

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 821 011**

51 Int. Cl.:

G01L 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.12.2018 E 18213555 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.06.2020 EP 3508830**

54 Título: **Rodillo dotado de sensores**

30 Prioridad:

03.01.2018 DE 102018200047

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

23.04.2021

73 Titular/es:

**AKTIEBOLAGET SKF (100.0%)
415 50 Göteborg, SE**

72 Inventor/es:

**DOP, GERRIT-JAN;
KOPERDRAAD, BEN;
LAURENT, NICOLAS y
VAN DER HAM, ANDREAS CLEMENS**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 821 011 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

Rodillo dotado de sensores

La presente invención se refiere al campo de la detección de cargas en rodamientos de rodillos, y más en particular, está dirigida a un rodillo de rodamiento con un taladro hueco en el que se disponen sensores para medir la deformación del taladro del rodillo.

Antecedentes técnicos

A partir del documento WO 2016/016054 existe constancia de un ejemplo de un rodillo de rodamiento de esta clase. Se expone un dispositivo para detectar una carga radial que actúa sobre el rodillo. El dispositivo comprende una célula de carga que abarca el diámetro del taladro del rodillo y que está en un contacto fijo con partes diametralmente opuestas de la superficie del taladro. Cuando el rodillo está cargado radialmente, la sección transversal circular del taladro hueco se deforma hasta una forma elíptica. Sometido a carga, el plano de carga permanece igual, aunque las ubicaciones de contacto de la célula de carga rotan dentro de este plano durante la rotación del rodillo. Como resultado, las ubicaciones de contacto no solo experimentan un desplazamiento radial relativo entre sí, sino también un desplazamiento transversal. Este efecto se denomina a veces como efecto de masticación. La célula de carga comprende una viga a flexión y una disposición articulada, y está diseñada de modo que las ubicaciones de contacto se muevan con las superficies del taladro, por medio de la deformación elástica de la célula de carga, para asumir el movimiento asociado con el efecto de masticación.

El dispositivo expuesto se configura de modo que calcule la carga radial sobre el rodillo de rodamiento en condiciones de rotación. El documento de la patente US 2012/0020603 A1 también expone un rodillo dotado de sensores para un rodamiento.

Aún existe margen de mejora en términos de una definición de un rodillo con un dispositivo de detección de carga integrado que también pueda determinar la carga radial sobre el rodillo en condiciones estáticas.

Compendio

La presente invención se refiere a un rodillo dotado de sensores de un rodamiento de rodillos, que tiene un taladro central que se extiende en una dirección axial a través del rodillo y un módulo sensor que se monta dentro del taladro de una manera no fija. El módulo sensor se configura para determinar una carga radial sobre el rodillo de rodamiento en condiciones estáticas, es decir, cuando el rodamiento está estacionario. El módulo sensor comprende al menos cuatro sensores de deformación dispuestos circunferencialmente alrededor de un eje geométrico central del módulo sensor, a intervalos angulares β_k definidos con relación a una referencia fija, conforme a lo cual cada sensor de deformación se configura de modo que mida una distancia radial r_1, r_2, r_3, r_4 entre el eje geométrico central y una superficie radialmente interior del taladro en la posición angular correspondiente. Las cuatro o más distancias radiales r_1, r_2, r_3, r_4 se miden para posiciones angulares definidas que se encuentran dentro de un arco angular de 180 grados. El módulo sensor está equipado además de un procesador, que se configura de modo que reciba cada una de las distancias radiales medidas, y calcule la carga radial que actúa sobre el rodillo mediante la estimación de un ángulo de desplazamiento ϕ de la referencia fija con relación a la dirección de carga radial; y utilizando el ángulo de desplazamiento estimado y cada distancia radial medida, como entradas para un modelo matemático que describe un radio de deformación del taladro en función de la posición angular y los parámetros dependientes de la carga.

Cuando el rodillo y el módulo sensor integrado están estacionarios, la referencia fija puede estar situada en cualquier ángulo (ángulo de desplazamiento) con relación a la línea de carga radial. El procesador en el rodillo dotado de sensores de la invención se configura de modo que estime este ángulo de desplazamiento desde las cuatro o más distancias radiales medidas, que se corresponden con los cuatro radios deformados del taladro. De manera conveniente, el modelo matemático de la deformación del taladro se deriva a partir de un análisis de elementos finitos del rodillo sometido a una carga radial diferente. En una realización preferida, el modelo matemático se basa en una expansión en series de Fourier de una señal de deformación del taladro obtenida a partir del análisis de elementos finitos. En una realización particularmente preferida, la expansión en series de Fourier tiene dos armónicos, ya que esto se ha descubierto que combina una precisión excelente con una velocidad computacional rápida.

En un ejemplo, el módulo sensor comprende cuatro sensores de deformación dispuestos a intervalos angulares uniformes de 45 grados. A continuación, el procesador se configura de modo que estime el ángulo de desplazamiento ϕ utilizando la siguiente relación:

$$\varphi = \frac{1}{2} \times \text{atan2} \left(\frac{r_3 - r_1}{r_4 - r_2} \right)$$

En una realización, cada uno de los cuatro o más sensores de deformación es un sensor de proximidad con un

5 elemento de detección dispuesto en una superficie radialmente exterior del módulo sensor, de modo que esté orientado hacia la superficie del taladro con un espacio radial pequeño. El sensor de proximidad puede ser un sensor óptico, tal como un sensor de fibra Fabry-Perot, un sensor capacitivo o un sensor inductivo. Preferentemente, se utilizan sensores inductivos, ya que estos sensores en gran medida no reaccionan frente a la presencia de un contaminante interpuesto, tal como grasa. Obviamente, dichos sensores de proximidad que miden la deformación del taladro de una manera sin contacto no se ven afectados por los problemas asociados con el movimiento de masticación analizado anteriormente.

10 En un ejemplo alternativo, los cuatro o más sensores de deformación están en contacto con la superficie radialmente interior del taladro, de una manera no fija. Cada sensor de deformación puede comprender una viga en voladizo que se fija a un cuerpo principal del módulo sensor o que se extiende desde este como una parte integral. Cada viga tiene un elemento de contacto en su extremo libre que se apoya contra la superficie del taladro. La viga está además dotada de instrumentos medidores con al menos una galga extensométrica para medir la deflexión de la viga. Preferentemente, la viga en voladizo dispone de una galga extensométrica sobre su superficie radialmente exterior.

15 Para garantizar que los elementos de contacto permanecen en contacto con la superficie del taladro, incluso cuando el diámetro del taladro deformado tiene un valor máximo, el módulo sensor dispone de manera conveniente de unos medios para hacer que las vigas en voladizo estén pretensadas dentro del taladro. En un ejemplo, el cuerpo principal del módulo sensor comprende una muesca anular dispuesta junto a una primera región del cuerpo principal, desde la cual se extiende cada viga en voladizo, conforme a lo cual la muesca se configura de modo que actúe como una articulación. El cuerpo principal comprende además un rebaje axial en una cara final de este, y el módulo sensor está equipado con un elemento cónico que encaja en el rebaje axial y que se puede desplazar en el rebaje axial, de modo que provoque el desplazamiento de la segunda región del cuerpo principal en una dirección radialmente hacia fuera.

20 Debido a que el elemento de contacto de cada viga en voladizo se puede mover con relación a la superficie del taladro, un módulo sensor que comprende dichos sensores de deformación tampoco reacciona frente al movimiento de masticación analizado anteriormente. Se puede producir una pequeña cantidad de contacto con deslizamiento. De manera conveniente, los elementos de contacto se ejecutan con una geometría en forma de cúpula para reducir las presiones de contacto.

25 En una realización, cada uno de los cuatro o más sensores de deformación está agrupado por parejas con un sensor de deformación adicional que está situado en una posición angular diametralmente opuesta, de modo que formen un primer par de sensores, un segundo par de sensores, un tercer par de sensores y un cuarto par de sensores. Esta realización es ventajosa cuando el eje geométrico central del módulo sensor está desplazado radialmente desde el eje geométrico del rodillo, ya que hace posible anular el desplazamiento radial.

30 Los cuatro o más sensores de deformación se disponen en general en la misma región axial del rodillo, preferentemente en una región axialmente central. En una realización adicional, el módulo sensor está equipado con un primer conjunto de al menos cuatro sensores de deformación dispuestos en una región axialmente central del rodillo, y al menos un conjunto adicional de al menos cuatro sensores que se disponen en una región axialmente exterior del rodillo. Esto hace posible determinar una distribución de carga a lo largo del rodillo, para facilitar la detección, p. ej., de una desalineación de los aros del rodamiento.

35 También es posible que el módulo sensor comprenda únicamente cuatro sensores de deformación. Cuando los sensores de deformación son sensores de proximidad, los sensores se pueden disponer dentro del arco angular de 180 grados, es decir, dentro del mismo semicírculo. Cuando el módulo sensor comprende sensores de deformación en forma de vigas en voladizo, es conveniente disponer dos de las vigas en semicírculos opuestos, de modo que estas se soporten y equilibren entre sí. Las vigas pueden no disponerse diametralmente opuestas entre sí, de modo que estas midan un radio del mismo diámetro. Cada sensor se debe disponer de modo que mida un radio del taladro que esté asociado con un diámetro independiente, conforme a lo cual se asume que el radio del taladro en la posición angular medida es igual al radio del taladro en el lado diametralmente opuesto. De hecho, las cuatro distancias radiales medidas se encuentran en el mismo semicírculo. En un ejemplo de esta clase, el módulo sensor tiene un primer sensor de deformación dispuesto formando cero grados con relación a la referencia fija, un segundo sensor de deformación dispuesto formando 45 grados, un tercer sensor dispuesto formando 135 grados y un cuarto sensor dispuesto formando 270 grados.

40 De manera adecuada, el módulo sensor se monta en el taladro del rodillo mediante un primer y segundo elemento resiliente separados axialmente, tales como unas juntas tóricas, que pueden asumir las deformaciones radiales del taladro.

45 De manera conveniente, el módulo sensor comprende una carcasa cilíndrica fabricada con un material rígido que se moldea de modo que encaje en el interior del taladro del rodillo con un huelgo radial pequeño y esté totalmente contenido dentro de las dimensiones del rodillo. La carcasa protege el procesador y la electrónica de los sensores frente a la contaminación y hace posible que el módulo sensor se monte como una unidad autónoma dentro del

taladro del rodillo. Preferentemente, la carcasa también acomoda una fuente de energía tal como una batería, y una antena para la transmisión inalámbrica de la carga radial determinada a un receptor situado fuera del rodamiento. Cuando el módulo sensor comprende sensores de deformación en forma de vigas en voladizo, la carcasa puede comprender unas aberturas a través de las cuales sobresalen los elementos de contacto.

5 Por tanto, el módulo sensor en un rodillo de acuerdo con la invención se puede montar como una unidad autónoma y hace posible la determinación de la carga radial sobre el rodillo en condiciones estáticas. El método de procesamiento descrito también se puede utilizar para calcular la carga en condiciones cuasiestáticas, e incluso en condiciones dinámicas, aunque en el caso de carga dinámica es computacionalmente más rápido calcular la carga a partir de la señal dinámica de una manera convencional. No obstante, la invención permitirá una resolución espacial
10 muy superior de la zona cargada del rodamiento. Esto puede ser conveniente cuando el comportamiento transitorio de la carga del rodamiento cambia más rápido de lo que tarda una revolución del rodillo.

Ahora se describirá la invención con más detalle haciendo referencia a los dibujos anexos.

Descripción breve de los dibujos

15 La figura 1 muestra una vista de una sección transversal parcial de un rodamiento de rodillos que puede estar equipado con un rodillo de acuerdo con la invención;

la figura 2 muestra una sección transversal de un ejemplo de un rodillo dotado de sensores de acuerdo con la invención, que comprende un módulo sensor en un taladro hueco del rodillo;

la figura 3 muestra una vista en perspectiva de un ejemplo adicional de un módulo sensor, con parte de un componente de carcasa eliminado;

20 Descripción detallada

En la figura 1 se muestra un ejemplo de un rodamiento que es adecuado para soportar el eje principal de una turbina eólica. El rodamiento debe soportar unas cargas axiales elevadas así como también cargas radiales y se ejecuta como un rodamiento de dos hileras de rodillos cónicos. El rodamiento comprende un aro exterior 1 provisto de un primer y segundo camino exterior de rodadura de forma cónica para un primer conjunto 4 y un segundo conjunto 5
25 de rodillos cónicos. El rodamiento comprende además un primer y segundo aro interior 2, 3 que están provistos respectivamente de un primer y segundo camino de rodadura interior de forma cónica para el primer y segundo conjunto de rodillos 4, 5. Además, se proporcionan una primera jaula 6 y una segunda jaula 7 para retener los rodillos del primer y segundo conjunto de rodillos respectivamente. De manera habitual, las jaulas se forman a partir de segmentos intercalados con los rodillos, sin segmentos que estén en contacto entre sí en la dirección circunferencial.
30

Para proporcionar la rigidez necesaria y garantizar una vida útil prolongada, el rodamiento está precargado. La posición axial de los aros interiores 2, 3 con relación al aro exterior 1 se establece de modo que el primer y segundo conjunto de rodillos 4, 5 tengan un huelgo interno negativo. El primer y segundo aro interior están entonces unidos mediante pernos entre sí o sujetos axialmente de otra manera para mantener la precarga durante la vida útil del
35 rodamiento. No obstante, en la práctica, la precarga disminuye de manera gradual con el tiempo. Si se pierde la precarga y la carga radial sobre un rodillo pasa a ser cero, éste podrá moverse hacia un lado de diámetro pequeño del hueco radial entre los caminos de rodadura interior y exterior, lo que conduce posiblemente a una carga excesiva que reducirá la vida útil del rodamiento. Como un rodamiento del eje principal es un componente crítico y costoso de una turbina eólica, es importante detectar si el rodamiento pierde precarga.

40 También es beneficioso poder medir la carga radial que actúa sobre el rodamiento, para detectar una condición de sobrecarga y caracterizar la extensión angular de la zona cargada del rodamiento. En aplicaciones tales como turbinas eólicas, también es conveniente medir la carga radial cuando el rodamiento está estacionario. En condiciones de tormenta, por ejemplo, cuando las palas de la turbina están en una posición "aparcada", el rodamiento podría experimentar una sobrecarga que podría afectar de manera negativa a la vida del rodamiento.
45 Para hacer posible la determinación de la carga radial que actúa sobre el rodamiento en condiciones estáticas, el rodamiento representado está equipado con un rodillo dotado de sensores de acuerdo con la invención.

En la figura 2 se muestra de manera esquemática una sección transversal radial, de un ejemplo de un rodillo dotado de sensores de acuerdo con la invención. El rodillo 10 tiene un cuerpo de rodillo cuya superficie radialmente exterior (no se muestra) está en contacto con los caminos de rodadura interior y exterior del rodamiento. El rodillo está
50 provisto de un taladro cilíndrico central 15 que tiene una superficie del taladro cilíndrico 15s. Se dispone un módulo sensor 20 dentro del taladro para determinar la carga radial sobre el rodillo en condiciones estáticas, utilizando diversos sensores de deformación dispuestos circunferencialmente. El módulo comprende además un procesador, que recibe una señal desde cada sensor de deformación y calcula la carga radial estática sobre el rodillo 10.

En una condición descargada, el taladro del rodillo 15 tiene una sección transversal circular. Sometido a carga radial,

- 5 el taladro circular se deforma hasta una forma esencialmente elíptica. Cuando se observa en la dirección axial y suponiendo que una línea de carga radial pasa a través del taladro en una posición angular de 0 grados y 180 grados, el radio del taladro en estas posiciones estará comprimido hasta un valor mínimo. En las posiciones angulares de 90 grados y 270 grados, el radio del taladro se expandirá hasta un valor máximo. Cuando se mide la carga radial en condiciones dinámicas, donde el rodillo dotado de sensores rota junto con el rodillo en torno a un eje geométrico del rodillo, un sensor de deformación del taladro detectará una señal de deformación correspondiente que comprende unos picos máximos y mínimos de una manera cíclica. La carga radial dinámica que actúa sobre el rodillo se puede derivar a partir de los picos máximos y mínimos medidos en la señal. Tal como se sobreentenderá, no es posible medir una carga estática de esta forma.
- 10 Un módulo sensor de acuerdo con la invención está equipado con al menos cuatro sensores de deformación dispuestos circunferencialmente alrededor de un eje geométrico 21 del módulo sensor 20, cada uno de los cuales detecta los cambios en la distancia radial entre la superficie del taladro 15s y el eje geométrico del módulo sensor. Suponiendo que el eje geométrico 21 del módulo sensor 20 está totalmente alineado con el eje geométrico del taladro del rodillo, cada sensor de deformación mide el radio del taladro en 4 ubicaciones separadas angularmente.
- 15 De manera adecuada, se desarrolla un modelo paramétrico que caracteriza el comportamiento del taladro sometido a carga utilizando análisis de elementos finitos (FEA). El modelo paramétrico debería expresar la distancia radial desde el eje geométrico central, como una función del ángulo de fase alrededor del taladro y los parámetros que dependen de la carga. Tal como se ha mencionado, la deformación de la sección transversal del taladro circular es en general elíptica, la cual se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$20 \quad r(\theta) = \frac{a \times b}{\sqrt{(b \times \cos \theta)^2 + (a \times \sin \theta)^2}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde

$r(\theta)$ es el radio de la elipse formando un ángulo de fase θ ,

a es el semieje geométrico mayor de la elipse y

b es el semieje geométrico menor de la elipse.

- 25 Se puede utilizar un modelo de ajuste basado en una deformación puramente elíptica, pero puede no ser lo suficientemente preciso en la práctica. La forma deformada del taladro no es exactamente una elipse y la deformación puede ser el resultado de una expansión térmica además de la carga radial.

- 30 La "señal" de deformación obtenida para $r(\theta)$ a partir de los resultados del análisis FEA tiene en general una forma sinusoidal. Se puede utilizar un polinomio de orden superior para describir la función $r(\theta)$. Preferentemente, se utiliza una expansión en serie de Fourier con dos armónicos como el modelo de ajuste matemático, ya que los inventores han descubierto que este proporciona un equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia computacional.

La siguiente expresión se puede derivar a partir de una transformada FFT de la señal de deformación del taladro:

$$r(\theta) = a_0 + a_1 \times \cos(2\theta) + a_2 \times \cos(4\theta) + a_3 \times \cos(10\theta) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde

- 35 a_0 es un desplazamiento general del nivel de deformación que depende de la carga y la expansión térmica;
 a_1, a_2, a_3 son coeficientes proporcionales a la carga aplicada.

- 40 A continuación, se utiliza un algoritmo para hacer coincidir los radios medidos con el modelo. En una aplicación de detección de cargas, un sensor de deformación k mide un radio r_k que forma un ángulo relativo conocido β_k a partir de una referencia fija. No obstante, se desconoce un ángulo de desplazamiento ϕ de la referencia fija con relación a la dirección real de la carga radial. El módulo sensor dentro del taladro del rodillo rota, y por tanto, puede adoptar cualquier orientación angular cuando está estacionario.

Definiendo el ángulo de fase del sensor k como $\theta_k = \beta_k + \phi$, la ecuación 2 se puede reescribir como:

$$r_k = a_0 + a_1 \times \cos(2\theta_k) + a_2 \times \cos(4\theta_k) = a_0 + a_1 \times \cos(2 \times (\beta_k + \phi)) + a_2 \times \cos(4 \times (\beta_k + \phi))$$

Ecuación (3)

- 45 Hay 2 ondas cosinusoidales a identificar, las cuales tienen unos períodos respectivos de π y $\pi/2$. Esto hace necesario obtener 4 mediciones r_1, r_2, r_3, r_4 dentro de un semicírculo con el fin de resolver la ecuación. Se supone

que la deformación es simétrica y que el radio del taladro en un ángulo de fase particular es igual al radio del taladro en el lado diametralmente opuesto.

5 En la realización mostrada en la figura 2, el módulo sensor 20 comprende ocho sensores de deformación en forma de vigas en voladizo, que se flexionan en respuesta a la deformación del taladro. Las ocho vigas se disponen circunferencialmente alrededor del eje geométrico 21 del módulo sensor con una separación angular uniforme, y están conectadas en pares diametralmente opuestos. En la sección transversal representada se observan únicamente un primer par de sensores de deformación 22a, 22b. Si el eje geométrico 21 del módulo sensor es coaxial con el eje geométrico del taladro, entonces cada viga a flexión 22a, 22b medirá la misma distancia radial desde el eje geométrico 21 central. En casos donde existe una pequeña excentricidad en dirección radial, un sensor 10 en el par medirá un error radial positivo y el otro sensor en el par medirá un error radial negativo, lo que hace posible que se anule el error radial. De hecho, se mide un radio del taladro r_1, r_2, r_3, r_4 en cuatro posiciones angulares dentro de un semicírculo a intervalos de 45 grados.

15 La ecuación 3 se puede resolver utilizando una función de búsqueda que hace estimaciones iniciales sobre el valor del desplazamiento del nivel de deformación a_0 y el ángulo de desplazamiento ϕ , y encuentra el mejor ajuste con los radios medidos. Preferentemente, para minimizar el tiempo computacional necesario, el procesador se configura de modo que calcule el ángulo de desplazamiento desde los radios medidos r_1, r_2, r_3, r_4 utilizando una ecuación algebraica. En el ejemplo dado de cuatro radios del taladro medidos a intervalos de 45 grados, la expresión para la medición de r_k a partir de la Ecuación 3 se puede desarrollar como sigue:

$$r_k = a_0 + a_1 \times \cos(2 \times (\beta_k + \phi)) + a_2 \times \cos(4 \times (\beta_k + \phi))$$

$$r_k = a_0 + a_1 \times \cos\left(2 \times \left(k \frac{\pi}{4} + \phi\right)\right) + a_2 \times \cos\left(4 \times \left(k \frac{\pi}{4} + \phi\right)\right) \quad (4)$$

$$r_k = a_0 + a_1 \times \left[\cos\left(k \frac{\pi}{2}\right) \cos(2\phi) - \sin\left(k \frac{\pi}{2}\right) \sin(2\phi) \right] + a_2 \times \left[\cos(k\pi) \cos(4\phi) - \sin(k\pi) \sin(4\phi) \right]$$

$$r_k = a_0 + a_1 \times \left[\cos\left(k \frac{\pi}{2}\right) \cos(2\phi) - \sin\left(k \frac{\pi}{2}\right) \sin(2\phi) \right] + a_2 \times \left[\cos(k\pi) \cos(4\phi) \right]$$

$$r_1 = r(\beta_k = 45^\circ) = a_0 - a_1 \times \sin(2\phi) - a_2 \times \cos(4\phi)$$

$$r_2 = r(\beta_k = 90^\circ) = a_0 - a_1 \times \cos(2\phi) + a_2 \times \cos(4\phi) \quad (5)$$

$$r_3 = r(\beta_k = 135^\circ) = a_0 + a_1 \times \sin(2\phi) - a_2 \times \cos(4\phi)$$

$$r_4 = r(\beta_k = 180^\circ) = a_0 + a_1 \times \cos(2\phi) + a_2 \times \cos(4\phi)$$

20 En consecuencia

$$r_3 - r_1 = 2a_1 \sin(2\phi)$$

$$r_4 - r_2 = 2a_1 \cos(2\phi) \quad (6)$$

El ángulo de desplazamiento se puede calcular como sigue:

$$\phi = \frac{1}{2} \times \text{atan2} \left(\frac{r_3 - r_1}{r_4 - r_2} \right) \quad (7)$$

25 Una vez que se ha calculado el ángulo de desplazamiento, el procesador se configura a continuación de manera adecuada para ajustar los radios medidos r_1, r_2, r_3, r_4 al modelo paramétrico utilizando, p. ej., un método de ajuste por mínimos cuadrados o un ajuste con un polinomio de 2º orden para resolver los coeficientes a_0, a_1, a_2 de la serie de Fourier (Ecuación (3)) y calcular la carga radial sobre el rodillo.

30 Tal como se ha mencionado, los sensores de deformación en la realización de la figura 2 se ejecutan como vigas en voladizo. El módulo sensor 20 tiene un cuerpo principal 23 a través del cual se extiende un perno central 24. El módulo se monta en el taladro 15 por medio de un primer y segundo elemento resiliente separados axialmente 37, 38. En el ejemplo representado, se utilizan juntas tóricas fabricadas con un material flexible, tal como NBR, para situar radialmente el cuerpo principal 23 dentro del taladro 15 y asumir la deformación del taladro, de modo que el cuerpo principal 23 del módulo no entre en contacto con la superficie del taladro 15s. El módulo comprende además una región anular cerrada 30, donde están alojados el procesador y preferentemente también una antena.

35 En una ubicación de montaje del cuerpo principal 23 se fijan ocho vigas en voladizo por medio, p. ej., de unos tornillos 50. En la sección transversal representada se observan únicamente dos de las vigas 22a, 22b. Cada viga tiene un extremo libre que se extiende desde una ubicación de soporte de la viga en el cuerpo principal 23. En la extremidad de cada extremo libre se proporciona un elemento de contacto 25, que se dispone de modo que se

- 5 apoye contra la superficie del taladro 15s, lo que implica que la deformación del taladro y los cambios correspondientes en el radio del taladro provocan la deflexión de cada viga en voladizo 22a, 22b. Entre el elemento de contacto 25 y una parte soportada de cada viga, se proporciona al menos una galga extensométrica para medir la flexión de la viga. Preferentemente, tanto el lado radialmente interior como el lado radialmente exterior de cada viga están provistos de una galga extensométrica. Tal como se menciona anteriormente, las vigas 22a, 22b mostradas en la figura 2 realizan la función de un primer par de sensores, para eliminar los errores de excentricidad radial. Por tanto, el primer par de sensores tiene cuatro galgas extensométricas, las cuales están conectadas convenientemente en un puente de Wheatstone para compensar la sensibilidad a la temperatura.
- 10 Debido a la forma de deformación elíptica en general del taladro, la distancia radial entre el eje geométrico 21 central y la superficie del taladro 15s varía entre un valor máximo y un valor mínimo, dependiendo de la orientación angular del rodillo con relación a la línea de carga radial. Para garantizar que los elementos de contacto 25 de cada viga 22a, 22b permanecen en contacto con la superficie del taladro 15s, cuando las vigas están en una posición de distancia radial máxima, las vigas se deberían montar con un cierto pretensado dentro del taladro. El módulo sensor se diseña para hacer posible esto, después de haber insertado el módulo sensor 20 en el taladro.
- 15 El cuerpo principal 23 comprende una muesca anular 26 para crear un área de menor diámetro que puede funcionar como una articulación. La muesca 26 se dispone entre la ubicación de fijación de cada viga y la ubicación de soporte, desde donde se extiende el extremo libre de cada viga. Además, el cuerpo principal 23 tiene un rebaje axial, dispuesto en una cara final del cuerpo, en la región de las ubicaciones de soporte de las vigas. El módulo sensor comprende además un elemento cónico 27, que se monta en el perno central 24 y que encaja en el rebaje axial del cuerpo principal. Una vez montado en el taladro del rodillo, se aprieta un elemento de tuerca 28 en el perno central 24, para empujar el elemento cónico 27 adicionalmente en el rebaje axial. Esto provoca el desplazamiento de la ubicación de soporte de las vigas en una dirección radialmente hacia fuera, y desplaza los elementos de contacto 25 hacia la superficie del taladro 15s. El elemento cónico 27 se desplaza en el rebaje axial hasta que las lecturas de deformación de las galgas extensométricas en cada viga indican que las vigas están suficientemente pretensadas.
- 20 El módulo sensor se monta dentro del taladro 15 de una manera no fija. Por lo tanto, durante la operación de apoyo, es posible que se produzca una rotación relativa en la dirección circunferencial. Dicho movimiento se denomina fluencia lenta y se espera que sea significativamente más lento que la velocidad de rotación del rodillo 10, debido a la fricción entre el primer y segundo elemento resiliente 37, 38 y las superficies con las que están en contacto. La flexión de las vigas durante la operación de apoyo también conduce a un desplazamiento axial muy pequeño de los elementos de contacto 25 con relación a la superficie del taladro 15s. Por lo tanto, se producirá cierto grado de contacto con deslizamiento. Por lo tanto, los elementos de contacto 25 se ejecutan con una geometría en forma de cúpula, que se asemeja a una rebanada a través de una región periférica de una esfera. De manera adecuada, se selecciona el diámetro de la cúpula en la dirección circunferencial de modo que se adapte a la superficie cilíndrica 15s del taladro. Esto conduce a unas presiones de contacto de Hertz relativamente bajas y minimiza el desgaste.
- 25 En una realización adicional de un rodillo dotado de sensores de acuerdo con la invención, el módulo sensor está equipado con sensores de proximidad que miden los cambios en el radio del taladro de una manera sin contacto. En la figura 3 se muestra una vista en perspectiva de un ejemplo de dicho módulo sensor, en el cual se han retirado algunas secciones para mostrar los componentes subyacentes.
- 30 El módulo sensor 320 comprende una carcasa 330 fabricada con un material rígido que se moldea de modo que se ajuste dentro de un taladro cilíndrico de un rodillo con un huelgo radial pequeño. La carcasa tiene un cuerpo cilíndrico principal que tiene un diámetro menor que el diámetro del taladro, y se dimensiona de modo que esté contenida dentro de las dimensiones del rodillo. El módulo sensor 320 está situado en una dirección radial con relación al taladro cilíndrico mediante un primer y segundo elemento de sellado resiliente, que se disponen entre una superficie radialmente interior del taladro y una superficie radialmente exterior de la carcasa 330. En el ejemplo representado se utilizan juntas tóricas. La carcasa está situada axialmente dentro del taladro del rodillo mediante una primera y segunda tapa final 333, 334, que tienen una parte cilíndrica principal que se ajusta sobre el cuerpo cilíndrico principal de la carcasa 330 en cada extremo axial. Cada tapa final también tiene una parte de reborde 335 con un diámetro mayor que la parte cilíndrica principal que, tras el ensamblaje, se apoya contra un área rebajada que se mecaniza en cada cara final axial del rodillo. Por tanto, la carcasa 330 del módulo sensor se puede situar con precisión con respecto al taladro del rodillo.
- 35 El módulo sensor 320 dispone además de ocho sensores inductivos separados circunferencialmente 332a – 332g, que tienen un elemento de detección formado por una bobina circular que se asienta en la superficie cilíndrica exterior de la carcasa 330 y está orientado hacia la superficie del taladro del rodillo con un hueco radial pequeño, p. ej., de 1.0 mm. La bobina de cada sensor inductivo está conectada a un condensador en un circuito tanque LC que es excitado en resonancia de modo que genere un campo magnético de alta frecuencia en la bobina. Esto induce corrientes de Eddy en la superficie enfrentada del taladro del rodillo, que generan un campo magnético secundario que se opone al campo primario de la bobina, lo que provoca una variación aparente en la frecuencia de resonancia del tanque que es proporcional al hueco radial entre la bobina y la superficie del taladro. Esta variación se detecta con el fin de medir los cambios en el hueco radial, y por tanto, los cambios en el radio del taladro debidos a la

deformación.

- 5 Tal como en la realización de la figura 2, los ocho sensores actúan como cuatro pares de sensores. Los sensores diametralmente opuestos 322a y 332e forman un primer par de sensores y conjuntamente miden un primer radio del taladro r_1 ; los sensores diametralmente opuestos 322b y 332f forman un segundo par de sensores y conjuntamente miden un segundo radio del taladro r_2 ; los sensores diametralmente opuestos 322c y 332g forman un tercer par de sensores y conjuntamente miden un tercer radio del taladro r_3 ; los sensores diametralmente opuestos 322d y 332h forman un cuarto par de sensores y conjuntamente miden un cuarto radio del taladro r_4 . De acuerdo con la invención, los 4 radios se miden en ubicaciones circunferenciales dentro de un semicírculo, es decir, dentro de un arco angular de 180 grados.
- 10 La electrónica asociada con cada sensor inductivo 322a, 322b, 322c, 322d, 322e, 322f, 322g, 322h está contenida de manera adecuada dentro de diversos convertidores digitales de inductancia (IDC) 341 montados en una PCB 340. En el ejemplo representado, las dos bobinas circulares asociadas con un par de sensores están conectadas a un único IDC, aunque el número de bobinas conectadas puede ser mayor, dependiendo del número de canales de entrada del IDC.
- 15 El módulo sensor 320 también comprende un procesador 345 que se configura de modo que calcule la carga radial sobre el rodillo a partir de los radios medidos r_1 , r_2 , r_3 , r_4 , tal como se explica haciendo referencia a la realización de la figura 2. También se proporciona una antena 347 para transmitir el resultado procesado a un receptor ubicado fuera del rodamiento. El procesador 345 y la antena 347 también se disponen en la PCB 340. El módulo sensor está equipado además con una batería 350 para alimentar el sensor y la electrónica de procesamiento. También es posible que el módulo sensor esté equipado para generar su propia energía eléctrica a partir de la rotación del rodillo.
- 20 Por tanto, el módulo sensor 320 como un todo es una unidad autónoma que es fácil de montar y desmontar del taladro del rodillo.
- 25 Se han descrito diversos aspectos y realizaciones de la invención. La invención no está restringida a estas realizaciones, sino que se puede modificar dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un rodillo dotado de sensores (10) de un rodamiento, comprendiendo el rodillo dotado de sensores un taladro central (15) que se extiende en dirección axial a través del rodillo y un módulo sensor (20, 220) que se monta dentro del taladro de una manera no fija, **caracterizado por que:** el módulo sensor comprende:
- al menos cuatro sensores de deformación (22a, 22b, 322a, 322b, 322c, 322d, 322e, 322f, 322g, 322h) dispuestos circunferencialmente alrededor de un eje geométrico central (21) del módulo sensor, a intervalos angulares β_k definidos con relación a una referencia fija, conforme a lo cual cada sensor de deformación se configura de modo que mida una distancia radial r_1, r_2, r_3, r_4 entre el eje geométrico central (21) y una superficie radialmente interior (15s) del taladro (15) en la posición angular correspondiente, conforme a lo cual las cuatro o más distancias radiales r_1, r_2, r_3, r_4 se miden para posiciones angulares definidas que se encuentran dentro de un arco angular de 360 grados; y
 - un procesador (345) que se configura de modo que reciba cada una de las distancias radiales medidas y calcule una carga radial que actúa sobre el rodillo, mediante la estimación de un ángulo de desplazamiento ϕ de la referencia fija con relación a la dirección de carga radial; y utilizando el ángulo de desplazamiento estimado y cada distancia radial medida como entradas para un modelo matemático, que describe un radio de deformación del taladro (15) como una función de la posición angular y los parámetros dependientes de la carga.
2. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con la reivindicación 1, donde el modelo matemático utilizado por el procesador para calcular la carga radial se basa en una expansión en series de Fourier de una señal de deformación del taladro, obtenida a partir de un análisis de elementos finitos del rodillo sometido a carga radial.
3. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, donde el módulo sensor comprende cuatro sensores de deformación que miden una distancia radial a intervalos angulares uniformes de 45 grados, y donde el procesador (345) se configura de modo que estime el ángulo de desplazamiento ϕ utilizando la siguiente relación:
- $$\varphi = \frac{1}{2} \times \text{atan2} \left(\frac{r_3 - r_1}{r_4 - r_2} \right)$$
4. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, donde cada uno de los cuatro o más sensores de deformación es un sensor de proximidad, con un elemento de detección dispuesto en una superficie radialmente exterior del módulo sensor (320) de modo que esté orientado hacia la superficie del taladro (15s) con un hueco radial pequeño.
5. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 – 4, donde cada uno de los cuatro o más sensores de deformación comprende una viga en voladizo (22a, 22b) fijada a un cuerpo principal del módulo sensor (20), conforme a lo cual la viga en voladizo tiene un elemento de contacto (25) en su extremo libre que se apoya contra la superficie del taladro (15s), y conforme a lo cual la viga en voladizo está dotada de instrumentos medidores con al menos una galga extensométrica para medir la deflexión de la viga.
6. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con la reivindicación 5, donde:
- el cuerpo principal (23) comprende una muesca anular (26) dispuesta junto a una primera región del cuerpo principal, desde donde se extiende cada viga en voladizo (22a, 22b), conforme a lo cual la muesca (26) se configura de modo que actúe como una articulación;
 - el cuerpo principal comprende además un rebaje axial en una cara final de este; y
 - el módulo sensor (20) comprende un elemento cónico (27) que se configura de modo que encaje en el rebaje axial y que se puede desplazar en el rebaje axial, de manera que provoque el desplazamiento de la segunda región del cuerpo principal (23) en una dirección radialmente hacia fuera, para hacer posible que cada viga (22a, 22b) se disponga en el taladro (15) sometida a un pretensado.
7. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con la reivindicación 5 o 6, donde el elemento de contacto (25) en el extremo de cada viga en voladizo tiene una geometría en forma de cúpula.
8. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, donde cada uno de los cuatro o más sensores de deformación está agrupado por parejas con un sensor de deformación adicional que está situado en una posición angular diametralmente opuesta, de modo que formen un primer par de sensores (22a, 22b; 322a, 322e), un segundo par de sensores (322b, 322f), un tercer par de sensores (322c, 322g) y un cuarto par de sensores (322d, 322h).

9. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, donde el módulo sensor (20, 320) se monta en el taladro del rodillo (15) mediante un primer y segundo elemento resiliente (37, 38; 337, 338) separados axialmente.
- 5 10. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, donde el módulo sensor comprende una carcasa cilíndrica (330) fabricada con un material rígido que se moldea de modo que se ajuste en el interior del taladro del rodillo (15) con un huelgo radial pequeño y de modo que esté totalmente contenido dentro de las dimensiones del rodillo.
- 10 11. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, donde el módulo sensor comprende además una antena (347) para transmitir la carga radial calculada por el procesador (345) a un receptor situado fuera del rodamiento.
- 15 12. El rodillo dotado de sensores de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, donde el módulo sensor (20, 320) comprende un primer conjunto de al menos cuatro sensores de deformación dispuestos circunferencialmente alrededor del eje geométrico (21) del módulo sensor en una primera región axial del rodillo (10) y comprende además al menos un segundo conjunto de al menos cuatro sensores de deformación dispuestos circunferencialmente alrededor del eje geométrico del módulo sensor en una segunda región axial del rodillo, separada axialmente de la primera región, y donde el procesador se configura de modo que calcule la carga radial que actúa sobre el rodillo en la primera y segunda región axial.
- 20 13. Un rodamiento que comprende un rodillo dotado de sensores (10) de acuerdo con cualquier reivindicación anterior.

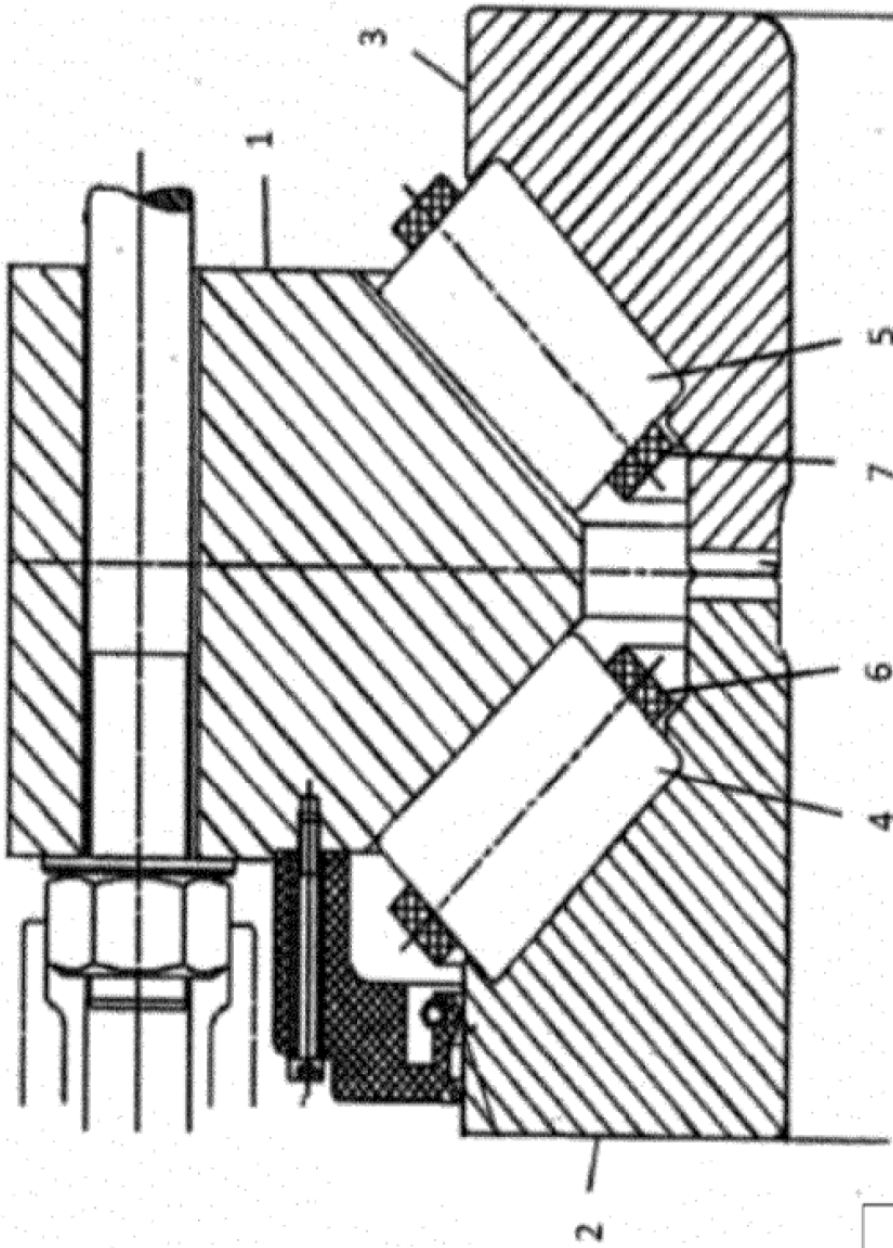


Figura 1

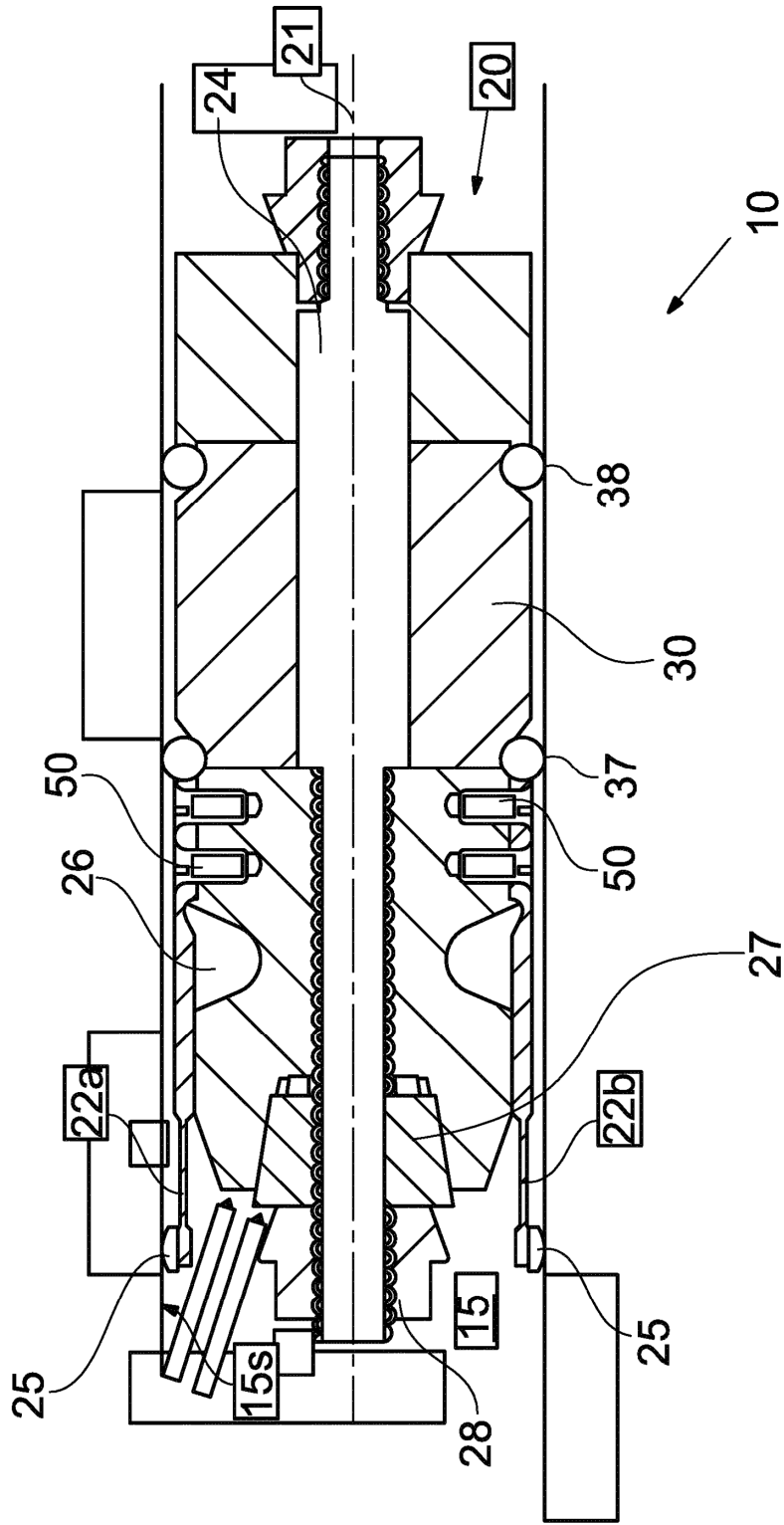


Fig. 2

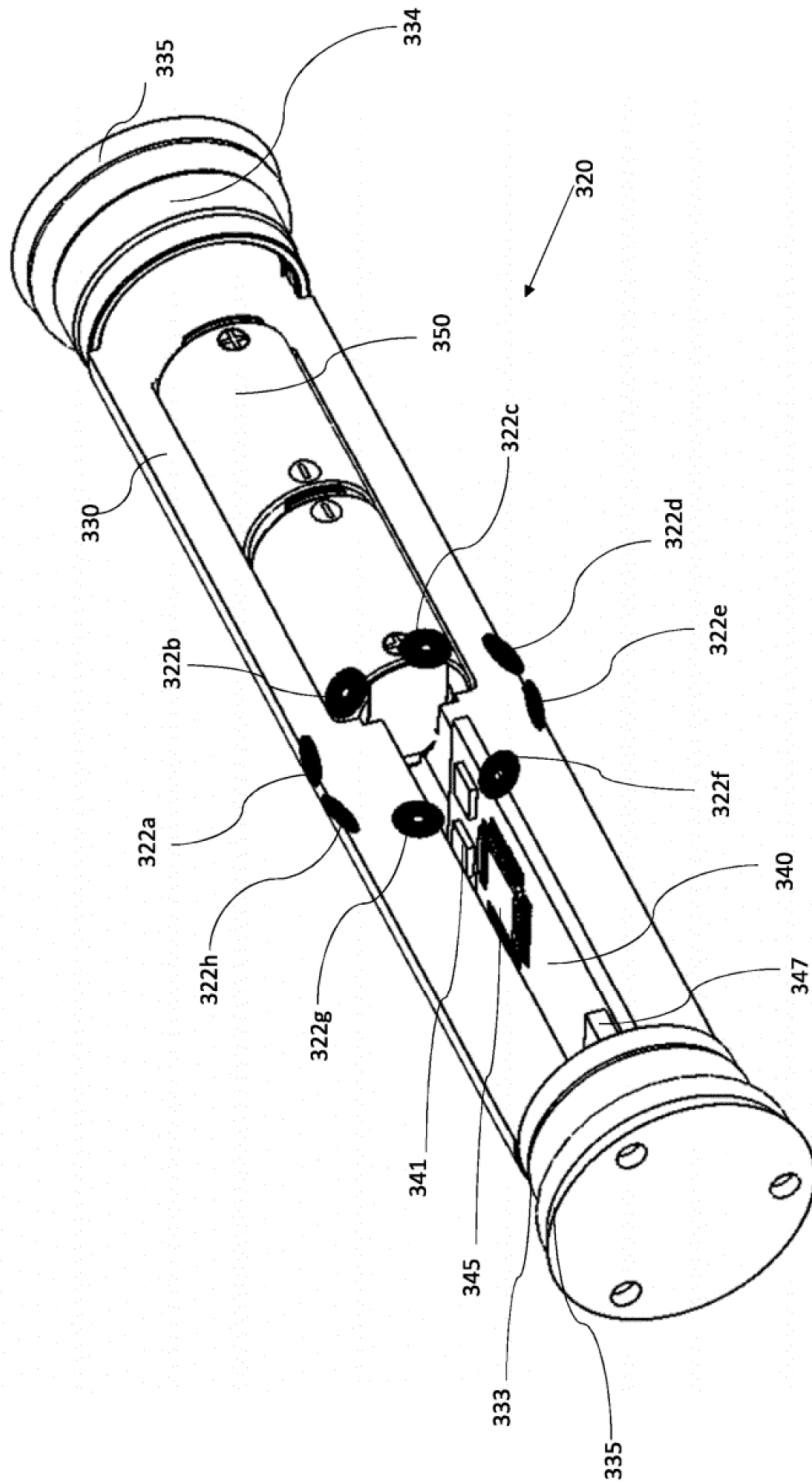


Figura 3