(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 399 624**

(51) Int. CI.:

***G01N 3/32*** (2006.01)
***G01M 7/02*** (2006.01)
***H01L 21/00*** (2006.01)
***H05K 3/00*** (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.11.2009 E 09768196 (9)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.11.2012 EP 2356424**

(54) Título: **Procedimiento de evaluación del envejecimiento de un conjunto electrónico**

(30) Prioridad:

**17.11.2008 FR 0857792**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
**02.04.2013**

(73) Titular/es:

**EUROPEAN AERONAUTIC DEFENCE AND SPACE COMPANY EADS (100.0%)**
**37 Bld de Montmorency**
**75016 Paris, FR**

(72) Inventor/es:

**GRIEU, MARC y**
**MASSIOT, GREGOR**

(74) Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

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 evaluación del envejecimiento de un conjunto electrónico.

La invención concierne a un procedimiento para evaluar el estado de envejecimiento denominado daño por fatiga a vibración en un sistema electrónico cualquiera. Puede tratarse de placas electrónicas individuales o de un conjunto de placas electrónicas. La evaluación estriba en un dispositivo de medida y de procesado digital de magnitudes físicas relativas a la solicitación que es causante del daño.

Actualmente existen dispositivos similares para piezas y estructuras mecánicas, pero no disponen de determinadas características necesarias para su aplicación en las placas electrónicas. Estas características son la capacidad de procesar, en tiempo real y de manera autónoma con toda la capacidad de cálculo embarcada, la estimación del daño sin recurrir a telemedida ni a post-procesado.

La telemedida y el post-procesado de datos son de uso corriente para supervisar estructuras aéreas y obras de fábrica, pero los correspondientes dispositivos no dan respuesta simultáneamente a los criterios de aptitud para ir embarcados y de autonomía de toda la potencia de cálculo.

La invención se basa en la asociación de uno o varios sensores cinemáticos de la vibración ubicados en puntos particulares, de un observador de estado para evaluar dinámicamente unas tensiones mecánicas localizadas en puntos críticos y de un cálculo de daño en esos puntos críticos, integrables los tres en un dispositivo embarcado y autónomo en cuanto a su función. Los puntos particulares de medida y los puntos críticos de cálculo de daño están diferenciados o coinciden, según las aplicaciones.

La noción de observador de estado halla su definición en las disciplinas de la automática y de la teoría de la información. Se aplica a sistemas dinámicos representados mediante magnitudes de estado. Cuando un estado de un sistema no es accesible a la medida, se construye un modelo dinámico que permite reconstruir el estado no mensurable a partir de medidas de otras magnitudes accesibles. Este modelo dinámico recibe el nombre de observador de estado de la magnitud. Sin embargo, la construcción de un observador de estado no siempre es posible y la posibilidad de construir uno recibe el nombre de condición de observabilidad de esa magnitud.

En la presente invención, con el concurso de sensores, por ejemplo de acelerómetros, son accesibles a la medida magnitudes cinemáticas (una aceleración o una velocidad o una posición o una deformación) de puntos particulares del conjunto electrónico que ha de supervisarse. Por el contrario, en puntos críticos del ensamble electrónico, casi siempre hay tensiones mecánicas inaccesibles a la medida, y más aún estados de daño, salvo en laboratorio. Se puede establecer un observador de estado de las tensiones mecánicas en los puntos críticos que utiliza la medida de una o varias magnitudes cinemáticas en puntos particulares, a condición de observabilidad. El carácter observable de las tensiones mecánicas depende directamente del o de los puntos particulares en los que se ubican el o los sensores cinemáticos. En general, basta con ubicar el o los sensores cinemáticos fuera de los nodos de vibración, esto es, ubicarlo(s) por ejemplo en la fijación del conjunto electrónico.

Cada vez se impone más la necesidad de saber evaluar correctamente el daño a vibración en placas electrónicas embarcadas. Esta necesidad se relaciona con un cierto número de puntos críticos de estas placas electrónicas, cuyo sometimiento a vibraciones es susceptible de acarrear el fallo del conjunto electrónico. Por ejemplo, los puntos críticos que han de supervisarse son juntas de soldadura de aleación de ciertos componentes electrónicos. En el caso de tales placas electrónicas, existen sistemas de supervisión embarcados. Estos pueden estar dotados de acelerómetros o de calibres de deformación para medir aceleraciones o deformaciones experimentadas por esa placa. No obstante, estos sensores casi nunca pueden ser ubicados en los puntos críticos de la placa a causa de las pequeñísimas dimensiones de los componentes y, más aún, de las juntas de soldadura de aleación. Por lo tanto, los sistemas existentes no pueden acceder al dato de las tensiones mecánicas en esos puntos críticos. Se sabe medir un estado de envejecimiento general de la placa, pero no se sabe medir un estado de fatiga local de un componente, al no poder emplazar en él un sensor que dé indicación de las tensiones experimentadas por ese componente.

La técnica anterior conoce, por la solicitud de patente PCT N.° WO2007/102155, un procedimiento y un sistema de simulación de fiabilidad.

La técnica anterior conoce asimismo, por la publicación científica LALL P ET AL «Failure-Envelope Approach to Modeling Shock and Vibration Survivability of Electronic and MEMS Packaging», ELECTRONIC COMPONENTS AND TECHNOLOGY, 2005. ECTC '05, PROCEEDINGS LAKE BUENA VISTA, FL, USA MAY 31 - JUNE 3, 2005, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE, 31 de mayo de 2005, páginas 480-490, un procedimiento de evaluación de fiabilidad a los choques de componentes electrónicos.

Han sido propuestos procedimientos por el laboratorio CALCE, Center for Advanced Life Cycle Engineering, para establecer el nexo entre medida y tensiones en los puntos críticos. Pero la gran laguna de estos procedimientos es la de no tomar en cuenta los efectos dinámicos de las vibraciones. En efecto, el procedimiento que el CALCE

propone omite la mayoría de los modos propios de vibración y estriba únicamente en cálculos estáticos de curvatura, vibración y estriba únicamente en cálculos estáticos de curvatura.

Por el contrario, la presente invención estriba en observadores de estado que dan razón de los efectos dinámicos vinculados a las fuerzas de inercia y a los modos propios de vibración del conjunto electrónico. El procedimiento que la invención propone hace un uso mucho más amplio de las medidas cinemáticas para evaluar con la mayor fidelidad posible las tensiones mecánicas en los puntos críticos. Se respeta el carácter multiaxial de las tensiones mecánicas y la dinámica del conjunto electrónico. La ventaja de evaluar de manera precisa estas tensiones mecánicas está en poder calcular de manera mucho más precisa el daño sufrido por el conjunto electrónico, en el lugar en el que se ubican el o los componentes críticos. La utilización de tal procedimiento permite mejorar las previsiones de mantenimiento, ya que la indicación de daño que éste suministra sirve para anticipar los potenciales fallos. El planteamiento propuesto permite aplicar los principios de la supervisión de las estructuras mecánicas y el procesado digital de las medidas para conocer el estado de daño en varios lugares, merced a un dispositivo embarcado, con uno o varios sensores.

El dispositivo que integra el procedimiento completo es un pequeño sistema electrónico embarcado de supervisión (PHM por Prognostics and Health Management) provisto de uno o varios sensores cinemáticos (aceleración o velocidad o posición o deformación) y de una unidad de cálculo. El sistema de supervisión está destinado a estimar el daño vinculado a un potencial fallo de las placas electrónicas constitutivas del conjunto electrónico que ha de supervisarse. El o los sensores miden una magnitud cinemática en uno o respectivamente varios puntos del conjunto electrónico que ha de supervisarse. Una de las funciones del sistema de supervisión es la evaluación, a partir de la o de las medidas del o de los sensores, de la tensión mecánica a vibración que es causante de un potencial fallo. Esta función la realiza un observador de estado, que permite reconstruir la dinámica de la tensión mecánica a partir de un modelo dinámico y de las medidas cinemáticas. La función se opera en tiempo real. El o los puntos de medida y los puntos de evaluación de las tensiones no son forzosamente los mismos. La utilización de un observador de estado tan sólo requiere de la unidad una potencia de cálculo bastante limitada y, así, el dispositivo completo se puede estructurar por ejemplo en torno a un mero microcontrolador. Por lo tanto, el propio procedimiento de evaluación de envejecimiento por fatiga es el que permite la integración en un pequeño dispositivo embarcado que dispone de una capacidad de cálculo autónoma.

En la práctica, el observador de estado puede realizarse por ejemplo mediante una operación de convolución de la aceleración medida con una respuesta al impulso en tensión mecánica. De esta manera, se toma en cuenta el conjunto de la banda de frecuencias solicitada, devolviendo así todos los efectos dinámicos. Además, se respeta el carácter multiaxial de la tensión mecánica, toda vez que se utiliza una respuesta al impulso para cada una de las componentes del tensor de tensiones. El observador de estado se podría realizar de otro modo que no sea mediante una operación de convolución: por ejemplo, con un esquema de resolución de ecuación diferencial o incluso utilizando un modelo de derivada no entera (tesis de doctorado de Xavier Moreau, n.º 95BOR10512, 1995).

La estimación del daño estriba en la tensión mecánica dada por el observador de estado. Por ejemplo, la estimación del daño puede realizarse mediante cómputo rainflow (descrito en la norma NF-A03-406, «Fatigue sous sollicitations d'amplitude variable, méthode rainflow de comptage des cycles», noviembre de 1993, ISSN 0335-3931) y mediante aplicación de la regla de Palmgren-Miner. La potencia de cálculo requerida para estas operaciones es muy escasa, lo cual también permite la integración en un dispositivo embarcado que dispone de una capacidad de cálculo autónoma.

La invención tiene pues por objeto un procedimiento de evaluación del envejecimiento de un conjunto electrónico, típicamente una placa electrónica, sometido a un movimiento vibratorio, procedimiento en el cual:

- se miden una o varias magnitudes cinemáticas, por ejemplo la aceleración o la deformación, en uno o varios puntos particulares que experimentan el movimiento vibratorio, por ejemplo en el lugar o en los lugares de su fijación a uno o unos soportes,
- se establece un modelo dinámico que relaciona las magnitudes cinemáticas medidas y unas tensiones mecánicas experimentadas en unos puntos críticos con relación a la fatiga a vibración, denominándose este modelo observador de estado,
- se infiere de las tensiones mecánicas calculadas según el observador de estado un estado de daño de cada uno de esos puntos críticos, estados de daño que caracterizan el envejecimiento que se persigue,
- se integra la cadena medidas cinemáticas - observador de estado - cálculo de los estados de daño en un dispositivo embarcado que dispone de una capacidad de cálculo autónoma.

Se comprenderá mejor la invención con la lectura de la descripción siguiente y con la revisión de las figuras que la acompañan. Estas tan sólo se aportan a título indicativo y sin carácter limitativo alguno de la invención. Las figuras muestran:

figura 1: un esquema sinóptico del procedimiento de la invención,
figura 2: un ejemplo práctico de utilización de la invención,

figura 3: un ejemplo de observador de estado de una tensión mecánica de una junta de soldadura de aleación de un componente electrónico crítico, tomado de un caso real.

La figura 1 muestra cómo un conjunto electrónico, por ejemplo una placa electrónica 7, es sometido a vibraciones mecánicas por un entorno 6. De acuerdo con la invención, el procedimiento de supervisión y, por tanto, de evaluación del envejecimiento, se lleva a la práctica con ayuda de un sistema 3 que incluye un sensor cinemático 1, una función llamada observador de estado 4 que procesa las señales γ producidas por el sensor 1 para devolver una estimación $\hat{\sigma}$ de la tensión mecánica verdadera σ en un punto crítico del conjunto 7 y una función de cálculo de daño a fatiga 5 acumulado en ese punto crítico del conjunto 7 que toma como variable los resultados $\hat{\sigma}$ producidos por el observador de estado 4. El observador de estado 4 es capaz de simular las consecuencias de la excitación del entorno 6 en un lugar seleccionado, mientras que el sensor 1 se halla situado *a priori* en otro lugar.

Por ejemplo, figura 2, el conjunto 7 es una placa electrónica dotada de componentes útiles 8 a 10, en concreto de componentes críticos en el sentido de que su funcionamiento debe estar garantizado y, por lo tanto, supervisado, y sensibles en el sentido de que unas vibraciones son susceptibles de acarrear un fallo. La placa 7 va fijada en su soporte de utilización mediante unas fijaciones tales como 11 a 12. Unos sensores 1 a 2, en el presente caso acelerómetros, miden los efectos de excitaciones e1 a e2 aplicadas en las fijaciones 11 a 12. De acuerdo con la invención, con el observador de estado 4 somos capaces de evaluar las tensiones mecánicas en los lugares en los que se ubican los componentes 8 a 10 sobre la placa 7.

Para simplificar la explicación, consideraremos que las excitaciones e1 a e2 están orientadas en una misma dirección, perpendicularmente a la placa 7, pero no necesariamente son síncronas. No obstante, cabría la posibilidad de construir un observador de estado aun si no se cumpliera esta obligación, pero las vibraciones según direcciones en el plano de la placa 7 ocasionan deformaciones de amplitudes mucho menores que ocasionan menos daños a los componentes electrónicos. En principio, es el soporte el que vibra y el que transmite sus vibraciones a la placa mediante las fijaciones 11 a 12. En un ejemplo, la vibración perpendicularmente a la placa 7 acarrea mayoritariamente unas tensiones de tracción/compresión, o tensiones normales, sobre unas juntas de soldadura de aleación 0 de un componente electrónico crítico 8 (tipo BGA, Ball Grid Array) que potencialmente conducen a la ruptura por tracción/compresión de esa junta y al fallo de la placa electrónica 7. En la invención, especialmente si el acelerómetro es un acelerómetro de tres dimensiones, se puede calcular los daños resultantes de las tres direcciones simultáneamente.

Para simplificar la explicación, también consideraremos que el conjunto electrónico 7 reacciona de manera lineal a las excitaciones vibratorias. Esto significa que cualquier magnitud física relativa a la vibración se comporta de manera aditiva cuando superponemos varias excitaciones vibratorias aplicadas en lugares diferentes o concurrentes. Esta restricción no es limitativa, ya que, en la práctica, casi todos los conjuntos electrónicos se comportan así.

Un observador de estado de la tensión de tracción/compresión σ en el punto crítico 0 se realiza por ejemplo mediante una operación de convolución entre las medidas de aceleración $\gamma_1$ y $\gamma_2$ de los puntos particulares 1 y 2, y unas respuestas al impulso $s_1$ y $s_2$ cuya determinación se especifica más adelante. La operación de convolución que realiza el observador de estado se escribe:

$$\hat{\sigma}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} s_1(k\tau)\gamma_1(t-k\tau) + \sum_{k=0}^{n-1} s_2(k\tau)\gamma_2(t-k\tau)$$

siendo n un número de puntos necesarios y suficientes para representar las respuestas al impulso $s_1$ y $s_2$, siendo k un número entero que toma sucesivamente todos los valores de 0 a n−1, siendo τ un paso de tiempo de muestreo de las medidas cinemáticas, y denotando por $\hat{\sigma}(t)$ la tensión normal evaluada en el punto crítico 0 en el instante presente t, por γ4(t−kτ) el k-ésimo último valor medido de $\gamma_1$ según el muestreo al paso de tiempo τ, por $\gamma_2$(t−kτ) el k-ésimo último valor medido de $\gamma_2$ según el muestreo al paso de tiempo τ, por $s_1$(kτ) el k-ésimo valor tabulado de la respuesta al impulso $s_1$ según el muestreo al paso de tiempo τ, por $s_2$(kτ) el k-ésimo valor tabulado de la respuesta al impulso $s_2$ según el muestreo al paso de tiempo τ, y utilizando la notación bien conocida E para designar un sumatorio discreto según una variable discreta y unos extremos indicados como índice y exponente de esta letra. La variable que indica el tiempo presente es muestreada a su vez al paso de tiempo τ y toma por tanto valores discretos múltiplos de τ. Por lo tanto, el observador presentado en el presente caso suministra en cada instante t múltiplo de τ una estimación $\hat{\sigma}$ de la tensión mecánica verdadera σ en el punto crítico 0 cuya medida directa es casi siempre imposible.

La figura 3 muestra un ejemplo de observador de estado en forma de convolución tomado del estudio de una placa electrónica real. En este ejemplo, no hay más que una sola excitación vibratoria e1 que se aplica de manera síncrona sobre todos los puntos de fijación de la placa en dirección perpendicular al plano de la placa. Por lo tanto, esta excitación se caracteriza por un número de grados de libertad igual a 1. Para construir un observador de estado

para cada componente del tensor de tensiones en un punto crítico, es necesario y suficiente un sólo sensor, a condición de observabilidad relacionada con las respectivas posiciones del sensor y del punto crítico y con las características del sensor. En el ejemplo de la figura 3, el sensor cinemático es un acelerómetro que mide la aceleración γ perpendicularmente al plano de la placa, y la tensión mecánica evaluada $\hat{\sigma}$ es la tensión normal en una junta con soldadura de aleación de un componente electrónico de tipo BGA. En este ejemplo, el número n de puntos que representan la respuesta al impulso es 512, el paso de tiempo es τ = 0,5 ms y, por lo tanto, la convolución recae sobre un intervalo de tiempo de 0,256 s. La dinámica de vibración tomada en cuenta de la placa electrónica está en un margen de frecuencias de 0 Hz a 1000 Hz, habida cuenta del paso de tiempo de muestreo τ = 0,5 ms. En este ejemplo tomado de un caso real, el número de operaciones aritméticas por segundo que ha de realizar la unidad de cálculo del dispositivo de supervisión (PHM) para la función de observador de estado del punto crítico 0 es de 1 024 000 multiplicaciones por segundo y 1 024 000 sumas por segundo. Por lo tanto, la capacidad de cálculo requerida para la función de observador de estado es bastante modesta, atendiendo a las arquitecturas electrónicas actuales. Por tanto, el dispositivo prescinde completamente de cualquier post-procesado o telemedida, ya que la técnica de cálculo utilizada proporciona el resultado a costa de un número de cálculos limitado y bastante pequeño.

Cabe destacar que el número de sensores necesarios generalmente debe ser mayor o igual que el número de grados de libertad de excitación. Si el número de sensores es inferior, generalmente no se verifica la condición de observabilidad. Esto clarifica el ejemplo dado en la figura 2 con dos sensores cinemáticos 1 y 2 para dos excitaciones vibratorias independientes e1 y e2.

Tal como se anunció anteriormente, a continuación se da un ejemplo de determinación de las respuestas al impulso $s_1$ y $s_2$ para el ejemplo de la figura 2. En lo que sigue, cada magnitud que lleve una tilde (~) designa la transformada de Fourier de una magnitud temporal. La pulsación, que es la variable de una transformada de Fourier, se denota por ω y es homogénea a la inversa de un tiempo. La unidad de ω es usualmente el radián por segundo.

Así, la función $\tilde{\gamma}_1(\omega)$ es resultado de la transformación de Fourier de la función $\gamma_1(t)$, aceleración suministrada por el sensor 1. La función $\tilde{\gamma}_2(\omega)$ es resultado de la transformación de Fourier de la función $\gamma_2(t)$, aceleración suministrada por el sensor 2. La función $\tilde{e}_1(\omega)$ es resultado de la transformación de Fourier de la función $e_1(t)$, excitación que se aplica en la fijación 11. La función $\tilde{e}_2(\omega)$ es resultado de la transformación de Fourier de la función $e_2(t)$, excitación que se aplica en la fijación 12. La función $\tilde{\sigma}_0(\omega)$ es resultado de la transformación de Fourier de la función $\sigma_0(t)$, tensión mecánica en el punto crítico 0. Se hace constar que las transformadas de Fourier son magnitudes escalares complejas.

Cuatro funciones $H_{11}(\omega)$, $H_{12}(\omega)$, $H_{21}(\omega)$, $H_{22}(\omega)$ de la pulsación ω quedan definidas cada una de ellas como la respuesta de uno de los puntos de medida, en términos de aceleración, a una excitación unitaria de pulsación ω en uno de los puntos de excitación, manteniéndose idénticamente nulas todas las demás excitaciones. Mediante la linealidad anteriormente especificada, estas funciones se escriben en términos generales como la razón de una aceleración a una excitación no nula que la origina, manteniéndose idénticamente nulas las demás excitaciones. Esta razón es independiente de la excitación aplicada a causa de la linealidad especificada antes. De manera explícita:

$$H_{11}(\omega) = \left.\frac{\tilde{\gamma}_1(\omega)}{\tilde{e}_1(\omega)}\right|_{e_2=0}$$

$$H_{21}(\omega) = \left.\frac{\tilde{\gamma}_2(\omega)}{\tilde{e}_1(\omega)}\right|_{e_2=0}$$

La notación en índice $e_2 = 0$ significa que la razón es calculada para la excitación e1 aplicada sola.

$$H_{12}(\omega) = \left.\frac{\tilde{\gamma}_1(\omega)}{\tilde{e}_2(\omega)}\right|_{e_1=0}$$

$$H_{22}(\omega) = \left. \frac{\widetilde{\gamma}_2(\omega)}{\widetilde{e}_2(\omega)} \right|_{e_1=0}$$

La notación en índice $e_1 = 0$ significa que la razón es calculada para la excitación e2 aplicada sola.

Estas cuatro funciones son independientes de las excitaciones aplicadas. Pueden ser determinadas experimentalmente, por ejemplo procediendo sucesivamente a las excitaciones unitarias de que se ha tratado anteriormente, barriendo sucesivamente valores de pulsación ω. El método de los elementos finitos, técnica de cálculo muy usual y acreditada en la industria, la ingeniería civil y las ciencias, ofrece asimismo múltiples medios para determinar esas cuatro funciones, por ejemplo calculando numéricamente el procedimiento experimental que permite determinar esas cuatro funciones.

Análogamente, dos funciones $G_1(\omega)$ y $G_2(\omega)$ de la pulsación ω quedan definidas cada una de ellas como la respuesta del punto crítico 0, en términos de tensión mecánica, a una excitación unitaria de pulsación ω en uno de los puntos de excitación, manteniéndose idénticamente nulas todas las demás excitaciones. Mediante linealidad, al igual que anteriormente:

$$G_1(\omega) = \left. \frac{\widetilde{\sigma}_0(\omega)}{\widetilde{e}_1(\omega)} \right|_{e_2=0}$$

$$G_2(\omega) = \left. \frac{\widetilde{\sigma}_0(\omega)}{\widetilde{e}_2(\omega)} \right|_{e_1=0}$$

La notación en índice $e_1 = 0$ o $e_2 = 0$ significa que la razón es calculada para una excitación aplicada sola. Las dos funciones G1 y G2 pueden ser determinadas experimentalmente o mediante el método de los elementos finitos, al igual que para las cuatro funciones anteriores.

Las transformadas de Fourier $\widetilde{\gamma}_1(\omega)$ y $\widetilde{\gamma}_2(\omega)$ de las dos aceleraciones $\gamma_1(t)$ y $\gamma_2(t)$ medidas por los sensores 1 y 2 se escriben superponiendo linealmente las respuestas a las dos excitaciones e1 y e2:

$$\begin{cases} \widetilde{\gamma}_1(\omega) = H_{11}(\omega)\widetilde{e}_1(\omega) + H_{12}(\omega)\widetilde{e}_2(\omega) \\ \widetilde{\gamma}_2(\omega) = H_{21}(\omega)\widetilde{e}_1(\omega) + H_{22}(\omega)\widetilde{e}_2(\omega) \end{cases}$$

Este sistema escalar se escribe en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \widetilde{\gamma}_1(\omega) \\ \widetilde{\gamma}_2(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \widetilde{e}_1(\omega) \\ \widetilde{e}_2(\omega) \end{pmatrix}$$

El sistema matricial inverso se escribe:

$$\begin{pmatrix} \widetilde{e}_1(\omega) \\ \widetilde{e}_2(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) \end{pmatrix}^{-1} \quad \begin{pmatrix} \widetilde{\gamma}_1(\omega) \\ \widetilde{\gamma}_2(\omega) \end{pmatrix}$$

donde el exponente −1 indica la inversa de la matriz. Esto es, en forma de sistema escalar:

$$\begin{cases} \widetilde{e}_1(\omega) = \dfrac{H_{22}(\omega)\widetilde{\gamma}_1(\omega) - H_{12}(\omega)\widetilde{\gamma}_2(\omega)}{H_{11}(\omega)H_{22}(\omega) - H_{12}(\omega)H_{21}(\omega)} \\ \widetilde{e}_2(\omega) = \dfrac{-H_{21}(\omega)\widetilde{\gamma}_1(\omega) + H_{11}(\omega)\widetilde{\gamma}_2(\omega)}{H_{11}(\omega)H_{22}(\omega) - H_{12}(\omega)H_{21}(\omega)} \end{cases}$$

La transformada de Fourier $\widetilde{\sigma}_0(\omega)$ de la tensión mecánica $\sigma_0$ en el punto crítico 0 se escribe superponiendo linealmente las respuestas a las dos excitaciones $e_1$ y $e_2$:

$$\widetilde{\sigma}_0(\omega) = G_1(\omega)\widetilde{e}_1(\omega) + G_2(\omega)\widetilde{e}_2(\omega)$$

Esta expresión se escribe entonces según las transformadas de Fourier de las aceleraciones:

$$\widetilde{\sigma}_0(\omega) = \frac{G_1(\omega)H_{22}(\omega) - G_2(\omega)H_{21}(\omega)}{H_{11}(\omega)H_{22}(\omega) - H_{12}(\omega)H_{21}(\omega)}\widetilde{\gamma}_1(\omega)$$

$$+ \frac{-G_1(\omega)H_{12}(\omega) + G_2(\omega)H_{11}(\omega)}{H_{11}(\omega)H_{22}(\omega) - H_{12}(\omega)H_{21}(\omega)}\widetilde{\gamma}_2(\omega)$$

Se definen entonces los dos factores delante de $\widetilde{\gamma}_1(\omega)$, respectivamente $\widetilde{\gamma}_2(\omega)$ en la expresión que antecede como dos funciones $\widetilde{s}_1(\omega)$ y respectivamente $\widetilde{s}_2(\omega)$:

$$\widetilde{s}_1(\omega) = \frac{G_1(\omega)H_{22}(\omega) - G_2(\omega)H_{21}(\omega)}{H_{11}(\omega)H_{22}(\omega) - H_{12}(\omega)H_{21}(\omega)}$$

$$\widetilde{s}_2(\omega) = \frac{-G_1(\omega)H_{12}(\omega) + G_2(\omega)H_{11}(\omega)}{H_{11}(\omega)H_{22}(\omega) - H_{12}(\omega)H_{21}(\omega)}$$

Las respuestas al impulso $s_1(t)$ y $s_2(t)$ son simplemente las transformadas de Fourier inversas de $\widetilde{s}_1(\omega)$ y $\widetilde{s}_2(\omega)$, respectivamente. Se hace constar que $s_1(t)$ y $s_2(t)$ son magnitudes escalares reales, por su naturaleza física. Hay para esto una razón algebraica que obedece a las propiedades de la transformación de Fourier. $s_1(t)$ y $s_2(t)$ son las dos funciones que, convolucionadas respectivamente con las medidas $\gamma_1(t)$ y $\gamma_2(t)$, devuelven la tensión mecánica $\sigma_0(t)$ en el punto crítico 0 del conjunto electrónico 7:

$$\sigma_0(t) = \int_0^t s_1(u)\gamma_1(t-u)du + \int_0^t s_2(u)\gamma_2(t-u)du$$

La variable *u* bajo el signo de integral es la variable muda de integración.

Una versión discretizada de esta ecuación integral es la expresión antes dada del observador de estado $\hat{\sigma}(t)$. Para obtener tal versión discretizada, basta por ejemplo con sustituir las integrales por sumatorios discretos y con no utilizar más que los valores de $s_1$ y $s_2$ tomados en los puntos múltiplos del paso de tiempo $\tau$:

$$\hat{\sigma}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} s_1(k\tau)\gamma_1(t-k\tau) + \sum_{k=0}^{n-1} s_2(k\tau)\gamma_2(t-k\tau)$$

La discretización tan sólo es válida con un paso de tiempo suficientemente pequeño para representar correctamente las integrales y las respuestas $s_1$ y $s_2$, tal y como ilustra la figura 3.

Por supuesto, en todo lo expuesto, el denominador $H_{11}(\omega)H_{22}(\omega) - H_{12}(\omega)H_{21}(\omega)$ no debe anularse para ninguno de los valores de pulsación $\omega$ en el margen de frecuencias de las vibraciones. Si así fuera, no se verificaría la condición de observabilidad: no sería posible deducir las excitaciones a partir de las medidas cinemáticas y habría que posicionar de otro modo los sensores cinemáticos.

El anterior cálculo no es más que una ilustración de una manera de desarrollar un observador de estado para una tensión mecánica de un punto crítico. Ésta es automáticamente generalizable a un sólo sensor o a un número de sensores superior a dos, siempre a condición de observabilidad, por tanto a condición de que el número de canales de medida sea al menos igual al número de grados de libertad de las excitaciones.

El cálculo mediante elementos finitos estriba en el mallado de la estructura geométrica del conjunto electrónico en elementos poliédricos y en la escritura de las ecuaciones de la mecánica en vibración según el método de Galerkin, también denominado formulación débil. El método de los elementos finitos está profusamente documentado en las revistas de matemáticas aplicadas y de mecánica. El cálculo se puede realizar con uno de los abundantes equipos lógicos del mercado. Está disponible una presentación de esta técnica en un artículo titulado «Durability Modelling of a BGA Component under Random Vibration» y presentado en el congreso EuroSimE en Freiburg-im-Breisgau los días 21-23 de abril de 2008 y disponible en el sitio Internet http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4525047&isnumber=4 525005.

El cálculo 5 del daño es realizable, por ejemplo, según el método rainflow, bien conocido (norma NF-A03-406), cuando la tensión mecánica evaluada por el observador de estado es escalar. En este método, se identifican todos los extremos locales de la tensión mecánica y un algoritmo permite identificar ciclos de tensión mecánica, definiéndose cada ciclo mediante uno de los mínimos locales y mediante uno de los máximos locales de la tensión mecánica. Cada ciclo contribuye al daño del punto crítico 0. Un ejemplo de cálculo del daño acumulado consiste en utilizar la hipótesis de Palmgren-Miner, según la cual el daño acumulado es una magnitud escalar que se incrementa con cada ciclo en un valor que tan sólo depende de las características del ciclo en cuestión, independientemente de los ciclos que lo han precedido. Cuando el daño alcanza un valor umbral, se puede considerar que hay una notable probabilidad de que se produzca un fallo del punto crítico 0 y el dispositivo de supervisión está en disposición entonces de generar una alarma. Entonces se pueden tomar medidas preventivas antes de que se produzca el fallo en cuestión.

Cuando la tensión mecánica es más generalmente tensorial, existen varios procedimientos. Uno de ellos está presentado en el citado artículo «Durability Modelling of a BGA Component under Random Vibration». De lo contrario, también existen métodos rainflow generalizados para las magnitudes tensoriales. Finalmente, cabe citar unos criterios multiaxiales de Dang Van y de Sines: véase «Mécanique des matériaux solides», J. Lemaître, J.-L. Chaboche, ISBN 2-10-001397-1.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de evaluación del envejecimiento por fatiga a vibración de un conjunto electrónico, en el que

- se miden una o varias magnitudes cinemáticas en uno o varios puntos particulares que experimentan el movimiento vibratorio,

**caracterizado porque**:

- se establece un modelo dinámico que relaciona las magnitudes cinemáticas medidas y unas tensiones mecánicas experimentadas en unos puntos críticos con relación a la fatiga a vibración, denominándose este modelo observador de estado,
- se infiere de las tensiones mecánicas calculadas según el observador de estado un estado de daño de cada uno de los puntos críticos, estados de daño que caracterizan el envejecimiento que se persigue,
- se integra la cadena medidas cinemáticas - observador de estado - cálculo de los estados de daño en un dispositivo embarcado que dispone de una capacidad de cálculo autónoma.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque**

- se ubica un sensor cinemático en un lugar del conjunto electrónico que no es ni una fijación del conjunto electrónico al soporte ni un punto crítico que ha de supervisarse.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** el observador de estado se determina mediante cálculo según el método de los elementos finitos.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** se ubica el o los sensores en uno o unos lugares que permiten la observabilidad de las tensiones mecánicas en los puntos críticos basándose en el análisis vibratorio del conjunto electrónico por medio del método de los elementos finitos.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque**

- el número de puntos de medida es mayor o igual que el número de grados de libertad de las excitaciones.

6. Procedimiento según una de las anteriores reivindicaciones, **caracterizado porque** dicho conjunto electrónico es una placa electrónica.

7. Procedimiento según una de las anteriores reivindicaciones, **caracterizado porque** una o varias magnitudes cinemáticas comprende la aceleración.

8. Procedimiento según una de las anteriores reivindicaciones, **caracterizado porque** una o varias magnitudes cinemáticas comprende la deformación.

9. Procedimiento según una de las anteriores reivindicaciones, **caracterizado porque** uno o varios puntos particulares que experimentan el movimiento vibratorio corresponde al lugar o a los lugares de su fijación a uno o unos soportes.

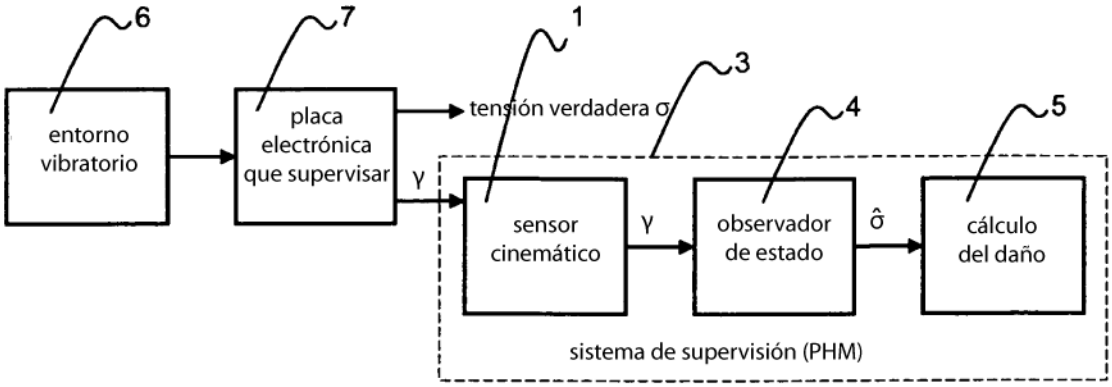


**Figura 1**

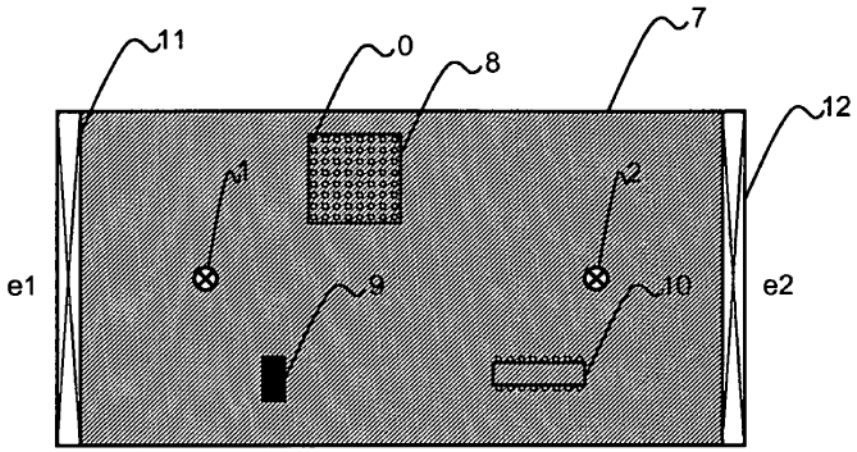


**Figura 2**

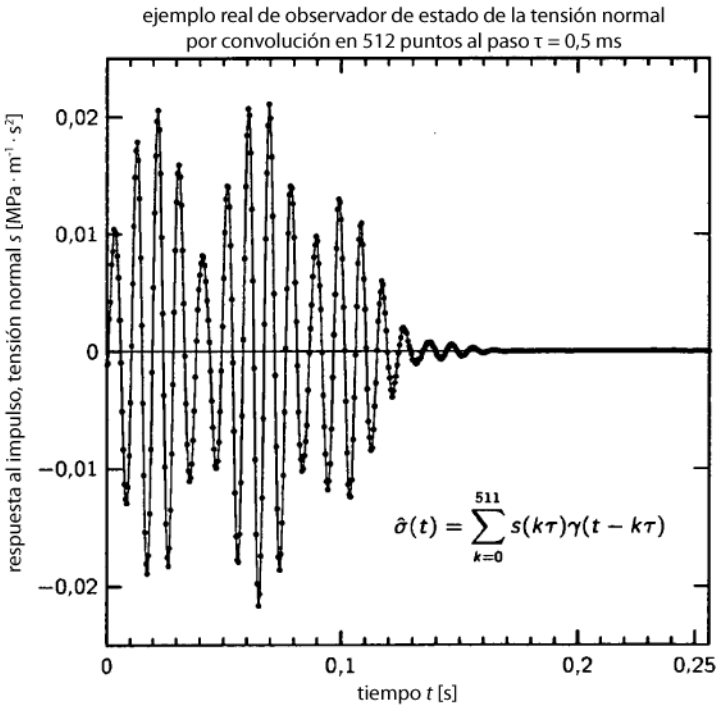


**Figura 3**