

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 411 404**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 7/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.07.2007 E 07786385 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2013 EP 2047098**

54 Título: **Procedimiento de calibración**

30 Prioridad:

**01.08.2006 DE 102006036157**

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

**05.07.2013**

73 Titular/es:

**REPOWER SYSTEMS AG (100.0%)  
Überseering 10 (Oval Office)  
22297 HAMBURG, DE**

72 Inventor/es:

**BOLZ, DETLEF**

74 Agente/Representante:

**BOTELLA REYNA, Antonio**

**ES 2 411 404 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de calibración.

- 5 La invención se refiere a un procedimiento para el funcionamiento de una instalación de energía eólica que comprende un procedimiento de calibración de al menos un sensor de una instalación de energía eólica así como una instalación de energía eólica correspondiente.

Debido a los rotores cada vez más grandes de las instalaciones de energía eólica, las estrategias de regulación para la minimización de cargas en la instalación de energía eólica, particularmente una estrategia de regulación para un paso del giro de pala, adquieren cada vez mayor importancia. Para ello se gira, por ejemplo, cada pala de rotor durante el giro individualmente hacia el viento (inclinación), de tal forma que se puede minimizar la carga mecánica total que se aplica a través del eje del rotor y de la góndola sobre la torre. Como una magnitud de medida esencial se necesitan para ello los momentos de flexión de la pala de cada pala de rotor u otros momentos de flexión, por ejemplo en un eje del generador o del cubo del rotor u otros elementos giratorios de la instalación de energía eólica. Además de ello, se necesitan mediciones correspondientes de carga a través de unos sensores correspondientes para mediciones de carga de la instalación de energía eólica.

Los sensores no se pueden fijar para ello con total precisión exactamente en el lugar en el que se deberían de fijar los mismos, o los sensores pueden modificar sus características en el transcurso del tiempo, de tal forma que es necesaria una calibración de los sensores, que habitualmente se realiza de forma manual. La carga de la raíz de la pala del rotor en instalaciones modernas de energía eólica está sustancialmente caracterizada por un solapamiento de los momentos de flexión de la aerodinámica (sustancialmente perpendicular al plano del rotor, en correspondencia con el momento de impacto), así como por el momento de flexión resultante del peso propio de las palas del rotor, sustancialmente en el plano del rotor (momento de giro) así como por fuerzas normales resultantes del peso propio y de la fuerza centrífuga (dependiente del número de revoluciones por unidad de tiempo del rotor), así como por fuerzas y momentos de la dinámica de los rotores, que son particularmente importantes cuando se producen oscilaciones no deseadas (véase el documento DE10219664A1).

Para realizar mediciones de carga se emplean habitualmente calibres extensiométricos que habitualmente se cablean de tal forma que sólo se tienen en cuenta alargamientos por flexión, no en cambio fuerzas normales resultantes de dilataciones por temperatura o fuerzas centrífugas. La calibración de los momentos de flexión de la raíz de pala se realiza contra el momento de flexión de la fuerza de la gravedad a partir de la masa conocida y de la distancia de separación conocida del centro de gravedad de la pala con respecto al punto de medida para la pala del rotor situada en posición horizontal. Para determinar el punto neutro de las mediciones de los momentos de flexión se sitúa la pala del rotor en posición vertical o alternativamente en posición horizontal, en donde en la posición horizontal se gira la pala del rotor alrededor del eje longitudinal de la pala del rotor (inclinación) para determinar el punto neutro. El momento de flexión de impacto o de giro se puede solicitar mediante el giro de 90° del ángulo de ajuste de la pala, lo que puede hacer sencillo el método de calibración elegido. Para la elección y la calibración se tiene que detener brevemente la instalación, según el artículo "Medición de colectivos de carga en un parque eólico" de H. Seifert y H. Söker en DEWI, 1994, páginas 399 a 402. Para ello se leen los datos a través de un ordenador portátil y se evalúan correspondientemente para realizar una calibración.

Del documento WO2005/111414A se conoce un procedimiento para el mando de las palas de rotor de una instalación de energía eólica así como una instalación de energía eólica con un sistema de medida para la realización del procedimiento. Se mide un espectro de resonancia, de frecuencia propia, de paso y/o de señal de reflexión de la pala de rotor y se compara con un espectro nominal correspondiente. A continuación se forma una señal parásita en función de la magnitud de las desviaciones del espectro medido fuera de un intervalo de tolerancia y cuando aparece la señal parásita se actúa sobre la posición de la pala del rotor de tal forma que se aplica una dilatación adaptada a la variación en el mando a modo de magnitud de mando.

El documento EP1359321A1 publica una instalación de energía eólica en la que están asignados dos elementos sensores a cada pala de rotor y se determinan cargas mecánicas de las palas del rotor en base a las señales de los sensores. Las cargas calculadas a partir de los valores medidos de los sensores se calculan en función de la temperatura, de la fuerza centrífuga y de la gravedad en base a, por ejemplo, otros sensores. Además de ello se controla si un sensor está defectuoso y en este caso se conmuta a un sensor diferente.

El documento WO99/57435A publica una instalación de energía eólica que presenta un sensor sobre una pala de rotor. El sensor sirve para medir las cargas de la pala del rotor. Se miden vibraciones de la pala.

El documento WO01/33075A1 publica un procedimiento y una instalación de energía eólica en el o en la que se miden las cargas mecánicas de las palas y se ajusta el ángulo de paso en función de las cargas.

- 5 El documento EP0995904A2 publica una instalación de energía eólica con un rotor y un sensor que proporciona una magnitud de medida que conforma una medida de la carga actual de un elemento de la estructura de la instalación, en donde el ángulo de ataque se modifica en función de la magnitud de medida. La magnitud de medida representa una aceleración o deformación del componente. Para ello se comparan los valores de medida con un perfil de carga, que se modifica y adapta en función del estado de funcionamiento y/o del tiempo de vida de la instalación de energía eólica y del número y magnitud de los cambios de carga que se han producido hasta el estado correspondiente de funcionamiento.

La presente invención tiene por objeto ofrecer un procedimiento para el funcionamiento de una instalación de energía eólica que comprende un procedimiento de calibración de al menos un sensor de una instalación de energía eólica así como una instalación de energía eólica, mediante el cual sea posible obtener de forma eficiente datos fiables sobre cargas en componentes de la instalación de energía eólica.

Este objetivo se resuelve mediante el objeto de las reivindicaciones 1 y 9. El objetivo también se resuelve mediante un procedimiento para el funcionamiento de una instalación de energía eólica que comprende un procedimiento de calibración de al menos un sensor, en donde el procedimiento de calibración se realiza de forma automática. Una realización automática del procedimiento de calibración significa, en el marco de la invención, particularmente que este se realiza o lleva a cabo sin acción de un operario. Se hace referencia particularmente a la siguiente definición de un procedimiento automático de calibración. Preferentemente, el al menos un sensor es un sensor de carga.

El procedimiento de acuerdo con la invención para el funcionamiento de una instalación de energía eólica presenta de acuerdo con la invención un procedimiento para la calibración de al menos un sensor de una instalación de energía eólica, en donde la instalación de energía eólica presenta al menos un componente móvil, en donde el componente se hace pivotar o girar alrededor de un eje predeterminable y en donde se evalúa un valor de medida adquirido por el al menos un sensor, que es una medida para la carga del componente. Para ello, la evaluación comprende particularmente una comparación del valor de medida adaptado mediante una función de calibración con un valor nominal o una referencia predeterminable y/o almacenada, que puede ser una función, un valor o una matriz. La función de calibración puede ser un factor o una matriz o una función, que depende de uno o más parámetros de funcionamiento de la instalación de energía eólica.

Además, el procedimiento de acuerdo con la invención para el funcionamiento de una instalación de energía eólica comprende la característica de que el procedimiento de calibración se inicia mediante una señal de calibración, en donde después de la iniciación del procedimiento de calibración a través de la señal de calibración se detiene la instalación de energía eólica o el procedimiento de calibración se realiza durante la entrada en barrena de las palas de rotor, en donde la evaluación comprende que en caso de una desviación del valor de medida adaptado a través de una función de calibración con respecto a una referencia predeterminable y/o almacenada y/o determinada, que sea mayor que un valor límite de desviación predeterminable, el valor de medida adaptado a través de la función de calibración es la base para la determinación y el almacenamiento de una función de calibración adaptada, o en donde la evaluación comprende que en caso de una desviación del valor de medida determinado con respecto a una referencia predeterminable y/o almacenada y/o determinada, que sea mayor que un valor límite de desviación predeterminable, el valor de medida determinado es la base para la determinación y el almacenamiento de una función de calibración adaptada. En la primera variante es posible ante condiciones de entorno variables, tales como, por ejemplo, para un incremento de temperatura y/o una deriva de temperatura del sensor correspondiente o para un efecto de envejecimiento del sensor o cualquier otro efecto, que dan lugar a efectos no deseados de medida y momentos erróneos provocados por efectos de medida, adaptar estas correspondientemente. Para ello se actualiza particularmente la función de calibración, en donde se parte de la función de calibración almacenada anteriormente y, partiendo de esta, se determina una nueva función de calibración y eventualmente se almacena correspondientemente. En el marco de la invención se entiende por valor límite de desviación particularmente también el término valor nominal de desviación. Cuando en lo sucesivo se hable del valor nominal de desviación, también se refiere a un valor límite de desviación.

Alternativamente, una variante diferente prevé conformar la referencia de tal forma que esta se pueda comparar directamente con los datos de medida del sensor. La ventaja de este procedimiento consiste en que no es necesario recurrir a una función de calibración existente almacenada para la determinación de la nueva función de calibración adaptada. El cálculo de la función de calibración puede ser entonces más complejo. Los datos en bruto del sensor

se pueden someter eventualmente sólo a un promediado (por ejemplo, promediado en el tiempo de valores de medida adquiridos con un elevado régimen de muestreo) para obtener datos de medida del sensor comparables con la referencia.

- 5 El procedimiento de calibración es particularmente eficiente cuando se recogen o evalúan una pluralidad de valores de medida del al menos un sensor durante el pivotaje o giro del componente. De este modo es posible una adaptación muy precisa de la función de calibración.

- 10 La referencia comprende preferentemente una pluralidad o una función de valores nominales, que son predeterminables y/o están almacenados y/o determinados. Cuando se repite la determinación y el almacenamiento de una función de calibración adaptada, y concretamente particularmente preferiblemente de forma reiterada, se obtiene un resultado seguro de medida.

- 15 El procedimiento prevé, de acuerdo con la invención, que la evaluación y/o el procedimiento de calibración se desarrolle o se realice de forma automática. Por un desarrollo automático se entiende particularmente, en el marco de la invención, que este se puede realizar sin acción alguna de un operario, es decir, que la evaluación y/o el procedimiento de calibración se puede realizar de forma automática después de una señal de iniciación que, en determinadas circunstancias, también la puede dar un operario, es decir, sin ninguna otra actuación por parte del operario, en donde el resultado puede ser entonces una nueva función de calibración, o tan sólo la presencia de valores de medida de carga correspondiente, que encuentran su aplicación para el mando y/o la regulación de la instalación de energía eólica. La señal de iniciación de la evaluación y/o del procedimiento de calibración también se puede generar sin ayuda de un operario, por ejemplo cuando se encuentra presente un intervalo de tiempo predeterminable y/o condiciones de entorno ventajosas, por ejemplo una velocidad del viento que se encuentra por debajo de una velocidad límite predeterminable como, por ejemplo, 7 m/s, y/o un evento puntual como, por ejemplo, una desviación no habitual de señal, como una deriva de una señal de un sensor después de una comprobación de plausibilidad, de acuerdo con una variación de temperatura predeterminable, una parada de emergencia o una solicitud manual.

- 20 Los valores de medida se adquieren preferentemente con una frecuencia de entre 0,01 y 1000 Hz, particularmente 10-500 Hz.

Asimismo se recogen preferentemente los valores de medida en el intervalo completo del pivotaje o de giro, con lo que se obtiene un procedimiento de calibración muy preciso.

- 35 El componente es preferentemente una pala de rotor y/o un cubo y/o un árbol de una instalación de energía eólica. El eje es preferentemente un eje de un árbol de rotor o un eje longitudinal de una pala de rotor. El procedimiento es particularmente eficiente cuando el componente es una pala de rotor y el pivotaje o el giro es superior a 90°, particularmente superior a 100°, particularmente superior a 120°, particularmente superior a 180°, particularmente superior a 270°, particularmente superior a 360°. Cuando el componente es un cubo y/o un árbol, en donde el pivotaje o giro se produce en varios giros, es posible un procedimiento de calibración muy preciso.

- 40 Cuando se genera una señal de fallo, siempre que un procedimiento de calibración anterior repetido en un número predeterminable de iteraciones da lugar a que la desviación del valor de medida adaptado mediante la función de calibración con respecto a la referencia es mayor que un valor nominal de desviación predeterminable, es posible de una forma sencilla determinar sensores defectuosos. Para ello también puede estar prevista una pluralidad o una función o una interpolación de los valores de medida.

- 45 El procedimiento de calibración se puede realizar con la instalación de energía eólica detenida, cuando es necesario realizar la calibración de sensores en la pala del rotor o en la raíz de la pala del rotor o en la brida de la pala del rotor.

- 50 Para la calibración de estos sensores puede estar prevista en cualquier caso también una instalación de energía eólica que entra en barrena, esto es, una instalación de energía eólica cuyas palas de rotor giran lentamente alrededor de su eje de rotor. Los valores individuales de medida se pueden comparar entonces con la referencia, y concretamente después de la aplicación de la función de calibración sobre los valores de medida, por ejemplo multiplicación de la función de calibración por los valores de medida u otra operación diferente, que puede estar correspondientemente prevista. La referencia puede ser particularmente una función, pero también un valor único. El procedimiento de calibración se puede realizar por lo tanto también en una instalación de energía eólica que ha entrado en barrena, es decir, que se mueve lentamente, en donde para ello la función de calibración se puede

determinar mediante una estadística, particularmente una realización múltiple de la calibración para, por ejemplo, compensar fuerzas de viento irregulares y velocidades de giro irregulares. Para ello se prevé particularmente una valoración con el valor medio y una desviación estándar. Preferentemente se realizará una repetición correspondiente de la calibración, que se debe de realizar tantas veces como sea necesario hasta que se haya alcanzado una precisión predeterminada.

También puede estar previsto mantener al rotor ante un viento escaso a un número de revoluciones por unidad de tiempo bajo y constante mediante dos palas de rotor, mientras que la tercera pala de rotor se calibra rotando alrededor del eje de paso, en donde son necesarios por naturaleza unos algoritmos de regulación correspondientemente rápidos para efectivamente mantener un número de revoluciones por unidad de tiempo constante y poder realizar de este modo la calibración con la precisión correspondiente. A este respecto también se recomienda la realización de varios procedimientos completos de calibración para obtener una estadística suficientemente buena. Por procedimiento completo de calibración se entiende un desarrollo completo del proceso de calibración, en el que, por ejemplo, se convierten los valores de medida determinados por los sensores en cargas del componente, esto es, se aplican sobre la función de calibración o la función de calibración se aplica sobre los valores de medida. Para ello puede estar previsto por ejemplo un giro de una pala de rotor desde  $-190^\circ$  hasta  $+190^\circ$ , o desde  $0^\circ$  hasta  $+92^\circ$ . Los valores de medida obtenidos de este modo se procesan correspondientemente a continuación, en donde el procedimiento de calibración se ha completado para  $+190^\circ$  o para  $92^\circ$ , para seguir con los ejemplos. Para una mejor estadística, pueden estar previstos desarrollos reiterados del procedimiento de calibración.

Este procedimiento se realiza preferentemente de forma consecutiva para todas las palas y preferentemente particularmente de forma reiterada, hasta alcanzar una precisión de calibración suficiente. El procedimiento de calibración se lleva a cabo preferentemente ante poco viento para no tener ninguna o una mínima pérdida de rendimiento y garantizar una mayor precisión. Cuando no hay viento, se prefiere que el rotor se posicione correspondientemente a través de unos accionamientos por motor, de tal forma que se puedan calibrar, por ejemplo, los sensores de una pala de rotor, situando en tal caso el eje longitudinal de la pala de rotor en posición sustancialmente horizontal.

En los sensores empleados habitualmente o que se pueden emplear se debe de calibrar, por ejemplo, un offset, una inclinación y eventualmente una falta de linealidad, así como un posicionamiento erróneo de los sensores. Ante un posicionamiento erróneo de los sensores puede tener lugar una transformación de coordenadas.

Está además preferentemente previsto un dispositivo de mando y/o de regulación y además un módulo de calibración, en donde el módulo de calibración realiza la calibración de los valores de medida y transmite los valores calibrados al dispositivo de mando y/o de regulación como magnitudes de entrada. Mediante el dispositivo de mando y/o de regulación se manda y/o regula el funcionamiento de la instalación de energía eólica. El dispositivo de mando y/o de regulación puede ser o comprender el guiado del funcionamiento.

De acuerdo con la invención, el proceso de calibración se inicia mediante una señal de calibración. Preferentemente, el módulo de calibración está integrado en el dispositivo de mando y/o de regulación, con lo que es posible un desarrollo rápido del procedimiento.

De acuerdo con la invención, después de la iniciación del procedimiento de calibración a través de la señal de calibración se detiene la instalación de energía eólica. De este modo, se puede desarrollar el procedimiento de calibración anteriormente descrito. La instalación de energía eólica también puede seguir funcionando en barrena después de la iniciación del procedimiento de calibración, en cuyo caso se realizan preferentemente varias series de medida para obtener una estadística con valor informativo y lo suficientemente precisa. Preferentemente, después de la iniciación del procedimiento de calibración a través de la señal de calibración se lleva una pala de rotor de una instalación de energía eólica a una posición predeterminable. Preferentemente, el desplazamiento hasta una posición predeterminable se realiza mediante movimiento alrededor de dos ejes de movimiento: por un lado mediante giro alrededor del eje vertical de la torre mediante el sistema de seguimiento del viento, con lo que el plano del rotor se sitúa en un ángulo predeterminado con respecto a la dirección del viento, preferentemente perpendicular con respecto a la dirección del viento (aprox.  $90^\circ$ ) o perpendicular (aprox.  $90^\circ$ ) con respecto a la normal del plano del rotor. Además, mediante giro alrededor del eje del rotor, en donde la pala de rotor a calibrar se sitúa en un ángulo predeterminable con respecto a la horizontal, particularmente en una posición horizontal.

El objetivo se resuelve además mediante una instalación de energía eólica con un módulo de calibración para la calibración automática de al menos un sensor, que mide la carga de un componente móvil de la instalación de energía eólica, en donde el módulo de calibración está conformado para la realización de un procedimiento de

acuerdo con la invención, tal y como se ha descrito con anterioridad. Preferentemente está además previsto un dispositivo de mando y/o de regulación, que está conectado con un módulo de calibración o en el que está integrado el módulo de calibración, de tal forma que la instalación de energía eólica se puede mandar o regular a través del dispositivo de mando y/o de regulación, y concretamente en función de las señales de medida calibradas a través del módulo de calibración de sensores de carga correspondientes.

A continuación, se describe la invención sin limitación a la idea general de la invención en base a unos ejemplos de realización, con referencia a los dibujos. En lo que respecta a cualquier particularidad de acuerdo con la invención no descrita con mayor detalle en el texto, se remite expresamente a los dibujos. Estos muestran:

- 10 la fig. 1 una representación esquemática de una instalación de energía eólica,  
la fig. 2 una representación esquemática de una parte de una instalación de energía eólica,
- 15 la fig. 3 una vista esquemática de una pala de rotor desde la brida de la pala en una pala de rotor situada en horizontal,  
la fig. 4 una representación esquemática como la de la fig. 3, pero en otra orientación diferente o en un ángulo de paso diferente de la pala de rotor,
- 20 la fig. 5 una vista esquemática de una instalación de energía eólica,  
la fig. 6 un diagrama de señal de medida, y
- 25 la fig. 7 una representación de un diagrama de señales de medida calibradas así como de valores teóricos.

La calibración de un sistema es la determinación y fijación de una relación funcional entre una magnitud numérica o medible y una característica determinante de un objeto. En los ejemplos de realización según las fig. 1 a 7 se establece una magnitud de medida que varía de forma monótona con el momento de flexión de pala, por ejemplo, una tensión de puente de un puente de medida de calibres extensiométricos en relación con un momento de flexión de pala estático conocido. Después del suministro de una pala de rotor, se dispone por lo general de un protocolo de pesaje del fabricante para cada pala de rotor. A partir de este se puede obtener la distancia de separación del centro de gravedad a la brida de la pala así como el peso total de la pala.

- 35 La calibración de la magnitud de medida es necesaria porque en los procedimientos de medida realizados hasta el momento no se puede definir ninguna función de transferencia fija de los valores obtenidos a través de las señales de medida de sensores a momentos correspondientes. Cuando se mide, por ejemplo, la dilatación de la pala en el elemento cilíndrico de la raíz de la pala, no se puede calcular hasta ese instante el momento de flexión real con la suficiente precisión a partir del valor de dilatación debido a la falta de homogeneidad del material compuesto de fibras. A ello se le añade que los puentes de medida de Wheatstone se desintonizan con facilidad, lo que hace necesaria una calibración posterior de cualquier ajuste del punto de medida.

La fig. 1 está prevista para la definición de los términos y reproduce una representación esquemática de un elemento de una instalación de energía eólica 10. Una góndola 40 está situada sobre una torre 41, lo cual está representado esquemáticamente. En la góndola 40 está previsto un eje del árbol 20, que está orientado con un ángulo  $\alpha$ , que define una inclinación de eje, con respecto a la horizontal. Un árbol 17 está unido con palas de rotor 15, 15' a través de un cubo 16. Las palas de rotor 15, 15' están inclinadas en un ángulo cónico  $\beta$  con respecto a la normal del eje del árbol 20.

50 En la fig. 2 está representado esquemáticamente una parte de las palas de rotor 15 a 15'' y un cubo 16, mediante la que se pretende mostrar el sistema de coordenadas de la brida de la pala. El eje de giro de la pala de rotor está indicado mediante ZB. Los ejes ortogonales con respecto a este son XB e YB. Un giro alrededor del eje YB proporciona un momento de impacto, que está indicado mediante  $M_{YB}$ , y que representa el momento alrededor del eje YB. YB se encuentra en un plano definido por los ejes longitudinales de las palas de rotor.  $M_{YB}$  también se denomina  $M_F$  en el marco de la invención. La dirección de ataque de la fuerza, que pertenece a este momento, está en dirección XB. El momento alrededor del eje XB define correspondientemente el momento de giro, que está indicado mediante  $M_{XB}$  y que en el marco de la invención también se identifica como  $M_S$ . La dirección de ataque de la fuerza de este momento está en dirección del eje YB. En funcionamiento, sobre cada pala de rotor 15 a 15'' actúa con respecto al sistema de coordenadas de la brida de pala según la fig. 2 un momento de impacto y de giro. El

momento de giro resulta sustancialmente de la carga del peso de la pala de rotor, y a ello se le añade una parte del momento de giro que acciona al rotor. El momento de impacto se genera mediante la carga del viento sobre el rotor. Si se saca a la pala de rotor 15, 15' o 15'' del viento mediante regulación aerodinámica (paso), se puede reducir este momento en la dirección de impacto. Una pala de rotor tiene un momento de peso propio MBL, que se obtiene a partir de una multiplicación de la distancia de separación del centro de gravedad del cubo del rotor con respecto al centro de gravedad de la pala de rotor por la masa total de la pala y la aceleración de la gravedad (por ejemplo,  $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Para la referenciación de las señales de los sensores se debe tener preferentemente en cuenta la distancia de separación del centro de gravedad a la posición del sensor. En general se deberían tener en cuenta para la referencia tanto datos geométricos (inclinación del eje, posición del sensor y orientación, posición de la pala y/o del rotor) así como parámetros del componente (masa, coordenadas del centro de gravedad, eventualmente datos estructurales, en caso que se deba divergir de la suposición simplificada de la distribución uniforme de carga en la raíz cilíndrica de la pala).

En la medida práctica se ha acreditado la fijación o colocación de calibres extensiométricos en la pared interior de la pala del rotor en el elemento cilíndrico de las palas de rotor en la proximidad de la brida de la pala. Alternativamente, también se pueden utilizar otros sensores, como, por ejemplo, calibres de pivote de dilatación de la unión cojinete-brida de pala u otros extensímetros. Con referencia a las fig. 3 y fig. 4, en las que está representada esquemáticamente una vista desde la brida de pala 18 hacia la punta de la pala de rotor, en donde está representado un único perfil de la pala de rotor por ejemplo en el centro de gravedad de la pala de rotor, está indicada la posición de los sensores 11 a 14. Están dispuestos dos sensores 11 y 13 o 12 y 14 del mismo tipo enfrentados entre sí. Los ejes a través de los sensores 11 y 13 así como 12 y 14 se encuentran situados sustancialmente perpendiculares entre sí.

En la fig. 3, en la que está representado el caso de una posición de funcionamiento de la pala de rotor 15 con un ángulo de pala próximo a  $0^\circ$ , los ejes principales YB' y XB' de la sección de la pala de rotor 15 coinciden con los ejes de la brida de pala YB y XB. Con la suposición simplificada de que los momentos de flexión de pala se aplican de forma homogénea al elemento cilíndrico, se utilizan por lo general sensores que se introducen o sitúan en los ejes principales de la pala. Estos sensores 11 – 14 también están representados esquemáticamente de forma correspondiente. Estos pueden estar introducidos naturalmente también dentro de la brida de pala 18. En la fig. 3 está también representado que los sensores 11 – 14 están conectados con módulos de calibración 22, 22', que están conectados con un dispositivo de mando y/o de regulación 23. En otra forma de realización ventajosa, los módulos de calibración 22, 22' están agrupados en una única unidad.

La fig. 4 muestra una representación correspondiente de una pala de rotor 15 girada con un ángulo de paso 42. Los ejes principales YB' y XB' correspondientes están girados el ángulo de paso 42 con respecto a los ejes YB y XB. También se encuentra representado un viento 24 con una dirección de viento correspondiente.

En una primera fase para el procedimiento de calibración, la pala de rotor 15 a calibrar se puede orientar de acuerdo con la fig. 5 de forma horizontal, es decir, el eje de la pala 19 se orienta de forma horizontal. De este modo el ángulo acimutal del rotor  $\alpha$  toma un valor de  $90^\circ$  para esta pala. Para poco viento, esto es, para una velocidad de viento que se encuentra sustancialmente por debajo de la velocidad de puesta en marcha de la instalación de energía eólica, la instalación de energía eólica 10 puede quedar detenida directamente en el viento.

En la fig. 5 está representada una situación en la que la velocidad media del viento de un anemómetro de góndola, que no está representado, se encuentra entre una velocidad de puesta en marcha de la instalación de energía eólica y  $7 \text{ m/s}$ . Para ello, la góndola ha girado  $90^\circ$  hacia la izquierda según una vista desde arriba, de tal forma que la pala de rotor 15 está dispuesta en la dirección del viento o está orientada en una especie de posición de bandera. Ahora se puede inclinar la pala de rotor 15 por ejemplo en un intervalo comprendido entre  $-190^\circ$  y  $190^\circ$ , de tal forma que se pueden registrar señales de sensor correspondientes. En la fig. 6 se muestra una representación correspondiente de señales medidas de esta forma. El ángulo cónico  $\beta$  no tiene preferentemente ninguna influencia sobre el desarrollo del momento para una rotación de pala como la anteriormente representada.

La fig. 6 muestra señales en bruto de dos sensores 11 a 14, en donde aquí encuentran uso dos sensores orientados ortogonalmente entre sí, por ejemplo, los sensores 11, 12 o 13, 14. La curva de medida 30 se refiere a la señal relativa al momento de impacto y la curva de medida 31 se refiere a la señal relativa al momento de giro. En el eje de ordenadas se representa una tensión en voltios, en donde esta tensión se somete a la finalización a un amplificador operacional, que amplifica correspondientemente la señal del sensor correspondiente. En el eje de abscisas están

representadas las posiciones de ángulo de paso de la pala de rotor. La gráfica de la fig. 6 muestra las señales en bruto de dos sensores 11 y 12 en los ejes principales, o, más exactamente, con un desplazamiento angular con respecto a los ejes principales. Para ello se emplearon puntos de medida de calibres extensiométricos. El punto de medida en la dirección de giro se desplazó en 5,8° con respecto a la costura de pegado de la pala, de tal forma que se obtiene un desplazamiento del máximo con respecto al punto cero o con respecto a 90°. Las señales de medida están representadas con respecto al ángulo de paso de la pala de rotor para un recorrido de paso de -190° a 190°.

Teniendo en cuenta la inclinación de eje presente de 6° y la suposición idealizada de que el elemento cilíndrico situado detrás de la brida de pala se puede considerar como un cilindro homogéneo y que el centro de gravedad de masa se encuentra sobre el eje de giro de inclinación, se supone que para los ángulos -186°, -96°, -6°, 84° y 174° los momentos estáticos de peso propio alcanzan su máximo con respecto al momento de impacto y al momento de giro. En estos puntos se toman tensiones de medida SF y SE. En base a estas tensiones de medida tomadas, se determinan los momentos de flexión con coeficientes de diafonía. Los coeficientes de diafonía sirven para multiplicarse por una señal analógica de medida para determinar los momentos actuales de flexión. Los coeficientes de diafonía determinados de este modo para determinados ángulos son válidos entonces para toda la curva, esto es, también para otros ángulos.

De las ecuaciones de partida

20 **Ecuación 1:**  $S_F = A_1 \times M_F + A_3 \times M_E$  (1.1)

Y

25 **Ecuación 2:**  $S_E = A_2 \times M_F + A_4 \times M_E$  (1.2)

en donde estas ecuaciones de partida encuentran su uso para sensores lineales, se pueden determinar los coeficientes A<sub>1</sub> a A<sub>4</sub> directamente a partir de los valores de señal SF y SE de la gráfica de la fig. 6 en las posiciones correspondientes -186°, -96°, -6°, 84° y 174° (para una inclinación de eje de 6°). En ello se tiene que tener en cuenta que S<sub>F</sub> es la señal de medida para el momento de impacto y S<sub>E</sub> la señal de medida para el momento de giro, y M<sub>F</sub> el momento de impacto y M<sub>E</sub> el momento de giro.

Para el primer caso está previsto un ángulo de paso de -180°, 0° o 180°. Los ángulos de paso están idealizados. Eventualmente se tiene que tener en cuenta la inclinación del eje, esto es, elegir, por ejemplo, un ángulo de paso de -186°, -6° y 174° como antes. Para ello el momento de impacto es 0, de tal forma que A<sub>3</sub> y A<sub>4</sub> se obtienen directamente del conocimiento del momento de giro. En el caso de un ángulo de -90° y 90° (o -96° y 84°), el momento de giro es igual a 0, de tal forma que del conocimiento del momento de impacto se obtienen directamente los coeficientes A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub>.

De este modo aplica para el momento de impacto  $M_F = D_1 S_F + D_3 S_E$  y para el momento de giro  $M_E = D_2 S_F + D_4 S_E$  con  $N = A_1 \times A_4 - A_2 \times A_3$  y  $D_1 = A_4/N$ ,  $D_3 = -A_3/N$ ,  $D_4 = A_1/N$ ,  $D_2 = -A_2/N$ .

En el caso de sensores desplazados en ángulo, el desplazamiento angular se debería compensar matemáticamente recurriendo a los sensores que se encuentran aproximadamente ortogonales. La compensación matemática se realiza, por ejemplo, mediante unas matrices de transformación por sí mismas conocidas que contienen sustancialmente componentes senoidales y cosenoidales. Para este caso es ventajoso, a diferencia de la disposición mostrada en la fig. 3, cuando el módulo de calibración está conformado para todos los cuatro sensores representados como una única unidad. De este modo se puede realizar la calibración completa, incluida la compensación de la posición errónea de los sensores, antes de que las señales de los sensores se almacenen en el dispositivo de regulación 23. La conformación de un único módulo de calibración para todos los sensores tiene además la ventaja de que también un procedimiento estático de evaluación puede promediar sin problemas todas las informaciones de los sensores.

De ello se obtienen correspondientemente momentos de impacto 32 calibrados o calculados y un momento de giro 33 de la fig. 7. El eje Y o de abscisas está representado normalizado en la fig. 7, es decir, un 1 se corresponde con el momento nominal estático. Para confirmar la teoría se obtiene el momento resultante de momento de impacto y de giro como una recta ideal. Este está representado en la fig. 7 como momento global calibrado 34. También el momento de impacto ideal 35 típico o teórico calculado a partir del seno del ángulo de paso mas la inclinación de eje Sigma multiplicado por el momento estático del peso propio ( $\text{sen}(\text{ángulo de paso} + \sigma) \times M_{\text{Stat}}$ ) discurre sustancialmente exactamente igual que el momento de impacto calibrado 32. La curva 35, concretamente el



momento de impacto teóricamente calculado y el momento de impacto calibrado 32 tienen una elevada coincidencia. Por seguridad, se representó en el intervalo comprendido entre  $-10$  y  $100^\circ$  también el ángulo de paso medido 36.

Alternativamente es posible no medir el intervalo completo de ángulo de  $-190^\circ$  a  $190^\circ$  o de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ , y determinar los coeficientes  $A_1$  a  $A_4$  mediante puesta a cero de los momentos para determinados ángulos de paso. En lugar de ello se puede calcular el momento de impacto mediante la fórmula  $M_F = \text{sen}(\text{ángulo de paso} + \sigma) \times M_{\text{Stat}}$  o el momento de giro  $M_E = \text{cos}(\text{ángulo de paso} + \sigma) \times M_{\text{Stat}}$ . De este modo se obtienen incluso para un recorrido de paso desde por ejemplo  $0$  a  $92^\circ$  correspondientemente muchas ecuaciones de partida para los datos en bruto, de tal forma que es posible determinar los coeficientes  $A_1$  a  $A_4$  con una calidad suficiente. Esto se puede realizar con un cálculo de compensación, a través del cual se determinan los coeficientes, en donde se minimiza la suma de los cuadrados de la desviación, por ejemplo, mediante el principio de compensación de Gauss. Preferentemente se sitúa para ello la pala de rotor en la posición horizontal y se minimizan las cargas del viento lo máximo posible.

Los cálculos anteriormente representados son válidos para sensores en los que se puede suponer una relación lineal entre momentos de flexión y señal de sensor. Esto aplica, por ejemplo, en mediciones de calibres extensiométricos habituales. En otros sensores, como, por ejemplo, aquellos que adolecen de una histéresis, que miden fuerzas axiales de pernos, tiene sentido prever o adaptar las conversiones con mayor precisión, por ejemplo, mediante el uso de una serie de Taylor, que se interrumpe después del miembro cuadrático o cúbico. Para prever una rutina automática de calibración es especialmente preferido indicar el ángulo acimutal del rotor  $\alpha$  con una precisión de al menos  $\pm 1^\circ$ .

Un procedimiento de calibración de acuerdo con la invención puede prever por lo tanto que se comprueben de antemano en primer lugar las condiciones de viento. Para ello, se puede elegir, por ejemplo, un promedio durante 5 minutos. En tanto en la media en 5 minutos la velocidad del viento sea menor que, por ejemplo,  $3$  m/s o  $5$  m/s o  $7$  m/s, se realiza una calibración.

En este caso se puede detener la instalación y detener la pala de rotor en la que están dispuestos el o los sensores a calibrar, en una posición angular de  $90^\circ$  (preferentemente  $\pm 0,5^\circ$ ). Se aplica entonces un freno del rotor. La instalación se gira eventualmente fuera del viento, la góndola se desplaza, por ejemplo,  $90^\circ$  hacia la izquierda según una vista desde arriba cuando la velocidad del viento se encuentra por debajo de una velocidad de viento de puesta en marcha predeterminada. Se realiza un recorrido de paso para la pala de rotor en un intervalo máximo posible de, por ejemplo,  $-190^\circ$  a  $190^\circ$ . Como régimen de paso se contemplan velocidades de recorrido iguales o inferiores a  $6^\circ/\text{s}$ .

Como magnitudes de medida se deberían registrar las señales  $S_F$  y  $S_E$ , esto es, datos en bruto de los sensores en el momento de giro y en el momento de impacto, así como el ángulo de paso. Estas señales se adquieren preferentemente con un régimen de muestro de al menos  $100$  ms. Preferentemente se prevé una separación aún más corta entre las mediciones. A partir de los valores de medida determinados se determinan los coeficientes de diafonía, tal y como se ha descrito anteriormente. Con los coeficientes determinados se compara ahora para el recorrido de paso de medida un recorrido de momento con un recorrido de momento ideal calculado. En tanto que, comparadas las desviaciones entre el recorrido medido del momento o el momento de impacto calibrado y el momento de giro calibrado con los momentos teóricos, se desvíen en menos de un  $3\%$ , se considera la medición como válida y se libera la instalación y se pone de nuevo en funcionamiento. En tanto que la desviación se encuentre fuera del intervalo de tolerancia de un  $3\%$ , se adaptan correspondientemente los coeficientes de diafonía y se vuelve a realizar el procedimiento de medida. En caso de que después de varias fases de iteración de este tipo aún estuviera presente una desviación demasiado grande, se puede generar una señal de fallo, que hace posible una indicación de que uno o varios sensores están defectuosos, o que las condiciones de entorno, por ejemplo, debido a una velocidad de viento y/o turbulencias de viento demasiado elevadas, no permiten una calibración suficientemente precisa.

Alternativamente a la parada o a un frenado de la instalación de energía eólica o del rotor, también se puede desarrollar el procedimiento de calibración durante la entrada en barrena de las palas de rotor, teniendo lugar para ello una evaluación estática mediante el registro de varias señales del mismo tipo, es decir, varias señales de medida para un mismo ángulo de paso, en todo caso para diferentes ángulos acimutales del rotor  $\alpha$ . Entonces se realiza para diferentes ángulos acimutales  $\alpha$  y los correspondientemente iguales ángulos de paso un promedio de los momentos de impacto y momentos de giro medidos, y se comparan estos con la curva idealizada o el recorrido idealizado de los momentos.

Un procedimiento de calibración para un sistema de sensores auxiliar o de árbol puede prever que puedan estar previstas varias rotaciones del rotor (cubo o árbol), mientras se registra el ángulo de rotación y los momentos

correspondientes a través de los sensores correspondientes. En este caso puede tener lugar una calibración de los sensores mediante un procedimiento de mínimos cuadrados o una estadística correspondiente.

La realización del procedimiento de calibración tiene lugar preferentemente para poca o ninguna visibilidad, por ejemplo, a oscuras o con niebla. Preferentemente está prevista para ello una detección de visibilidad o un procedimiento o un dispositivo para la detección de visibilidad, que emite una señal que indica particularmente una autorización para la realización de un procedimiento de calibración cuando se está por debajo de una visibilidad predeterminable.

10 Lista de símbolos de referencia

10	instalación de energía eólica
11 – 14	sensor
15, 15', 15''	pala de rotor
15 6	cubo
17	árbol
18	brida de pala
19	eje de pala
20	eje de árbol
20 22, 22'	módulo de calibración
23	dispositivo de mando y/o de regulación
24	viento
30	curva de medida del momento de impacto
31	curva de medida del momento de giro
25 32	momento de impacto calibrado
33	momento de giro calibrado
34	momento total calibrado
35	momento de impacto teórico
36	ángulo de paso medido
30 40	góndola
41	torre
42	ángulo de paso
$\alpha$	ángulo acimutal
$\sigma$	inclinación del eje
35 $\beta$	ángulo cónico
XB	eje
YB	eje
ZB	eje
$M_{YB}$	momento alrededor del eje YB
40 $M_{XB}$	momento alrededor del eje XB

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para el funcionamiento de una instalación de energía eólica (10) que comprende un procedimiento para la calibración de al menos un sensor (11 – 14) de una instalación de energía eólica (10), en donde la instalación de energía eólica (10) presenta al menos un componente (15, 15', 15'', 16, 17) móvil, en donde el componente (15 – 17) se pivota o gira alrededor de un eje (19, 20) predeterminable y en donde se evalúa un valor de medida (30, 31) adquirido a través de al menos un sensor (11 – 14), que es una medida de la carga del componente (15 – 17), en donde el procedimiento de calibración se realiza automáticamente, en donde el procedimiento de calibración se inicia a través de una señal de calibración, en donde después de la iniciación del procedimiento de calibración a través de la señal de calibración se detiene la instalación de energía eólica (10) o el procedimiento de calibración tiene lugar durante la entrada en barrena de las palas de rotor (15 – 15''), en donde la evaluación comprende que para una desviación del valor de medida (30, 31) adaptado a través de una función de calibración con respecto a una referencia (35) predeterminable y/o almacenada y/o determinada, que es mayor que un valor nominal de desviación predeterminable, el valor de medida (30, 31) adaptado a través de la función de calibración es la base para la determinación y el almacenamiento de una función de calibración adaptada, o en donde la evaluación comprende que para una desviación del valor de medida (30, 31) con respecto a una referencia (35) predeterminable y/o almacenada y/o determinada, que es mayor que un valor nominal de desviación predeterminable, el valor de medida (30, 31) adquirido es la base para la determinación y el almacenamiento de una función de calibración adaptada.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque el al menos un sensor (11 – 14) es un sensor de carga, en donde particularmente están previstas una unidad de mando y/o de regulación (23) y además un módulo de calibración (22, 22''), en donde el módulo de calibración (22, 22'') realiza la calibración de los valores de medida y transmite los valores calibrados al dispositivo de mando y/o de regulación (23), en donde particularmente el dispositivo de mando y/o de regulación (23) manda y/o regula el funcionamiento de la instalación de energía eólica (10), en donde particularmente el módulo de calibración (22, 22'') está integrado en el dispositivo de mando y/o de regulación (23).
3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, caracterizado porque después de la iniciación del procedimiento de calibración (10) a través de la señal de calibración se lleva una pala de rotor (15 – 15'') de la instalación de energía eólica (10) a una posición sustancialmente predeterminable, en donde particularmente el desplazamiento de la pala de rotor (15 – 15'') a una posición predeterminable ocurre con respecto a la dirección del viento, en donde particularmente el desplazamiento de la pala de rotor (15 – 15'') se realiza a una posición sustancialmente horizontal.
4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque se recogen y/o evalúan una pluralidad de valores de medida (30, 31) del al menos un sensor (11 – 14) durante el pivotaje o giro del componente (15 – 17), en donde particularmente la referencia comprende una pluralidad o una función de valores nominales (35), que se pueden predeterminar y/o están almacenados y/o han sido determinados.
5. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque se repite la elaboración y el almacenamiento de una función adaptada de calibración.
6. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque la evaluación y/o el procedimiento de calibración se realizan de forma automática, en donde particularmente los valores de medida (30, 31) se adquieren con una frecuencia de entre 0,01 Hz y 1000 Hz, en donde particularmente los valores de medida (30, 31) se adquieren en el intervalo completo de pivotaje o de giro, en donde particularmente el componente es una pala de rotor (15 – 15'') y/o un cubo (16) y/o un árbol (17), en donde particularmente el eje (19, 20) es un eje de árbol de rotor (20) o un eje longitudinal de pala de rotor (19).
7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado porque cuando el componente (15 – 17) es una pala de rotor (15 – 15''), el pivotaje o giro se realiza más de 90°, particularmente más de 100°, particularmente más de 120°, particularmente más de 180°, particularmente más de 270°, particularmente más de 360°, o cuando el componente (15 – 17) es un cubo (16) y/o un árbol (17), el pivotaje o el giro se produce en varias vueltas.
8. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, caracterizado porque se genera una señal de fallo cuando un procedimiento completo de calibración repetido en un número predeterminable de iteraciones da lugar a que la desviación del valor de medida (30, 31) adaptado a través de la función de calibración con respecto a la referencia es mayor que el valor nominal de desviación predeterminable.

9. Instalación de energía eólica (10) con un módulo de calibración (22, 22') para la calibración automática de al menos un sensor (11 – 14), que mide la carga de un componente (15 – 17) móvil de la instalación de energía eólica (10), en donde el módulo de calibración (22, 22') está conformado para la realización de un procedimiento 5 según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

10. Instalación de energía eólica (10) según la reivindicación 9, caracterizada porque además está previsto un dispositivo de mando y/o de regulación (23) que está conectado con el módulo de calibración (22, 22') o está integrado en el módulo de calibración (22, 22').

10

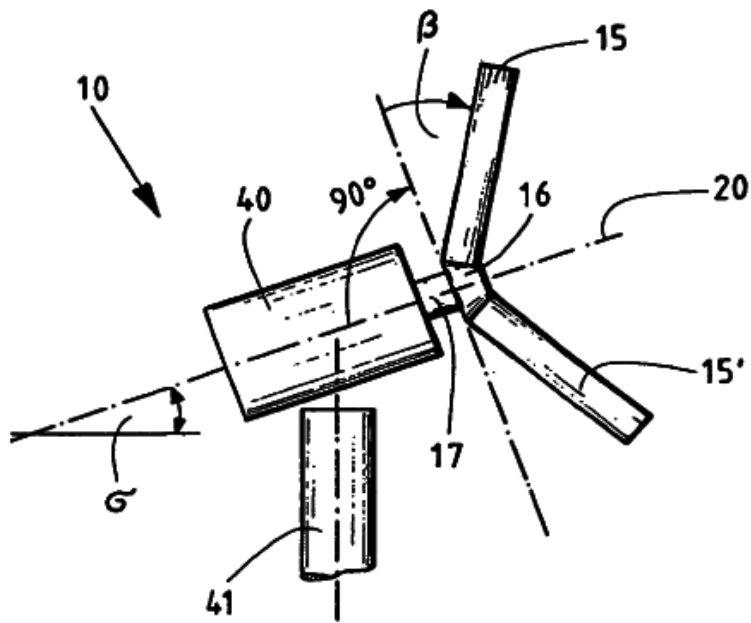


Fig. 1

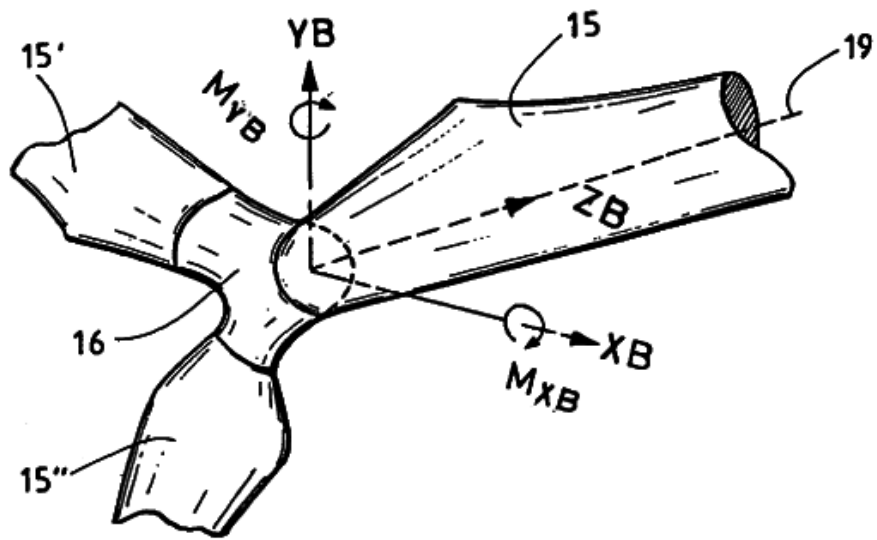


Fig. 2

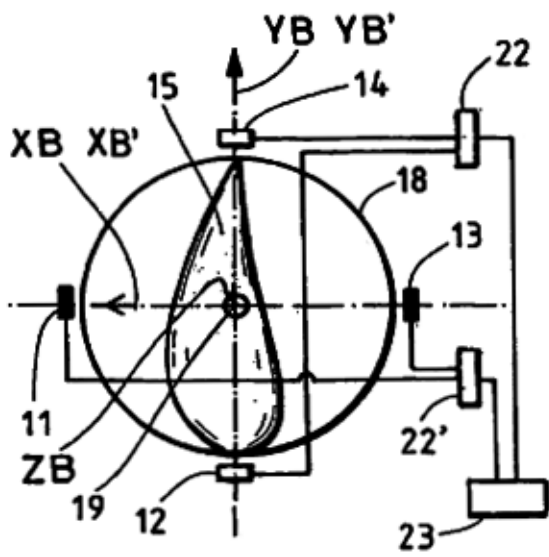


Fig. 3

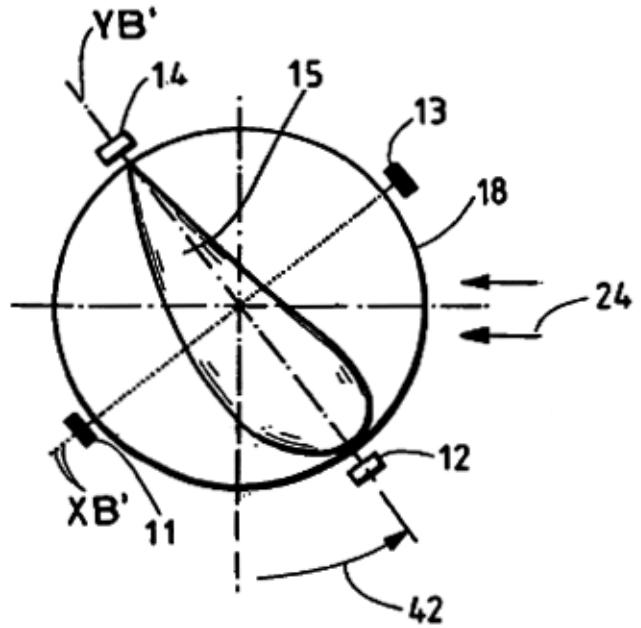


Fig. 4

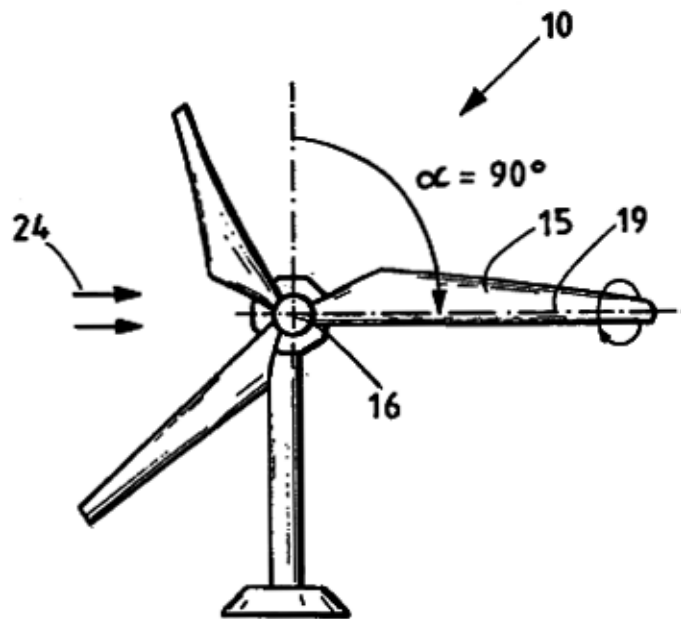


Fig. 5

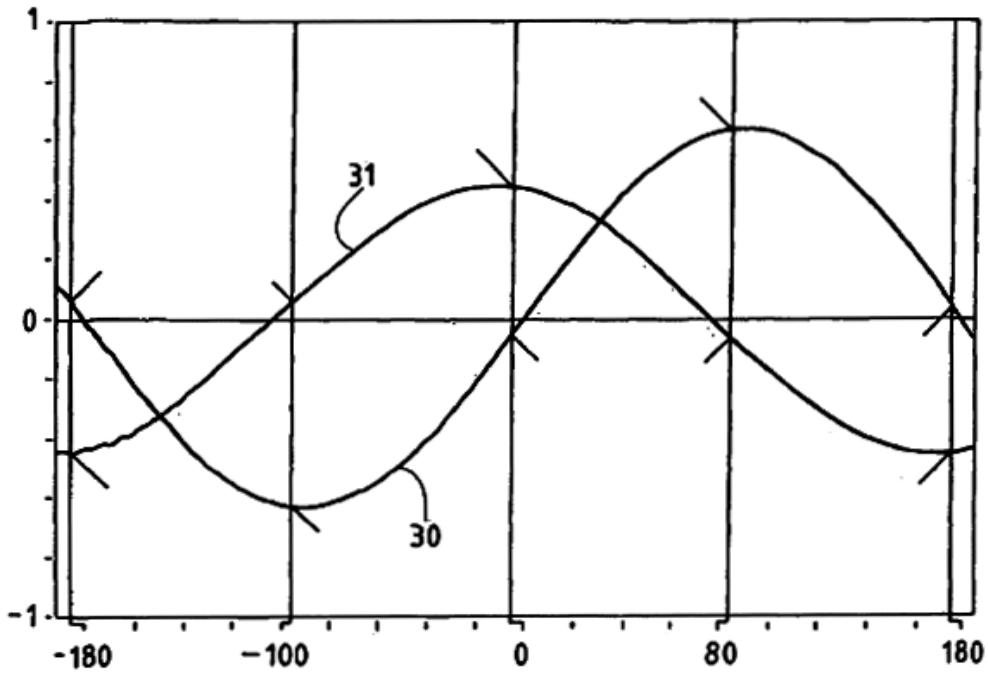


Fig. 6

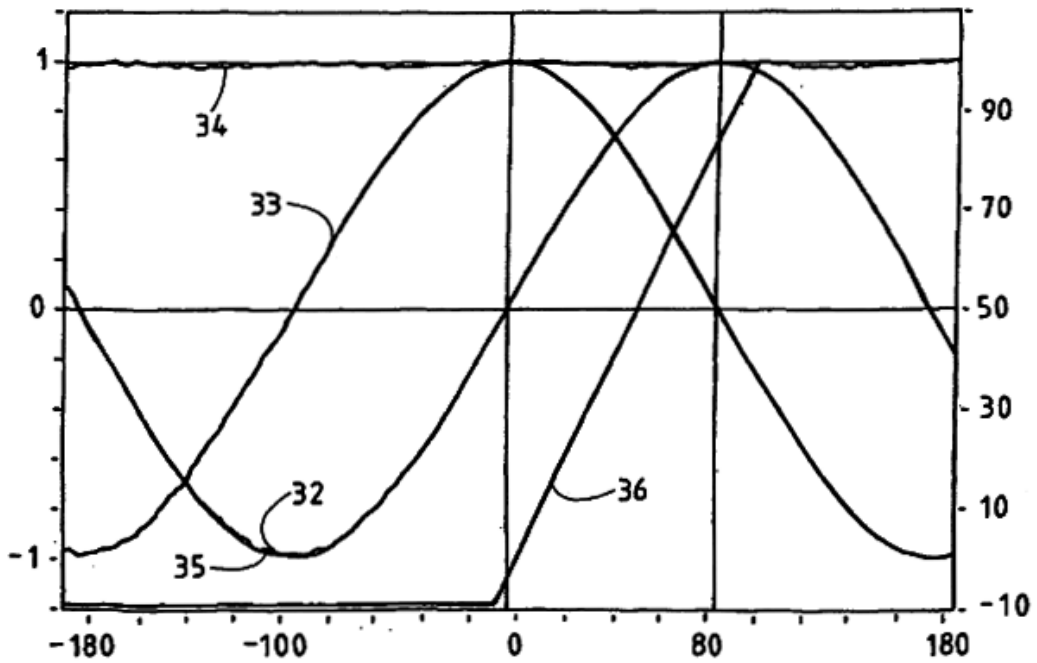


Fig. 7