

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 988 378**

51 Int. Cl.:

G01R 15/18 (2006.01)
G01R 19/20 (2006.01)
G01R 33/04 (2006.01)
G01R 33/06 (2006.01)
G01R 33/18 (2006.01)
H01F 38/30 (2006.01)
H01F 38/32 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.11.2021** **E 21210841 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.07.2024** **EP 4009057**

54 Título: **Dispositivo de medición de corriente eléctrica sin contacto con núcleo magnético flexible**

30 Prioridad:

26.11.2020 FR 2012196

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

20.11.2024

73 Titular/es:

CHAUVIN ARNOUX (100.0%)
12-16 rue Sarah Bernhardt
92600 Asnieres-sur-Seine, FR

72 Inventor/es:

PION, FRANCISQUE

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 988 378 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

Dispositivo de medición de corriente eléctrica sin contacto con núcleo magnético flexible

Campo técnico

5 La presente invención se refiere al campo de las mediciones de corriente sin contacto y más particularmente se refiere a un dispositivo de medición de corriente eléctrica que comprende un núcleo magnético flexible.

Técnica anterior

10 Son bien conocidos los sensores de corriente para una adecuada medición sin contacto, como los sensores de efecto Hall, los sensores de Rogowski, las magnetorresistencias, los magnetómetros de saturación (sensores de puerta de flujo) o incluso los dispositivos magnetoópticos. Algunos, como los sensores de Rogowsky, son especialmente adecuados para medir corrientes elevadas porque, por un lado, su sensibilidad es baja (normalmente $1 \mu\text{V/A/Hz}$, es decir, 50 mV para una corriente de 1000 A a 50 Hz) y, por otro lado, estos sensores no se saturan. Otros, en cambio, como los sensores de efecto Hall, son menos sensibles y requieren la adición de un circuito magnético para concentrar el campo.

15 Sin embargo, ninguno de estos sensores tiene suficiente flexibilidad para su puesta en práctica en entornos particularmente restringidos, o su colocación alrededor del conductor del que se desea medir la corriente que pasa a su través puede resultar particularmente difícil o incluso a veces imposible.

Los documentos WO2009/153485A1, WO2020/002184A1, JP-H08-250351, FR2983966A1 y FR3060757A1 dan a conocer sensores de corriente.

Explicación de la invención

20 Por lo tanto, la presente invención tiene por objeto un dispositivo de medición de corriente eléctrica sin contacto particularmente adecuado para medir corrientes bajas o muy bajas (típicamente inferiores a 10 mA), como, por ejemplo, las corrientes de fuga, y que supere los inconvenientes antes mencionados mediante un núcleo magnético flexible y una electrónica de procesamiento adecuada. Un objetivo de la invención es también obtener un sensor que permita mediciones de corrientes alternas a las frecuencias industriales (50/60 Hz), así como a las frecuencias que van de 0,05 Hz a 100 kHz. Estos objetivos se logran mediante un dispositivo de medición de corriente sin contacto
25 como se describe en la reivindicación 1.

Así, con un dispositivo de medición de este tipo con núcleo magnético deformable, es posible formar un lazo alrededor del conductor, que luego se adapta fácilmente a su entorno, incluso particularmente restringido, y obtener una medición de la corriente excluyendo la frecuencia de polarización del espectro de medición (el ancho de banda de la señal que se va a procesar).

30 Ventajosamente, el filtro de frecuencia determinada es un filtro paso bajo o supresor de banda.

Preferiblemente, la corriente de polarización a la frecuencia de polarización F_{pol} se obtiene a la salida de un primer filtro paso bajo montado a la salida de un generador de señales cuadradas y cuya frecuencia de corte es inferior al primer armónico $2F_{pol}$ de la frecuencia de polarización.

35 Según el modo de realización considerado, cuando la señal de medición está a 50/60 Hz, la frecuencia F_{pol} está comprendida entre 133 y 333 Hz, típicamente 166 Hz, y la frecuencia de corte F_c del filtro paso bajo está comprendida entre 2 y 30 Hz, típicamente 16 Hz. Cuando la señal de medición está a 1 kHz, la frecuencia F_{pol} está comprendida entre 3,1 y 10,1 kHz, típicamente 6,666 kHz, y la frecuencia de corte F_c del filtro paso bajo está comprendida entre 2 y 4,5 kHz, típicamente 2,6 kHz, o la frecuencia de rechazo del filtro supresor de banda está comprendida entre 3,1 y 10,1 kHz, típicamente 6,666 kHz.

40 Ventajosamente, dicho núcleo magnético deformable está formado por varias decenas de cintas magnéticas que tienen cada una de ellas un espesor de algunas decenas de micrómetros.

Preferiblemente, cada una de las cintas magnéticas está constituida de hierro amorfo.

Ventajosamente, el tubo magnético tiene una permeabilidad relativa alta, típicamente superior a 10 000.

Preferiblemente, las cintas magnéticas están inmovilizadas en uno de sus dos extremos o en su centro.

45 Ventajosamente, el núcleo magnético deformable está montado en una funda flexible realizada preferentemente de un material termorretráctil y aislada y lubricada para soportar la deformación del núcleo magnético durante el envolvimiento del conductor recorrido por la corriente eléctrica que se va a medir.

Breve descripción de los dibujos

50 Otras características y ventajas de la presente invención se desprenderán de la descripción que se hace a continuación, con referencia a los dibujos adjuntos, que ilustran un ejemplo de realización de la misma sin carácter

limitativo y en donde:

[Fig. 1] la figura 1 ilustra esquemáticamente un dispositivo de medición de corriente eléctrica sin contacto según la invención,

[Fig. 2] la figura 2 muestra una sección del núcleo magnético del sensor flexible del dispositivo de medición de la figura 1,

[Fig. 3A-3B] las figuras 3A-3B ilustran una posición circular y una posición deformada del sensor de medición flexible,

[Fig. 4] la figura 4 ilustra esquemáticamente un órgano de cierre del lazo del sensor de medición flexible, y

[Fig.5] la figura 5 detalla la unidad de procesamiento del dispositivo de medición de la figura 1.

Descripción de los modos de realización

La figura 1 ilustra el dispositivo de medición de corriente eléctrica sin contacto según la invención que comprende un sensor flexible 12, preferentemente de forma toroidal pero no solamente, y un módulo electrónico de procesamiento 14 para procesar la señal de salida del sensor y obtener a través de un microprocesador dedicado o un microcontrolador el valor de la corriente medida en un conductor 16 rodeado por el sensor flexible 12.

Este dispositivo de medición es muy parecido a un sensor de Rogowski, pero además con un núcleo magnético. La adición del núcleo magnético permite una ganancia muy superior a 1000 en las frecuencias muy bajas que, sin embargo, casi se anula en el centro de la curva de magnetización del material. El objeto de la invención es en particular corregir esta anulación.

Como se muestra en la figura 2, el sensor flexible 12 comprende un núcleo magnético 120 constituido por cintas finas o laminillas superpuestas 120A, 120B, ..., 120I que le confiere su flexibilidad a lo largo del plano P formado por estas cintas magnéticas. Este apilamiento está ventajosamente formado por varias decenas de cintas magnéticas (típicamente entre 50 y 100) que tienen cada una de ellas un espesor de algunas decenas de micrómetros (típicamente entre 20 y 50 micrómetros), formando el conjunto una pieza fácilmente deformable en el plano P.

Las cintas se apilan y luego se bloquean en un único lugar 122 (obteniéndose este bloqueo mediante soldadura con o sin aporte de material o pegado), por ejemplo, en el medio, como se ilustra en la figura 2, o en un extremo. La deformación del núcleo magnético así constituido se transfiere a los dos extremos cuando las cintas se bloquean en el centro o al extremo que queda libre en caso de bloqueo del otro extremo. Las cintas se mantienen juntas en una funda flexible aislante 124, ventajosamente termorretráctil, y se lubrican preferentemente con aceite o grasa (la naturaleza del lubricante depende de las condiciones de temperatura de uso), para poder resistir la deformación del núcleo durante el envolvimiento del conductor 16 recorrido por la corriente eléctrica que se va a medir y al que puede ser difícil acceder a menos que se deforme apropiadamente el sensor flexible (véanse, por ejemplo, las figuras 3A-3B, que comparan esta configuración deformada con una configuración sin ninguna dificultad particular de envolvimiento). Algunas aplicaciones pueden ser incompatibles con la presencia de lubricante en el sensor. En tales casos, la funda puede entonces sobremoldearse y tener propiedades de deslizamiento en seco. El material de las cintas podrá ser ventajosamente hierro amorfo (METGLAS®).

Cualquiera que sea la configuración elegida para el núcleo magnético 120 (obsérvese que una configuración con hilos en lugar de cintas también podría garantizar esta misma flexibilidad del núcleo), el problema de su cierre surge con un entrehierro mínimo comprendido entre 1 mm y unos pocos mm (típicamente 1 a 5 mm), cuya saturación deberá entonces controlarse. En efecto, para controlar la saturación del material, es necesario disponer de un entrehierro en el cierre del sensor flexible 12 alrededor del conductor 16, permitiendo la presencia de este entrehierro aumentar el valor del campo de saturación y, por tanto, linealizar el sensor (sin embargo, a costa de una sensibilidad reducida y de un aumento de los campos parásitos externos al sensor).

La figura 4 ilustra esquemáticamente el órgano que permite este cierre del sensor flexible. Este órgano de cierre 126 comprende un tubo magnético 128 con una permeabilidad relativa alta, típicamente superior a 10 000, tal como una ferrita o cualquier otro material equivalente, en donde los dos extremos del núcleo magnético se encajan dejando entre ellos un entrehierro $\underline{e}$ no nulo. La funda flexible aislante 124 que mantiene en posición el apilamiento de cintas magnéticas 120 está rodeada en toda su longitud por un devanado eléctrico 130, ventajosamente de espiras compactas formando así un solenoide, cuyos dos extremos pasan a través de una funda externa protectora flexible 132 para entregar la señal de medición de salida para la unidad de procesamiento 14 en un cable de medición 134 (en el ejemplo ilustrado, al hacer el bobinado de medición un recorrido de ida y vuelta en la funda, los dos extremos de salida se encuentran en un mismo lado de la funda). Una carcasa externa 136 garantiza la protección de la ferrita, al tiempo que permite la apertura del lazo de medición.

La unidad de procesamiento se ilustra en la figura 5, que proporciona su esquema de principio simplificado. Comprende un generador de señales cuadradas 140 cuya salida está unida a un filtro paso bajo 142 cuya frecuencia de corte comprendida entre la fundamental F_{pol} y el primer armónico $2F_{pol}$ permite descartar los armónicos y obtener a su

salida una señal sinusoidal perfecta. Alternativamente, esta señal sinusoidal también podría obtenerse directamente de un cuarzo o de cualquier otro dispositivo oscilante, por ejemplo. La señal sinusoidal se inyecta en el bobinado eléctrico 130, que entrega la señal de salida (señal de medición) del sensor flexible para un filtro de frecuencia determinada 144 cuya salida está unida a un amplificador de alta ganancia 146, típicamente 10 000, cuyo cero (su punto de reposo) es desplazado por una fuente de tensión 148. La señal amplificada entregada a la salida del amplificador constituye la señal de entrada para un microprocesador o microcontrolador 150 (u otro componente equivalente, como ASIC o FPGA, por ejemplo) que asegura una conversión analógico-digital de la señal amplificada y su procesamiento para entregar un valor de corriente. El valor de corriente así determinado se puede convertir en valor eficaz y mostrarse en una pantalla 152 (opcionalmente, también se pueden mostrar otros parámetros de la corriente, tales como la frecuencia y el valor promedio continuo). Por supuesto, esta unidad de procesamiento está alimentada por una batería (no representada), recargable o no, típicamente de 5 V, cuyo nivel de carga también se puede mostrar en la pantalla. En conexión con el microcontrolador 150, esta pantalla también puede mostrar cierto número de otros estados que permiten comprobar el funcionamiento correcto del dispositivo de medición.

El funcionamiento del dispositivo de medición de corriente se puede resumir de la siguiente manera.

El núcleo magnético 120 descrito anteriormente está rodeado en toda su longitud por el bobinado eléctrico de medición 130. Cuando el sensor flexible 12 se cierra alrededor del conductor de interés 16 recorrido por una corriente i de frecuencia F , el bobinado de medición es el foco de una fuerza electromotriz inducida cuya amplitud es proporcional a la amplitud de la corriente y a su frecuencia.

En aplicación de las leyes de Faraday y Ampere:

$$v(t) = - \frac{\mu_0 \mu_r N S}{l} \frac{di(t)}{dt}$$

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío

μ_r = permeabilidad magnética del material

N = número de espiras

S = sección del bobinado

l = longitud del bobinado

$i(t)$ = corriente que genera el campo que pasa por el bobinado

La función de la unidad de procesamiento 14 es amplificar esta señal y ecualizarla en frecuencia para obtener un ancho de banda plano en el dominio de frecuencia considerado. Sin embargo, la presente invención tiene por objeto medir corrientes alternas muy bajas (unos pocos mA) y, para valores tan bajos, la curva de magnetización del material magnético (diagrama B-H) no es lineal.

Así, si consideramos la estructura a una escala intermedia entre la totalidad del cristal y la escala atómica de un monocristal de hierro, prácticamente sin defectos, es decir, la de los llamados dominios magnéticos de Weiss, podemos observar que, tan pronto como se aplica un campo H en una dirección determinada, la energía de los momentos magnéticos aumenta en los dominios que tienen una dirección opuesta y, en menor medida, en el dominio central de Weiss. El cumplimiento de la condición de energía mínima en la muestra conduce entonces a una disminución del volumen de estos dominios. En un campo H creciente, la estructura de los dominios se irá transformando gradualmente hasta presentar finalmente un solo dominio orientado a lo largo de H . En este ejemplo ideal, el desplazamiento de las paredes de Bloch, que son las interfases de separación entre dos dominios magnéticos de Weiss de orientaciones diferentes, está perfectamente libre y, cortando el campo H , encontramos el estado inicial de la estructura, siendo reversible el proceso de polarización.

Sin embargo, los defectos cristalinos tienen un efecto significativo en la forma del diagrama B-H. Se ha estudiado la acción de defectos puntuales sobre el desplazamiento de las paredes de Bloch, en el interior de un monocristal, y el experimento de Barkhausen ha puesto de relieve movimientos irreversibles de estas paredes que se desplazan mediante una serie de saltos que hacen que los puntos de soldeo de las paredes cedan.

De acuerdo con la invención, el fenómeno de saltos de Barkhausen mencionado anteriormente se compensa mediante la puesta en práctica de una polarización magnética.

Para ello, en la unidad de procesamiento 14, se añade en el bobinado de medición 130 una corriente de polarización alterna de frecuencia de polarización F_{pol} superior al límite superior del ancho de banda útil y de amplitud superior a la de la corriente i que va a medirse. El campo de polarización así creado hace que el punto de reposo magnético ya no es estacionario en el centro de la curva de magnetización, sino que se desplaza permanentemente al compás de la corriente de polarización así creada. Idealmente, si la relación de frecuencia entre la frecuencia de polarización y la frecuencia de medición es suficientemente alta (es decir, superior a 2,5), cada valor del campo de medición recorre

uno o más ciclos de magnetización/desmagnetización a la frecuencia de polarización F_{pol} y a una amplitud media correspondiente a la amplitud de la corriente de polarización. Como se suma el campo provocado por la corriente de medición, todo sucede como si la corriente de medición fuera mucho más magnetizante de lo que realmente es, lo que hace que la función de transferencia salga de la zona central no lineal. El filtrado de frecuencia apropiado 144 (paso bajo, pero que también podría ser supresor de banda) elimina entonces la señal a la frecuencia de polarización F_{pol} para conservar solamente la de la señal de medición.

La elección de la frecuencia de corte de este filtro recae sobre un cálculo de optimización que consiste en eliminar la componente de salida a la frecuencia de polarización al menor coste. En primer lugar, debido a la gran amplitud de la señal de polarización en comparación con la amplitud de la señal útil, se utiliza un filtro analógico. Además, al elegirse la frecuencia de polarización más allá del ancho de banda útil, antes del filtrado existe por lo tanto una preponderancia muy fuerte de la señal de polarización con respecto a la señal útil en una relación que puede ser, por ejemplo, de 50 000/1.

Así, cuando la señal de medición F está a 50/60 Hz, la frecuencia F_{pol} que no es un múltiplo de la frecuencia de medición puede estar comprendida entre 133 y 333 Hz, típicamente 166 Hz, y la frecuencia F_c del filtro paso bajo puede estar comprendida entre 2 y 30 Hz, típicamente 16 Hz. Cuando la señal de medición F está a 1 kHz, la frecuencia F_{pol} que no es un múltiplo de la frecuencia de medición puede estar comprendida entre 3,1 y 10,1 kHz, típicamente 6,666 kHz, y la frecuencia F_c del filtro paso bajo puede estar comprendida entre 2 y 4,5 kHz, típicamente 2,6 kHz, o también la frecuencia de rechazo del filtro supresor de banda puede estar comprendida entre 3,1 y 10,1 kHz, típicamente 6,666 kHz.

Se observará que la utilización en la unidad de tratamiento 14 de un convertidor analógico-digital de muy alta dinámica (de 18 a 24 bits) puede permitir sustituir el filtrado de frecuencia 144 por un filtrado paso bajo digital. Esta configuración tiene entonces la ventaja de permitir adoptar un modo de funcionamiento en donde el procesador calcula constantemente la frecuencia de polarización para que sea no múltiplo de la fundamental de la señal útil medida. De hecho, en determinadas aplicaciones, la frecuencia de la señal útil puede ser arbitraria y estar comprendida en un amplio ancho de banda. Entonces, puede resultar difícil elegir de antemano la frecuencia de polarización sin dar con un múltiplo tomado en el intervalo de interés de la frecuencia que se va a medir.

En la práctica, la frecuencia de polarización magnética puede elegirse arbitrariamente mayor que el espectro de medición y eliminarse mediante un filtrado paso bajo. En todos los casos, también podemos utilizar un filtrado de rechazo siempre que la frecuencia de polarización no forme parte de este espectro de medición.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de medición de corriente alterna sin contacto (10) que comprende un sensor flexible (12) y una unidad de procesamiento (14), rodeando el sensor flexible un conductor (16) recorrido por una corriente eléctrica que va a medirse de amplitud inferior a 10 mA y teniendo un núcleo magnético deformable (120), dispositivo en donde la unidad de procesamiento está configurada para, en un bobinado de medición (130), añadir a una corriente de medición a una frecuencia F una corriente de polarización a una frecuencia de polarización Fpol no múltiplo y al menos 2,5 veces superior a esta frecuencia F y de gran amplitud superior a la amplitud de la corriente de medición y, después, mediante un filtro de frecuencia determinada (144), eliminar esta corriente de polarización a la frecuencia de polarización Fpol para conservar solamente la corriente de medición a la frecuencia F.
2. Dispositivo de medición según la reivindicación 1, caracterizado por que el filtro de frecuencia determinada (144) es un filtro paso bajo o supresor de banda.
3. Dispositivo de medición según la reivindicación 2, caracterizado por que la corriente de polarización a la frecuencia de polarización Fpol se obtiene a la salida de un filtro paso bajo (142) montado a la salida de un generador de señales cuadradas (140) y cuya frecuencia de corte es inferior al primer armónico 2Fpol de la frecuencia de polarización.
4. Dispositivo de medición según la reivindicación 2, caracterizado por que, cuando la señal de medición está a 50/60 Hz, la frecuencia Fpol está comprendida entre 133 y 333 Hz, típicamente 166 Hz, y la frecuencia de corte Fc del filtro paso bajo está comprendida entre 2 y 30 Hz, típicamente 16 Hz.
5. Dispositivo de medición según la reivindicación 2, caracterizado por que, cuando la señal de medición está a 1 kHz, la frecuencia Fpol está comprendida entre 3,1 y 10,1 kHz, típicamente 6,666 kHz, y la frecuencia de corte Fc del filtro paso bajo está comprendida entre 2 y 4,5 kHz, típicamente 2,6 kHz, o la frecuencia de rechazo del filtro supresor de banda está comprendida entre 3,1 y 10,1 kHz, típicamente 6,666 kHz.
6. Dispositivo de medición según la reivindicación 1, caracterizado por que la unidad de procesamiento está configurada para calcular la frecuencia de polarización Fpol de manera que sea permanentemente no múltiplo de la frecuencia F.
7. Dispositivo de medición según la reivindicación 1, caracterizado por que dicho núcleo magnético deformable está formado por varias decenas de cintas magnéticas (120A - 120I) que tienen cada una de ellas un espesor de algunas decenas de micrómetros y cuyos dos extremos están destinados a encajarse en un tubo magnético (128) de un órgano de cierre (126) dejando entre ellos un entrehierro e no nulo.
8. Dispositivo de medición según la reivindicación 5, caracterizado por que cada una de las cintas magnéticas (120A - 120I) está constituida de hierro amorfo.
9. Dispositivo de medición según la reivindicación 5, caracterizado por que el tubo magnético (128) tiene una permeabilidad relativa alta, típicamente superior a 10 000.
10. Dispositivo de medición según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 9, caracterizado por que las cintas magnéticas (120A - 120I) están inmovilizadas en uno de sus dos extremos o en su centro.
11. Dispositivo de medición según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 10, caracterizado por que el núcleo magnético deformable está montado en una funda flexible (124) aislada y lubricada para soportar la deformación del núcleo magnético (120) durante el envolvimiento del conductor (16) recorrido por la corriente eléctrica que se va a medir.
12. Dispositivo de medición según la reivindicación 11, caracterizado por que la funda flexible (124) está realizada de un material termorretráctil.

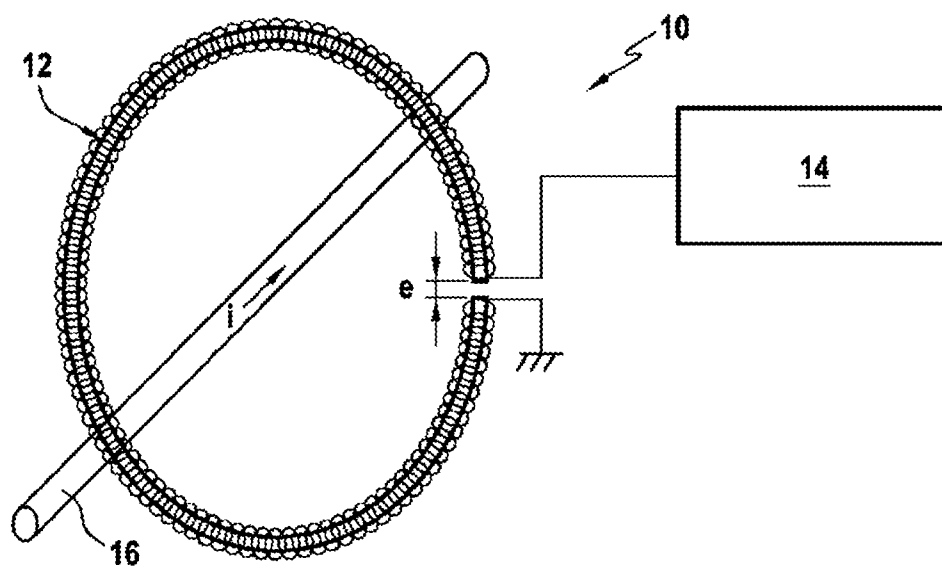


FIG.1

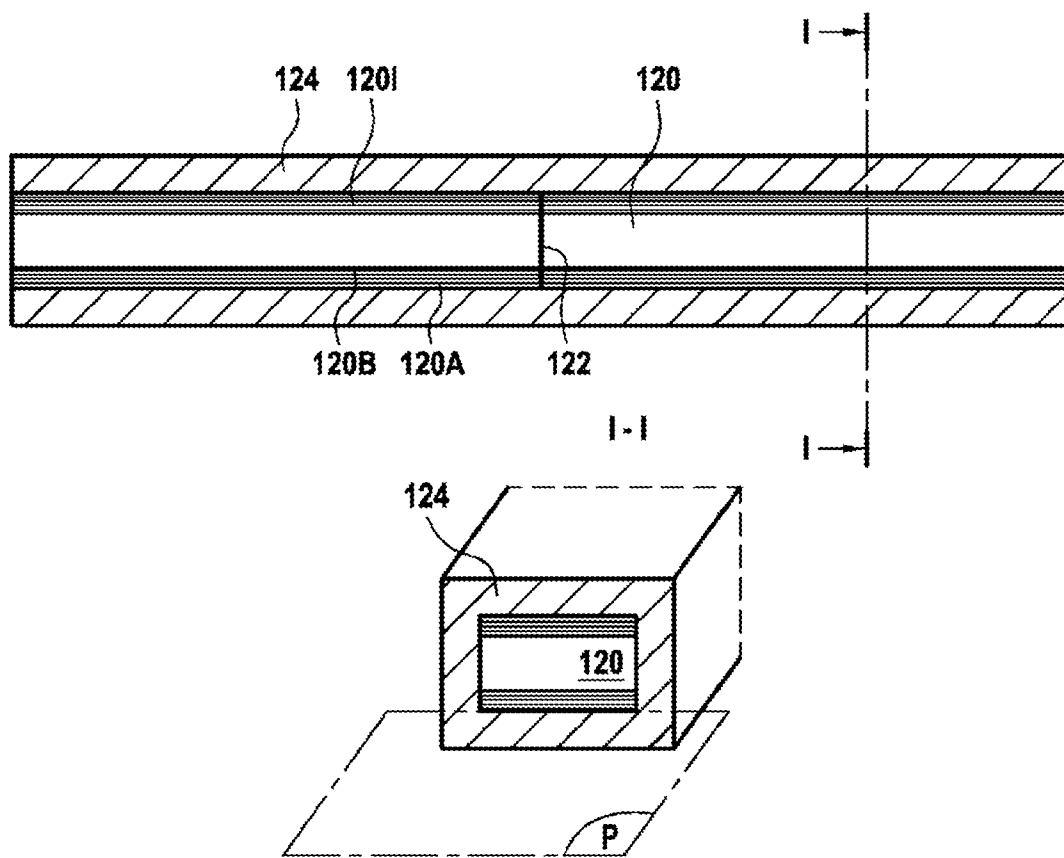


FIG.2

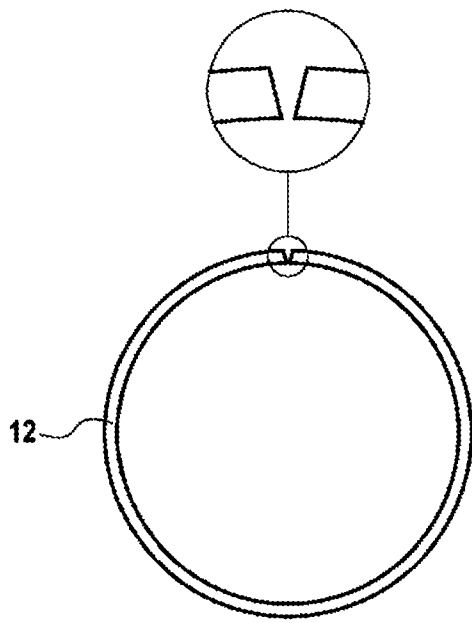


FIG. 3A

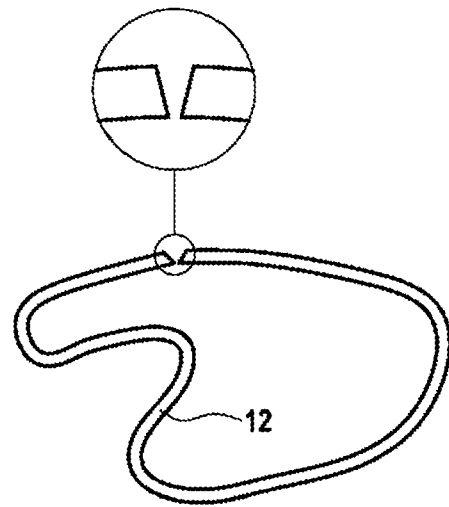


FIG. 3B

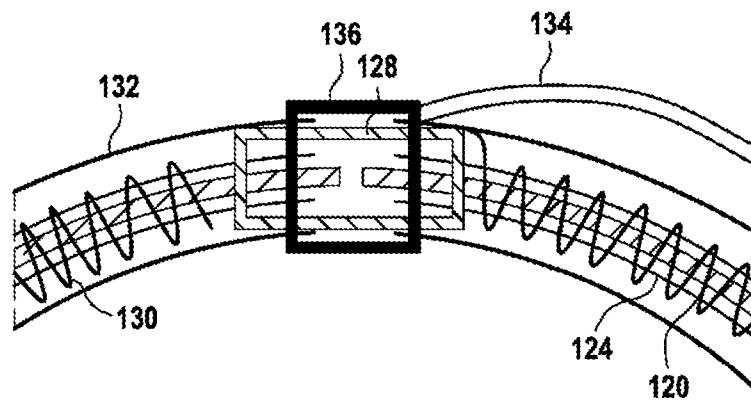


FIG. 4

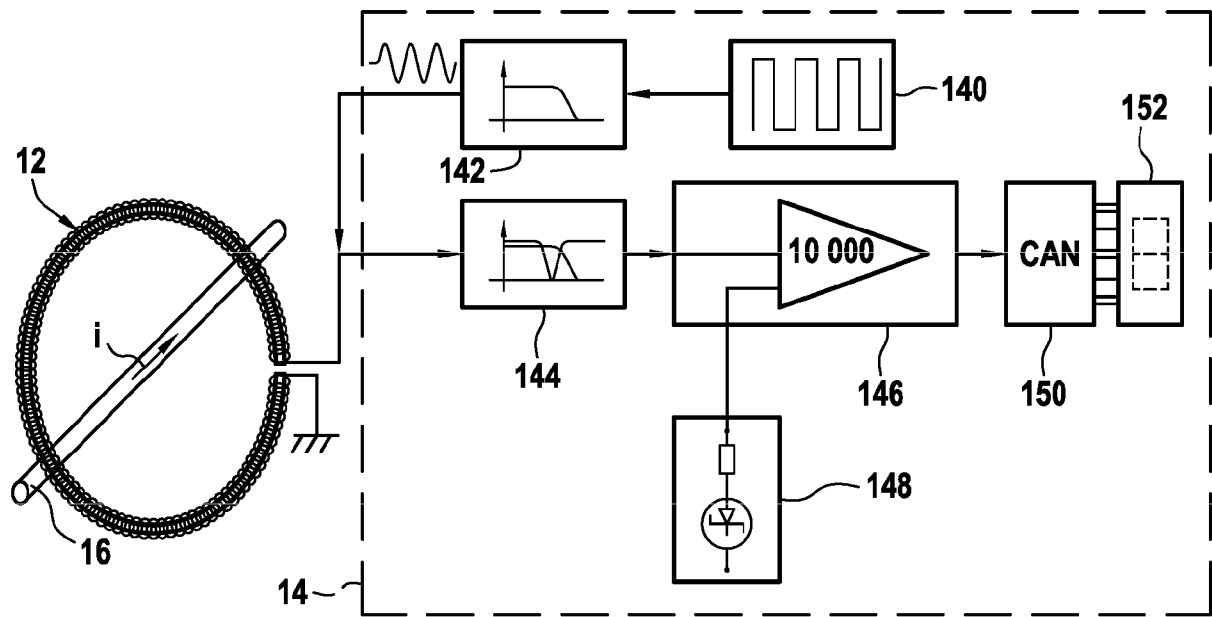


FIG.5