \cdot (1 + \alpha_3 \cdot q^{-1} + \alpha_4 \cdot q^{-2})$ con una multiplicidad igual a n_y .

Se puede elegir:

$$C_Q = \begin{bmatrix} C_{QI} & 0_{1,4} & 0_{1,4} \\ 0_{1,4} & C_{QI} & 0_{1,4} \\ 0_{1,4} & 0_{1,4} & \ddots \end{bmatrix}$$

Es decir que C_Q está constituida por n_y bloques $C_{QI} = [1 \ 0 \ 1 \ 0]$ puestos en diagonal.

Y, finalmente, la matriz B_Q es de tamaño $4 \cdot n_y \cdot n_y$.

Por tanto, quedan por determinar los coeficientes de B_Q .

Se tiene ahora:

$$Q(z) = C_Q (z \cdot I - A_Q)^{-1} B_Q$$

Las incógnitas del problema son ahora los $4 \cdot n_y \cdot n_y$ coeficientes de B_Q , que se determinan con ayuda de las ecuaciones 31 a 35 vistas anteriormente.

Lo que se acaba de describir para un número de frecuencias simultáneamente rechazadas igual a 2 puede extenderse a un número de frecuencias más elevado, pero, como se ha dicho más arriba, el aumento del número de frecuencias rechazadas conlleva una pérdida de robustez que puede devenir rápidamente redhibitoria.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control activo de vibraciones mecánicas mediante la aplicación de una ley de control constituida por un corrector central y por un parámetro de Youla que permite la atenuación de perturbaciones vibratorias mecánicas esencialmente monofrecuenciales creadas en una estructura material (5) de un sistema material por lo menos por una máquina giratoria (1) fijada por un soporte (2) a dicha estructura material y que gira a una velocidad de rotación determinable, estando la frecuencia de la perturbación vibratoria relacionada con la velocidad de rotación de la máquina giratoria y variando en función de las variaciones de dicha velocidad de rotación, estando por lo menos un accionador (3) mecánico dispuesto entre la máquina giratoria y la estructura material, así como por lo menos un sensor (4) de vibración que produce unas señales $y(t)$ o $Y(t)$, según un caso monovariante o multivariante, respectivamente, correspondiendo la utilización de un sensor a un caso monovariante y correspondiendo la utilización de varios sensores a un caso multivariante, pudiendo el/los accionadores estar en serie en el soporte o en paralelo con el soporte, estando el/los sensores unidos a por lo menos un ordenador que controla el/los accionadores, comprendiendo el ordenador unos medios de cálculo de corrección que producen unas señales de control $u(t)$ o $U(t)$, según el caso monovariante o multivariante respectivamente para el/los accionadores en función, por una parte, de mediciones del/de los sensores y, por otra parte, de un parámetro de frecuencia de perturbación vibratoria, estando los medios de cálculo configurados según una ley de control de corrección correspondiente a una modelización por bloques del sistema, siendo dichos bloques, por una parte, los del corrector central y, por otra parte, un bloque de parámetro de Youla, siendo la modelización tal que sólo el parámetro de Youla tenga unos coeficientes dependientes de la frecuencia de perturbación vibratoria en dicha ley de control de corrección, teniendo el corrector central unos coeficientes fijos,

caracterizado por que el parámetro de Youla tiene la forma de un filtro de respuesta impulsional infinita, y

cuando tiene lugar una fase previa de concepción, se determinan y se calculan, por una parte, unos parámetros de un modelo de la parte del sistema material que comprende el/los accionadores, soporte(s) y sensor(s) por estimulación del/de los accionadores y mediciones por el/los sensores, y, por otra parte, la ley de control de corrección en función de frecuencias determinadas de perturbaciones vibratorias, y se almacenan en una memoria del ordenador por lo menos los coeficientes variables del parámetro de Youla, preferentemente en una tabla, y cuando tiene lugar una fase de utilización, en tiempo real:

- se determina la frecuencia de la perturbación vibratoria corriente,
- se calcula la ley de control de corrección, que comprende el corrector central con el parámetro de Youla, con el ordenador utilizando para el parámetro de Youla los coeficientes memorizados de una frecuencia de perturbación determinada correspondiente a la frecuencia de perturbación corriente.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que en el caso monovariante, en la fase de concepción:

a) - en un primer tiempo se utiliza un modelo lineal del sistema material en forma de una función de transferencia racional discreta y se determina y se calcula dicha función de transferencia por estimulación del sistema material por el(los) accionador(es) y mediciones por el sensor, y después aplicación de un procedimiento de identificación de sistema lineal con las mediciones y el modelo,

b) - en un segundo tiempo se aplica un corrector central aplicado al modelo del sistema material determinado y calculado en el primer tiempo, teniendo el corrector central la forma de un corrector RS de dos bloques $1/S_o(q^{-1})$ y $R_o(q^{-1})$, en el corrector central, produciendo el bloque $1/S_o(q^{-1})$ la señal $u(t)$ y recibiendo como entrada la señal de salida invertida del bloque $R_o(q^{-1})$, recibiendo dicho bloque $R_o(q^{-1})$ como entrada la señal $y(t)$ correspondiente a la suma de la perturbación vibratoria $p(t)$ y de la salida de la función de transferencia del modelo del sistema material, y se determina y se calcula el corrector central,

c) - en un tercer tiempo, se añade un parámetro de Youla al corrector central para formar la ley de control de corrección, teniendo el parámetro de Youla la forma de un bloque $Q(q^{-1})$, filtro de respuesta impulsional infinita, siendo

$$Q(q^{-1}) = \frac{\beta(q^{-1})}{\alpha(q^{-1})},$$

siendo α , β unos polinomios en q^{-1} , añadido al corrector central RS, recibiendo dicho bloque $Q(q^{-1})$ de Youla una estimación de perturbación obtenida por cálculo a partir de las señales $u(t)$ e $y(t)$ y en función de la función de transferencia del modelo del sistema material y siendo la señal de salida de dicho bloque $Q(q^{-1})$ de Youla sustraída de la señal invertida de $R_o(q^{-1})$ enviada a la entrada del bloque $1/S_o(q^{-1})$ del corrector central RS, y se determina y se calcula el parámetro de Youla en la ley de control de corrección que comprende el

corrector central al que está asociado el parámetro de Youla para por lo menos una frecuencia de perturbación vibratoria $p(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de la perturbación vibratoria a atenuar, y

5 por que en la fase de utilización, en tiempo real:

- se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar,
- se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, que comprende el corrector RS con el parámetro de Youla, utilizando para el parámetro de Youla los coeficientes que se han calculado para una frecuencia de perturbación vibratoria correspondiente a la frecuencia corriente de perturbación vibratoria a atenuar, siendo fijos los coeficientes de $R_o(q^{-1})$ y $S_o(q^{-1})$.

10 3. Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado por que en la fase de concepción, se efectúan las operaciones siguientes:

- a) - en el primer tiempo, se excita el sistema material aplicando al (a los) accionador(es) una señal de excitación cuya densidad espectral es sustancialmente uniforme sobre una banda de frecuencia útil,
- b) - en el segundo tiempo, se determinan y se calculan los polinomios $R_o(q^{-1})$ y $S_o(q^{-1})$ del corrector central de manera que dicho corrector central sea equivalente a un corrector calculado por colocación de los polos del bucle cerrado en la aplicación del corrector central a la función de transferencia del modelo del sistema material,
- c) - en el tercer tiempo, se determinan y se calculan el numerador y el denominador del bloque $Q(q^{-1})$ de Youla en el seno de la ley de control de corrección para por lo menos una frecuencia de perturbación vibratoria $p(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de perturbación vibratoria a atenuar, y esto en función de un criterio de atenuación, estando el bloque $Q(q^{-1})$ expresado en forma de una relación $\beta(q^{-1})/\alpha(q^{-1})$, siendo α , β unos polinomios en q^{-1} , con el fin de obtener unos valores de coeficientes de los polinomios $\alpha(q^{-1})$ y $\beta(q^{-1})$ para la/cada una de las frecuencias, realizándose el cálculo de $\beta(q^{-1})$ y $\alpha(q^{-1})$ por la obtención de una función de transferencia discreta $H_s(q^{-1})/\alpha(q^{-1})$ resultante de la discretización de una célula del segundo orden continuo, calculándose el polinomio $\beta(q^{-1})$ por la resolución de una ecuación de Bézout,

25 y por que en la fase de utilización, en tiempo real, se efectúan las operaciones siguientes:

- se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar,
- se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, corrector central de coeficientes fijos con un parámetro de Youla de coeficientes variables, para producir la señal $u(t)$ enviada al/a los accionadores, en función de las mediciones $y(t)$ del sensor y utilizando para el bloque $Q(q^{-1})$ de Youla los valores de los coeficientes de los polinomios $\alpha(q^{-1})$ y $\beta(q^{-1})$ determinados y calculados para una frecuencia determinada correspondiente a la frecuencia corriente.

30 4. Procedimiento según la reivindicación 2 o 3, caracterizado por que se utiliza para el modelo del sistema material una función de transferencia de la forma:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

50 en la que d es el número de periodos de muestreo de retardo del sistema, B y A son unos polinomios en q^{-1} de la forma:

$$\begin{aligned} B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 \cdot q^{-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb} \\ A(q^{-1}) &= 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na} \end{aligned}$$

55 siendo los b_i y a_i unos escalares, y siendo q^{-1} el operador retardo de un periodo de muestreo, y por que el cálculo de la estimación de perturbación vibratoria se obtiene mediante la aplicación de la función $q^{-d}B(q^{-1})$ a $u(t)$ y sustracción del resultado de la aplicación de $y(t)$ a la función $A(q^{-1})$.

60 5. Procedimiento según la reivindicación 2, 3 o 4, caracterizado por que para el tiempo b), se determinan y se calculan los polinomios $R_o(q^{-1})$ y $S_o(q^{-1})$ del corrector central por un método de colocación de los polos del bucle cerrado.

6. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que en el caso mono y multivariable, en la fase de concepción:

- a) - en un primer tiempo, se utiliza un modelo lineal del sistema material en forma de representación de estado de bloques matriciales H , W , G y $q^{-1} \cdot I$, siendo G una matriz de transición, siendo H una matriz de entrada, siendo W una matriz de salida e I la matriz identidad, pudiendo expresarse dicha representación de estado por una ecuación de recurrencia:

$$\begin{aligned} X(t+Te) &= G \cdot X(t) + H \cdot U(t) \\ Y(t) &= W \cdot X(t) \end{aligned}$$

siendo $X(t)$: vector de estado, $U(t)$: vector de las entradas, $Y(t)$: vector de las salidas,

y se determina y se calcula dicho modelo del sistema material por estimulación del sistema material por el (los) accionador(es) y mediciones por los sensores, y después aplicación de un procedimiento de identificación de sistema lineal con las mediciones y el modelo,

- b) - en un segundo tiempo, se aplica un corrector central aplicado al modelo del sistema material determinado y calculado en el primer tiempo, teniendo el corrector central la forma de observador de estado y retorno de estado estimado que expresa $\hat{X}$, un vector de estado del observador iterativamente en función de K_f , una ganancia del observador, K_c , un vector de retorno sobre el estado estimado, así como del modelo del sistema material determinado y calculado en el primer tiempo, o sea:

$$\hat{X}(t+Te) = (G - K_f \cdot W) \cdot \hat{X}(t) + H \cdot U(k) + K_f \cdot (Y(t+Te))$$

con una orden $U(t) = K_c \cdot \hat{X}(t)$,

y se determina y se calcula dicho corrector central,

- c) - en un tercer tiempo, se añade un parámetro de Youla al corrector central para formar la ley de control de corrección, teniendo el parámetro de Youla la forma de un bloque Q mono o multivariable, de matrices de estado A_Q , B_Q , C_Q , añadido al corrector central expresado asimismo en forma de representación de estado, bloque Q cuya salida sustraída de la salida del corrector central produce la señal $U(t)$ y cuya entrada recibe la señal $Y(t)$ de la que se sustrae la señal $W \cdot \hat{X}(t)$, y se determina y se calcula el parámetro de Youla en la ley de control de corrección que comprende el corrector central al que está asociado el parámetro de Youla para por lo menos una frecuencia de perturbación vibratoria $P(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de perturbación vibratoria a atenuar,

y por que en la fase de utilización, en tiempo real:

- se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar,
- se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, que comprende el corrector central de coeficientes fijos con el parámetro de Youla de coeficientes variables, utilizando, para el parámetro de Youla, los coeficientes que se han calculado para una frecuencia de perturbación vibratoria correspondiente a la frecuencia corriente de perturbación vibratoria a atenuar.

7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado por que, en la fase de concepción, se efectúan las operaciones siguientes

- a) - en el primer tiempo, se excita el sistema material aplicando a los accionadores unas señales de excitación cuya densidad espectral es sustancialmente uniforme sobre una banda de frecuencia útil, estando las señales de excitación descorrelacionadas entre ellas,
- b) - en el segundo tiempo, se determina y se calcula el corrector central de manera que sea equivalente a un corrector con observador de estado y retorno sobre el estado, obteniéndose K_f por optimización cuadrática (LQ), y eligiéndose la ganancia de retorno de estado K_c de manera que se asegure la robustez de la ley de control provista del parámetro de Youla, por medio de una optimización cuadrática (LQ),
- c) - en el tercer tiempo, se determinan y se calculan los coeficientes del bloque Q de Youla en el seno de la ley de control de corrección para por lo menos una frecuencia de perturbación vibratoria $P(t)$, incluida por lo menos la frecuencia determinada de perturbación vibratoria a atenuar en función de un criterio de atenuación, con el fin de obtener unos valores de coeficientes del parámetro de Youla para la/cada una de las

frecuencias,

y por que en la fase de utilización, en tiempo real, se efectúan las operaciones siguientes:

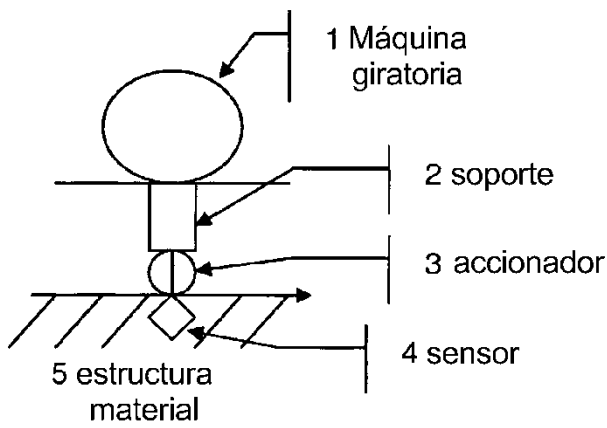
- 5 - se determina la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar,
- se hace que el ordenador calcule la ley de control de corrección, corrector central de coeficientes fijos con parámetro de Youla de coeficientes variables, para producir la señal $U(t)$ enviada a los accionadores, en función de las mediciones $Y(t)$ de los sensores y utilizando para el parámetro de Youla los valores de los
- 10 coeficientes determinados y calculados para una frecuencia determinada correspondiente a la frecuencia corriente.
8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7, caracterizado por que está adaptado a un conjunto de frecuencias determinadas de perturbaciones vibratorias a atenuar y se repite el tiempo c) para cada una de las
- 15 frecuencias determinadas, y por que, en fase de utilización, cuando ninguna de las frecuencias determinadas corresponde a la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar, se realiza una interpolación a dicha frecuencia corriente para los valores de los coeficientes del bloque Q de Youla a partir de los valores de coeficientes de dicho bloque Q de Youla conocidos para las frecuencias determinadas.
- 20 9. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 8, caracterizado por que las señales son muestreadas a una frecuencia F_e y en el tiempo a) se utiliza una banda de frecuencia útil de la señal de excitación que es sustancialmente $[0, F_e/2]$.
- 25 10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9, caracterizado por que, antes de la fase de utilización, se añade a la fase de concepción un cuarto tiempo d) de verificación de la estabilidad y de la robustez del modelo del sistema material y de la ley de control de corrección, corrector central con parámetro de Youla, obtenidos anteriormente en los tiempos a) a c) haciendo una simulación de la ley de control de corrección obtenida en los
- tiempos b) y c) aplicada al modelo del sistema material obtenido en el tiempo a) para la/las frecuencias determinadas, y cuando no se respeta un criterio predeterminado de estabilidad y/o robustez, se reitera por lo menos
- 30 el tiempo c) modificando el criterio de atenuación.
11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la fase de concepción es una fase previa y se efectúa una vez, previamente a la fase de utilización, con memorización de los resultados de las determinaciones y cálculos para su utilización en la fase de utilización.
- 35 12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la frecuencia corriente de la perturbación vibratoria a atenuar se determina a partir de la medición de la velocidad de rotación de la máquina giratoria.
- 40 13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el sistema material es una aeronave y la máquina giratoria es un motor de aeronave.
14. Dispositivo que comprende unos medios de control activo de vibraciones mecánicas mediante la aplicación de una ley de control constituida por un corrector central y por un parámetro de Youla en un ordenador de dicho
- 45 dispositivo que permite la realización del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores de atenuación de perturbaciones vibratorias mecánicas esencialmente monofrecuenciales creadas en una estructura material de un sistema material por lo menos por una máquina giratoria fijada por un soporte a dicha estructura material y que gira a una velocidad de rotación determinable, estando la frecuencia de la perturbación vibratoria relacionada con la velocidad de rotación de la máquina giratoria y variando en función de las variaciones de dicha
- 50 velocidad de rotación, comprendiendo el dispositivo además por lo menos un accionador mecánico dispuesto entre la máquina giratoria y la estructura material, así como por lo menos un sensor de vibración que produce unas señales $y(t)$ o $Y(t)$ según un caso monovariante o multivariante respectivamente, correspondiendo la utilización de un sensor a un caso monovariante y correspondiendo la utilización de varios sensores a un caso multivariante, pudiendo el/los accionadores estar en serie, en el soporte, o en paralelo con el soporte, estando el/los sensores
- 55 unidos al ordenador que controla el/los accionadores, comprendiendo el ordenador unos medios de cálculo de corrección que producen unas señales de control $u(t)$ o $U(t)$ según el caso monovariante o multivariante respectivamente, para el/los accionadores en función, por una parte, de mediciones del/de los sensores y, por otra parte, de un parámetro de frecuencia de perturbación vibratoria, comprendiendo el ordenador unos medios de cálculo configurados según una ley de control de corrección correspondiente a una modelización por bloques del
- 60 sistema, siendo dichos bloques, por una parte, los del corrector central y, por otra parte, un bloque de parámetro de Youla, siendo tal la modelización que sólo el parámetro de Youla tenga unos coeficientes dependientes de la frecuencia de perturbación vibratoria en dicha ley de control de corrección, teniendo el corrector central unos coeficientes fijos, teniendo el parámetro de Youla la forma de un filtro de respuesta impulsional infinita, cuando tiene lugar una fase previa de concepción, que han sido determinados y calculados, por una parte, unos parámetros de un
- 65 modelo de la parte del sistema material que comprende el/los accionadores, soporte(s) y sensor(es) por estimulación del/de los accionadores y mediciones por el/los sensores y, por otra parte, la ley de control de corrección en función

de frecuencias determinadas de perturbaciones vibratorias, y se almacenan en una memoria del ordenador por lo menos los coeficientes variables del parámetro de Youla, preferentemente en una tabla, permitiendo el dispositivo, cuando tiene lugar una fase de utilización, en tiempo real, la determinación de la frecuencia de la perturbación vibratoria corriente y el cálculo de la ley de control de corrección, que comprende el corrector central con el parámetro de Youla, con el ordenador utilizando para el parámetro de Youla los coeficientes memorizados de una frecuencia de perturbación determinada correspondiente a la frecuencia de perturbación corriente.

5

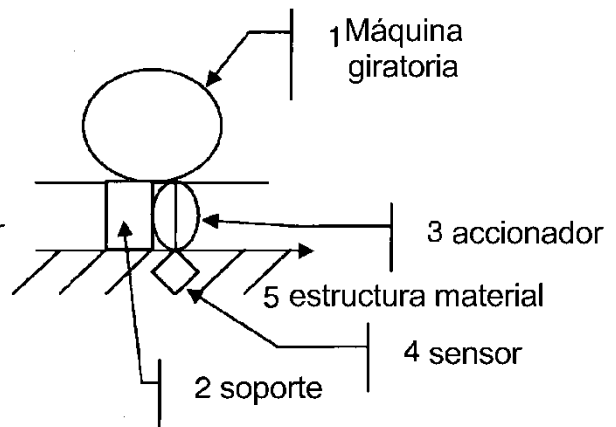
15. Dispositivo según la reivindicación 14, caracterizado por que el ordenador permite además, cuando tiene lugar la fase previa de concepción, la determinación y el cálculo de los parámetros del modelo y la ley de control de corrección.

10



montaje en serie

FIGURA 1



montaje en paralelo

FIGURA 2

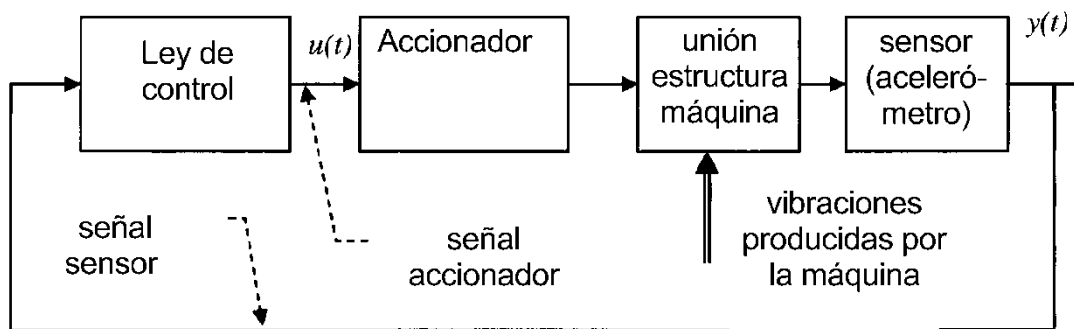


FIGURA 3

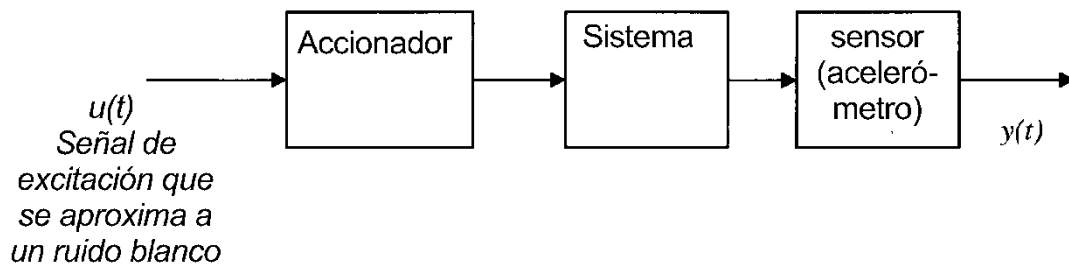


FIGURA 4

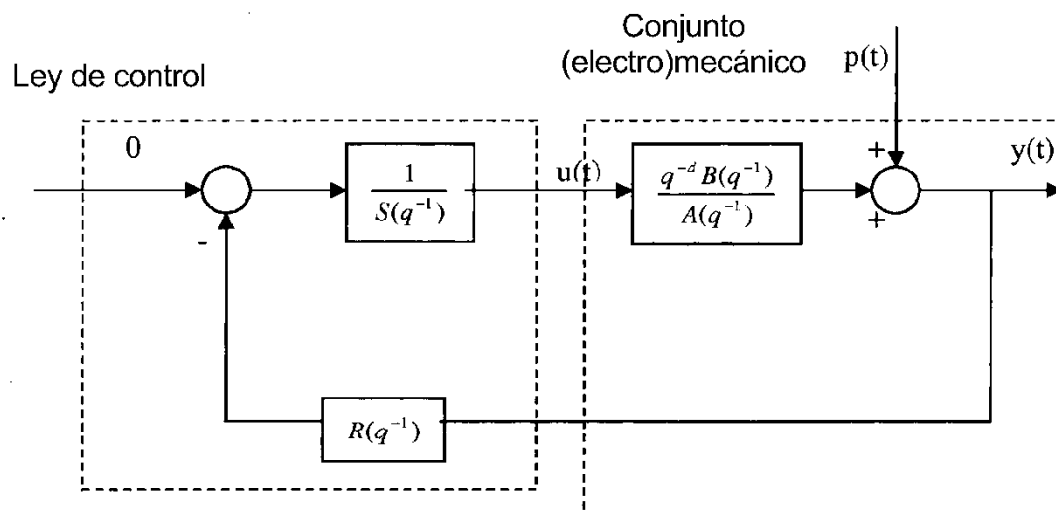


FIGURA 5

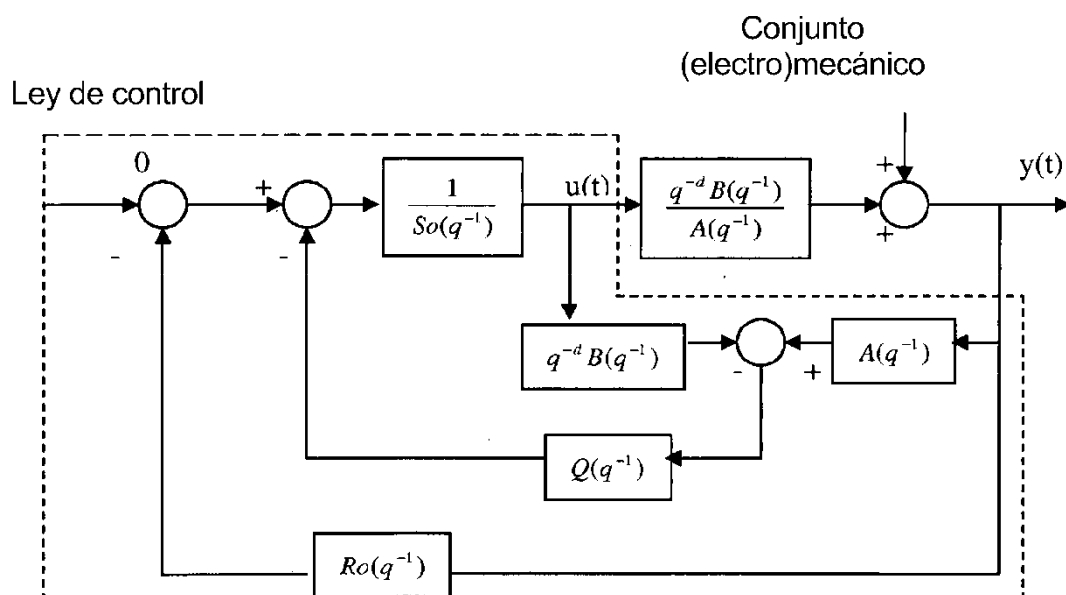


FIGURA 6

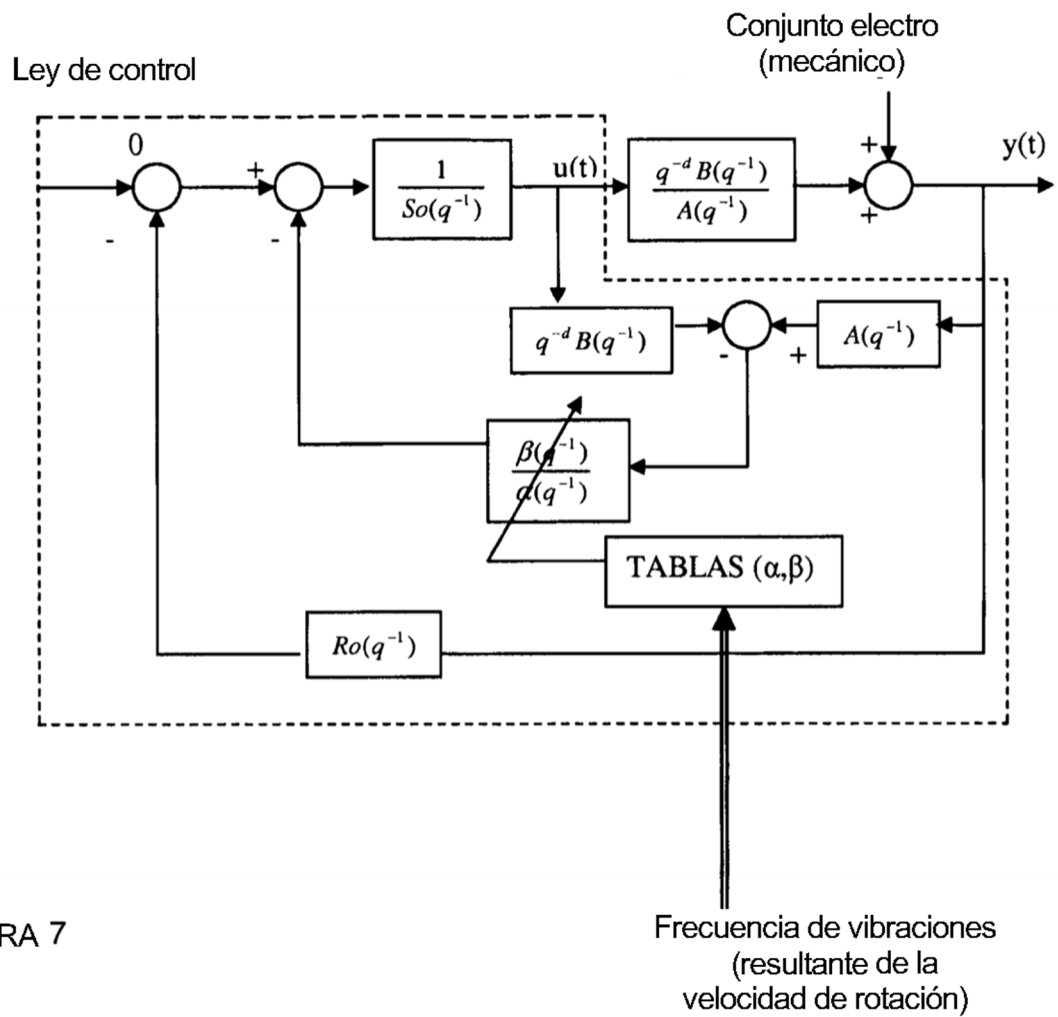


FIGURA 7

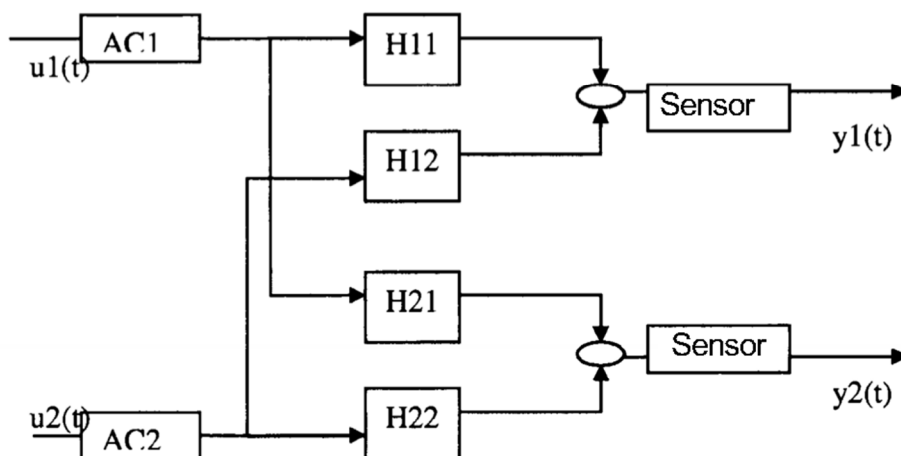


FIGURA 8

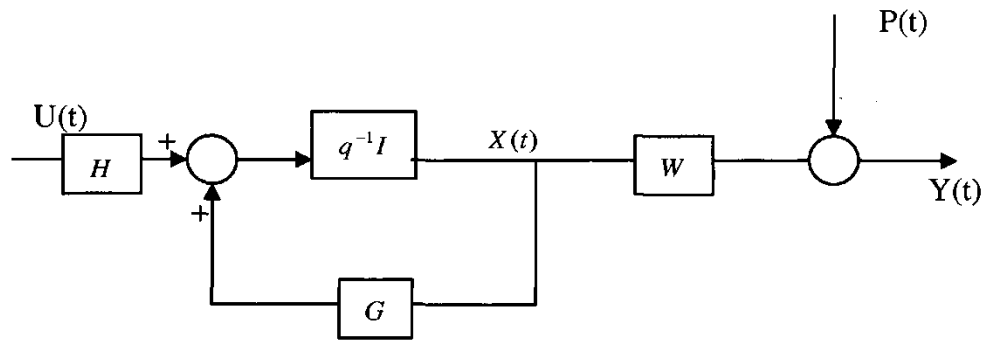


FIGURA 9

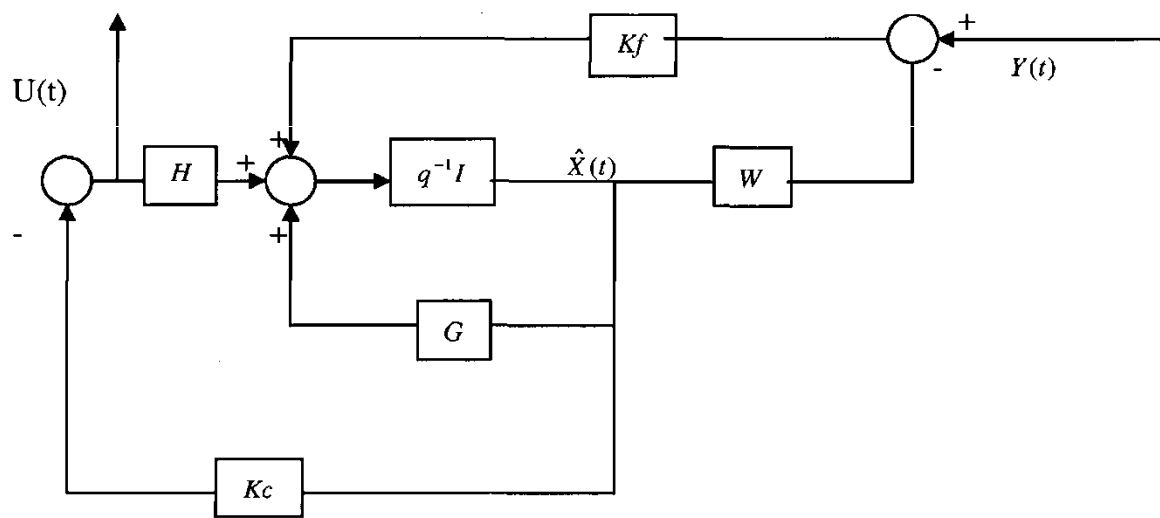


FIGURA 10

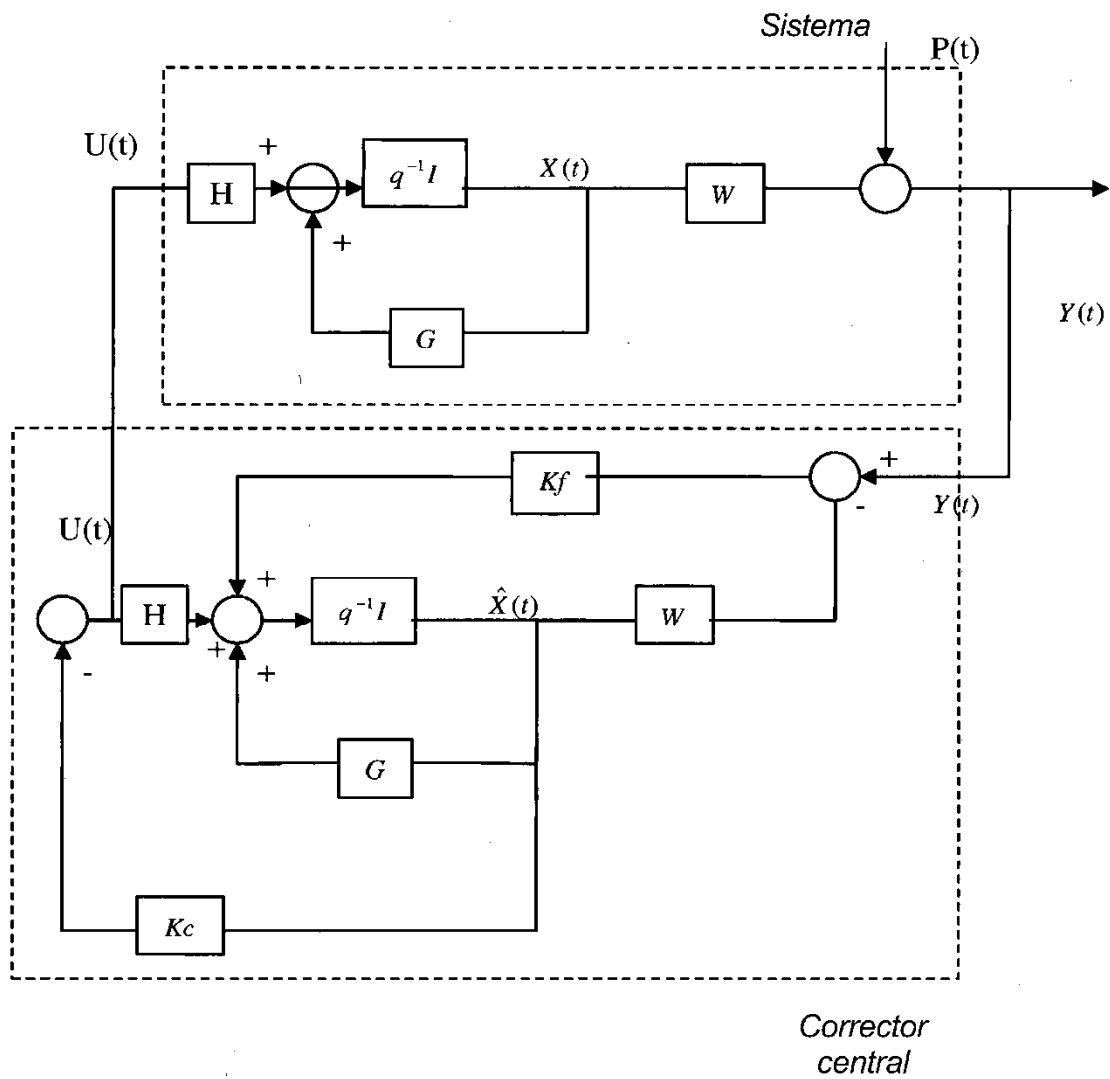


FIGURA 11

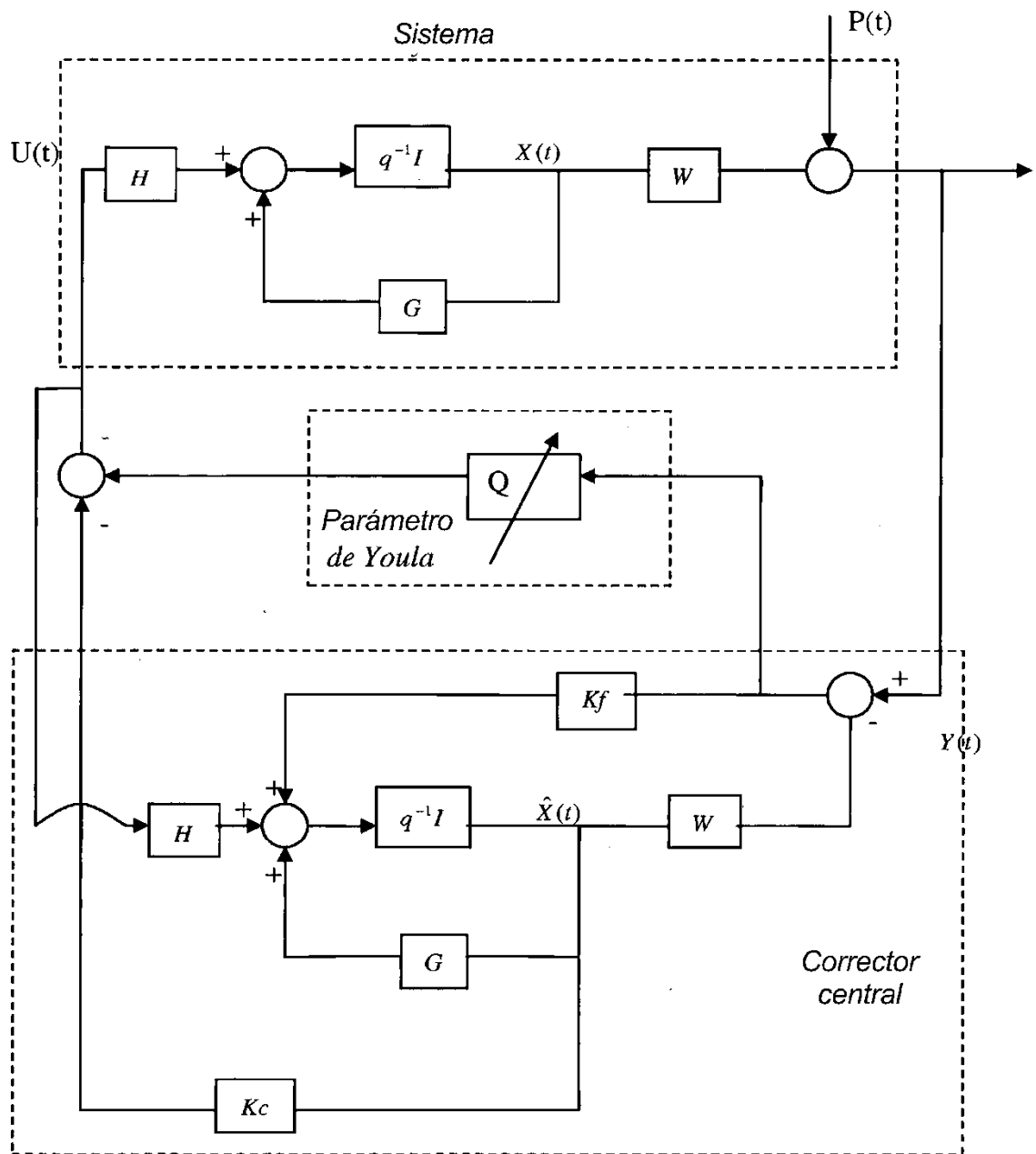


FIGURA 12

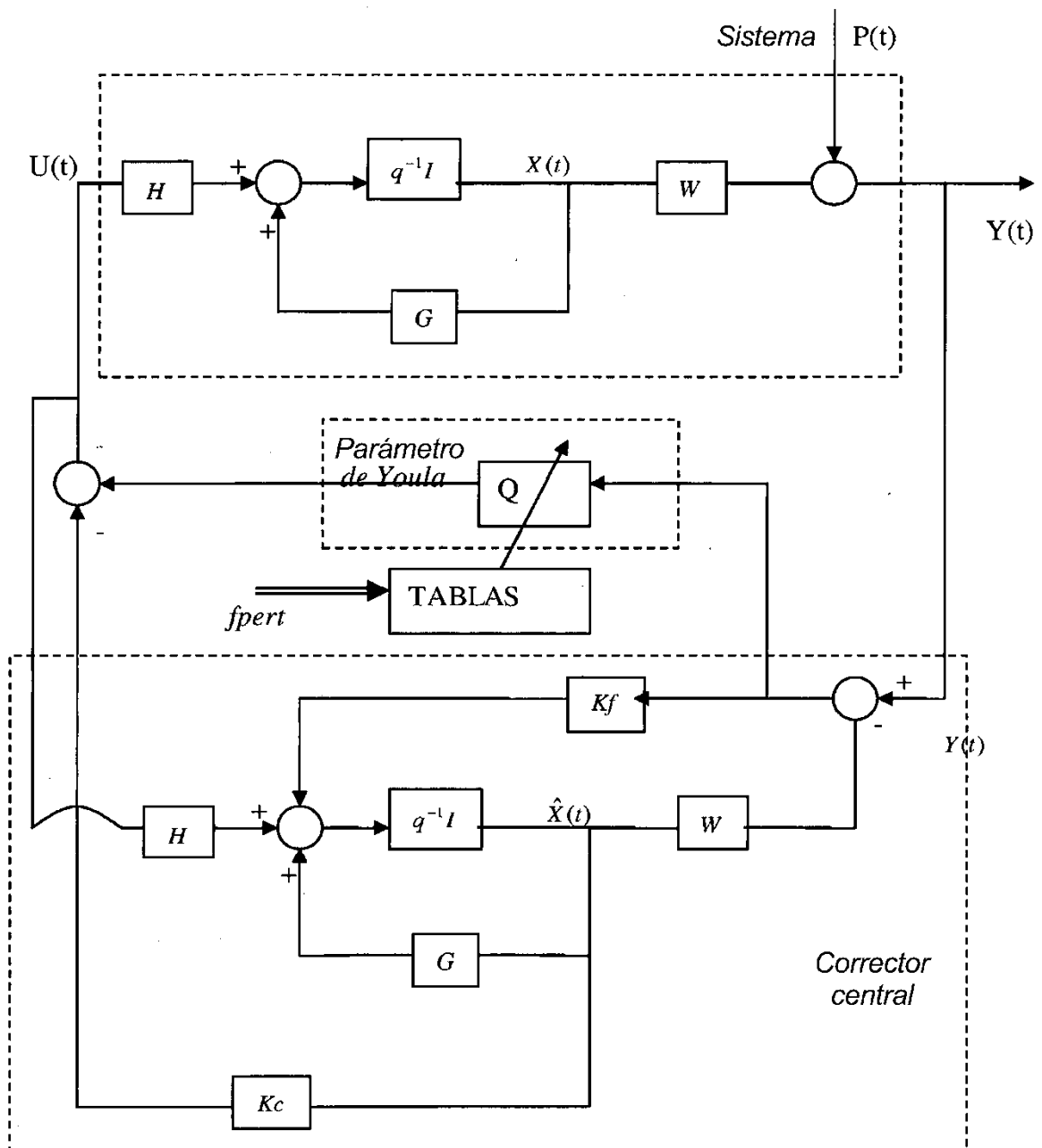


FIGURA 13