

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 401 760**

51 Int. Cl.:

**G01R 33/12** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.11.2010 E 10191044 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.01.2013 EP 2325667**

54 Título: **Procedimiento y aparato para la determinación de defectos en la fabricación de sistemas magnéticos**

30 Prioridad:

**16.11.2009 RU 2009141919**

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

**24.04.2013**

73 Titular/es:

**FEDERALNOE GOSUDARSTVENNOE  
UNITARNOE PREDPRIYATIE "NAUCHNO-  
ISSLEDOVATELSJIY INSTITUT  
ELECTROPHIZICHESKOY APPARATURY IM. D.V.  
EFR (100.0%)  
Doroga na Metallostroy 3 Metallostroy  
Sankt-Petersburg 196641, RU**

72 Inventor/es:

**AMOSKOV, VIKTOR MIKHAILOVICH;  
BELYAKOV, VALERIY ARKADEVICH;  
VASILIEV, VYACHESLAV NIKOLAEVICH;  
EGOROV, SERGEY ALEXANDROVICH;  
IVKIN, VLADIMIR GEORGIEVICH;  
KOROTKOV, VLADIMIR ALEXANDROVICH;  
KUKHTIN, VLADIMIR PETROVICH;  
LAMZIN, EVGENIY ANATOLIEVICH;  
LANTSETOV, ANDREY ANATOLIEVICH;  
LARIONOV, MIKHAIL SERGEEVICH;  
MAXIMENKOVA, NINA ALEXANDROVNA;  
RODIN, IGOR YURIEVICH;  
SYTCHEVSKY, SERGEY EVGENIEVICH;  
FILATOV, OLEG GENNADIEVICH;  
FIRSOV, ALEXEY ANATOLIEVICH y  
SHATIL, NIKOLAY ALEXANDROVICH**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 401 760 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Procedimiento y aparato para la determinación de defectos en la fabricación de sistemas magnéticos

5 **SECTOR TÉCNICO**

La presente invención se refiere a un procedimiento para la determinación de defectos que se producen en la fabricación, ensamblaje y montaje de sistemas magnéticos, es decir, estructuras que comprenden bobinas para corriente eléctrica o imanes permanentes y que sirven como fuentes de campo magnético. La invención puede ser utilizada en la fabricación y ajuste de equipos electrofísicos, pero su utilización no está limitada a estas aplicaciones.

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Existen múltiples estructuras de diferente complejidad que generan campos magnéticos en el medio ambiente y el campo magnético generado debe cumplir ciertas exigencias en cuanto a su configuración y orientación en el espacio. Estas estructuras son denominadas en general sistemas magnéticos.

Existen varias exigencias para la calidad de los sistemas magnéticos. El control directo de la fabricación, ensamblaje y montaje es usualmente complicado en cuanto a calidad, debido a la accesibilidad limitada o a las grandes dimensiones de las estructuras; en otras palabras, los procedimientos basados en la medición directa de desviaciones dimensionales son difíciles o imposibles de aplicar. Por otra parte, el sistema magnético generará un campo magnético distinto del requerido cuando dicho sistema es ensamblado con la utilización de componentes defectuosos, aunque los parámetros geométricos cumplan con las exigencias. Al mismo tiempo, los sistemas magnéticos están destinados a la generación de un campo magnético con parámetros predeterminados y se puede utilizar la información basada en la distribución de campo magnético en el medio ambiente para evaluar la calidad de la fabricación y la integridad operativa del sistema y sus componentes.

Si el sistema magnético ha sido ensamblado de manera apropiada, el campo magnético coincide con el mapa magnético calculado; de otro modo, el campo magnético no se corresponderá con el rendimiento especificado. El término "defecto" que se utiliza más adelante significa una desviación específica realizada en el curso de la fabricación, ensamblaje o montaje del sistema magnético en consideración y que supera las tolerancias tecnológicas objetivo.

La utilización de la medición del campo magnético para control de calidad es conocida en el estado de la técnica. Por ejemplo, un sensor de campo magnético, colocado en el eje de una bobina redonda de corriente continua se puede utilizar para comprobar la ausencia de espiras en cortocircuito en la bobina. La señal del sensor es proporcional al número de espiras de la bobina y en el caso de espiras en cortocircuito, la señal del sensor disminuye y por esta disminución se puede evaluar el número de espiras en cortocircuito (ver I.E. Tamm, Bases of the Electricity Theory, Nauka, Moscow, 1989).

Por lo tanto, sistemas bien conocidos que utilizan la medición del campo magnético pueden proporcionar una respuesta a las siguientes cuestiones: si un aparato ha sido ensamblado de manera apropiada y si sus elementos son funcionales. La información con respecto a la naturaleza (tipo), valor y localización de un defecto se puede conseguir de manera típica solo en los casos más simples.

Para la mayor parte de problemas de ingeniería es necesario conocer la información o bien la naturaleza (tipo) o valor y localización del defecto. La localización del defecto se debe determinar frecuentemente en un área que en general es completamente cerrada para observación visual.

Un ejemplo típico de un sistema magnético es un cable superconductor utilizado en bobinas electromagnéticas como elemento aplicado a la generación de un campo magnético. El cable está formado por hebras torsionadas consistiendo en una gran cantidad de hilos y si hay un hilo defectuoso varía la distribución de campo cerca de la hebra defectuosa.

Del documento US 2001/054509 A1 se conoce modelar la distribución de corrientes en base a las inductancias y resistencias medidas. El procedimiento consiste en resolver ecuaciones para modelar los defectos a través de las pérdidas de corriente. Esta decisión técnica permite calcular el campo magnético con la utilización de la distribución de corriente y, por lo tanto, permite calcular también el campo magnético del defecto. El procedimiento que se da a conocer para la determinación de defecto requiere la medición de resistencias e inductancias de las que no se podría disponer en muchos casos.

Otro documento Duke A.E. y otros: "Coupled Electromagnetic and Thermohydraulic Analysis of ITER Cable Joint", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol. 7, nº2, Junio 1997 da a conocer la determinación de pérdidas de Joule en uniones de superconductores en base a la distribución de corrientes de transporte y corrientes parásitas. Las corrientes parásitas en las uniones de cables se ha propuesto que queden definidas con utilización de la fórmula de Biot-Savart aplicada a la distribución de corrientes determinada. El

procedimiento permite la evaluación de las pérdidas por Joule con utilización del modelo de distribución de corriente, no obstante, no se ha descrito una forma posible de determinar defectos de un sistema magnético.

5 Las bobinas electromagnéticas, por su parte, pueden ser otro ejemplo de un sistema magnético. Estas bobinas tienen frecuentemente dimensiones de varios metros y masas de decenas de quilos, pero se deben montar con exactitud de milímetros. En este caso, el defecto puede ser no solamente un fallo del arrollamiento, sino una colocación defectuosa de la bobina con respecto a una localización predeterminada. De manera ideal, la localización de la bobina se debe relacionar no a sus dimensiones geométricas, sino a la distribución de corriente en la bobina.

10 Una estructura consistente en imanes permanentes puede ser también otro ejemplo de un sistema magnético con uno de los imanes montado de forma incorrecta. Estos sistemas son utilizados como fuentes de campo estático en sistemas de seguimiento, ver patentes RU 2197013 "Procedure and tracking system establishing position and orientation of mobile object" ("Procedimiento y sistema de seguimiento que establece la posición y orientación de un objeto móvil") y RU 2241958 "Method and follow-up for finding position of and location of moving object" ("Procedimiento y seguimiento para encontrar la posición y localización de un objeto móvil").

15 La patente US 5654635 da a conocer un procedimiento y dispositivo para la corrección de errores de medición de un magnetómetro (sistema de medición de campo magnético) montado en un vehículo, por ejemplo, en un avión o un helicóptero. El procedimiento comprende la medición de un campo magnético distorsionado por un sistema magnético (un vehículo), mediante sensores de campo magnético situados dentro del vehículo. Se formula una ecuación asociando el campo magnético medido con campos magnéticos con error hipotético introducido por el sistema magnético, de manera que los campos magnéticos con error hipotético dependen de uno o varios parámetros. La solución de las ecuaciones formuladas permite obtener los valores de los parámetros. Estos valores determinan campos magnéticos con error introducido por el sistema magnético. Este procedimiento está dirigido a corregir los valores medidos de un campo magnético a efectos de obtener los parámetros del campo magnético sin introducción de campos magnéticos con error por el sistema magnético, por ejemplo, un avión o un helicóptero. El procedimiento que se da a conocer no proporciona la determinación de defectos del sistema magnético. Además, este procedimiento requiere llevar a cabo mediciones dentro del sistema magnético; no obstante, no resulta posible en algunos casos.

20 Un problema de la localización de defectos con utilización de la medición de campo fuera de un sistema magnético no se puede resolver en el caso general. Por ejemplo, suponiendo que la corriente fluye en un cilindro infinito con el radio de  $R$  y conociendo que la distribución de campo exacta en el espacio es inversa a la distancia desde el eje del cilindro, no hay manera de determinar la distribución de corriente en este cable cilíndrico porque este campo puede ser generado no solamente con un cable cilíndrico sólido y homogéneo, sino con cualquier cable que tenga simetría cilíndrica, ver I.E. Tamm, Bases of the Electricity Theory, Nauka, Moscow, 1989. Lo indicado es también correcto para defectos asociado con la fabricación, ensamblaje y montaje.

25 Otros documentos de la técnica anterior se dan a conocer en Belyakov V. y otros: "Plasma control in Tokamaks", Physics and Control, Proc. Intern. Conf. Saint Petersburg, Rusia, agosto 24-26, 2005, Piscataway, NJ, USA, IEEE, 24.08.2005, pp. 920-927. De acuerdo con esta publicación, se mide un campo magnético del sistema magnético utilizando, como mínimo, un sensor de campo magnético situado fuera del sistema magnético. Para reconocer defectos del sistema magnético se formula, como mínimo, una ecuación que asocia el campo magnético medido con un campo magnético hipotético del sistema magnético que tiene, como mínimo, un defecto hipotético introducido en el mismo. Además, los campos magnéticos hipotéticos del sistema magnético que tienen, como mínimo, un defecto hipotético introducido en el mismo, son evaluados por un enfoque estadístico con simulaciones de Monte Carlo y permiten determinar desviaciones (defectos) esperados durante la fabricación y ensamblaje del sistema magnético. El procedimiento de evaluación del campo con error requiere mucho tiempo para su implementación y requiere potencia de cálculo significativa.

30 De manera típica, se puede seleccionar un conjunto de posibles defectos tecnológicos en el proceso de fabricación, ensamblaje o montaje para cualquier estructura considerada. Estos "defectos tecnológicos típicos" se pueden describir matemáticamente por un conjunto de parámetros.

35 De este modo, la pérdida de conductividad en una hebra individual puede ser relacionada con defectos de fabricación importantes del cable superconductor. Esta hebra defectuosa se describe matemáticamente por su situación central en el plano en sección del cable.

40 El desplazamiento y la desviación con respecto a otros componentes, así como deformaciones de arrollamiento, son los defectos de fabricación principales de las bobinas electromagnéticas. Se describen matemáticamente con un vector de desplazamiento del centro de la bobina, un ángulo de inclinación y semiejes de una elipse de modo correspondiente.

45 Las desalineaciones en localizaciones prescritas y la variación de magnetización de imanes individuales se refieren a defectos de fabricación principales del sistema magnético permanente. Se describen matemáticamente con un vector de desplazamiento y un vector de magnetización.

Debido a la utilización del procedimiento y aparato, de acuerdo con la solución técnica antes mencionada, solamente se puede determinar la corrección de la fabricación de la estructura, ensamblaje o montaje. Una desventaja de los procedimientos y aparatos conocidos es que no facilitan información adicional con respecto a la naturaleza del defecto o bien esta información es cualitativa.

#### RESUMEN DE LA INVENCION

Un objetivo de la presente invención consiste en dar a conocer un procedimiento y aparato para la determinación de la presencia, localización y parámetros (es decir, características cuantitativas) de los defectos de un sistema magnético mediante el examen de campo magnético en las proximidades del sistema magnético. Un objetivo adicional de la presente invención es la mejora de la exactitud de la determinación de parámetros de defectos del sistema magnético.

El objetivo de la presente invención se consigue por un procedimiento para la determinación de defectos de un sistema magnético, cuyo procedimiento comprende las siguientes etapas:

- medición utilizando, como mínimo, un sensor de campo magnético situado fuera de sistema magnético, el campo magnético del sistema magnético;
- formular, como mínimo, una ecuación que asocia el campo magnético medido con un campo magnético hipotético del sistema magnético que tiene, como mínimo, un defecto hipotético introducido en el mismo; y
- resolver dicha, como mínimo, una ecuación formulada.

El procedimiento se caracteriza porque comprende, antes de la etapa de medición del campo magnético, las siguientes etapas:

- introducir el, como mínimo, un defecto hipotético en el sistema magnético y definir, como mínimo, un parámetro que define el, como mínimo, un defecto hipotético;
  - simular el campo magnético hipotético del sistema magnético teniendo el, como mínimo, un defecto hipotético introducido en el mismo;
  - determinar puntos para la localización del, como mínimo, un sensor de campo magnético;
  - determinar una serie de mediciones del campo magnético;
- en el que el campo magnético hipotético depende de uno o varios parámetros que definen el, como mínimo, un defecto hipotético, y
- en el que los valores de los parámetros son determinados resolviendo el, como mínimo, una ecuación formulada para obtener los valores que determinan los defectos del sistema magnético.

El campo magnético hipotético del sistema magnético puede ser definido en base a simulación utilizando modelos matemáticos bien conocidos del campo magnético, tales como la ley de Biot-Savart-Laplace, ecuaciones de Maxwell o similares.

Se considera que es conocido de antemano un conjunto de defectos típicos del sistema magnético a medir, de manera que los defectos típicos son interpretados como errores tecnológicos en la fabricación, ensamblaje y montaje de una estructura específica y también como fallos del sistema y sus elementos, que podrían ser objeto de predicción por adelantado, de manera que una serie de tipos de defectos se supone que está limitado a una determinada lista, de acuerdo con la estructura del sistema magnético y la tecnología de su fabricación y ensamblaje.

El campo medido se considera que es una superposición de campos generados por un sistema magnético ideal (es decir, una estructura sin defecto) y por todos los defectos. La lista de posibles defectos se constituye y se indica un conjunto de parámetros indeterminados a determinar, que describen cualquier tipo de los defectos, en base a la tecnología de fabricación y características de diseño determinadas (se puede realizar antes de completar la medición). Se determina una distribución de campo magnético para cada defecto a partir de la lista de posibles defectos como resultado de la simulación de campo magnético de un sistema.

Las ecuaciones formuladas forman un sistema de ecuaciones; al resolverlo, se determinan los parámetros de defecto a buscar. Preferentemente, la serie de puntos de medición y, por lo tanto, la serie de ecuaciones preparadas basándose en las señales del sensor no deberían ser menores que el número general de parámetros independientes que definen los defectos a determinar.

Preferentemente, las dimensiones y forma de la proximidad del sistema magnético, es decir, el área en la que se llevan a cabo las mediciones de campo magnético, se definen mediante simulación preliminar de los defectos de dicho sistema magnético. Los puntos de medición, en los que están situados los sensores de campo magnético, o la disposición espacial óptima de los sensores de campo magnético en las proximidades del sistema magnético en el caso de una serie de sensores y/o la orientación de, como mínimo, un sensor de campo magnético se puede determinar en base a exigencias respecto a la exactitud de determinación de defectos que describen parámetros. En la determinación de los puntos de medición del campo magnético, se pueden determinar tanto la exactitud requerida del posicionamiento y orientación del sensor de campo magnético. La exactitud de medición requerida del sensor de

campo magnético se puede especificar en base a simulación preliminar; en otro caso, se puede adoptar, por ejemplo, como exactitud de la medición del sensor de campo magnético, por ejemplo, la exactitud de sensores disponibles y el punto de medición o localizaciones del sensor se varían para conseguir la exactitud de determinación requerida de los defectos del sistema magnético.

5 Tal como se puede apreciar en lo anterior, la localización y orientación del sensor, así como su exactitud de posicionamiento se pueden ajustar basándose en simulación preliminar. No obstante, incluso en este caso existe un error de posicionamiento del sensor y en una realización preferente mientras se mide el campo magnético cerca del sistema magnético, se determina la localización y orientación de, como mínimo, un sensor de medición para  
10 determinar la localización y orientación reales del sensor. En el caso de un posicionamiento grosero del sensor, por ejemplo, dentro de un área determinada es necesaria la determinación de la localización y orientación de los sensores de campo magnético en el curso de la realización de la medición.

15 En una realización, el procedimiento de acuerdo con la presente invención es llevado a cabo en un sistema magnético que comprende, como mínimo, un conductor portador de corriente, en el que en una de las variantes este conductor es un cable. Este cable puede ser superconductor; en este caso, el defecto es la rotura de una hebra del cable y los parámetros que definen los defectos son las coordenadas del punto central del conductor, el paso del arrollamiento y la longitud de la parte defectuosa (cinco parámetros en total).

20 En otra realización, el procedimiento de acuerdo con la presente invención es llevado a cabo en un sistema magnético que comprende, como mínimo, una bobina electromagnética, en el que en uno de los casos el sistema consiste en una bobina electromagnética única. En este caso, si la bobina electromagnética es redonda, los defectos son la forma elíptica de la bobina y el alabeo con respecto al otro componente, incluido en el sistema o que se encuentra fuera del sistema y los parámetros que definen los defectos son el eje mayor y el eje menor de la elipse y  
25 la distorsión terminal máximo (en total tres parámetros). Si la bobina electromagnética es una bobina de campo toroidal tokamak, los defectos son desplazamientos de N puntos de referencia de la línea central de la bobina, de manera que los parámetros que describen los defectos son desplazamientos ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) de cada N puntos de referencia (3N parámetros en total).

30 En otra realización adicional, el procedimiento de acuerdo con la presente invención es llevado a cabo en un sistema magnético que comprende, como mínimo, un imán magnético, en el que en uno de los casos el sistema consiste en un imán permanente único. En esta realización, el defecto es el cambio de momento magnético del dipolo de punta equivalente, en el que los parámetros que describen los defectos son cambios de los componentes del momento magnético ( $\Delta M_x$ ,  $\Delta M_y$ ,  $\Delta M_z$ ) (tres parámetros para cada imán permanente en total).

35 El procedimiento de acuerdo con la presente invención puede ser llevado a cabo también para un sistema magnético que comprende, como mínimo, dos elementos que generan campo magnético, en el que los defectos son desplazamiento espacial y la inclinación de, como mínimo, un elemento con respecto al otro y parámetros que describen los defectos son tres coordenadas de desplazamiento y tres ángulos Euler de la inclinación, es decir, seis  
40 parámetros en total. En este caso, los elementos del sistema magnético están posicionados uno con respecto a otro.

En otra realización, el procedimiento es llevado a cabo en un sistema magnético que comprende, como mínimo, un elemento que genera campo magnético, en el que los defectos son desplazamiento espacial y la inclinación de, como mínimo, un elemento que genera campo magnético e incluido en el sistema magnético, con respecto a, como mínimo, un elemento no incluido en el sistema magnético o con respecto a, como mínimo, un elemento incluido en el sistema magnético pero que no genera campo magnético y los parámetros que describen los defectos son tres coordenadas de desplazamiento y tres ángulos Euler de la inclinación. En esta realización, los elementos del sistema magnético pueden ser posicionados, por ejemplo, con respecto a los elementos de referencia no incluidos en el sistema, por ejemplo, con respecto a marcas indicadas en paredes del edificio o con respecto a satélites  
45 incluidos en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Por otra parte, los elementos que son referencias para orientar los elementos del sistema magnético que generan campo magnético útil pueden ser componentes estándar del sistema magnético, de manera que dichos componentes destinados para orientación de elementos del sistema magnético preferentemente no generan campo magnético propio o generan campo magnético que se puede despreciar debido a las dimensiones muy reducidas o a la localización, de manera que dicho campo magnético no influye en el campo magnético útil del sistema.  
50  
55

Cuando se implementa el procedimiento, de acuerdo con la presente invención, la simulación adicional del campo magnético del sistema sin defectos se puede cumplir, de manera que durante la formulación de dicho sistema de ecuación, los valores del campo magnético sin defectos son restados de los valores medidos del campo magnético del sistema.  
60

En una realización de la invención, durante la formulación de las ecuaciones, el campo magnético medido es relacionado con el campo magnético hipotético del sistema magnético en los puntos de medición de campo magnético.  
65

En otra realización de la invención, durante las formulaciones de las ecuaciones, el campo magnético hipotético del sistema magnético es relacionado con los valores del campo magnético obtenidos en base a los valores medidos del campo magnético en los puntos dentro de un área que encierra el sistema magnético, de manera que los puntos de medición del campo magnético están situados en el límite del área. Los valores del campo magnético obtenidos en base de los valores medidos del campo magnético son evaluados en dichos puntos dentro de la mencionada área por determinación de una solución al problema del valor límite de la ecuación de Laplace.

En este caso, las mediciones del campo magnético son realizadas con utilización de sensores en el límite de uno o varios volúmenes encerrados (proximidades o áreas de medición), en el que la localización de dichos volúmenes y disposición del sensor son definidos por simulación matemática preliminar, tal como la descrita en el documento RU2271549 "Método y dispositivo para mapeado de un campo magnético en un volumen cerrado" ("Method and device for magnetic field mapping in a closed volume"). Los datos de medición directa son interpolados con respecto a dicho límite del área de medición para calcular el campo magnético en los puntos límite. Los datos de interpolación con respecto al límite del área de medición son utilizados como datos límite para hallar una solución al problema de valor límite de la ecuación de Laplace, de manera que durante la formulación del sistema de ecuaciones, el problema de valor límite de la ecuación de Laplace es resuelto, se calculan los valores de campo magnético en los puntos internos del área y estos valores son utilizados para formular el sistema de ecuaciones. Debido al hecho de que un error de medición del sensor de campo es la diferencia de dos funciones armónicas (de los campos magnéticos calculado y medido), por lo que por su parte es también una función armónica, el error tiene un valor máximo en el límite de área, de acuerdo con una característica bien conocida de las funciones armónicas. De este modo, se reduce el error de medición de campo directa relacionada con ruidos del sensor y también con los errores de medición de las coordenadas del sensor.

En otra realización del método, se lleva a cabo la medición del campo magnético del sistema magnético que comprende, como mínimo, un conductor portador de corriente cuando la corriente en el sistema magnético es cero, de manera que dichos valores del campo magnético medidos son restados de los valores de campo magnético medidos con la corriente en el sistema magnético distinta de cero, y los valores obtenidos son utilizados para formular dicho sistema de ecuaciones. Esta realización del método es utilizada cuando existe un campo magnético que interfiere de manera constante o cuando la influencia del campo magnético terrestre es significativa o cuando existe una desviación a lo largo del tiempo de los datos del sensor, que es significativa.

En otra realización del método, la medición del campo magnético del sistema magnético que comprende, como mínimo, un conductor portador de corriente es llevada a cabo también cuando la corriente del sistema magnético es inversa, de manera que los valores de campo magnético del sistema son determinados por cálculo de los valores de la semidiferencia de los campos magnéticos generados por las corrientes directa e inversa en el sistema magnético, y los valores obtenidos son utilizados para formular dicho sistema de ecuaciones. Esta realización del método es utilizada también cuando existe un campo magnético que interfiere de manera constante o cuando la influencia del campo magnético terrestre es significativa o cuando existe una desviación de datos del sensor significativa a lo largo del tiempo.

El objetivo de la presente invención se consigue también con un aparato para determinar defectos de un sistema magnético o al ser sus componentes fuentes de campo magnético, comprendiendo el aparato: como mínimo, un sensor de campo magnético situado fuera de un sistema magnético, configurado para medir un campo magnético del sistema magnético y medios de proceso de datos configurados para:

- formular, como mínimo, una ecuación que asocia el campo magnético medido con el campo magnético hipotético del sistema magnético que tiene, como mínimo, un defecto hipotético introducido en el mismo, dependiendo del campo magnético hipotético de uno o varios parámetros que definen el, como mínimo, un defecto hipotético; y
- resolver la, como mínimo, una ecuación formulada para obtener valores de los parámetros, determinando los valores defectos del sistema magnético.

En una realización preferente del aparato, los sensores están montados en un armazón móvil que comprende un dominio cerrado, de manera que el aparato está dotado de medios para la impulsión del armazón y medios para el control del posicionado del sensor.

Los sensores de campo magnético son preferentemente de componente único.

El método y aparato de acuerdo con la invención proporcionan la posibilidad de detección de defectos del sistema magnético y su determinación de parámetros, y elimina la desventaja principal de las soluciones técnicas conocidas, que es la ausencia de información cuantitativa con respecto a los defectos. Además, la presente invención proporciona una exactitud mejorada para determinar los parámetros de los defectos del sistema magnético.

El método y aparato para la determinación de defectos del sistema magnético proporcionan una determinación exacta del tipo, localización y magnitud de un defecto y, por lo tanto, eliminan los defectos con un tiempo menor para la localización de los mismos y su determinación de valor, así como su eliminación. La determinación exacta de parámetros de defecto reduce pérdidas de material y gastos por la eliminación de defectos debido al hecho de que la

localización de defectos y sus dimensiones son conocidas antes de empezar el trabajo de eliminación de los defectos.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

- 5 La figura 1 muestra un diagrama de bloques de un aparato para la determinación de defectos.
- La figura 2 muestra una vista general de un cable superconductor.
- 10 La figura 3 muestra la sección de un cable superconductor.
- La figura 4 muestra una vista general de una bobina poloidal tokamak.
- La figura 5 muestra una vista de la distorsión elíptica de la bobina poloidal.
- 15 La figura 6 muestra una vista del alabeo de la bobina poloidal.
- La figura 7 muestra una vista general de una bobina toroidal tokamak.
- 20 La figura 8 muestra una vista de una bobina toroidal que tiene distorsiones.
- La figura 9 muestra un sistema de imanes permanentes que generan campo magnético de referencia en un sistema de seguimiento de un avión.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA

- La figura 1 muestra un diagrama de bloques de un aparato para la determinación de defectos. Se muestran ejemplos de aparatos y defectos típicos en las figuras 2-4.
- 30 El aparato comprende un armazón 4 que tiene, como mínimo, un sensor de campo magnético 1, medios para recibir señal del sensor y transmitir dichas señales a medios 2, un sistema de captación de datos con un bloque de memoria y un bloque de proceso (ordenador 3) para el almacenamiento de datos de medición. En una realización preferente del aparato, los sensores 1 están montados sobre un armazón móvil que comprende un dominio cerrado, de manera que el aparato está dotado de medios 5 para la impulsión del armazón y medios para la determinación de
- 35 las coordenadas y orientación del sensor. El bloque de proceso se puede combinar con el ordenador 3 en sus mediciones de control, pero es preferible tener un ordenador 6 de alto rendimiento separado. El bloque de proceso está destinado a almacenar una base de datos de un mapa de campo magnético generado por los "defectos típicos" de una estructura electromagnética. La solución de un sistema de ecuaciones algebraicas determina el bloque de proceso a utilizar para "defectos típicos" (ver a continuación).
- 40 Una serie de sensores de componente único queda definida por una simulación matemática preliminar. Los sensores de campo magnético de componente único son bien conocidos en el estado de la técnica (ver M.L. Baranochnikov "Micromagneto-electronics", v. 1-2, Moscow, DMK-Press, 2001).
- 45 Los medios para transmitir señales del sensor al ordenador 3 son implementados en un panel de circuito impreso y tienen un microcontrolador incorporado que sincroniza convertidores analógico/digital que transforman señales de sensor a forma digital. El ordenador está dotado de un bloque de memoria, por ejemplo, un almacenamiento permanente para almacenar coordenadas de sensor de campo magnético.
- 50 Para determinar defectos del sistema magnético utilizando el aparato descrito, se mide el campo magnético del sistema cerca del sistema magnético con utilización de, como mínimo, un sensor de campo magnético. Además, se compone (se formula), como mínimo, una ecuación que relaciona el campo magnético medido con el campo magnético hipotético del sistema magnético que tiene uno o varios defectos en el sistema de captación de datos, de manera que el campo magnético hipotético es expresado en forma de dependencia en uno o más parámetros, de
- 55 manera que las ecuaciones formuladas son solucionadas para obtener los parámetros que describen los defectos.
- Se pueden definir arbitrariamente una serie de mediciones, posiciones y/o orientaciones de los sensores que miden el campo magnético; no obstante, en una realización preferente, antes de la etapa de medición del campo magnético se determina, como mínimo, un parámetro que describe dicho defecto, se lleva a cabo la simulación preliminar del
- 60 campo magnético del sistema magnético que tiene más defectos y se determinan puntos de medición del campo magnético y/o la orientación de, como mínimo, un sensor de campo magnético, así como el número de mediciones.
- Además, se lleva a cabo la descripción de un algoritmo preferible para determinación de parámetro de un "defecto típico" y se realiza la simulación preliminar de un campo del sistema magnético de acuerdo con el mismo.

65

Se supondrá que la totalidad de los  $N$  parámetros que describen defectos típicos de un sistema específico son presentados como un vector generalizado:

$$\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N) \quad (1)$$

5 No se suponen otros defectos del sistema magnético posibles de acuerdo con la tecnología de fabricación, es decir, este vector define por completo todos los defectos típicos. Se muestran ejemplos de dichos parámetros en las figuras 2 a 4.

10 Para proporcionar los parámetros (1), la determinación del número de mediciones de campo realizadas en  $K$  puntos cerca del sistema determinado (número de ecuaciones) no debe ser menor del número de parámetros (1), es decir,  $K \geq N$ . Las mediciones se llevan a cabo preferentemente por sensores de componente único. Utilizando estos datos, los parámetros (1) pueden ser utilizados con utilización del método siguiente.

15 El sensor de campo magnético mide el componente de vector de campo magnético dirigido a lo largo de un eje magnético del sensor:

$$b_k = (\vec{B}_k \cdot \vec{n}_k), \quad (2)$$

20 siendo  $b_k$  la componente de campo medida por el sensor  $k$ ,  $\vec{B}_k$  es el vector de inducción magnética del sistema en el centro del área de detección del sensor  $k$  y  $\vec{n}_k$  es el vector unidad de la dirección del eje magnético del sensor  $k$ .

La expresión (2) incluye dos vectores:  $\vec{B}_k = (B_x, B_y, B_z)$  y  $\vec{n}_k$ .

25 Los métodos para la determinación del vector unidad del eje magnético del sensor (dirección) son bien conocidos en el estado de la técnica (Afanasiev U.V., Studentsov N.V., Schepkin A.P. "Convertidores magnetométricos, dispositivos, aparatos" ("Magnetometric converters, devices, apparatuses"), Moscow, Energiya, 1972). Se basan en la rotación del sensor en un campo de calibración conocido, por ejemplo, el campo magnético terrestre.

30 El vector de campo magnético  $\vec{B}_k$  es calculado en el punto  $\vec{r}_k = (x, y, z)$  situado en el centro del área de detección del sensor  $k$ . Cada una de las coordenadas del sensor se puede medir directamente, por ejemplo, con una galga vernier de altura.

35 El cálculo de un vector de inducción magnética generado por bobinas de corriente o imanes permanentes es bien conocida en el estado de la técnica (ver I.E. Tamm, Bases de Teoría de la Electricidad ("Bases of the Electricity Theory"), Nauka, Moscow, 1989; Purcell E. "Electricidad y magnetismo" ("Electricity and Magnetism")). Se debe observar que las localizaciones de fuentes de campo magnético se suponen usualmente que son exactamente conocidas en las fuentes publicadas, mientras que las fuentes de campo magnético dependen de los parámetros (1) en el caso considerado. No obstante, si los parámetros (1) se suponen que tienen ciertos valores (arbitrarios), el vector de campo magnético se puede calcular en principio utilizando fórmulas conocidas de la literatura.

40 De este modo, el vector de inducción magnética calculado en el punto  $k$  depende del conjunto de parámetros (1):

$$\vec{B}_k = \vec{B}_k(a_1, a_2, \dots, a_N) = \vec{B}_k(\vec{a}) \quad (3)$$

45 Si el producto de la parte de la derecha de la fórmula (2) se designa  $f_k$ , a continuación se puede escribir la siguiente expresión para esta función:

$$f_k(\vec{a}) = (\vec{B}_k(\vec{a}), \vec{n}(\vartheta, \varphi)); \quad (4)$$

50 que depende también de todos los parámetros (1).

55 El campo magnético calculado (4) como función de las  $N$  variables desconocidas (1) debe ser igual al campo magnético  $b_k$ , cuyo valor es medido por el sensor y proporciona un sistema de  $K \geq N$  de ecuaciones algebraicas no lineales:

$$f_k(a_1, a_2, \dots, a_N) = b_k, \quad (5)$$

60 en las que  $k=1 \dots K$ .

El sistema de ecuaciones (5) que depende de las variables (1) es resuelto, por ejemplo, hallando la discrepancia funcional mínima  $F$ :

$$F = \left\{ \sum_k (B_k - b_k)^2 + \alpha \sum_i (a_i - a_i^*)^2 \right\} \quad (6)$$

5 en la que  $a_i^*$  es un conjunto arbitrario de las coordenadas generalizadas (1) y  $\alpha$  es un parámetro de regularización (ver Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. "Métodos de solución de problemas incorrectos" ("Methods of incorrect problem solving"), Moscow, Nauka, 1986).

10 La minimización funcional (6) se puede cumplimentar con utilización de un procedimiento iterativo, por ejemplo, un método de Newton generalizado (ver Demidovich B.P., Maron I.A. "Bases de cálculo matemático" ("Bases of the calculus mathematics"), Moscow, Nauka, 1970). En vista de ello, todas las derivadas parciales  $N$ ,  $\partial F / \partial x_i$ , de la funcional (6) sobre las variables (1) son puestas iguales a cero y ello proporciona un sistema de ecuaciones lineales con matriz positivamente definida de  $N \times N$  dimensión:

$$(D^T D + \alpha E) \Delta \bar{a} = D^T \Delta \bar{B} + \alpha (\bar{a}^* - \bar{a}) \quad (7)$$

15 en la que  $D_{ik} = \frac{\partial f_k(\bar{a})}{\partial a_i}$ ,  $\Delta B_k = f_k(\bar{a}) - b_k$ ,  $k=1 \dots K$ ,  $i=1 \dots N$ , y  $D^T$  es la matriz transpuesta con respecto a la matriz derivada  $D$ .

20 El sistema lineal (7) es resuelto con respecto a  $N$  incrementos  $\vec{\Delta a} = (\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_N)$  utilizando el método de Gauss (ver Demidovich B.P., Maron I.A. "Bases de cálculo matemático" ("Bases of the calculus mathematics"), Moscow, Nauka, 1970). Se describe una determinación del parámetro  $\alpha$  de regularización en la monografía Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. "Métodos de solución de problemas incorrectos" ("Methods of incorrect problem solving"), Moscow, Nauka, 1986.

25 Se supondrá que  $(a_1^{(0)}, a_2^{(0)}, \dots, a_N^{(0)})$  es una cierta aproximación inicial del vector (1) de coordenadas generalizadas; a efectos de comodidad, cuando no hay defectos, los valores de los parámetros (1) se pueden considerar como ellos. Repitiendo el proceso iterativo (7) del método de Newton generalizado el número necesario de veces, todas las incógnitas (1) podrán ser calculadas con la exactitud requerida. De esta manera, se soluciona la tarea propuesta.

Como mínimo, las  $N$  ecuaciones son necesarias para una solución correcta del sistema (5), pero es preferible un número redundante de ecuaciones para aumentar la exactitud y fiabilidad de la solución.

35 El método indicado de la presencia de defectos, localización y determinación de parámetros se puede cumplimentar en un sistema magnético, comprendiendo, como mínimo, un conductor portador de corriente, en el que en una de las variantes este conductor es un cable. Dicho cable puede ser superconductor; en este caso, el defecto es el de rotura de la hebra del cable y los parámetros que describen los defectos son coordenadas del punto central de la hebra, el paso de arrollamiento y la longitud de la parte defectuosa (cinco parámetros en total). La figura 2 muestra una vista general de un cable superconductor formado al torsionar varias hebras (por ejemplo, ocho). Un defecto típico puede ser un fallo de conducción en la hebra (esta hebra se ha mostrado con rayado en la figura 2). Los parámetros del defecto son el paso de arrollamiento  $h$ , la longitud  $l$  de la parte defectuosa y las coordenadas del centro de la hebra  $(x, y)$  mostradas en la figura 3.

45 El método que se ha indicado puede ser cumplimentado en un sistema magnético, comprendiendo, como mínimo, una bobina electromagnética, en el que en uno de los casos el sistema consiste en una bobina electromagnética única. En este caso, cuando la bobina electromagnética es redonda, los defectos son la forma elíptica de la bobina y el alabeo con respecto a los otros componentes incluidos en el sistema o que se encuentran fuera del sistema y los parámetros que definen los defectos son los semiejes principal y menor de la elipse y la distorsión vertical máxima (tres parámetros en total). La figura 4 muestra esta bobina en la que la figura 5 muestra distorsión elíptica de la bobina con los semiejes de la elipse  $a$  y  $b$  y la figura 6 muestra distorsión vertical de la bobina con un valor de  $\gamma$ .

55 La bobina electromagnética puede ser una bobina de campo toroidal tokamak; en este caso, los defectos son desplazamientos de  $N$  puntos de referencia del eje central de la bobina, en los que los parámetros que describen los efectos son desplazamientos  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  de cada uno de los  $N$  puntos de referencia ( $3N$  parámetros en total). La figura 7 muestra una vista general de una bobina toroidal tokamak y la figura 8 muestra defectos típicos de fabricación que se refieren a la distorsión de la línea de la línea de corriente central de la bobina. La línea de corriente central de la bobina se puede describir por una acanaladura que pasa por varios puntos de referencia a comprobar; la figura 8 muestra una variante de seis puntos  $A$  a  $F$ . Los parámetros del defecto son desplazamientos de puntos de referencia, es decir,  $\Delta x_A, \Delta y_A, \Delta z_A, \Delta x_B, \Delta y_B, \Delta z_B, \dots, \Delta x_F, \Delta y_F, \Delta z_F$ .

El método descrito puede ser cumplimentado también en un sistema magnético que comprende, como mínimo, un imán permanente, en el que en uno de los casos el sistema consiste en un imán permanente único. En esta realización, el defecto es el cambio de momento magnético del dipolo del punto equivalente, en el que los parámetros que describen los defectos son cambios ( $\Delta M_x$ ,  $\Delta M_y$ ,  $\Delta M_z$ ) de las componentes del momento magnético (tres parámetros para cada imán permanente en total).

Además, el método de acuerdo con la presente invención puede ser cumplimentado también en un sistema magnético que comprende, como mínimo, dos elementos que generan un campo magnético, de manera que los defectos son desplazamientos en el espacio y inclinación de, como mínimo, un elemento con respecto al otro, y los parámetros que describen los defectos son tres coordenadas de desplazamiento y tres ángulos de Euler de la inclinación, es decir, seis parámetros en total. En este caso, las componentes del sistema magnético están dispuestas una con respecto a otra.

La figura 9 muestra una fuente de campo magnético utilizada en un sistema de seguimiento de aviones y que consiste en varios imanes permanentes (por ejemplo, cuatro), que se pueden citar como ejemplo de este sistema. Cada uno de los imanes está definido por el momento magnético  $M$  del dipolo equivalente. Un defecto de fabricación se considera que es el cambio del momento magnético ( $\Delta M_x$ ,  $\Delta M_y$ ,  $\Delta M_z$ ) de uno o varios imanes. La figura 9 muestra un caso en el que cuatro imanes se han desviado de la posición vertical preescrita para el montaje.

En una realización se cumplimenta el método en un sistema magnético que comprende, como mínimo, un elemento que genera campo magnético, en el que los defectos son desplazamiento espacial y la inclinación de, como mínimo, un elemento que genera campo magnético y que está incluido en el sistema magnético con respecto a, como mínimo, un elemento no incluido en el sistema magnético o con respecto a, como mínimo, un elemento incluido en el sistema magnético pero que no genera campo magnético y los parámetros que describen los defectos son tres coordenadas de desplazamiento y tres ángulos de Euler de la inclinación.

Cuando se lleva a cabo el método, de acuerdo con la presente invención, se puede cumplimentar además la simulación de campo magnético del sistema sin defectos; en el que durante la formulación de dicho sistema de ecuaciones, los valores del campo magnético correspondiente del sistema magnético sin defectos son restados de los valores medidos del campo magnético del sistema.

En una realización de la invención, durante la formulación de las ecuaciones, el campo magnético medido está relacionado con el campo magnético hipotético del sistema magnético en los puntos de medición. No obstante, con el objetivo de una determinación más precisa de la localización de defectos y parámetros durante la formulación de las ecuaciones, el campo magnético hipotético del sistema magnético se relaciona preferentemente con los valores del campo magnético obtenidos en la base de los valores medidos del campo magnético en los puntos dentro de un área que encierra el sistema magnético, de manera que los puntos de medición del campo magnético están situados en el límite del área. Los valores del campo magnético obtenidos en la base de los valores medidos del campo magnético son evaluados en dichos puntos dentro de dicha área mediante la determinación de una solución al problema de valor límite de la ecuación de Laplace.

A condición de que un sistema magnético comprende, como mínimo, un conductor portador de corriente, con el objetivo de incremento de la exactitud de determinación de defectos y determinación de parámetros, la medición del campo magnético del sistema magnético se lleva a cabo cuando la corriente del sistema magnético es cero, de manera que medidos de esta manera, los valores de campo magnético son restados de los valores de campo magnético medidos siendo la corriente del sistema magnético distinta de cero y los valores obtenidos son utilizados para formular dicho sistema de ecuaciones. En un caso similar, se puede utilizar otro método de localización de defectos y determinación de parámetros para el incremento de la exactitud. De acuerdo con este método, la medición de campo magnético de un sistema magnético que comprende, como mínimo, un conductor portador de corriente se lleva a cabo también cuando la corriente del sistema magnético es inversa, de manera que los valores de campo magnético del sistema son determinados por cálculo de las semidiferencias de los valores de campos magnéticos generados con las corrientes directa e inversa del sistema magnético y los valores obtenidos son utilizados para formular dicho sistema de ecuaciones.

El aparato y método que se dan a conocer para la determinación de defectos de un sistema magnético, de acuerdo con la presente invención, permiten la determinación de la presencia de defectos o su ausencia y si se encuentran presentes defectos hacen posible determinar los parámetros y localizaciones de los defectos. Además, algunos aspectos que se han dado a conocer de la invención permiten también incrementar la exactitud de la determinación de parámetros y localización de defectos del sistema magnético en el caso en que existan defectos.

El método y aparato que se han dado a conocer para la determinación de defectos de un sistema magnético permiten reducir el tiempo para la detección de los defectos y para determinar los parámetros de los mismos y también su localización y, por lo tanto, permiten la eliminación de los defectos hallados con menor coste de materiales y mano de obra. Esto influye a su vez de manera positiva en el coste del trabajo de montaje y trabajo de mantenimiento del sistema magnético y también de los gastos de sustitución de elementos sustituibles, porque la

5 determinación exacta de los parámetros y localización de los defectos del sistema magnético proporcionan la posibilidad de eliminación de defectos por sustitución de la cantidad mínima requerida de elementos que genera el campo magnético en las proximidades del defecto hallado. Además, la determinación de la presencia, localización y parámetros de defectos de dichos elementos del sistema magnético, tal como un cable superconductor, permiten el rechazo de elementos defectuosos de un tokamak toroidal antes o durante el montaje y, por lo tanto, reducen los costes de eliminación de defectos.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para la determinación de defectos en un sistema magnético, cuyo método comprende las siguientes etapas:

- 5 - medición utilizando, como mínimo, un sensor (1) de campo magnético situado fuera de un sistema magnético, un campo magnético del sistema magnético;
- formular, como mínimo, una ecuación que asocia el campo magnético medido con un campo magnético hipotético del sistema magnético que tiene, como mínimo, un defecto hipotético introducido en el mismo; y
- 10 - resolver dicha, como mínimo, una ecuación formulada.

caracterizado porque el método comprende además, antes de la etapa de medición del campo magnético, las siguientes etapas:

- 15 - introducir el, como mínimo, un defecto hipotético, en el sistema magnético y definir, como mínimo, un parámetro que define el, como mínimo, un defecto hipotético;
- simular el campo magnético hipotético del sistema magnético teniendo el, como mínimo, un defecto hipotético introducido en el mismo;
- determinar puntos para la localización del, como mínimo, un sensor de campo magnético (1); y
- 20 - determinar una serie de mediciones del campo magnético;

en el que el campo magnético hipotético depende de uno o varios parámetros que definen el, como mínimo, un defecto hipotético, y

25 en el que los valores de los parámetros son determinados resolviendo la, como mínimo, una ecuación formulada para obtener los valores que determinan los defectos en el sistema magnético.

2. Procedimiento, según la reivindicación 1, que comprende además, antes de la etapa de medición del campo magnético, la siguiente etapa:

- 30 - determinar la localización y orientación del, como mínimo, un sensor de campo magnético (1).

3. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que el sistema magnético comprende, como mínimo, un conductor portador de corriente.

35 4. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que el conductor portador de corriente es un cable.

5. Procedimiento, según la reivindicación 4, en el que el cable es un cable superconductor, el como mínimo un defecto hipotético es una rotura de una hebra de un cable y los parámetros que definen dicho defecto son las coordenadas (x, y) del punto central de la hebra, el paso de arrollamiento (h) y la longitud (l) de la parte defectuosa.

40 6. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que el sistema magnético comprende, como mínimo, una bobina electromagnética.

7. Procedimiento, según la reivindicación 6, en el que la, como mínimo, una bobina electromagnética es redonda, los defectos hipotéticos son la forma elíptica de la bobina y el alabeo de la misma y los parámetros que determinan los defectos son los semiejes mayor y menor (a, b) de la elipse y el valor del alabeo (Y).

45 8. Procedimiento, según la reivindicación 6, en el que la, como mínimo, una bobina electromagnética es una bobina de campo toroidal tokamak, en la que los defectos son desplazamientos de los puntos de referencia de la línea central de la bobina (A,B,C,D,E,F) y los parámetros que determinan los defectos son desplazamientos de los puntos de referencia (A,B,C,D,E,F) seleccionados a lo largo del contorno de la bobina.

9. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que el sistema magnético comprende, como mínimo, un imán permanente, en el que el defecto del, como mínimo, un imán permanente es el cambio del momento magnético (M) del dipolo del punto equivalente y los parámetros que determinan el defecto son el desplazamiento de la componente del vector (M) del momento magnético.

50 10. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que el sistema magnético comprende, como mínimo, dos elementos que generan campo magnético, en el que los defectos son desplazamiento espacial y la inclinación de, como mínimo, uno de los elementos que generan campo magnético con respecto al otro y los parámetros que determinan los defectos son tres coordenadas del desplazamiento espacial y tres ángulos de Euler de la inclinación.

60 11. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que el sistema magnético comprende, como mínimo, un elemento que generan campo magnético, en el que los defectos son desplazamiento espacial y la inclinación del, como mínimo, un elemento generador de campo magnético e incluyéndose en el sistema magnético con respecto al, como mínimo, un elemento no incluido en el sistema magnético o con respecto al, como mínimo, un elemento incluido en

el sistema magnético pero que no genera campo magnético, y los parámetros que determinan los defectos son tres coordenadas del desplazamiento espacial y tres ángulos de Euler de la inclinación.

5 12. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que se cumplimenta adicionalmente la simulación de campo magnético del sistema de campo magnético sin defectos, se manera que durante la formulación de la, como mínimo, una ecuación, los valores de campo magnético correspondientes al sistema magnético sin defectos son restados de los valores medidos del campo magnético del sistema magnético.

10 13. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que durante la formulación de la, como mínimo, una ecuación, el campo magnético medido es asociado con el campo magnético hipotético del sistema magnético en los puntos de medición del campo magnético.

15 14. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que durante la formulación de la, como mínimo, una ecuación, el campo magnético hipotético del sistema magnético es asociado con valores del campo magnético en los puntos dentro de un área que encierra el sistema magnético, los valores de campo magnético obtenidos a base de los valores medidos del campo magnético medido en los puntos de medición del campo magnético situados en el límite de dicha área, de manera que los valores del campo magnético obtenidos a base de los valores medidos del campo magnético son evaluados en dichos puntos dentro de dicha área hallando una solución al problema de valor límite de la ecuación de Laplace.

20 15. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que la medición del campo magnético es llevada a cabo adicionalmente cuando la corriente en el sistema magnético es cero, de manera que dichos valores de campo magnético medidos son restados de los valores de campo magnético medidos, siendo la corriente en el sistema magnético distinta de cero y los valores obtenidos son utilizados para formular la, como mínimo, una ecuación.

25 16. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que la medición del campo magnético se lleva a cabo adicionalmente cuando la corriente en el sistema magnético es inversa, de manera que los valores de campo magnético del sistema magnético son determinados por cálculo de la semidiferencia de los valores de campo magnético generados con corriente directa a inversa en el sistema magnético y los valores obtenidos son utilizados para formular la, como mínimo, una ecuación.

30 17. Aparato configurado para la realización de todas las etapas del método de la reivindicación 1 para la determinación de defectos en un sistema magnético, cuyo aparato comprende:  
 35 como mínimo, un sensor de campo magnético (1) situado fuera del sistema magnético, configurado para medir un campo magnético del sistema magnético; y  
 medios de proceso de datos (6) configurados para:  
 - formular, como mínimo, una ecuación que asocia el campo magnético medido con un campo magnético hipotético del sistema magnético que tiene, como mínimo, un defecto hipotético introducido en la mismo, dependiendo el campo magnético hipotético de uno o varios parámetros que definen el, como mínimo, un defectos hipotético; y  
 40 - resolver la, como mínimo, una ecuación formulada para obtener valores de los parámetros, determinando los valores defectos en el sistema magnético.

45 18. Aparato, según la reivindicación 17, en el que el, como mínimo, un sensor de campo magnético (1) está montado sobre un armazón móvil (4) que comprende un dominio cerrado, en el que el aparato está dotado de medios (5) para impulsar el armazón móvil y medios para determinar coordenadas y orientación del, como mínimo, un sensor de campo magnético.

50 19. Aparato, según la reivindicación 17, en el que el, como mínimo, un sensor (1) de campo magnético es un componente único.

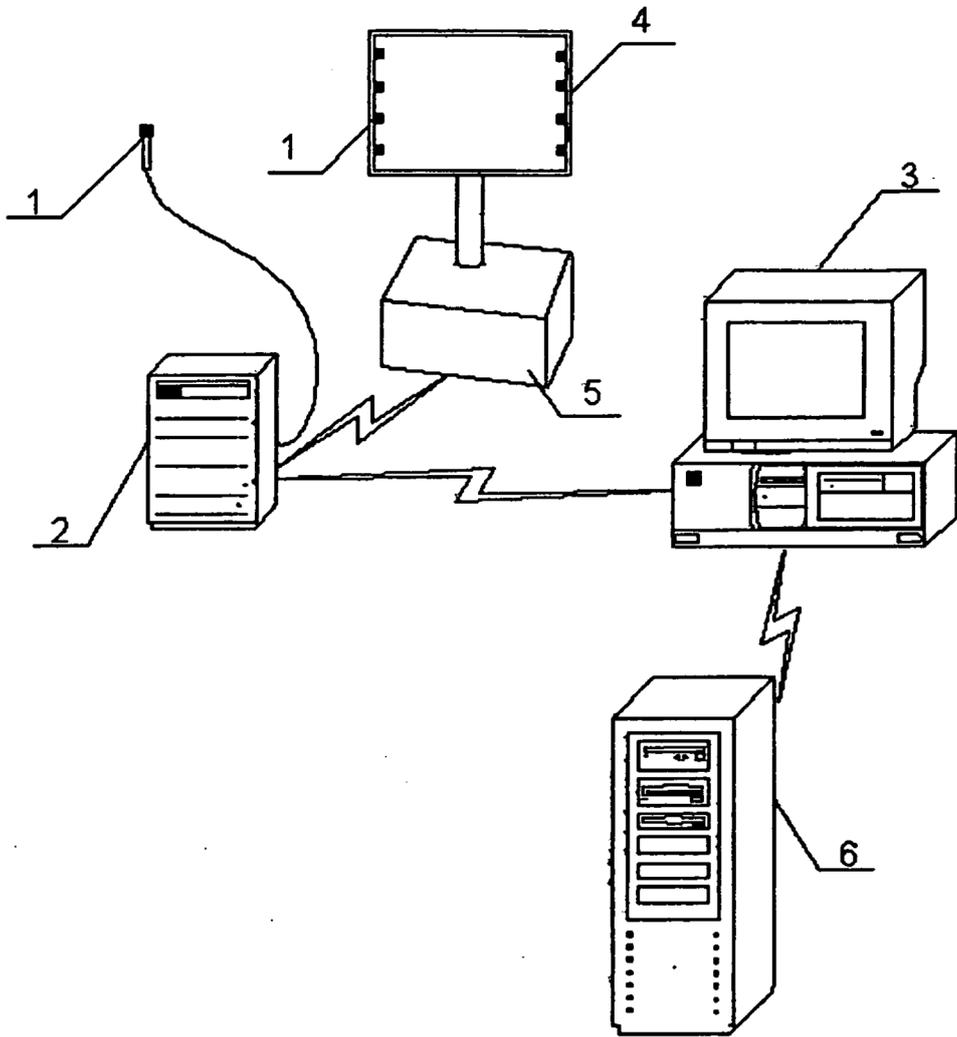


Fig.1

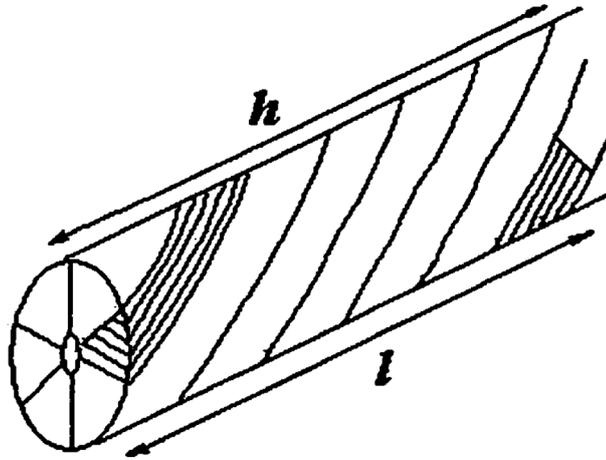


Fig. 2

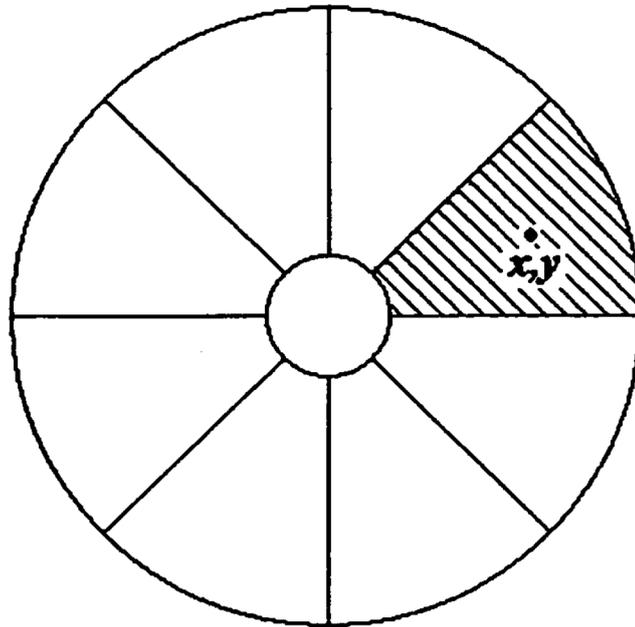


Fig. 3

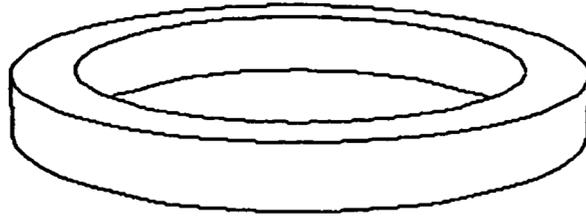


Fig. 4

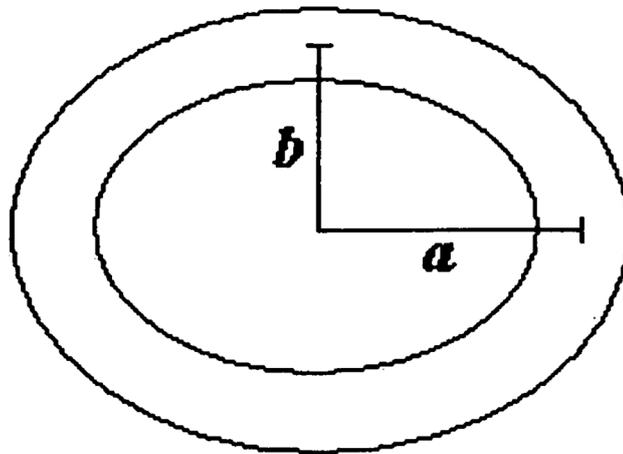


Fig. 5

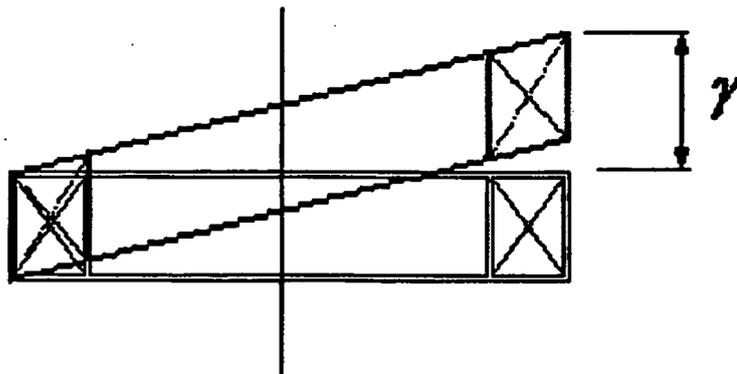
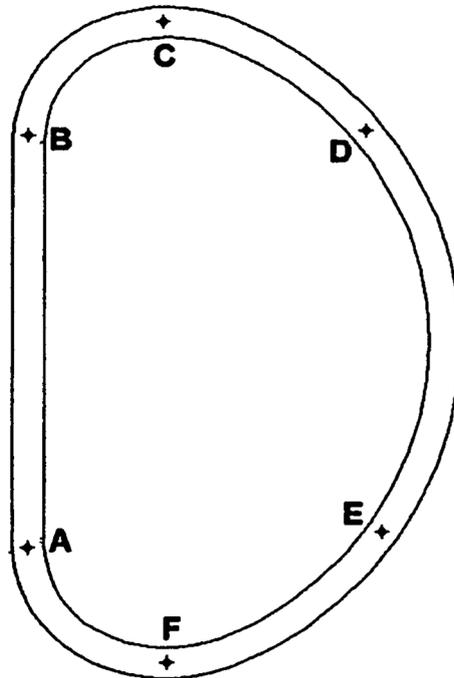


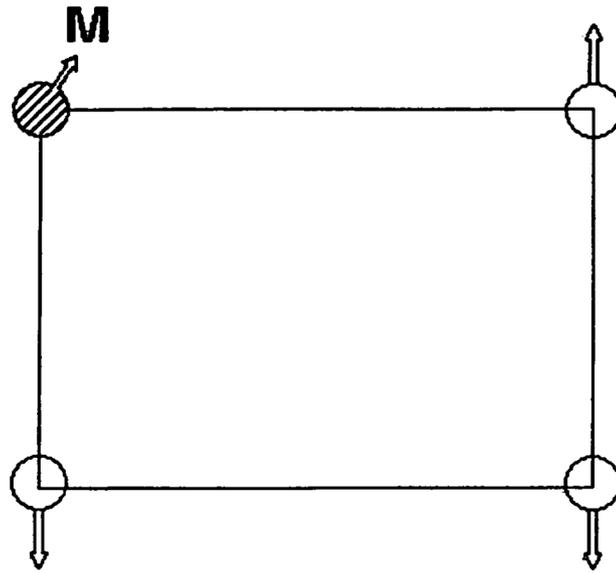
Fig. 6



**Fig. 7**



**Fig. 8**



**Fig. 9**