



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 354 147**

51 Int. Cl.:
G01M 13/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **00116952 .3**
96 Fecha de presentación : **07.08.2000**
97 Número de publicación de la solicitud: **1111363**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **27.06.2001**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para el análisis de rodamientos en máquinas.**

30 Prioridad: **16.08.1999 DE 199 38 722**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
10.03.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
10.03.2011

73 Titular/es: **PRÜFTECHNIK Dieter Busch AG.**
Oskar-Messter-Strasse 19-21
85737 Ismaning, DE

72 Inventor/es: **Lysen, Heinrich**

74 Agente: **Lehmann Novo, María Isabel**

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 EL ANÁLISIS DE RODAMIENTOS EN MÁQUINAS

La presente invención se refiere a un procedimiento y un dispositivo para el análisis de rodamientos incorporados en máquinas, en los que por medio de un sensor es detectada una señal, que es generada a través del movimiento del cuerpo rodante, y es evaluada la amplitud de la señal para calcular la presencia y, dado el caso, la profundidad de un daño en una superficie de rodadura del rodamiento.

Los daños sobre la superficie de rodadura de segmentos de rodamientos conducen, durante el funcionamiento del cojinete, cada vez que un cuerpo rodante rueda sobre el lugar dañado, a una excitación a vibración del rodamiento y de los elementos de la máquina acoplados mecánicamente con él. En este caso, por medio de un registrador de la aceleración acoplado, por ejemplo, en el soporte de cojinete, calcula una señal de aceleración, que resulta a partir de la desviación o bien del consumo de fuerza del cuerpo rodante en el lugar del daño. Para la diagnosis del estado del rodamiento es interesante en particular la profundidad de los daños existentes.

Se conoce una visión general sobre procedimientos de diagnosis de vibraciones para rodamientos a partir del Capítulo 6.1 de "Schwingsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen" de Ulric Klein, publicado por la Verein für Betriebsfestigkeitsforschung, Verlag Stahl – Eisen, Dusseldorf 1998. Allí se puede encontrar, por ejemplo, una descripción de técnicas de registro de resonancia, en las que la señal del sensor es sometida a un filtrado de paso de banda en torno a la frecuencia de resonancia del sensor. Durante la medición del impulso de impacto se lleva a cabo una formación del valor medio de la señal de registro, mientras que en el método SEE se forma la derivación temporal de la aceleración y se analiza su intensidad en la zona de altas frecuencias hasta 300 kHz. En el método de Energía Punta se analizan el valor medio de la aceleración limitado por el paso de banda, la curva envolvente de las amplitudes alternas así como el valor vértice frente al valor efectivo, siendo evaluados los resultados por medio de una normalización determinada empíricamente sobre el número de revoluciones y el diámetro de los cojinetes. En este procedimiento es un inconveniente que apenas se pueden detectar daños en el segmento interior y, además, para determinados tipos de máquinas la normalización no es satisfactoria. Además, en el libro mencionado se describen procedimientos, en los que se evalúan la consistencia de los valores punta de la distribución de las amplitudes o bien la distribución estadística.

Además, para la normalización de la amplitud de la señal de aceleración después de una formación de la curva envolvente en la zona de tiempo se trata de concluir a partir de las resonancias de la estructura o bien de las frecuencias sonoras de los componentes de cojinetes la función de transmisión de la excitación de los daños. Sin embargo, este procedimiento no proporciona resultados satisfactorios, puesto que las resonancias de la estructura o bien las frecuencias sonoras de los componentes del cojinete en el estado no empotrado apenas permiten sacar conclusiones sobre el comportamiento de transmisión del cojinete montado.

Otros ejemplos para la evaluación de la señal de la curva envolvente en la zona de tiempo se encuentran en los documentos US 4 007 630 y US 3 554 012.

Se conoce a partir del documento DE 29 47 937 A1 un procedimiento del tipo indicado al principio para el análisis de rodamientos, en el que se menciona que la altura del impulso de una señal de medición de la vibración obtenida por medio de bandas extensométricas representa una medida para la profanidad del daño.

Se conoce a partir de N. Afshari y col. "Model-based technique for the fault-detection of rolling element bearings using detection filter design and sliding mode technique", *Proceedings of the 1998 37th IEEE Conference on Decision and Control (CDC); Tampa, Florida, USA, Diciembre de 1998, Vol. 3, 1998, páginas 2593-2598, XP 002237459 Proc IEEE Conf Decis Control*, establecer un modelo de vibración de un rodamiento teniendo en cuenta las rigideces de contacto bilaterales de los rodamientos, para evaluar señales de vibración, en el que se utiliza la función de transmisión entre una fuerza provocada por el daño y la señal de vibración correspondiente. El modelo de vibración es utilizado en la evaluación de señales de aceleración medidas para detectar la presencia de un daño; no se realiza una cuantificación del daño.

El cometido de la presente invención es crear un procedimiento para el análisis de rodamientos en máquinas, por medio del cual, a partir de la amplitud de la señal, es posible sacar conclusiones de una manera fiable sobre la profundidad de daños en una superficie de rodadura de rodamientos.

Este cometido se soluciona de acuerdo con la invención por medio de un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1.

En la solución de acuerdo con la invención es ventajoso que a través de la determinación, al menos aproximada, de la función de transmisión se posibilita una normalización realista de la amplitud de la señal, de manera que se posibilita una evaluación fiable de la profundidad del daño.

Las configuraciones preferidas de la invención se deducen a partir de las reivindicaciones dependientes.

Una forma de realización de la invención se explica en detalle a modo de ejemplo con la ayuda de los dibujos adjuntos. En este caso:

La figura 1 muestra de forma esquemática una vista lateral de una máquina con dos rodamientos radiales.

5 La figura 2 muestra una vista frontal de la máquina de la figura 1.

La figura 3 muestra de forma esquemática un modelo de vibración de la máquina de las figuras 1 y 2.

La figura 4 muestra a modo de ejemplo la función de transmisión en función de la frecuencia para un daño del segmento interior o bien un daño del segmento exterior.

10 La figura 5 muestra a modo de ejemplo una función de transmisión en función de la frecuencia para un daño del segmento interior (línea de trazos) así como una función de transmisión linealizada de acuerdo con la invención (línea continua).

La figura 6 muestra lo mismo que la figura 5, pero para un daño del segmento exterior.

La figura 7 muestra de forma esquemática un daño de la superficie de rodadura, sobre el que rueda precisamente un cuerpo rodante.

15 La figura 8 muestra a modo de ejemplo el flujo de información en un dispositivo de análisis de cuerpos rodantes.

La figura 9 muestra de forma esquemática la estructura de un dispositivo de análisis de rodamientos de acuerdo con la invención.

20 La figura 10 muestra la curva ejemplar de un perfil de daño y de las señales correspondientes del recorrido, de la velocidad y de la aceleración así como la suma de ellas; y

La figura 11 muestra las respuestas de la frecuencia de las señales del recorrido, de la velocidad y de la aceleración así como una suma de ellas.

25 La máquina representada en las figuras 1 y 2 comprende un rotor con una masa 1, un árbol con una rigidez 2 y una masa 3, que está conectada con el segmento interior (no representado de un rodamiento 15, un soporte de cojinete con una masa 7 y una rigidez 8, que está conectada con el segmento exterior (no representado) del rodamiento 15, así como un cimiento de máquina con una masa 9, en el que en el soporte de cojinete 7 está acoplado un registrador de la aceleración 10. El rodamiento 15 configurado como cojinete radial comprende varios cuerpos rodantes, que tienen una rigidez de contacto del cuerpo rodante 4 con respecto a su contacto con el segmento interior, una rigidez de contacto del rodamiento 6 con respecto a su contacto con el segmento exterior así como una masa 5. En la figura 1, el sentido de giro del rotor 1 se designa con UPM, la fuerza adicional a la fuerza de la gravedad o bien la carga constante (por ejemplo una fuerza de desequilibrio) se designa con 1.1, el ángulo entre la dirección del registrador 10 de la dirección de la fuerza de la gravedad se designa con 10-9 y el ángulo entre la fuerza adicional y la fuerza de la gravedad se designa con 1.1-9.

35 La figura 3 muestra un modelo de oscilación para la máquina de las figuras 1 y 2, en el que la masa del rotor 1 está acoplada a través de la rigidez del árbol 2 con la masa del árbol 3, en la que las masas de los cuerpos rodantes 5 están acopladas a través de la rigidez de contacto de los cuerpos rodantes 4 (es decir, que las masas de los cuerpos rodantes 5 están acopladas a través de la rigidez de contacto 4 con el segmento interior). Además, las masas de los cuerpos rodantes 5 están acopladas a través de la rigidez de contacto de los cuerpos rodantes 6 con la masa del soporte de cojinete 7 (es decir, que las masas de los cuerpos rodantes 5 están acopladas a través de la rigidez de contacto 6 con el segmento exterior), de manera que la masa del soporte de cojinete 7, en la que está acoplado el registrador de la aceleración 10, está acoplada a través de la rigidez del soporte de cojinete 8 con la masa del cimiento de la máquina 9. Adicionalmente a la fuerza de la gravedad de las masas 1, 3, 5, 7 y 9, en el sistema actúa la masa adicional 1.1 (por ejemplo, un desequilibrio) sobre la masa del rotor 1. El sistema de la figura 3 tiene tres frecuencias de resonancia esenciales, a saber, la resonancia designada con 55 o bien a frecuencia de resonancia de los cuerpos rodantes 5, la resonancia designada con 37 o bien la frecuencia de resonancia entre la masa del árbol 3 y la masa del soporte de cojinete 7 (designada a continuación como resonancia del cojinete) así como la resonancia designada con 19 o bien la frecuencia de resonancia entre la masa del rotor 1 y la masa del cimiento 9. Las resonancias de la estructura o bien las resonancias sonoras de los elementos individuales de la máquina o bien de los elementos de cojinete, es decir, las resonancia en el estado desacoplado o bien libre, no tienen ninguna importancia en el modelo de oscilación de la figura 3 utilizado para la evaluación de la señal del registrador 10.

Con respecto a las rigideces de los cuerpos rodantes 4 y 6 hay que tener en cuenta las siguientes particularidades. Las rigideces de contacto de los cuerpos rodantes 4 y 6 son dependientes de la fuerza en cierta extensión, de manera que la fuerza depende del número de los cuerpos rodantes que soportan en ese momento. El número de los cuerpos rodantes de soporte depende de nuevo del aire del cojinete, es decir, del juego radial entre el segmento interior y el segmento exterior, y de la fuerza total sobre el cojinete. La fuerza total sobre el cojinete, que comprende esencialmente la fuerza continua (fuerza de la gravedad), la fuerza de desequilibrio, la fuerza axial (designada con F_a en la figura 1) y la fuerza centrífuga, es una función del número de revoluciones y del tiempo debido a la fuerza centrífuga y a la fuerza de desequilibrio, de manera que la fuerza centrífuga solamente actúa sobre la rigidez de contacto del segmento exterior 6 de los cuerpos rodantes. La distribución de la fuerza total es una función de los diámetros de los cuerpos rodantes y de su forma.

Con 44 y 66, respectivamente, se designa en la figura 3 un daño de contacto del segmento interior y un daño de contacto del segmento exterior, respectivamente, de manera que a continuación se supone que en este caso se trata de un daño en la superficie de rodadura del segmento interior o bien de un daño en la superficie de rodadura del segmento exterior. De la misma manera, se pueden formar daños de contacto naturalmente también a través de un daño sobre la superficie de rodadura de un cuerpo rodante, apareciendo entonces, sin embargo, el daño de acuerdo con la rodadura del cuerpo rodante de forma alterna en el contacto del segmento interior y en el contacto del segmento exterior. Tales casos no se consideran aquí para mayor simplicidad. En la figura 7 se representa de forma esquemática un daño en la superficie de rodadura del segmento exterior y en la superficie de rodadura del segmento interior como cavidad en la superficie de rodadura, en la que un cuerpo rodante 5 se sumerge con un diámetro 52. La profundidad del daño 51 resulta como el recorrido en el que el cuerpo rodante 5 se "sumerge" o bien se desvía al rodar sobre el daño en dirección radial con respecto a la superficie de rodadura 56 no dañada. Como profundidad del daño 100 % efectiva debe considerarse a continuación la profundidad del daño, a la que un cuerpo rodante 5 se puede sumergir precisamente tan profundamente en el daño que no soporta ya la suma de las fuerzas, que actúan en ese momento sobre el mismo, es decir, que con una profundidad del daño 100 % efectiva, la superficie de rodadura en el lugar del daño no contribuye ya a la acción del cojinete y en este sentido está dañada el 100 %. Con respecto a las fuerzas que actúan en ese momento, es razonable a este respecto que, por lo demás, nunca se calcule una profundidad del daño del 100 % y, sin embargo, los cojinetes podrían fallar (es posible una profundidad del daño mayor del 100 %, cuando varios cuerpos rodantes no soportan ya al mismo tiempo, por ejemplo en caso de erosión por inactividad). Los fallos de contrato 44 ó 66 en la figura 3 se pueden entender en este sentido como 100 % efectivo, es decir, que en este lugar la superficie de rodadura no soporta ya.

En la figura 10 se representa de forma esquemática qué señal de recorrido s , señal de velocidad v y señal de aceleración ' a ' generan un daño 57 en una superficie de rodadura 56 durante la rodadura de un cuerpo rodante 5 sobre la misma, suponiendo una cavidad con cantos empinados, que es relativamente larga con respecto al diámetro del cuerpo rodante 52. En caso de entrada o bien de salida desde el daño 57, el cuerpo rodante 5 genera en este caso en la señal de aceleración ' a ', respectivamente, una excitación del tipo de impulso, mientras que en la señal de la velocidad v aparece una excitación más amplia más uniforme. En cambio, en la señal del recorrido se muestra una excitación ancha plana, que corresponde esencialmente a un filtrado de paso bajo del perfil del daño. De manera correspondiente, la señal de aceleración ' a ' es adecuada sobre todo para daños cortos con relación al diámetro del cuerpo rodante 52, mientras que la señal de la velocidad v es adecuada para daño medio y la señal del recorrido s es adecuada para daños largos.

En la figura 4 se muestran las funciones de transmisión en función de la frecuencia para un fallo de contacto del segmento interior 44 o bien un fallo de contacto del segmento exterior 66, es decir, la relación en función de la frecuencia entre una modificación de la fuerza 44 y 66 generada por el daño y la aceleración correspondiente en el lugar de acoplamiento del registrador de la vibración 10, como resultan a partir del modelo de oscilación de la figura 3. De ello se deduce que el comportamiento de transmisión para un daño del segmento interior (designado con 10.44 en la figura 4) se diferencia del comportamiento de un daño del segmento exterior (designado con 10.66 en la figura 4) sobre todo en la zona más allá de la frecuencia de resonancia del cuerpo rodante 55, donde una excitación, que es atribuible a un daño del segmento interior, se amortigua a medida que se incrementa la frecuencia, mientras que no se amortigua una excitación, que es atribuible a un daño del segmento exterior. Ambos tipos de daños o bien clases de daños tienen en común que en la zona entre la resonancia del cojinete 37 y la resonancia del cuerpo rodante 55 la función de transmisión es plana, es decir, que la aceleración en el lugar de acoplamiento del registrador de la aceleración 10 es aproximadamente proporcional a la modificación de la fuerza 44 o bien 66 generada por el daño, mientras que en la zona por debajo de la resonancia del cojinete 37 se amortigua la propagación de ambas excitaciones a medida que se reduce la frecuencia. Por lo tanto, sin corrección de la respuesta de frecuencia o bien de la función de transmisión para daños del segmento exterior o bien del segmento interior, solamente en la zona entre la resonancia del cojinete 37 y la resonancia del cuerpo rodante 55, a partir de la amplitud de la aceleración, como se calcula con el registrador 10, se podrían sacar conclusiones sobre la profundidad del daño (que está enlazada a través de la rigidez de contacto con la modificación de la fuerza en el lugar del daño), puesto que solamente en esta zona existe la proporcionalidad necesaria entre la excitación provocada por el daño (modificación de la fuerza 44 o bien 66, es decir, la profundidad del daño) y la señal de aceleración. No obstante, puesto que, en general, aparecen señales de daños relevantes también fuera de esta gama de frecuencia, es necesario para una escala o bien evaluación fiable de la amplitud de las señales de daños linealizar la respuesta de la frecuencia o bien la función de transmisión de daños en toda la gama de frecuencia, en la que pueden aparecer señales de daños, como se representa en las figuras 5 y 6 con la línea continua. En las figuras 5 y

6 se representa adicionalmente por medio de la línea discontinua la respuesta de la frecuencia no corregida correspondiente para un daño de contacto del segmento interior o bien para un daño de contacto del segmento exterior, de manera que adicionalmente a la figura 4 hay que tener en cuenta todavía la resonancia del registrador 10 (en las figuras 5 y 6 se designa la frecuencia de resonancia correspondiente con el signo de referencia 10).

5 Con el signo de referencia 54' se designa en las figuras 5 y 6 una frecuencia, que se designa a continuación como "frecuencia máxima del daño muy rica en energía", en la que ésta se designa de la siguiente manera. A partir de la profundidad del daño 100 % efectiva (designada con 51 en la figura 7) y el diámetro de los cuerpos rodantes 52 se puede calcular el segmento circular introducido en el daño (o bien aplanado). De ello resulta la forma de exploración designada en la figura 7 con el signo de referencia 53, que corresponde al perfil de la superficie de rodadura 55, como se ve a partir del cuerpo rodante 5 que rueda sobre el daño y, por lo tanto, corresponde a la fuerza en el cuerpo rodante 5. Con 54 se designa en la figura 7 la longitud del segmento circular entrante, de manera que el valor inverso de la longitud 54 corresponde a la frecuencia local del daño 100 % efectivo más corto posible, que se puede convertir a través de la velocidad de rodadura del cuerpo rodante 5 en una frecuencia (tiempo). La frecuencia obtenida de esta manera corresponde a la frecuencia máxima del daño 54' más rica en energía. Se entiende que la forma de exploración o bien la forma del daño 53 contiene también todavía porciones de frecuencia más elevadas y, por lo tanto, también todavía señales de daños de aceleración con frecuencias más elevadas, correspondiendo, sin embargo, a estas porciones de frecuencias más elevadas una energía más reducida que a la frecuencia 54'. Por este motivo, para una evaluación fiable de las amplitudes de las señales es suficiente que la función de transmisión 10.44' o bien 10.66' sea linealizada al menos hasta esta frecuencia máxima del daño 54' más rica en energía, como se representa en las figuras 5 y 6.

10 En una gama de frecuencia, en la que la función de transmisión es lineal, es decir, plana en la representación de las figuras 5 y 6, la profundidad del daño 51, puesto que entonces la modificación de la fuerza 44 o bien 66 en el lugar del daño durante la rodadura del cuerpo rodante 5 sobre dicho lugar es proporcional a la aceleración medida por medio del sensor 10, se puede calcular a partir de la amplitud de la aceleración medida y a partir de la rigidez de contacto del cuerpo rodante 4 y 6, respectivamente, de manera que, puesto que el sensor 10 detecta la aceleración en la masa del soporte de cojinete 7, se puede normalizar todavía sobre ésta. La profundidad del daño se realiza de esta manera, por lo tanto, como amplitud de la señal de aceleración por la masa del soporte de cojinete dividida por la rigidez de contacto del cuerpo rodante. Con la respuesta de la frecuencia 10.44 o bien 10.66 no corregida, esto se aplica, como se ha mencionado anteriormente, sólo para la gama de frecuencias entre la resonancia del cojinete 37 y la resonancia del cuerpo rodante 55. Estas frecuencias de resonancia 37 y 55 se pueden calcular de nuevo por medio del modelo de vibración cuando se conocen los parámetros que entran en el modelo de oscilación de la figura 3. En cambio, fuera de esta zona es necesaria una linealización de la función de transmisión, para poder deducir la profundidad del daño a partir de la amplitud de la señal de aceleración. Para una descripción completa de la máquina de las figuras 1 y 2 por medio del modelo de oscilación de la figura 3 es necesario el conocimiento de la fuerza continua (fuerza de peso), de la fuerza de desequilibrio, dado el caso de la fuerza axial F_a , de la fuerza centrífuga de los cuerpos rodantes, de las rigideces 4, 6, 2 o bien 8 de los cuerpos rodantes, del árbol o bien del soporte de cojinete así como de las masas 7, 1, 5 o bien 9 del soporte de cojinete, del rotor, de los cuerpos rodantes o bien del cimiento. En este caso, no todos los parámetros tienen la misma importancia para la evaluación de las amplitudes y se pueden estimar o bien omitir. No obstante, el parámetro más importante para la evaluación de la amplitud es la rigidez de contacto del cuerpo rodante 4 ó 6, de manera que ésta es tenida en cuenta en cualquier caso, siendo tenida en cuenta, sin embargo, por ejemplo, en el caso de una evaluación de la señal con respecto a la amplitud del daño del segmento interior, dado el caso, solamente la rigidez de contacto del segmento interior 4 y siendo tenida en cuenta solamente la rigidez de contacto del segmento exterior en un análisis relacionado con daños del segmento exterior 6.

No obstante, con preferencia se tienen en cuenta todos los parámetros mencionados, para obtener un modelo de oscilación de la máquina lo más acertado posible y de esta manera poder corregir la amplitud de la señal de aceleración de la manera más fiable posible con respecto a la función de transmisión, para poder indicar de la manera más exacta posible la profundidad del daño responsable de la señal de aceleración.

La figura 8 reproduce de forma esquemática el flujo de daños para un sistema de análisis de rodamientos, en el que se forman magnitudes características o bien parámetros relevantes para un tipo determinado de máquina o bien para una serie de fabricación determinada en función del diámetro del cojinete (esto se indica en 803) y se registran en una base de datos 802. En el caso de que haya que analizar una máquina, que no está todavía tipificada de esta manera, se pueden registrar las magnitudes características necesarias en el lugar asistido por ordenador (esto se indica con 804), introduciendo los datos obtenidos en la base de datos 802 y, si ya han sido registradas varias máquinas de este tipo, tipificándolos de acuerdo con 803. 801 designa en la figura 8 el flujo de datos del fabricante de la máquina o bien del cojinete, mientras que 805 designa el flujo de datos en el caso de reconocimiento de casos de daños verificados.

La base de datos 802 contiene, por ejemplo, datos del cojinete de la siguiente manera: cojinetes combinados son divididos en los tipos de cojinetes individuales y son evaluados sucesivamente. En el caso de cojinetes de varias series se tiene en cuenta el número de serie en la rigidez total y en el número de los rodamientos de soporte. La rigidez del cojinete indicada por el fabricante del cojinete se divide en una rigidez de contacto del segmento interior y una rigidez de contacto del segmento exterior, de manera que la suma de las constantes de resonancia permanece constante y de manera que se tienen en cuenta la forma de los rodamientos y la superficie de rodadura a través de la

flexibilidad, pudiendo tenerse en cuenta, por ejemplo, las siguientes “rigideces de la flexibilidad”: área del cilindro: $cs = 32$, ranura esférica: $cs = 8$, superficie esférica: $cs = 2$. Además, se tienen en cuenta el número así como la longitud o masa de los cuerpos rodantes, de los diámetros del círculo primitivo, de los diámetros de los cuerpos rodantes, del ángulo de contacto para las frecuencias de rodadura así como el aire del cojinete.

5 En la detección de una máquina no tipificada todavía en el lugar según 804 se puede proceder, por ejemplo, de la siguiente manera: en primer lugar se edita el modelo de oscilación según las figuras 1, 2 y 3, respectivamente, siguiendo a partir de la entrada de la geometría de la máquina las masas, fuerzas y rigideces del árbol. Se miden las relaciones de transmisión o bien la función de transmisión entre el árbol y el soporte de cojinete o bien el soporte de cojinete y el cimient, pudiendo preverse un segundo registrador, en particular en el cimient del cojinete, para medir las relaciones de transmisión con la máquina en funcionamiento, o siendo realizado un intento de tope con la máquina parada, siendo excitado a modo de impulso un elemento de la máquina y siendo detectada la respuesta del sistema con el registrador de la aceleración. No obstante, en principio se podría modelar también el sistema formado por el cojinete y la máquina por medio del procedimiento de elementos finitos. A través de esta transmisión de las relaciones de transmisión entre el árbol y el soporte de cojinete o bien el soporte de cojinete y el cimient, el modelo de oscilación es adecuado también para el tratamiento de sistemas distribuidos de oscilación – resorte – masa.

15 A continuación se determinan a partir de los datos del cojinete valores de estimación para las frecuencias de resonancia. Si con estos valores de estimación se encuentran daños del cojinete, se miden las frecuencias de resonancia aparecidas y se mejoran los valores de estimación. Puesto que, como se ha mencionado ya anteriormente, no siempre todos los parámetros del modelo de oscilación son relevantes para el resultado y, además, están enlazados matemáticamente entre sí, con frecuencia se puede prescindir de una parte de los parámetros o solamente es necesaria una estimación aproximada. El sistema de análisis está configurado en este caso de tal forma que indica al usuario qué datos son necesarios o bien qué datos pueden ser utilizados como sustitución.

20 Los valores calculados de esta manera son computados entre sí y finalmente son corregidos con el ángulo del registrados con respecto a la dirección resultante de la carga (multiplicación por $1 - \cos\alpha$), de manera que se obtienen el daño y las magnitudes características de la máquina detectada.

25 Con preferencia la base de datos 802 está configurada de tal forma que está implementada una “función autodidacta”, en la que los parámetros que entran en el modelo de vibración son verificados por medio de la verificación de los resultados suministrados por el modelo y, dado el caso, corregidos. En este caso, los datos memorizados en la base de datos 802 son evaluados con un factor de confianza, que reproduce el origen y, por lo tanto, la fiabilidad del parámetro respectivo. Así, por ejemplo, incluso los datos medidos posteriormente pueden ser evaluados con 100 %, los datos del fabricante con 90 %, los datos medidos indirectamente con 80 %, los datos (803) calculados a partir de una tipificación con 70 %, los datos indirectos del fabricante, que son calculados a partir de otros de otros datos, con 60 %, los datos calculados a partir de datos de otros fabricantes con 50 %, los datos medidos varias veces indirectamente con 40 %, las estimaciones con 30 %, los datos de origen desconocido con 20 % y los datos por defecto con 10 %. Después de cada medición realizada con éxito, es decir, cuando se ha encontrado un daño, todos los datos de la máquina y del cojinete (804) retornan a la base de datos, de manera que se realiza un cálculo de compensación teniendo en cuenta (ponderando) los factores de confianza. No obstante, en este caso solamente se corrigen los datos, cuyo factor de confianza es inferior al 100 %. También los factores de confianza se adaptados de manera correspondiente al resultado de la verificación, teniendo en cuenta durante la corrección de los datos el factor de confianza antiguo y el factor de confianza nuevo. Los factores de confianza se pueden adaptar, por ejemplo, colocando el factor de confianza en (valor de confianza antiguo + 100 %) / 2 en el caso de que se encuentre un daño.

30 En particular, en el caso de un daño calculado por el sistema, el cojinete correspondiente puede ser desmontado e inspeccionado, para verificar el daño. Si en este caso se confirma el resultado del análisis del sistema, se deposita un mensaje de éxito 805 y los datos correspondiente son corregidos con el error residual, pudiendo elevarse su factor de confianza, por ejemplo, de nuevo a (factor de confianza antiguo + 100 %) / 2. En el caso de que no se confirme el diagnóstico de daños del sistema, deben investigarse sus causas.

35 En general, a través del modo de proceder descrito se mejora continuamente la base de datos, con lo que los datos serían cada vez más dignos de confianza y se puede mejorar la exactitud de la diagnosis.

40 La linealización de la función de transmisión de daños mostrada en las figuras 5 y 6 se puede realizar, por ejemplo, formando a partir de la función de transmisión calculada la función inversa a ella, para filtrar de esta manera la señal de aceleración medida, para calcular la amplitud “auténtica” del daño y, por lo tanto, la profundidad del daño.

45 No obstante, la linealización de la función de transmisión se puede conseguir también, por ejemplo, formando a partir de la señal de aceleración ‘a’ medida a través de integración la señal de la velocidad v así como la señal del recorrido s y formando con ponderación determinada la suma de estas tres señales (ver la figura 10). Si en este caso se selecciona de forma correcta la ponderación de las señales individuales, resulta una reconstrucción del perfil de daños (ver la parte superior e inferior de la figura 10). La ponderación correcta de las señales se puede calcular a partir del modelo de vibración, siendo calculadas las funciones de transmisión, dependientes de la frecuencia, para la señal de la velocidad y la señal del recorrido de una maneras similar que para la señal de aceleración y siendo ponderadas

entonces la señal de la velocidad y la señal del recorrido de tal manera que sus funciones de transmisión a la resonancia del cojinete 37 tienen el valor 1, es decir, una amplificación 1, ver la figura 11, en la que se representan las funciones de transmisión para un daño del segmento interior. En este caso, para la señal acumulativa resulta la respuesta de la frecuencia indicada en la figura 11 con la línea continua gruesa, que es plana, es decir, lineal al menos hasta la resonancia del cuerpo rodante 55. En particular, la adición de la señal de aceleración 'a' y de la señal del recorrido s, en virtud del desplazamiento de fases de 180° entre las dos señales, tiene como consecuencia la supresión de la resonancia del cojinete 37, ver la figura 11.

En la figura 9 se representa de forma esquemática un dispositivo, en el que en un rodamiento 100 con un segmento interior 102, un segmento exterior 104 y varios cuerpos rodantes 106 se registra, por medio de un registrador de la aceleración 10, que está acoplado con el segmento exterior 104, una señal de aceleración, que es provocada por el movimiento de los cuerpos rodantes 106. La señal de salida del sensor 10 es distribuida sobre cuatro derivaciones, siendo alimentada la primera a un sumador 110, después de pasar a través de un paso bajo 108 con una frecuencia angular, que corresponde a la frecuencia máxima del daño 54' más rica en energía. Por medio del paso bajo 108 se suprimen las porciones de alta frecuencia de interferencia, en particular la resonancia del registrador. Otra derivación es alimentada a un integrador 112, cuya señal de salida es liberada, por medio de una fase de supresión de periodos giratorios 114, de porciones de señales que tienen la periodicidad de la rotación del árbol alojado. La señal de la velocidad obtenida de esta manera es alimentada, por una parte, al sumador 110 y, por otra parte, a un sumador 116 así como a un integrador 118. La señal de salida del integrador 118, que corresponde a la señal del recorrido s, es alimentada tanto al sumador 110 como también al sumador 116. Una tercera derivación de la señal de aceleración 'a' medida es alimentada al sumador 116, mientras que una cuarta derivación es sometida a una diferenciación doble por medio de un diferenciador 120 y de un diferenciador 122. Las señales de salida de los diferenciadores 120 y 122, respectivamente, son alimentadas al sumador 116.

Las amplificaciones de los integradores 112 y 118 están ajustadas de tal forma que dan como resultado en el sumador 110 la ponderación de las señales a, v y s formada de acuerdo con la especificación mencionada anteriormente. La ponderación correcta para la primera y la segunda derivación de la aceleración en la suma formada en el sumador 116 resulta a través del ajuste correspondiente de los dos diferenciadores 120 y 122, siendo calculada la respuesta de la frecuencia de la primera y de la segunda derivación y siendo seleccionada la ponderación de tal forma que las dos derivaciones tienen la amplificación 1 a la resonancia del cuerpo rodante 55, para compensar la caída de la función de transmisión para la señal de aceleración o bien de la señal acumulativa formada por a, v y s más allá de la resonancia de los cuerpos rodantes 55.

La señal de salida del sumador 110 sirve para la evaluación de la señal con respecto a datos de contacto exterior o bien a daños del segmento exterior, mientras que la señal de salida del sumador 116 se utiliza para la evaluación de la señal con respecto a daños de contacto interior o bien daños del segmento interior. En general, en la preparación de la señal descrita hasta ahora se trata de una preparación de la señal proporcional a la longitud del daño, en la que a través de la vía de transmisión desde el lugar del daño hacia el registrador 10 se compensan las distorsiones de la señal realizadas a través de las funciones de transmisión no lineales, de manera que se puede reconstruir la señal "auténtica" del daño. En la señal de salida de los sumadores 110 y 116 se trata de tal señal de daño reconstruida para daños del segmento exterior y daños del segmento interior, respectivamente, que son de esta manera proporcionales a la longitud del daño o bien acordes con la longitud del daño.

A partir de esta señal reconstruida se eliminan ahora, por decirlo así, por medio de dos filtros de formación de los periodos 124, porciones perturbadoras de las señales, que tienen los periodos de la rotación del árbol alojado. El filtrado de señales con respecto a porciones periódicas de las señales se describe en detalle en una solicitud de patente paralela. De acuerdo con ello, en un filtro de formación de periodos se trata de un dispositivo con una entrada de señales, que alimenta a una memoria anular, que se forma por elementos de memoria dispuestos cíclicamente, que están conectados de acuerdo con la frecuencia de rotación de manera sucesiva, respectivamente, con la entrada, así como un dispositivo de sincronización, para llevar la frecuencia de rotación a coincidencia con la duración de los periodos de las porciones de las señales buscadas. Tan pronto como el filtro de formación de periodos está "estabilizado", es decir, después de un número determinado de revoluciones, el contenido de los elementos de memoria forma un tren de señales con la longitud buscada de los periodos, que contiene esencialmente sólo las porciones de las señales (promediada o bien sumadas sobre varios periodos) con esta duración de los periodos. Los filtros de formación de periodos 124 están sincronizados a la frecuencia de giro del árbol. La señal de salida del sumador 110, liberada de esta manera de porciones de periodos giratorios, es alimentada, por una parte, a otro filtro de formación de periodos 126, que está sincronizado a la frecuencia de rodadura del segmento exterior, para separar de la señal todas las porciones de señales, que tienen la periodicidad de un periodo de rodadura del segmento exterior, para continuar evaluando estas porciones de la señal. En este caso, la señal de salida del filtro de formación de periodos 126 es alimentada, por una parte, directamente a la unidad de diagnóstico 128 y, por otra parte, es alimentada a una unidad de clasificación 130, en la que la señal es procesada de tal forma que es clasificada con respecto a su amplitud, para eliminar de la señal estructuras que son atribuibles a diferencias de fases durante la obtención de la señal en el filtro de formación de periodos 126. Durante la clasificación de la amplitud, los valores discretos de la amplitud (en los filtros digitales de formación de periodos la señal ya está digitalizada, en otro caso se digitaliza con anterioridad) del tren de señales suministrado por el filtro de formación de periodos 126 son clasificados de acuerdo con su magnitud, es decir,

que resulta un tren de señales de la misma longitud, que comienza ahora, por ejemplo, con la amplitud máxima y termina con la amplitud mínima.

5 La señal de salida de la fase de clasificación 130 es alimentada de la misma manera a la unidad de diagnóstico 128 y representa un eventual daño del segmento exterior. Además, la señal de salida del sumador 110 liberada de porciones de periodos giratorios por medio del filtro de formación de periodos 124 es alimentada a una unidad de clasificación 132, donde la señal es sometida a una clasificación de la amplitud de acuerdo con la magnitud de la amplitud. La señal de salida del clasificador 132 representa daños, que pueden proceder tanto del segmento exterior como también de cuerpos rodantes. Puesto que las señales de salida de los dos clasificadores 130 y 132 son sustraídas una de la otra en un restador 134, se puede obtener una señal que representa daños de cuerpos rodantes. Para 10 conseguir una resolución con respecto a cuerpos rodantes individuales, se alimenta la señal de salida del diferenciador 134 a otro filtro de formación de periodos 136, que está sincronizado a la frecuencia de rotación de la jaula de cojinete, siendo alimentada su señal de salida finalmente también a la unidad de diagnóstico 128. La señal de salida del sumador 116 liberada de porciones de periodos giratorios es alimentada a un filtro de formación de periodos 138, que está sincronizado a la frecuencia de rodadura del segmento interior, siendo alimentada la señal obtenida de esta manera del 15 daño del segmento interior, por una parte, directamente a la unidad de diagnóstico 128 y siendo clasificada, por otra parte, de acuerdo con la amplitud en un clasificador 140 con objeto de la corrección de diferencias de fases.

Por último, en la unidad de diagnóstico 128 se calcula la profundidad del daño a partir de la amplitud de la señal, mientras que a partir de la curva de la señal se calcula la longitud del daño. La profundidad del daño y la longitud del 20 daño se pueden registrar como función del tiempo, pudiendo extrapolarse entonces a partir de la curva de tiempo calculada el instante de fallo del cojinete, suponiendo como instante del fallo el instante, en el que un segmento de cojinete solamente presenta todavía zonas de las superficies de rodaduras, en las que un cuerpo rodante sumergido al máximo no transmite ninguna fuerza sobre el segmento de cojinete dañado, es decir, que el 100 % de la superficie de rodadura está dañada efectivamente al 100 %.

25 Para mejorar la evaluación de la señal a altas frecuencias, se puede someter la señal de salida del registrador 10 también antes de la preparación de la señal descrita a una formación de la curva envolvente.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento dispositivo para el análisis de rodamientos (15, 100) incorporados en máquinas, en el que por medio de un sensor (10) es detectada una señal de aceleración, que es generada a través del movimiento de rodadura, y es evaluada la amplitud de la señal de aceleración para calcular y está presente un daño en una superficie de rodadura del rodamiento (56) y, en el caso de que se determine tal daño, calcular la profundidad del año, caracterizado porque se utiliza un modelo dinámico del rodamiento en la máquina, en el que entran al menos rigideces de contacto (4, 6) bilaterales de los rodamientos, para linealizar la función de transmisión entre una fuerza provocada por el daño y la señal de aceleración del sensor correspondiente en toda la gama de frecuencia, en la que pueden aparecer señales de daños, en el que la función de transmisión linealizada es utilizada para el cálculo de la profundidad del daño a partir de la amplitud de la señal de aceleración.
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la función de transmisión se calcula en función del lugar del daño.
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizado porque se calcula una función de transmisión propia para daños sobre cada uno de los dos segmentos del cojinete.
4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado porque en el modelo dinámico se introducen las fuerzas continuas, las fuerzas de desequilibrio, las fuerzas centrífugas y, dado el caso, las fuerzas axiales, que actúa sobre el cojinete (15, 100) y en particular sobre los cuerpos rodantes (5, 106) al menos en la medida en que exceden un valor umbral determinado.
5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque en el modelo dinámico entra las masas (1, 3, 7, 9) y las rigideces (2, 8) de los elementos de la máquina acoplados con el cojinete (15, 100).
6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque a partir del modelo dinámico se calcula la profundidad de un daño, que conduce, en las condiciones que predominan en este momento, precisamente a que un rodamiento (5, 106) no transmita ya ninguna fuerza.
7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 6, caracterizado porque para la diagnosis del cojinete, se relaciona la profundidad del daño calculado actualmente con la profundidad del daño que conduce, en las condiciones que predominan actualmente, precisamente a que un rodamiento (5, 106) no transmita ya ninguna fuerza.
8. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la porción de la señal con el periodo de rodadura sobre el daño es separada de la señal del sensor y esta porción de la señal es sometida a la evaluación de la amplitud.
9. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque a partir de la señal del sensor se eliminan porciones con periodo determinado y la señal residual es sometido a la evaluación de la amplitud.
10. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado porque a partir de la porción de la señal separada se calcula la extensión espacial de un daño.
11. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 10, caracterizado porque la longitud del daño se calcula por medio de clasificación de la porción de la señal separada de acuerdo con sus amplitudes.
12. Procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 8 a 11, caracterizado porque la separación se realiza por medio de un filtro de formación de periodos (126, 136, 138), que comprende una entrada para la señal, que alimenta a una memoria anular giratoria, que se forma por elementos de memoria dispuestos cíclicamente, que están conectados de acuerdo con la frecuencia de rotación de forma sucesiva, respectivamente, con la entrada, y una instalación de sincronización, para llevar la frecuencia de rotación a coincidencia con la duración del periodo de rodadura sobre el daño.
13. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en tanto que están relacionadas con la reivindicación 10, caracterizado porque la profundidad del daño y la longitud del daño se calculan como función del tiempo.
14. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado porque a partir de la curva temporal calculada de la profundidad del daño y de la longitud del daño se extrapola el instante de fallo del cojinete.
15. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 14, caracterizado porque el instante del fallo se supone como el instante en el que un segmento del cojinete presenta solamente todavía zonas de la superficie de rodadura, en

las que un rodamiento (5, 106) sumergido al máximo no transmite ya ninguna fuerza sobre el segmento de cojinete (102, 104) dañado.

5 16. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque al menos una parte de los parámetros introducidos en el modelo dinámico son verificados por medio de la verificación de los resultados proporcionados por el modelo y, dado el caso, son corregidos.

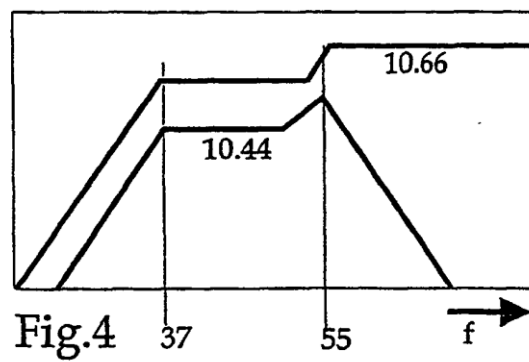
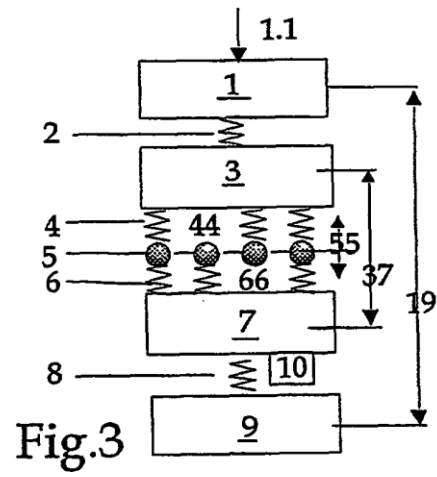
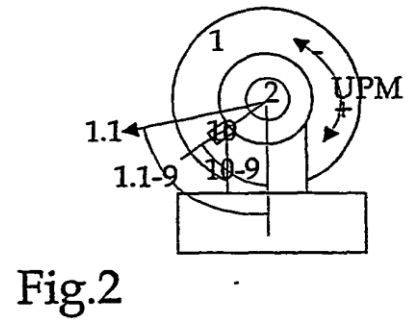
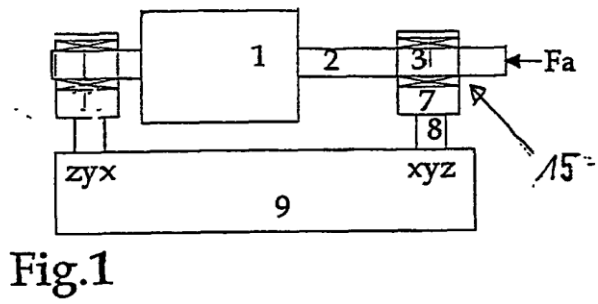
17. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 16, caracterizado porque los parámetros introducidos en el modelo dinámico son evaluados con un factor de confianza, que es seleccionado en función del origen y de la fiabilidad del parámetro respectivo.

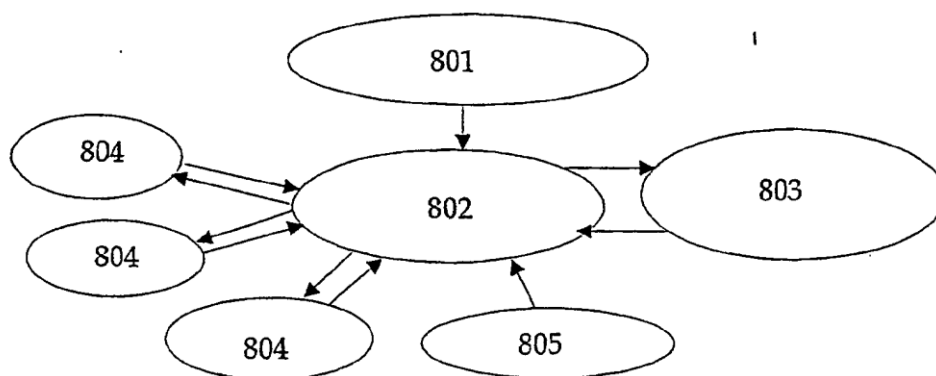
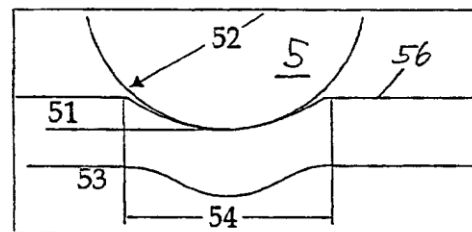
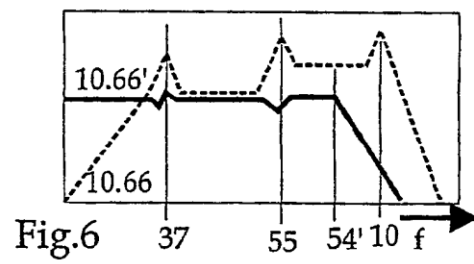
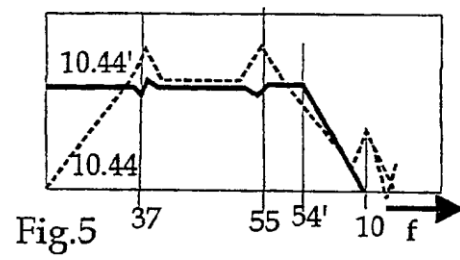
10 18. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 17, caracterizado porque la corrección de los parámetros se realiza por medio de cálculo de compensación, en el que los parámetros son ponderados de acuerdo con su factor de confianza.

19. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 17 ó 18, caracterizado porque utilizando el modelo dinámico se verifican daños hallados a través del análisis del cojinete (15, 100), en el que los factores de confianza son modificados de acuerdo con el resultado de la verificación.

15 20. Procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 16 a 19, caracterizado porque en el caso de presencia de daños a partir de la señal del sensor, se calculan las frecuencias de resonancia (19, 37, 55) del rodamiento (15, 100) en la máquina y a partir de ello se verifican los valores de las rigideces (2, 4, 6, 8) introducidos en el modelo dinámico y, dado el caso, se corrigen.

- 11 -





- 13 -

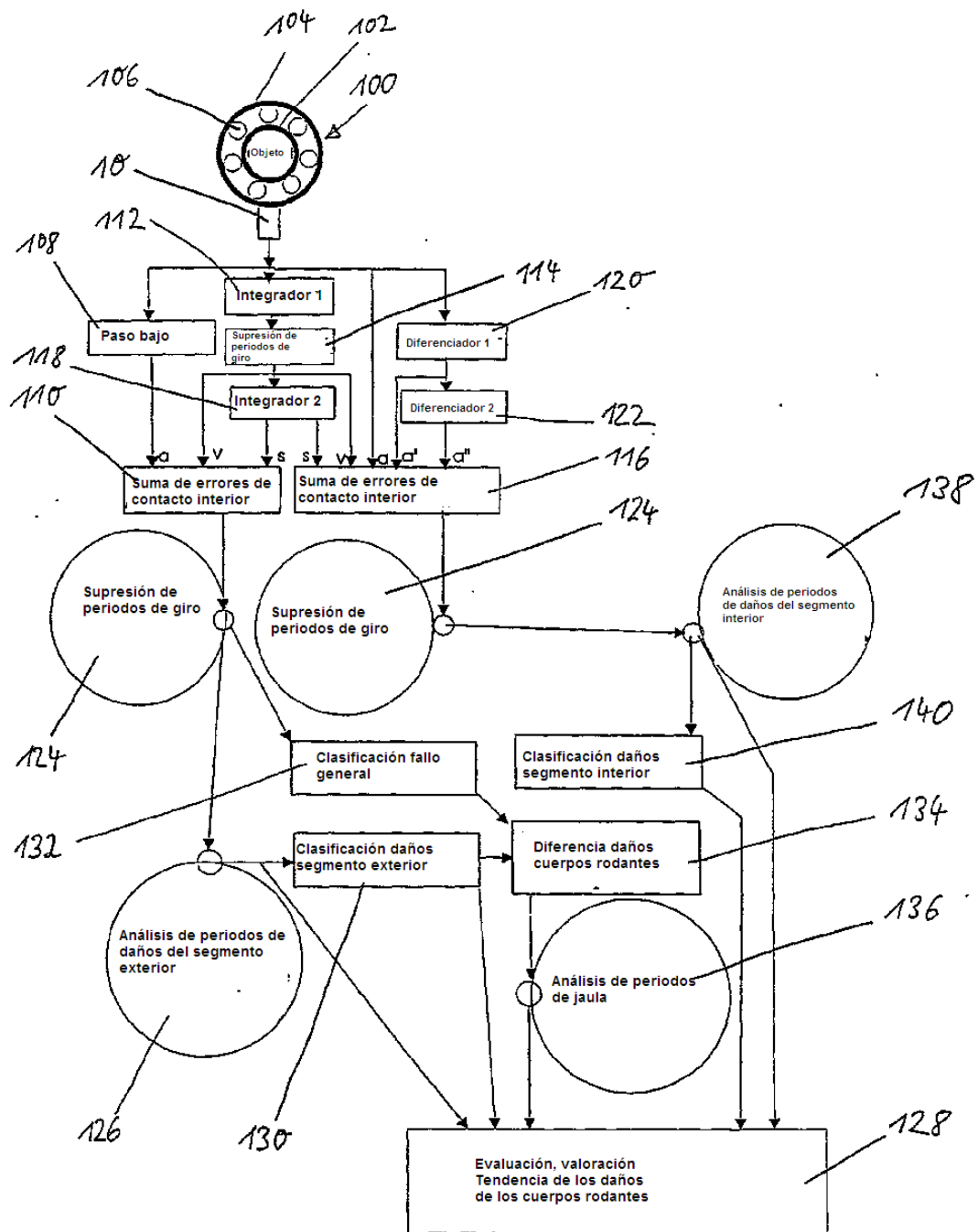


Fig. 9

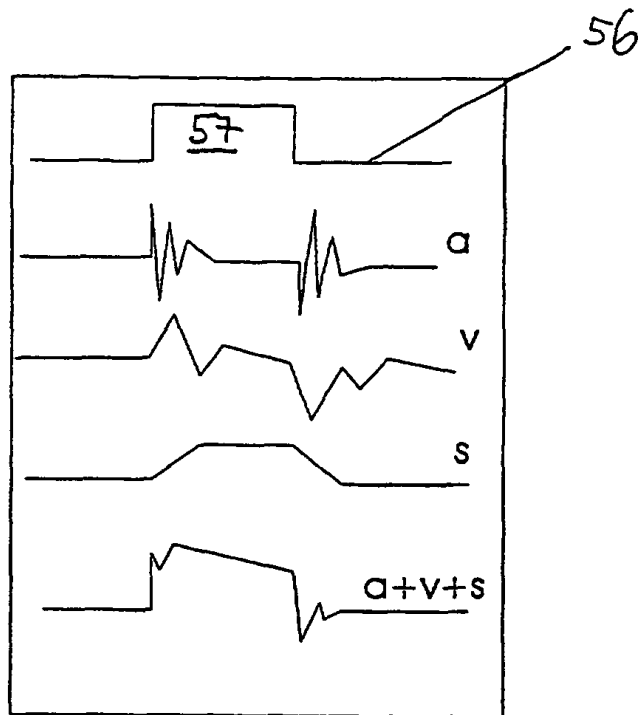


Fig. 10

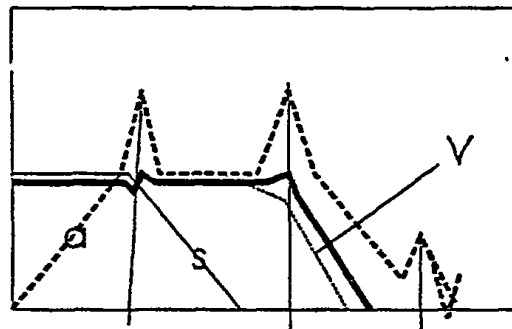


Fig. 11