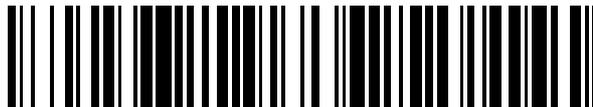


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 371 724**

51 Int. Cl.:
G05D 19/02 (2006.01)
F25B 9/14 (2006.01)
F16F 15/03 (2006.01)
H02K 33/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08761926 .8**
96 Fecha de presentación: **11.01.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2137588**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **30.12.2009**

54 Título: **PROCEDIMIENTO DE EQUILIBRADO DEL MOVIMIENTO DE LAS MASAS MÓVILES DE UN MOTOR ELECTRODINÁMICO BILINEAL.**

30 Prioridad:
14.03.2007 FR 0753813

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
09.01.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
09.01.2012

73 Titular/es:
**L'AIR LIQUIDE, SOCIÉTÉ ANONYME POUR
L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCÉDÉS
GEORGES CLAUDE
75, QUAI D'ORSAY
75007 PARIS, FR**

72 Inventor/es:
**BUQUET, Jonathan;
AIGOUY, Gérald y
TROLLIER, Thierry**

74 Agente: **de Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 371 724 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 de equilibrado del movimiento de las masas móviles de un motor electrodinámico bilineal

La presente invención se refiere a un procedimiento de equilibrado del movimiento de las masas móviles de un motor electrodinámico bilineal.

- 5 La invención encuentra una aplicación particularmente ventajosa en los ámbitos de las máquinas criogénicas de ciclo alterno, máquinas Stirling o tubos de gas pulsado, que ponen en práctica motores electrodinámicos bilineales de masas móviles que forman pistones, y de modo más particular de las máquinas criogénicas destinadas a ser embarcadas en ingenios espaciales tales como los satélites de observación de la Tierra. En esta aplicación, los motores electrodinámicos bilineales hacen la función de compresor del fluido utilizado, helio por ejemplo.
- 10 El principio de funcionamiento de un motor electrodinámico bilineal está basado en la generación por bobinas de inducción de fuerzas magnéticas cíclicas que animan de un movimiento rectilíneo a las masas móviles imantadas que constituyen los pistones del motor, los cuales están montados en cojinetes mecánicos que desarrollan debido a su construcción una fuerza de sollicitación elástica axial proporcional al desplazamiento de las masas móviles. Estas últimas están caracterizadas por tanto por una frecuencia de resonancia mecánica, determinada por la masa en movimiento, la rigidez del cojinete, la rigidez magnética y la carga fluidica.
- 15 El gobierno del motor consiste entonces en aplicar a las bobinas de inducción una corriente de excitación a la frecuencia de resonancia mecánica de las masas móviles imantadas, de manera que se obtenga una amplificación natural del movimiento del desplazamiento de los pistones.
- 20 En los compresores electrodinámicos bilineales, las masas móviles de los pistones están alineadas en el interior de la misma cámara de compresión y oscilan en oposición mecánica a la frecuencia de la corriente de excitación de las bobinas, generalmente una corriente sinusoidal. Este ensamblaje presenta la ventaja de un equilibrado natural de las masas móviles en movimiento, lo que no es el caso de los compresores lineales monopistones.
- 25 Sin embargo, las tolerancias sobre los parámetros mecánicos y magnéticos, como la masa, la rigidez mecánica y magnética, el alineamiento, etc., conducen a respuestas mecánicas de los dos semimotores ligeramente diferentes para una consigna eléctrica idéntica, y por consiguiente inducen vibraciones del motor en el eje de desplazamiento de las masas móviles de los pistones.
- 30 En una aplicación de observación de la Tierra por satélite, este nivel vibratorio residual conduce a la degradación de la toma de vistas, esto tanto más cuanto que el entorno mecánico severo durante el lanzamiento en términos de vibraciones y de choques del lanzador, así como el entorno térmico en órbita que excluye cualquier transferencia térmica por convección, imponen fijar el compresor de manera rígida a la estructura del satélite, lo que favorece la propagación de las vibraciones generadas por el compresor hacia los otros equipos fijados igualmente a la estructura del satélite, especialmente las cámaras de toma de vistas.
- 35 Además, habida cuenta de las duraciones de vida de servicio útil demandadas, entre 5 y 10 años, es necesario seguir la evolución del equilibrado del compresor con el fin de garantizar un nivel mínimo de vibraciones inducidas a todo lo largo del envejecimiento.
- Las soluciones actuales para reducir las vibraciones residuales debidas a un defecto de equilibrado del movimiento de las masas móviles consisten en optimizar la consigna de la corriente de gobierno de una de las masas móviles con respecto a la otra, según un sistema maestro-esclavo.
- 40 A tal efecto, sensores de esfuerzo o acelerómetros están colocados en relación mecánica con el compresor de manera que facilitan una medición de las vibraciones inducidas, en el compresor, por un eventual desequilibrio entre los desplazamientos de los dos pistones. La consigna óptima de la corriente de gobierno del pistón-esclavo es obtenida cuando la medición de vibraciones recogida por los sensores de esfuerzos o los acelerómetros es mínima.
- 45 Los sensores de esfuerzo son arandelas piezoeléctricas colocadas en las interfaces mecánicas de fijación del compresor con la estructura del satélite. Este tipo de sensores presenta sin embargo un cierto número de inconvenientes.
- En primer lugar, si bien estos son capaces de medir vibraciones residuales propias del compresor, los sensores de esfuerzo pueden igualmente registrar aquéllas que provienen de otros equipos fijados a la misma estructura mecánica del satélite. La medición de las vibraciones buscadas se encuentra por tanto perturbada por el entorno mecánico del compresor.
- 50 Siendo los sensores piezoeléctricos malos conductores térmicos, hay que prever un camino térmico diferente del camino mecánico que pasa por las arandelas para evacuar las disipaciones térmicas del compresor, a saber el calor de compresión del gas, las pérdidas por efecto Joule, por corriente de Foucault, por histéresis, etc. A título de ejemplo, un camino térmico específico puede estar realizado por trenzas conductoras colocadas en cortocircuito en las arandelas piezoeléctricas. Resulta, así, evidentemente, una integración compleja y más cara.

Finalmente, es muy difícil obtener una redundancia de estos sensores de esfuerzo, habida cuenta de su implantación mecánica específica.

Asimismo, la utilización de acelerómetros dispuestos en el compresor no conduce a resultados satisfactorios por las razones siguientes.

5 La medición facilitada por los acelerómetros presenta generalmente una baja relación entre señal y ruido debido a las masas importantes a las cuales queda fijado el compresor. Además, la fuerza transmitida es reconstituida por interpretación de la medición de aceleración según la masa efectiva, resultante de las masas móviles, difícil de evaluar y por tanto imprecisa.

10 Como en los sensores de esfuerzo, la medición de aceleración es perturbada por el entorno mecánico alrededor del compresor, lo que conduce a la medición de aceleraciones que no dependen del compresor.

En realidad, la medición de aceleración está bien adaptada a un montaje del compresor en suspensión y no a un montaje en una interfaz rígida por fijación con pernos.

15 Sin embargo, un montaje tradicional en suspensión, necesario para una medición correcta de la aceleración, desacopla la estructura de las interfaces y por tanto impone condiciones difícilmente compatibles con las aplicaciones espaciales, como la creación de un camino térmico específico para evacuar las disipaciones de calor y la colocación de un mecanismo de bloqueo de la suspensión, y después de desbloqueo cuando el compresor debe soportar cargas mecánicas externas.

Finalmente, los acelerómetros y su acondicionamiento asociado son caros.

20 El documento GB 2 318 887 A divulga un procedimiento de reducción de vibraciones de una máquina criogénica de tipo Stirling basado en la medición directa de vibraciones con la ayuda de un sensor de fuerza que detecta las vibraciones.

25 La invención tiene por objetivo entonces proponer un procedimiento de equilibrado del movimiento de las masas móviles imantadas de un motor electrodinámico bilineal, que permita la puesta en práctica del sistema de gobierno maestro-esclavo anteriormente mencionado, a partir de mediciones de desplazamiento de las masas móviles que no sean perturbadas por el entorno mecánico externo al motor.

Este objetivo se logra, de acuerdo con la invención, debido a que el citado procedimiento comprende etapas de acuerdo con la reivindicación 1.

30 Así, se comprende, en primer lugar, que el procedimiento de acuerdo con la invención funciona sobre la base de señales representativas del desplazamiento de las masas móviles facilitadas por sensores magnéticos, tales como sensores de efecto Hall, colocados por ejemplo en el cárter del motor, que interceptan una densidad, variable en función de su desplazamiento, del flujo magnético generado por las masas móviles imantadas.

Resulta así que las mediciones de desplazamiento obtenidas son independientes del entorno del motor, al menos en tanto que ningún otro equipo en la proximidad del motor facilite una densidad magnética variable.

35 Por otra parte, se comprende también que el procedimiento iterativo propuesto por la invención consiste en construir una señal de excitación para la masa móvil-esclava como una serie de Fourier de la cual cada término reduce al mínimo el armónico correspondiente de la señal de error, siendo la señal aplicada a la masa móvil-maestra la señal sinusoidal de excitación a la frecuencia fundamental, aplicada a la bobina de inducción asociada a esta masa móvil-maestra. En estas condiciones, se obtiene un equilibrado óptimo del movimiento de las masas móviles y, por consiguiente, una reducción de las vibraciones residuales mínimas.

40 La invención presenta igualmente otras muchas ventajas.

El equilibrado de las masas móviles puede ser efectuado en cualquier momento, especialmente durante la duración de la misión del satélite con el fin de tener en cuenta el envejecimiento de los órganos del motor.

45 Contrariamente a los sistemas de medición conocidos a base de sensores de esfuerzo o de acelerómetros, no debe aportarse ninguna modificación o adaptación particular a las interfaces mecánicas y térmicas del motor con su entorno, como por ejemplo un compresor fijado a la estructura de un satélite.

Las señales representativas del movimiento de las masas móviles son obtenidas sin tener que recurrir a sensores intrusos que afecten al funcionamiento del motor.

50 Finalmente, es muy fácil realizar una redundancia del sistema colocando varios sensores magnéticos en diversos lugares del cárter del motor, no teniendo importancia el emplazamiento exacto de los sensores desde el momento en que estos son capaces de interceptar una densidad de flujo magnético suficiente para obtener una relación entre señal y ruido mínima.

La descripción que sigue en relación con el dibujo anejo, dado a título de ejemplo no limitativo, hará comprender bien en qué consiste la invención y cómo puede ser realizada ésta.

La figura 1 es una vista en corte de un compresor equipado con sensores magnéticos para la puesta en práctica del procedimiento de acuerdo con la invención.

5 En la figura 1 está representado un motor electrodinámico lineal destinado por ejemplo a quedar integrado como compresor en una máquina criogénica de ciclo alterno del tipo Stirling, tubo de gas pulsado u otro, o en máquinas criogénicas de flujo continuo del tipo Joule-Thomson. El motor de la figura 1 comprende dos masas móviles 10, 20 que forman pistones encargados de comprimir un fluido criogénico, como el helio.

10 En funcionamiento, las dos masas móviles 10, 20 se desplazan en sentido contrario paralelamente al eje X-X del motor según un movimiento alterno cuya frecuencia f_0 es elegida sensiblemente igual a la frecuencia de resonancia del conjunto electromotor y de su carga fluidita. Un valor típico de esta frecuencia de resonancia es por ejemplo de 50 Hz. A esta frecuencia, la amplitud del movimiento de las masas móviles es entonces máxima y solamente está limitada por las fuerzas de amortiguamiento debidas a los diversos rozamientos mecánicos, los cuales se hacen los más bajos posibles para una eficacia máxima del motor.

15 Por otra parte, el movimiento alterno de los pistones es obtenido aplicando a bobinas 11, 21 de inducción una señal de excitación sinusoidal a la frecuencia f_0 . El acoplamiento magnético de los pistones con las bobinas 11, 21 es realizado por medio de imanes permanentes llevados por las masas móviles 10, 20.

20 Como se ha mencionado anteriormente, a pesar del hecho de que el motor bilineal de la figura 1 está concebido de manera que el movimiento de las masas móviles sea equilibrado naturalmente, pueden producirse, por diversas razones, ligeros desequilibrios en amplitud y en fase entre los desplazamientos de las masas móviles 10, 20 con la aparición, en consecuencia, de vibraciones residuales responsables de degradaciones en la calidad de la toma de vistas de las cámaras del satélite.

25 Para limitar estas vibraciones inducidas, está previsto equipar al motor con sensores magnéticos 12, 22, sensores de efecto Hall por ejemplo, aptos para facilitar respectivamente una primera señal eléctrica $s_1(t)$ representativa del movimiento de la masa 10 y una segunda señal eléctrica $s_2(t)$ representativa del movimiento de la masa 20. Estas señales eléctricas $s_1(t)$ y $s_2(t)$ tienen como origen la variación de la inducción magnética a través de los sensores 12, 22, debida a la variación de la densidad del flujo magnético creado por las masas imantadas en el transcurso de su movimiento, como está representado en la figura 1 por líneas de campo magnético divergentes procedentes de las masas imantadas 10, 20. En el transcurso del movimiento de las masas móviles, los sensores interceptan más o menos líneas de campo, de donde la variación del flujo magnético y la corriente inducida que así se obtiene.

30 En el ejemplo de la figura 1, los sensores magnéticos 12, 22 han sido colocados en el eje longitudinal X-X del motor. Naturalmente, estos podrían estar colocados en otro lugar en el cárter el motor, por ejemplo lateralmente, siendo la única condición que estos puedan detectar variaciones de densidad de los flujos magnéticos creadas por las masas móviles imantadas 10, 20.

35 El movimiento de las masas móviles 10, 20 es obtenido aplicando a la bobina 11 de la primera masa móvil 10, que se elegirá más adelante como masa-maestra, una señal de excitación $e_1(t)$, y a la bobina 21 de la segunda masa móvil 20, que será elegida como masa esclava, una señal de excitación $e_2(t)$. Estas señales de excitación son periódicas de frecuencia f_0 .

40 Si los dos semimotores están perfectamente equilibrados, la diferencia $\Delta s(t) = s_1(t) - s_2(t)$, que se denominará señal de error, es nula. Sin embargo, se ha visto anteriormente que, en la práctica, existe entre los dos movimientos un desequilibrio, fuente de vibraciones residuales, que la invención pretende corregir lo mejor posible.

Para esto, la señal de error $\Delta s(t)$ periódica de frecuencia f_0 es registrada y sometida a un análisis armónico de manera que se efectúa una descomposición en N componentes de Fourier de frecuencia $n.f_0$ con $0 \leq n \leq N - 1$, siendo N un número arbitrario dado elegido en función del nivel de corrección deseado.

45 Se designará por $C_0, \dots, C_n, \dots, C_{N-1}$ la amplitud respectiva de las componentes de Fourier de la señal de error $\Delta s(t)$.

Se aplica a la masa-maestra 10 una señal de excitación sinusoidal a la frecuencia f_0 :

$$e_1(t) = A_1 \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t)$$

Después, se efectúa una iteración de la señal de excitación de la masa-esclava 20 de la manera siguiente.

Se aplica a la masa-esclava 20 una primera señal de excitación de frecuencia nula ($n = 0$)

50
$$e_2^0(t) = B_0$$

El coeficiente B_0 es entonces ajustado a un valor óptimo B_0' tal que el coeficiente correspondiente C_0 de la señal de error sea mínimo.

A continuación se aplica a la masa-esclava 20 una nueva señal de excitación:

$$e_2^1(t) = B'_0 + B_1 \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_1)$$

y se ajustan el coeficiente B_1 y la fase φ_1 con el fin de reducir al mínimo el coeficiente C_1 de la señal de error. Sean B'_1 y φ'_1 los valores correspondientes.

5 En el rango de iteración n , se aplica a la masa-esclava una señal de excitación $e_2^n(t)$ dada por:

$$e_2^n(t) = B'_0 + B'_1 \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi'_1) + B'_2 \cdot \text{sen}(2\pi(2 \cdot f_0)t + \varphi'_2) + \dots + B_n \cdot \text{sen}(2\pi(n \cdot f_0)t + \varphi_n)$$

De nuevo, se ajustan el coeficiente B_n y la fase φ_n para reducir al mínimo el coeficiente C_n .

La iteración continúa de este modo hasta el último rango $n = N - 1$.

Finalmente, la señal óptima de excitación de la masa móvil-esclava 20 vale:

10

$$e_2(t) = e_2^{N-1}(t) = B'_0 + \sum_{n=1}^{N-1} B'_n \cdot \text{sen}(2\pi(n \cdot f_0)t + \varphi'_n)$$

Se observará que este procedimiento puede ser efectuado en cualquier momento, incluso cuando el satélite está en vuelo.

15

REIVINDICACIONES

5 1. Procedimiento de equilibrado del movimiento de las masas móviles imantadas (10, 20) de un motor electrodinámico bilineal que comprende dos masas móviles imantadas (10, 20) que se desplazan en sentido contrario paralelamente al eje (X-X) del motor según un movimiento alterno animado por las fuerzas magnéticas de bobinas (11, 21) de inducción, constituyendo las masas móviles imantadas dos pistones alineados en el interior de una misma cámara de compresión y que oscilan en oposición mecánica, comprendiendo el citado procedimiento etapas consistentes en:

10 - facilitar al menos un primer sensor magnético (12) y al menos un segundo sensor magnético (22) aptos para proporcionar respectivamente una primera señal eléctrica ($s_1(t)$) y una segunda señal eléctrica ($s_2(t)$) respectivamente representativas del movimiento de la primera (10) y de la segunda (20) masa móvil imantada,

- registrar una señal de error ($\Delta s(t)$) igual a la diferencia entre las citadas primera ($s_1(t)$) y segunda ($s_2(t)$) señales eléctricas y efectuar un análisis armónico de la citada señal de error,

- aplicar a la bobina (11) de la primera masa móvil imantada (10) una señal de excitación sinusoidal ($e_1(t)$) a un frecuencia f_0 dada,

15 - aplicar iterativamente a la bobina (21) de la segunda masa móvil imantada N señales de excitación sucesivas ($e_2^n(t)$), siendo una señal de excitación de rango n ($0 \leq n \leq N - 1$) igual a una serie de Fourier de orden n de frecuencia fundamental f_0 , siendo ajustado en amplitud y en fase el término de orden n de la citada serie de modo que se reduzca al mínimo la componente a la frecuencia $n.f_0$ de la citada señal de error,

20 - tomar para señal de excitación de la bobina (21) de la segunda masa móvil imantada la señal de excitación ($e_2^{N-1}(t)$) obtenida en la iteración de rango N - 1.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el cual los citados sensores magnéticos (12, 22) son sensores de efecto Hall.

25 3. Procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el cual las dos masas móviles imantadas (10, 20) forman dos pistones encargados de comprimir un fluido criogénico y se desplazan en sentido contrario paralelamente al eje (X-X) del motor según un movimiento alterno cuya frecuencia f_0 es elegida igual a la frecuencia de resonancia del conjunto motor.

30 4. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el cual el movimiento alterno de los pistones es obtenido aplicando a bobinas (11, 21) de inducción una señal de excitación sinusoidal a una frecuencia f_0 , siendo realizado el acoplamiento magnético de los pistones con las bobinas (11, 21) por medio de imanes permanentes llevados por las masas móviles imantadas (10, 20).

35 5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, en el cual se aplica a la bobina (11) de la primera masa móvil imantada (10), denominada « masa-maestra », una señal de excitación $e_1(t)$, y a la bobina (21) de la segunda masa móvil imantada (20), denominada « masa-esclava », una señal de excitación $e_2(t)$, siendo estas señales de excitación periódicas de frecuencia f_0 , siendo registrada y sometida a un análisis armónico la señal de error $\Delta s(t) = s_1(t) - s_2(t)$ periódica de frecuencia f_0 de manera que se efectúa una descomposición en N componentes de Fourier de frecuencia $n.f_0$ con $0 \leq n \leq N - 1$, siendo $C_0, \dots, C_n, \dots, C_{N-1}$ la amplitud respectiva de las componentes de Fourier de la señal de error $\Delta s(t)$, se aplica una señal de excitación sinusoidal a la frecuencia f_0 a la masa-maestra (10):

$$e_1(t) = A_1 \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t)$$

y después, se efectúa una iteración de la señal de excitación de la masa-esclava (20) de la manera siguiente:

40 se aplica a la masa-esclava (20) una primera señal de excitación de frecuencia nula ($n = 0$)

$$e_2^0(t) = B_0$$

el coeficiente B_0 es entonces ajustado a un valor óptimo B_0' tal que el coeficiente correspondiente C_0 de la señal de error sea mínimo, a continuación se aplica a la masa-esclava (20) una nueva señal de excitación:

$$e_2^1(t) = B_0' + B_1 \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_1)$$

45 y se ajustan el coeficiente B_1 y la fase φ_1 de manera que se reduzca al mínimo el coeficiente C_1 de la señal de error, siendo B_1' y φ_1' los valores correspondientes, en el rango de iteración n, se aplica a la masa-esclava (20) una señal de excitación $e_2^n(t)$ dada por:

$$e_2^n(t) = B_0' + B_1' \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_1') + B_2' \cdot \text{sen}(2\pi(2.f_0)t + \varphi_2') + \dots + B_n \cdot \text{sen}(2\pi(n.f_0)t + \varphi_n)$$

y después se ajustan de nuevo, el coeficiente B_n y la fase φ_n para reducir al mínimo el coeficiente C_n , la iteración continúa de este modo hasta el último rango $n = N - 1$, la señal óptima de excitación de la masa móvil-esclava (20) vale al final:

$$e_2(t) = e_2^{N-1}(t) = B'_0 + \sum_{n=1}^{N-1} B'_n \cdot \text{sen}(2p(nf_0)t + j'_n)$$

- 5 6. Aplicación del procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5 a la reducción de las vibraciones de los motores electrodinámicos bilineales.

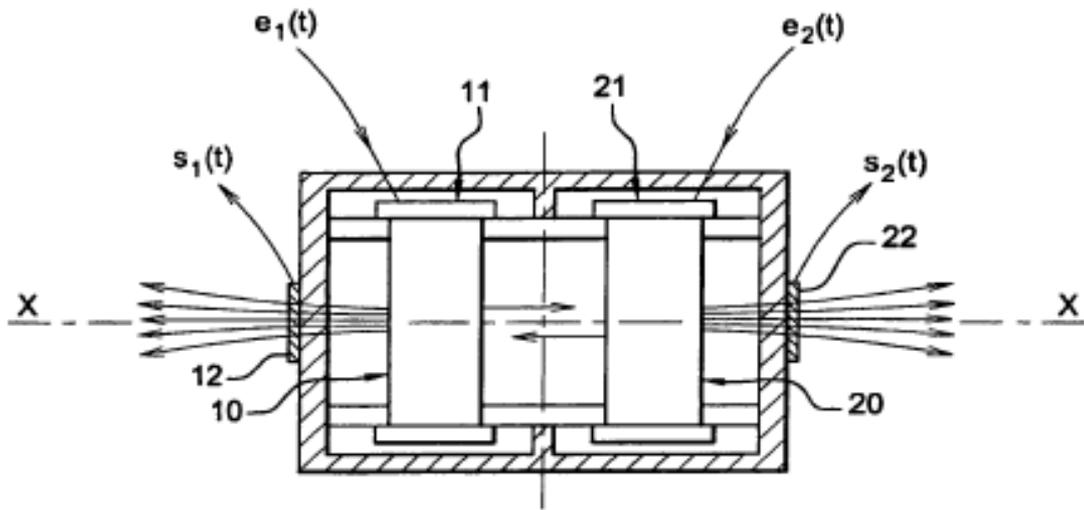


Fig. 1