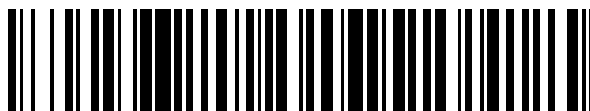


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 642 120**

51 Int. Cl.:

**G01K 15/00** (2006.01)

**G05D 23/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.03.2015 E 15161989 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.08.2017 EP 2947439**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para regular la temperatura del volumen de calibración de un dispositivo para la calibración comparativa de sensores de temperatura**

30 Prioridad:

**23.05.2014 DE 102014007786**

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

**15.11.2017**

73 Titular/es:

**SIKA DR.SIEBERT & KÜHN GMBH & CO. KG.  
(100.0%)  
Struthweg 7-9  
34260 Kaufungen, DE**

72 Inventor/es:

**FRIEDRICHS, RENÉ**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 642 120 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 dispositivo para regular la temperatura del volumen de calibración de un dispositivo para la calibración comparativa de sensores de temperatura

5 La invención se refiere a un procedimiento para regular la temperatura del volumen de calibración de un dispositivo para la calibración comparativa de sensores de temperatura a una temperatura nominal, presentando dicho dispositivo de calibración fuentes de calor y/o disipadores térmicos, que a través de una parte de conducción de calor o varias partes de conducción de calor están en contacto térmico con el volumen de calibración, estimándose en al menos una etapa de procedimiento el estado térmico real del calibrador y del entorno utilizando un filtro de Kalman, alimentándose al filtro de Kalman los valores de medición de varios de los sensores de temperatura situados en dicho dispositivo de calibración y calculándose en al menos una etapa de procedimiento adicional un estado térmico futuro utilizando un modelo térmico de la dinámica de estado. El objeto de la invención es también un dispositivo para regular la temperatura de un volumen de calibración de un dispositivo para la calibración comparativa de sensores de temperatura a una temperatura nominal, estando compuesto el dispositivo al menos por una unidad de procesamiento de datos electrónica, que a través de una interfaz puede recibir datos de medición de al menos un sensor de temperatura situado en el dispositivo de calibración.

20 La gran mayoría de los sensores de temperatura utilizados en la industria y la investigación son termómetros secundarios. Es decir, los sensores correspondientes, como por ejemplo termómetros de resistencia o termoelementos, tienen que calibrarse al menos antes de su primer uso y generalmente también durante su empleo repetidas veces. Para ello, en el procedimiento comparativo se comparan los conmutadores o sensores sensibles a la temperatura que van a calibrarse en baños u hornos de temperatura estable con un termómetro estándar. Se conocen los dispositivos que atemperan un volumen de calibración correspondiente a una temperatura nominal constante predeterminable. Estos denominados calibradores de temperatura pueden realizarse como dispositivos pesados no móviles o, como se describe en el documento US 39 39 687 A, como calibradores portátiles compactos.

30 Para garantizar un acoplamiento térmico óptimo de los objetos de ensayo al volumen de calibración o ensayo, pueden introducirse diferentes manguitos de inserción o receptáculos para objetos de ensayo adaptados a los sensores que van a someterse a ensayo como cuerpos sólidos en el volumen de calibración del calibrador de temperatura. Para la calibración de sensores con geometrías complicadas, el volumen de calibración puede llenarse con medios de calibración líquidos, gaseosos o granulares. Para conseguir una distribución de temperatura espacial lo más constante posible dentro del volumen de calibración, la pieza de inserción o el medio de calibración debería tener una conductividad térmica lo más elevada posible. Para garantizar un perfil de temperatura en el tiempo lo más constante posible, es decir, una alta estabilidad de temperatura, la pieza de inserción o el medio de calibración debería tener una capacidad térmica lo más elevada posible.

40 Como el volumen de calibración debe atemperarse a la temperatura nominal predeterminada por el usuario, a través de un cuerpo térmicamente conductor, que rodea el volumen, puede extraerse o añadirse calor del/al volumen de calibración. Este cuerpo está realizado en el caso de los calibradores no móviles normalmente como cuba y en el caso de los calibradores portátiles normalmente como bloque metálico y está en contacto térmico con disipadores térmicos, como por ejemplo elementos de Peltier que funcionan como elementos de enfriamiento, como se describe en el documento DE 20 2005 006 710 U1, o el aire ambiente más frío, y fuentes de calor, como por ejemplo una calefacción por resistencia o el aire ambiente más caliente.

45 De aquí resulta la cuestión de con qué intensidad o potencia deben hacerse funcionar los elementos de enfriamiento y calentamiento ajustables (magnitudes de control o ajuste) para que la temperatura del volumen de calibración (magnitud de regulación) alcance lo más rápido posible el valor de temperatura deseado (valor nominal) y lo mantenga lo más estable posible también con cambios en el tiempo por ejemplo de la temperatura ambiente (magnitud perturbadora). La presente invención soluciona el problema de la técnica de regulación para el ajuste de las magnitudes de control o ajuste en función de las temperaturas (magnitudes de medición) medidas en el volumen de calibración o en la parte de conducción de calor.

55 Un enfoque conocido para la regulación de sistemas de calentamiento y enfriamiento es el uso de uno o varios reguladores PID asociados, tal como se describe en el documento DE 2 023 130 B. Un inconveniente general en el uso de reguladores PID es que al menos para alcanzar un rendimiento de regulación óptimo, es decir, una alta estabilidad de la temperatura del volumen de calibración, es necesario un ajuste muy fino o una determinación complicada de los parámetros de regulación. En el caso de la regulación de un calibrador de temperatura se añade como agravante que los parámetros de regulación óptimos dependen de las condiciones ambiente, como por ejemplo la temperatura ambiente, la humedad del aire o la tensión de red. La dificultad principal en la regulación de los calibradores de temperatura es sin embargo la gran inercia del sistema de regulación, que se extiende desde las fuentes de calor o los disipadores térmicos por la parte de conducción de calor hasta el volumen de calibración. Así, debido a las altas capacidades térmicas de la parte de conducción de calor, que puede estar realizada como bloque metálico, y del volumen de calibración, que puede estar realizado como manguito de inserción metálico, ya con variaciones relativamente lentas de la potencia de calentamiento con una frecuencia de menos de 0,1 Hz puede observarse un retardo de fase de la temperatura del volumen de calibración con respecto a la potencia de

calentamiento de casi  $3\pi$ . Por consiguiente no es posible una regulación estable, que reaccione a cambios de las condiciones ambiente en aproximadamente 10 segundos, por medio de uno o varios reguladores PID o sólo es posible tras una determinación compleja de parámetros de regulación adecuados. Esto tiene como consecuencia que la estabilidad de temperatura en el tiempo que puede alcanzarse con los calibradores de temperatura disponibles actualmente en el mercado para temperaturas nominales por encima de  $500^{\circ}\text{C}$  asciende a aproximadamente  $\pm 30$  mK y así es casi un orden de magnitud peor que la estabilidad necesaria para calibraciones de temperatura de alta precisión de  $\pm 5$  mK.

Una posibilidad para alcanzar tanto una homogeneidad de temperatura elevada como una estabilidad de temperatura en el tiempo es la integración descrita en el documento WO 2013/113683 A2 de una o varias células de punto fijo en el bloque de un calibrador de temperatura. La solución tiene el inconveniente de que la constancia de la temperatura de la célula de punto fijo durante el periodo de la transformación de fase sólo se da para la temperatura de transición de fase de la célula de punto fijo utilizada. Al mismo tiempo las células de punto fijo son caras, de modo que un dispositivo para la calibración en diferentes puntos de temperatura estabilizados en cada caso mediante células de punto fijo correspondientes iría asociado a costes muy elevados.

El procedimiento de calibración dinámico descrito en el documento KR 100991021 B1 trabaja sin una regulación de temperatura compleja. En su lugar se aumenta o reduce a propósito a modo de rampa la temperatura en el volumen de calibración cerca de la temperatura de calibración que va a observarse y se compensa el desfase de temperatura resultante entre el termómetro estándar y los objetos de ensayo a través de una compensación de desfase de tiempo. En esta calibración resulta desventajoso que la incertidumbre de medición adicional resultante de la compensación en la calibración se sitúa en el orden de magnitud de  $\pm 20$  a  $\pm 40$  mK y así es claramente superior a los  $\pm 5$  mK buscados. Otro inconveniente del procedimiento de calibración dinámico radica en que la calibración no se realiza en un punto de temperatura, sino en un intervalo de temperatura cuya extensión no puede ignorarse y cuya situación con respecto al punto de calibración observado no está definida.

Sin embargo, para regular la temperatura de manera especialmente estable y precisa, es muy necesario conocer la distribución de la temperatura o del estado térmico preciso de todo el bloque de calibración. En el documento WO2011/100736 A2 se describe cómo utilizando un filtro de Kalman y varios puntos de medición de temperatura puede estimarse en una sala en un edificio el estado térmico de esta sala. A este respecto, la incertidumbre de la estimación descrita de la temperatura de la sala está determinada por las incertidumbres de medición de los sensores de temperatura utilizados, por un lado, y por el modelo térmico descrito, por el otro. La incertidumbre de estimación que puede alcanzarse del procedimiento aquí descrito es grande para poder calcular con precisión la distribución de temperatura en el bloque de calibración de un calibrador de temperatura en una medida suficiente.

Para poder determinar la temperatura de un bloque de calibración con especial precisión, en el documento DE 20317566 U1 se propone utilizar como sensor de referencia en el volumen de calibración un patrón de trabajo según DKD. En esta solución resulta desventajoso que así sólo puede determinarse con precisión la temperatura del volumen de calibración en la posición del patrón de trabajo. Esta temperatura, debido a perturbaciones externas, debido a variaciones laterales de las potencias de calentamiento introducidas puede diferir claramente de las temperaturas en otras posiciones en el bloque de calibración. Según la invención, para regular la temperatura del volumen de calibración a una temperatura nominal se emplea un procedimiento de regulación basado en modelo con las características de la reivindicación 1. La invención se refiere también a un dispositivo según la reivindicación 5 para regular la temperatura de un volumen de calibración.

A este respecto, el modelo de la dinámica del sistema de regulación necesario para la regulación contiene preferiblemente magnitudes de control y ajuste, como por ejemplo la intensidad o potencia de los elementos de enfriamiento y calentamiento ajustables, magnitudes perturbadoras, como por ejemplo la temperatura ambiente o variaciones de la tensión de red, y magnitudes de regulación, como por ejemplo temperaturas dentro del volumen de calibración o sus cambios en el tiempo. El modelo puede implementarse como regla de cálculo en una unidad de procesamiento de datos electrónica, por ejemplo en un microcontrolador, dentro o fuera del calibrador. Con el modelo formado de este modo pueden calcularse valores futuros de las magnitudes de regulación en función de posibles valores de las magnitudes perturbadoras, de control y ajuste.

El modelo puede estar presente por ejemplo en forma de una o varias funciones de transferencia. A este respecto resulta ventajoso que las funciones de transferencia correspondientes pueden medirse fácilmente porque en las posiciones relevantes en el calibrador de temperatura ya están integrados puntos de medición de temperatura o aquí se encuentran soportes de sensor correspondientes.

Alternativamente el modelo también puede estar presente en la representación de espacio de estados. Las ecuaciones de modelo correspondientes pueden obtenerse entonces por ejemplo a partir de la ecuación del calor conocida. Como una solución de la ecuación del calor para la geometría de un calibrador de temperatura real, por regla general, sólo puede producirse de manera numérica y es muy compleja, resulta ventajoso derivar a partir de la ecuación del calor sólo la estructura de las ecuaciones de modelo y determinar los parámetros libres del modelo por medio de una medición de las funciones de transferencia.

En el caso de un modelado continuo en el tiempo de la dinámica de estado, el modelo se formula preferiblemente como sistema lineal de ecuaciones diferenciales,

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t)$$

5 designando  $\bar{x}(t)$  el vector del estado térmico del calibrador y del entorno y  $\bar{u}(t)$  el vector de las magnitudes de control y ajuste. Los elementos del vector de estado se forman preferiblemente por temperaturas en posiciones en el volumen de calibración, temperaturas en posiciones en la parte de conducción de calor del calibrador, temperaturas en el entorno o dentro de la carcasa del calibrador y diferencias sistemáticas en los indicadores de temperatura de  
10 sensores de temperatura. Además, el vector de estado también puede comprender flujos térmicos o cambios en el tiempo de temperaturas. Los elementos del vector de las magnitudes de control y ajuste se forman preferiblemente por los niveles de activación o las potencias de los elementos de calentamiento y enfriamiento. Los valores de las matrices  $A$  y  $B$  pueden determinarse por ejemplo mediante la medición de las funciones de transferencia correspondientes.

15 En el caso de un modelado discreto en el tiempo de la dinámica de estado para los instantes

$$t_n = t_{n-1} + \theta$$

20 con un incremento de tiempo  $\theta$  adecuado, el modelo se formula preferiblemente como ecuación en diferencias lineal

$$\bar{x}_n = F \cdot \bar{x}_{n-1} + G \cdot \bar{u}_{n-1}$$

25 para los estados  $\bar{x}_n = \bar{x}(t_n)$ . A este respecto, se calculan los coeficientes de las matrices  $F$  y  $G$  por medio de integración numérica o analítica de dicho sistema de ecuaciones diferenciales preferiblemente antes de una implementación de la regla de cálculo y a continuación se implementan en un microcontrolador u otra unidad de procesamiento de datos electrónica compacta. La regla de cálculo resultante en forma de ecuación en diferencias lineal con matrices constantes en el tiempo o matrices con coeficientes constantes en el tiempo puede realizarse así muy rápidamente, de modo que el modelo también puede utilizarse para una regulación rápida del calibrador de  
30 temperatura con incrementos de tiempo inferiores a 100 ms.

35 En una realización preferida, los coeficientes de las matrices  $F(T)$  y  $G(T)$  se calculan en función de la temperatura del volumen de calibración y durante la regulación del volumen de calibración a una temperatura nominal  $T_{Nominal}$  para el modelado de la dinámica de estado se utilizan las matrices con coeficientes constantes en el tiempo  $F(T_{Nominal})$  y  $G(T_{Nominal})$ . De este modo se tiene en cuenta en una medida suficiente la no linealidad de la dinámica de estado basada en las dependencias de temperatura de conductividades térmicas y capacidades térmicas sin aumentar la complejidad del modelo, porque la regla de cálculo correspondiente sigue siendo una ecuación en diferencias lineal con coeficientes constantes en el tiempo.

40 La formulación del modelo como ecuación en diferencias lineal para los estados  $\bar{x}_n = \bar{x}(t_n)$  tiene la ventaja adicional de que es idéntica a la ecuación de predicción del filtro de Kalman discreto que preferiblemente se utiliza para la estimación de los estados  $\bar{x}_n = \bar{x}(t_n)$ . En este sentido, el resultado del cálculo del filtro de Kalman se denomina estimación, porque no sólo contiene los valores verdaderos para el estado sino también su incertidumbre de estimación correspondiente. Las incertidumbres de estimación calculadas, en el caso de los sensores de  
45 temperatura utilizados para una calibración de temperatura, se encuentran normalmente en el intervalo de sólo unos pocos milikelvin, de modo que en el campo de aplicación de la invención el resultado de estimación del filtro de Kalman tiene una precisión suficiente para regular la temperatura del volumen de calibración. La determinación indirecta de una temperatura en una posición por ejemplo sólo difícilmente accesible en un horno mediante la medición de una temperatura en otra posición más fácilmente accesible mediante el uso de un filtro de Kalman es un procedimiento conocido y se describió por Mouzinho *et al.* [L. F. Mouzinho, J. V. Fonseca Neto, B. A. Luciano y R. C. S. Freire, "INDIRECT MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE VIA KALMAN FILTER", XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development, 17 - 22 de septiembre de 2006, Rio de Janeiro, Brasil].

55 Se ha encontrado que para alcanzar una alta calidad de regulación el vector de estado tiene que contener una pluralidad de temperaturas en hasta 20 posiciones diferentes en la parte de conducción de calor del calibrador, que por ejemplo se forma por el bloque metálico de un calibrador de bloque seco portátil. Una medición de la temperatura en muchas posiciones es técnicamente posible aunque tiene unos costes correspondientes. Por este motivo, preferiblemente sólo se miden temperaturas en uno o dos puntos en la parte de conducción de calor por medio de un sensor de referencia interno integrado o dos y a partir de aquí, por medio del filtro de Kalman, se  
60 calculan las demás temperaturas contenidas en el vector de estado. Adicionalmente puede mejorarse la estimación del estado de temperatura mediante el uso de los valores de medición de temperatura de los sensores de

temperatura situados en el volumen de calibración. Para ello, además de los valores de medición de los sensores de referencia internos, preferiblemente también se alimentan al filtro de Kalman los valores de medición de uno o varios sensores de referencia externos.

5 Además se ha encontrado que una aplicación del filtro de Kalman descrito por Mouzinho *et al.* para la estimación de las temperaturas en posiciones en la parte de conducción de calor y en el volumen de calibración llevan a errores, que pueden situarse en el orden de magnitud de algunos 10 mK. Este tipo de desviaciones pueden ignorarse para las mediciones de temperatura indirectas habituales en el entorno industrial, sin embargo, no son aceptables para la regulación de dispositivos de calibración para sensores de temperatura de alta precisión. Estas desviaciones se producen una vez que se alimentan al filtro de Kalman valores de medición de más de un sensor de temperatura y se deben al hecho de que dos sensores debido a la incertidumbre de medición en su calibración presentan desviaciones sistemáticas pequeñas aunque finitas y en particular diferentes en los valores de medición indicados. Para la regulación de un calibrador de temperatura no pueden ignorarse estas desviaciones incluso con el uso de sensores de referencia trazables de alta precisión.

15 Según la invención estas desviaciones se tienen en cuenta en la estimación de estado por medio del filtro de Kalman porque se selecciona un sensor de temperatura en el calibrador y se añaden al vector de estado las desviaciones sistemáticas de los indicadores de temperatura de los demás sensores con respecto a este sensor de referencia como diferencias de temperatura constantes en el tiempo que van a estimarse. Esto tiene como consecuencia que los valores de temperatura estimados mediante el filtro de Kalman en el volumen de calibración y en la parte de conducción de calor todavía presentan un error sistemático con respecto a la escala internacional de temperatura, sin embargo, este desfase es el mismo para todos los valores de temperatura o en todas las posiciones. Esta propiedad es de gran importancia para la regulación de temperatura, porque diferentes errores sistemáticos en los valores de temperatura llevarían a predicciones de flujo térmico sistemáticamente erróneas y con ello también a estimaciones de temperatura sistemáticamente erróneas.

20 Preferiblemente se selecciona como sensor de referencia el sensor del que se supone que sus valores de medición presentan la desviación de medición sistemática más pequeña con respecto a la escala internacional de temperatura, de modo que todos los valores de temperatura calculados por el filtro de Kalman presenten este error sistemático.

35 En una realización para la calibración rápida de sensores de temperatura, también los valores de medición de temperatura de los objetos de ensayo se alimentan al filtro de Kalman y se añaden al vector de estado las desviaciones sistemáticas respectivas de los valores de medición con respecto al sensor de referencia como desfases de temperatura que van a estimarse. La desviación sistemática de los valores de medición del objeto de ensayo con respecto a los valores de medición del patrón de referencia es precisamente el desfase de temperatura que se determinará mediante la operación de calibración. Este desfase de temperatura de interés se determina habitualmente de manera compleja mediante comparación de las curvas de medición de temperatura del objeto de ensayo y del patrón de referencia por un periodo de normalmente 30 minutos tras alcanzar un nivel de temperatura estable en el entorno de la temperatura nominal. Según la configuración de la invención según la reivindicación 7, el desfase de temperatura calculado por el filtro de Kalman está disponible en todo momento como elemento del vector de estado durante la operación de calibración y puede leerse o mostrarse directamente. El valor mostrado para el desfase de temperatura entre objeto de ensayo y patrón de referencia normalmente ya unos pocos minutos tras alcanzar la temperatura nominal es lo suficientemente estable y entonces corresponde al desfase del indicador de temperatura del objeto de ensayo con respecto al patrón de referencia, que se obtiene cuando se comparan las curvas de medición de temperatura por un periodo prolongado.

45 Conociendo el estado del calibrador y del entorno estimado por medio del filtro de Kalman, con el modelo de la dinámica de estado puede calcularse cómo tendrán que ajustarse las magnitudes de control y ajuste en el futuro para que el comportamiento futuro de las magnitudes de regulación se aproxime lo más posible al comportamiento buscado de las magnitudes de regulación. Este ajuste óptimo de las magnitudes de control y ajuste da como resultado entonces un comportamiento óptimo de las magnitudes de regulación.

50 En caso de que, por ejemplo, se pretenda que el volumen de calibración en los siguientes 100 segundos se caliente a una temperatura nominal de exactamente 50°C, por medio de un modelo continuo en el tiempo en forma de dicha ecuación diferencial lineal pueden calcularse las temperaturas T0 y T1000 que se establecen cuando la potencia de calentamiento en este tiempo asciende a 0 o 1 kW. La potencia de calentamiento óptima en los 100 segundos observados asciende entonces debido a la linealidad de la ecuación diferencial a  $(50^{\circ}\text{C}-T_0)/(T_{1000}-T_0)*1\text{kW}$ . En este enfoque resulta desventajoso que, en la medida en que pueda ajustarse la potencia correspondiente, se alcanzan los 50°C deseados exactamente después de los 100 segundos, pero tanto antes como después pueden aparecer desviaciones claras con respecto a la temperatura nominal, por ejemplo en forma de excesos.

60 Por tanto, preferiblemente, el comportamiento buscado se especifica como desviación cuadrática media mínima de las magnitudes de regulación con respecto a los valores nominales por un periodo de longitud  $\tau$  en lugar de en un instante individual. Para solucionar el problema de optimización cuadrático resultante de manera rápida y con un resultado de optimización suficiente, preferiblemente se utiliza un modelo discreto en el tiempo de la dinámica de

estado en forma de ecuación en diferencias lineal para calcular las magnitudes de regulación resultantes y se reduce la cantidad de los valores considerados como ajustables en cada caso para las magnitudes de control y ajuste a un número finito pequeño superior a 1. De este modo, la cantidad de las secuencias de magnitudes de control y ajuste en el tiempo que van a observarse en la optimización y la cantidad de las desviaciones de regulación cuadráticas medias resultantes en cada caso y que van a calcularse por medio del modelo se vuelve finita.

Se ha encontrado que para evitar excesos en el comportamiento de temperatura del volumen de calibración, el horizonte de tiempo  $\tau$ , durante el cual se observa el desarrollo de las magnitudes de regulación, es preferiblemente más largo de 10 segundos.

Con un horizonte de tiempo de sólo 15 segundos y sólo una magnitud de control, que exclusivamente puede tomar los valores 0 o 1 y cuyo ajuste sólo puede cambiarse cada 0,5 segundos, se obtienen  $2^{30}$  y con ello más de mil millones de posibles secuencias temporales de la magnitud de control dentro de este horizonte de tiempo. Por tanto, preferiblemente se reduce adicionalmente el número de las desviaciones medias que van a calcularse de las magnitudes de regulación con respecto a los valores nominales, considerando en la optimización no todos los posibles transcurso de tiempo de las magnitudes de control, sino sólo una subcantidad seleccionada de manera adecuada. El ajuste pseudoóptimo de las magnitudes de control resultante es la secuencia temporal de las magnitudes de control cuya desviación de regulación cuadrática media resultante no es superior a cualquier desviación de regulación cuadrática media, resultante de otro de los ajustes de la subcantidad considerada.

Preferiblemente se selecciona como subcantidad la cantidad de ajustes que se desvían poco con respecto a la secuencia temporal óptima o pseudoóptima, que se han calculado en una etapa de optimización previa.

La regulación de la temperatura del volumen de calibración basada en modelo comprende preferiblemente las cuatro etapas siguientes, que se realizan de manera repetida periódicamente en el orden indicado, siendo la duración del periodo correspondiente preferiblemente inferior a un segundo. En la primera etapa se realiza una medición de una cantidad parcial de las magnitudes de estado térmicas actuales. En la segunda etapa se estima la totalidad de las magnitudes de estado actuales basándose en los valores medidos en la primera etapa, una estimación previa de la totalidad de las magnitudes de estado y de los valores previos de las magnitudes de control y ajuste, preferiblemente por medio de un filtro de Kalman discreto. En la tercera etapa se calculan los valores óptimos o pseudoóptimos de las magnitudes de control y ajuste, para los cuales el comportamiento futuro de las magnitudes de regulación se acerca lo más posible o de manera suficiente al comportamiento buscado de las magnitudes de regulación, preferiblemente por medio de un modelo térmico discreto en el tiempo para la dinámica de estado. En la cuarta etapa se lleva a cabo un ajuste de los valores óptimos de las magnitudes de control y ajuste para el instante actual.

Resulta especialmente ventajoso en la regulación basada en modelo según la invención que con ello, para temperaturas nominales por encima de  $500^{\circ}\text{C}$ , pueden alcanzarse estabilidades de temperatura en el tiempo que con aproximadamente  $\pm 3$  mK son mejores en un orden de magnitud que las estabilidades alcanzadas hasta ahora para este intervalo de temperatura. De este modo también en el intervalo de altas temperaturas de hasta  $700^{\circ}\text{C}$  pueden realizarse calibraciones de temperatura de alta precisión.

Una ventaja adicional de la regulación previsiva de la temperatura del volumen de calibración basada en modelo radica en que se evitan excesos en la magnitud de regulación mediante el cálculo de las desviaciones de regulación en varios instantes futuros. De este modo se alcanza más rápidamente la estabilidad en el tiempo de la temperatura del volumen de calibración.

A partir de la siguiente descripción de un ejemplo de realización en relación con los dibujos se deducen ventajas, características y detalles adicionales. Muestran:

la figura 1 muestra un modelo térmico de un calibrador de bloque metálico portátil con una parte de conducción de calor metálica (2) y el volumen de calibración (3), encontrándose en el primero de los nueve elementos del modelo (11, 12, ..., 19) una fuente de calor (1), en el quinto elemento del modelo un sensor de referencia interno (6), y en el noveno elemento del modelo un sensor de referencia externo (7);

la figura 2 muestra el diagrama de Bode con respuesta de amplitud (61) y respuesta de fase (66) de la función de transferencia interna, que resulta de un modelo térmico adaptado a los valores de medición de amplitud (60) y los valores de medición de fase (65);

la figura 3 muestra el diagrama de Bode con respuesta de amplitud (71) y respuesta de fase (76) de la función de transferencia externa, que resulta de un modelo térmico adaptado a los valores de medición de amplitud (70) y los valores de medición de fase (75);

la figura 4 muestra los valores de temperatura (77) medidos por medio del sensor de referencia externo (7), que resultan con una regulación de la temperatura del volumen de calibración (3) de un calibrador de bloque metálico a una temperatura nominal de  $600^{\circ}\text{C}$  utilizando un modelo térmico adaptado.

En la figura 1 se representa un modelo térmico de un calibrador de bloque metálico portátil, basándose en el cual a continuación se realizará una regulación de la temperatura del volumen de calibración (3) del calibrador de bloque metálico a una temperatura nominal. En el volumen de calibración (3) pueden colocarse diferentes manguitos de inserción metálicos adaptados a los sensores de temperatura que van a someterse a ensayo con perforaciones de alojamiento (4) para los objetos de ensayo. La temperatura del volumen de calibración (3) se mide por medio de un sensor de referencia externo (7). Como única información sobre la distribución de temperatura en la parte de conducción de calor (2) realizada como bloque metálico está disponible el indicador del sensor de referencia interno (6). Para regular la temperatura del volumen de calibración (3) al valor nominal deseado, las fuentes de calor (1) realizadas como elementos de calentamiento pueden activarse o desactivarse con una electrónica de control. Los lados externos de la parte de conducción de calor (2) realizan la función de un disipador térmico (5). Para el modelado de la dinámica de los estados térmicos se subdivide la sección transversal del calibrador de bloque metálico de manera imaginaria en elementos triangulares del mismo tamaño y se representa la distribución de temperatura en la parte de conducción de calor (2) y en el volumen de calibración (3) mediante las temperaturas de los elementos individuales de la red térmica. Debido a la simetría de la disposición de las fuentes de calor (1) realizadas como elementos de calentamiento es suficiente modelar sólo el área de tres lados representada como red térmica con los nueve elementos (11, 12, ..., 19), cuando se tiene en cuenta a continuación que puede fluir energía térmica de la red sólo al disipador térmico (5). Se alimenta calor a la red térmica con los nueve elementos (11, 12, ..., 19) sólo a través de la fuente de calor (1) en el primer elemento (11).

El cambio en el tiempo de la temperatura en un elemento se da entonces mediante la ecuación

$$m_i k \frac{dT_i}{dt} = Q_i$$

A este respecto,  $m_i$  es la masa del elemento,  $k$  la capacidad térmica específica del metal utilizado y  $Q_i$  el flujo térmico al elemento. Éste resulta de las diferencias de temperatura con respecto a los elementos adyacentes y los coeficientes de transferencia de calor correspondientes  $\alpha_{ij}$  y las superficies de contacto  $L_{ij}$  según la ecuación

$$Q_i = \alpha_{ij} L_{ij} (T_j - T_i) + \alpha_{ii} L_{ii} (T_i - T_i) + \alpha_{in} L_{in} (T_n - T_i)$$

Para el vector de estado  $\bar{T}(t)$  de las nueve temperaturas en relación con la temperatura ambiente se obtiene así un sistema lineal de ecuaciones diferenciales

$$\frac{d\bar{T}(t)}{dt} = A\bar{T}(t) + Bu(t)$$

con la magnitud de control  $u(t)$  y la matriz  $B$ , que contiene el parámetro libre  $p$  en la forma

$$[p \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]'$$

porque sólo se suministra energía térmica al primer elemento (11). Se supone que los coeficientes de la transferencia de calor entre todos los elementos de la parte de conducción de calor (2) realizada como bloque metálico o todos los elementos del volumen de calibración (3) ocupado con el manguito de inserción metálico son iguales entre sí. Sin embargo, pueden diferenciarse tanto del coeficiente de la transferencia de calor de elementos en la parte de conducción de calor (2) al disipador térmico (5) como del coeficiente de la transferencia de calor de elementos en la parte de conducción de calor (2) a elementos en el volumen de calibración (3). Si además debido a la incertidumbre geométrica del modelo se permite que la masa de un elemento en el volumen de calibración (3) sea mayor por el factor  $d$  que la masa de un elemento en la parte de conducción de calor (2) del calibrador de bloque metálico, se obtiene para la matriz  $A$  la estructura

$$\begin{pmatrix} -a-b & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & -a-b-b\sqrt{2} & b\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b\sqrt{2} & b(2-\sqrt{2}) & b & 0 & b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & -2b & b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b & -2b-c & b & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 & b & b(2-\sqrt{2}) & b\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b\sqrt{2} & -a-b\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{d} & 0 & 0 & \frac{-c-b}{d} & \frac{b}{d} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{b}{d} & \frac{-b}{d} \end{pmatrix}$$

con los cuatro parámetros libres a, b, c y d.

Para determinar los en total 5 parámetros libres p, a, b, c, y d del modelo térmico, se miden los valores de amplitud (60) y los valores de fase (65) tanto de la función de transferencia interna, es decir, de la transferencia de la fuente de calor (1) a la temperatura del sensor de referencia interno (6), como los valores de amplitud (70) y los valores de fase (75) de la función de transferencia externa, es decir, de la transferencia del sensor de referencia interno (6) a la temperatura del sensor de referencia externo (7), para frecuencias seleccionadas. A continuación se calculan las funciones de transferencia resultantes del sistema lineal de ecuaciones diferenciales para diferentes valores de los parámetros libres del modelo y se comparan con los datos de medición. Con una temperatura del volumen de calibración de 600°C se obtiene para p=0,11 K/s, a=0,0044 1/s, b=0,11 1/s, c=0,071 1/s y d=2,1 tanto para el diagrama de Bode representado en la figura 2 de la función de transferencia interna con respuesta de amplitud (61) y respuesta de fase (66) como para el diagrama de Bode representado en la figura 3 de la función de transferencia externa con respuesta de amplitud (71) y respuesta de fase (76) una buena coincidencia con los valores medidos.

Para reformular de manera adecuada el modelo térmico presente así como sistema lineal de ecuaciones diferenciales con coeficientes constantes conocidas o matrices A y B constantes conocidas para su uso en un filtro de Kalman discreto, en este ejemplo de realización se selecciona un incremento de tiempo  $\theta$  de 100 ms para el modelado discreto en el tiempo. Por la respuesta de amplitud (61) representada en la figura 2 en el diagrama de Bode de la función de transferencia interna puede concluirse que debido a la gran inercia térmica de la parte de conducción de calor (2) con una regulación de encendido/apagado de las fuentes de calor (1), con una frecuencia de reloj correspondiente  $1/\theta$  de 10 Hz, puede alcanzarse una resolución de la regulación de la temperatura en la proximidad inmediata del sensor de referencia interno claramente mejor de 1  $\mu$ K.

En el ejemplo de realización considerado, para la estimación de los estados térmicos se alimentan al filtro de Kalman discreto los valores de medición de temperatura tanto del sensor de referencia interno (6) como del sensor de referencia externo (7) con una frecuencia de actualización también de 10 Hz. A este respecto, el ruido de señal  $2\sigma$  de ambos sensores de referencia asciende aproximadamente 4 mK.

La serie de estados térmicos que van a estimarse

$$x_n = \begin{pmatrix} \bar{T}(t_n) \\ T_U(t_n) \\ T_{Desfase} \end{pmatrix}$$

comprende además de las temperaturas  $\bar{T}(t_n)$  de los nueve elementos de la red térmica en los instantes  $t_n = t_{n-1} + 100$  ms también la temperatura ambiente dependiente del tiempo  $T_U(t_n)$  y el desfase  $T_{desfase}$  sistemático dependiente del tiempo entre los valores de medición de temperatura del sensor de referencia interno (6) y del sensor de referencia externo (7). De este modo se obtiene para los estados la ecuación en diferencias lineal estocástica

$$x_n = F \cdot x_{n-1} + G \cdot u_{n-1} + w_{n-1} ,$$

obteniéndose las matrices F o G con coeficientes constantes en el tiempo mediante la integración del sistema lineal de ecuaciones diferenciales con las matrices A y B constantes en el tiempo ya determinadas por un periodo de  $\theta = 100$  ms con  $u(t) = 0$  (fuentes de calor encendidas) o  $u(t)=1$  (fuentes de calor apagadas). Las variables aleatorias  $w_n$  representan el ruido de sistema y se supone que se distribuyen normalmente con el valor medio cero y la matriz de covarianza Q. Los indicadores de temperatura de las dos referencias  $\Theta_{in}(t_n)$  y  $\Theta_{Ex}(t_n)$  se obtienen a partir de la ecuación de medición

$$z_n = \begin{pmatrix} \Theta_{in}(t_n) \\ \Theta_{Ex}(t_n) \end{pmatrix} = H \cdot x_n + v_n$$

con la matriz de medición

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} .$$

Las variables aleatorias  $v_n$  representan el ruido de medición y se supone que se distribuyen normalmente con el valor medio cero y la matriz de covarianza R.



El componente central y la ventaja decisiva del filtro de Kalman discreto utilizado en este ejemplo de realización es que además de la estimación de un estado  $\hat{x}_n$  también se calcula siempre la incertidumbre de esta estimación en forma de matriz de covarianza de error de estimación  $P_n$ . En la etapa de predicción para el instante  $t_n$  se determinan tanto el estimador para el estado como la matriz de covarianza correspondiente inicialmente sólo utilizando los resultados de estimación para el instante  $t_{n-1}$  según la primera ecuación de modelo presente como ecuación en diferencias lineal con coeficientes constantes en el tiempo

$$\hat{x}_n^- = F \cdot \hat{x}_{n-1} + G \cdot u_{n-1}$$

10 y la segunda ecuación de modelo del filtro de Kalman

$$P_n^- = F \cdot P_{n-1} \cdot F' + Q$$

15 En la siguiente etapa parcial del filtro de Kalman se corrige esta predicción teniendo en cuenta las temperaturas  $(\Theta_{In}, \Theta_{Ex})' = z_n$  medidas en el instante  $t_n$  según las ecuaciones de corrección

$$\hat{x}_n = \hat{x}_n^- + K_n(z_n - H\hat{x}_n^-)$$

20 y

$$P_n = (I - K_n \cdot H) \cdot P_n^-$$

A este respecto, se da la denominada ganancia de Kalman mediante

$$25 \quad K_n = P_n^- \cdot H' \cdot (H \cdot P_n^- \cdot H' + R)^{-1}$$

Tras la estimación del estado térmico actual  $x_n$  en la etapa de procedimiento previa, utilizando de nuevo la primera ecuación de modelo del filtro de Kalman, que está presente como ecuación en diferencias lineal con coeficientes constantes en el tiempo, para cada secuencia de bits  $(u_n, u_{n+1}, \dots, u_{n+N})$  de valores futuros (0/1) de la magnitud de control  $u(t)$  por el horizonte de tiempo  $\tau = 30$  s puede estimarse la secuencia temporal  $(\hat{T}_{Ex}(t_{n+1}), \hat{T}_{Ex}(t_{n+2}), \dots, \hat{T}_{Ex}(t_{n+N+1}))$  de los indicadores de temperatura de la referencia externa (7) que resultaría a partir del perfil de potencia de calentamiento correspondiente de las fuentes de calor. Para alcanzar una regulación rápida y al mismo tiempo estable ahora se ajusta la secuencia de bits de la que resulta una secuencia temporal con la que dentro del horizonte de tiempo  $\tau$  la desviación cuadrática media de la temperatura de la referencia externa con respecto a la temperatura nominal se vuelve lo más pequeña posible.

Para obtener dentro del incremento de tiempo  $\theta$  seleccionado de 100 ms un resultado suficiente de la optimización cuadrática en forma de secuencia de bits pseudoóptima, se aprovecha la secuencia de bits, calculada en el periodo de regulación previo como pseudoóptima, como secuencia de inicio de la optimización y mediante la inversión aleatoria de bits individuales de esta secuencia de inicio se generan secuencias de bits adicionales, de modo que se obtiene una subcantidad adecuada de todos los ajustes posibles de la magnitud de control, en la que entonces se realiza la predicción de la dinámica de estado y la optimización cuadrática.

El modelo térmico discreto en el tiempo derivado para el calibrador de bloque metálico considerado en el ejemplo de realización en forma de ecuación en diferencias lineal con coeficientes constantes en el tiempo se utiliza de este modo tanto en la etapa de procedimiento para la estimación del estado térmico como en la etapa de procedimiento para la determinación del ajuste (pseudo)óptimo de la magnitud de control. Esta realización a modo de ejemplo del procedimiento de regulación basado en modelo dio lugar para una regulación del volumen de calibración (3) del calibrador de bloque metálico modelado en el ejemplo de realización a una temperatura nominal de 600°C el comportamiento de regulación muy estable representado en la figura 4 con una desviación estándar doble de los valores de temperatura (77) indicados del sensor de referencia externo de  $2\sigma \leq 3$  mK.

Lista de números de referencia:

- 55 1 fuente de calor
- 2 parte de conducción de calor
- 3 volumen de calibración
- 4 perforación de alojamiento para objeto de ensayo
- 5 disipador térmico
- 60 6 sensor de referencia interno
- 7 sensor de referencia externo
- 11 1<sup>er</sup> elemento del modelo

## ES 2 642 120 T3

	12	2º elemento del modelo
	13	3 <sup>er</sup> elemento del modelo
	14	4º elemento del modelo
	15	5º elemento del modelo
5	16	6º elemento del modelo
	17	7º elemento del modelo
	18	8º elemento del modelo
	19	9º elemento del modelo
	60	valores de medición de amplitud para la función de transferencia interna
10	61	respuesta de amplitud de la función de transferencia interna
	65	valores de medición de fase para la función de transferencia interna
	66	respuesta de fase de la función de transferencia interna
	70	valores de medición de amplitud para la función de transferencia externa
	71	respuesta de amplitud de la función de transferencia externa
15	75	valores de medición de fase para la función de transferencia externa
	76	respuesta de fase de la función de transferencia externa
	77	valores de temperatura indicados del sensor de referencia externo

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para regular la temperatura del volumen de calibración de un dispositivo para la calibración comparativa de sensores de temperatura a una temperatura nominal, presentando dicho dispositivo de calibración fuentes de calor y/o disipadores térmicos que, a través de una parte de conducción de calor o varias partes de conducción de calor, están en contacto térmico con el volumen de calibración, estimándose en al menos una etapa de procedimiento el estado térmico real del calibrador y del entorno utilizando un filtro de Kalman, suministrándose al filtro de Kalman los valores de medición de varios de los sensores de temperatura situados en dicho dispositivo de calibración y calculándose en al menos una etapa de procedimiento adicional un estado térmico futuro utilizando un modelo térmico de la dinámica de estado, caracterizado por que en al menos una etapa de procedimiento a partir de dicha estimación del estado térmico real y utilizando un modelo discreto en el tiempo de la dinámica de estado para al menos dos ajustes de las magnitudes de control y ajuste por un periodo futuro, se calcula la desviación cuadrática media resultante en dicho periodo al menos de una temperatura dentro del volumen de calibración con respecto a la temperatura nominal, comprendiendo el estado térmico al menos una diferencia de la desviación sistemática de los valores de medición de temperatura de un primer sensor de temperatura con respecto a la desviación sistemática de los valores de medición de temperatura de un segundo sensor de temperatura.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que el modelo de la dinámica de estado es un modelo discreto en el tiempo y la regla para calcular un estado térmico es una ecuación en diferencias lineal con coeficientes constantes en el tiempo y los coeficientes constantes en el tiempo son dependientes de la temperatura nominal.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el estado térmico
- comprende temperaturas y/o flujos térmicos y/o cambios en el tiempo de temperaturas
  - dentro del volumen de calibración y/o dentro de partes de conducción de calor y/o en el entorno de dicho dispositivo de calibración.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se calcula la al menos una diferencia de la desviación sistemática de los valores de medición de temperatura de un sensor de temperatura que va a calibrarse con respecto a la desviación sistemática de los valores de medición de temperatura de un patrón de referencia.
5. Dispositivo para regular la temperatura de un volumen de calibración de un dispositivo para la calibración comparativa de sensores de temperatura a una temperatura nominal, estando compuesto el dispositivo al menos por una unidad de procesamiento de datos electrónica que, a través de una interfaz, puede recibir datos de medición de al menos un sensor de temperatura situado en el dispositivo de calibración, caracterizado por que en dicha unidad de procesamiento de datos electrónica está implementado un modelo térmico de la dinámica de estados térmicos, comprendiendo el estado térmico al menos una diferencia de la desviación sistemática de los valores de medición de temperatura de un primer sensor de temperatura con respecto a la desviación sistemática de los valores de medición de temperatura de un segundo sensor de temperatura, estimando esta unidad de procesamiento de datos a partir de los datos de medición recibidos y utilizando un filtro de Kalman el estado térmico real del dispositivo de calibración.
6. Dispositivo según la reivindicación 5, caracterizado por que la unidad de procesamiento de datos electrónica es un microcontrolador.
7. Dispositivo según la reivindicación 5 o 6, caracterizado por que el modelo de la dinámica de estado es un modelo discreto en el tiempo y la regla para calcular un estado térmico es una ecuación en diferencias lineal con coeficientes constantes en el tiempo y los coeficientes constantes en el tiempo son dependientes de la temperatura nominal.
8. Dispositivo según la reivindicación 7, caracterizado por que se almacenan los coeficientes constantes en el tiempo en una memoria no volátil.
9. Dispositivo según una de las reivindicaciones 5 a 8, caracterizado por que la totalidad o componentes del estado térmico estimado se emiten a través de una interfaz.
10. Dispositivo según una de las reivindicaciones 5 a 9, caracterizado por que a partir de dicha estimación del estado térmico real y utilizando el modelo discreto en el tiempo de la dinámica de estado para al menos dos ajustes posibles de las magnitudes de control y ajuste del dispositivo de calibración por un periodo, se calcula la desviación cuadrática media resultante en dicho periodo al menos de una temperatura dentro del volumen de calibración con respecto a la temperatura nominal y a través de una interfaz se emite el ajuste, para el cual la desviación cuadrática media calculada con respecto a la temperatura nominal es mínima y se ajustan las magnitudes de ajuste o magnitudes de control correspondientes.

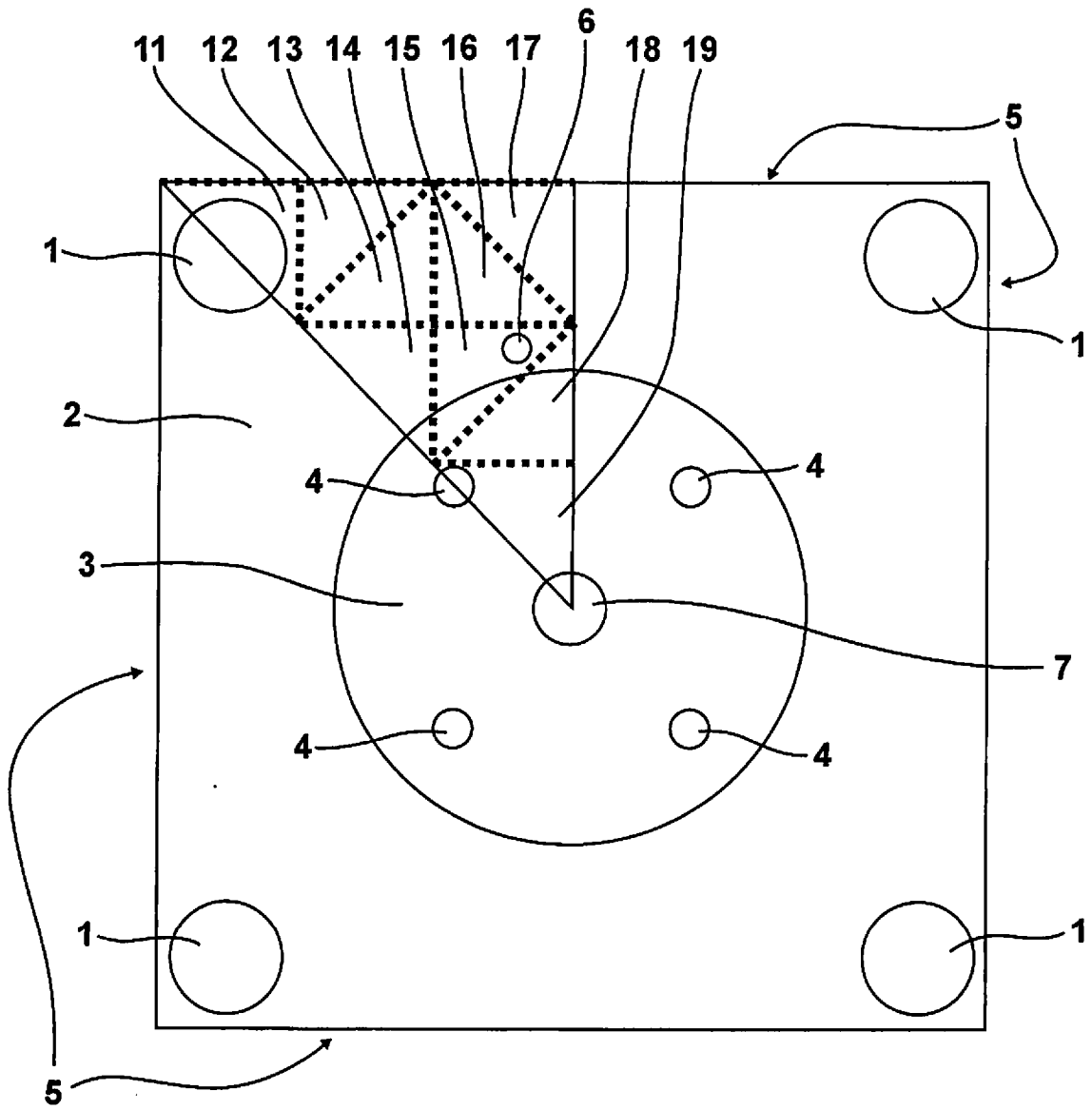


Fig. 1

Fig. 2

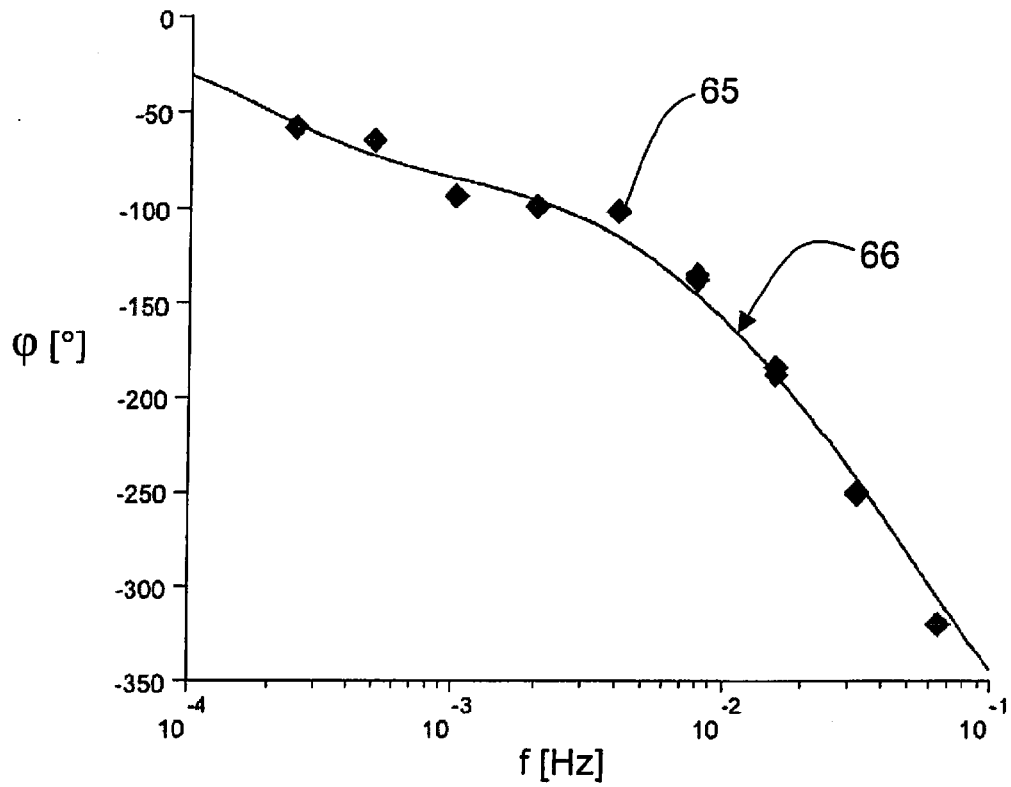
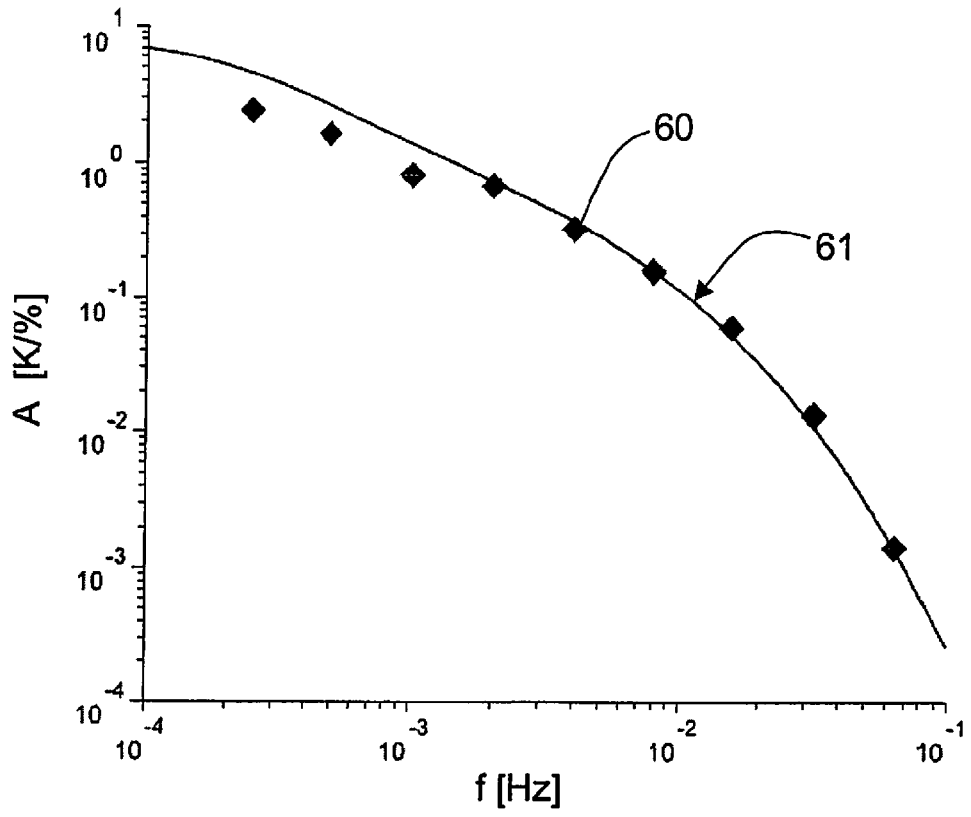


Fig. 3

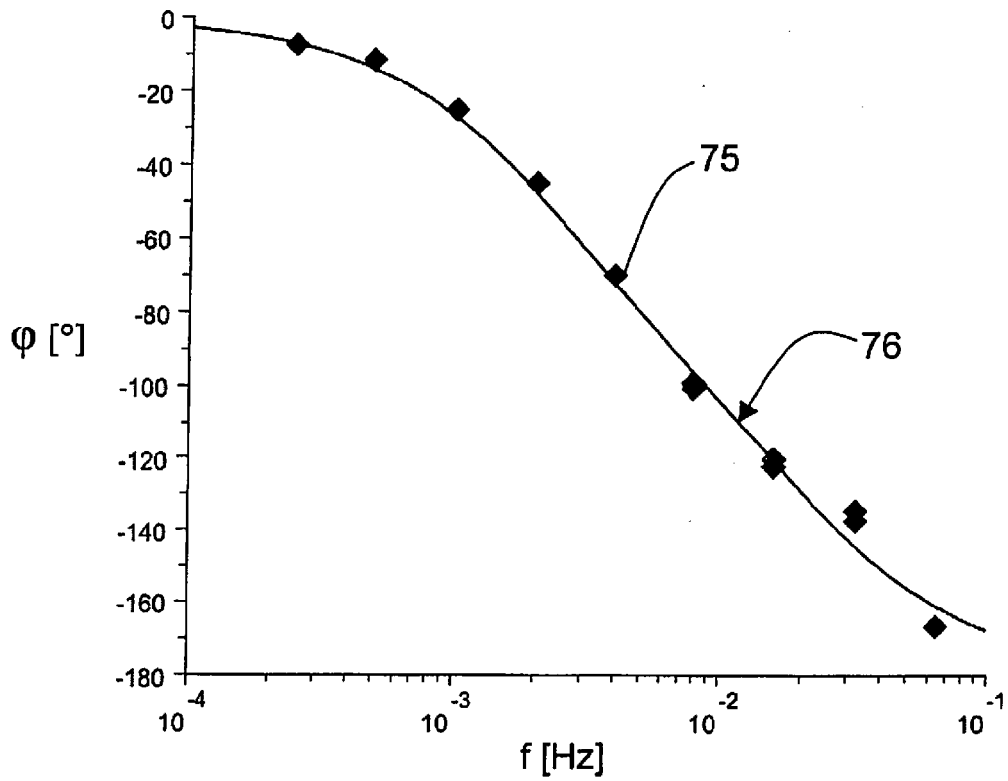
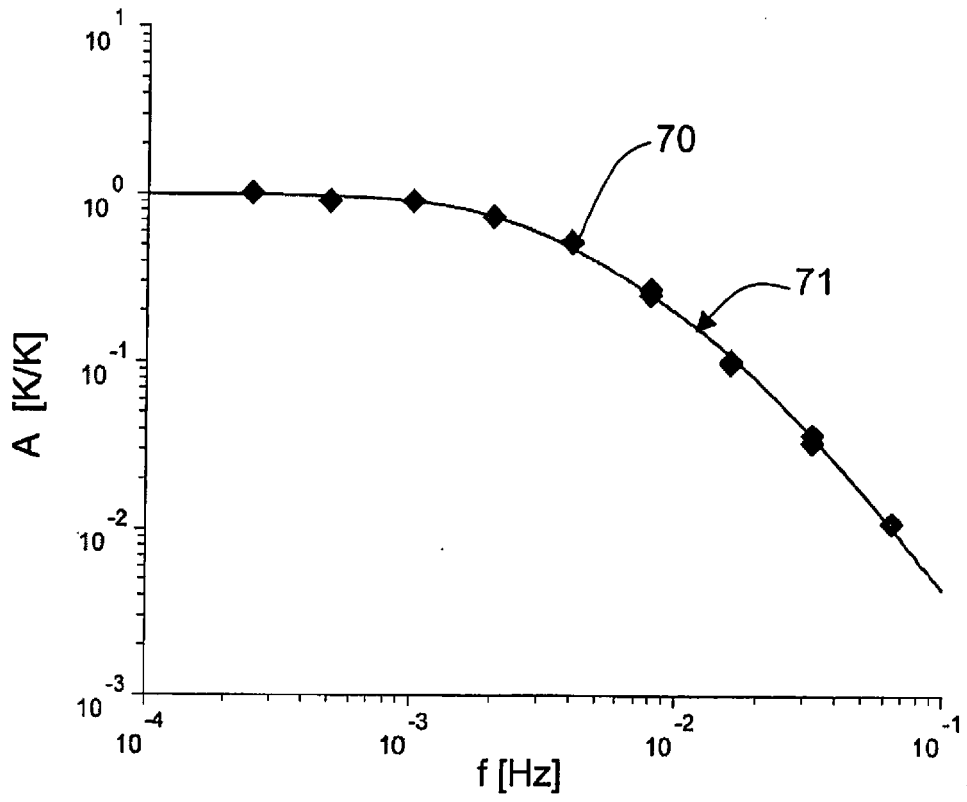


Fig. 4

