

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 980 243**

51 Int. Cl.:

F16C 17/02 (2006.01)
F16C 17/04 (2006.01)
F16C 17/26 (2006.01)
F16C 23/04 (2006.01)
F16C 32/06 (2006.01)
F16C 33/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.11.2020** **E 20210368 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2024** **EP 4006367**

54 Título: **Sistema de cojinete de gas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
30.09.2024

73 Titular/es:

EUROPEAN SPACE AGENCY (100.0%)
8-10 rue Mario-Nikis
75738 Paris Cedex 15, FR

72 Inventor/es:

HEINDEL, STEFAN y
LIEBOLD, FLORIAN

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 980 243 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

Sistema de cojinete de gas

Campo técnico

- 5 Esta solicitud se refiere a sistemas de cojinete (conjuntos de cojinete) para estabilizar la rotación de un elemento giratorio utilizando uno o más cojinetes de gas. Estos sistemas de cojinete pueden aplicarse, por ejemplo, a activadores de control de inclinación para naves espaciales, tales como ruedas de reacción, giroscopios de momento de control o esferas de reacción.

Antecedentes de la invención

- 10 El soporte de discos giratorios (u otros objetos giratorios) con baja fricción es un problema con numerosas soluciones técnicas. Para aplicaciones terrestres, estas soluciones son a menudo cojinetes lisos o cojinetes de elementos rodantes. Para maquinaria que exceda la envolvente operativa de estos tipos de cojinete, se pueden utilizar cojinetes estáticos o dinámicos de fluido o gas. Para aplicaciones especiales que requieren una vida útil larga, funcionan a altas velocidades, o no permiten lubricación, los cojinetes magnéticos activos y pasivos pueden ser una alternativa.

- 15 Las peculiaridades del espacio hacen difícil la elección del cojinete en naves espaciales. Los requisitos encontrados comúnmente se refieren al funcionamiento sin mantenimiento durante más de una década, la tolerancia contra la degradación de lubricantes fluidos debido a desgasificación, radiación y otros efectos, la necesidad de baja fricción causada por la potencia eléctrica limitada y la robustez contra las altas cargas que el cojinete tiene que soportar durante el lanzamiento de la nave espacial. Los requisitos para las ruedas de reacción que controlan la actitud de una nave espacial son incluso más desafiantes. Un contribuyente clave es el alto número de revoluciones, que puede exceder fácilmente un billón. Además, las naves espaciales modernas a menudo presentan instrumentos científicos sensibles, tales como cámaras o interferómetros. Estos instrumentos requieren una nave espacial con una alta precisión de apuntamiento y bajos niveles de (micro)vibración. La tecnología de rueda de reacción del estado de la técnica se basa principalmente en cojinetes de elementos rodantes.

- 25 A pesar de su uso extendido para ruedas de reacción, los cojinetes de bolas tienen una serie de desventajas:

- El contacto tribológico entre elementos rodantes (por ejemplo, bolas), pistas de rodadura y jaula requiere una lubricación constante. La disponibilidad de lubricante debe asegurarse durante toda la vida útil de la rueda sin posibilidad de intervención manual. Los sistemas de repetición de lubricación necesarios aumentan la complejidad del sistema. Aunque la lubricación constante puede reducir el desgaste de los contactos tribológicos, la vida útil sigue siendo limitada.
- La pequeña área de contacto entre las pistas de rodadura y los elementos rodantes conduce a altas presiones de contacto hertzianas. Los cojinetes de bolas son por consiguiente sensibles a las condiciones de sobrecarga que podrían deformar, bien los elementos rodantes, o bien las pistas de rodadura.
- Los cojinetes de bolas proporcionan poca amortiguación mecánica a través de su contacto directo de cerámica a metal o de metal a metal, transmitiendo por lo tanto vibraciones mecánicas no deseadas.
- Las tolerancias de fabricación de los cojinetes de elementos rodantes provocan vibraciones mecánicas y ruido no deseados.
- Los cojinetes de elementos rodantes pueden presentar un comportamiento no deseado provocado por la interacción entre la jaula de cojinete de bolas y los elementos rodantes. Este comportamiento no deseado provoca altos niveles de ruido del cojinete y un aumento de la fricción. El inicio de este efecto es potencialmente aleatorio y, por consiguiente, difícil de predecir.
- La función de lubricación del lubricante líquido solo está garantizada por encima de una velocidad umbral de aproximadamente 200 rpm. Por lo tanto, los operadores de naves espaciales tienen que asegurarse de que las ruedas corren por encima de ese umbral y evitar inversiones de velocidad. Esto es una limitación de la capacidad de funcionamiento de los satélites y de las sondas espaciales.

- 50 Por lo tanto, existe la necesidad de sistemas de cojinete mejorados (conjuntos de cojinete) para estabilizar la rotación de elementos giratorios, especialmente a bordo de una nave espacial (tal como un satélite o una sonda espacial, por ejemplo). Además, se necesitan sistemas de cojinete de este tipo que tengan poca complejidad, pocas perturbaciones mecánicas, una larga vida útil y/o un buen comportamiento dinámico. Además, se necesitan sistemas de cojinete de este tipo que permitan una implementación sencilla de un bloqueo de lanzamiento y/o que puedan hacerse funcionar a velocidades de rotación bajas.

El documento US 2018/087566 da a conocer un cojinete sin contacto. En un estado suspendido, el cojinete sin contacto está dispuesto con una separación predeterminada con respecto a una primera superficie de guía. El

cojinete sin contacto incluye: un cuerpo de cojinete y una capa microelectromecánica. El cuerpo de cojinete incluye una segunda superficie de guía, en donde la segunda superficie de guía es opuesta a la primera superficie de guía. La capa microelectromecánica está dispuesta sobre la segunda superficie de guía, e incluye al menos un micro sensor y/o al menos un micro activador.

- 5 El documento US 2010/289362 A1 da a conocer una suspensión ultrasónica piezoeléctrica en gas para crear un soporte de cojinete sin contacto de un instrumento de precisión y específicamente un motor electromagnético. Se forma una micropelícula de gas de presión elevada entre las superficies contiguas de un asiento esférico y un muñón esférico. El muñón esférico está separado de la superficie esférica de un asiento por una micropelícula de gas cuando se excita el piezorresonador.

10 Compendio

En vista de algunas o todas estas necesidades, la presente descripción propone un conjunto de cojinete y un conjunto de rueda de reacción como se describe en la presente memoria.

- 15 Un aspecto de la descripción se refiere a un conjunto de cojinete. El conjunto de cojinete se utiliza para estabilizar la rotación de un elemento giratorio. El elemento giratorio se denomina elemento giratorio. El elemento giratorio puede ser un elemento giratorio para una nave espacial, por ejemplo. El conjunto de cojinete incluye un cojinete de gas que actúa como cojinete para el elemento giratorio. El cojinete de gas es un cojinete de gas estático. El conjunto de cojinete incluye además una bomba de vibración ultrasónica acoplada al cojinete de gas. La bomba de vibración ultrasónica proporciona gas presurizado al cojinete de gas. El conjunto de cojinete incluye además un alojamiento sellado que encierra el cojinete de gas y la bomba de vibración ultrasónica. El alojamiento sellado puede estar sellado herméticamente. Sellado (hermético) puede significar hermético/hermético al gas o hermético a la presión. El alojamiento sellado encierra además el elemento giratorio.

Además, el alojamiento sellado se llena con un gas (por ejemplo, aire, helio, etc.).

- 25 Configurado como se ha descrito anteriormente, el conjunto de cojinete propuesto no requiere lubricante fluido. En comparación con un cojinete de bolas convencional, el conjunto de cojinete tiene muy baja emisión de vibraciones y ruido. Si es necesario, puede funcionar a velocidades de rotación muy bajas y tiene una vida útil suficientemente larga para aplicaciones espaciales. En comparación con los cojinetes magnéticos (tanto activos como pasivos), el conjunto de cojinete propuesto es de bajo coste y baja complejidad. Finalmente, el conjunto de cojinete propuesto tiene un excelente comportamiento dinámico y permite evitar resonancias en las fuerzas de cojinete mediante la adaptación dinámica de la rigidez del cojinete.

- 30 En algunas realizaciones, el conjunto de cojinete puede incluir además una unidad de control para controlar el funcionamiento de la bomba de vibración ultrasónica. La unidad de control puede estar adaptada para controlar una potencia que se suministra a la bomba de vibración ultrasónica dependiendo de una velocidad de rotación del elemento giratorio. La potencia puede ser potencia eléctrica. Controlando la potencia, la unidad de control puede controlar la presurización (por ejemplo, la diferencia de presión) que se aplica mediante la bomba de vibración ultrasónica, dependiendo de la velocidad de rotación del elemento giratorio. Por ejemplo, la unidad de control puede estar adaptada para controlar la potencia que se suministra a la bomba de vibración ultrasónica de tal manera que se eviten resonancias entre el cojinete de gas y el elemento giratorio (por ejemplo, resonancias en la fuerza o fuerzas del cojinete). Para este fin, el conjunto de cojinete puede incluir un sensor para medir la velocidad de rotación del elemento giratorio. Dicho sensor puede estar acoplado a la unidad de control.

- 40 En algunas realizaciones, la unidad de control puede estar adaptada para controlar la potencia que se suministra a la bomba de vibración ultrasónica de tal manera que se aplique una presurización más alta para velocidades de rotación por debajo de un umbral predefinido y se aplique una presurización más baja para velocidades de rotación por encima del umbral predefinido. De este modo, se pueden evitar las resonancias mencionadas anteriormente entre el cojinete de gas y el elemento giratorio.

- 45 En algunas realizaciones, la potencia que se ha de suministrar a la bomba de vibración ultrasónica puede determinarse basándose en la velocidad de rotación del elemento giratorio, utilizando una tabla de consulta. La determinación puede ser realizada por la unidad de control.

- En algunas realizaciones, la bomba de vibración ultrasónica puede ser una bomba de membrana ultrasónica. Específicamente, la bomba de vibración ultrasónica puede ser una bomba de membrana piezoeléctrica, por ejemplo. Como tal, puede ser una bomba de tipo desplazamiento o puede generar una onda estacionaria, estando la entrada de la bomba ubicada en un nodo de la onda estacionaria y estando la salida de la bomba ubicada en un antinodo de la onda estacionaria. Alternativamente, la bomba de vibración ultrasónica puede ser de tipo bobina de émbolo/solenoides, por ejemplo. Por consiguiente, una bomba de vibración ultrasónica adecuada para el propósito previsto puede implementarse de manera sencilla y eficiente.

- 55 En algunas realizaciones, la bomba de vibración ultrasónica puede incluir una válvula sin partes móviles, tal como una válvula de estado sólido, por ejemplo. Adicional o alternativamente, una entrada de la bomba de vibración ultrasónica puede estar conectada (acoplada) a un filtro de partículas.

En algunas realizaciones, el cojinete de gas puede actuar como un cojinete radial para el elemento giratorio. Adicionalmente, el conjunto de cojinete puede incluir uno o más segundos cojinetes de gas que actúan como cojinetes axiales para el elemento giratorio. El uno o más segundos cojinetes de gas pueden estar encerrados por el alojamiento sellado. El segundo cojinete o cojinetes de gas pueden estar provistos de gas presurizado mediante la bomba de vibración ultrasónica mencionada anteriormente o cualquier bomba de vibración ultrasónica adicional como se menciona en las realizaciones posteriores. Por consiguiente, la rotación del elemento giratorio puede estabilizarse tanto en dirección radial como axial.

En algunas realizaciones, el cojinete de gas puede ser un cojinete de gas esférico. Teniendo tal cojinete de gas, el conjunto de cojinete de gas puede ser particularmente adecuado para estabilizar la rotación de un giroscopio de control de momento, permitiendo el movimiento giratorio del mismo.

En algunas realizaciones, el conjunto de cojinete puede incluir además al menos una segunda bomba de vibración ultrasónica que está acoplada al cojinete de gas. La al menos una segunda bomba de vibración ultrasónica puede estar encerrada por el alojamiento sellado y puede proporcionar redundancia a la (primera) bomba de vibración ultrasónica. La segunda bomba o bombas de vibración ultrasónica pueden acoplarse en paralelo a la (primera) bomba de vibración ultrasónica. Además, la segunda bomba o bombas de vibración ultrasónica pueden tener su propio filtro o filtros de partículas en algunas implementaciones. De este modo, se puede reducir el riesgo de fallo crítico del conjunto de cojinete.

En algunas realizaciones, el conjunto de cojinete puede incluir además al menos una tercera bomba de vibración ultrasónica que está acoplada al cojinete de gas. La al menos una tercera bomba de vibración ultrasónica puede estar encerrada por el alojamiento sellado y puede estar acoplada en serie con la (primera) bomba de vibración ultrasónica. De este modo, se puede aumentar la presurización alcanzable. Particularmente, el conjunto de cojinete puede incluir tanto una segunda como una tercera bombas de vibración ultrasónica para lograr tanto redundancia como presiones más altas. Esto puede dar como resultado que se proporcionen dos o más conexiones en serie de bombas en paralelo. De este modo, si el tipo previsto de bomba de vibración ultrasónica no es capaz de proporcionar una presurización objetivo dada, dicha presurización objetivo aún puede lograrse cuando se proporciona una conexión en serie de dos o más bombas de vibración ultrasónica. Ni que decir tiene que prever dicha conexión o conexiones en serie no es necesario si el tipo previsto de bomba de vibración ultrasónica es capaz de proporcionar la presurización objetivo.

En algunas realizaciones, una presión de gas en el alojamiento sellado puede estar en el intervalo de 10 kPa a 80 kPa.

En algunas realizaciones, el alojamiento sellado puede ser una carcasa flexible. Esto ayudaría a reducir el aumento de presión dentro del alojamiento sellado al aumentar la temperatura de funcionamiento. Adicional o alternativamente, el alojamiento sellado puede incluir una junta sellada.

En algunas realizaciones, el elemento giratorio puede ser uno de una rueda de reacción para una nave espacial, un giroscopio de control de momento para una nave espacial y una esfera de reacción para una nave espacial. La nave espacial puede ser un satélite o sonda espacial, por ejemplo.

Otro aspecto de la descripción se refiere a un conjunto de rueda de reacción para una nave espacial. El conjunto de rueda de reacción puede incluir una rueda de reacción. El conjunto de rueda de reacción puede incluir además el conjunto de cojinete según el aspecto mencionado anteriormente y cualquiera de sus realizaciones, para estabilizar la rotación de la rueda de reacción.

Otros aspectos de la descripción se refieren a métodos para operar o controlar el conjunto de cojinete mencionado anteriormente, para estabilizar la rotación de un elemento giratorio. En particular, tales métodos pueden incluir controlar el funcionamiento de la bomba de vibración ultrasónica. Dicho control puede implicar controlar una potencia (por ejemplo, potencia eléctrica) que se suministra a la bomba de vibración ultrasónica dependiendo de la velocidad de rotación del elemento giratorio. Por ejemplo, el control de la potencia que se suministra a la bomba de vibración ultrasónica puede realizarse de tal manera que se eviten resonancias entre el cojinete de gas y el elemento giratorio (por ejemplo, resonancias en la fuerza o fuerzas de cojinete). Específicamente, la potencia que se suministra a la bomba de vibración ultrasónica puede controlarse de tal manera que la bomba de vibración ultrasónica aplique una presurización más alta para velocidades de rotación por debajo de un umbral predefinido y se aplique una presurización más baja para velocidades de rotación por encima del umbral predefinido. Además, la potencia que se ha de suministrar a la bomba de vibración ultrasónica puede determinarse basándose en la velocidad de rotación del elemento giratorio, utilizando una tabla de consulta.

Se apreciará que las características del aparato y las etapas del método pueden intercambiarse de muchas maneras. En particular, los detalles del aparato dados a conocer (por ejemplo, conjunto de cojinete o conjunto de rueda de reacción) pueden realizarse mediante el método correspondiente de funcionamiento del aparato, y viceversa, como apreciará el experto. Además, se entiende que cualquiera de las declaraciones anteriores realizadas con respecto al aparato se aplica igualmente al método correspondiente, y viceversa.

Breve descripción de las figuras

A continuación se explican ejemplos de realización de la descripción con referencia a los dibujos adjuntos, en donde

La Fig. 1 ilustra esquemáticamente un ejemplo de un conjunto de cojinete según las realizaciones de la descripción,

5 Las Figs. 2A y 2B ilustran esquemáticamente un ejemplo de un alojamiento sellado para el conjunto de cojinete, según las realizaciones de la descripción,

La Fig. 3 ilustra esquemáticamente un ejemplo de una disposición de bomba para el conjunto de cojinete, según las realizaciones de la descripción,

La Fig. 4 es un diagrama que ilustra ejemplos de fuerzas de cojinete para diferentes rigideces de cojinete del conjunto de cojinete,

10 La Fig. 5 ilustra esquemáticamente otro ejemplo de un conjunto de cojinete según las realizaciones de la descripción,

La Fig. 6 ilustra esquemáticamente otro ejemplo más de un conjunto de cojinete según las realizaciones de la descripción,

15 La Fig. 7 es un diagrama que ilustra un ejemplo de una relación de potencia perdida frente a velocidad para un conjunto de cojinete según las realizaciones de la presente descripción,

Las Figs. 8A, 8B, 8C, y 8D son diagramas que ilustran espectros de microvibración para un conjunto de cojinete según las realizaciones de la descripción y un conjunto de cojinete convencional, y

La Fig. 9 es un diagrama que ilustra los niveles de ruido para un conjunto de cojinete según las realizaciones de la descripción y un conjunto de cojinete convencional.

20 Descripción detallada

A continuación, se describirán realizaciones ejemplares de la descripción con referencia a las figuras adjuntas. Los elementos idénticos en las figuras pueden ser indicados por números de referencia idénticos, y puede omitirse una descripción repetida de los mismos.

25 Para superar los problemas mencionados anteriormente de los cojinetes de elementos rodantes, son factibles una serie de mejoras. Como solución técnica, debería evitarse un contacto mecánico entre el rotor y el estator.

Una posibilidad para evitar el contacto mecánico consiste en el uso de cojinetes magnéticos activos (AMB). Los sistemas basados en cojinetes magnéticos activos pueden tener varias ventajas, tales como movimiento sin fricción, sin desgaste y, por lo tanto, vida útil mecánica infinita teórica, movimientos suaves, la posibilidad de equilibrio electrónico a través de estrategias de control adecuadas y bajos niveles de vibración cuando se diseñan de manera apropiada. Por otro lado, existen varios inconvenientes que limitan la utilidad espacial:

- Diseño mecánico y eléctrico complejo, que requiere cinco ejes controlados activamente (tres traslaciones, dos rotaciones). Se requiere una integración estrecha de muchos elementos diferentes (sensores, activadores, cableado, imanes) en el estator y el rotor.
- Las implementaciones propuestas tienen por tanto (múltiples) puntos únicos de fallos. La redundancia completa requeriría un sistema incluso más complejo.
- Los cojinetes magnéticos, particularmente los basados en fuerzas de Lorentz, tienen una relación fuerza-peso y fuerza-potencia pobre. Por consiguiente, los sistemas tienden a ser voluminosos y pesados.
- La relación fuerza-peso/fuerza-potencia pobre mencionada anteriormente hace que la operación en condiciones de gravedad sea difícil o imposible, afectando negativamente a la capacidad de prueba.
- La electrónica de control necesaria es compleja. Las características avanzadas, tales como el equilibrio electrónico, requieren una potencia computacional significativa, lo que resulta en un aumento del coste de la electrónica.
- Los sistemas con cojinetes magnéticos activos requieren cojinetes de contacto de emergencia, a menudo cojinetes lisos o de bolas. En funcionamiento nominal, estos componentes no utilizados añaden peso y complejidad adicionales.
- Los rotores de las ruedas de reacción deben ser bloqueados adicionalmente durante el lanzamiento para evitar el traqueteo y los daños.

Otra posibilidad para evitar el contacto mecánico consiste en el uso de cojinetes magnéticos pasivos (y semiactivos). Para reducir la complejidad del sistema, algunos grados de libertad pueden soportarse por cojinetes magnéticos pasivos. Debido a que no todos los ejes pueden estabilizarse pasivamente, al menos un eje debe soportarse por otros medios, tales como un cojinete magnético activo. Aunque el sistema es menos complejo, también existen desventajas en comparación con la solución de AMB completamente activos:

- La amortiguación de los ejes estabilizados pasivamente es pobre, lo que conduce a resonancias mecánicas pronunciadas.
- Para los ejes pasivos, el equilibrio electrónico es imposible, por lo que persiste una fuente principal de vibraciones exportadas.
- Muchas desventajas de los sistemas de cojinete magnéticos completamente activos también se aplican a disposiciones semiactivas, incluyendo la necesidad de cojinetes de contacto de emergencia, un único punto de fallos y dispositivos de bloqueo adicionales para el lanzamiento.

Otra posibilidad para evitar contacto mecánico consiste en el uso de cojinetes superconductores pasivos. A diferencia de los cojinetes magnéticos pasivos, los superconductores ejercen un comportamiento estable cuando se someten a un campo magnético. Esta propiedad física permite la levitación pasiva sin la necesidad de un sistema de control activo. A pesar de su aparente simplicidad, los cojinetes superconductores pasivos tienen una serie de inconvenientes significativos:

- El efecto superconductor está presente solamente a temperaturas muy bajas (típicamente a o por debajo de 70 K). El enfriamiento del cojinete a tales bajas temperaturas requiere grandes cantidades de energía, incluso con buen aislamiento térmico.
- El enfriamiento requiere un crioenfriador, que es en sí mismo un dispositivo mecánico complejo con partes móviles y, por tanto, una vida útil y emisión de vibración limitadas.
- El sistema requiere un bloqueo de lanzamiento de rotor dedicado, así como un mecanismo de retención/liberación que soporta el rotor cuando el superconductor no está a temperatura de funcionamiento.
- A pesar de su aparente simplicidad, los sistemas necesarios de refrigeración y auxiliares hacen que el dispositivo en su conjunto sea muy complejo.

Otra posibilidad para evitar el contacto mecánico consiste en el uso de cojinetes dinámicos de gas. Los cojinetes de gas permiten un soporte sin contacto que utiliza gas como medio entre una parte estática y rotatoria. Se requiere una alta velocidad relativa de la superficie entre el rotor y el estator para permitir una acumulación de presión que separe ambas superficies. La fricción sólida se produce a bajas velocidades de rotación, lo que la hace inadecuada para ruedas de reacción con pasos a cero frecuentes. Este problema puede abordarse proporcionando un diseño de rotor doble, en el que un pequeño rotor interior es accionado por un motor eléctrico y funciona a altas velocidades para permitir un movimiento relativo constante entre el rotor exterior y el estator, manteniendo eficazmente una separación entre ambos. Las características y deficiencias de un cojinete dinámico de gas son las siguientes:

- Los pasos a cero son imposibles sin contacto, inadecuados para ruedas de reacción (al menos para un diseño de rotor único).
- Par motor de arranque difícil y alto requerido para superar la fricción sólida, el riesgo de desgaste y residuos.
- Diseño de rotor doble: niveles de vibración más altos causados por dos árboles giratorios.

Otra posibilidad más para evitar el contacto mecánico consiste en el uso de cojinetes hidrodinámicos de película de fluido. Este concepto es similar al concepto de cojinetes hidrodinámicos de gas, excepto porque el medio es un fluido en lugar de un gas. Los cojinetes hidrodinámicos de fluido también requieren una velocidad mínima para el funcionamiento nominal. Esta solución tiene los siguientes inconvenientes:

- Fricción sólida durante la puesta en marcha.
- El control de fluidos en condiciones de baja gravedad es un reto.
- Mayor fricción (en comparación con los cojinetes magnéticos o de gas).
- Como ventaja potencial, la solución puede ser más robusta contra vibraciones de lanzamiento.

La presente descripción aborda los problemas y deficiencias mencionados anteriormente. En términos generales, la presente descripción consiste en el campo técnico de los sistemas de cojinete y el control de los mismos. Específicamente, se da conocer un conjunto de cojinete (o sistema de cojinete) que comprende un cojinete de gas (estático), una microbomba ultrasónica y un alojamiento herméticamente sellado. En algunas implementaciones, la

microbomba consiste en una membrana vibratoria que oscila a frecuencias ultrasónicas, accionada por un activador. En tales microbombas, la membrana oscilante crea una onda estacionaria de presión de gas. La entrada de la bomba está ubicada en un nodo de presión de gas, mientras que la salida de la bomba está ubicada en un antinodo de presión. El reflujo puede evitarse a través de una válvula en la salida de la bomba. Un alojamiento herméticamente sellado contiene tanto el sistema de cojinete como la bomba ultrasónica en una atmósfera gaseosa.

La descripción propone además un método para la reducción de vibraciones de un objeto giratorio (elemento giratorio). El método puede alterar la rigidez del cojinete de gas cambiando la presión de salida de la bomba para minimizar las interacciones dinámicas entre el estator, el cojinete y el rotor.

En una realización relativa a un volante de inercia, el sistema de cojinete propuesto es un componente integral en una rueda de reacción o giroscopio de control de momento utilizable para controlar la orientación de una nave espacial.

Con más detalle, la presente descripción propone un sistema de cojinete con bajo ruido mecánico y excelente vida útil. Sus características distintas lo hacen particularmente adecuado para su uso en activadores de control de actitud de naves espaciales, por ejemplo, ruedas de reacción, ruedas de momento, giroscopios de control de momento o esferas de reacción. La descripción se basa en tres elementos principales: un conjunto de cojinete (sistema de cojinete) que incluye un cojinete de gas (estático), una bomba de vibración ultrasónica (por ejemplo, bomba de membrana ultrasónica) y un recinto hermético.

Se ilustra una vista general esquemática de un ejemplo de un conjunto de cojinete 1 según las realizaciones de la descripción en la Fig. 1. El conjunto de cojinete 1 es adecuado para estabilizar la rotación de un elemento 5 giratorio (tal como, por ejemplo, una rueda de reacción o un giroscopio de control de movimiento). El conjunto de cojinete 1 comprende un cojinete 10, 15 de gas (o cojinetes de gas) que actúa como un cojinete para el elemento 5 giratorio, una bomba 20 de vibración ultrasónica acoplada al cojinete 10, 15 de gas, para proporcionar gas presurizado al cojinete 10, 15 de gas, y un alojamiento 40 sellado que encierra el cojinete 10, 15 de gas y la bomba 20 de vibración ultrasónica. El cojinete 10, 15 de gas puede ser un cojinete de gas estático. Puede comprender uno o más (por ejemplo, dos) cojinetes 10 axiales de gas y un cojinete 15 radial de gas que soporta el elemento 5 giratorio. Una pequeña holgura (por ejemplo, $\approx 5 \mu\text{m}$) entre el rotor (es decir, el elemento 5 giratorio) y el estator asegura un movimiento libre del rotor. Los cojinetes 10, 15 de gas pueden estar soportados por una estructura 65 de soporte (mecanizada con precisión).

El cojinete 10, 15 de gas se suministra con un gas (por ejemplo, aire o helio) a través de tubos o tuberías 30 accionadas por la bomba 20 de vibración ultrasónica. La bomba 20 de vibración ultrasónica puede ser una bomba de membrana ultrasónica, por ejemplo, tal como una bomba de membrana piezoeléctrica. Puede ser una bomba de tipo desplazamiento o puede generar una onda estacionaria con la entrada y la salida de la bomba ubicadas en un nodo y un antinodo de la onda estacionaria, respectivamente. Alternativamente, la bomba de vibración ultrasónica puede ser de tipo bobina de émbolo/solenoide, por ejemplo.

El gas 50 de baja presión y baja viscosidad puede entrar en la bomba 20 de vibración ultrasónica a través de una entrada de bomba. La entrada de bomba de la bomba 20 de vibración ultrasónica puede conectarse (acoplarse) a un filtro 35 de partículas para eliminar posibles contaminantes (por ejemplo, partículas, residuos). El filtro 35 de partículas puede servir también de este modo como entrada para el gas 50. El gas 50 está encerrado en el alojamiento 40 sellado, que puede ser una contención herméticamente sellada, cerrado a presión. Por consiguiente, sellado (herméticamente) puede significar hermético/hermético a gases y/o cerrado a presión. El alojamiento 45 sellado (carcasa) puede abrirse para su montaje, reparación o mantenimiento a través de una junta 45 sellada. Como se muestra en la figura, el alojamiento 40 sellado también puede encerrar el elemento 5 giratorio.

El conjunto de cojinete 1 junto con el elemento 5 giratorio pueden montarse, por ejemplo, en una nave espacial (por ejemplo, un satélite o sonda espacial), a través de una base 60 de montaje.

El elemento 5 giratorio también puede denominarse elemento giratorio. El elemento 5 giratorio puede ser un elemento giratorio para una nave espacial, tal como una rueda de reacción, un giroscopio de control de movimiento o una esfera de reacción, como se ha indicado anteriormente.

En algunas implementaciones, el conjunto de cojinete 1 puede comprender el elemento 5 giratorio. Se comprende que el elemento 5 giratorio puede ser accionado por un sistema de accionamiento eléctrico, que no se muestra en los dibujos.

A continuación, se describirán con más detalle posibles implementaciones de elementos y ciertos aspectos del conjunto de cojinete 1. Se comprende que estas implementaciones posibles pueden aplicarse igualmente a los conjuntos de cojinete 2, 3 descritos más adelante.

Cojinete de gas

La presente descripción y los conjuntos de cojinete propuestos son independientes de la realización técnica específica del cojinete de gas. Por ejemplo, el cojinete de gas puede realizarse utilizando un material poroso (tal

como se describe en los documentos de patente JP-H08-6748 B2, JP-S52 92048 A o US 2016/363165 A1).). Otros tipos de cojinete de gas que podrían utilizarse en el contexto de la presente descripción se basan en materiales sólidos con boquillas micromecanizadas (tal como se describe en los documentos de patente US 2012/020596 A1 o CN 101490430 A). Cuando se aplica una presión de gas, el gas sale a través de los poros o boquillas para generar una presión de gas en el rotor. La presión de gas aumenta cuando el espacio entre el rotor y el estator es pequeño, lo que conduce a una fuerza de centrado total. Un sistema de cojinete de gas configurado de manera correspondiente asegura un funcionamiento de rueda sin contacto a lo largo de todo el intervalo de velocidades de rueda. Aquí y en otros casos a lo largo de la presente descripción, "rueda" o "rueda de reacción" se pueden utilizar como un ejemplo no limitativo del elemento 5 giratorio.

Los pequeños espacios de trabajo de unos pocos micrómetros hacen que los sistemas de cojinete de gas sean susceptibles a la expansión térmica. Esto es una preocupación particular para equipos de naves espaciales tales como ruedas de reacción, que tienen que operar en diferencias de temperatura de hasta o por encima de 140 °C. Este problema puede mitigarse eligiendo materiales con coeficientes de expansión térmica (CTE) similares para estator, cojinetes de gas y rotor. Además, se pueden utilizar materiales con bajo CTE, por ejemplo, fibra de carbono o invar. Cuando la elección del material de adaptación resulta difícil, este problema también puede abordarse diseñando el rotor y el estator de una manera compatible.

Bomba de vibración ultrasónica

Los conjuntos de cojinete de gas comprenden (por ejemplo, son accionados por) una bomba de vibración ultrasónica (por ejemplo, bomba de membrana ultrasónica), como un ejemplo de una microbomba o bomba piezoeléctrica. Ejemplos de bombas de vibración ultrasónica se describen en los documentos de patente US 10598192 B2, WO 2009/112866 A1, EP 2312158 A1, EP 2306019 A1. Fabricantes tales como TTP Ventus Ltd. y Murata ofrecen estas microbombas como productos comerciales disponibles. Las posibles realizaciones de bombas de vibración ultrasónicas tienen similitudes, pero también diferencias. Por ejemplo, las bombas de vibración ultrasónica, incluyendo las de TTP Ventus y Murata, pueden basarse en una membrana accionada que vibra a frecuencia ultrasónica (por ejemplo, ≥ 20 kHz). La membrana es accionada por piezoactivadores. En cuanto a las diferencias potenciales, las bombas de vibración ultrasónica pueden ser de un diseño de bomba de tipo desplazamiento. Alternativamente, la bomba de vibración ultrasónica puede generar una onda de gas estacionaria. A continuación, la entrada sin válvula estaría ubicada en un nodo de presión de la onda estacionaria, mientras que la salida con válvula estaría ubicada en el antinodo en el centro. Se comprende que cualquiera de tales bombas de vibración ultrasónica u otras se pueden utilizar para los conjuntos de cojinete según las realizaciones de la descripción.

Debido a su frecuencia de funcionamiento muy alta, las bombas de vibración ultrasónicas son inaudibles. Además, la alta frecuencia de oscilación combinada con la baja masa de membrana conduce a un comportamiento de bomba sin vibraciones de facto.

Las válvulas pueden desempeñar un papel importante para el rendimiento así como para la vida útil de una microbomba. Un posible ejemplo de una válvula típica para microbombas comprende una membrana polimérica móvil, que está limitada en sí misma en vida útil (por ejemplo, típicamente 10^{11} ciclos). Para que sea factible, la vida útil de la válvula debe aumentarse a aproximadamente 10 a 15 años de funcionamiento continuo. Esto puede conseguirse, por ejemplo, mediante válvulas de estado sólido, que se basan en estructuras de boquilla simples sin movimiento. Debido a la ausencia de partes móviles, la vida útil es en principio ilimitada (aunque la eficiencia puede ser menor que para estructuras de válvula móviles). Por consiguiente, la bomba 20 de vibración ultrasónica (o cualquier otra bomba de vibración ultrasónica descrita a lo largo de la descripción) puede comprender una válvula de estado sólido.

La electrónica de accionamiento para bombas piezoeléctricas es comparativamente simple, ya que (solo) se requiere una tensión sinusoidal de una cierta frecuencia para accionar la bomba. El circuito puede basarse en un microcontrolador, pero debido a su simplicidad también es posible diseñar el circuito de accionamiento utilizando un pequeño número de componentes electrónicos discretos. La baja complejidad de la electrónica de accionamiento tiene efectos positivos en el precio, así como en la fiabilidad de la electrónica. En el documento de patente GB 2577710 A se describen circuitos ejemplares para accionar una bomba piezoeléctrica. Por ejemplo, el circuito de accionamiento puede utilizar un amplificador operacional o un puente en H para accionar el activador o activadores piezoeléctricos.

Como se ha observado anteriormente, la bomba de vibración ultrasónica también puede implementarse mediante una bomba de tipo bobina de émbolo/solenoide, por ejemplo.

Alojamiento sellado

Para el funcionamiento en condiciones de vacío (por ejemplo, en el espacio), se requiere un alojamiento herméticamente sellado para mantener el gas de trabajo presente durante toda la vida útil de la nave espacial. Se puede evitar la fuga de gas potencial reduciendo el número de bridas y partes a un mínimo absoluto. En cualquier caso, se requiere una tapa de acceso sellada para permitir el montaje y la reparación de los componentes dentro del alojamiento. Después de la fabricación y el montaje, la tapa de acceso se cerrará y se sellará. Por consiguiente, el

alojamiento 40 sellado puede comprender una junta 45 sellada. El sistema de sellado tiene que diseñarse para asegurar fugas despreciables a lo largo de la vida útil de la nave espacial. Sistemas de sellado concebibles podrían ser juntas tóricas, así como conexiones soldadas.

5 Una rueda de reacción (o cualquier otro elemento giratorio a bordo de una nave espacial) requiere tanto potencia eléctrica como conexiones de comunicación. Estas conexiones pueden proporcionarse a través de conductos de alimentación sellados. Como cada conducto de alimentación es una fuente de fuga potencial, el número de conexiones debería limitarse a un mínimo. Los conductos de alimentación también deberían diseñarse para una fuga mínima.

10 El alojamiento sellado es un punto único de fallo, ya que la fuga de gas conducirá a un fallo de la rueda. Por otro lado, el sellado de un sellado hermético de un compartimento presurizado es un problema estándar (por ejemplo, en depósitos presurizados o conductos de alimentación en aplicaciones de vacío) con numerosas soluciones técnicas. De hecho, muchos productos convencionales de rueda de reacción del estado de la técnica, que utilizan cojinetes de bolas, están ubicados dentro de un alojamiento sellado. No se han informado de casos de fallos de rueda de reacción tempranos debidos a fugas en el alojamiento.

15 El equipo típico en naves espaciales debe funcionar en frío (por ejemplo, aproximadamente -60°C) así como en calientes (por ejemplo, aproximadamente $+80^{\circ}\text{C}$). Suponiendo que el volumen del recinto es constante, un aumento de temperatura de frío a caliente conduciría a aproximadamente un 68% de aumento de presión. Este aumento de presión cambia las propiedades del sistema, tales como pérdidas de resistencia o eficiencia de la bomba. Para mantener bajos los cambios de presión, puede proporcionarse una carcasa flexible para permitir un aumento de
20 volumen para mantener bajo el aumento de presión. Por consiguiente, el alojamiento 40 sellado puede ser o puede comprender una carcasa flexible. Esto se muestra en las Figs. 2A y 2B, de las cuales la primera muestra la carcasa 40 flexible a presión nominal (caso ambiental) y la segunda muestra la carcasa 40 flexible a alta presión (caso caliente). Los elementos individuales del conjunto de cojinete pueden omitirse en estas figuras, por razones de concisión. El aumento de volumen permitido por la carcasa 40 flexible reduce el aumento de presión que resultaría
25 del aumento de temperatura.

Pérdidas aerodinámicas

La mayoría de las ruedas de reacción disponibles comercialmente están completamente selladas y evacuadas o tienen carcasas con orificios que permiten el intercambio de gas con el medio ambiente. Por consiguiente, la
30 mayoría de las ruedas de reacción operan bajo condiciones de vacío en el espacio. Una ventaja de esta configuración es la ausencia completa de pérdidas de resistencia aerodinámica.

Las realizaciones de la presente descripción se basan en la presencia de una atmósfera gaseosa para los cojinetes de gas, por consiguiente, son inevitables las pérdidas de resistencia. En condiciones atmosféricas estándar, estas pérdidas pueden exceder los 100 W para una rueda de gran tamaño a toda velocidad. Estos valores de pérdida son inaceptablemente altos para aplicaciones espaciales. Los contribuyentes individuales a la resistencia total son la
35 velocidad del volante de inercia, la densidad y viscosidad del gas, el número de Reynolds y la forma del volante de inercia. Cada contribuyente puede ajustarse para reducir la resistencia total y por tanto las pérdidas.

El primer contribuyente es la velocidad del volante de inercia, que debería elegirse baja para minimizar las pérdidas. Además, se debería elegir un gas con una baja viscosidad dinámica, por ejemplo helio. Existe una correlación positiva entre la presión del gas y las pérdidas de resistencia, por lo que una reducción de la presión conducirá a
40 pérdidas de resistencia más bajas. A partir de las primeras estimaciones, las presiones absolutas de gas entre 10 kPa y 50 kPa permitirían una reducción significativa de la pérdida. Por lo tanto, en los conjuntos de cojinete según las realizaciones de la descripción, la presión de gas en el alojamiento sellado puede estar en el intervalo de 10 kPa a 80 kPa, o preferiblemente, en el intervalo de 10 kPa a 50 kPa. Otro aspecto es el régimen de flujo, que se caracteriza por el número de Reynolds. Un bajo número de Reynolds corresponde al flujo laminar, mientras que un
45 alto número de Reynolds conduce a un flujo turbulento. Tanto para bajas pérdidas de resistencia aerodinámica como para bajas emisiones de vibración, se debería preferir el flujo laminar. Finalmente, la forma del volante de inercia (o forma del elemento giratorio aplicable en general) puede optimizarse para pérdidas aerodinámicas mínimas.

Una reducción de la presión de gas no sólo reducirá las pérdidas aerodinámicas, sino que también reducirá la presión absoluta en la entrada de la bomba. Por consiguiente, la potencia de bomba requerida aumenta para una
50 presión de salida de bomba dada. Por lo tanto, existe un equilibrio entre las pérdidas aerodinámicas y la potencia de bomba requerida para una optimización de pérdidas globales. Como se describe a continuación, la presurización que se puede lograr se puede aumentar conectando múltiples bombas en serie.

Bloqueo de lanzamiento

55 El lanzamiento de una nave espacial provoca niveles intensos de vibración a través de inestabilidades de combustión o ruido acústico extremo. Las ruedas de reacción convencionales utilizan, bien cojinetes precargados, o bien topes duros dedicados para evitar daños en el volante de inercia o en los cojinetes. Las ruedas de reacción de cojinete magnético requieren conceptualmente espacios libres relativamente grandes entre el rotor y el estator (de

aproximadamente 0,5 mm a 1 mm). Para evitar daños por traqueteo, las ruedas de reacción de cojinete magnético requieren un dispositivo que mantenga el rotor en una posición fija.

Las realizaciones de la presente descripción tienen la ventaja de que el cojinete de gas (estático) requiere holguras extremadamente pequeñas de aproximadamente 5 pm a 10 pm. Estas holguras pequeñas hacen menos probables daños debidos a vibración de lanzamiento, ya que los pequeños huecos conducen a velocidades relativas comparativamente bajas entre el rotor y el estator. Como ventaja adicional, el área de contacto del cojinete de gas entre el rotor y el estator es muy grande, lo que conduce a bajas presiones de contacto hertzianas para el contacto rotor-estator. Se puede argumentar que tanto los efectos pequeños huecos y pequeñas presiones de contacto hertzianas hacen que un dispositivo de bloqueo adicional sea potencialmente innecesario, o al menos muy simple de implementar.

Redundancia

La alta fiabilidad del equipo de la nave espacial (o equipo en general) puede obtenerse bien a través de una fiabilidad muy alta de sus subcomponentes, o bien cuando esto no es posible, a través de redundancia. El funcionamiento sin contacto del cojinete de gas estático hace que sea improbable un fallo, dado que se proporciona la presión requerida del gas de suministro.

Un punto de fallo único potencial es el alojamiento de rueda, ya que una fuga de gas conducirá eventualmente a un fallo del sistema de cojinete. Por otro lado, el diseño de un alojamiento hermético es un problema conocido y se ha resuelto en diferentes dominios de la tecnología, y por lo tanto no es de preocupación principal.

Un subcomponente del conjunto de cojinete que puede requerir especial atención es la microbomba. Sus elementos activos, específicamente la membrana accionada y posiblemente la válvula, están móviles y tienen una probabilidad de fallo no despreciable. Como se ha observado anteriormente, la fiabilidad de la válvula puede incrementarse mucho sustituyéndola por una válvula de estado sólido (posiblemente a coste de eficiencia).

Otra medida de mitigación para el fallo potencial de la bomba se muestra esquemáticamente en la Fig. 3. Múltiples bombas 20, 320 de vibración ultrasónica, si se desea con filtros 35, 335 de entrada individuales, pueden conectarse en paralelo para mitigar el riesgo de un fallo de bomba. Por consiguiente, el conjunto de cojinete puede comprender al menos una segunda bomba de vibración ultrasónica (por ejemplo, la bomba 320 de vibración ultrasónica en la Fig. 3) que está acoplada al cojinete de gas. Esta segunda bomba de vibración ultrasónica también está encerrada por el alojamiento sellado (no mostrada en la Fig. 3) y proporciona redundancia a la bomba 20 de vibración ultrasónica. La segunda bomba o bombas de vibración ultrasónica están acopladas en paralelo a la bomba o bombas 20 de vibración ultrasónica. La segunda bomba o bombas de vibración ultrasónica pueden tener su propio filtro o filtros de partículas.

En caso de que falle la bomba principal (por ejemplo, la bomba 20 de vibración ultrasónica), la bomba redundante (por ejemplo, la bomba 320 de vibración ultrasónica) puede ser alimentada para proporcionar la presión de suministro requerida (redundancia en frío). Alternativamente, ambas bombas pueden estar activas al mismo tiempo con sólo el 50% de la capacidad total requerida (redundancia en caliente).

En cualquiera de las realizaciones anteriores de la descripción, también se pueden utilizar bombas de vibración ultrasónica adicionales para aumentar la presurización alcanzable. Esto puede hacerse conectando (acoplando) múltiples bombas en serie. En particular, si una sola bomba de vibración ultrasónica no es suficiente para generar una presurización deseada, esto puede abordarse proporcionando una conexión en serie de un número apropiado de bombas de vibración ultrasónica. Para proporcionar redundancia, se pueden proporcionar dos o más conexiones en serie de bombas de vibración ultrasónica en paralelo.

Es decir, el conjunto de cojinete puede comprender al menos una tercera bomba de vibración ultrasónica que está acoplada al cojinete de gas. Esta tercera bomba de vibración ultrasónica también está encerrada por el alojamiento sellado y acoplada en serie con la (primera) bomba de vibración ultrasónica.

Funcionamiento de emergencia

Una operación de emergencia se define como un fallo en la entrega de la presión de gas requerida mientras el rotor está todavía girando. En este caso, se producirá un contacto rotor-estator, y tanto la fricción del cojinete como la resistencia aerodinámica detendrán eventualmente el rotor. El cojinete debería diseñarse para soportar un número limitado de contactos con el rotor. Los materiales y el tratamiento superficial tanto para el cojinete como para el rotor deberían elegirse de manera que el desgaste y el riesgo de desgaste se mantengan al mínimo. Permitir otras maneras de disipar la energía cinética del rotor, por ejemplo, mediante frenado activo a través del sistema de accionamiento, contribuirá a minimizar el impacto de un contacto sobre el sistema de rotor-cojinete. El evento más probable que conduce a una operación de emergencia repentina es la pérdida de potencia externa o un fallo de software. El riesgo de una pérdida de potencia externa repentina puede mitigarse utilizando la potencia eléctrica generada por el rotor giratorio y utilizar esta potencia para el funcionamiento de la bomba. Gracias a los moderados requisitos de potencia de la bomba, esto debería ser posible hasta velocidades de rotación muy bajas. El riesgo de

un fallo de software que conduce a un fallo de bomba inducido por el accionador puede mitigarse mediante un circuito de accionador simple independiente del software.

Gestión de (micro)vibraciones

Una de las principales ventajas del conjunto de cojinete propuesto es su muy baja emisión de vibraciones, en comparación con los cojinetes de bolas del estado de la técnica. Las primeras estimaciones sugieren una reducción de diez a cien veces en la emisión de vibraciones, por ejemplo cuando el conjunto de cojinete propuesto se utiliza para una rueda de reacción. Las razones para estos buenos resultados son que se evita un contacto directo rotor-estator así como la excelente amortiguación proporcionada por la película de gas combinada con la rigidez de cojinete comparativamente baja. La baja rigidez del cojinete en la otra extremidad podría conducir a velocidades críticas, por lo tanto a una resonancia inducida por desequilibrio, en el intervalo de funcionamiento.

La Fig. 4 es un diagrama que muestra las fuerzas del cojinete provocadas por desequilibrios en función de la velocidad de rueda, para un cojinete flexible. La ubicación de la velocidad crítica depende de la rigidez del cojinete. Los gráficos 410 y 420 indican la fuerza del cojinete como función de la velocidad de rueda para rigidez del cojinete alta y baja, respectivamente. La rigidez de un cojinete de gas (estático) puede alterarse cambiando la presión de suministro. Una presión de suministro más alta conduce a una alta rigidez del cojinete, a la inversa, la disminución de la presión de suministro reduce la rigidez. Por lo tanto, el comportamiento de microvibración se puede optimizar alterando la potencia de la bomba y, por lo tanto, la presión de salida de la bomba con respecto a la velocidad de la rueda.

Específicamente, las resonancias de la fuerza del cojinete pueden evitarse mediante un cambio apropiado en la presión de la bomba. A bajas velocidades de rotación, las bombas deberían generar alta presión para una alta rigidez del cojinete (gráfico 410 en la Fig. 4). En un cierto punto (en el ejemplo de la Fig. 4 a aproximadamente 30% de velocidad de rueda), la presión de la bomba debería ser reducida para seguir la curva para una rigidez baja del cojinete (gráfico 520 en la Fig. 4). El método propuesto no sólo se limita a una conmutación simple entre dos presiones, sino que puede implicar una adaptación de presión continua, por ejemplo a través de una tabla de consulta. El método propuesto tiene la ventaja de que la rueda (o elemento giratorio en general) siempre puede funcionar al nivel de vibración más bajo.

En línea con lo anterior, el conjunto de cojinete puede comprender una unidad de control para controlar el funcionamiento de la bomba o bombas de vibración ultrasónica (es decir, la (primera) bomba 20 de vibración ultrasónica), y posiblemente la segunda y/o tercera bombas de vibración ultrasónica, si corresponde), en donde la unidad de control está adaptada para controlar una potencia (por ejemplo, potencia eléctrica) que se suministra a la bomba o bombas dependiendo de una velocidad de rotación del elemento giratorio. La unidad de control puede implementarse mediante un controlador digital, microcontrolador (microprocesador) o cualquier tipo adecuado de ordenador (procesador informático), por ejemplo. Controlando la potencia, la unidad de control puede controlar la presurización (por ejemplo, la diferencia de presión) que se aplica mediante la bomba o bombas de vibración ultrasónica, en función de la velocidad de rotación del elemento giratorio. Por ejemplo, la unidad de control puede estar adaptada para controlar la potencia que se suministra a la bomba o bombas de vibración ultrasónica de tal manera que se eviten resonancias entre el cojinete de gas y el elemento giratorio (por ejemplo, resonancias en fuerzas del cojinete inducidas por desequilibrio). Como se ha observado anteriormente, esto puede significar que la unidad de control está adaptada para controlar la potencia que se suministra a la bomba de vibración ultrasónica de tal manera que se aplica una presurización más alta para velocidades de rotación por debajo de un umbral predefinido y se aplica una presurización más baja para velocidades de rotación por encima del umbral predefinido. En el mismo, la cantidad respectiva de potencia que se ha de suministrar a la bomba o bombas de vibración ultrasónica puede determinarse (por ejemplo, por la unidad de control) basándose en la velocidad de rotación del elemento giratorio, por ejemplo, utilizando una tabla de consulta. El umbral predefinido puede elegirse basándose en la ocurrencia de resonancias en las fuerzas del cojinete para alta rigidez del cojinete y baja rigidez del cojinete, típicamente entre estas resonancias.

Realizaciones e implementaciones adicionales

Los cojinetes de aire estáticos pueden fabricarse en formas arbitrarias. Para la configuración propuesta del cojinete, se utilizan un cojinete radial cilíndrico y un par de cojinetes planos para el soporte de rotor axial, como se muestra en el ejemplo de la Fig. 1.

Es decir, el cojinete de gas del conjunto de cojinete puede actuar como un cojinete radial para el elemento giratorio (por ejemplo, rueda de reacción). Esto corresponde al cojinete 15 de gas en la Fig. 1. En tal caso, el conjunto de cojinete puede comprender uno o más segundos cojinetes de gas que actúan como cojinetes axiales para el elemento giratorio. Esto correspondería a los cojinetes 10 de gas en la Fig. 1. El uno o más segundos cojinetes de gas están encerrados por el alojamiento sellado. El segundo cojinete de gas puede estar provisto de gas presurizado mediante la bomba o bombas de vibración ultrasónica mencionadas anteriormente o cualquier bomba o bombas de vibración ultrasónica adicional. En implementaciones alternativas, el cojinete de gas del conjunto de cojinete puede actuar (solo) como un cojinete axial para el elemento giratorio, o (solo) como un cojinete radial para el elemento giratorio.

Alternativamente, el cojinete de gas puede ser un cojinete de gas esférico. Tal configuración se ilustra esquemáticamente en la Fig. 5, que muestra otro ejemplo de una configuración de volante de inercia. Esta vez, los cojinetes 10, 15 de gas se sustituyen por el cojinete 510 de gas esférico (estático) que soporta el rotor en dirección axial y radial, así como la rotación alrededor del eje principal de inercia del volante de inercia (vertical, línea discontinua) alrededor del punto 70 central. De este modo, se permite el giro del volante de inercia. El cojinete 510 de gas esférico está soportado por la estructura 565 de soporte. Por lo demás, elementos del conjunto de cojinete 2 de la Fig. 5 pueden ser idénticos a los del conjunto de cojinete 1 de la Fig. 1. En particular, la bomba y las tuberías pueden omitirse en la Fig. 5 por razones de concisión. A diferencia de la configuración anterior, la presente configuración permite un movimiento de rotación adicional en dos ejes. Por consiguiente, todos los ejes de rotación no están restringidos. Esta configuración es especialmente útil para el diseño y la realización de un giroscopio de control de movimiento, ya que el cardán de un disco giratorio genera pares giroscópicos para el control de la actitud de una nave espacial.

Otra implementación alternativa más se ilustra esquemáticamente en la Fig. 6, que muestra un conjunto de cojinete 3 para una esfera 605 giratoria (por ejemplo, esfera de reacción) en lugar de un volante de inercia. Esta vez, los cojinetes 10, 15 de gas se sustituyen por cojinetes 665 externos que están soportados por la estructura 680 de soporte. El alojamiento 640 sellado tiene una forma que puede ser equilibrada con la forma de la esfera 605 giratoria. Las bombas, tuberías, etc. pueden omitirse en la Fig. 6 por razones de concisión y pueden corresponder a las mostradas en la Fig. 1.

Una ventaja de esta implementación es la capacidad de acelerar y desacelerar la esfera en cualquier dirección, permitiendo controlar la actitud de una nave espacial en cualquier dirección con un único dispositivo. El concepto de un sistema de accionamiento y cojinetes para una esfera de reacción que utiliza fuerzas magnéticas se describe en el documento US 2014/0209751 A1. La presente realización tiene la ventaja de su simplicidad, ligereza y eficiencia energética. Además, permite un gran grado de libertad en el diseño, ya que la elección del material para la esfera no está limitada casi completamente. La implementación específica del motor para accionar la esfera de reacción está más allá del alcance de la presente descripción. Motores factibles para este propósito se describen, por ejemplo, en el documento de patente US 2014/209751 A1 y en L. Rossini, O. Chételat, E. Onillon, Y. Perriard, "Analytical and Experimental Investigation on the Force and Torque of a Reaction Sphere for Satellite Attitude Control" (Investigación analítica y experimental en la fuerza y par de torsión de una esfera de reacción para el control de actitud del satélite, Conferencia internacional IEEE/ASME en mecatrónica inteligente avanzada (AIM2011), Budapest, Hungría, 3-7 de julio, 2011. Se comprende que el experto en la técnica seleccionaría un motor apropiado para accionar la esfera de reacción dependiendo de las circunstancias y los requisitos.

Las realizaciones adicionales de la descripción se refieren a un conjunto de rueda de reacción para una nave espacial, que comprende una rueda de reacción y un conjunto de cojinete como se ha descrito anteriormente (por ejemplo, el conjunto de cojinete de la Fig. 1) para estabilizar la rotación de la rueda de reacción. Las realizaciones adicionales se refieren a un conjunto de giroscopio de control de movimiento para una nave espacial, que comprende un giroscopio de control de movimiento y un conjunto de cojinete como se ha descrito anteriormente (por ejemplo, el conjunto de cojinete 2 de la Fig. 5) para estabilizar la rotación del giroscopio de control de movimiento. Otras realizaciones adicionales se refieren a un conjunto de esfera de reacción para una nave espacial, que comprende una esfera de reacción y un conjunto de cojinete como se ha descrito anteriormente (por ejemplo, el conjunto de cojinete 3 de la Fig. 6) para estabilizar la rotación de la esfera de reacción.

Ventajas técnicas

A continuación, se describirán las ventajas técnicas de las realizaciones de la descripción. En la misma, sin limitación prevista, se puede hacer referencia a una rueda de reacción (o volante de inercia) como ejemplo del elemento giratorio soportado por el conjunto de cojinete.

El conjunto de cojinete propuesto y los métodos de funcionamiento del mismo ofrecen una serie de ventajas sobre el estado actual de la técnica:

- A diferencia de las ruedas de reacción con cojinetes de bolas, no se requiere lubricación por fluido, evitando cualquier problema derivado de los lubricantes. Estos problemas son, por ejemplo: pérdida de lubricante, evaporación, degradación o deformación por fluencia lenta. Además, no se requiere un sistema de reposición de lubricación, haciendo que el sistema de cojinete de gas (estático) sea menos complejo.
- A diferencia de una rueda de reacción con cojinetes de bolas, los cojinetes de gas tienen un excelente comportamiento dinámico. Los efectos transitorios presentes en los cojinetes de bolas, por ejemplo la inestabilidad de la jaula que provoca grandes vibraciones, no están presentes para los cojinetes de gas.
- La emisión de vibraciones y ruidos de una rueda de reacción con cojinetes de gas es de 10 a 100 veces menor que la emisión de una rueda de reacción de cojinete de bolas.
- Los cojinetes de bolas son propensos a mostrar inestabilidades del par de fricción, por ejemplo, causadas por una distribución irregular del lubricante líquido. Este efecto puede perjudicar la estabilidad de apuntamiento de la

nave espacial. El ruido del par de fricción está ausente en los cojinetes de gas, lo que conduce a una mejor estabilidad de apuntamiento de la nave espacial.

- 5
 - Las ruedas de reacción convencionales basadas en cojinetes de bolas no pueden funcionar regularmente a bajas velocidades de rotación entre ± 200 rpm, ya que esto aumentaría el desgaste y reduciría la vida útil. También aumentan las inestabilidades del par de fricción en ese intervalo de velocidad. Esto tiene consecuencias en el funcionamiento de los satélites, ya que la capacidad de impulso efectiva se reduce a la mitad. Estos efectos no se producen en los cojinetes de gas, de modo que se puede utilizar el intervalo de momento completo. De este modo, la capacidad de apuntamiento fino de los satélites se ve menos frecuentemente (típicamente por un factor de la mitad o menos) afectada cuando se utilizan cojinetes de gas.
- 10
 - La vida útil de un cojinete de gas es prácticamente ilimitada debido a la ausencia de contacto físico rotor-estator. Por consiguiente, el único elemento crítico en el conjunto de cojinete propuesto es el fallo de la microbomba.
- 15
 - A diferencia de las ruedas de reacción de cojinete magnético, la rueda de reacción de cojinete de gas propuesto es considerablemente menos compleja de construir, ya que el número de piezas es menor, ya que la fabricación requiere herramientas y procesos estándares, y ya que el proceso de montaje puede automatizarse. Las ruedas de reacción de cojinete magnético, por otra parte, consisten en muchos subsistemas diferentes, integrados de manera estrecha, cuyo montaje es difícil de automatizar.
- 20
 - La electrónica para la microbomba es considerablemente menos compleja que la de una rueda de reacción de cojinete magnético, ya que estas últimas requieren un sistema de control de bucle cerrado para cinco ejes.
 - Debido a las bajas holguras de rotor-estator, un bloqueo de lanzamiento de potencial (si es necesario) es más fácil de realizar que para una rueda de reacción de cojinete magnético.
 - Todos los puntos mencionados anteriormente conducirán a un coste significativamente menor que el de una rueda de reacción de cojinete magnético.
 - Se prevé que la rueda de reacción de cojinete de gas propuesta será más ligera que una rueda de reacción de cojinete magnético comparable.
- 25
 - Se prevé que el rendimiento de vibración de una rueda de reacción de cojinete de gas sea comparable al de una rueda de reacción de cojinete magnético.
- 30
 - Muchos satélites científicos y sondas espaciales están equipados con magnetómetros ultrasensibles. Cualquier distorsión magnética procedente de la nave espacial deteriorará los resultados. Por lo tanto, es importante minimizar los campos magnéticos procedentes de las ruedas de reacción (o cualquier otro elemento giratorio). El sistema de cojinete de gas propuesto en combinación con una bomba ultrasónica no emite ninguna distorsión magnética, lo que es una ventaja considerable sobre las ruedas de reacción de cojinete magnético.

La cancelación electrónica del desequilibrio, como se hace en una rueda de reacción de cojinete magnético, puede no ser posible con una rueda de reacción de cojinete de gas. Sin embargo, el equilibrio de precisión y la adaptación dinámica de la rigidez del cojinete a través de una modulación de la potencia y la presión de la bomba según las realizaciones pueden alcanzar reducciones de vibración comparables.

Resultados técnicos

A continuación, se describirán los resultados técnicos de las realizaciones de la descripción. Con el fin de demostrar la viabilidad y las principales ventajas técnicas del uso de cojinetes de gas para ruedas de reacción (u otros elementos giratorios), se ha diseñado y fabricado un prototipo a escala completa. El prototipo presenta un buje de aire radial y un cojinete de aire axial, un volante de inercia monolítico, un motor de CC sin escobillas comercial, un codificador incremental, una placa inferior impresa en 3D, y una placa de circuito impreso equipada con un accionador de motor, microbombas, e interfaces eléctricas.

El prototipo está diseñado para suministrar un momento angular de 24 Nm a 6000 rpm, que está en línea con las necesidades de rendimiento de plataformas de naves espaciales típicas de tamaño medio a grande, utilizadas por ejemplo para observación de la Tierra, astronomía o navegación.

Durante una primera fase de prueba, el rotor se ha operado hasta un máximo de 5.800 rpm para estudiar las características generales de la rueda. Además, la funcionalidad de las microbombas se ha probado y verificado. En una primera prueba, el cojinete axial se presuriza con 1,2 bares, mientras que el cojinete radial se presuriza con 0,6 bares de aire presurizado. El volante de inercia se ha acelerado utilizando el motor de CC sin escobillas comercial integrado. Cuando se ha alcanzado una velocidad de aproximadamente 5.800 rpm, el motor ha sido desconectado y el volante de inercia se ha dejado desacelerar en punto muerto hacia abajo utilizando la resistencia atmosférica que actúa sobre el volante de inercia así como la resistencia dentro de los propios cojinetes de aire. La prueba se ha utilizado principalmente para verificar que los cojinetes de aire son capaces de soportar la carga del rotor y que no hay contacto físico entre ninguna parte sólida. Puesto que durante la desaceleración en punto muerto no se ha

producido ningún ruido audible (por ejemplo, ni chirridos, ningún clic, ni tampoco ningún ruido perceptible debido a remolinos de aire), se ha demostrado la función de soporte de carga de los cojinetes.

Mediante el análisis de la señal de velocidad durante la desaceleración en punto muerto se pueden sacar conclusiones sobre las pérdidas totales. En total, se han necesitado aproximadamente 12 minutos para desacelerar el rotor de 5.800 rpm a justo por debajo de 400 rpm. Según los fundamentos de la dinámica de fluidos, se espera que las pérdidas aumenten de manera no lineal con la velocidad. Los datos de prueba que se muestran en la Fig. 7 confirman una curva de pérdida no lineal. La potencia de pérdida máxima alcanza 135 rpm a velocidad máxima, mientras que las pérdidas por debajo de 2.500 rpm ya se reducen a por debajo de 20W.

Otro punto de interés es la microvibración. Con el fin de caracterizar las vibraciones emitidas durante el funcionamiento del cojinete de aire, el prototipo se ha instalado en un dinamómetro de 6 ejes. Este dispositivo es capaz de medir fuerzas y pares muy pequeños con alta precisión y es estándar para pruebas de microvibración de ruedas de reacción. Se ha encontrado que el nivel global de vibración emitida es muy bajo. A lo largo del eje x, es decir, en dirección radial, las vibraciones están dominadas por el desequilibrio estático del rotor. Una fuerza medida de aproximadamente 1 N a 5.800 rpm corresponde a un desequilibrio de 0,3 gcm, que es un valor típico para volantes de inercia de rueda de reacción equilibrada. Más importante aún, se ha encontrado que no hay otra fuente de ruido principal dentro del espectro de la microvibración registrada. Para poner esto en perspectiva, el espectro de ruido de una rueda de reacción convencional, que utiliza cojinetes de bolas, está muy dominado por la presencia de perturbaciones en los cojinetes de bolas, así como resonancias mecánicas. Las Figs. 8A y 8B muestran el espectro de microvibración de una rueda de reacción que utiliza el conjunto de cojinete según las realizaciones de la descripción, en la dirección radial (eje x) y en la dirección axial (eje z), respectivamente. Las Figs. 8C y 8D muestran, por otra parte, el espectro típico de microvibración en dirección radial (eje x) y en la dirección axial (eje z) para una rueda de reacción convencional de dimensión similar al prototipo del cojinete de aire, con la ayuda de cojinetes de bolas. Como puede verse a partir de estos diagramas, las resonancias en el espectro de microvibración están esencialmente ausentes para la rueda de reacción cuando se utiliza el conjunto de cojinete según realizaciones de la descripción. De hecho, el valor máximo de la vibración emitida del prototipo de cojinete de aire parece ser 20 veces menor en comparación con las ruedas de reacción convencionales debido a la ausencia de imperfecciones del cojinete de bolas, así como resonancias (dentro del intervalo de frecuencias sensibles).

Se da una comparación directa entre los niveles de ruido de una rueda convencional y el prototipo del cojinete de aire en la Fig. 9. Para el conjunto de cojinete según las realizaciones de la descripción, el gráfico 910 indica niveles de ruido a lo largo de la dirección radial (ejes x e y), y el gráfico 920 indica el nivel de ruido en la dirección axial (eje z). Para la rueda de reacción convencional, los gráficos 930 y 940 indican niveles de ruido a lo largo de la dirección radial (ejes x e y), y en la dirección axial (eje z), respectivamente. Se puede ver que los niveles de vibración del cojinete de aire según las realizaciones de la descripción están en un factor de 10 a 30 por debajo del cojinete de bolas para direcciones radiales (ejes x e y) y en un factor de 5 a 20 por debajo para la dirección axial (eje z).

Resumen de posibles implementaciones

A continuación se proporciona un resumen de posibles implementaciones de realizaciones de la presente descripción. Este resumen no se ha de comprender de ninguna manera como completo o limitativo.

Un ejemplo de implementación se refiere a un sistema de cojinete, que comprende: un cojinete de gas estático con hasta tres grados de libertad, que permite la rotación o traslación de un objeto con baja fricción. El cojinete de gas está conectado a través de tuberías o tubos a la salida de una bomba de membrana ultrasónica. Esta bomba se caracteriza por una membrana accionada que vibra a una frecuencia ultrasónica inaudible. A diferencia de las bombas de desplazamiento, la bomba propuesta genera una onda estacionaria de presión de gas en una cavidad. La entrada de gas de la bomba está ubicada en un nodo de presión de gas, mientras que la salida de la bomba está ubicada en un antinodo de presión. Para un funcionamiento apropiado de la bomba, se requiere una válvula de retención en la salida de la bomba. Esta válvula puede realizarse utilizando partes móviles, o puede ser de estado sólido. La entrada de la bomba presenta un filtro que protege la bomba de partículas o residuos.

En la implementación ejemplar anterior, para la aplicación en vacío, que es una condición típica para el equipo a bordo de naves espaciales, el conjunto de cojinete de gas y la bomba están encerrados en un alojamiento herméticamente sellado. El alojamiento se llena con un gas presurizado para permitir el funcionamiento de la bomba y el cojinete de gas. El alojamiento está dividido para permitir el montaje de los componentes. Después del montaje, el alojamiento dividido se cierra y se sella. El sistema de sellado puede realizarse, por ejemplo, mediante una brida con una junta tórica, una conexión soldada u otro método de sellado. El alojamiento puede contener conductos de alimentación herméticamente sellados para conexiones eléctricas. Los cambios de temperatura pueden conducir a cambios significativos, potencialmente indeseados, en la presión absoluta del gas dentro del alojamiento. Estos cambios pueden reducirse diseñando el recipiente presurizado con un alojamiento flexible, permitiendo un aumento de volumen y, por tanto, cambios absolutos de presión de gas más bajos.

Adicional o alternativamente en la implementación de ejemplo anterior, la redundancia de bomba puede lograrse conectando (acoplando) múltiples bombas en paralelo.

Otra implementación ejemplar se refiere a un método para reducir la característica de vibración de un objeto giratorio en cojinetes de gas cambiando la rigidez del cojinete. La correlación positiva entre la rigidez de un cojinete de gas estático y la presión de suministro de gas proporcionada por la bomba puede aprovecharse para reducir la emisión de vibración causada por el desequilibrio. Para ciertas combinaciones de velocidad de rotación, la masa del objeto giratorio y la rigidez del cojinete, pueden producirse resonancias que provocan grandes desviaciones del rotor y fuerzas de cojinete. Modulando la presión de la bomba, la rigidez del cojinete cambia, conduciendo a evitar la situación de resonancia. El método propuesto define un nivel óptimo de rigidez del cojinete (y por lo tanto de presión) para cualquier velocidad de rotación. Estos niveles óptimos de presión pueden determinarse utilizando análisis o pruebas y almacenarse después en una tabla de consulta. Para cada velocidad, el controlador digital, el microcontrolador (microprocesador), el ordenador (procesador informático) o la unidad de control en general pueden alimentar la potencia de bomba óptima y, por lo tanto, los niveles de presión a la bomba ultrasónica.

Interpretación

Se comprende que cualesquiera unidades o bloques de control descritos a lo largo de la descripción pueden implementarse mediante un controlador digital, microcontrolador (microprocesador), ordenador, procesador informático o procesadores informáticos respectivos, o similares.

Debería observarse además que la descripción y los dibujos ilustran meramente los principios del aparato (sistema) y método propuestos. La invención está limitada por las reivindicaciones adjuntas.

Además, todos los ejemplos y realizaciones descritos en el presente documento están destinados principalmente de manera expresa a ser solo con fines explicativos para ayudar al lector a comprender los principios del método y sistema propuestos.

REIVINDICACIONES

1. Un conjunto de cojinete para estabilizar la rotación de un elemento (5) giratorio en condiciones de vacío, comprendiendo el conjunto de cojinete:
un cojinete (10, 15) de gas estático que actúa como un cojinete para el elemento (5) giratorio;
- 5 una bomba (20) de vibración ultrasónica acoplada al cojinete (10, 15) de gas estático, para proporcionar gas presurizado al cojinete (10, 15) de gas estático; y
un alojamiento (40) sellado que encierra el cojinete (10, 15) de gas estático y la bomba (20) de vibración ultrasónica;
en donde la bomba (20) de vibración ultrasónica comprende una entrada de bomba a través de la cual el gas (50) encerrado en el alojamiento (40) sellado puede entrar en la bomba (20) de vibración ultrasónica.
- 10 2. El conjunto de cojinete según la reivindicación 1, que comprende además una unidad de control para controlar el funcionamiento de la bomba (20) de vibración ultrasónica,
en donde la unidad de control está adaptada para controlar una potencia que se suministra a la bomba dependiendo de una velocidad de rotación del elemento (5) giratorio.
- 15 3. El conjunto de cojinete según la reivindicación 2, en donde la unidad de control está adaptada para controlar la potencia que se suministra a la bomba (20) de vibración ultrasónica de tal manera que se aplica una presurización más alta para velocidades de rotación por debajo de un umbral predefinido y se aplica una presurización más baja para velocidades de rotación por encima del umbral predefinido.
- 20 4. El conjunto de cojinete según la reivindicación 2 o 3, en donde la potencia que se ha de suministrar a la bomba (20) de vibración ultrasónica se determina basándose en la velocidad de rotación del elemento (5) giratorio, utilizando una tabla de consulta.
5. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la bomba (20) de vibración ultrasónica es una bomba de membrana ultrasónica.
6. El conjunto de cojinete según una de las reivindicaciones anteriores,
en donde la bomba (20) de vibración ultrasónica comprende una válvula de estado sólido; y/o
- 25 en donde la entrada de bomba de la bomba (20) de vibración ultrasónica está acoplada a un filtro de partículas.
7. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el cojinete (10, 15) de gas estático actúa como un cojinete radial para el elemento (5) giratorio.
8. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además uno o más segundos cojinetes (10, 15) de gas estáticos que actúan como cojinetes axiales para el elemento (5) giratorio,
- 30 en donde el uno o más segundos cojinetes (10, 15) de gas estáticos están encerrados por el alojamiento (40) sellado.
9. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde el cojinete (10, 15) de gas estático es un cojinete de gas estático esférico.
- 35 10. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además al menos una segunda bomba (20, 320) de vibración ultrasónica que está acoplada al cojinete (10, 15) de gas estático,
en donde la al menos una segunda bomba (20, 320) de vibración ultrasónica está encerrada por el alojamiento (40) sellado y acoplada en paralelo con la bomba (20) de vibración ultrasónica.
11. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además al menos una tercera bomba de vibración ultrasónica que está acoplada al cojinete (10, 15) de gas estático,
- 40 en donde la al menos una tercera bomba de vibración ultrasónica está encerrada por el alojamiento (40) sellado y acoplada en serie con la bomba (20) de vibración ultrasónica.
12. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde una presión de gas en el alojamiento (40) sellado está en el intervalo de 10 kPa a 80 kPa.
13. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores,
- 45 en donde el alojamiento (40) sellado es una carcasa flexible; y/o

en donde el alojamiento (40) sellado comprende una junta sellada.

14. El conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el elemento (5) giratorio es uno de:

una rueda de reacción para una nave espacial;

5 un giroscopio de control de momento para una nave espacial; y

una esfera de reacción para una nave espacial.

15. Un conjunto de rueda de reacción para una nave espacial, comprendiendo el conjunto de rueda de reacción:

una rueda de reacción; y

10 el conjunto de cojinete según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, para estabilizar la rotación de la rueda de reacción.

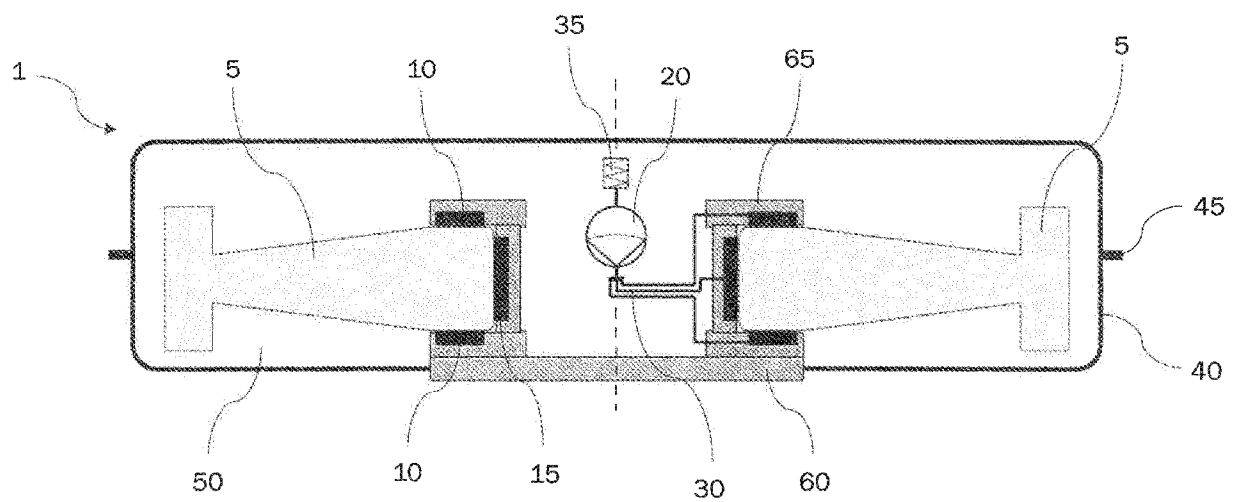


Fig. 1

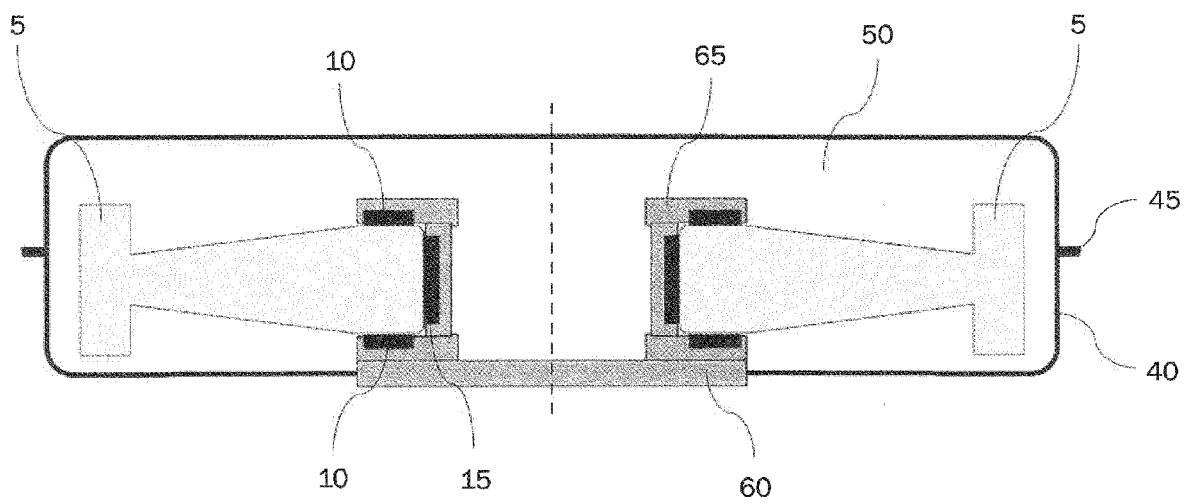


Fig. 2A

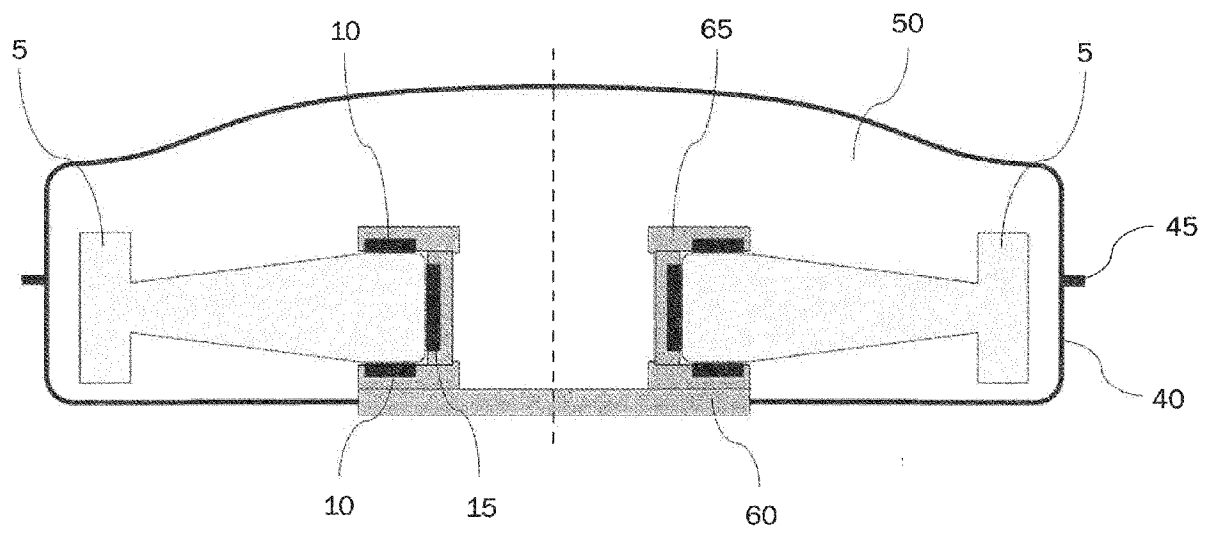


Fig. 2B

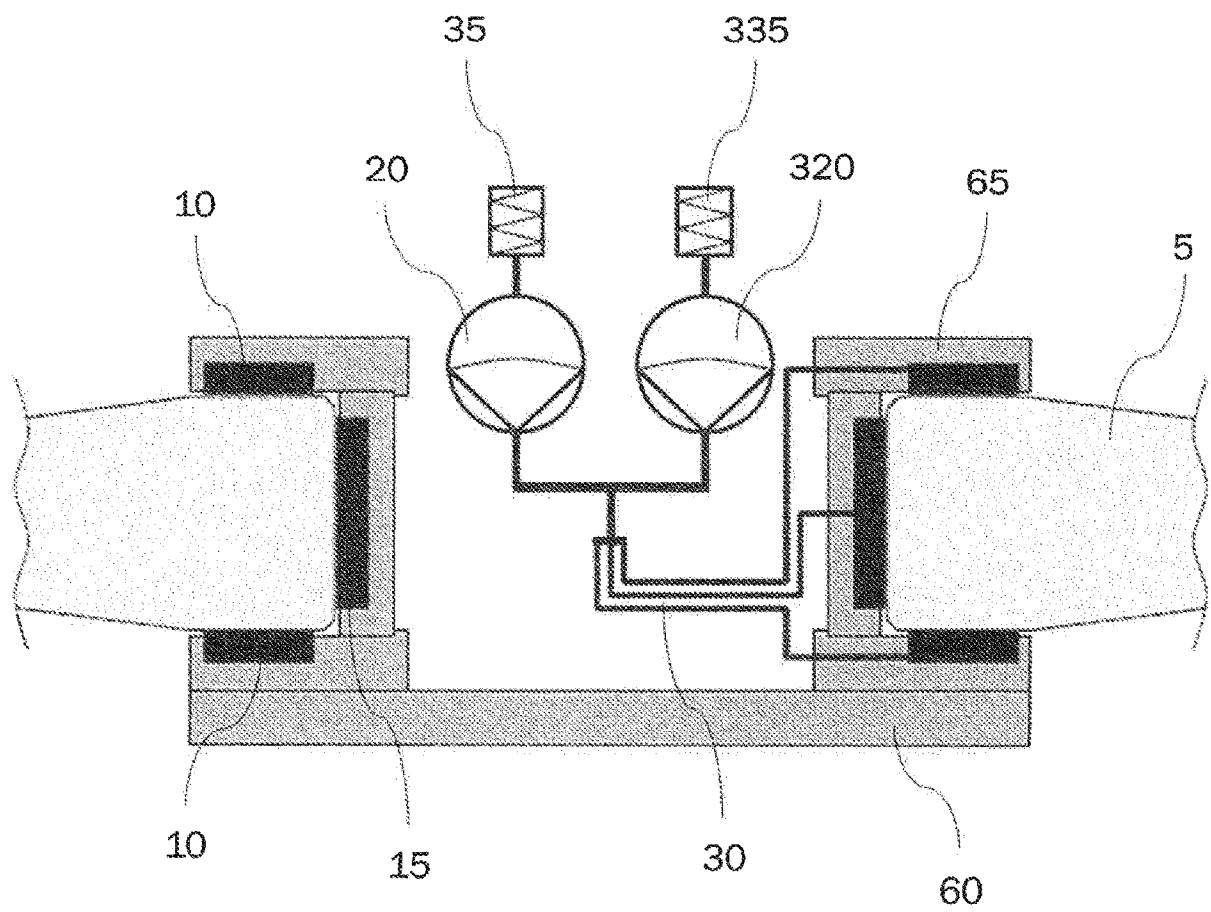


Fig. 3

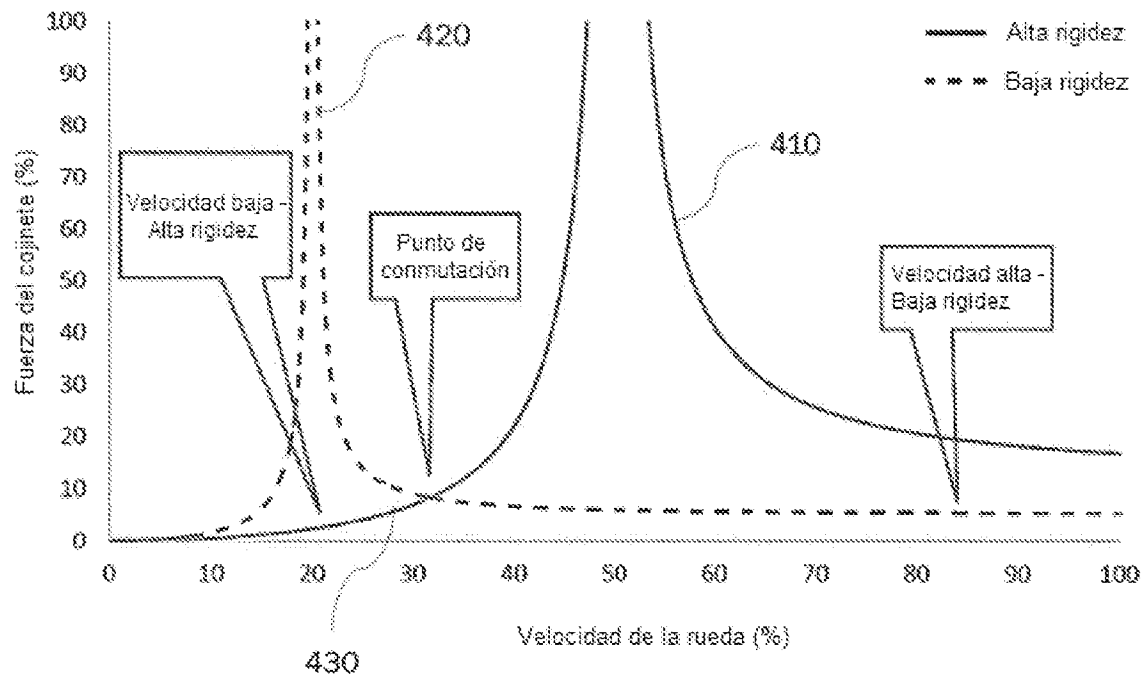


Fig. 4

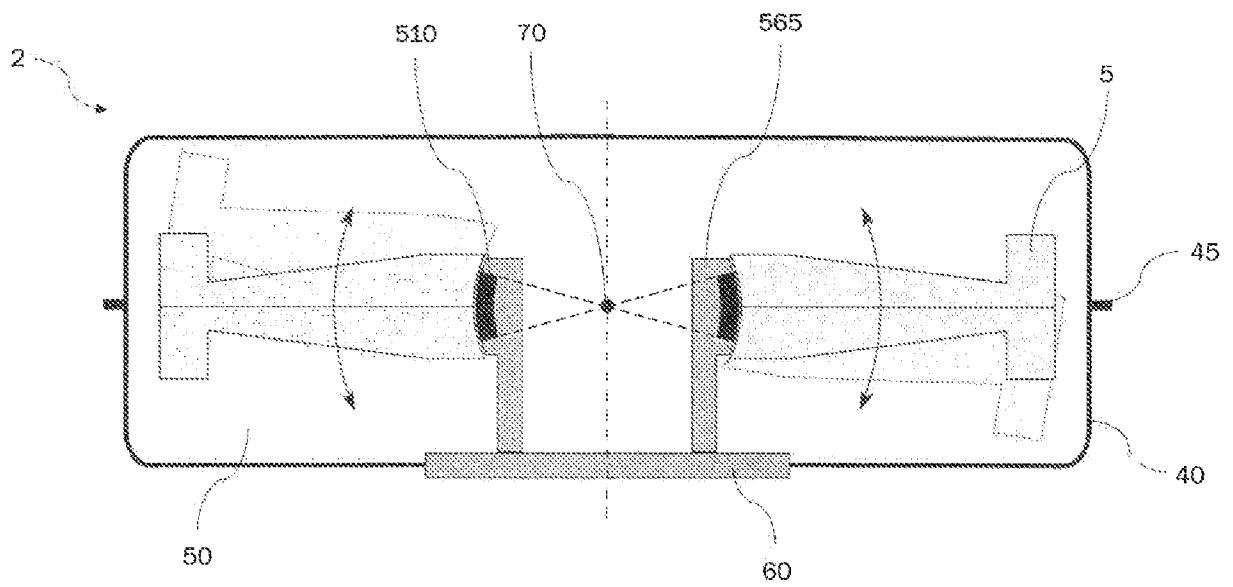


Fig. 5

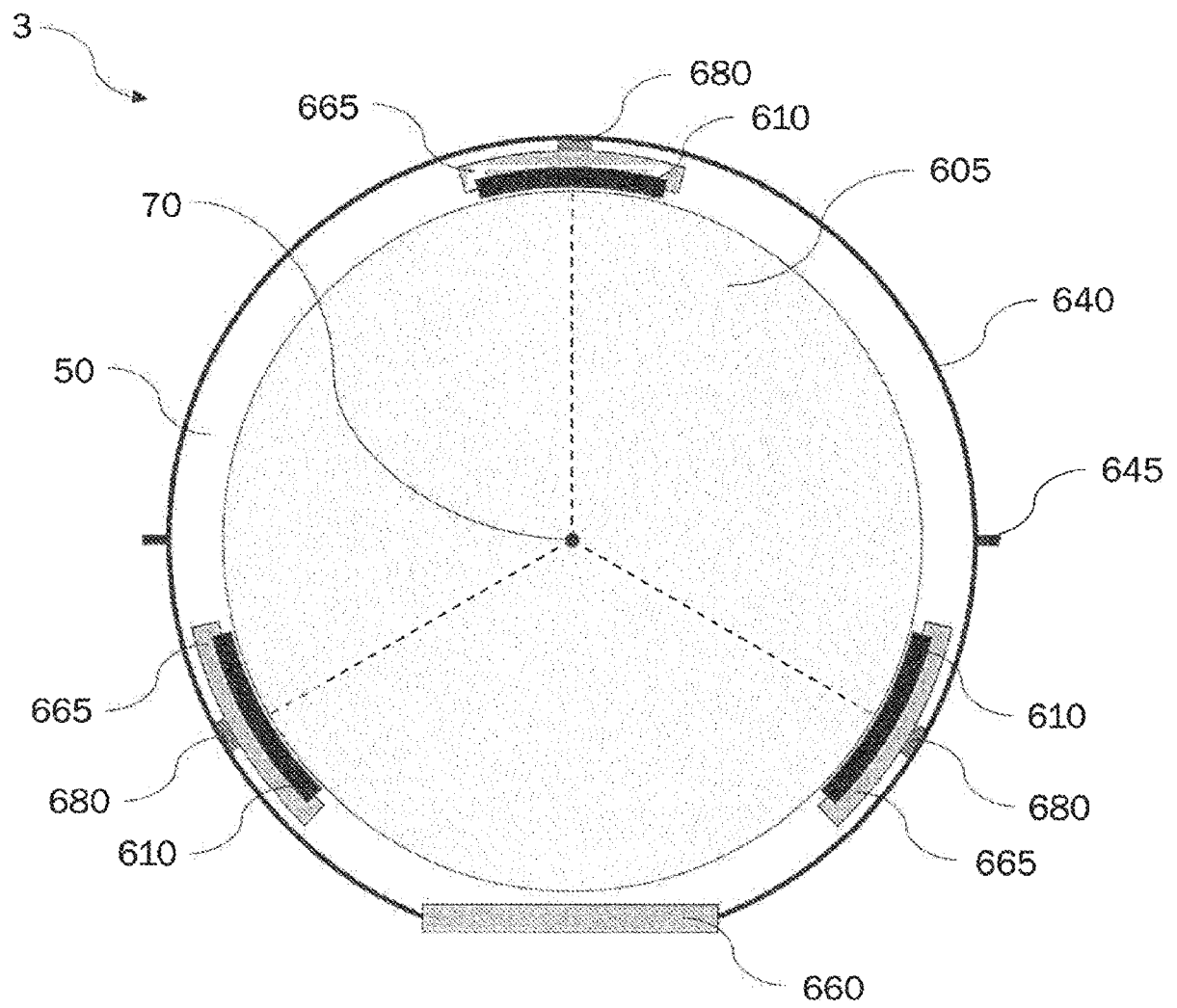


Fig. 6

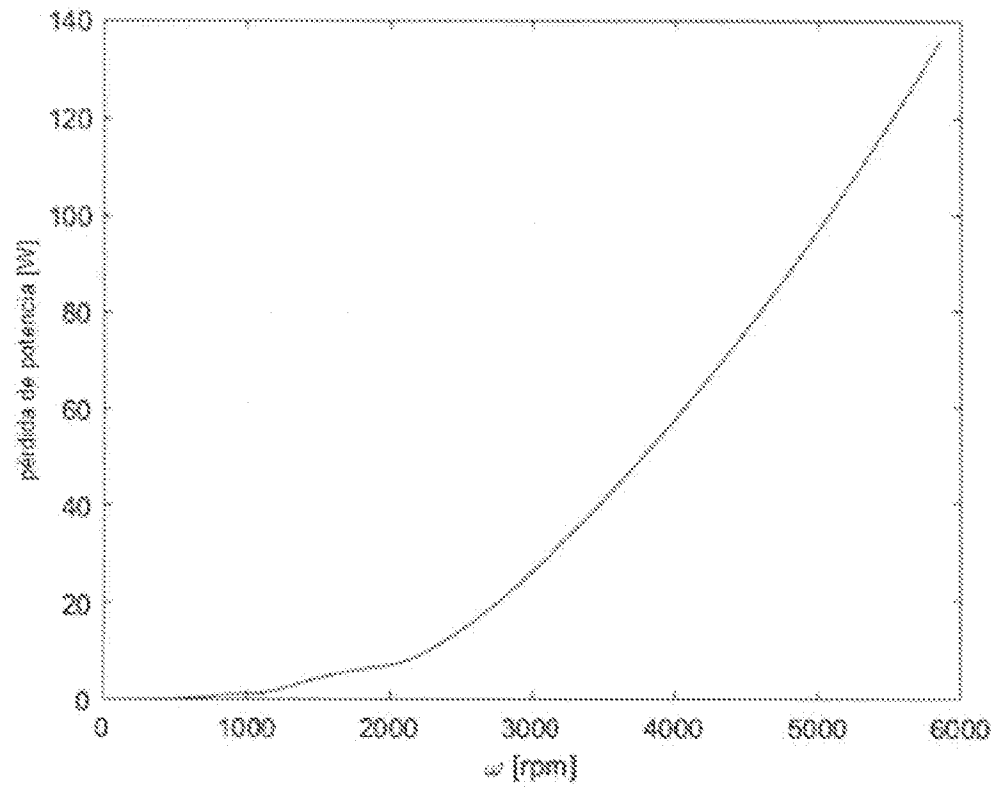


Fig. 7

Fig. 8A

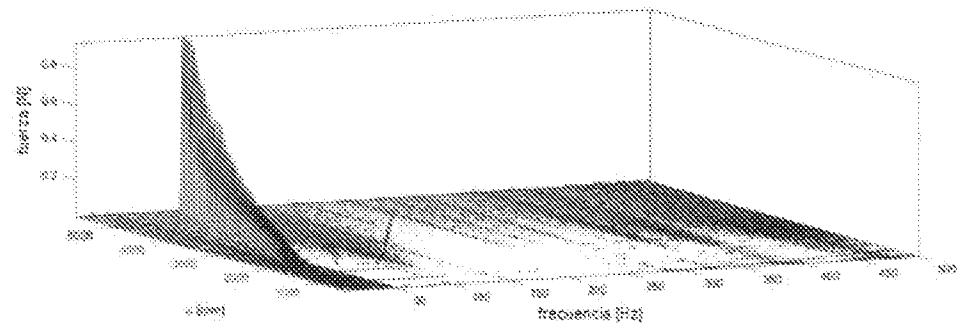


Fig. 8B

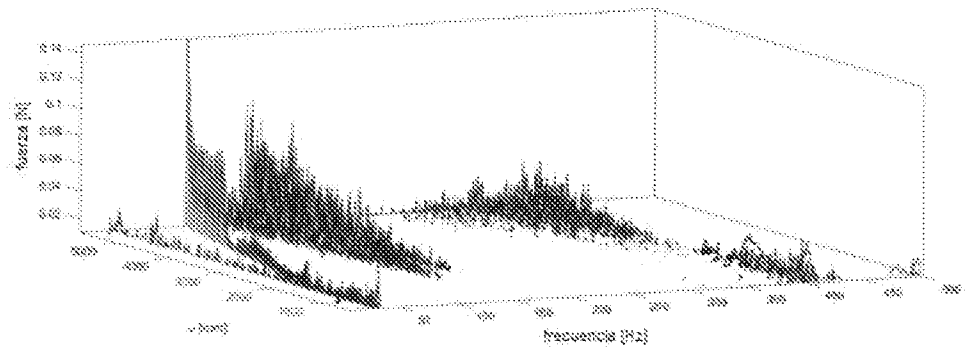


Fig. 8C

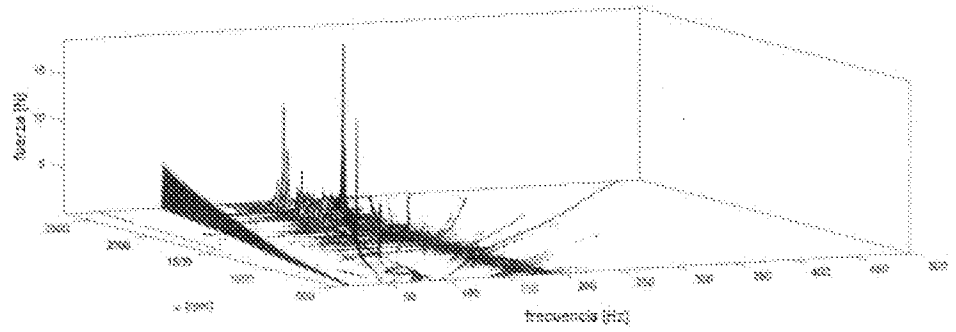
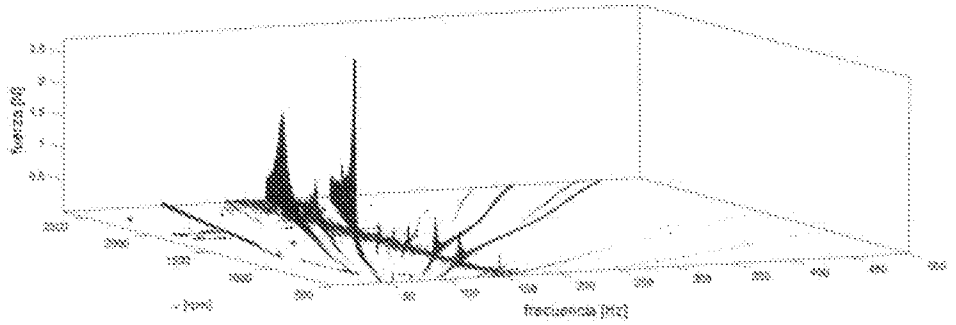


Fig. 8D



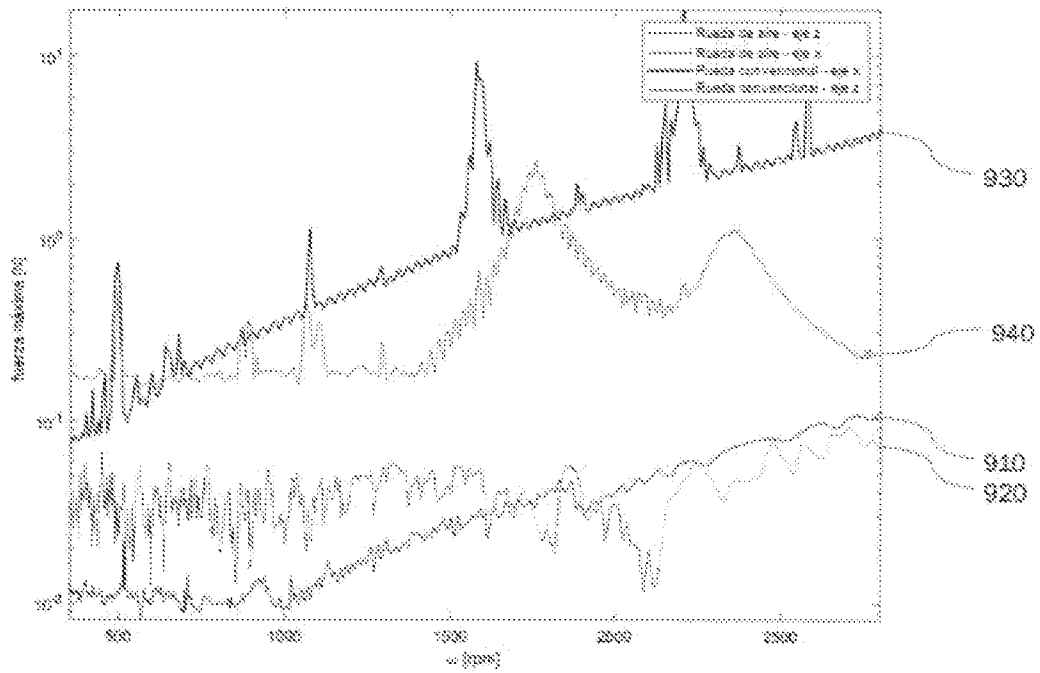


Fig. 9