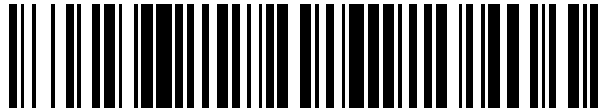


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 248**

51 Int. Cl.:

G01K 7/30

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.11.2016 PCT/EP2016/079104**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.06.2017 WO17097631**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.11.2016 E 16801807 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.06.2019 EP 3387400**

54 Título: **Aparato de medición de temperatura y procedimiento de medición de temperatura**

30 Prioridad:

07.12.2015 GB 201521503

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

13.02.2020

73 Titular/es:

**METROSOL LIMITED (100.0%)
Plum Park Estate Watling Street
Paulerspury, Northamptonshire NN12 6LQ, GB**

72 Inventor/es:

BRAMLEY, PAUL

74 Agente/Representante:

GARCÍA GONZÁLEZ, Sergio

ES 2 742 248 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

Aparato de medición de temperatura y procedimiento de medición de temperatura

5 La presente invención se refiere a un aparato de medición de temperatura y a un procedimiento de medición de temperatura.

10 En realizaciones, la presente invención se refiere a un aparato de medición de temperatura y a un procedimiento de medición de temperatura que determina la temperatura de un elemento sensor midiendo la señal de ruido de Johnson generada por el elemento sensor.

15 La medición precisa de la temperatura es importante en una variedad de entornos comerciales, industriales y científicos. Estos, por ejemplo, incluyen plantas de energía, instalaciones de almacenamiento de alimentos, motores de aviones, plantas de procesamiento de metales, instalaciones de fabricación de cerámica, instalaciones de fabricación de semiconductores, instalaciones de fabricación de productos farmacéuticos, hospitales y laboratorios de investigación científica. En algunos casos, como en plantas de energía nuclear e instalaciones de fabricación farmacéutica, las mediciones precisas de temperaturas son críticas para la seguridad y la calidad del producto.

20 La noción tradicional de un aparato de medición de temperatura es usualmente un termómetro de líquido en vidrio o un medidor mecánico con una tira bimetálica. En la práctica, la mayoría de los termómetros en uso son electrónicos, ya que ofrecen la capacidad de automatizar las funciones de control o alarma y pueden tolerar un rango operativo mucho más amplio que sus contrapartes tradicionales. Los termómetros electrónicos se dividen principalmente en dos categorías: termopares y detectores de temperatura por resistencia. Otros tipos de
25 sensores de temperatura, como los sensores de semiconductores, también están disponibles para su uso en aplicaciones específicas y limitadas.

30 El principio básico de un termómetro de termopar se basa en la fuerza electromotriz (EMF) generada en un circuito que comprende dos metales diferentes o aleaciones metálicas en las que las dos uniones entre los diferentes metales están a diferentes temperaturas. Al fijar una unión a una temperatura conocida y siempre que se conozcan las características de temperatura-voltaje, la temperatura de la otra unión se puede inferir midiendo la EMF generada en el circuito. En un termómetro detector de temperatura por resistencia, la resistencia del elemento sensor (por ejemplo, un termistor o un termómetro por resistencia de platino) del termómetro varía con la temperatura. Por lo tanto, siempre que se conozcan las características de temperatura-resistencia del sensor,
35 la temperatura del sensor se puede inferir midiendo la resistencia del sensor.

40 Estos tipos de termómetros electrónicos (termopares y detectores de temperatura por resistencia) requieren calibración para obtener las características de temperatura-voltaje o las características de resistencia a la temperatura. Además, si este tipo de termómetros se implementan en entornos exigentes, las propiedades físicas del elemento sensor cambian inevitablemente con el tiempo debido a la degradación o contaminación, lo que significa que a menudo se requiere calibrarlo de nuevo. Por ejemplo, en un entorno típico de alta temperatura, como una planta de procesamiento de metales, puede haber muchos iones metálicos en las proximidades del elemento sensor del termómetro. Estos pueden migrar al material del sensor, cambiando así sus propiedades termoeléctricas o de resistencia, lo que lleva a la des-calibrado del termómetro. Incluso en
45 entornos menos exigentes, como en un laboratorio de calibración, la oxidación de los materiales, el crecimiento de granos, la tensión mecánica u otros factores harán que cambien las propiedades físicas del material del sensor, lo que provocará la des-calibrado del termómetro.

50 Aunque se han desarrollado varias técnicas para minimizar y mitigar estos efectos, se ha aceptado que el sensor se "desviará" (des-calibrará) con el tiempo y que es necesario recalibrar el sensor periódicamente. También había sido una práctica común aumentar gradualmente el margen de operación seguro para acomodar la creciente incertidumbre de medición que proporciona un termómetro que se desvía. Por ejemplo, en una planta de energía nuclear, la temperatura del refrigerante de salida del reactor puede reducirse gradualmente a medida que la planta envejece para acomodar mediciones de temperatura menos precisas. Sin embargo, operar a estas
55 temperaturas más bajas es claramente indeseable ya que reduce la eficiencia de la planta de energía. Para sortear este problema, se ha desarrollado una técnica para determinar la temperatura midiendo el ruido eléctrico térmico.

60 En un medio conductor, como un elemento sensor resistivo, se genera ruido eléctrico aleatorio debido a la agitación térmica de los portadores de carga (generalmente electrones) dentro del medio. Este ruido eléctrico, comúnmente conocido como ruido de Johnson, generalmente se mide como un voltaje y es proporcional a la temperatura del medio y sigue la llamada ecuación de Johnson-Nyquist:

$$(1) \quad \overline{V_f^2} = 4 k T R \Delta f$$

donde $\overline{V_T^2}$ es el voltaje de ruido de Johnson cuadrático medio, k (es la constante de Boltzmann, T es la temperatura termodinámica (absoluta), R es la resistencia del medio conductor y Δf es el ancho de banda de medición. Por lo tanto, la Ecuación 1 muestra que la temperatura termodinámica real del elemento sensor se puede determinar directamente midiendo el ruido de Johnson y la resistencia del elemento sensor. Tal medición no se ve afectada por cambios en la construcción del sensor o cualquier otra propiedad física del material que no sea su resistencia.

Los intentos anteriores de un "termómetro de ruido de Johnson" se han limitado a áreas específicas como en los experimentos de metrología destinados a establecer y verificar escalas de temperatura. Existen dos dificultades principales con la termometría de ruido de Johnson, la primera de las cuales es que las señales eléctricas generadas por el ruido de Johnson son extremadamente pequeñas; usualmente cerca del límite inferior de medición. Esto no es sorprendente ya que la técnica implica medir las señales eléctricas generadas por el movimiento aleatorio excitado térmicamente de los portadores eléctricos y cualquier equipo electrónico utilizado para medir estas señales experimentará señales de ruido comparables que son difíciles de separar del ruido de Johnson a medir. La señal de ruido de Johnson también puede estar contaminada por fuentes de ruido externas, como interferencias electromagnéticas en entornos industriales que se acoplan al sistema de medición.

La segunda dificultad principal con la termometría de ruido de Johnson es que la Ecuación 1 supone una respuesta de frecuencia perfectamente plana en el ancho de banda de medición con un rechazo infinito fuera de banda (es decir, una función rectangular). Esto es imposible de realizar en la práctica y cualquier aproximación con precisión adecuada es difícil de lograr.

En teoría, la dificultad con el ruido no deseado de la electrónica de medición puede abordarse mediante un sistema como el que se muestra en la Figura 1. Como se muestra, el sistema 1 usa dos amplificadores de señal 2a/2b para medir la señal de voltaje del elemento sensor 3 y usa un correlacionador 4 para extraer la señal de ruido de Johnson. Dado que la señal de ruido de Johnson medida por los diferentes amplificadores estará correlacionada y dado que el ruido generado por los diferentes amplificadores será diferente y, por lo tanto, no correlacionado, la señal de ruido de Johnson deseada se puede extraer de la señal de ruido total utilizando esta técnica de correlación. La correlación se puede realizar directamente en el dominio de tiempo o por multiplicación en el dominio de frecuencia después de transformar la señal utilizando algoritmos de transformada de Fourier.

El problema de una respuesta de frecuencia imperfecta generalmente se aborda mediante el uso de una técnica de sustitución como la que se muestra en la Figura 2. En el sistema 5 mostrado en la Figura 2, los amplificadores 6a/6b se cambian alternativamente entre medir las señales de voltaje del elemento sensor 7 y las señales de voltaje de un resistor de referencia 8 de resistencia y temperatura conocidas. El resistor de referencia permite la calibración del sistema electrónico utilizado para realizar las mediciones al proporcionar una señal predeterminada en función de la cual se puede medir la salida resultante. El correlacionador 9 extrae la señal de ruido de Johnson de manera similar al correlacionador 4 que se muestra en la Figura 1. En tal disposición, la señal de ruido de Johnson del elemento sensor y la señal del resistor de referencia serán ruido blanco (es decir, igual densidad espectral en todas las frecuencias). Como tal, siempre que la respuesta de frecuencia del sistema sea la misma cuando se conecta al elemento sensor y cuando se conecta al resistor de referencia, el ancho de banda desconocido de la Ecuación 1 se puede eliminar y la temperatura del elemento sensor se puede determinar usando la siguiente ecuación:

$$(2) \quad T = T_{ref} \frac{\overline{V_T^2}}{\overline{V_{ref}^2}} \frac{R_{ref}}{R_T}$$

donde T_{ref} es la temperatura conocida del resistor de referencia, R_{ref} es la resistencia conocida del resistor de referencia, $\overline{V_{ref}^2}$ es el voltaje de ruido de Johnson cuadrático medio medido del resistor de referencia, R_T es la resistencia medida del elemento sensor y $\overline{V_T^2}$ es el ruido de Johnson cuadrático medio medido del elemento sensor. La Ecuación 2 supone que el resistor de referencia es efectivamente una fuente de calibración de ruido blanco con una densidad espectral de potencia conocida. Esta puede ser reemplazada por una señal de ruido sintetizada, como una forma de onda de voltaje pseudoaleatoria para aumentar la flexibilidad en el diseño del sistema. Con el resistor de referencia reemplazado por una forma de onda de voltaje pseudoaleatoria, la temperatura del elemento sensor puede determinarse usando la siguiente ecuación:

$$(3) \quad T = \frac{\overline{V_T^2} v_{cal}^2}{4 k R_T \overline{V_{cal}^2}}$$

donde $\overline{V_{cal}^2}$ es la señal de voltaje cuadrática media medida de la forma de onda de voltaje pseudoaleatoria y

v_{cal}^2 es la densidad espectral cuadrático conocida de voltaje de ruido de la señal de calibración.

La Ecuación 2 también supone que la respuesta de frecuencia del sistema es idéntica cuando está conectada al elemento sensor y al resistor de referencia. Cualquier incompatibilidad en la respuesta de frecuencia cuando el sistema cambia entre el elemento sensor y el resistor de referencia dará lugar a errores. En particular, dado que las señales de ruido de Johnson son pequeñas, es deseable utilizar anchos de banda amplios. También es deseable utilizar un elemento sensor y un resistor de referencia que tengan grandes valores de resistencia. Sin embargo, esto hace que el sistema de medición sea extremadamente sensible a cualquier incompatibilidad en la capacitancia de los cables utilizados para conectar el elemento sensor y el resistor de referencia, lo que luego conduce a una incompatibilidad en el contenido de frecuencia de la señal de entrada en los amplificadores. Para minimizar la incompatibilidad, la resistencia del elemento sensor se limita usualmente a 100Ω y el ancho de banda de medición se restringe usualmente a 100kHz. Un sistema de cambio o conmutación, como se muestra en la Figura 2, también toma el doble de tiempo para realizar mediciones y tiene la desventaja de requerir componentes adicionales (por ejemplo, interruptores) en el circuito de entrada extremadamente sensible.

A pesar de limitar la resistencia y el ancho de banda, los sistemas típicos a menudo requieren un ajuste extremadamente cuidadoso de las capacitancias de los cables para mantener los errores de medición a niveles aceptables. La necesidad de limitar la resistencia y el ancho de banda para evitar errores por incompatibilidad del cable también significa que la señal de ruido de Johnson generada por el elemento sensor apenas se detecta por encima del nivel de ruido de los amplificadores. Esto lleva a tiempos de medición extremadamente largos, usualmente medidos en horas o días. Esto puede ser aceptable para fines experimentales con equipos caros a gran escala. Sin embargo, no es práctico para fines industriales y comerciales. Por lo tanto, existe la necesidad de un sistema de termometría de ruido de Johnson más rápido y sin desviaciones. Se conoce un termómetro de ruido de Johnson en la técnica anterior, por ejemplo, en Luca Callegaro *et al.*: "A Johnson noise thermometer with traceability to electrical standards", *Metrologia*, Institute of Physics Publishing, Bristol, GB, vol. 46, no. 5, 1 de octubre de 2009, páginas 409-415, ISSN: 0026-1394, DOI: 10.1088/0026-1394/46/5/004. Dicha publicación divulga un termómetro de ruido de Johnson (JNT) con una fuente de voltaje de calibración de ruido pseudoaleatorio (PRN) La temperatura se determina mediante la comparación de la densidad espectral de potencia con y sin inyección de un voltaje de calibración.

Por consiguiente, el primer aspecto de la presente invención proporciona un sistema de medición de temperatura, que comprende un elemento sensor resistivo generador de ruido de Johnson para detectar temperatura; circuitería de procesamiento de señales acoplada eléctricamente al elemento sensor; y un inyector de corriente acoplado eléctricamente a la circuitería de procesamiento de señales y al elemento sensor, y configurado para inyectar una corriente de calibración en el elemento sensor; en el que la circuitería de procesamiento de señales está configurada para: recibir una señal de voltaje compuesta del elemento sensor, la señal de voltaje compuesta comprende una señal de voltaje que surge del ruido de Johnson generado por el elemento sensor y una señal de voltaje que surge de la corriente de calibración; extraer la señal de voltaje de ruido de Johnson de la señal de voltaje compuesta recibida; y determinar la temperatura del elemento sensor en función de la señal de voltaje de ruido de Johnson extraída.

Por lo tanto, la presente invención proporciona un sistema para medir temperatura que no requiere conmutación entre mediciones del elemento sensor y un resistor de referencia. Esta disposición reduce en gran medida el tiempo de medición y mejora la precisión de la medición. El sistema puede funcionar a un ancho de banda mucho mayor con un elemento sensor que tiene una resistencia mucho mayor para aumentar el nivel de señal total.

Preferentemente, la circuitería de procesamiento de señales está además configurada para extraer una medición de la resistencia del elemento sensor y para determinar la temperatura del elemento sensor en base a la medición extraída de la resistencia.

En realizaciones, el inyector de corriente está configurado para generar una corriente de ruido pseudoaleatorio como la corriente de calibración.

En realizaciones, la corriente de ruido pseudoaleatorio tiene una forma que comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas.

En realizaciones, la circuitería de procesamiento de señales incluye dos o más amplificadores de señal acoplados eléctricamente al elemento sensor en paralelo, estando configurado cada amplificador de señal para recibir la señal de voltaje compuesta y para emitir una señal amplificada; y un correlacionador de señal configurado para recibir las señales amplificadas de los amplificadores de señal, procesar las señales amplificadas recibidas y extraer una señal de voltaje compuesta amplificada. Preferentemente, el inyector de corriente está dispuesto para inyectar la corriente de calibración desde una ubicación próxima a una entrada de uno de los amplificadores de señal.

En realizaciones, el elemento sensor tiene una resistencia de 5000 ohmios.

5 En las realizaciones, la circuitería de procesamiento de señales está configurada para extraer la señal de voltaje de ruido de Johnson y la señal de voltaje de calibración usando un algoritmo de transformada de Fourier, en el que el algoritmo de transformada de Fourier incluye al menos uno de un algoritmo de transformada rápida de Fourier y un algoritmo de transformada discreta de Fourier. Preferentemente, el inyector de corriente está configurado para generar una corriente de ruido pseudoaleatorio como la corriente de calibración; la corriente de ruido pseudoaleatorio tiene una forma que comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas y frecuencias seleccionadas que están centradas en un canal del algoritmo de transformada de Fourier. Más preferentemente, la corriente de ruido pseudoaleatorio está predeterminada para tener frecuencias en un subconjunto de los canales del algoritmo de transformada de Fourier.

10 En realizaciones, la circuitería de procesamiento de señales está configurada para recibir la señal de voltaje compuesta del elemento sensor sobre un ancho de banda de 3×10^6 Hz.

En realizaciones, la circuitería de procesamiento de señales está configurada para ponderar la señal de voltaje compuesta recibida hacia frecuencias por debajo de 1×10^5 Hz.

20 En realizaciones, el inyector de corriente incluye un resistor de resistencia relativamente alta protegido por una estructura de resistencia inferior que tiene el mismo factor de forma física que el resistor de alta resistencia.

25 En realizaciones, el sistema además comprende una fuente de voltaje secundario acoplada eléctricamente a la circuitería de procesamiento de señales y al elemento sensor, y dispuesta para aplicar una señal de voltaje secundario en serie con el elemento sensor; en el que la señal de voltaje compuesta además incluye una señal de voltaje que surge de la fuente de voltaje secundario; en el que la circuitería de procesamiento de señales está configurada adicionalmente para extraer la señal de voltaje que surge de la fuente de voltaje secundario de la señal de voltaje compuesta recibida; y en el que la determinación de la temperatura del elemento sensor se basa adicionalmente en la señal de voltaje secundario extraída.

30 De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, se proporciona un procedimiento para medir la temperatura, que comprende proporcionar un elemento sensor resistivo generador de ruido de Johnson para detectar la temperatura; inyectar una corriente de calibración en el elemento sensor; recibir, desde el elemento sensor, una señal de voltaje que surge del ruido de Johnson generado por el elemento sensor y de la corriente de calibración; extraer, de la señal de voltaje recibida, una señal de voltaje de ruido de Johnson que surge del ruido de Johnson generado por el elemento sensor; determinar la temperatura del elemento sensor en base a la señal de voltaje de ruido de Johnson extraída.

35 Preferentemente, el procedimiento además comprende extraer una medición de la resistencia del elemento sensor, en el que la determinación de la temperatura del elemento sensor se basa adicionalmente en la medición extraída de la resistencia.

40 En realizaciones, inyectar una corriente de calibración incluye inyectar una corriente de ruido pseudoaleatorio. Preferentemente, la corriente de ruido pseudoaleatorio tiene una forma que comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas.

45 En realizaciones, recibir una señal de voltaje compuesta comprende dividir la señal de voltaje compuesta en una pluralidad de rutas; amplificar cada ruta; y procesar las rutas amplificadas usando técnicas de correlación para extraer una señal de voltaje compuesta amplificada.

50 En realizaciones, extraer una señal de voltaje de ruido de Johnson y extraer una señal de voltaje de calibración comprende usar un algoritmo de transformada de Fourier, en el que el algoritmo de transformada de Fourier incluye al menos uno de un algoritmo de transformada rápida de Fourier y un algoritmo de transformada discreta de Fourier. Preferentemente, inyectar una corriente de calibración incluye inyectar una corriente de ruido pseudoaleatorio, la corriente de ruido pseudoaleatorio tiene una forma que comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas y frecuencias seleccionadas que están centradas en un canal del algoritmo de transformada de Fourier. Más preferentemente, el procedimiento además comprende predeterminar la corriente de ruido pseudoaleatorio para que tenga frecuencias en un subconjunto de los canales del algoritmo de transformada de Fourier.

55 En realizaciones, recibir una señal de voltaje compuesta comprende recibir una señal de voltaje desde el elemento sensor en un ancho de banda de 3×10^6 Hz.

60 En realizaciones, el procedimiento además comprende ponderar la señal de voltaje compuesta recibida hacia frecuencias inferiores a 1×10^5 Hz.

En realizaciones, el procedimiento además comprende aplicar un voltaje secundario en serie con el elemento sensor, en el que la señal de voltaje compuesta además incluye una señal de voltaje que surge del voltaje secundario; y extraer, de la señal de voltaje compuesta recibida, una señal de voltaje secundario que surge del voltaje secundario aplicado; en el que la determinación de la temperatura del elemento sensor se basa adicionalmente en la señal de voltaje secundario extraída.

De acuerdo con otro aspecto más, se proporciona un sistema de medición de temperatura, que comprende un elemento sensor resistivo generador de ruido de Johnson para detectar temperatura; circuitería de procesamiento de señales acoplada eléctricamente al elemento sensor; y una fuente de voltaje secundario acoplada eléctricamente a la circuitería de procesamiento de señales y al elemento sensor, y dispuesta para aplicar un voltaje secundario en serie con el elemento sensor; en el que la circuitería de procesamiento de señales están configurados para recibir una señal de voltaje compuesta del elemento sensor, la señal de voltaje compuesta incluye una señal de voltaje que surge del ruido de Johnson generado por el elemento sensor y una señal de voltaje que surge del voltaje secundario; extraer la señal de voltaje de ruido de Johnson y la señal de voltaje secundario de la señal de voltaje compuesta recibida; y determinar la temperatura del elemento sensor en base a la señal de voltaje de ruido de Johnson extraída y a la señal de voltaje secundario extraída.

A continuación, se describirán realizaciones de la presente invención a modo de ejemplos, con referencias a las figuras adjuntas, en las que:

La Figura 1 es un diagrama de circuito que ilustra un sistema de medición de temperatura conocido;

La Figura 2 es un diagrama de circuito que ilustra otro sistema conocido de medición de temperatura;

La Figura 3 es un diagrama de circuito que ilustra un ejemplo de un sistema de medición de temperatura;

La Figura 4 es un diagrama de circuito que ilustra un ejemplo de un conjunto de resistor para un inyector de corriente; y

La Figura 5 es un gráfico que ilustra los componentes de frecuencia de una señal de calibración.

El sistema de medición de temperatura de las realizaciones de la presente invención incluye en general un elemento sensor formado a partir de un material conductor que tiene una resistencia eléctrica. El material conductor del elemento sensor genera naturalmente ruido de Johnson en forma de una señal de voltaje, que el sistema de medición de temperatura mide para determinar la temperatura del elemento sensor. El sistema también incluye circuitería de procesamiento de señales que está eléctricamente acoplada al elemento sensor. El sistema además incluye un inyector de corriente, que está acoplado eléctricamente tanto al elemento sensor como a la circuitería de procesamiento de señal. El inyector de corriente está configurado para inyectar una corriente de calibración en el elemento sensor, que se combina con el ruido de Johnson generado naturalmente en el elemento sensor para generar una señal de voltaje compuesta. La circuitería de procesamiento de señales está configurada para recibir la señal de voltaje compuesta (es decir, una señal que comprende una señal de voltaje que surge del ruido de Johnson del elemento sensor combinado con una señal de voltaje que surge de la corriente de calibración). La circuitería de procesamiento de señales está además configurada para extraer la señal de voltaje de ruido de Johnson y la señal de voltaje de calibración de la señal compuesta y para determinar la temperatura del elemento sensor en base a la señal de voltaje de ruido de Johnson extraída y a la señal de voltaje de calibración extraída.

En la Figura 3 se muestra una realización de un sistema de medición de temperatura 10 de la presente invención. En esta realización, el sistema 10 incluye un elemento sensor 12, circuitería de procesamiento de señales 14 y un inyector de corriente 16. En ejemplos de esta realización, el elemento sensor 12 está formado a partir de un material resistivo metálico que genera señales de ruido de Johnson de forma natural como, por ejemplo, un termómetro por resistencia de platino. En otros ejemplos, el elemento sensor 12 puede formarse a partir de cualquier otro material adecuado que genere señales de ruido de Johnson de forma natural. La circuitería de procesamiento de señales 14 incluye dos amplificadores de señal 18a/18b y un procesador de señal 20. El procesador de señal 20 incluye opcionalmente uno o más correlacionadores de señal. Los amplificadores de señal 18a/18b y el procesador de señal 20 tienen cada uno dos entradas y una salida. Las entradas de cada uno de los amplificadores de señal 18a/18b se acoplan eléctricamente al elemento sensor 12 y las salidas de los amplificadores de señal 18a/18b se acoplan eléctricamente a las entradas respectivas del procesador de señal 20. En algunas realizaciones, el elemento sensor 12 y los amplificadores de señal 18a/18b están conectados en paralelo.

El inyector de corriente 16 de la realización de la Figura 3 está acoplado eléctricamente al elemento sensor 12 para permitir que se inyecte una corriente de calibración en el elemento sensor 12. Por ejemplo, en algunas disposiciones de esta realización, el elemento sensor 12 y los diversos componentes de la circuitería de

procesamiento de señales 14 están interconectados por cables eléctricos y el inyector de corriente 16 está dispuesto para inyectar la corriente de calibración en el cable eléctrico que conecta el elemento sensor 12 a una entrada de uno de los amplificadores de señal 18a/18b. En otras disposiciones, el elemento sensor 12 y los diversos componentes de la circuitería de procesamiento de señales 14 están interconectados por otros medios adecuados de conexión eléctrica y el inyector de corriente 16 está dispuesto para inyectar la corriente de calibración en la conexión eléctrica entre el elemento sensor 12 y una entrada de uno de los amplificadores de señal 18a/18b. La corriente de calibración es de una forma conocida y puede ser predeterminada por un operador del sistema 10.

El elemento sensor 12 genera una señal de voltaje debido al ruido de Johnson generado naturalmente. La señal de voltaje de ruido de Johnson depende de la temperatura del elemento sensor 12, y es más alta cuando la temperatura del elemento sensor 12 es alta, más baja cuando la temperatura del elemento sensor es baja. Cuando el inyector de corriente 16 inyecta la corriente de calibración en el elemento sensor 12, la corriente de calibración se combina con el ruido de Johnson del elemento sensor 12 para generar una señal de voltaje compuesta a través del elemento sensor 12. La señal de voltaje compuesta puede comprender la señal de voltaje de ruido de Johnson generada naturalmente y la señal que surge de la corriente de calibración, y los rangos de frecuencia usados en la medición pueden tener el mismo espectro de frecuencia que la señal de voltaje de ruido de Johnson del elemento sensor 12 en ausencia de la corriente de calibración. En algunos ejemplos de la realización mostrada en la Figura 3, la corriente de calibración es una corriente de ruido pseudoaleatorio (PRN). En ejemplos particulares, la corriente de PRN tiene una forma que comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas. En algunos ejemplos de esta realización, la corriente de calibración se inyecta directamente en el elemento sensor 12. En otros ejemplos, el inyector de corriente 16 está dispuesto para inyectar la corriente de calibración en una ubicación próxima a la entrada de un amplificador de señal 18a/18b, es decir, físicamente cerca de la entrada. Esta última disposición es preferente cuando, por ejemplo, el elemento sensor 12 se coloca en una ubicación física que es difícil o imposible de acceder con el fin de inyectar la corriente de calibración.

Al inyectar una corriente de calibración en el elemento sensor 12, el sistema 10 no requiere ninguna conmutación para cambiar entre medir la señal de voltaje del elemento sensor 12 y medir la señal de voltaje de un resistor de referencia. Esto elimina el requisito de una coincidencia estrecha de las constantes de tiempo de los diferentes circuitos con el fin de reducir los errores causados por respuestas de frecuencia que coinciden de forma imperfecta, permitiendo así el uso de anchos de banda de medición más amplios y/o elementos sensores de mayor resistencia para generar señales más grandes. La señal de voltaje que surge de la corriente de calibración también se puede usar para caracterizar la respuesta de frecuencia del sistema 10.

En disposiciones en las que la corriente de calibración se inyecta en el elemento sensor 12 en una ubicación próxima a la entrada de un amplificador de señal 18a/18b, las señales recibidas por los amplificadores de señal 18a/18b diferirán debido a la atenuación de señal en los cables eléctricos que conectan el sensor a los amplificadores de señal y la asimetría en el sistema 10. En el ejemplo que se muestra en la Figura 3, la corriente de calibración se inyecta cerca de una entrada del amplificador de señal 18a, lo que hace que la señal recibida por el amplificador de señal 18a sea más alta que la señal recibida por el amplificador de señal 18b. La magnitud del exceso de señal en el amplificador de señal 18a es comparable al déficit de señal en el amplificador de señal 18b cuando se compara con la situación ideal de inyectar la corriente directamente en el elemento sensor 12. Esto conduce a una cancelación de primer orden de los errores, que mejora con el aumento de la resistencia del elemento sensor 12. En consecuencia, el error causado por la atenuación y la asimetría del sistema puede reducirse a niveles aceptables seleccionando un elemento sensor 12 que tenga una alta resistencia. En ejemplos, se usa un elemento sensor 12 con una resistencia de 5000Ω. Con un ancho de banda de 1MHz, esto proporciona un aumento de 500 veces en el nivel de señal en comparación con un elemento sensor de 100Ω con un ancho de banda de 100kHz.

En las realizaciones descritas anteriormente y como se muestra en la Figura 3, se proporcionan dos amplificadores de señal 18a/18b. Sin embargo, la persona experta en la técnica apreciará que la circuitería de procesamiento de señales 14 puede tener más de dos amplificadores de señal y que el procesador de señal 20 puede incluir más de un correlacionador de señal conectado adecuadamente a los amplificadores de señal.

Para determinar la temperatura del elemento sensor 12, la circuitería de procesamiento de señales 14 recibe la señal de voltaje compuesta del elemento sensor 12, extrae la señal de voltaje de ruido de Johnson y la señal de voltaje de calibración usando una técnica de correlación, y determina la temperatura del elemento sensor 12 basado en la Ecuación 3. Más específicamente, la señal de voltaje compuesta se divide en varias rutas eléctricas, cada una recibida en las entradas de cada uno de los amplificadores de señal 18a/18b. Cada amplificador de señal 18a/18b amplifica la señal de voltaje que recibe a un nivel que es más práctico para el procesamiento de señal y envía la señal amplificada al procesador de señal 20. El procesador de señal 20 recibe y compara las dos señales de voltaje amplificadas e identifica componentes que son comunes a ambas señales amplificadas recibidas. Los componentes que no son comunes se atribuyen al ruido aleatorio no correlacionado generado por los amplificadores de señal 18a/18b y se rechazan. Los componentes que son comunes se

atribuyen a la señal de voltaje compuesta generada a través del elemento sensor 12. Basado en estos componentes comunes, el procesador de señal 20 extrae una señal de voltaje compuesta amplificada. Además, en base a la forma conocida de la corriente de calibración, el procesador de señal 20 separa los componentes de la señal de voltaje compuesta atribuida a la corriente de calibración y los componentes atribuidos al ruido de Johnson del elemento sensor 12. En algunos ejemplos de la realización mostrada en la Figura 3, el procesador de señal 20 realiza cálculos basados en los componentes atribuidos al ruido de Johnson del elemento sensor 12 para inferir la temperatura del elemento sensor 12.

Opcionalmente, la circuitería de procesamiento de señales 14 también extrae la señal de voltaje de calibración de la señal de voltaje compuesta recibida y determina la temperatura del elemento sensor 12 en base a la señal de voltaje de ruido de Johnson extraída y a la señal de voltaje de calibración extraída.

En ejemplos de las realizaciones del sistema 10, el inyector de corriente 16 incluye un conjunto de resistor 30 que tiene una alta resistencia y una baja capacitancia parásita. Como se muestra en la Figura 4, el conjunto de resistor 30 comprende un resistor de alta resistencia 32 rodeado por una estructura de resistencia inferior 34 conectada a voltajes similares para proteger el resistor de alta resistencia. Tal disposición de una protección de resistencia inferior alrededor del resistor de alta resistencia asegura que el campo eléctrico alrededor del resistor blindado sea igual o similar a uno que esté en espacio infinito y protege el resistor de alta resistencia de cualquier conductor que pueda estar cerca. En particular, el blindaje evita que cualquier corriente capacitiva fluya a tierra, lo que desviaría parte de la corriente de calibración prevista destinada del elemento sensor 12. Las imperfecciones capacitivas en el resistor de alta resistencia 32 se limitan entonces a la capacitancia de extremo a extremo que surge de la construcción del resistor, que puede mantenerse baja manteniendo separados los extremos del resistor. En el ejemplo que se muestra en la Figura 4, la estructura de resistencia inferior 34 tiene forma cilíndrica y tiene una resistencia de 5kΩ. La resistencia de alta resistencia 32 tiene una resistencia de 5MΩ y tiene una capacitancia lo suficientemente baja como para lograr un ancho de banda superior a 1MHz.

En ejemplos de la realización del sistema 10, el procesador de señal 20 está configurado para comparar las dos señales de voltaje amplificadas recibidas de los amplificadores de señal 18a/18b usando un algoritmo de transformada de Fourier. El algoritmo de transformada de Fourier incluye, entre otros, un algoritmo de transformada rápida de Fourier o un algoritmo de transformada discreta de Fourier. Las salidas de los amplificadores de señal 18a/18b se multiplican juntas y luego se suman para determinar el valor cuadrático medio del componente correlacionado de las dos señales de voltaje amplificadas. En algunos de estos ejemplos, el inyector de corriente 16 está configurado para inyectar una corriente de PRN como la corriente de calibración. El PRN tiene una forma que comprende una serie de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas. Las frecuencias de las ondas sinusoidales se seleccionan de modo que cada una de ellas esté centrada en un canal del algoritmo de transformada de Fourier para garantizar que no haya fugas en canales adyacentes. En algunos ejemplos, la corriente de PRN está predeterminada para tener frecuencias en un subconjunto de los canales del algoritmo de transformada de Fourier. En un ejemplo particular, la corriente de PRN está predeterminada para tener frecuencias en cada octavo canal. La Figura 5 muestra un ejemplo particular de este tipo, en el que un componente de frecuencia de la transformada de Fourier de la señal de calibración está en el canal "n" y el siguiente componente de frecuencia está en el contendor "n + 8".

La señal de voltaje de ruido de Johnson se puede determinar utilizando solo canales que no contengan ninguna de las frecuencias seleccionadas. La señal de calibración se puede determinar utilizando solo los canales que contienen las frecuencias seleccionadas y restando, en cuadratura, la señal de voltaje de ruido de Johnson previamente determinada.

En algunas realizaciones, además o como alternativa al inyector de corriente 16, el sistema 10 incluye una fuente de voltaje secundario (no mostrada) que está eléctricamente acoplada al elemento sensor 12 y a la circuitería de procesamiento de señales 14. La fuente de voltaje secundario está dispuesta para aplicar un voltaje secundario en serie con el elemento sensor 12. El uso de un voltaje secundario de este tipo evita la necesidad de que la sensibilidad del sistema de medición sea estable en el tiempo. En ejemplos, la fuente de voltaje secundario está configurada para aplicar un voltaje de ruido pseudoaleatorio (PRN). En ejemplos particulares, el voltaje PRN comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fase aleatoria. Las ondas sinusoidales están preferentemente en un subconjunto diferente de canales de transformada de Fourier a los ocupados por la señal de corriente de calibración, de modo que la señal de voltaje que surge de la fuente de voltaje secundario se puede extraer de las otras señales en la señal de voltaje compuesta usando el mismo procedimiento de procesamiento de señal utilizado para separar la señal de voltaje que surge de la corriente de calibración de la señal de voltaje de ruido de Johnson. Además de usarse para calibrar la sensibilidad del sistema 10 con el fin de permitir que la resistencia del elemento sensor 12 se determine utilizando la ley de Ohm, esta señal de voltaje secundario también se puede usar para caracterizar la respuesta de frecuencia de la electrónica de medición y, por lo tanto, para contribuir al cálculo de la temperatura a partir de los datos capturados.

Usualmente, debido a la respuesta de frecuencia del elemento sensor 12 en combinación con la capacitancia de

los cables eléctricos, la mayoría de la señal que llega a los amplificadores de señal 18a/18b se produce a frecuencias más bajas, tales como por debajo de 100 kHz, y la mayoría de los errores mencionados anteriormente ocurren a frecuencias superiores a 100 kHz. En consecuencia, en realizaciones del sistema 10, la circuitería de procesamiento de señales 14 está configurada para aplicar una ponderación a los canales en el algoritmo de transformada de Fourier que contiene la señal total que aparece en cada intervalo de frecuencia. Esta ponderación es proporcional a la amplitud esperada o medida al realizar los cálculos antes mencionados. En particular, en algunos ejemplos, el procesador de señal 20 está configurado para aplicar esta ponderación.

En ejemplos de las realizaciones del sistema 10, la resistencia del elemento sensor 12 se determina mediante la inclusión de frecuencias más bajas en la señal de corriente de calibración donde la ganancia del sistema es calculable y estable. Estas frecuencias más bajas pueden estar por debajo de las utilizadas para la determinación del ruido de Johnson. Estas frecuencias se extraen de la información de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se utilizan para determinar la resistencia utilizando la ley de Ohm. En los ejemplos particulares en los que la señal de corriente de calibración es un PRN que comprende una serie de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas, la inclusión de estas frecuencias más bajas donde la ganancia es estable y conocida permite medir el voltaje resultante y permite determinar la resistencia del elemento sensor 12 utilizando la ley de Ohm.

Las realizaciones del sistema 10 de la presente invención pueden implementarse de varias maneras. En algunos ejemplos, el elemento sensor 12 puede colocarse en un espacio o adyacente a un objeto para medir la temperatura del mismo. El espacio u objeto puede estar a temperaturas extremas y/o estar sujeto a altos niveles de radiación. La circuitería de procesamiento de señales 14 y el inyector de corriente 16 pueden entonces ubicarse de forma remota, lejos del espacio u objeto. En tal disposición, los componentes más delicados del sistema 10 están protegidos del daño por calor/frío o radiación.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de medición de temperatura (10), que comprende:
- 5 un elemento sensor resistivo generador de ruido de Johnson (12) para detectar temperatura;
- circuitería de procesamiento de señales (14) acoplada eléctricamente al elemento sensor (12); y
- 10 un inyector de corriente (16) acoplado eléctricamente a la circuitería de procesamiento de señales (14) y al elemento sensor (12), y configurado para inyectar una corriente de calibración en el elemento sensor (12);
- en el que la circuitería de procesamiento de señales (14) está configurada para:
- 15 recibir una señal de voltaje compuesta del elemento sensor (12), incluyendo la señal de voltaje compuesta una señal de voltaje que surge del ruido de Johnson generado por el elemento sensor (12) y una señal de voltaje que surge de la corriente de calibración;
- 20 extraer la señal de voltaje de ruido de Johnson y la señal de voltaje de calibración de la señal de voltaje compuesta recibida; y
- determinar la temperatura del elemento sensor (12) en base a la señal de voltaje de ruido de Johnson extraída y a la señal de voltaje de calibración extraída.
- 25 2. Un sistema (10) según la reivindicación 1, en el que la circuitería de procesamiento de señales (14) está además configurada para:
- extraer una medida de la resistencia del elemento sensor (12); y determinar la temperatura del elemento
- 30 sensor (12) en base a la medida extraída de la resistencia.
3. Un sistema (10) según la reivindicación 1 o 2, en el que el inyector de corriente (16) está configurado para generar una corriente de ruido pseudoaleatorio como la corriente de calibración.
- 35 4. Un sistema (10) según cualquier reivindicación precedente, en el que la corriente de ruido pseudoaleatorio tiene una forma que comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas.
5. Un sistema (10) según cualquier reivindicación precedente, en el que la circuitería de procesamiento de
- 40 señales (14) incluye:
- dos o más amplificadores de señal (18a, 18b) acoplados eléctricamente al elemento sensor (12) en paralelo, estando cada amplificador de señal (18a, 18b) configurado para recibir la señal de voltaje compuesta y emitir una señal amplificada; y
- 45 un correlacionador de señal (20) configurado para recibir las señales amplificadas de los amplificadores de señal (18a, 18b), procesar las señales amplificadas recibidas y extraer una señal de voltaje compuesta amplificada.
- 50 6. Un sistema (10) según la reivindicación 5, en el que el inyector de corriente (16) está dispuesto para inyectar la corriente de calibración desde una ubicación próxima a una entrada de uno de los amplificadores de señal (18a, 18b).
7. Un sistema (10) según cualquier reivindicación precedente, en el que la circuitería de procesamiento de
- 55 señales (14) está configurada para extraer la señal de voltaje de ruido de Johnson y la señal de voltaje de calibración usando un algoritmo de transformada de Fourier, en el que el algoritmo de transformada de Fourier incluye al menos uno de un algoritmo de transformada rápida de Fourier y un algoritmo de transformada discreta de Fourier.
- 60 8. Un sistema (10) según la reivindicación 7, en el que el inyector de corriente (16) está configurado para generar una corriente de ruido pseudoaleatorio como la corriente de calibración; teniendo la corriente de ruido pseudoaleatorio una forma que comprende una pluralidad de ondas sinusoidales relacionadas armónicamente con fases aleatorizadas y frecuencias seleccionadas que están cada una centradas en un canal del algoritmo de transformada de Fourier.

9. Un sistema (10) según la reivindicación 8, en el que la corriente de ruido pseudoaleatorio está predeterminada para tener frecuencias en un subconjunto de los canales del algoritmo de transformada de Fourier.
- 5 10. Un sistema (10) según cualquier reivindicación precedente, en el que la circuitería de procesamiento de señales (14) está configurada para recibir la señal de voltaje compuesta del elemento sensor (12) en un ancho de banda de 3×10^6 Hz.
- 10 11. Un sistema (10) según cualquier reivindicación precedente, en el que el inyector de corriente (16) incluye un resistor de resistencia relativamente alta (32) protegido por una estructura de resistencia más baja (34) que tiene un factor de forma física similar al resistor de alta resistencia (32).
- 15 12. Un sistema (10) según cualquier reivindicación precedente, que además comprende una fuente de voltaje secundario acoplada eléctricamente a la circuitería de procesamiento de señales (14) y al elemento sensor (12), y dispuesta para aplicar un voltaje secundario en serie con el elemento sensor (12);
- en el que la señal de voltaje compuesta además incluye una señal de voltaje que surge del voltaje secundario;
- 20 en el que la circuitería de procesamiento de señales (14) está además configurada para extraer la señal de voltaje que surge de la fuente de voltaje secundario de la señal de voltaje compuesta recibida; y
- en el que la determinación de la temperatura del elemento sensor (12) se basa adicionalmente en la señal de voltaje secundario extraída.
- 25 13. Un procedimiento de medición de temperatura, que comprende:
- proporcionar un elemento sensor resistivo generador de ruido de Johnson (12) para detectar temperatura;
- 30 inyectar una corriente de calibración en el elemento sensor (12);
- recibir, desde el elemento sensor (12), una señal de voltaje compuesta que surge del ruido de Johnson generado por el elemento sensor (12) y que surge de la corriente de calibración;
- 35 extraer, de la señal de voltaje compuesta recibida, una señal de voltaje de ruido de Johnson que surge del ruido de Johnson generado por el elemento sensor (12);
- 40 extraer, de la señal de voltaje compuesta recibida, una señal de voltaje de calibración que surge de la corriente de calibración;
- determinar la temperatura del elemento sensor (12) en base a la señal de voltaje de ruido de Johnson extraída y a la señal de voltaje de calibración extraída.
- 45 14. Un procedimiento según la reivindicación 13, en el que recibir una señal de voltaje compuesta comprende:
- dividir la señal de voltaje compuesta en una pluralidad de rutas;
- 50 amplificar cada ruta; y
- procesar las rutas amplificadas usando técnicas de correlación para extraer una señal de voltaje compuesta amplificada.
- 55 15. Un procedimiento según la reivindicación 13 o 14, que además comprende:
- aplicar un voltaje secundario en serie con el elemento sensor (12), en el que la señal de voltaje compuesta además incluye una señal de voltaje que surge del voltaje secundario; y
- 60 extraer, de la señal de voltaje compuesta recibida, una señal de voltaje secundario que surge del voltaje secundario aplicado;
- en el que la determinación de la temperatura del elemento sensor (12) se basa además en la señal de voltaje secundario extraída.

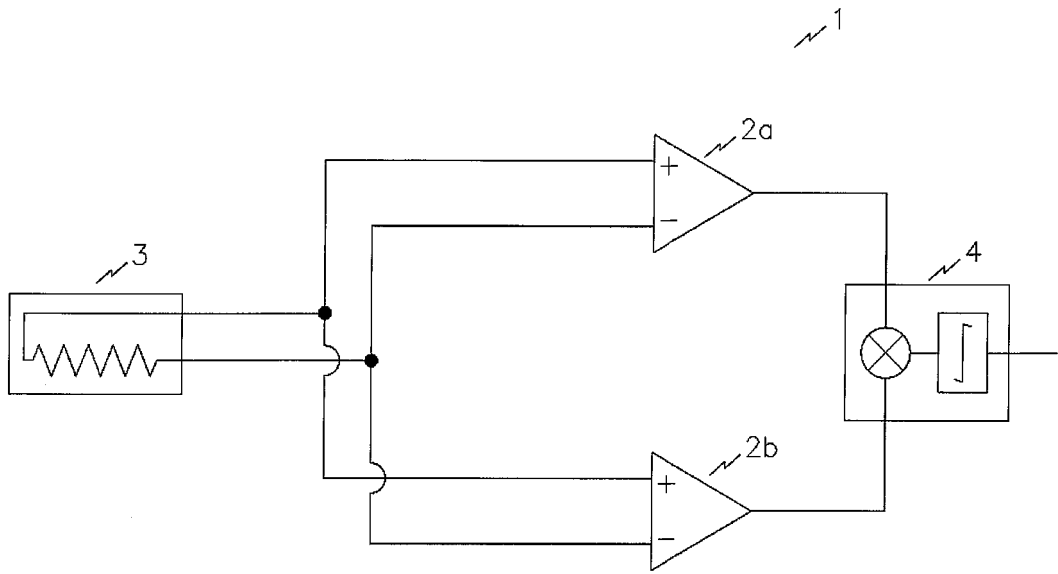


Fig 1

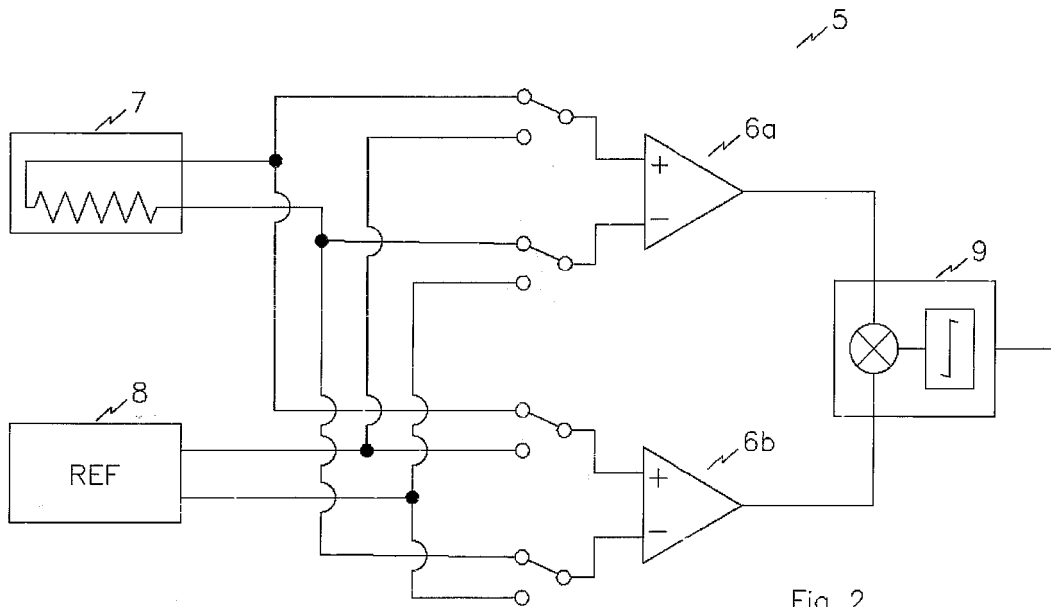


Fig 2

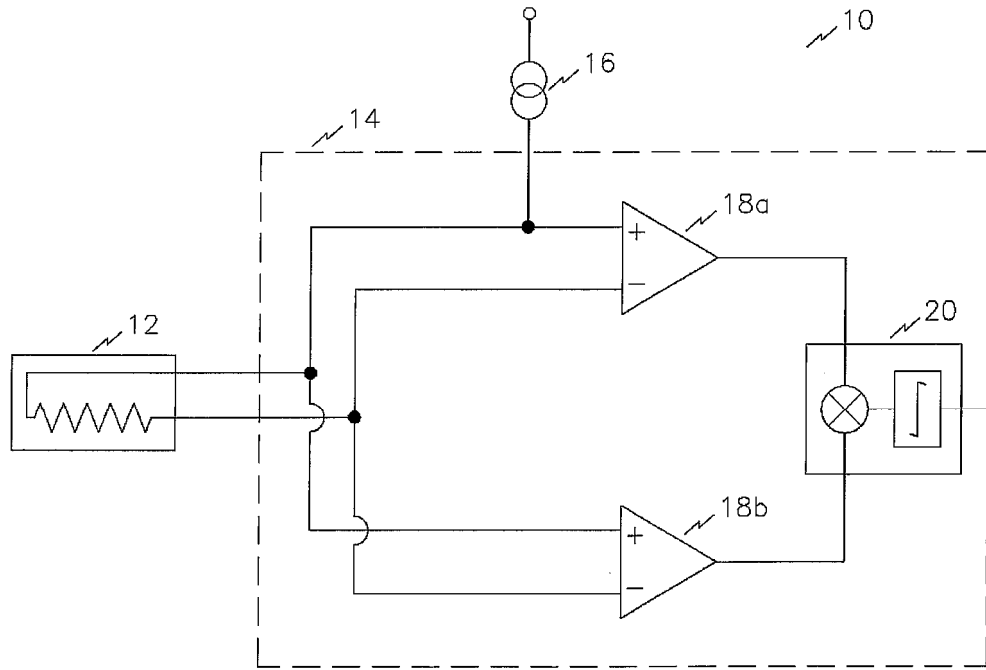


Fig 3

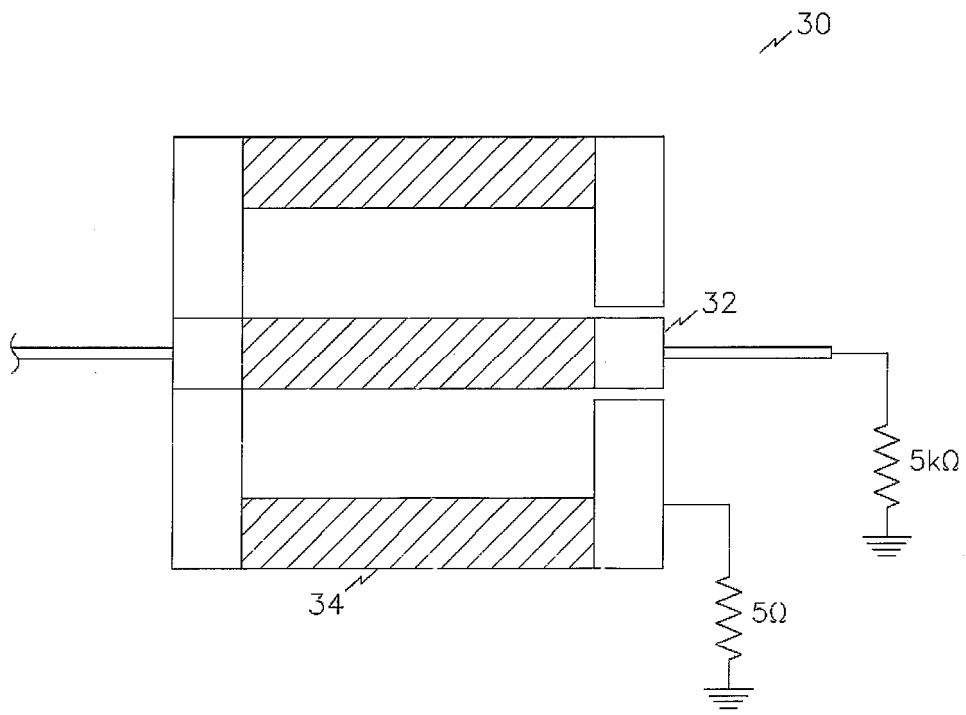


Fig 4

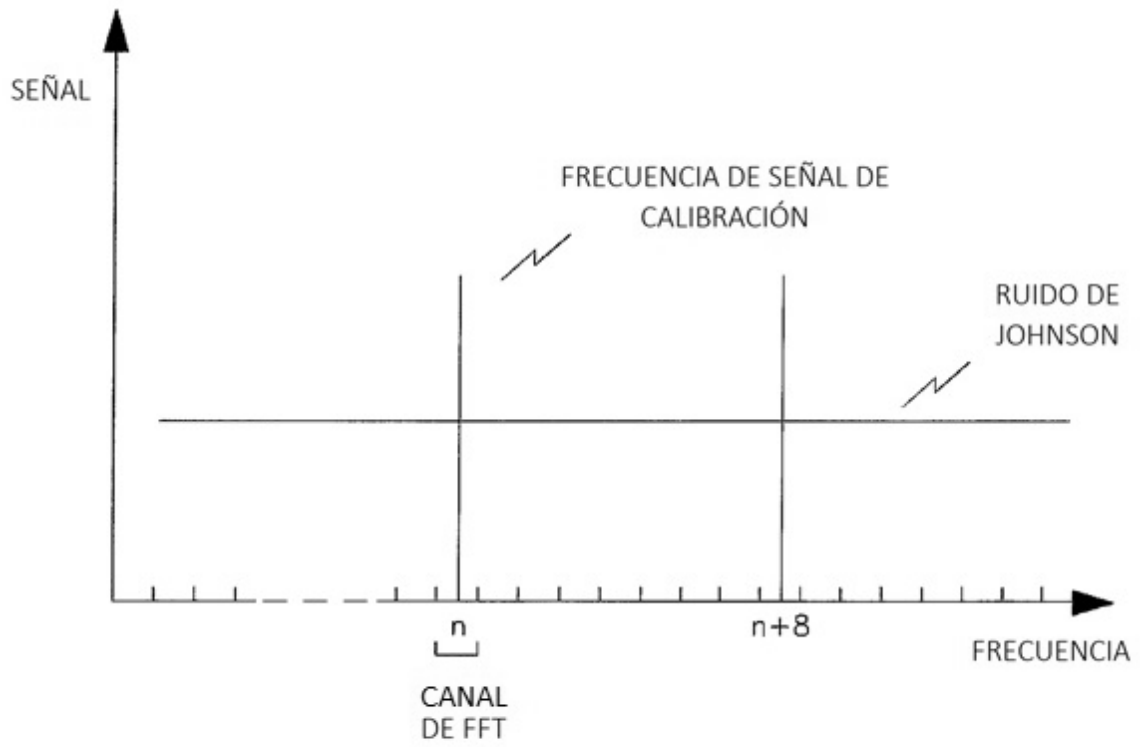


Fig 5