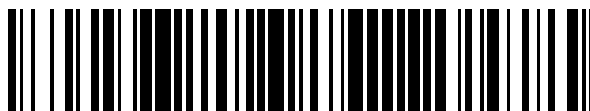


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 690 077**

51 Int. Cl.:

G01M 13/02 (2006.01)

G01H 1/00 (2006.01)

G01M 7/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.04.2015 E 15163653 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.07.2018 EP 3081914**

54 Título: **Monitorización de una máquina con un componente de máquina rotatorio**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.11.2018

73 Titular/es:
**SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Werner-von-Siemens-Straße 1
80333 München, DE**

72 Inventor/es:
OCHSENFELD, HENNING

74 Agente/Representante:
CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 690 077 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

Monitorización de una máquina con un componente de máquina rotatorio

La invención se refiere a un procedimiento para la monitorización de una máquina con un componente de máquina rotatorio.

5 En el entorno, los componentes de máquinas con un componente de máquina rotatorio, tal como por ejemplo cojinetes de engranaje de engranajes contruidos en grupos motopropulsores, presentan tras un tiempo en la mayoría de los casos impredecible con frecuencia anomalías, que están condicionadas o bien por el desgaste natural o bien por errores de material o de sistema que aparecen esporádicamente. Un reconocimiento a su debido tiempo de un defecto de este tipo tiene una alta prioridad en muchos campos de aplicación, dado que la obtención de sustitutos de determinados elementos constructivos es de larga duración, la interrupción del funcionamiento es muy costosa o el daño es problemático de otro modo. Por este motivo, con frecuencia se formaliza un contrato con un proveedor de servicios de un denominado "servicio de mantenimiento", que encarga al proveedor de servicios reconocer a su debido tiempo anomalías y el inicio de eventuales medidas de mantenimiento. Tales servicios (servicios de mantenimiento) está hoy en día poco automatizados y se ejecutan por tanto con un esfuerzo de personal correspondientemente alto.

El documento US 2005/0119840 A1 da a conocer un procedimiento para localizar anomalías de almacenamiento en máquinas mediante la medición y evaluación de vibraciones de máquina.

El documento P. J. Tavner: "Review of condition monitoring of rotating electrical machines", IET Electric Power Applications, 2008, tomo 2, n.º 4, pág. 215-247 ofrece una visión general sobre monitorizaciones de estado conocidas de máquinas eléctricas rotatorias.

El documento EP 2 626 682 A1 da a conocer un sistema y un procedimiento para reconocer errores de máquinas rotatorias.

El documento EP 1 014 054 A2 da a conocer un procedimiento para la monitorización del diagnóstico por oscilación basada en un modelo de máquinas rotatorias.

25 El documento W. J. Wang *et al*: "Early detection of gear failure by vibration analysis - I. Calculation of the time-frequency distribution", Mechanical Systems and Signal Processing (1993) 7 (3), 193-203 se refiere al reconocimiento de errores de engranaje mediante un análisis de vibración.

W. Bartelmus *et al*: "A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operating conditions", Mechanical Systems and Signal Processing 23 (2009) 1528-1534 se refiere a la monitorización del estado de engranajes en condiciones de funcionamiento no estacionarias.

El documento US 5 602 761 A da a conocer un procedimiento basado en el ordenador para la monitorización y el diagnóstico de estados de máquina anómalos.

La invención se basa en el objetivo de indicar un procedimiento mejorado para la monitorización de una máquina con un componente de máquina rotatorio.

35 El objetivo se alcanza según la invención mediante las características de la reivindicación 1.

Configuraciones ventajosas de la invención son el objeto de las reivindicaciones dependientes.

En el procedimiento automatizado, según la invención, para la monitorización de una máquina con un componente de máquina rotatorio se registran en tiempos de medición sucesivos valores de parámetro de parámetros de funcionamiento de la máquina y en cada caso vibraciones de la máquina a lo largo de una duración de medición predeterminada. Para cada duración de medición se determina un espectro de vibración de amplitudes de vibración en función de frecuencias de vibración de las vibraciones registradas durante la duración de medición. A partir del espectro de vibración se determina para varios intervalos de frecuencia en cada caso una densidad de potencia media del espectro de vibración. Durante una fase de aprendizaje que comprende varios tiempos de medición se determina a partir de las densidades de potencia medias determinadas para estos tiempos de medición y valores de parámetro registrados para cada intervalo de frecuencia una función de modelo para una densidad de potencia promediada a lo largo del intervalo de frecuencia esperada como función de los parámetros de funcionamiento. Durante una fase de monitorización se forma para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia se forma una medida de desviación para una desviación de la densidad de potencia media determinada a partir de las vibraciones registradas con respecto a una densidad de potencia media esperada. A este respecto, la densidad de potencia media esperada para un tiempo de medición y un intervalo de frecuencia como valor de función de la

función de modelo determinada en la fase de aprendizaje para el intervalo de frecuencia en el punto definido por los valores de parámetro registrados con respecto al respectivo tiempo de medición.

5 Por tanto, el procedimiento según la invención prevé (al menos) una fase de aprendizaje y (al menos) una fase de monitorización. Durante la fase de aprendizaje se registran repetidamente valores de parámetro de parámetros de funcionamiento de la máquina y vibraciones de la máquina y a partir de ellos para diferentes intervalos de frecuencia se determina en cada caso una función de modelo, que indica una densidad de potencia media esperada de amplitudes de vibración en el respectivo intervalo de frecuencia como función de los parámetros de funcionamiento. En la fase de monitorización se registran igualmente valores de parámetro de los parámetros de funcionamiento de la máquina y la vibración de la máquina, y las vibraciones registradas se evalúan por separado para cada intervalo de frecuencia mediante las funciones de modelo determinadas en la fase de aprendizaje.

15 Las funciones de modelo determinadas en la fase de aprendizaje reproducen propiedades específicas de máquina de la máquina y forman la base para la evaluación de los datos de medición registrados en la fase de monitorización. De este modo, el procedimiento es ventajosamente genérico, es decir aplicable para diferentes máquinas, sin tener que conocer previamente las propiedades específicas de máquina de las máquinas, dado que estas propiedades se aprenden de manera automatizada durante la fase de aprendizaje y se plasman en las funciones de modelo determinadas durante la fase de aprendizaje.

20 La evaluación por separado de diferentes intervalos de frecuencia posibilita un modelado cualitativamente bueno por medio de funciones de modelo sencillas, por ejemplo por medio de funciones lineales de los parámetros de funcionamiento, cuya determinación solo requiere pocos datos de medición. De esto resulta ventajosamente una breve fase de aprendizaje, que también puede repetirse sin problemas y sin una gran pérdida de tiempo, por ejemplo para tener en cuenta las variaciones esenciales de la máquina y/o su entorno.

En general, el procedimiento posibilita una monitorización automatizada de máquinas de tipo genérico y reduce de este modo en particular el esfuerzo de personal necesario para la monitorización de las máquinas y la propensión a errores de la monitorización que resulta de ello.

25 Una configuración de la invención prevé que la máquina sea un engranaje.

Esta configuración de la invención tiene en cuenta que precisamente los engranajes son susceptibles para la aparición de anomalías condicionadas por el desgaste y el sistema y pueden monitorizarse eficientemente mediante la evaluación según la invención de espectros de vibración.

30 Una configuración adicional de la invención prevé que como parámetros de funcionamiento se usen un momento de giro y/o un número de revoluciones y/o una temperatura de un componente de máquina rotatorio de la máquina.

Esta configuración aprovecha ventajosamente que los momentos de giro, números de revoluciones y temperaturas de componentes de máquina rotatorio por regla general influyen en una medida especialmente intensa en espectros de vibración registrados en estos componentes de máquina y por tanto son especialmente relevantes y adecuados como parámetros de funcionamiento para la evaluación de los espectros de vibración.

35 Una configuración adicional de la invención prevé que una anchura de los intervalos de frecuencia aumente de manera monótona con una frecuencia de vibración creciente.

40 El aumento de la anchura de los intervalos de frecuencia con una frecuencia de vibración creciente es ventajoso en particular que el contenido de información relevante para la monitorización de la máquina de los espectros de vibración disminuya con frecuencias de vibración crecientes, tal como es a menudo el caso. La invención prevé que la función de modelo para cada intervalo de frecuencia se determine como una función lineal de los parámetros de funcionamiento, al entrenar un modelo de regresión múltiple lineal para estimar la función de modelo.

45 Las funciones lineales de los parámetros de funcionamiento pueden determinarse ventajosamente de manera especialmente sencilla y rápida, es decir a partir de pocos datos de medición. Tal como ya se ha expuesto anteriormente, el procedimiento según la invención posibilita un uso razonable de funciones lineales de los parámetros de funcionamiento para el modelado de densidades de potencia esperadas debido a la evaluación específica para el intervalo de frecuencia según la invención de los espectros de vibración. Una configuración adicional de la invención prevé que como medida de desviación para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia se forme una diferencia de densidad de potencia normalizada para una distribución normal estándar entre la densidad de potencia media determinada a partir de las vibraciones registradas y la densidad de potencia media esperada.

50

Las medidas de desviación normalizadas para una distribución normal estándar posibilitan ventajosamente una interpretación y evaluación sencilla y fácilmente comprensible de las medidas de desviación.

A este respecto, la diferencia de densidad de potencia normalizada para un tiempo de medición y un intervalo de frecuencia se forma preferiblemente según

$$Z_t^{(i)} = \frac{\delta_t^{(i)} - \mu_{t-1}^{(i)}}{\sigma_{t-1}^{(i)}}$$

5 a partir de una diferencia de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ entre la densidad de potencia media, que se determina a partir de las vibraciones registradas con respecto al tiempo de medición, y la densidad de potencia media esperada durante el tiempo de medición, un valor esperado suavizado $\mu_{t-1}^{(i)}$ de las diferencias de densidad de potencia para un tiempo de medición previo al tiempo de medición y una desviación estándar suavizada $\sigma_{t-1}^{(i)}$ de las diferencias de densidad de potencia para el tiempo de medición previo al tiempo de medición. A este respecto, t es un índice de tiempo, que enumera los tiempos de medición según su sucesión temporal, e i es un índice de intervalo de frecuencia, que enumera los intervalos de frecuencia.

De este modo se normalizan las diferencias de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ en cada caso con respecto a diferencias de densidad de potencia distribuidas de manera normal estándar $Z_t^{(i)}$, que indican en cada caso una distancia con respecto a su propia distribución. Expresado de otro modo, las diferencias de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ se transforman de ese modo para dar magnitudes estadísticas, que posibilitan en particular la utilización de intervalos de confianza habituales de la distribución normal estándar para la interpretación y evaluación de las diferencias de densidad de potencia.

A este respecto, el valor esperado suavizado $\mu_t^{(i)}$ para un tiempo de medición se forma preferiblemente en función de la diferencia de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ para este tiempo de medición y el valor esperado suavizado $\mu_{t-1}^{(i)}$ para el tiempo de medición previo al tiempo de medición según

$$\mu_t^{(i)} = \lambda \delta_t^{(i)} + (1 - \lambda) \mu_{t-1}^{(i)},$$

siendo λ un parámetro de suavizado.

Además, se forma la desviación estándar suavizada $\sigma_t^{(i)}$ para un tiempo de medición en función de la diferencia de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ y el valor esperado suavizado $\mu_t^{(i)}$ para este tiempo de medición y la desviación estándar suavizada $\sigma_{t-1}^{(i)}$ para el tiempo de medición previo al tiempo de medición según

$$\left(\sigma_t^{(i)}\right)^2 = \lambda \left(\delta_t^{(i)} - \mu_t^{(i)}\right)^2 + (1 - \lambda) \left(\sigma_{t-1}^{(i)}\right)^2,$$

siendo λ un parámetro de suavizado.

Las configuraciones mencionadas anteriormente de la invención posibilitan ventajosamente una actualización móvil constante de los parámetros de distribución $\mu_t^{(i)}$ y $\sigma_t^{(i)}$ usados para el cálculo de las diferencias de densidad de potencia normalizadas $Z_t^{(i)}$ como consecuencia de sus definiciones anteriores recursivas.

El parámetro de suavizado A que aparece en las definiciones anteriores de los parámetros de distribución $\mu_t^{(i)}$ y $\sigma_t^{(i)}$ se forma preferiblemente según

$$\lambda = 1 - \exp\left(\frac{-1}{\tau f_s}\right)$$

5 a partir de una constante de tiempo predeterminable τ y una frecuencia de muestreo f_s de la detección de las vibraciones de la máquina.

10 De este modo se consigue un suavizado exponencial de los parámetros de distribución $\mu_t^{(i)}$ y $\sigma_t^{(i)}$ con una constante de tiempo predeterminable τ . En particular, esto posibilita eliminar o suprimir los componentes de señal de tendencia que se producen posiblemente, que se provocan por ejemplo por el desgaste natural y solo avanzan lentamente, mediante la especificación de una constante de tiempo τ suficientemente grande. Las señales de anomalías que se producen rápidamente en relación temporal con ello no se ven influidas.

Una configuración adicional de la invención prevé que se predetermine un intervalo de tolerancia para la medida de desviación y se determine para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia, si la medida de desviación se encuentra dentro del intervalo de tolerancia predeterminado.

15 El intervalo de tolerancia para la medida de desviación proporciona ventajosamente un criterio cuantitativo y que puede emplearse de manera automatizada para la evaluación específica en cuanto al intervalo de frecuencia de las densidades de potencia medias para cada tiempo de medición.

Las propiedades, características y ventajas descritas anteriormente de esta invención, así como la manera en cómo se alcanzan, se entenderán de manera más clara y evidente en relación con la siguiente descripción de ejemplos de realización, que se explican más detalladamente en relación con los dibujos. A este respecto, muestran:

20 la Figura 1, un diagrama de flujo de una fase de aprendizaje de un procedimiento para la monitorización de una máquina,

la Figura 2, intervalos de frecuencia de vibración,

la Figura 3, un diagrama de flujo de una fase de monitorización de un procedimiento para la monitorización de una máquina,

25 la Figura 4, para un tiempo de medición una densidad de potencia media determinada a partir de vibraciones registradas y una densidad de potencia media esperada en función del intervalo de frecuencia,

la Figura 5, para un intervalo de frecuencia una diferencia de densidad de potencia entre una densidad de potencia media, que se determina para un tiempo de medición a partir de vibraciones registradas, y una densidad de potencia media esperada para el tiempo de medición así como un valor esperado suavizado de las diferencias de densidad de potencia en función del tiempo de medición,

30 la Figura 6, para un intervalo de frecuencia una desviación estándar suavizada de las diferencias de densidad de potencia en función del tiempo de medición,

la Figura 7, para un intervalo de frecuencia una diferencia de densidad de potencia normalizada en función del tiempo de medición.

35 Las partes correspondientes entre sí están dotadas en todas las figuras de los mismos números de referencia.

Un procedimiento según la invención para la monitorización de una máquina con al menos un componente de máquina rotatorio, por ejemplo un engranaje, comprende (al menos) una fase de aprendizaje y (al menos) una fase de monitorización.

La Figura 1 muestra un diagrama de flujo de una fase de aprendizaje del procedimiento.

40

5 Durante la fase de aprendizaje se registran en una etapa de procedimiento S1 en tiempos de medición sucesivos valores de parámetro P_t de parámetros de funcionamiento P de la máquina y en cada caso a lo largo de una duración de medición predeterminada vibraciones de la máquina (en el caso de varios parámetros de funcionamiento P_t designa una tupla de valores de medición). A este respecto, t es un índice de tiempo, que
 10 enumera los tiempos de medición según su sucesión temporal. Como parámetro de funcionamiento P se usan por ejemplo un momento de giro y/o un número de revoluciones y/o una temperatura del respectivo componente de máquina rotatorio, cuyos valores de parámetro P_t se registran por medio de sensores correspondientes. Las vibraciones se registran por medio de al menos un sensor de vibración. Cuando la máquina que debe monitorizarse es por ejemplo un engranaje con un cojinete de engranaje o varios cojinetes de engranaje, se dispone por ejemplo para cada cojinete de engranaje un sensor de vibración en el respectivo cojinete de engranaje o en su proximidad.

A continuación se asume para la simplificación de la descripción y la notación, que solo está presente un sensor de vibración. En los casos en los que estén presentes varios sensores de vibración, las etapas de procedimiento descritas a continuación se realizarán por separado para cada sensor de vibración.

15 En una etapa de procedimiento S2 se determina para cada duración de medición un espectro de vibración discreto $Y_t(f)$ de amplitudes de vibración Y en función de frecuencias de vibración f de las vibraciones registradas durante la duración de medición mediante una transformada de Fourier, preferiblemente mediante una transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), de las señales de sensor del respectivo sensor de vibración.

En una etapa de procedimiento S3 se almacenan los valores de parámetro P_t y espectros de vibración $Y_t(f)$ registrados para los tiempos de medición individuales, por ejemplo en una base de datos.

20 En una etapa de procedimiento S4 se forman a partir de cada espectro de vibración $Y_t(f)$ N espectros parciales, que contienen en cada caso amplitudes de vibración de un intervalo de frecuencia.

La Figura 2 muestra a modo de ejemplo la división de frecuencias de vibración f entre 0 Hz y 12000 Hz en intervalos de frecuencia enumerados con un índice de intervalo de frecuencia i ($i=1, \dots, N$), cuya anchura aumenta de manera monótona con una frecuencia de vibración f creciente. Un aumento representado en la Figura 2 de la anchura de los
 25 intervalos de frecuencia con una frecuencia de vibración f creciente es ventajoso cuando el contenido de información relevante para la monitorización de la máquina de los espectros de vibración disminuye con frecuencias de vibración f crecientes, tal como es a menudo el caso. En otros ejemplos de realización, en los que este no es el caso, los intervalos de frecuencia también pueden tener anchuras distribuidas de otra manera, por ejemplo en cada caso iguales, y/o solaparse mutuamente.

30 En las etapas de procedimiento S5.1 a S5.N se calcula en cada caso para uno de los N espectros parciales de cada espectro de vibración $Y_t(f)$ una densidad de potencia media $\Phi_t^{(i)}$ según

$$\Phi_t^{(i)} = \frac{1}{L^{(i)}} \sum_{l=1}^{L^{(i)}} |Y_t(f_l)|^2 \quad [1]$$

35 siendo i el índice de intervalo de frecuencia, siendo t el índice de tiempo, siendo l un índice de frecuencia, que enumera las frecuencias de vibración f del i ésimo espectro parcial, es decir las frecuencias de vibración f contenidas en el i ésimo intervalo de frecuencia del espectro de vibración discreto $Y_t(f)$, $L^{(i)}$ es el número de las frecuencias de vibración f del i ésimo espectro parcial, e $Y_t(f)$ es la amplitud de vibración determinada para el tiempo de medición con el índice de tiempo t y la frecuencia de vibración f con el índice de frecuencia l del i ésimo espectro parcial.

En las etapas de procedimiento S6.1 a S6.N se determina para cada intervalo de frecuencia a partir de las densidades de potencia medias $\Phi_t^{(i)}$ determinadas para este intervalo de frecuencia en las etapas de

40 procedimiento S5.1 a S5.N y los valores de parámetro registrados P_t una función de modelo $\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(N)}(P)$ para una densidad de potencia esperada promediada a lo largo del intervalo de frecuencia como una función de los parámetros de funcionamiento P . Por ejemplo, para ello se entrena para cada intervalo de frecuencia un modelo de

regresión múltiple lineal, que proporciona como función de modelo $\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(N)}(P)$ una función lineal de los parámetros de funcionamiento P con coeficientes (parámetros de modelo), que se determinan en las etapas de
 45 procedimiento S6.1 a S6.N de la fase de aprendizaje. En lugar de un modelo de regresión múltiple lineal puede entrenarse también un modelo complicado, que también describe dependencias no lineales de la función de modelo

$\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(N)}(P)$ de los parámetros de funcionamiento P .

Las funciones de modelo $\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(M)}(P)$ determinadas para los diferentes intervalos de frecuencia se almacenan en cada caso, para usarse en la fase de monitorización.

La Figura 3 muestra un diagrama de flujo de una fase de monitorización del procedimiento.

5 Durante la fase de monitorización se ejecutan como en la fase de aprendizaje las etapas de procedimiento S1 a S5.N, registrándose en tiempos de medición sucesivos de la fase de monitorización, por ejemplo periódicamente, valores de parámetro P_t de los parámetros de funcionamiento P de la máquina y en cada caso a lo largo de una duración de medición vibraciones de la máquina y determinándose a partir de ello para cada tiempo de medición y para los mismos intervalos de frecuencia que en la fase de aprendizaje en cada caso una densidad de potencia media $\Phi_t^{(i)}$ según la ecuación [1].

10 Además, en las etapas de procedimiento S7.1 a S7.N para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia se forma una densidad de potencia media esperada $\hat{\Phi}^{(0)}(P_t)$ como valor de función de la función de modelo $\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(M)}(P)$ determinada en la fase de aprendizaje para el respectivo intervalo de frecuencia en el punto definido mediante los valores de parámetro P_t registrados en el respectivo tiempo de medición.

15 En las etapas de procedimiento S8.1 a S8.N se forma para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia una medida de desviación para la desviación de la densidad de potencia media $\Phi_t^{(i)}$ determinada a partir de las vibraciones registradas de la densidad de potencia media esperada $\hat{\Phi}^{(0)}(P_t)$.

A este respecto, como medida de desviación se forma por ejemplo en cada caso una diferencia de densidad de potencia $z_t^{(i)}$ normalizada para una distribución normal estándar según

$$z_t^{(i)} = \frac{\delta_t^{(i)} - \mu_{t-1}^{(i)}}{\sigma_{t-1}^{(i)}} \quad [2]$$

20 A este respecto, $\delta_t^{(i)}$ designa una diferencia de densidad de potencia formada según

$$\delta_t^{(i)} = \Phi_t^{(i)} - \hat{\Phi}^{(0)}(P_t) \quad [3]$$

entre la densidad de potencia media $\Phi_t^{(i)}$ determinada a partir de las vibraciones registradas y la densidad de potencia media esperada $\hat{\Phi}^{(0)}(P_t)$, $\mu_t^{(i)}$ designa un valor esperado suavizado, que se forma para un tiempo de medición en función de la diferencia de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ para este tiempo de medición, el valor esperado suavizado $\mu_{t-1}^{(i)}$ para el tiempo de medición previo al tiempo de medición y un parámetro de suavizado λ según

$$\mu_t^{(i)} = \lambda \delta_t^{(i)} + (1 - \lambda) \mu_{t-1}^{(i)} \quad [4],$$

25 y $\sigma_t^{(i)}$ una desviación estándar suavizada, que se forma para un tiempo de medición en función de la diferencia de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ y el valor esperado suavizado $\mu_t^{(i)}$ para este tiempo de medición así como la desviación estándar suavizada $\sigma_{t-1}^{(i)}$ para el tiempo de medición previo al tiempo de medición y el parámetro de suavizado λ según

$$\left(\sigma_t^{(i)}\right)^2 = \lambda \left(\delta_t^{(i)} - \mu_t^{(i)}\right)^2 + (1 - \lambda) \left(\sigma_{t-1}^{(i)}\right)^2 \quad [5]$$

A este respecto, el parámetro de suavizado λ se forma según

$$\lambda = 1 - \exp\left(\frac{-1}{\tau f_s}\right) \quad [6]$$

5 a partir de una constante de tiempo predeterminable τ y una frecuencia de muestreo f_s de la detección de las vibraciones de la máquina (es decir el valor inverso f_s de la diferencia de dos tiempos de medición sucesivos). Los valores iniciales para el valor esperado suavizado y la desviación estándar suavizada se determinan por ejemplo a partir de las densidades de potencia medias $\Phi_t^{(i)}$ determinadas durante la fase de aprendizaje.

10 La ecuación [1] normaliza las diferencias de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ en cada caso para diferencias de densidad de potencia normalizadas en una distribución normal estándar $Z_t^{(i)}$, que indican en cada caso una distancia con respecto a su propia distribución. Expresado de otro modo, las diferencias de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ se transforman de ese modo para dar magnitudes estadísticas, de modo que pueden utilizarse intervalos de confianza habituales de la distribución normal estándar para su interpretación. Los parámetros de distribución $\mu_t^{(i)}$ y $\sigma_t^{(i)}$ usados para el cálculo de las diferencias de densidad de potencia normalizadas $Z_t^{(i)}$ se determinan de manera adaptativa y continua por medio de un suavizado exponencial recursivo según las ecuaciones [4] a [6].

15 Además de la capacidad de interpretación estadística clara de las diferencias de densidad de potencia normalizadas $Z_t^{(i)}$ de los diferentes intervalos de frecuencia, el procedimiento posibilita de manera ventajosa una denominada deducción de tendencia para eliminar efectos no deseados de tendencias a largo plazo sobre los resultados. Por ejemplo, pueden eliminarse los componentes de señal de tendencia que se producen posiblemente, que se provocan por ejemplo por el desgaste natural y avanzan solo lentamente, mediante la sustracción de los valores esperados suavizados móviles $\mu_{t-1}^{(i)}$ de las diferencias de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ en la ecuación [1] por medio de una especificación de una constante de tiempo τ suficientemente grande. Las señales de anomalías que se producen rápidamente en relación temporal con ello no se ven influidas.

25 La Figura 4 muestra a modo de ejemplo para un tiempo de medición con el índice de tiempo t una densidad de potencia media $\Phi_t^{(i)}$ determinada a partir de vibraciones registradas y una densidad de potencia media esperada $\hat{\Phi}^{(0)}(P_i)$ en función del intervalo de frecuencia, estando representadas $\Phi_t^{(i)}$ y $\hat{\Phi}^{(0)}(P_i)$ según una escala logarítmica seleccionada de manera adecuada S_1 .

Las Figuras 5 y 6 muestran a modo de ejemplo para un intervalo de frecuencia con el índice de intervalo de frecuencia i una diferencia de densidad de potencia $\delta_t^{(i)}$ y un valor esperado suavizado correspondiente $\mu_t^{(i)}$ (Figura 5) así como una desviación estándar suavizada correspondiente $\sigma_t^{(i)}$ (Figura 6) en función del índice de tiempo t de los tiempos de medición en una escala seleccionada de manera adecuada S_2 .

30 En una etapa de procedimiento S9 se evalúan las medidas de desviación formadas en las etapas de procedimiento S8.1 a S8.N.

Para ello se predetermina por ejemplo un intervalo de tolerancia T para las medidas de desviación formadas en las etapas de procedimiento S8.1 a S8.N y para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia se determina si la respectiva medida de desviación se encuentra dentro del intervalo de tolerancia predeterminado T .

35 En el caso de que las medidas de desviación se formen en cada caso como una diferencia de densidad de potencia $Z_t^{(i)}$ normalizada según las ecuaciones [2] a [6], como intervalo de tolerancia T se predetermina un intervalo de confianza adecuado de la distribución normal estándar, por ejemplo un intervalo de confianza 3σ , y en la etapa de procedimiento S9 se genera para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia una señal de salida binaria $\gamma_t^{(i)}$, que adopta del valor cero, cuando la respectiva diferencia de densidad de potencia normalizada $Z_t^{(i)}$ se encuentra dentro del intervalo de tolerancia predeterminado, y en caso contrario adopta el valor uno. En el caso de

un intervalo de confianza T predeterminado como 3σ de la distribución normal estándar se forma la señal de salida binaria $\gamma_t^{(i)}$ para el tiempo de medición con el índice de tiempo t y el intervalo de frecuencia con el índice de intervalo de frecuencia i por tanto según

$$\gamma_t^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{si } |z_t^{(i)}| \geq 3\sigma \\ 0 & \text{si } |z_t^{(i)}| < 3\sigma \end{cases} \quad [7],$$

5 siendo σ la desviación estándar de la distribución normal estándar.

De este modo se generan por tiempo de medición para cada sensor de vibración N señales de salida binarias $\gamma_t^{(i)}$, que pueden evaluarse para la monitorización de la máquina, por ejemplo formando una señal de emisión total a partir de las señales de salida binarias $\gamma_t^{(i)}$ y/o visualizándolas de manera adecuada.

La Figura 7 muestra a modo de ejemplo para un intervalo de frecuencia con el índice de intervalo de frecuencia i una

10 diferencia de densidad de potencia normalizada $z_t^{(i)}$ en unidades de desviación estándar σ de la distribución normal estándar en función del índice de tiempo t de los tiempos de medición. A modo de ejemplo se representa además como intervalo de tolerancia T el intervalo de confianza 3σ de la distribución normal estándar. En el ejemplo representado, la diferencia de densidad de potencia normalizada $z_t^{(i)}$ discurre en el intervalo de tiempo representado dentro del intervalo de tolerancia T.

15 Aunque la invención se ha ilustrado y descrito más detalladamente mediante ejemplos de realización preferidos, la invención no está limitada por los ejemplos dados a conocer y el experto en la técnica puede deducirse otras variaciones de los mismos, sin abandonar el alcance de protección de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la monitorización de una máquina con un componente de máquina rotatorio, registrándose de manera automatizada

- 5 - en tiempos de medición sucesivos valores de parámetro (P_i) de parámetros de funcionamiento de la máquina y en cada caso a lo largo de una duración de medición predeterminada vibraciones de la máquina,
- determinándose para cada duración de medición un espectro de vibración ($Y_i(f)$) de amplitudes de vibración en función de frecuencia de vibración (f) de las vibraciones registradas durante la duración de medición,

caracterizado por que

- 10 - a partir del espectro de vibración ($Y_i(f)$) para varios intervalos de frecuencia se determina en cada caso una densidad de potencia media ($\Phi_i^{(i)}$) del espectro de vibración ($Y_i(f)$),
- durante una fase de aprendizaje que comprende varios tiempos de medición a partir de las densidades de potencia medias ($\Phi_i^{(i)}$) determinadas para estos tiempos de medición y los valores de parámetro registrados (P_i) para cada intervalo de frecuencia se determina una función de modelo ($\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(N)}(P)$) para una densidad de potencia promediada a lo largo del intervalo de frecuencia esperada como función lineal de los
- 15 parámetros de funcionamiento, entrenando un modelo de regresión múltiple lineal para la estimación de la función de modelo ($\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(N)}(P)$),
- y durante una fase de monitorización para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia se forma una medida de desviación para una desviación de la densidad de potencia media ($\Phi_i^{(i)}$) determinada a partir de las vibraciones registradas de una densidad de potencia media esperada ($\hat{\Phi}^{(i)}(P_i)$),
- 20 - formándose la densidad de potencia media esperada para un tiempo de medición y un intervalo de frecuencia ($\hat{\Phi}^{(i)}(P_i)$) como valor de función de la función de modelo ($\hat{\Phi}^{(1)}(P)$ a $\hat{\Phi}^{(N)}(P)$) determinada en la fase de aprendizaje para el intervalo de frecuencia en el punto definido por los valores de parámetro (P_i) registrados en el respectivo tiempo de medición.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** la máquina es un engranaje.

25 3. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** como parámetros de funcionamiento se usan un momento de giro y/o un número de revoluciones y/o una temperatura de un componente de máquina rotatorio de la máquina.

4. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** una anchura de los intervalos de frecuencia aumenta de manera monótona con una frecuencia de vibración (f) creciente.

30 5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** como medida de desviación para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia se forma una diferencia de densidad de potencia ($z_i^{(i)}$) normalizada para una distribución normal estándar para un tiempo de medición y un intervalo de frecuencia según

$$z_i^{(i)} = \frac{\delta_i^{(i)} - \mu_{i-1}^{(i)}}{\sigma_{i-1}^{(i)}}$$

35 a partir de una diferencia de densidad de potencia ($\delta_i^{(i)}$) entre la densidad de potencia media ($\Phi_i^{(i)}$), que se determina a partir de las vibraciones registradas con respecto al tiempo de medición, y la densidad de potencia media ($\hat{\Phi}^{(i)}(P_i)$) esperada para el tiempo de medición, un valor esperado suavizado ($\mu_i^{(i)}$) de las diferencias de densidad de potencia ($\delta_i^{(i)}$) para un tiempo de medición previo al tiempo de medición y una desviación estándar suavizada ($\sigma_i^{(i)}$) de las diferencias de densidad de potencia ($\delta_i^{(i)}$) para el tiempo de medición previo al tiempo

40 de medición.

6. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado por que** el valor esperado suavizado $(\mu_i^{(i)})$ para un tiempo de medición se forma en función de la diferencia de densidad de potencia $(\delta_i^{(i)})$ para este tiempo de medición y el valor esperado suavizado $(\mu_{i-1}^{(i)})$ para el tiempo de medición previo al tiempo de medición según

$$\mu_i^{(i)} = \lambda \delta_i^{(i)} + (1 - \lambda) \mu_{i-1}^{(i)},$$

5 siendo λ un parámetro de suavizado.

7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5 o 6, **caracterizado por que** la desviación estándar suavizada $(\sigma_i^{(i)})$ para un tiempo de medición se forma en función de la diferencia de densidad de potencia $(\delta_i^{(i)})$ y el valor esperado suavizado $(\mu_i^{(i)})$ para este tiempo de medición y la desviación estándar suavizada $(\sigma_{i-1}^{(i)})$ para el tiempo de medición previo al tiempo de medición según

10
$$(\sigma_i^{(i)})^2 = \lambda (\delta_i^{(i)} - \mu_i^{(i)})^2 + (1 - \lambda) (\sigma_{i-1}^{(i)})^2,$$

siendo λ un parámetro de suavizado.

8. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 6 o 7, **caracterizado por que** el parámetro de suavizado se forma según

$$\lambda = 1 - \exp\left(\frac{-1}{\tau f_s}\right)$$

15 a partir de una constante de tiempo predeterminable τ y una frecuencia de muestreo f_s de la detección de las vibraciones de la máquina.

9. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** se predetermina un intervalo de tolerancia (T) para la medida de desviación y se determina para cada tiempo de medición y cada intervalo de frecuencia, si la medida de desviación se encuentra dentro del intervalo de tolerancia predeterminado (T).
20

FIG 1

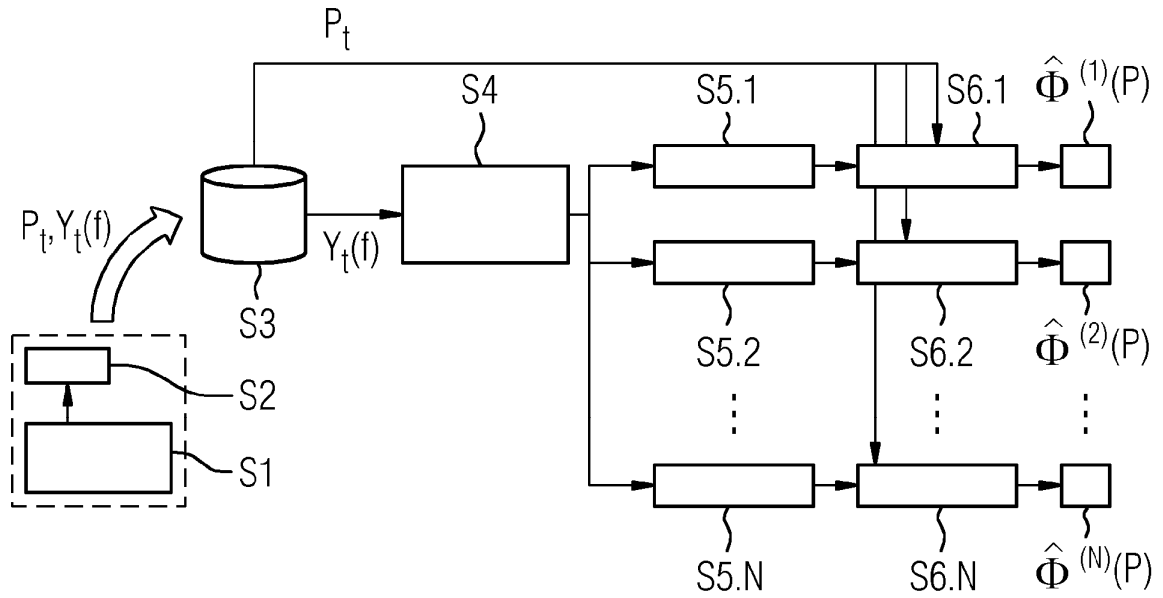


FIG 2

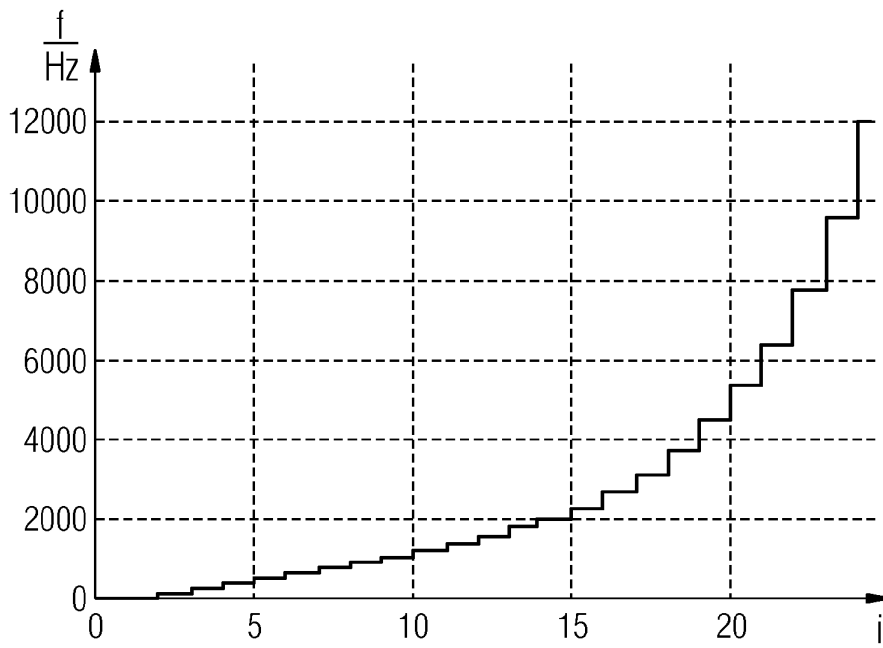


FIG 3

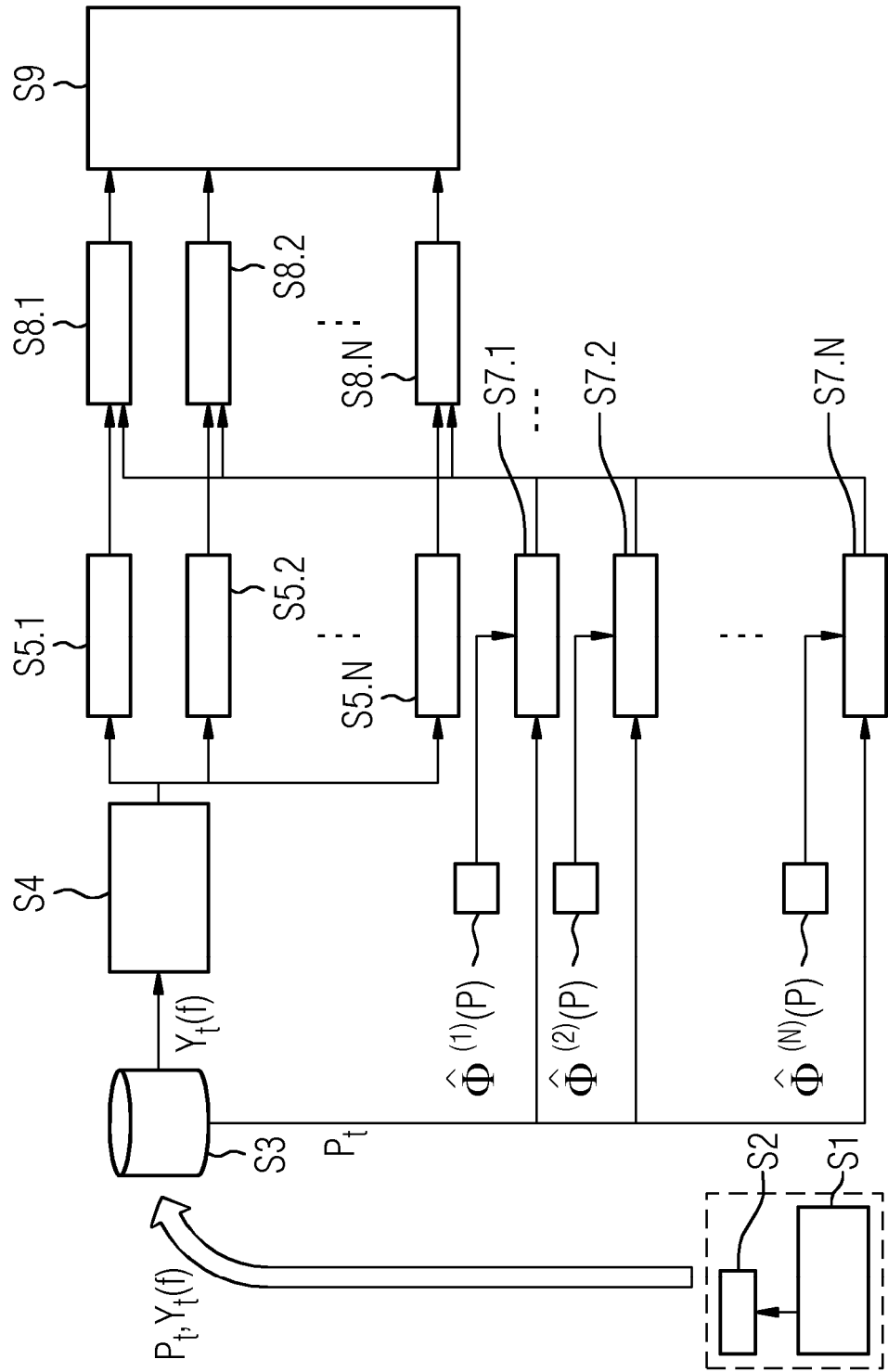


FIG 4

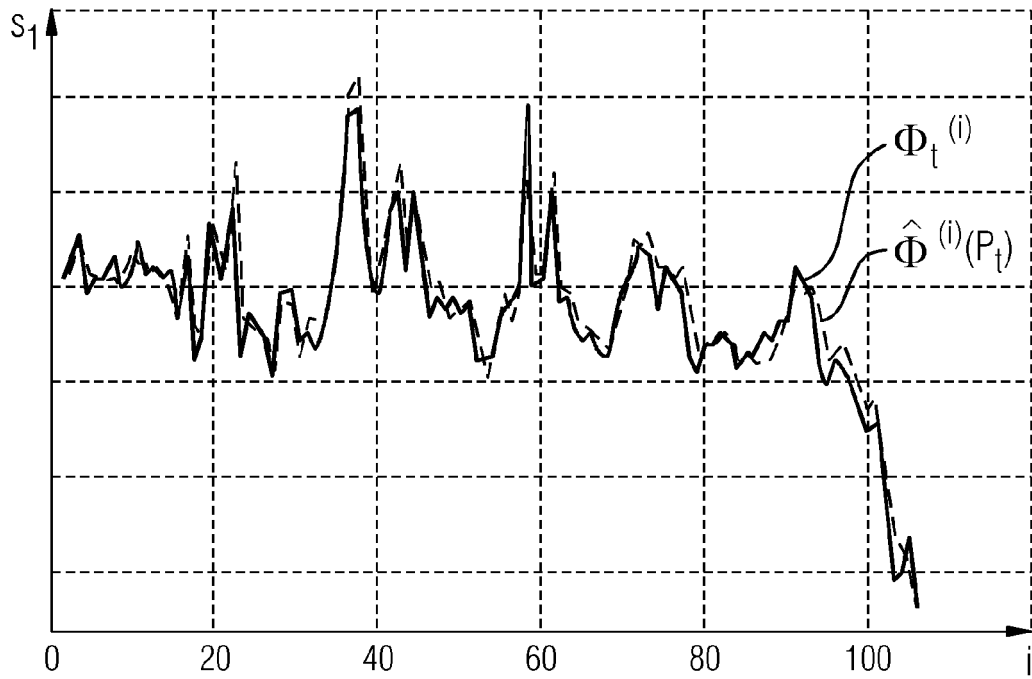


FIG 5

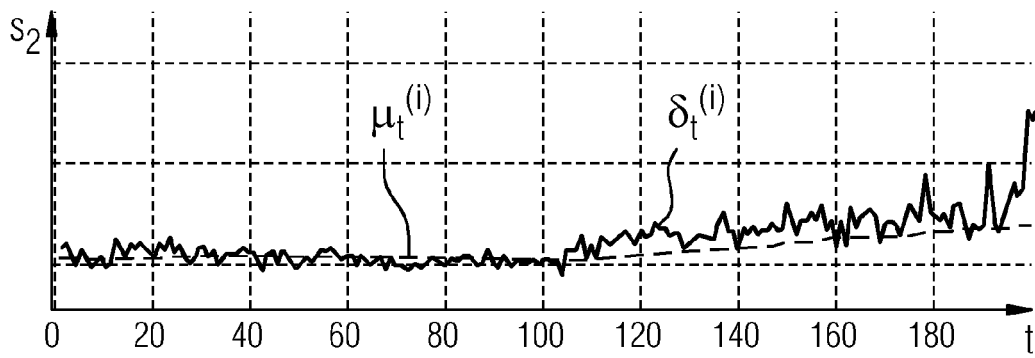


FIG 6

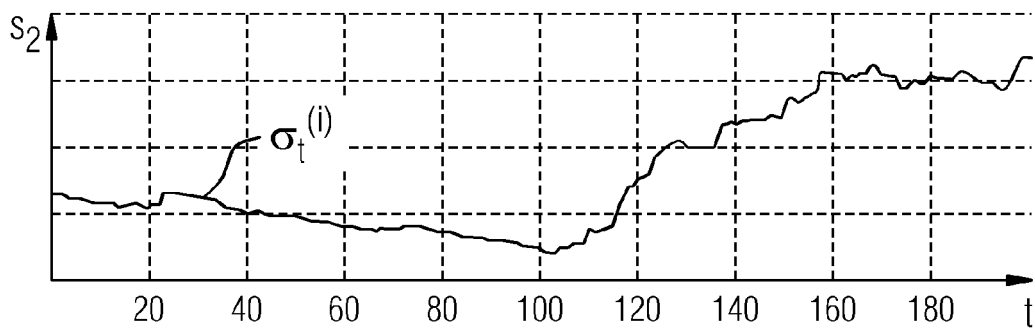


FIG 7

