

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 718 739**

51 Int. Cl.:

G01N 27/82 (2006.01)

G01N 33/38 (2006.01)

G01N 33/44 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.11.2015 PCT/CZ2015/000132**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.05.2016 WO16070859**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.11.2015 E 15816355 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.01.2019 EP 3215840**

54 Título: **Método para evaluar la distribución, densidad y orientación de las fibras ferromagnéticas eléctricamente conductoras en un material compuesto**

30 Prioridad:

03.11.2014 CZ 20140742

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

04.07.2019

73 Titular/es:

**VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE (100.0%)
Antonínská 548/1
601 90 Brno, CZ**

72 Inventor/es:

**FIALA, PAVEL;
FRIEDL, MARTIN;
HOBST, LEONARD y
KOMÁRKOVÁ, TEREZA**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 718 739 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

Método para evaluar la distribución, densidad y orientación de las fibras ferromagnéticas eléctricamente conductoras en un material compuesto

5

Campo técnico

La invención se refiere a un método para evaluar la distribución y la orientación de las fibras ferromagnéticas eléctricamente conductoras en un material conductor, radicando su aplicabilidad especialmente dentro de la ingeniería civil, donde puede usarse para examinar pisos, vigas portadoras u otros componentes estructurales.

10

Estado de la técnica

En la actualidad, el diagnóstico de materiales heterogéneos usados para los elementos estructurales en la ingeniería civil se realiza a través de métodos destructivos y no destructivos. Los primeros métodos son demostrablemente capaces de monitorizar la condición y la distribución de los componentes compuestos de los materiales compuestos, pero ejercen un efecto destructivo sobre los materiales; los últimos métodos evalúan la homogeneidad de la distribución de los componentes compuestos de los materiales, y su desventaja consiste en la capacidad simplemente relativa o limitada de determinar con precisión la condición, la composición y las propiedades de la parte monitorizada de un elemento estructural.

15

20

El conocimiento y las características relacionados están comprendidos dentro de varios documentos, por ejemplo "Non-destructive Identification of Engineering Properties of Metal Fibre Composites" por J. Vala y M. Horák, o "Non-destructive testing of steel-fibre-reinforced concrete using a magnetic approach" por M. Faifer, R. Ottoboni, S. Toscani y L. Ferrara. Los autores de estos dos informes de investigación examinan y proponen métodos no destructivos, principalmente la espectroscopia de impedancia, para el diagnóstico de elementos estructurales reforzados con fibra de acero. Dentro del método mencionado anteriormente, los parámetros de permeabilidad magnética se evalúan basándose en la definición del entorno magnético anisotrópico. En el dominio de la frecuencia, estos parámetros son de hasta 10 kHz, y se usa un núcleo ferromagnético para establecer las condiciones magnéticas adecuadas para evaluar la impedancia de todo el circuito magnético. A partir de la impedancia y sus componentes en la forma de componente complejo se determina, por medio de parámetros concentrados, la proporción del contenido de los componentes, la forma en forma de aguja del relleno y el aglutinante del material compuesto (tal como el hormigón reforzado con fibra de acero). El inconveniente del presente método consiste en que no define, proporcional o empíricamente, la densidad del refuerzo de metal fabricado de fibras distribuidas uniformemente y configuradas en el material compuesto. El método no especifica la homogeneidad de distribución o la posición de las fibras; solo define, a través de una escala comparativa, una mayor o menor proporción de densidad de las fibras ferromagnéticas configuradas en un material compuesto.

25

30

35

La solicitud de patente WO 2007136264 A1 "Non-destructive testing of composite structures" describe un procedimiento de ensayo no destructivo para los materiales de polímero reforzado con fibras, donde un sensor de infrarrojos (tal como una cámara de infrarrojos) se usa para crear imágenes del objeto probado. Este objeto es en general un material de polímero reforzado con fibras. De acuerdo con la invención descrita en la solicitud de patente, un grupo de cables de resistencia se calienta durante o antes del ensayo del objeto, y el calor actúa internamente, a través del conjunto de cables eléctricamente resistentes incorporados adecuadamente en la estructura fibrosa de refuerzo del material. El calentamiento mejorado de la región se captura por medio de un sensor de infrarrojos. Por lo tanto, en un material polimérico, los defectos de las fibras de refuerzo pueden llegar a ser fáciles de reconocer durante el ensayo. El principal campo de aplicación se encuentra en la producción y la verificación apropiada de los materiales, por ejemplo, dentro de la fabricación de componentes aeroespaciales. El método se basa en la detección infrarroja de ondas reflejadas y, por lo tanto, permanece fuera del alcance del objeto de la invención especificado anteriormente.

40

45

50

La publicación "Magnetic validations system for steel fiber reinforced concrete" de E. Brosa Ciércoles desvela un dispositivo que comprende un núcleo ferromagnético en forma de C, U o E que tiene dos brazos y una base y está equipado además con al menos dos bobinas eléctricas. Cada una de las bobinas eléctricas está configurada en un brazo del núcleo ferromagnético. Además, los cables de la bobina eléctrica están en sus terminales de devanado conectados a un circuito eléctrico exterior que incluye un generador de tensión eléctrica con una frecuencia ajustable f y un dispositivo de detección y medición que comprende un medidor de impedancia. Los métodos develados describen las propiedades conocidas del campo electromagnético y sus efectos en las interfaces del material, donde la evaluación se basa en los valores medidos del campo electromagnético y el medidor de impedancia. Esta publicación no proporciona ningún soporte teórico de los principios de colocación en tierra relacionados con la impedancia, las pérdidas de rendimiento, la densidad de las fibras y la disposición del campo electromagnético, ni considera el diseño del dispositivo en un estado resonante o casi resonante.

55

60

La publicación "Low frequency electrical and magnetic methods for non-destructive analysis of fiber dispersion in fiber reinforced cementitious composites - an overview" de M. Faifer et al., desvela un método para evaluar la distribución, densidad y orientación de las fibras y/o formaciones ferromagnéticas eléctricamente conductoras en un

65

material compuesto (hormigón reforzado con fibra (FRC) y compuesto cementoso reforzado con fibra (FRCC)). En primer lugar, las bobinas eléctricas configuradas en los brazos del núcleo ferromagnético se establecen a una frecuencia dada f , se excitan y a continuación se evalúa la impedancia compleja Z a una distancia D de la muestra de material compuesto monitorizada. Posteriormente, el núcleo ferromagnético se hace rotar un ángulo de rotación determinado y la impedancia compleja Z se evalúa nuevamente. Esta medida se repite hasta que el núcleo ha rotado 360° . La densidad de masa de la muestra de material compuesto se evalúa a partir de los valores medidos de la impedancia compleja Z . Finalmente, el núcleo ferromagnético se mueve a un nuevo punto de medición y se repite la medición. En este método, la impedancia se evalúa sin tener en cuenta la disposición electromagnética de la muestra núcleo-bobina del sistema, la relación entre el componente real y el componente imaginario y la posibilidad de un estado resonante o casi resonante. Además, el documento no desvela ningún análisis de pérdidas con respecto a la impedancia medida, la orientación del dispositivo o las fibras. Además, no se desvelan frecuencias de excitación específicas y, dentro de una medición, el núcleo ferromagnético simplemente rota y no se desplaza en la dirección del eje x o y .

La solicitud de patente europea EP 0389916 A1, describe un aparato usado para determinar las propiedades dieléctricas de los materiales. Una bobina produce un campo magnético alterno que impregna la muestra a examinar. Se miden los cambios en el campo alternativo debido a las propiedades eléctricas de la muestra. Durante la operación de medición, puede colocarse una bobina de campo junto a una muestra, haciendo posible la medición sin contacto y, por consiguiente, no destructiva de una pieza de ensayo. El aparato es específicamente adecuado para medir la humedad en partes de ensayo, para medir la concentración y para el análisis de gases. El aparato, que también puede ser de construcción transportable, es específicamente adecuado para mediciones en serie y continuas. El dispositivo y el método desvelados no funcionan con materiales ferromagnéticos.

La publicación "A magnetic method for non-destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in Steel fiber reinforced cementitious composites - part 1, method calibration" de L. Ferrara et al., desvela un método para la detección de la densidad y la orientación de la fibra basado en el uso de una sonda sensible a las propiedades magnéticas de las fibras de acero. La presencia y la posición relativa de las fibras de acero modifican el flujo unido por el devanado de la sonda, resultando de este modo en una variación en la impedancia. La concentración promedio local y la orientación de las fibras pueden evaluarse de este modo midiendo la variación de la inductancia de la sonda. Este método no funciona en estados resonantes o casi resonantes.

Los métodos o dispositivos descritos y publicados hasta la fecha no han resuelto suficientemente la evaluación de fibras ferromagnéticas eléctricamente conductoras con respecto a otra materia no magnética, incluyendo los componentes o partes de un material compuesto (tales como hormigón reforzado con fibra de acero).

El objetivo de la invención presentada en el presente documento es proponer un método de acuerdo con la reivindicación 1 para evaluar la distribución y la orientación de las fibras ferromagnéticas eléctricamente conductoras en un material compuesto. El método consiste en una evaluación reproducible de la densidad de las fibras ferromagnéticas eléctricamente conductoras en una localización medida, y dicha evaluación se realiza dentro de un intervalo de dispersión garantizado de datos medidos y con una proporción de precisión garantizada.

Sumario de la invención

El objetivo de la invención se consigue diseñando un método para evaluar la distribución, la densidad y la orientación de las formaciones ferromagnéticas eléctricamente conductoras en un material compuesto.

Este método usa un dispositivo que comprende un núcleo ferromagnético en forma de C, U o E que tiene dos brazos y una base. El núcleo ferromagnético muestra las dimensiones A, B y C, donde $C \geq 3 B$ y $B \approx A$, y A es la anchura del brazo, B es la profundidad del brazo y C es la longitud de la base. El núcleo ferromagnético está equipado además con al menos dos bobinas eléctricas. Cada una de las bobinas eléctricas está configurada en el brazo del núcleo ferromagnético. Además, los cables de la bobina eléctrica están en sus terminales de devanado conectados a un circuito eléctrico exterior que incluye un generador de tensión eléctrica con una frecuencia ajustable f y un dispositivo de detección y medición que comprende un medidor de impedancia. El devanado de la bobina eléctrica se realiza de manera parcialmente distribuida o totalmente uniforme y se divide de manera ventajosa entre los brazos del núcleo ferromagnético para garantizar un fuerte acoplamiento electromagnético con el material electromagnético probado.

El método se caracteriza por siete etapas. En la primera etapa, las bobinas eléctricas configuradas en los brazos del núcleo ferromagnético en forma de C, U o E se establecen a una frecuencia f y se excitan a una frecuencia f_{sq3} de tal

manera que la frecuencia f corresponde a una resonancia con el factor de calidad de $Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q_{m\acute{a}x}$, donde $Q_{m\acute{a}x}$ es el factor de calidad máximo de la frecuencia de resonancia del núcleo ferromagnético y la bobina eléctrica a una distancia D de la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada. Posteriormente, en una posición definida por la distancia D de la superficie de una muestra de material compuesto monitorizada, se registra la impedancia compleja \hat{Z} tanto en la forma de componente como exponencial.

En la segunda etapa, la posición del núcleo ferromagnético se cambia haciéndolo rotar un ángulo de rotación a lo largo del eje de uno de los brazos del núcleo ferromagnético, y la impedancia compleja \hat{Z} se mide y se registra tanto en la forma de componente como exponencial.

5 En la tercera etapa, se realiza un cambio de posición y el registro de la impedancia compleja \hat{Z} se realiza de acuerdo con la segunda etapa. En esta etapa, dicho ángulo de rotación para cambiar la posición del núcleo ferromagnético se aplica nuevamente hasta que el brazo haya rotado 360°.

10 En la cuarta etapa, los resultados de las etapas primera a tercera, basados en las fórmulas para la impedancia \hat{Z} y la potencia disipada P, se usan para evaluar la densidad de masa de las formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras de la muestra de material compuesto. La evaluación se realiza en la localización medida.

15 En la quinta etapa, la frecuencia f del dispositivo de detección y medición que comprende un medidor de impedancia se establece a una frecuencia $f_{0,5}$ de tal manera que la frecuencia $f_{0,5}$ corresponde a una resonancia con el factor de calidad de $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}$ para el punto original de la medición y la distancia D. La medición se realiza de acuerdo con las etapas segunda y tercera. A continuación, usando los datos obtenidos de este modo, la homogeneidad de la distribución y la orientación de las formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras de la muestra de material compuesto se evalúan en el punto original de la medición.

20 En la sexta etapa, la bobina eléctrica (2) se establece a la frecuencia $f_{0,5}$ y se excita de tal manera que la frecuencia $f_{0,5}$ corresponde a una resonancia con el factor de calidad de $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}$. El núcleo ferromagnético se desplaza con respecto al punto original de la medición en una distancia dX y una distancia dY . Estas distancias dX y dY se orientan con respecto a la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada y se mantiene la distancia definida D desde la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada. Posteriormente, la impedancia compleja se registra tanto en la forma de componente como exponencial. A continuación, se realiza un cambio en las distancias $-dX$, dY con respecto al punto original de la medición, y la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial. Después de esto, sigue un cambio en las distancias dX , $-dY$ con respecto al punto original de la medición, y la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial. Finalmente, se realiza un cambio en las distancias $-dX$, $-dY$ con respecto al punto original (21) de la medición y se registra la impedancia compleja \hat{Z} tanto en la forma de componente como exponencial. A continuación, usando las mediciones realizadas de este modo, se realiza una evaluación más precisa de la densidad y el volumen del componente monitorizado en la muestra de material compuesto probada. Los registros establecidos de la impedancia compleja \hat{Z} para calcular el valor medio de la densidad y el volumen del componente monitorizado.

35 En la séptima etapa, se establece una nueva posición del núcleo ferromagnético para un nuevo punto de medición en la dirección de la coordenada x, diferente en al menos una distancia mayor que la longitud C de la base más el doble de la anchura A del brazo, igual a $C + 2A$, de acuerdo con las dimensiones del núcleo ferromagnético. Después de establecer la nueva posición del núcleo ferromagnético, las cantidades se miden y evalúan de acuerdo con la etapa primera a sexta, proporcionando una evaluación numérica y gráfica de la distribución, densidad y orientación del componente monitorizado de la muestra de material compuesto probada a lo largo de toda su superficie. El material compuesto es una formación ferromagnética y/o eléctricamente conductora.

40 El método propuesto en el presente documento elimina los inconvenientes anteriormente especificados y aporta una solución para una evaluación metódica de no solo la homogeneidad de la distribución, sino también de la orientación de grupo espacial y la densidad de masa en las fibras ferromagnéticas, eléctricamente conductoras y no conductoras en la región medida.

45 Ventajosamente, el método analizado permite tanto cambiar la sensibilidad del dispositivo bajo ajustes idénticos del sistema de medición como establecer las condiciones para diversos tipos de materiales compuestos. Además, el método no se limita al hormigón reforzado con fibra de acero, sino que puede usarse en otras aplicaciones, tales como algunos materiales compuestos de carbono potencialmente utilizables en ingeniería aeroespacial.

50 El dispositivo de detección para realizar el método está conectado a un circuito magnético diseñado de una manera tal que su frecuencia de resonancia en el espacio libre se encuentra entre 100 kHz y 2 GHz. La elección de la frecuencia f depende de los parámetros del material compuesto probado (la densidad, el volumen y la distribución de los componentes ferromagnéticos y/o eléctricamente conductores) y de la profundidad de medición necesaria desde la superficie de la muestra de material compuesto. El dispositivo de detección y medición comprende un medidor de impedancia y está conectado a una bobina eléctrica que excita un flujo magnético ϕ , como se muestra en la figura 1a. Un núcleo ferromagnético con el devanado eléctrico de la bobina eléctrica de excitación está unido a la muestra de material compuesto. El medidor de impedancia incluido en el circuito eléctrico exterior evalúa la impedancia y sus cambios, tanto en la forma de componente como exponencial. La frecuencia f del circuito de excitación del

dispositivo de detección y medición se establece para localizarse en los pies de la curva de resonancia, figura 2. Las bobinas eléctricas conectadas están configuradas en el núcleo ferromagnético, que se localiza a una distancia predeterminada "D" de la superficie del material compuesto probado. Durante el movimiento del núcleo a la distancia predeterminada "D" de la superficie del material compuesto, se producen cambios en la impedancia medida \hat{Z} . Esta impedancia se evalúa por el dispositivo de detección y medición, y su cambio se registra además a través de una parte del circuito eléctrico exterior. Usando el resultado del cambio, la densidad específica de los componentes ferromagnéticos y el volumen V del material compuesto se interpretan a continuación en función de la posición dada del núcleo ferromagnético. La dimensión A del núcleo ferromagnético puede asumir dimensiones entre 1 mm y 100 mm, y el núcleo puede fabricarse de ferrita, granos de ferrita, chapa metálica orientada y plegada, metal ferromagnético sólido (tal como Fe puro), granos de nanomaterial, Ni, material amorfo, materiales combinados (tal como ferrita) o hierro puro con una nanocapa de Ni. La fabricación debe realizarse invariablemente de tal manera que, para la frecuencia límite de 2 GHz, cualquier núcleo construido como se ha definido anteriormente muestre un valor de permeabilidad magnética relativa mayor que 1. En general, una realización preferida muestra un valor de permeabilidad magnética relativa mayor que 100.

Breve descripción de los dibujos

La invención se representa esquemáticamente en un dibujo relacionado, donde: la figura 1a muestra una configuración común de la bobina eléctrica y el núcleo ferromagnético con respecto a la muestra de material compuesto probada: la figura 1b indica un cambio del núcleo ferromagnético durante la medición real para la siguiente localización de la medición de la impedancia compleja \hat{Z} : la figura 1c presenta el ajuste del cambio de dX y dY del núcleo ferromagnético durante la medición: la figura 2 muestra el comportamiento de la curva de resonancia por medio del factor de calidad, especifica el valor máximo de la curva Q_r a la frecuencia f_r , e indica las cantidades Q_d , f_d a los pies de la curva de resonancia y Q_h , f_h en el intervalo entre los pies y el pico de la curva; la figura 3 presenta un diagrama esquemático de un modelo eléctrico equivalente de la bobina eléctrica enrollada en el núcleo ferromagnético, y el diagrama esquemático se expresa por medio de parámetros concentrados, donde la frecuencia f de las cantidades de corriente y tensión eléctricas están casi en modo de resonancia con el intervalo de $0,1 f_r \leq f \leq 10 f_r$: la figura 4 muestra, por medio de un diagrama eléctrico y parámetros concentrados, un modelo de la muestra de material compuesto examinada dentro del método descrito de evaluación no destructiva de las propiedades del material de acuerdo con la presente invención; y la figura 5 muestra, por medio de un diagrama eléctrico, un modelo con parámetros concentrados que representan una situación en la zona cercana a la resonancia de toda la configuración de tanto la bobina eléctrica enrollada en el núcleo ferromagnético como el campo electromagnético limitado por la región de una parte de la muestra de material compuesto.

Realización a modo de ejemplo de la invención

La presente invención se refiere a y propone un método para evaluar las propiedades electromagnéticas de las partes ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras de un material compuesto.

El dispositivo de detección para realizar el método definido comprende un núcleo ferromagnético **1** que consiste en un base **1.1**, que conecta dos brazos **1.2** que tienen un devanado eléctrico; el núcleo ferromagnético es en forma de C, U o E, y el devanado de la bobina eléctrica está distribuido o es uniforme, tal como se muestra en la figura 1a. El núcleo ferromagnético **1** que tiene las dimensiones A, B, C y el eje 20 está ventajosamente fabricado de un material de ferrita; donde las dimensiones son $C \geq 3B$ y $B \approx A$, y A indica la anchura del brazo **1.2**, B representa la profundidad del brazo **1.2** y C es la longitud de la base **1.1**. El núcleo ferromagnético **1** está equipado con dos bobinas eléctricas **2** enrolladas en los brazos **1.2** y conectadas en serie, terminándose los cables de la bobina en los terminales de devanado **3**. Para garantizar un fuerte acoplamiento magnético entre el núcleo ferromagnético **1** y el volumen examinado V de la muestra de material compuesto **4** en el punto original **21** de la medición, estando el devanado de la bobina eléctrica **2** configurado ventajosamente en ambos brazos **1.2** del núcleo ferromagnético **1**, y los cables del devanado de la bobina eléctrica **2** están conectados en los terminales de devanado **3** a un circuito eléctrico externo **17** que comprende un generador de tensión eléctrica **16** con una frecuencia f ajustable y un dispositivo de detección y medición **18**, que comprende un medidor de impedancia. Los extremos de los brazos **1.2** del núcleo ferromagnético **1** se colocan a una distancia D de la superficie de la muestra de material compuesto examinado **4**. Por lo tanto, se forma un flujo magnético ϕ que se cierra ventajosamente a través de un circuito magnético **6** que comprende el núcleo ferromagnético **1** y el volumen examinado V de la muestra de material compuesto **4**. El devanado de la bobina eléctrica **2** está diseñado de tal manera que la frecuencia del generador de tensión eléctrica **16** crea resonancia, dentro del intervalo de entre 200 MHz y 2 GHz, tal como se muestra en la figura 2: la elección de la frecuencia f depende de los parámetros del volumen examinado V de la muestra de material compuesto **4** y de la profundidad de prueba necesaria desde la superficie del volumen examinado V de la muestra de material compuesto **4**. El circuito eléctrico exterior **17** contiene un dispositivo de detección y medición **18** que evalúa la impedancia compleja \hat{Z} de la bobina eléctrica conectada **2**, como se muestra en la figura 1a. El dispositivo de detección y medición **18** evalúa a continuación la impedancia compleja \hat{Z} y sus cambios tanto en la forma de componente como exponencial. La frecuencia f del generador de tensión eléctrica **16** incluido en el circuito eléctrico externo **17** se establece para localizarse a los pies de la curva de resonancia **19**, figura 2, y la frecuencia se define adicionalmente por la frecuencia inferior f_d con el límite inferior **8** del factor de calidad Q_d y la frecuencia superior f_h con el límite superior **7** del factor de calidad Q_h . El efecto de resonancia se producirá si los parámetros se

establecen de acuerdo con el esquema del modelo equivalente, véase la figura 5, donde los parámetros concentrados se describen mediante inducciones L, capacidades C, resistencias R y la inducción común M. Con los parámetros establecidos de esta manera, la frecuencia de resonancia f del generador de tensión eléctrica **16** y del circuito eléctrico externo **17** está dentro del intervalo de entre 100 kHz y 2 GHz y, simultáneamente, dentro del intervalo definido por la frecuencia inferior f_d con el límite inferior **8** del factor de calidad Q_d y la frecuencia superior f_h con el límite superior **7** de la calidad factor Q_h . Además, la propiedad de la homogeneidad del volumen examinado V en la muestra de material compuesto **4** puede describirse a través del esquema del modelo equivalente con parámetros concentrados, que incluyen capacidad C_0 , resistencia R_0 e inductancia L_0 , como se indica en la figura 4. Los parámetros de este modelo vienen dados por la calidad del volumen examinado V de la muestra de material compuesto **4**; las propiedades del núcleo ferromagnético **1** y el espacio de aire **5** pueden describirse a través del esquema del modelo equivalente con parámetros concentrados, que incluyen capacidad C_s , resistencia R_s e inductancia L_s , como se muestra en la figura 3. La propiedad del circuito magnético **6**, que transporta el flujo magnético ϕ y comprende el núcleo ferromagnético **1**, el devanado de la bobina eléctrica **2** y el espacio de aire **5**, se proporciona por la distancia D entre los extremos de los brazos **1,2** del núcleo ferromagnético **1** y la superficie de la muestra de material compuesto examinada **4**. Las partes del volumen investigado V donde se presentan las formaciones monitorizadas de la muestra de material compuesto **4** pueden caracterizarse a través del modelo equivalente con parámetros concentrados de acuerdo con la figura 5, y estas partes se unen por un acoplamiento electromagnético **10** al núcleo ferromagnético **1**. Las partes del volumen investigado V donde están presentes las formaciones monitorizadas pueden describirse por medio de la capacidad C_s , la resistencia R_s y la inductancia L_s y las propiedades electromagnéticas que caracterizan el núcleo ferromagnético **1**, el devanado de la bobina electromagnética **2** y el espacio de aire **5** (que ocupa el espacio entre el extremo del núcleo ferromagnético **1** y la superficie de la muestra de material compuesto examinada **4**, la capacidad C_0 , la resistencia R_0 y la inductancia L_0 (figura 4) y la inductancia común M (figura 5). Los elementos caracterizan a continuación los parámetros materializados por el devanado de la bobina eléctrica **2** en el núcleo ferromagnético **1** suministrados a través de los cables en los terminales **3** del devanado de la bobina eléctrica **2**. La alimentación se facilita aún más a través del circuito eléctrico externo **17** que comprende un generador de tensión eléctrica **16** con la frecuencia f manipulable, el circuito que se crea en los terminales **3** del devanado de la bobina eléctrica **2** de los valores instantáneos **12** de la tensión eléctrica $u(t)$ y los valores instantáneos **12** de la corriente eléctrica $i(t)$ pasan a través de los terminales **3** del devanado de la bobina eléctrica **2**. A continuación, el dispositivo de detección y medición **18** evalúa la impedancia compleja \hat{Z} y sus cambios como se especifica en la presente invención.

La frecuencia f de la señal de excitación del dispositivo de detección y medición **18** se establece de tal manera que el factor calidad de resonancia Q_h podría asumir los valores de

$$Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}, \quad Q_{sq2} = \frac{1}{\sqrt{2}} Q_{m\acute{a}x}, \quad Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q_{m\acute{a}x}$$

El factor no asumirá valores por debajo de la magnitud del factor Q_d (figura 2). En el contexto experimental, los valores demostraron ser beneficiosos para la evaluación final de la localización con una distribución no homogénea de los componentes de material compuesto. La impedancia compleja \hat{Z} del comportamiento armónico de los componentes del campo eléctrico y magnético se puede escribir como

$$\hat{Z} = \frac{|\hat{E}|}{|\hat{H}|}, \tag{1}$$

donde \hat{E} es el vector complejo de la intensidad del campo eléctrico, y \hat{H} es el vector complejo de la intensidad del campo magnético. El vector complejo de la densidad específica de la potencia eléctrica se puede escribir en la forma

$$\hat{\Pi} = \hat{E} \times \hat{H}, \tag{2}$$

donde el símbolo \times indica el producto vectorial. A continuación, para el circuito conectado de acuerdo con la figura 1a, la impedancia compleja \hat{Z} , en forma exponencial, que contiene componentes del campo eléctrico y magnético de la configuración dada del circuito magnético **6** y la muestra de material compuesto **4**, se escribe como

$$\hat{Z}_0 = \frac{\|\hat{E}\|}{\|\hat{H}\|} \angle \varphi_0, \tag{3}$$

donde $\angle \varphi_0$ expresa el ángulo de número complejo en la forma exponencial, $\|\hat{E}\|$ es el módulo vectorial de la intensidad del campo eléctrico, $\|\hat{H}\|$ indica el módulo vectorial de la intensidad del campo magnético, y la impedancia compleja \hat{Z} , que consiste en los componentes obtenidos a partir del dispositivo de detección y medición

18, se escribe como

$$\hat{Z}_0 = \frac{|\hat{u}|}{|\hat{i}|} \angle \varphi_0, \quad (4)$$

5 donde $|\hat{u}|$ es el módulo del valor instantáneo de la tensión eléctrica, $|\hat{i}|$ indica el módulo del valor instantáneo de la corriente eléctrica y \hat{U} representa la forma compleja de la tensión eléctrica en los terminales **3** de la bobina eléctrica **2**, con una expresión equivalente a través de los parámetros concentrados (figura 3). La bobina está configurada en el núcleo ferromagnético **1**, tal como se indica en la figura 1a. \hat{I} es entonces la forma compleja de la corriente eléctrica que fluye a través de la bobina eléctrica **2**, con una expresión equivalente a través de los parámetros concentrados (véase el diagrama equivalente en la figura 3), en el núcleo ferromagnético **1**, como se muestra en la figura 1a. Para la frecuencia de resonancia preestablecida f_r de toda la configuración, que consiste en el dispositivo de detección y medición **18** y la bobina eléctrica enrollada en los brazos **1.2** del núcleo ferromagnético **1** a la distancia definida D de la muestra de material compuesto **4**, para la impedancia compleja, en la forma exponencial la fórmula es

$$\hat{Z}_0|_{f_r} = \frac{\|\hat{E}\|}{\|\hat{H}\|} \angle \varphi_0, \varphi_0 \cong 0. \quad (5)$$

Para la forma de componente, la impedancia compleja se escribe como

$$\hat{Z}_0|_{f_r} = Z_{0,Re} + jZ_{0,Im}, \forall f = f_r \text{ tenemos } Z_{0,Im} \cong 0,$$

donde $Z_{0,Re}$, $Z_{0,Im}$ son los componentes real e imaginario de la impedancia compleja \hat{Z} , y también se tiene la proporción

$$Z_{0,Re} = \frac{P}{I^2},$$

donde P es la potencia eléctrica disipada en la región con volumen V , en la parte medida del material compuesto, e I es el módulo de las corrientes eléctricas que se cierran en la región medida de la muestra de material compuesto **4**. Si todo el sistema de resonancia no se establece dentro de la zona de resonancia, como se indica en las figuras **2** y **5**, la resonancia compleja \hat{Z} cambia, y se tiene

$$\hat{Z}_0|_{f \neq f_r} = \frac{\|\hat{E}\|}{\|\hat{H}\|} \angle \varphi_0, \varphi_0 \neq 0. \quad (6)$$

El cambio de resonancia también para la frecuencia preestablecida f_r del dispositivo de detección y medición **18** y para la bobina eléctrica **2** enrollada en los brazos **1.2** del núcleo ferromagnético se produce de tal manera que, con respecto al estado de referencia preestablecido con un volumen definido V y la distribución de los componentes de la muestra de material compuesto monitorizada **4**, y dadas las distancias idénticas D entre el núcleo ferromagnético **1** y la superficie de la muestra de material compuesto **4**, el volumen o sentido de distribución o el volumen y el sentido de distribución de una parte de la muestra de material compuesto **4** cambia en la zona monitorizada de la muestra. El material consiste en formaciones ferromagnéticas, tal como las que tienen una forma acicular, usadas como relleno en el hormigón reforzado con fibra de acero. La potencia eléctrica disipada P está unida a la densidad de zona de la potencia activa de la expresión (2), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$P = \int_{S_{jha}} |\hat{H}| dS, \quad (7)$$

donde dS es el vector del elemento de la zona superficial de la parte medida de la muestra de material compuesto **4**. Usando las relaciones expresadas en las fórmulas (1) a (7), es posible, como se establece en esta invención, calibrar y evaluar los parámetros individuales de las propiedades deseadas de las muestras de material compuesto **4**, por ejemplo, la densidad, la orientación y la uniformidad de distribución de las formaciones de relleno.

La frecuencia f del dispositivo de detección y medición **18** se establece de tal manera que se produce la resonancia $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}$, como se muestra en la figura 2, lo que permite un ajuste muy sensible del método de detección; este procedimiento es adecuado para evaluar la distribución de las formaciones del material compuesto con respecto a su homogeneidad.

5 La frecuencia f del dispositivo de detección y medición **18** se establece de tal manera que se produce la resonancia

$Q_{sq2} = \frac{1}{\sqrt{2}} Q_{m\acute{a}x}$, lo que conduce a una detección menos sensible de la falta de homogeneidad de la distribución

de las formaciones del material compuesto, pero también es adecuado para evaluar la densidad de las formaciones monitorizadas en la muestra de material compuesto **4**, siendo las formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras.

10 Alternativamente, la frecuencia f del dispositivo de detección y medición **18** se establece de tal manera que se

produce la resonancia $Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q_{m\acute{a}x}$, lo que es adecuado para una evaluación precisa de la densidad del componente monitorizado en la muestra de material compuesto **4**, siendo el material formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras.

15 El punto original **21** de la medición indica el espacio definido por la posición del eje **20** y por el espacio que puede lograrse haciendo rotar el brazo **1.2** a lo largo del eje **20** un ángulo de 0-360°. Cuando la posición del eje **20** cambia con las distancias dX y dY , se establece un nuevo punto **22** de medición y se define un nuevo espacio.

20 El procedimiento para evaluar la distribución y la orientación de las fibras ferromagnéticas, eléctricamente conductoras en el material compuesto es el siguiente:

En la primera etapa, la bobina eléctrica **2** enrollada en los brazos **1.2** del núcleo ferromagnético **1** y conectada al dispositivo de detección y medición **18** se establece a una frecuencia f y se excita de tal manera que la frecuencia

corresponde a la resonancia $Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q_{m\acute{a}x}$. En esta posición que tiene la distancia definida D de la superficie de

25 la muestra de material compuesto monitorizada **4**, la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial.

A continuación, en la segunda etapa, la posición del núcleo ferromagnético **1** se cambia a través de hacerlo rotar un ángulo **24** de rotación (tal como 10°) a lo largo del eje **20** de uno de los brazos **1.2** del núcleo **1**, y la impedancia compleja \hat{Z} , se registra y se mide tanto en la forma de componente como exponencial.

30 La tercera etapa comprende un cambio y un registro de la impedancia compleja \hat{Z} de acuerdo con la segunda etapa, y estas operaciones se realizan de tal manera que el cambio de la posición del núcleo ferromagnético **1** por el ángulo **24** de rotación se repita progresivamente hasta que el brazo haya rotado 360°.

Posteriormente, en la cuarta etapa, se usan los resultados de la etapa primera a tercera para evaluar, a partir de las fórmulas para la impedancia \hat{Z} y la potencia disipada P , la densidad de masa de las formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras de la muestra de material compuesto **4** en la localización medida del punto original **21** de la medida.

35 En la quinta etapa, la frecuencia f en el dispositivo de detección y medición **18** se establece a $f_{0,5}$ de tal manera que

se produce la resonancia $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}$ en la misma localización medida del punto original **21** de la medición y del

40 espacio de aire **5** a la distancia D , y la medición se realiza de acuerdo con las etapas segunda y tercera. A continuación, usando los datos obtenidos de este modo, la homogeneidad de la distribución de los componentes de material compuesto se evalúa en la localización monitorizada, es decir, el punto original **21** de la medición, y también se evalúa la orientación del componente de material compuesto monitorizado, siendo el material unas formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras. Los resultados adquiridos de la impedancia compleja \hat{Z} se representan gráficamente usando coordenadas polares, y la impedancia \hat{Z} puede representarse tanto en la forma de componente como exponencial.

45 La sexta etapa consiste en que la bobina eléctrica **2** enrollada en los brazos **1.2** del núcleo ferromagnético **1** y conectada al dispositivo de detección y medición **18** se establece a la frecuencia $f_{0,5}$ y se excita de tal manera que la

frecuencia corresponda a la resonancia $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}$; la posición de los brazos **1.2** del núcleo ferromagnético se

desplaza al punto de medición **22**, lo que es nuevo con respecto a la configuración de acuerdo con la primera etapa.

50 El cambio se realiza mediante las distancias dX y dY en el sistema aplicado de coordenadas **23**, donde dX y dY se establecen en $dX = A$ y $dY = B$, figura 1c. Las distancias dX y dY están orientadas con respecto a la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada **4**, y el espacio de aire **5** se mantiene a la distancia definida D de la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada **4**. La impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial. Después de esto, sigue un cambio en las distancias - dX , dY con respecto al punto original **21** de la medición, y la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de

componente como exponencial. A continuación se realiza un cambio en las distancias dX , $-dY$ con respecto a la posición inicial del punto original **21** de la medición, y la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial. Posteriormente, se realiza un cambio en las distancias $-dX$, $-dY$ con respecto a la posición inicial del punto original **21** de la medición, y la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial. A continuación, usando las mediciones realizadas de este modo, la densidad y el volumen V del componente monitorizado en la muestra de material compuesto probada **4** se evalúan con mayor precisión. El material son formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras. Después de eso, los registros establecidos de la impedancia compleja \hat{Z} se usan para calcular su valor medio.

A continuación, la séptima etapa comprende la colocación del eje **20** del núcleo ferromagnético **1** en un nuevo punto **22** de la medición del núcleo ferromagnético **1**. Esta posición es, en la dirección de la coordenada x , diferente en al menos una distancia mayor que la longitud C de la base **1.1** más el doble de la anchura A del brazo **1.2**, igual a $C + 2A$, de acuerdo con las dimensiones del núcleo ferromagnético **1** (figura 1b). Después de establecer la nueva posición del eje **20** para el núcleo ferromagnético **1**, se miden y evalúan las cantidades de acuerdo con la etapa primera a sexta. Por lo tanto, se obtiene una evaluación numérica y gráfica de la distribución, densidad y orientación del componente monitorizado de la muestra de material compuesto probada **4**. El material son formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras a lo largo de toda la superficie de la muestra.

Aplicabilidad industrial

El método descrito en el presente documento es adecuado para la ingeniería civil, la aviación y la ingeniería de materiales, donde puede emplearse como un método de diagnóstico no destructivo para examinar materiales compuestos tanto con rellenos ferromagnéticos como con rellenos eléctricamente conductores, no ferromagnéticos o ferromagnéticos.

Resumen de signos de referencia

- 1 Núcleo ferromagnético
- 1.1 Base
- 1.2 Brazo
- 2 Bobina eléctrica
- 3 Terminales de devanado
- 4 Muestra de material compuesto
- 5 Espacio de aire
- 6 Circuito/flujo magnético ϕ
- 7 Límite superior del factor de calidad Q_h
- 8 Límite inferior del factor de calidad Q_d
- 9 Comportamiento de la curva de resonancia del factor de calidad
- 10 Acoplamiento electromagnético
- 11 Valor instantáneo de la tensión eléctrica $u(t)$
- 12 Valor instantáneo de la corriente eléctrica $i(t)$
- 15 Inductancia común M
- 16 Generador de tensión eléctrica
- 17 Circuito eléctrico exterior
- 18 Dispositivo de detección y medición
- 19 Pies de la curva de resonancia
- 20 Eje de núcleo ferromagnético
- 21 punto original de medida
- 22 Nuevo punto de medida
- 23 Sistema de coordenadas
- 24 Ángulo de rotación
- Capacidad C_s
- Resistencia R_s
- Inductancia L_s
- Inductancia L_0
- Capacidad C_0
- Resistencia R_0
- dX - distancia
- dY - distancia
- f - frecuencia de medición del dispositivo

REIVINDICACIONES

1. Un método para evaluar la distribución, densidad y orientación de las fibras y/o formaciones ferromagnéticas eléctricamente conductoras en un material compuesto, en el que el método usa un dispositivo que comprende un núcleo ferromagnético en forma de C, U o E (1) que tiene dos brazos (1.2) y una base (1.1), en el que el núcleo ferromagnético (1) muestra unas dimensiones A, B y C, donde $C \geq 3 B$ y $B \approx A$, y A es la anchura del brazo (1.2), B es la profundidad del brazo (1.2) y C es la longitud de la base (1.1), en el que el núcleo ferromagnético (1) está equipado además con al menos dos bobinas eléctricas (2), estando cada una de las bobinas eléctricas (2) configurada en el brazo (1.2) del núcleo ferromagnético (1), y en el que los cables de la bobina eléctrica (2) están en sus terminales de devanado (3) conectados a un circuito eléctrico exterior (17) que incluye un generador de tensión eléctrica (16) con una frecuencia ajustable f y un dispositivo de detección y medición (18) que comprende un medidor de impedancia, en el que
- 5
- 10
- 15 a. en la primera etapa, las bobinas eléctricas (2) configuradas en los brazos (1.2) del núcleo ferromagnético en forma de C, U o E (1) se establecen a una frecuencia f y se excitan a una frecuencia f_{sq3} de tal manera que la frecuencia f corresponde a una resonancia con el factor de calidad de $Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q_{m\acute{a}x}$, donde $Q_{m\acute{a}x}$, es el factor de calidad máximo de la frecuencia de resonancia del núcleo ferromagnético (1) y la bobina eléctrica (2) a una distancia D de la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada (4), en el que, a continuación, en una posición definida por la distancia D de la superficie de una muestra de material compuesto monitorizada (4), la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial en un punto original (21) de medición;
- 20
- 25 b. en la segunda etapa, la posición del núcleo ferromagnético (1) se cambia haciéndolo rotar un ángulo (24) de rotación a lo largo del eje (20) de uno de los brazos (1.2) del núcleo ferromagnético (1), y la impedancia compleja \hat{Z} se mide y se registra tanto en la forma de componente como exponencial;
- 30 c. en la tercera etapa, se realiza un cambio de posición y el registro de la impedancia compleja \hat{Z} de acuerdo con la segunda etapa, y el cambio de la posición del núcleo ferromagnético (1) por el ángulo (24) de rotación se repite hasta que el brazo (1.2) haya rotado 360° ;
- 35 d. en la cuarta etapa, los resultados de las etapas primera a tercera, basados en las fórmulas para la impedancia \hat{Z} y la potencia disipada P, se usan para evaluar la densidad de masa de las formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras de la muestra de material compuesto (4), realizándose la evaluación en la localización medida;
- 40 e. en la quinta etapa, la frecuencia f del dispositivo de detección y medición (18) que comprende un medidor de impedancia se establece a una frecuencia $f_{0,5}$ de tal manera que la frecuencia $f_{0,5}$ corresponde a una resonancia con el factor de calidad de $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}$ para el punto original (21) de la medición y la distancia D, y la medición se realiza de acuerdo con las etapas segunda y tercera, en el que usando los datos obtenidos de este modo, la homogeneidad de la distribución y la orientación de las formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras de la muestra de material compuesto (4) se evalúan en el punto original (21) de la medición;
- 45 f. en la sexta etapa, la bobina eléctrica (2) se establece a la frecuencia $f_{0,5}$ y se excita de tal manera que la frecuencia $f_{0,5}$ corresponde a una resonancia con el factor de calidad de $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{m\acute{a}x}$, y la posición del núcleo ferromagnético (1) se desplaza las distancias dX y dY con respecto al punto original (21) de la medición, estando dichas distancias dX y dY orientadas con respecto a la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada (4), y se mantiene la distancia definida D desde la superficie de la muestra de material compuesto monitorizada (4), en el que a continuación se registra la impedancia compleja \hat{Z} tanto en la forma de componente como exponencial, se realiza un cambio en las distancias $-dX$, dY con respecto al punto original (21) de la medición y la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial; en el que a continuación sigue un cambio en las distancias dX , $-dY$ con respecto al punto original (21) de la medición y la impedancia compleja \hat{Z} se registra tanto en la forma de componente como exponencial; en el que finalmente se realiza un cambio en las distancias $-dX$, $-dY$ con respecto al punto original (21) de la medición y se registra la impedancia compleja \hat{Z} tanto en la forma de componente como exponencial, en el que a continuación, usando las mediciones realizadas de este modo, se realiza una evaluación más precisa de la densidad y el volumen del componente monitorizado en la muestra de material compuesto probada (4) y se usan los registros establecidos de la impedancia compleja \hat{Z} para calcular el valor medio de la densidad y el volumen del componente monitorizado; y
- 50
- 55 g. en la séptima etapa, se establece una nueva posición del núcleo ferromagnético (1) para un nuevo punto de medición (22) en la dirección de la coordenada x, diferente en al menos una distancia mayor que la longitud C de la base (1.1) más el doble de la anchura A del brazo (1.2), igual a $C + 2A$, de acuerdo con las dimensiones del núcleo ferromagnético (1), en el que después de establecer la nueva posición del núcleo ferromagnético (1), las cantidades se miden y evalúan de acuerdo con la etapa primera a sexta, proporcionando una evaluación numérica y gráfica de la distribución, densidad y orientación del componente monitorizado de la muestra de material compuesto probada (4) a lo largo de toda su superficie, siendo dicho material unas fibras y/o unas
- 60

formaciones ferromagnéticas y/o eléctricamente conductoras.

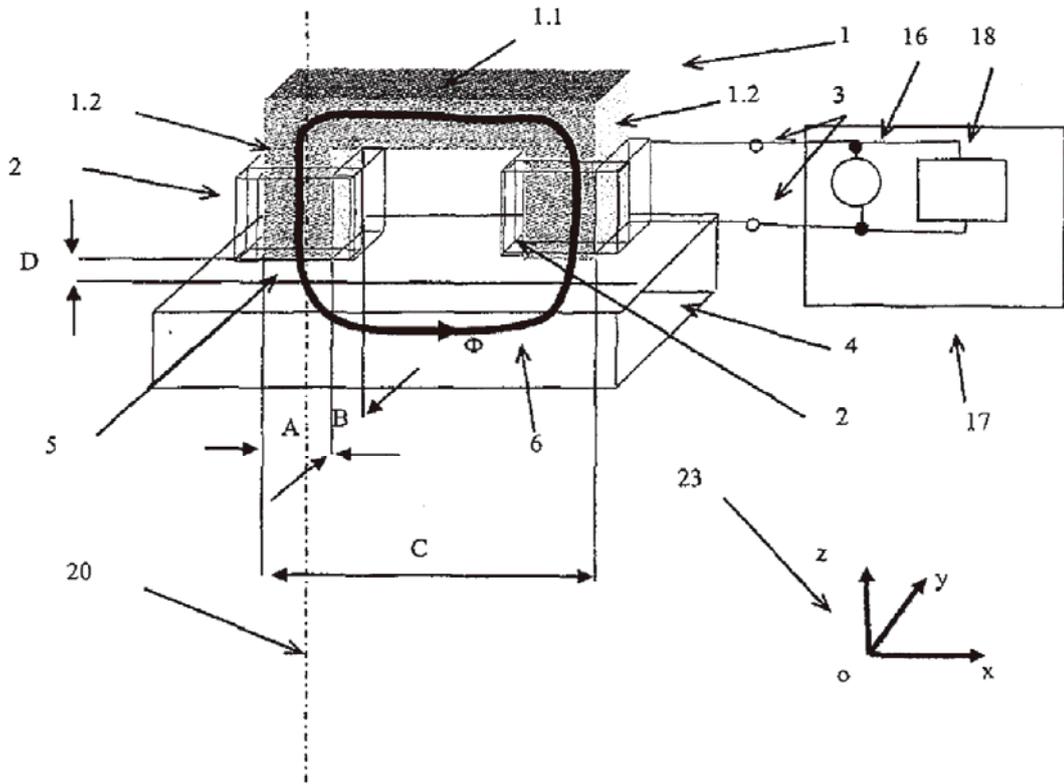


Fig. 1a

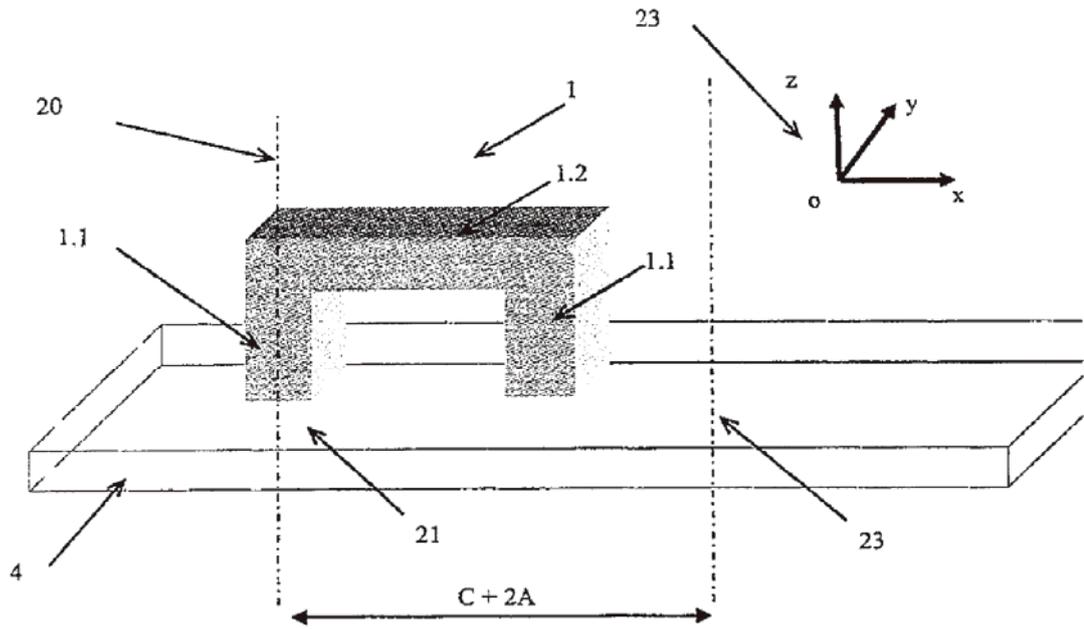


Fig. 1b

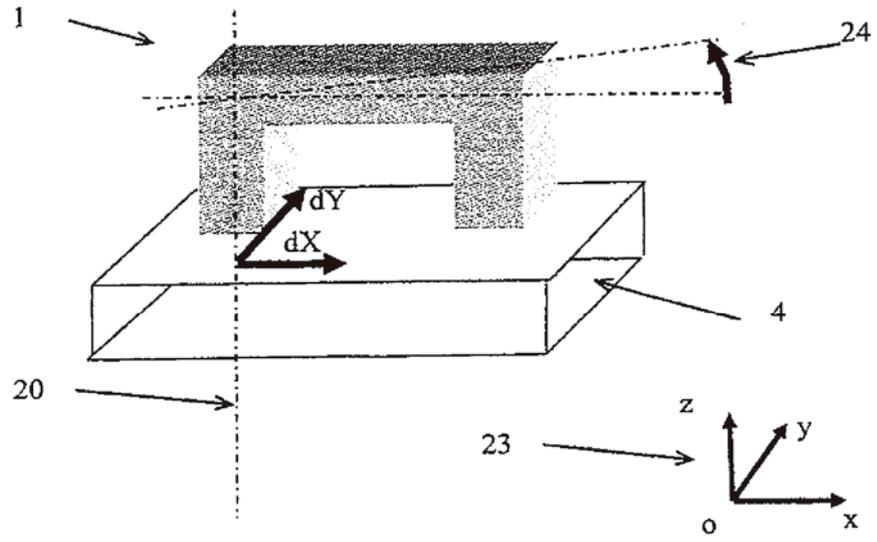


Fig.1c

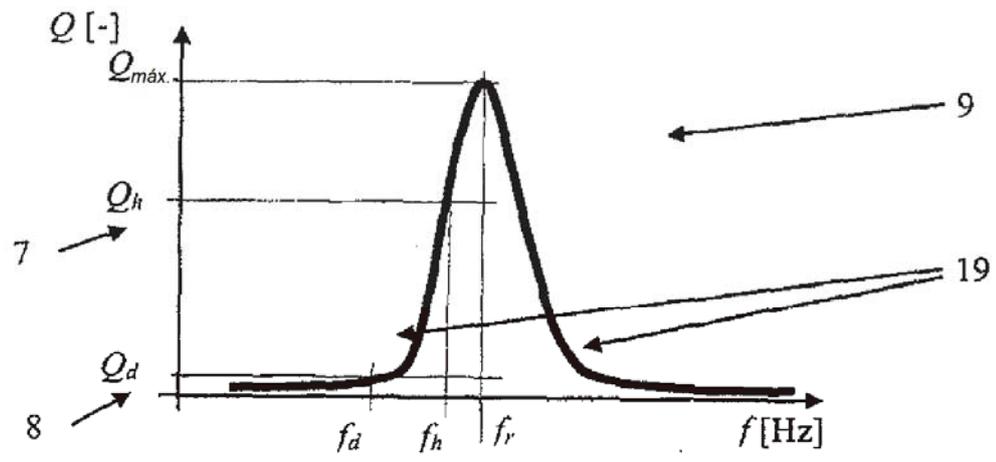


Fig. 2

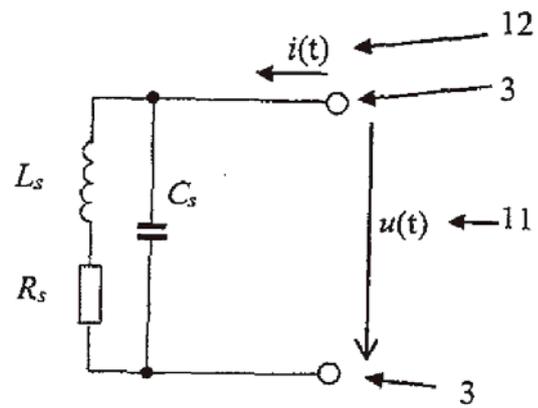


Fig. 3

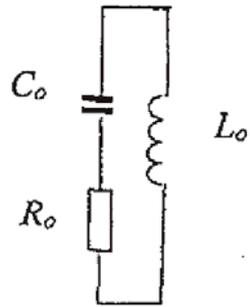


Fig. 4

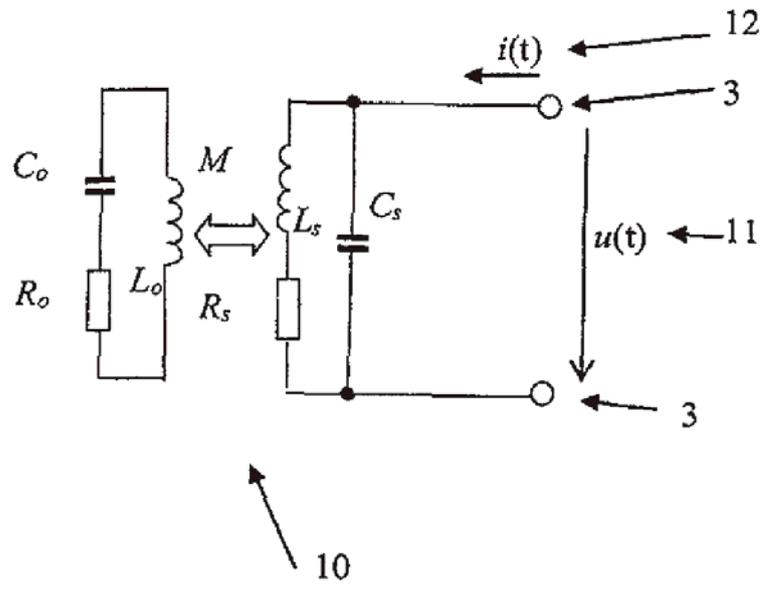


Fig. 5