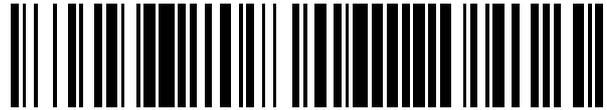


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 566 177**

51 Int. Cl.:

**H02P 25/06** (2006.01)

**H02K 7/075** (2006.01)

**H02K 41/02** (2006.01)

**H02K 7/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.08.2012 E 12762107 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.02.2016 EP 2751925**

54 Título: **Minimización del rizado del par de torsión**

30 Prioridad:

**16.08.2011 US 201161524089 P**

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

**11.04.2016**

73 Titular/es:

**NUCLEUS SCIENTIFIC INC. (100.0%)  
6 Oakdale Lane  
Lincoln, MA 01773, US**

72 Inventor/es:

**HUNTER, IAN W.;  
LAFONTAINE, SERGE y  
FOFONOFF, TIMOTHY A.**

74 Agente/Representante:

**LAZCANO GAINZA, Jesús**

**ES 2 566 177 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**

Minimización del rizado del par de torsión

5 Campo técnico

Esta invención se refiere generalmente al control de motores eléctricos y más específicamente al control de motores lineales de actuadores tipo Lorentz.

10 Antecedentes de la invención

15 Los motores de tipo Lorentz explotan el principio básico de que una partícula cargada que se mueve en un campo magnético experimenta una fuerza en una dirección perpendicular a la dirección del movimiento. Expresado matemáticamente:  $F=qv \times B$ , donde F es la fuerza, q es la carga de la partícula cargada, v es la velocidad instantánea de la partícula, y B es el campo magnético. De esta forma, si una corriente fluye a través de un alambre y se aplica un campo magnético en dirección perpendicular, el alambre experimenta una fuerza que trata de moverlo lateralmente.

20 Una simple configuración que aprovecha este principio es una bobina que rodea un núcleo magnético hecho de imanes permanentes. La bobina, referenciada como el actuador, se dispone para ser capaz de deslizarse hacia delante y hacia atrás a lo largo de la longitud del núcleo magnético o estator magnético. En esa configuración, el flujo de una corriente a través de la bobina resulta en una fuerza en la bobina que la empuja en una dirección a lo largo de la longitud del núcleo magnético. La inversión de la dirección del flujo de corriente provoca que la bobina se mueva en la dirección opuesta. La magnitud de la corriente determina la intensidad de la fuerza y la forma de onda de la corriente determina cómo cambia la fuerza con el tiempo. Con tal disposición, mediante la aplicación de una forma de onda de corriente apropiada a la bobina, puede hacerse que la bobina se mueva hacia delante y hacia atrás a lo largo del núcleo magnético de una manera controlada. El movimiento controlado del actuador puede, a su vez, usarse para realizar trabajo.

25 El documento GB-A-2344223 describe un motor eléctrico que comprende una pluralidad de actuadores eléctricos dispuestos radialmente alrededor de un eje de rotación, una superficie de levas que se extiende alrededor del eje y se acopla por las armaduras de los actuadores para convertir el movimiento lineal de este en movimiento giratorio, y medios de control para operar los actuadores secuencialmente.

30 El documento US-A-2007120432 describe una leva magnética axial que comprende al menos uno de un primer elemento de imán permanente soportado para el movimiento rotacional a lo largo de un eje, cuyo elemento de imán proporciona un área de trabajo y trayectoria de área de campo magnético circular continuo en donde dicha trayectoria incluye una pendiente magnética. Al menos uno de un segundo elemento de imán permanente que tiene un campo magnético se soporta para el movimiento alternativo dentro de la proximidad operacional de al menos un primer elemento magnético; en donde dicho movimiento alternativo es prácticamente paralelo con dicho eje de salida. El al menos uno de un primer elemento magnético y el al menos uno de un segundo elemento magnético alternativo proporcionan una fuerza magnética constante entre estos.

35 El documento US-A-2007120432 describe un motor eléctrico que utiliza una pluralidad de elementos magnéticos linealmente alternativos comparables con los pistones en un motor de fluido y un elemento de conversión de movimiento lineal a giratorio que comprende un miembro sinusoidal que acopla los elementos magnéticos alternativos.

40 El documento US-A-2011108339 describe un dispositivo de movimiento giratorio y lineal que incluye una unidad de estator magnético, actuadores electromagnéticos opuestos y un convertidor lineal a giratorio (por ejemplo, leva). Cada actuador electromagnético incluye una bobina que se configura para moverse alternadamente con relación a la unidad de estator magnético o para trasladarse linealmente en una dirección común con relación a la unidad de estator magnético. Los actuadores electromagnéticos se acoplan al convertidor lineal a giratorio y después del movimiento alternativo o de traslación lineal, accionan el convertidor lineal a giratorio en el movimiento giratorio o lineal.

45 El documento EP-A-1098429 describe un motor que incluye al menos dos elementos de accionamiento electromecánicos accionados por piezoactuadores. Al menos un anillo de accionamiento circular se excita a un desplazamiento giratorio mediante un golpe radial de los elementos de accionamiento electromecánicos. Un vástago se encuentra en el anillo de accionamiento de manera que el desplazamiento del anillo de accionamiento provoca que el vástago gire con este.

50 El documento US-A-6575078 describe un motor de fluido que tiene una pluralidad de pistones accionados por fluido que se extienden radialmente hacia fuera desde un estator y cada uno que tiene un cojinete de seguidor de leva en su extremo externo. Un rotor rodea el estator e incluye un perfil de levas de accionamiento orientado hacia dentro acoplado por los cojinetes de los seguidores de levas para hacer avanzar el rotor con relación al estator. El perfil de levas de accionamiento es sustancialmente sinusoidal como resultado de lo cual se logra un par de torsión sustancialmente constante.

65 Resumen de la invención

La presente invención comprende un motor eléctrico como se define por la reivindicación 1, con elementos opcionales como se define en las reivindicaciones dependientes 2 a la 13 y 15. Un aspecto de la invención es el método de operación de un motor eléctrico como se define en la reivindicación 14.

5 Breve descripción de los dibujos

Las Figs. 1A-1B ilustran un motor giratorio en una rueda.

La Fig. 1C ilustra una unidad de estator magnético.

Las Figs. 2A-2C ilustran componentes del motor giratorio de la Fig. 1 en varias etapas de movimiento,

10 La Fig. 2D ilustra una forma ejemplar de una leva.

La Fig. 3 es un perfil de leva basado en una espiral de Arquímedes

La Fig. 4 es un gráfico de la posición radial de la leva como una función del ángulo.

La Fig. 5 es un perfil de leva sinusoidal.

La Fig. 6 es un gráfico de la posición radial de la leva como una función del ángulo para la leva mostrada en la Fig. 5.

15 Las Figs. 7A-7B ilustran una disposición de dos motores con concentradores para una rueda.

Las Figs. 8A-8B ilustran vistas de dos levas desplazadas de forma giratoria.

Las Figs. 9A-9B ilustran un disco de un ejemplo de dispositivo giratorio acoplado a un borde de una rueda.

La Fig. 10 ilustra dos perfiles de levas en cuadratura.

La Fig. 11 ilustra las características de simetría de una función del par de torsión.

20 La Fig. 12 ilustra una función del par de torsión cuadrática por tramos.

La Fig. 13 ilustra un perfil cuadrático por tramos para la primera derivada del perfil de leva.

La Fig. 14 ilustra una función de fuerza no trigonométrica comparada con una función de fuerza trigonométrica.

La Fig. 15 ilustra un perfil de levas no trigonométrico comparado con un perfil de levas trigonométrico.

La Fig. 16 es un sistema de control ejemplar para proporcionar un par de torsión constante.

25 La Fig. 17 muestra una celda de carga para medir directamente la fuerza de Lorentz.

La Fig. 18 es un sistema de control ejemplar el cual emplea realimentación para la generación del perfil de fuerza.

Descripción detallada

30 El objeto de esta solicitud es el diseño y operación de una unidad de motor montada en un concentrador para así minimizar el rizado del par de torsión. El motor montado en un concentrador es un motor lineal de actuador tipo Lorentz. Antes de discutir el diseño y operación de la unidad de motor montada en un concentrador, se presentará una breve revisión del motor lineal de actuador tipo Lorentz. Una discusión más detallada puede encontrarse en el documento WO-A-2011/057070 (US-A-2011108339).

35 El motor lineal de actuador tipo Lorentz

El motor lineal de actuador tipo Lorentz es un dispositivo giratorio 100 que se monta dentro de una rueda en un vehículo, como se ilustra en la Fig. 1A. El dispositivo giratorio 100 incluye una unidad de estator magnético 120, los actuadores electromagnéticos opuestos 110a, 110b, y un convertidor lineal a giratorio (por ejemplo, leva en forma de óvalo) 105. El dispositivo giratorio 100 se une a la carrocería de un vehículo, por ejemplo, en un punto en el lado lejano de la rueda (no mostrado). El dispositivo giratorio 100 se une a la rueda a través de la leva 105 mediante el uso de una placa de soporte circular, por ejemplo, la cual se ha removido para mostrar el interior de la rueda. Tal placa se une al borde de la rueda y la leva 105 mediante el uso de sujetadores, tales como pernos. La rueda y la placa de soporte circular giran con relación a un concentrador 145 alrededor de un cojinete 150.

La Fig. 1B muestra el dispositivo giratorio 100 desde el lado de la rueda 140 con el neumático y algunos otros componentes retirados. El núcleo del dispositivo giratorio 100 incluye la leva 105, dos actuadores electromagnéticos opuestos 110a, 110b, y una unidad de estator magnético 120. Los actuadores electromagnéticos 110a, 110b cada uno aloja una bobina 115a, 115b que rodea la unidad de estator magnético 120. Los actuadores magnéticos 110a, 110b se disponen para el movimiento alternativo con relación a la unidad de estator magnético 120 cuando una señal de accionamiento adecuada se aplica a las bobinas 115a, 115b. Un actuador electromagnético 110a se muestra que tiene un alojamiento 155a que rodea su bobina 115a y el otro actuador electromagnético 110b se muestra con su alojamiento retirado para mostrar su bobina 115b.

55 La unidad de estator magnético 120 representada en la Fig. 1B se orienta verticalmente e incluye una pluralidad de estatores magnéticos 125a, 125b, cada uno de los cuales incluye múltiples imanes permanentes individuales orientados de manera que sus momentos magnéticos son perpendiculares al eje de la unidad de estator magnético 120. Cuando se aplica corriente a las bobinas 115a, 115b de los actuadores electromagnéticos 110a, 110b (por ejemplo, corriente alterna), los actuadores 110a, 110b se fuerzan para moverse verticalmente a lo largo de la unidad de estator magnético 120 debido a las fuerzas electromagnéticas resultantes (es decir, las fuerzas de Lorentz). Como se conoce bien, cuando una bobina que transporta una corriente eléctrica se coloca en un campo magnético, cada una de las cargas en movimiento de esa corriente experimentan lo que se conoce como la fuerza de Lorentz, y colectivamente crean una fuerza neta en la bobina. La dirección del movimiento y la fuerza generada se controlan por la polaridad y amplitud de la corriente inducida en la bobina.

El dispositivo giratorio 100 incluye además una pluralidad de vástagos 130a, 130b, acoplados a una estructura de soporte de cojinete 165. Los actuadores electromagnéticos 110a, 110b se deslizan a lo largo de los vástagos mediante el uso de, por ejemplo, cojinetes lineales. A cada actuador electromagnético 110a, 110b se une un par de seguidores 135a-d que interactúan con la leva 105 para convertir su movimiento lineal, a movimiento giratorio de la leva. Para reducir la fricción, los seguidores 135a-d giran libremente para así rodar sobre las superficies de la leva 105 durante el ciclo de operación. Los seguidores 135a-d se unen a los actuadores electromagnéticos 110a, 110b a través de, por ejemplo, los alojamientos de los actuadores. Cuando los actuadores electromagnéticos 110a, 110b se mueven alternativamente, la fuerza ejercida por los seguidores 135a-d sobre la leva 105 acciona la leva 105 en movimiento giratorio.

La Fig. 1C ilustra la unidad de estator magnético 120 con dos estatores magnéticos 125a, 125b. Los estatores magnéticos 125a, 125b cada uno incluye múltiples imanes. Por ejemplo, el estator magnético 125a incluye, sobre una porción de superficie de extremo, ocho imanes 160a-h. Todos los imanes 160 tienen sus momentos magnéticos orientados perpendiculares a la superficie sobre la cual ellos se montan y en la misma dirección.

Las Figs. 2A-C ilustran componentes del dispositivo giratorio 100 en acción, que incluyen los actuadores electromagnéticos del dispositivo giratorio 110a, 110b (con las bobinas asociadas 115a, 115b y los seguidores 135a-d) y la leva 105 que se mueve con relación a la unidad de estator magnético 120 (que incluye los estatores magnéticos asociados 125a, 125b). El borde, la rueda, y los alojamientos mediante los cuales los seguidores se unen a las bobinas no se muestran en estas figuras. Como se ilustra por las Figs. 2A-C, el movimiento alternativo de las bobinas 115a, 115b en oposición acciona la leva 105 para girar, lo cual, a su vez, provoca que gire una rueda unida a la leva 105. Las bobinas 115a, 115b se muestran en la Fig. 2A como que están separadas casi a su distancia más lejana. La Fig. 2B muestra que cuando las bobinas 115a, 115b se mueven más cerca entre sí, las bobinas 115a, 115b accionan la leva 105 para girar en una dirección en el sentido de las manecillas del reloj, de esta manera que provocan que cualquier rueda unida gire además en el sentido de las manecillas del reloj. En el dispositivo de ejemplo, la fuerza ejercida sobre la leva 105 se provoca por los seguidores externos 135a, 135c que se aprietan sobre la leva 105. La Fig. 2C muestra que las bobinas 115a, 115b están incluso más cerca juntas lo que provoca el movimiento adicional en el sentido de las manecillas del reloj de la leva 105.

Después que las bobinas 115a, 115b han alcanzado su distancia más corta entre sí y la leva 105, en este caso, ha girado noventa grados, las bobinas 115a, 115b comienzan a moverse alejándose entre sí y accionan la leva 105 para continuar girando en el sentido de las manecillas del reloj. Cuando las bobinas 115a, 115b se mueven alejándose entre sí, los seguidores internos 135b, 135d ejercen fuerza sobre la leva 105 mediante el empuje hacia fuera sobre la leva 105.

Se debe notar que la leva 105 se muestra in las figuras como de una forma ovalada, pero puede tener una forma más compleja, tal como, por ejemplo, una forma que tiene un número par de lóbulos, como se ilustra en la Fig. 2D. Los lados de cada lóbulo pueden conformarse en forma de una onda sinusoidal, una porción de una espiral de Arquímedes o alguna otra curva, por ejemplo. El número de lóbulos determina cuántos ciclos deben completar las bobinas para provocar que la leva gire un círculo completo. Una leva con dos lóbulos girará un círculo completo después de dos ciclos de la bobina. Una leva con cuatro lóbulos girará un círculo completo después de cuatro ciclos de la bobina. Adicionalmente, más lóbulos en una leva resultan en un mayor par de torsión.

#### Análisis del par de torsión

El motor consta de un disco circular con una leva externa y una leva interna. Dos seguidores de leva conectados a una bobina pueden crear una fuerza radial sobre la leva. La fuerza ejercida por los seguidores de leva a su vez crean un par de torsión sobre el disco.

La ecuación idealizada para el par de torsión  $T_c(\theta)$  generado por el seguidor de leva se determina por la siguiente ecuación:

$$T_c(\theta) = F_c(\theta) \cdot \frac{dR_c(\theta)}{d\theta}$$

Ec. 1

donde  $F_c(\theta)$  es la fuerza radial generada por el seguidor de leva, y  $R_c(\theta)$  es la distancia del seguidor de leva desde el centro del disco. Como se notó anteriormente, en el motor, la fuerza se genera a partir de una corriente que corre en una bobina e interactúa con un campo magnético.

Si la fuerza es constante a lo largo de un medio golpe y la pendiente que define la posición del seguidor de leva como una función del ángulo de la rueda es además constante, eso produce un par de torsión que es constante durante todo el ciclo. La forma bidimensional de la leva sería entonces como se representa en la Fig. 3.

En la Fig. (1),  $\theta$  es la posición (rotación) de la rueda en radianes y el disco tiene cuatro lóbulos. El seguidor de leva ejerce una fuerza vertical como se indica por la flecha. La posición de la leva en coordenadas polares se determina por la curva mostrada en la Fig. 4.

Aunque este perfil de leva se presta fácilmente a una señal de accionamiento que produce un par de torsión constante, presenta dos grandes inconvenientes: la necesidad de cambiar instantáneamente la velocidad de la bobina en el extremo del movimiento de la leva y la necesidad de cambiar instantáneamente la corriente que genera la fuerza ejercida por la leva.

La ecuación aproximada que da la fuerza requerida para acelerar y desacelerar la bobina es:

$$F_r = M_c \cdot \left[ \frac{d^2}{d\theta^2} R_c(\theta) \cdot \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{d}{d\theta} R_c(\theta) \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \right] \quad \text{Ec. 2}$$

donde  $M_c$  es la masa de la bobina. En los extremos del movimiento de golpe, el término  $\frac{d^2 R_c(\theta)}{d\theta^2}$  es en teoría infinito, lo que significa en la práctica que la bobina experimentaría un choque inaceptablemente alto debido a la desaceleración y aceleración abrupta.

Cambiar instantáneamente la corriente presenta además retos técnicos, dado que la corriente fluye a través de una bobina con una inductancia significativa. Una aproximación lineal del voltaje requerido para cambiar la corriente en la bobina se determina por:

$$V_c(t) = R_c \cdot I_c(t) + L_c \cdot \frac{d}{dt} I(t) + V_{emf}(t) \quad \text{Ec. 3}$$

donde  $V_c(t)$  es el voltaje requerido a través de la bobina como una función del cambio requerido en la corriente de la bobina,  $I_c(t)$ ,  $R_c$  es la resistencia de la bobina,  $L_c$  es la inductancia de la bobina y  $V_{emf}(t)$  es la fuerza electromotriz de retorno generada por la bobina cuando esta se mueve a través de un campo magnético variable. Aquí nuevamente, dada la discontinuidad en la corriente el voltaje a través de la bobina tendería a infinito.

Una solución parcial es cambiar el perfil de leva de manera que su segunda derivada sea finita y continua en todos los puntos, es decir, que tenga una derivada de tercer orden. Un ejemplo de tal perfil de leva sería una forma sinusoidal. En tal caso, el perfil de leva se determinaría por la ecuación:

$$R_c(\theta) = R_o + A_c \cdot \text{sen}(n_1 \cdot \theta) \quad \text{Ec. 4}$$

donde  $R_o$  es el círculo alrededor del cual la leva evoluciona (posición principal),  $A_c$  es la amplitud de la leva y  $n_1$  es el número de lóbulos o número de golpes por revolución. El perfil de leva entonces se parece a lo que se muestra en la Fig. 5 y en coordenadas polares, el perfil de leva se muestra en la Fig. 6.

En este caso la fuerza que se va a generar por la bobina se determina por:

$$F_c(\theta) = \frac{T_c(\theta)}{\frac{d}{d\theta} R_c(\theta)} \quad \text{Ec. 5}$$

Sin embargo, la derivada de la posición de la leva  $R_c(\theta)$  es nula en el extremo de los golpes, por lo tanto la fuerza requerida divergería además a infinito. Esto continúa siendo cierto para cualquier perfil de leva. Si existe solamente una leva, el corolario es que esta no sería de arranque automático si la posición inicial ocurre cuando el seguidor de leva está en el extremo de un golpe.

El uso de múltiples levas de manera que sus puntos nulos se separen salva el problema. En el ejemplo más simple, deberían existir dos levas en un disco, cada una en lados opuestos.

Una modalidad ilustrativa

Una rueda la cual implementa este enfoque se muestra en las Figs. 7A-B. En este caso el neumático de la rueda, y algunos otros componentes, se han retirado para mayor claridad. Tiene dos dispositivos giratorios, uno montado en cada lado de un disco central 1635. Los dispositivos giratorios son similares a los dispositivos giratorios descritos anteriormente. Un dispositivo giratorio incluye un par de actuadores electromagnéticos 1510a, 1510b, y una unidad de estator magnético 1520. De manera similar, el segundo dispositivo giratorio incluye un par de actuadores electromagnéticos 1610a, 1610b, y una unidad de estator magnético 1620. Cada una de las unidades de estator magnético 1520, 1620 incluye dos estatores magnéticos 1515a, 1515b, 1615a, 1615b, los cuales incluyen las trayectorias de retorno de flujo magnético 1640a-d y los imanes (por ejemplo, 1630a, 1630b). Los alojamientos que rodean las bobinas de los actuadores electromagnéticos 1510a, 1510b, 1610a, 1610b no se muestran. Cada bobina se mueve alternativamente a lo largo de cuatro arreglos de imanes, los cuales, como se describió anteriormente, pueden incluir múltiples imanes. Dos de los arreglos de imanes se localizan dentro de la bobina (por ejemplo, el componente de estator magnético interno 1630b) y dos se localizan fuera de la bobina (por ejemplo, el componente de estator magnético externo 1630a). Cada conjunto de imanes se monta en una trayectoria de retorno de flujo magnético 1640a-d.

El disco 1635 incluye dos levas, una en cualquiera de los dos lados del disco 1635. En este ejemplo, cada leva del dispositivo tiene la forma de una ranura que incluye una superficie interna 1605a y una superficie externa 1605b. Acoplados a los actuadores electromagnéticos 1510a y 1510b hay dos pares de seguidores 1625a, 1625b, los diferentes seguidores de cada par que interactúan con una superficie respectiva 1605a, 1605b de la leva. Los actuadores electromagnéticos 1610a y 1610b se acoplan similarmente a los seguidores. Cuando las bobinas se mueven una hacia la otra, uno de los seguidores de cada actuador electromagnético 1510a, 1510b ejerce fuerza sobre la superficie interna 1605a de la leva. Cuando las bobinas se mueven alejándose una de la otra, el otro seguidor ejerce fuerza sobre la superficie externa 1605b de la leva.

La Fig. 7B ilustra una vista diferente de los dispositivos giratorios. Debería ser evidente que cada par de actuadores electromagnéticos (el par 1510a, 1510b y el par 1610a, 1610b) están en fases diferentes de movimiento alternativo. Esto es porque en el dispositivo de ejemplo, las levas en cualquier lado del disco 1635 se desplazan de forma giratoria entre sí, por ejemplo, cuarenta y cinco grados. Esto ayuda a evitar que los actuadores paren en un punto sobre las levas a partir del cual sería difícil comenzar de nuevo. Así, si un par de actuadores para en un "punto muerto" de su respectiva leva, el otro par de actuadores no estaría en un punto muerto. La Fig. 7B ilustra además una disposición de las bobinas y los componentes del estator magnético. Por ejemplo, los componentes del estator magnético 1630b y 1630c se localizan dentro de la bobina del actuador 1610a, y los componentes del estator magnético 1630a y 1630d se localizan fuera de la bobina.

La Fig. 8A ilustra dos levas desplazadas de forma giratoria 1505, 1606. Las levas 1505, 1606 son parte de o se montan sobre un disco 1635. Una leva 1505 está en un lado del disco 1635, y la otra leva 1606 está en el lado opuesto, como se indica por la línea discontinua. En algunos dispositivos la leva puede desplazarse cuarenta y cinco grados, por ejemplo. Las levas 1505, 1606 tienen un número par de lóbulos, por ejemplo 2, 4, 6 etc.. Las levas que tienen dos lóbulos se desplazan 45 grados. Las levas que tienen cuatro lóbulos se desplazan 22.5 grados.

La Fig. 8B ilustra una sección transversal vertical de un disco 1635 con dos levas desplazadas de forma giratoria, cada una que tiene una superficie interna 1605a, 1605c y una superficie externa 1605b, 1605d. Debido al desplazamiento, las superficies internas 1605a, 1605c no están en línea entre sí. De igual forma, las superficies externas 1605b, 1605d también no están en línea entre sí.

La Fig. 9A ilustra cómo el disco 1635 del dispositivo giratorio de ejemplo se acopla al borde 1705 de una rueda. El borde 1705 consta de una pieza a la cual el disco 1635 se fija mediante el uso de sujetadores, tal como pernos, a lo largo de un anillo interno 1715. Alternativamente, el borde 1705 puede incluir dos partes 1710a, 1710b que se unen con pernos a lo largo del anillo 1715. Cuando se sujetan juntas, las dos partes 1710a, 1710b forman un borde completo 1705 con el anillo interno 1715. Un neumático se monta después al borde 1705. La Fig. 9B muestra cómo el disco 1635 se sujeta al anillo interno 1715 del disco 1635.

Minimizar el rizado del par de torsión

De vuelta a la descripción de la técnica para minimizar el rizado del par de torsión, dirigimos la atención de los lectores a un ejemplo que usa dos levas de cuatro lóbulos, el cual se ilustra en la Fig. 10.

Cabe destacar que los perfiles no son imágenes espejo pero están en cuadratura y que constan del mismo perfil básico  $R_c(x)$  pero "desplazado" con respecto uno del otro. Mediante la suposición de que  $n_c$  es el número de lóbulos en la leva, es decir el número de veces que una función básica  $R_c(x)$  se repite dentro de un círculo completo, y que la derivada del perfil de leva se determina por  $\Psi_c(n_c \cdot \theta)$ , la ecuación para el par de torsión proporcionado por la suma de los pares de torsión  $\Phi(\theta)$  de las levas individuales sería:

$$T = \Phi(n_c \cdot \theta) + \Phi(n_c \cdot \theta + \Delta) \tag{Ec. 6}$$

$$T = F_c(n_c \cdot \theta) \cdot \Psi(n_c \cdot \theta) + F_c(n_c \cdot \theta + \Delta) \cdot \Psi(n_c \cdot \theta + \Delta) \tag{Ec. 7}$$

Y típicamente  $\Delta$  corresponde a un cuarto de un lóbulo, es  $\Delta = \frac{\pi}{2}$ .

Esto conduce a la siguiente pregunta: cuál es la familia de las funciones  $\Phi(\theta) = F_c(\theta) \cdot \Psi_c(\theta)$  de manera que el par de torsión total sea constante (es decir, libre de rizado) cuando al menos se usan dos levas fuera de fase y actuadores. Esta ecuación implica que la función  $\Phi(\theta)$  tiene una periodicidad de  $2 \cdot \Delta$ :

$$\Phi(\theta) = T - \Phi(\theta + \Delta) \tag{Ec. 8}$$

$$\Phi(\theta + \Delta) = T - \Phi(\theta + 2 \cdot \Delta) \tag{Ec. 9}$$

Sustituyendo:

$$\Phi(\theta) = T - (T - \Phi(\theta + 2 \cdot \Delta)) = \Phi(\theta + 2 \cdot \Delta) \tag{Ec. 10}$$

Que es como se requiere, es decir, la función  $\Phi(\theta)$  es periódica, con un período que es el doble del período de un ciclo de leva completo. Esto aún deja el conjunto de funciones bastante grande. Por razones de simetría, es razonable requerir que:

$$\Phi(\theta) = \Phi(-\theta) \tag{Ec. 11}$$

Y podemos asumir además que la leva alcanza su extremo en  $\theta = 0$  y  $\theta = \Delta$ . Por lo tanto, la clase de funciones  $\Phi(\theta)$  que estamos buscando tiene las propiedades siguientes:

1.  $\Phi(0) = 0$
2.  $\Phi(\Delta) = T_{max}$  donde  $T_{max}$  es el par de torsión máximo
3.  $\Phi(\theta)$  es simétrica con respecto al eje vertical  $\theta = 0$
4.  $\Phi(\theta)$  es simétrica con respecto al punto  $(\Delta/2, T_{max}/2)$ .
5.  $\Phi(\theta)$  es continua.

La forma general de esta función se determina en la Fig. 11.

Se conoce, además, que la función  $\Phi(\theta)$  es el producto de otras dos funciones,  $F_c(\theta)$  y  $\Psi(\theta)$ , donde  $\Psi(\theta)$  debe tener una derivada de primer orden, de manera que el perfil de leva se determina por:

$$R_c(\theta) = \int \Psi(\theta) d\theta \tag{Ec. 12}$$

Intuitivamente sería deseable además que las funciones  $F_c(\theta)$ ,  $R_c(\theta)$  y  $\Psi(\theta)$  tengan la misma simetría. Por lo tanto, una cuestión razonable para preguntar es ¿existiría una función de manera que  $F_c(\theta)$  y  $\Psi(\theta)$  sean la misma función? En este caso:

$$T = \Psi^2(n_c \cdot \theta) + \Psi^2(n_c \cdot \theta + \Delta)$$

Ec. 13

5

que es la ecuación básica de un triángulo rectángulo.

Aquí los componentes en cuadratura pueden observarse como los lados de un triángulo rectángulo, de manera que uno es un seno de un ángulo y el otro el coseno del ángulo:

10

$$\cos^2(\varphi) = \Psi^2(n_c \cdot \theta)$$

Ec. 14

15

$$\cos(\varphi + \Delta) = \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) = \cos(\varphi) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \text{sen}(\varphi) \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) = -\text{sen}(\varphi)$$

Ec. 15

$$\therefore \cos^2(\varphi + \Delta) = \text{Sen}^2(\varphi)$$

Ec. 16

20

En conclusión, si la forma de la leva es una función seno, su derivada es una función coseno, su derivada es una función seno, y si la forma de onda de la corriente es además una función seno entonces los dos componentes en cuadratura se suman hasta un par de torsión constante sin rizado.

25

En principio, existe un número infinito de funciones  $F_c(\theta)$ ,  $R_c(\theta)$  y  $\Psi(\theta)$  que conducen a un par de torsión constante. En la práctica, la selección es más bien limitada, dado que se debe tener:

30

$$F_c(\theta) = \frac{\Phi(\theta)}{\Psi(\theta)}$$

Ec. 17

35

Y cuando ambas  $\Phi(\theta)$  y  $\Psi(\theta)$  tienden a cero, la relación debe converger además a cero. También se requiere una derivada de primer orden. Se vuelve un ejercicio no trivial encontrar otras funciones además de la función de tipo sinusoidal que reúnan estos criterios, y típicamente termina muy cerca de una función trigonométrica. Sin embargo, en la época actual de microprocesador basado en control digital donde el tiempo de cálculo es una consideración principal tales funciones alternativas podrían tener un beneficio.

40

Uno de los ejemplos más simples de un enfoque alternativo sería usar funciones cuadráticas por tramos para  $\Phi_1(\theta)$  y  $\Psi_1(\theta)$ , como se determina en esta representación recursiva en MathCAD, que omite por el momento, el número de lóbulos en las ecuaciones:

45

$$\Phi_1(\theta) := \begin{cases} z \leftarrow |\theta| \\ z \leftarrow \text{mod}(z, \pi) \\ y \leftarrow \frac{8}{\pi^2} \cdot z^2 \text{ si } z \leq \frac{\pi}{4} \\ \text{de otra manera} \\ \left| \begin{array}{l} y \leftarrow 1 - \Phi_1\left(\frac{\pi}{2} - z\right) \text{ si } z \leq \frac{\pi}{2} \\ y \leftarrow \Phi_1(\pi - z) \text{ de otra manera} \end{array} \right. \\ y \leftarrow y \end{cases}$$

Ec. (18)

60

donde  $\Phi_1(\theta)$  se muestra en la Fig. 12.

65

$$\Psi_1(x) := \begin{cases} z \leftarrow |x| \\ z \leftarrow \text{mod}(z, 2\pi) \\ y \leftarrow 1 - \frac{4}{\pi^2} \left( \frac{\pi}{2} - z \right)^2 \quad \text{si } z \leq \frac{\pi}{2} \\ \text{de otra manera} \\ \left| \begin{array}{l} y \leftarrow \Psi_1(\pi - z) \quad \text{si } z \leq \pi \\ y \leftarrow -\Psi_1(z - \pi) \quad \text{de otra manera} \end{array} \right. \\ y \leftarrow y \cdot \text{sign}(x) \end{cases}$$

Ec. (19)

donde  $\Psi_1(\theta)$  se muestra en la Fig. 13.

El perfil de la fuerza resultante  $F_1$ , calculado a partir de la relación de  $\Phi_1$  con  $\Psi_1$  se indica en la Fig. 14, y se compara con una función trigonométrica.

Finalmente, el perfil de leva  $R_1$  se calcula a partir de la integral de  $\Psi_1$  y se compara con una función trigonométrica en la Fig. 15.

Aunque es difícil de probar, se espera que todas las formas de levas y perfiles de fuerza que se comporten bien en términos de simetría y suavidad tengan todos una forma muy cercana a funciones trigonométricas. Solamente dos levas en cuadratura se analizaron aquí, el mismo enfoque podría usarse para otros números pares de levas.

En la práctica actual, aunque es fácil generar una leva con una función triangular precisa, es más difícil generar un perfil de fuerza que sea una senoide. Para un actuador de fuerza de Lorentz idealizado que asume una inducción magnética constante  $B$ , esto se traduciría en generar un perfil de corriente exacto con una función sinusoidal. Sin embargo, en la práctica la inducción magnética  $B$  no es constante y depende de la geometría de los imanes permanentes usados para generar el campo. Además, el campo generado por los imanes depende de la temperatura y se influencia también por la corriente que fluye en la bobina del motor. Todos estos efectos deben modelarse con cuidado para generar una corriente que realmente minimice el rizado.

Un sistema de control típico se representa en la Fig. 16. Este incluye la conmutación de la electrónica de potencia 500 la cual suministra una señal de accionamiento de ancho de pulso modulado a las bobinas en el motor para producir el par de torsión y la velocidad deseada. La operación de conmutación de la electrónica de potencia 500 se controla basado en modelos del motor que incluyen un modelo 502 de la inducción magnética del motor (es decir, el campo magnético visto por la bobina como una función de la posición de la bobina, la corriente en la bobina, y la temperatura de la bobina) y un modelo 504 el cual permite determinar el voltaje de una señal de ancho de pulso modulado que es necesaria para producir la corriente de accionamiento deseada en las bobinas. La entrada para los modelos proviene de un codificador giratorio 506 el cual indica la posición angular de la leva o rueda, un módulo de conversión 508 que convierte la posición angular en una posición de la bobina o el seguidor de leva, y varios sensores en el motor que suministran información acerca de las condiciones de operación del motor. Se debe notar que el modelo cambia en dependencia de las condiciones de operación y algunas veces el modelo necesita tener esto en cuenta. Los varios sensores incluyen un sensor de temperatura del motor 510, un sensor de corriente 512, un sensor de voltaje de la batería 514, y un sensor de voltaje de la bobina 516.

A partir de un codificador giratorio de rueda 506, se calculan la posición angular y radial de la bobina y el seguidor de leva. Desde la posición del seguidor de leva, la fuerza deseada para generarse por la bobina se calcula a partir de una función  $F_c(\theta)$ . La corriente deseada requerida para producir esta fuerza es igual a la corriente en la bobina por la inducción magnética. Ya que la inducción magnética  $B$  no es exactamente uniforme, esta tiene que estimarse a partir del modelo 502 mediante el uso de la temperatura del motor, la corriente de la bobina, y la posición relativa de la bobina con respecto a los imanes permanentes.

La corriente deseada se convierte a un ancho de modulación de pulso. Esto se hace en dos etapas. Primero a partir del modelo de la dinámica de la bobina, se calcula el voltaje requerido a través de la bobina para obtener la corriente deseada en la bobina. Después, se requiere un modelo de la electrónica de potencia para calcular la conmutación del ciclo de trabajo basado en el voltaje deseado, el voltaje de alimentación, la corriente actual en la bobina y el voltaje a través de la bobina.

Hasta ahora el control se basa todo en modelos de alimentación directa. Sin embargo, los modelos tienen ciertos niveles de inexactitud, por lo que se usa la realimentación para corregirlos entre la corriente deseada y la corriente medida.

Un enfoque alternativo para generar el perfil de fuerza deseado es medir la fuerza que se genera y controlar directamente esa fuerza mediante el uso de un control de realimentación en la corriente, como se resume en las Figs. 17 y 18.

5

La Fig. 17 ilustra cómo la fuerza de Lorentz generada por la bobina puede medirse directamente. Una celda de carga 700 se inserta entre la bobina 702 y el seguidor de leva 704. El seguidor de leva en sí puede someterse a grandes fuerzas fuera del eje a partir de la reacción con la leva. Sin embargo, los transductores de fuerza pueden diseñarse para ser mayormente insensibles a tales fuerzas laterales. Por lo tanto, una medición exacta de la fuerza axial puede obtenerse a partir de la celda de carga y después usarse en varios algoritmos de control para ajustar la corriente de manera que se genera el perfil de fuerza requerido.

10

La Fig. 18 ilustra una de las muchas estrategias de control alternativas que pueden usarse para obtener el perfil de fuerza requerido. Los algoritmos descritos anteriormente para estimar la corriente necesaria para obtener la fuerza deseada podrían usarse en una manera de alimentación directa. Después, el error entre la fuerza deseada y la fuerza de la bobina medida se alimentaría a algún otro sistema de control de realimentación que use la medición para hacer las correcciones de corriente con el propósito de obtener el perfil de fuerza deseado. La ventaja del enfoque de control de realimentación es que este tenderá a ser más estable que un enfoque puramente de alimentación directa.

15

20

Otras modalidades se encuentran dentro de las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Un motor eléctrico (100) que comprende:
- 5 un primer actuador lineal (110a) que incluye una primera bobina (115a);  
un segundo actuador lineal (110b) que incluye una segunda bobina (115b);  
10 un vástago de rotación (145);  
una unidad de leva (135/105) montada sobre dicho vástago de rotación para traducir el movimiento lineal de los primero y segundo actuadores lineales en movimiento rotacional del vástago de rotación, la unidad de leva (135/105) que comprende dos o un número par mayor de levas desplazadas de forma giratoria;
- 15 un controlador programado para generar durante la operación una primera señal de accionamiento para la primera bobina y una segunda señal de accionamiento para la segunda bobina, en donde la primera señal de accionamiento provoca que el primer actuador lineal, a través de la interacción con la unidad de leva, genere un primer par de torsión en el vástago de rotación que varía periódicamente tras una rotación completa del vástago y la segunda señal de accionamiento provoca que el segundo actuador lineal, a través de la interacción con la  
20 unidad de leva, genere un segundo par de torsión en el vástago de rotación que varía periódicamente tras la rotación completa del vástago, y
- en donde una señal de accionamiento adecuada se aplica a las bobinas para generar los primero y segundo pares de torsión, la suma de cuyos pares de torsión produce un par de torsión total que está sustancialmente libre de rizado durante la rotación completa del vástago.
- 25 2. El motor eléctrico de la reivindicación 1, que comprende además:
- una primera unidad de seguidor de leva (135a,b) que acopla el primer actuador lineal (110a) a la unidad de leva (135/105); y
- 30 una segunda unidad de seguidor de leva (135c,d) que acopla el segundo actuador lineal (110b) a la unidad de leva (135/105), en donde la primera unidad de seguidor de leva se dispone para ir a lo largo de una primera superficie de leva (105) dentro de la unidad de leva, dicha primera superficie de leva que tiene un primer perfil de  
35 más de 360 grados de rotación,
- en donde la segunda unidad de seguidor de leva se dispone para ir a lo largo de una segunda superficie de leva (105) dentro de la unidad de leva, dicha segunda superficie de leva que tiene un segundo perfil de más de 360  
40 grados de rotación, y
- en donde los primero y segundo perfiles, así como también las primera y segunda señales de accionamiento, se seleccionan para generar los primero y segundo pares de torsión la suma de los cuales produce un par de torsión total que está sustancialmente libre de rizado durante la rotación completa del vástago.
- 45 3. El motor eléctrico de la reivindicación 2, en donde el primer perfil se describe por n ciclos de una función trigonométrica, en donde n es un entero par.
4. El motor eléctrico de la reivindicación 3, en donde el segundo perfil se describe por n ciclos de dicha función trigonométrica.
- 50 5. El motor eléctrico de la reivindicación 4, en donde n es igual a 4.
6. El motor eléctrico de la reivindicación 5, en donde dicha función trigonométrica es una función seno.
7. El motor eléctrico de la reivindicación 6, en donde el primer perfil se desplaza en fase con relación al segundo  
55 perfil por  $\frac{\pi}{2n}$  radianes.
8. El motor eléctrico de la reivindicación 2, en donde el primer perfil sigue una curva que es continua por más de 360 grados y que tiene una primera derivada que es continua por más de 360 grados.
- 60

9. El motor eléctrico de la reivindicación 2, en donde cada uno de los primero y segundo perfiles tiene un período de  $\frac{360}{n}$  grados y cada uno de los primero y segundo pares de torsión tiene un período de  $\frac{180}{n}$  grados y en donde n es un número entero par.
- 5 10. El motor eléctrico de la reivindicación 9 en donde n es igual a 4.
11. El motor eléctrico de la reivindicación 6, en donde los primero y segundo perfiles se alinean en fase y en donde los primero y segundo actuadores lineales se desplazan en orientación con relación uno al otro por  $\frac{\pi}{2n}$  radianes
- 10 12. El motor eléctrico de la reivindicación 1, en donde las primera y segunda superficies de leva son superficies separadas.
13. El motor eléctrico de la reivindicación 1, en donde las primera y segunda superficies de leva son la misma superficie.
- 15 14. Un método para operar un motor eléctrico que incluye un primer actuador lineal (110a) que incluye una primera bobina (115a), un segundo actuador lineal (110a) que incluye una segunda bobina (115b), un vástago de rotación (145), una unidad de leva (135/105), que comprende dos o un número par mayor de levas desplazadas de forma giratoria, montadas sobre dicho vástago de rotación para traducir el movimiento lineal de los primero y segundo actuadores lineales en el movimiento rotacional del vástago de rotación, dicho método que comprende:
- 20 accionar la primera bobina (115a) con una primera señal que produce una primera fuerza dirigida radialmente;
- 25 accionar simultáneamente la segunda bobina (115b) con una segunda señal que produce una segunda fuerza dirigida radialmente, en donde la primera fuerza dirigida radialmente se representa por una función seno y la segunda fuerza dirigida radialmente se representa por la función seno con fase desplazada por  $\pm \frac{\pi}{2}$  radianes, de manera que un par de torsión total se vuelve sustancialmente libre de rizado durante la rotación completa del vástago.
- 30 15. El motor eléctrico de la reivindicación 2, en donde:
- una primera derivada del primer perfil se representa por  $\Psi(n_c \cdot \theta)$
- 35 una primera derivada del segundo perfil se representa por  $\Psi(n_c \cdot \theta + \Delta)$
- una fuerza generada por el primer actuador se representa por  $F_c(n_c \cdot \theta)$
- 40 una fuerza generada por el segundo actuador se representa por  $F_c(n_c \cdot \theta + \Delta)$
- en donde  $\theta$  es un ángulo de rotación del vástago,  $n_c$  es un entero par que representa un número de ciclos de los primero y segundo perfiles después de una rotación completa del vástago,  $\Delta$  es un cambio de fase entre los primero y segundo perfiles, y
- 45 en donde  $F_c(n_c \cdot \theta) \cdot \Psi(n_c \cdot \theta) + F_c(n_c \cdot \theta + \Delta) \cdot \Psi(n_c \cdot \theta + \Delta)$  es una función constante de  $\theta$ .

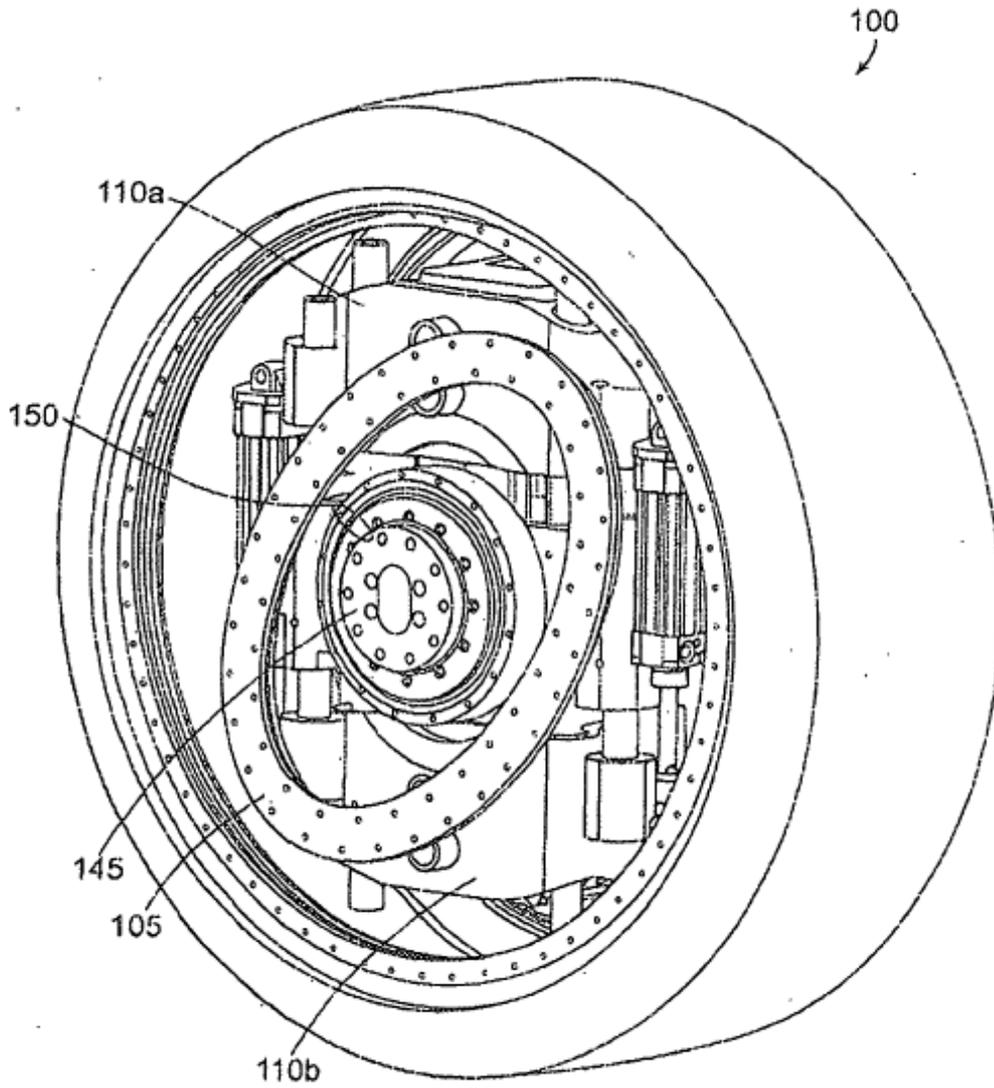


FIG. 1A

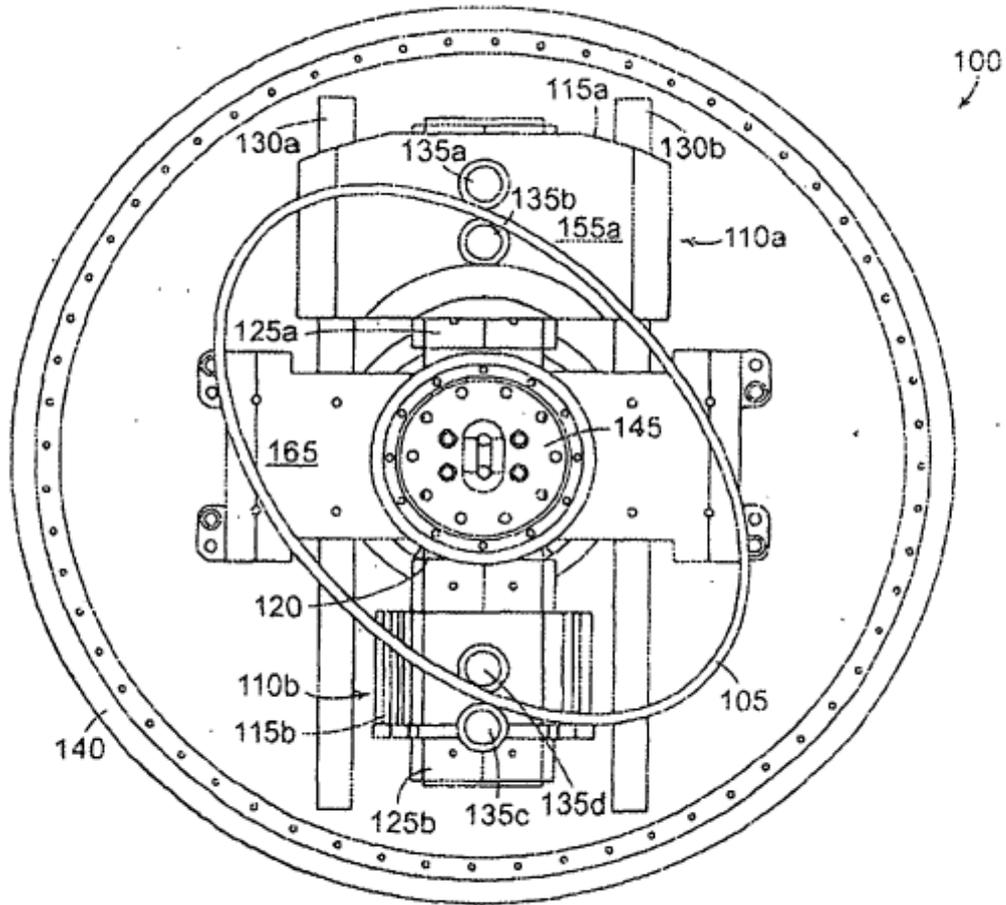


FIG. 1B

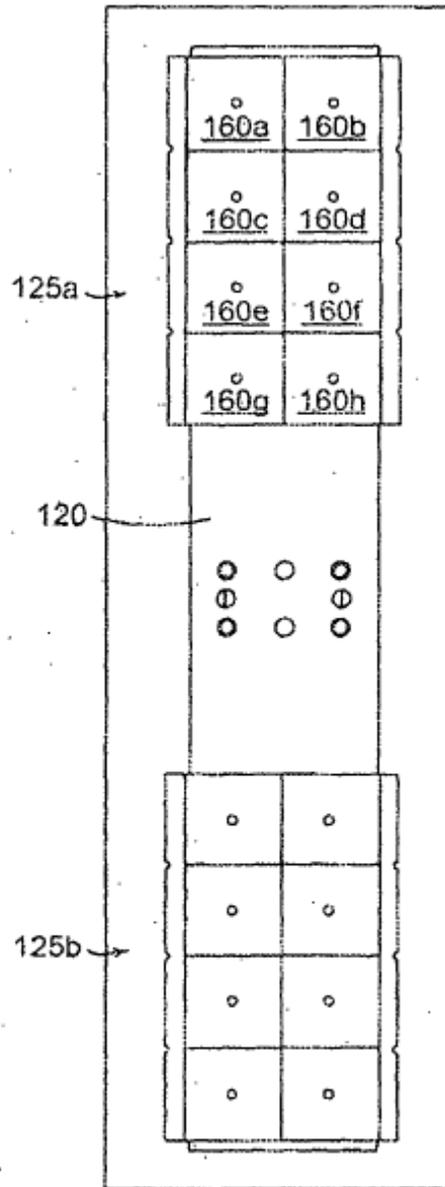


FIG. 1C

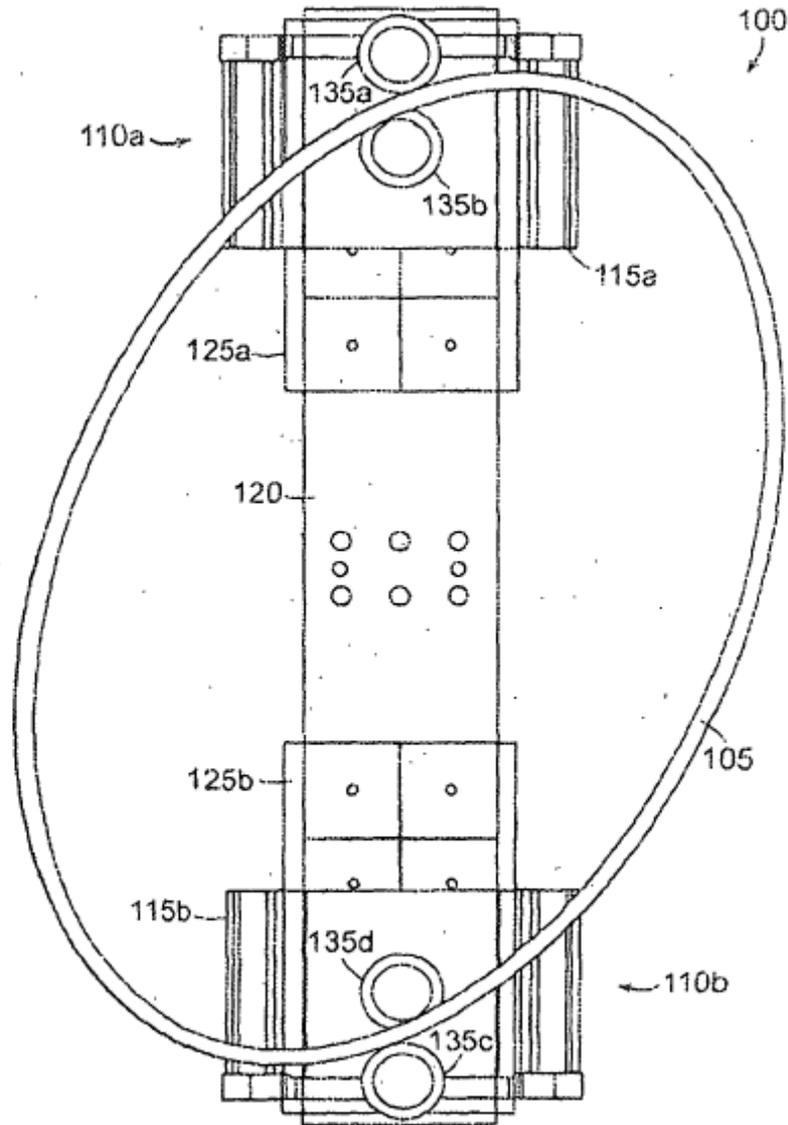


FIG. 2 A

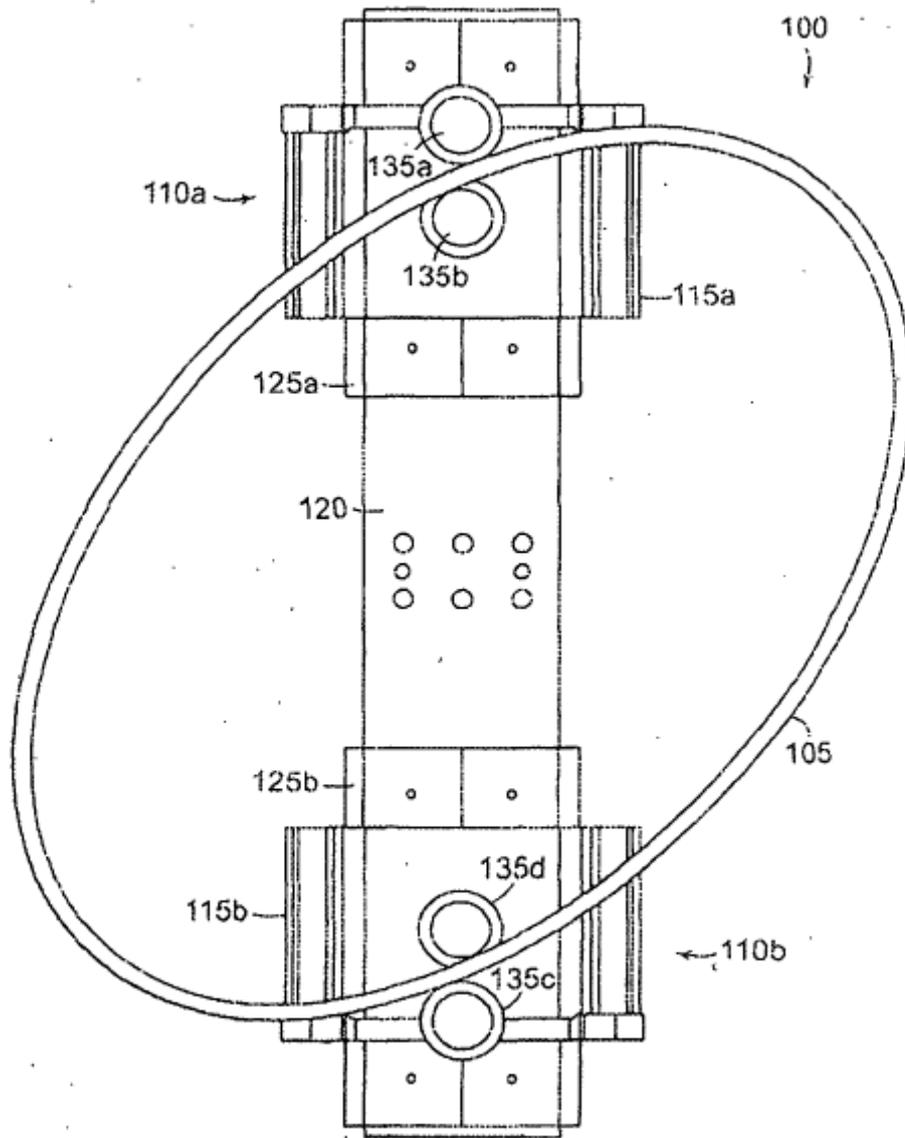


FIG. 2 B

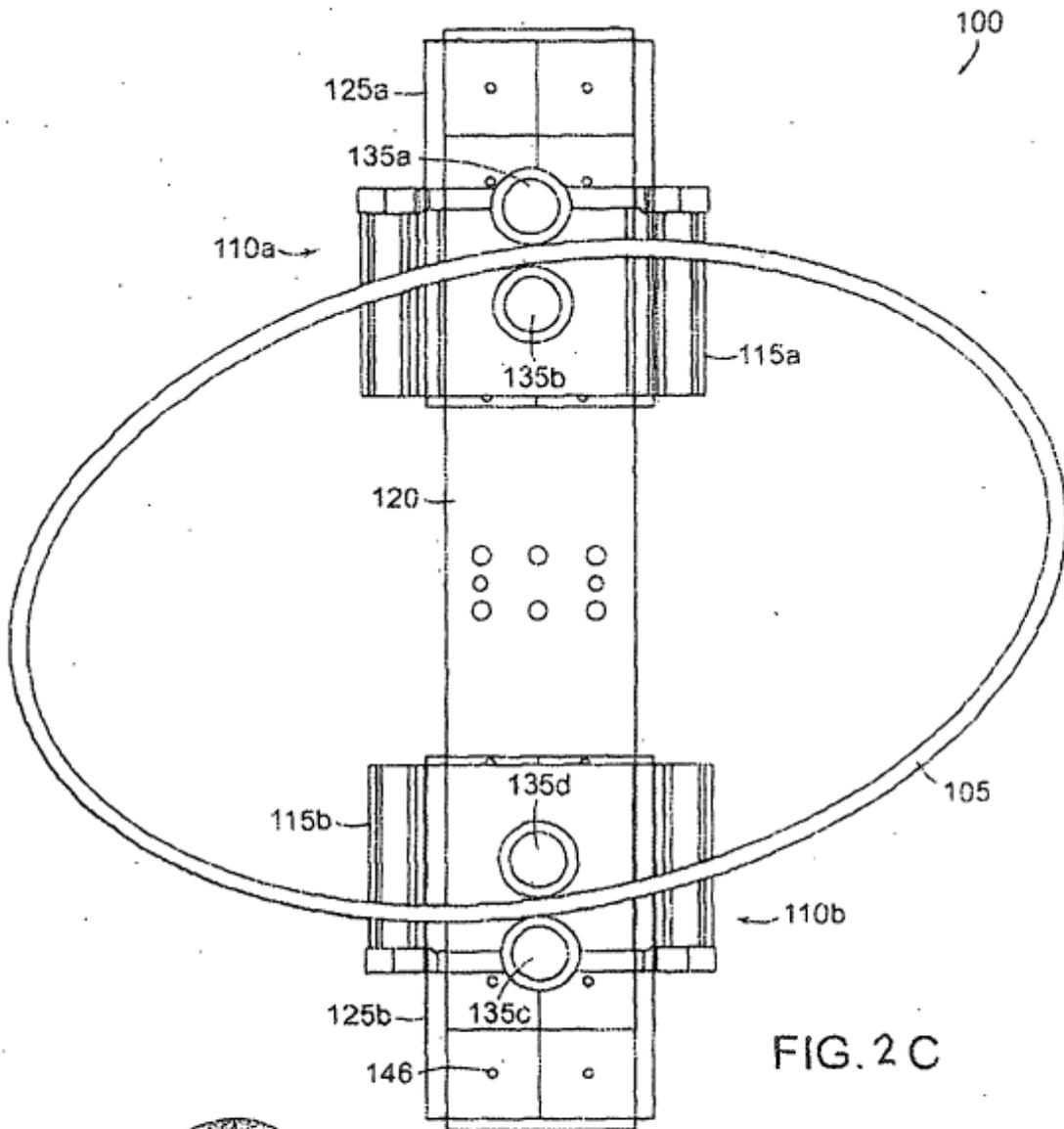


FIG. 2 C

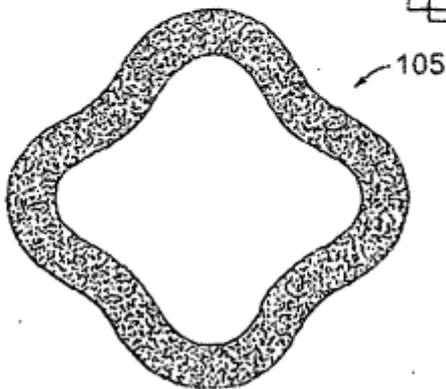


FIG. 2 D

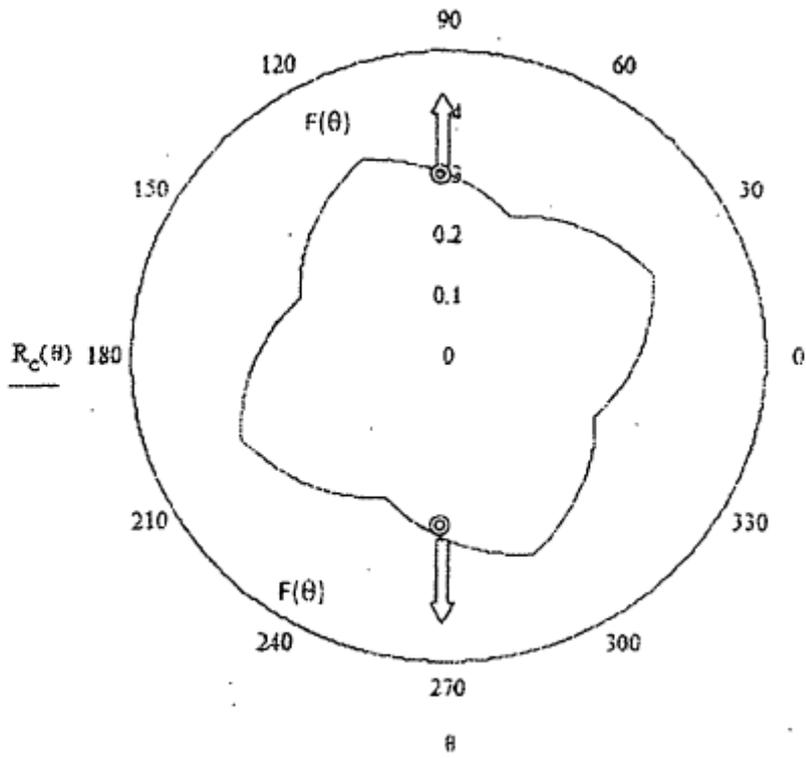


FIG. 3

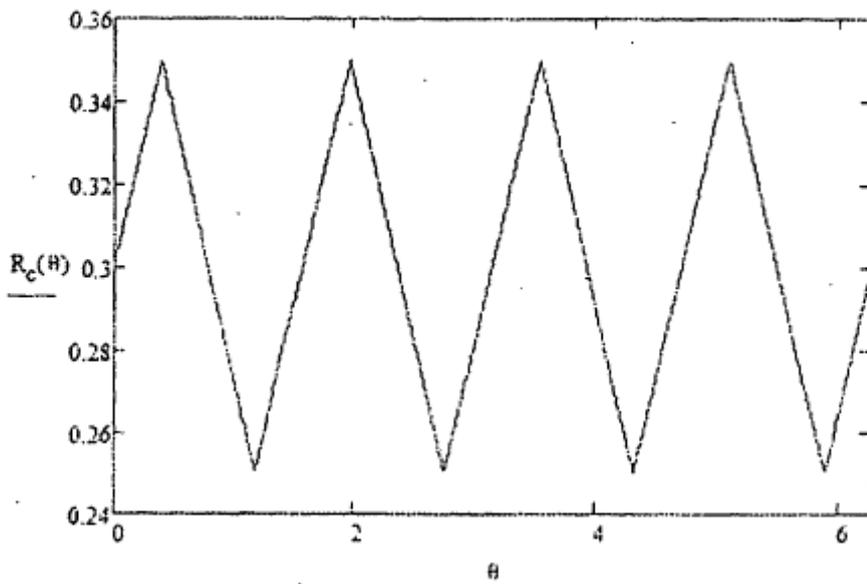


FIG. 4

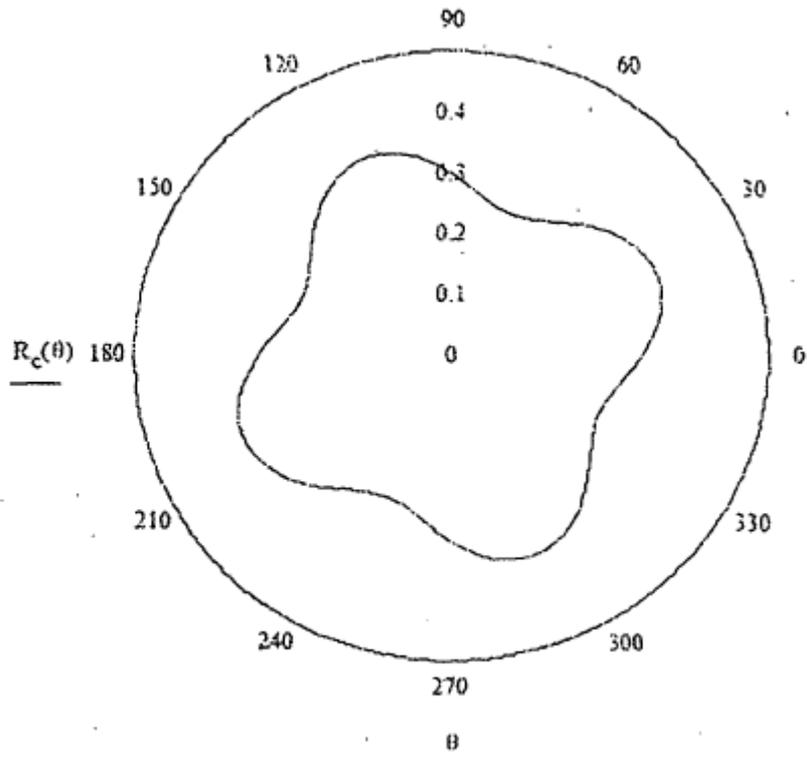


FIG. 5

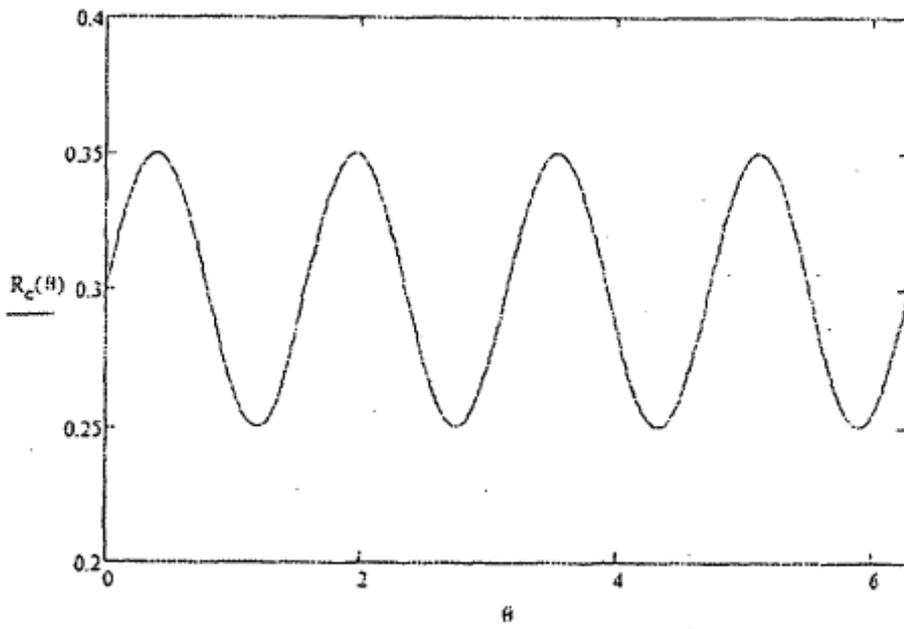


FIG. 6

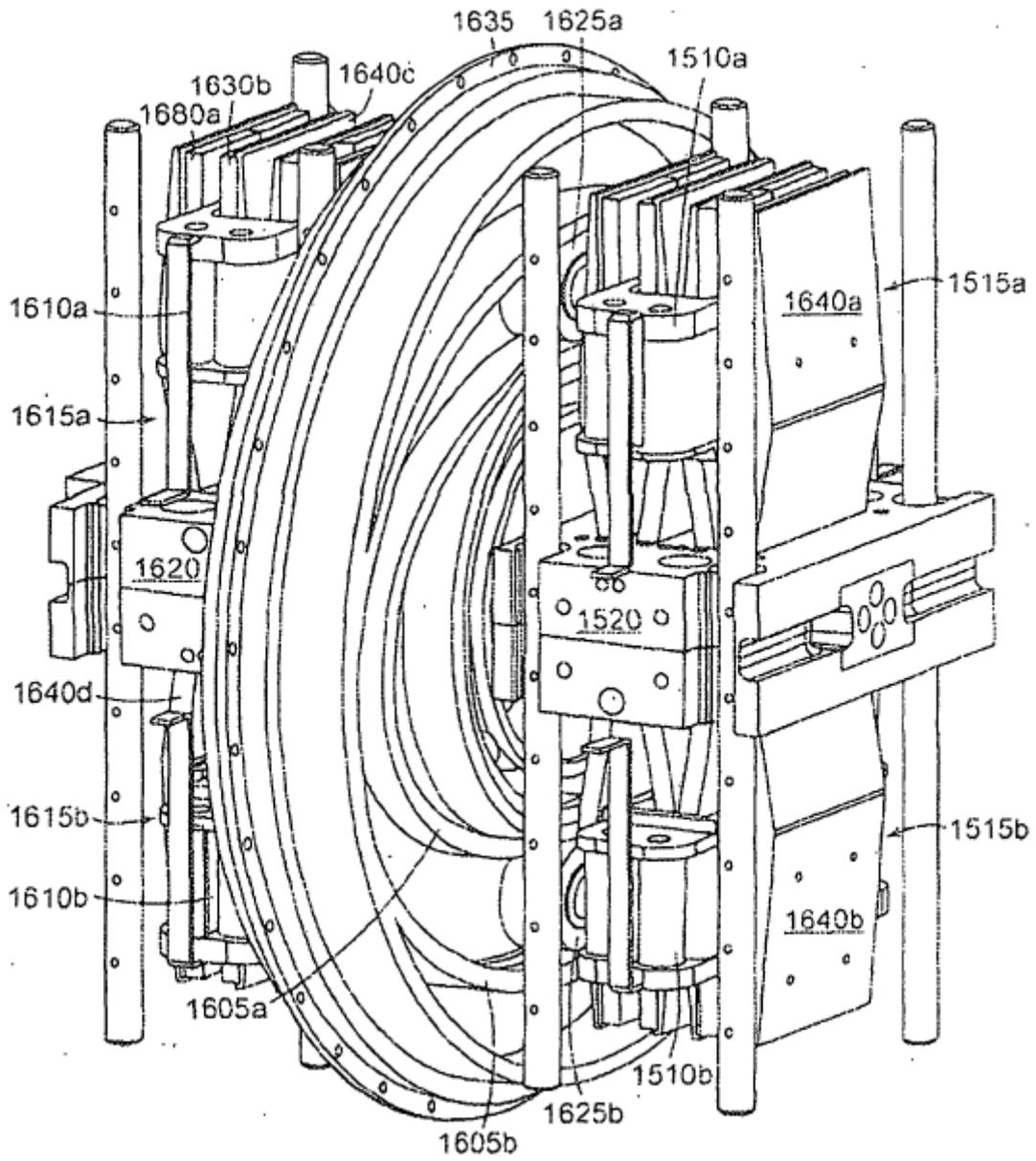


FIG. 7A

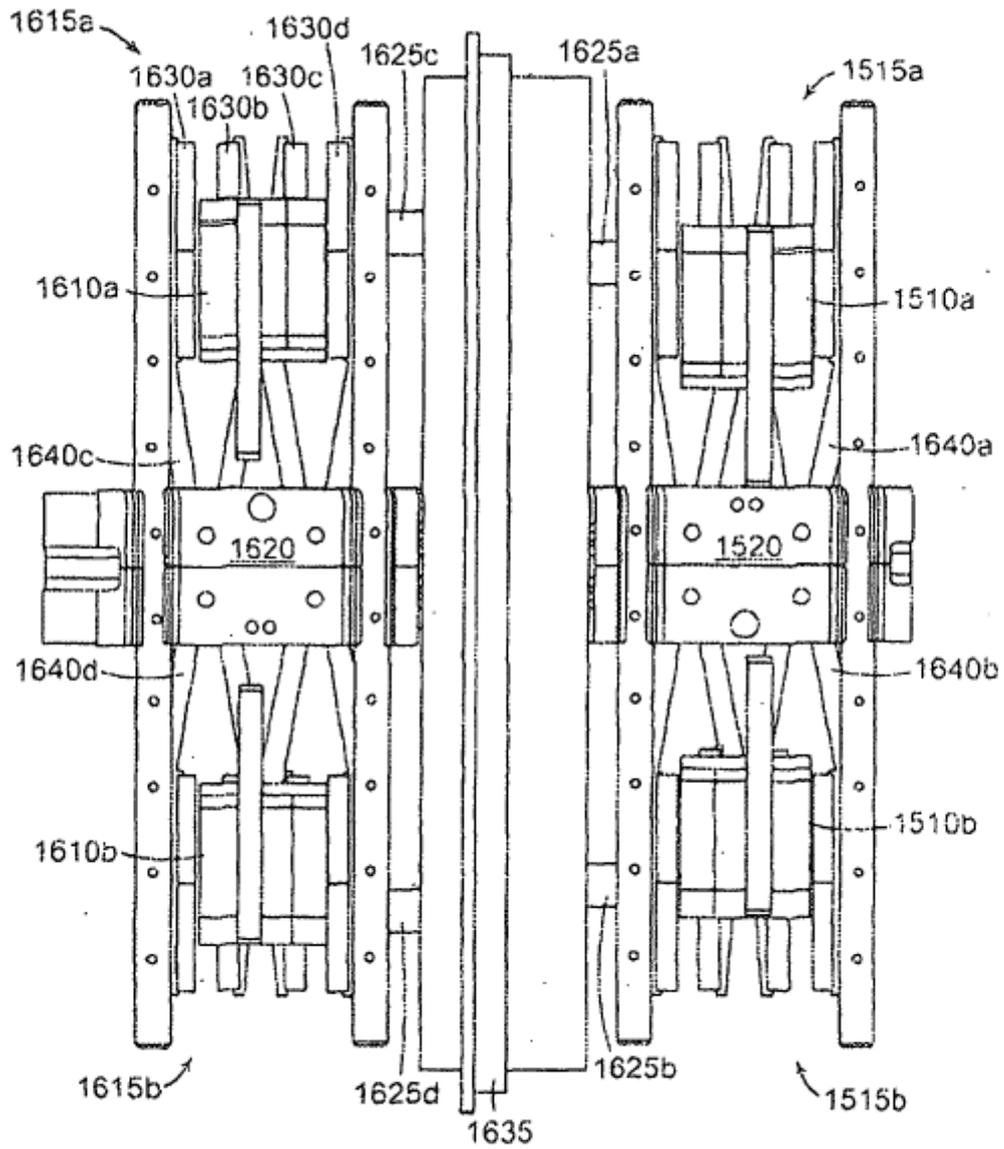


FIG. 7.B

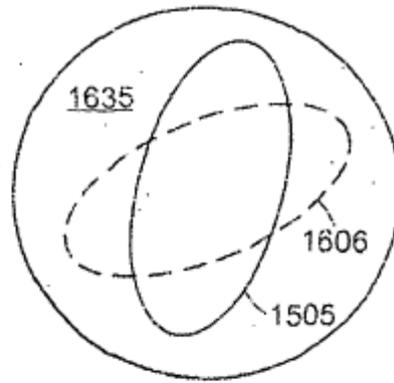


FIG. 8A

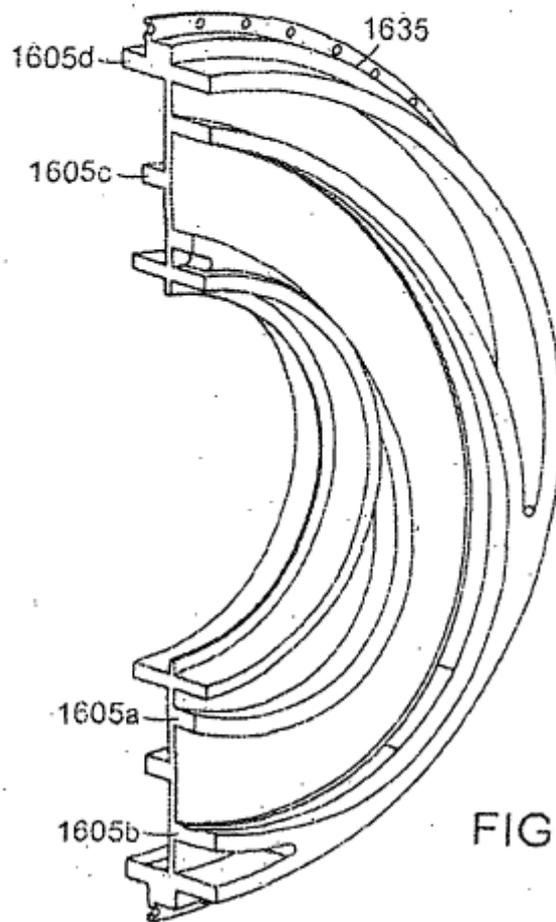


FIG. 8B

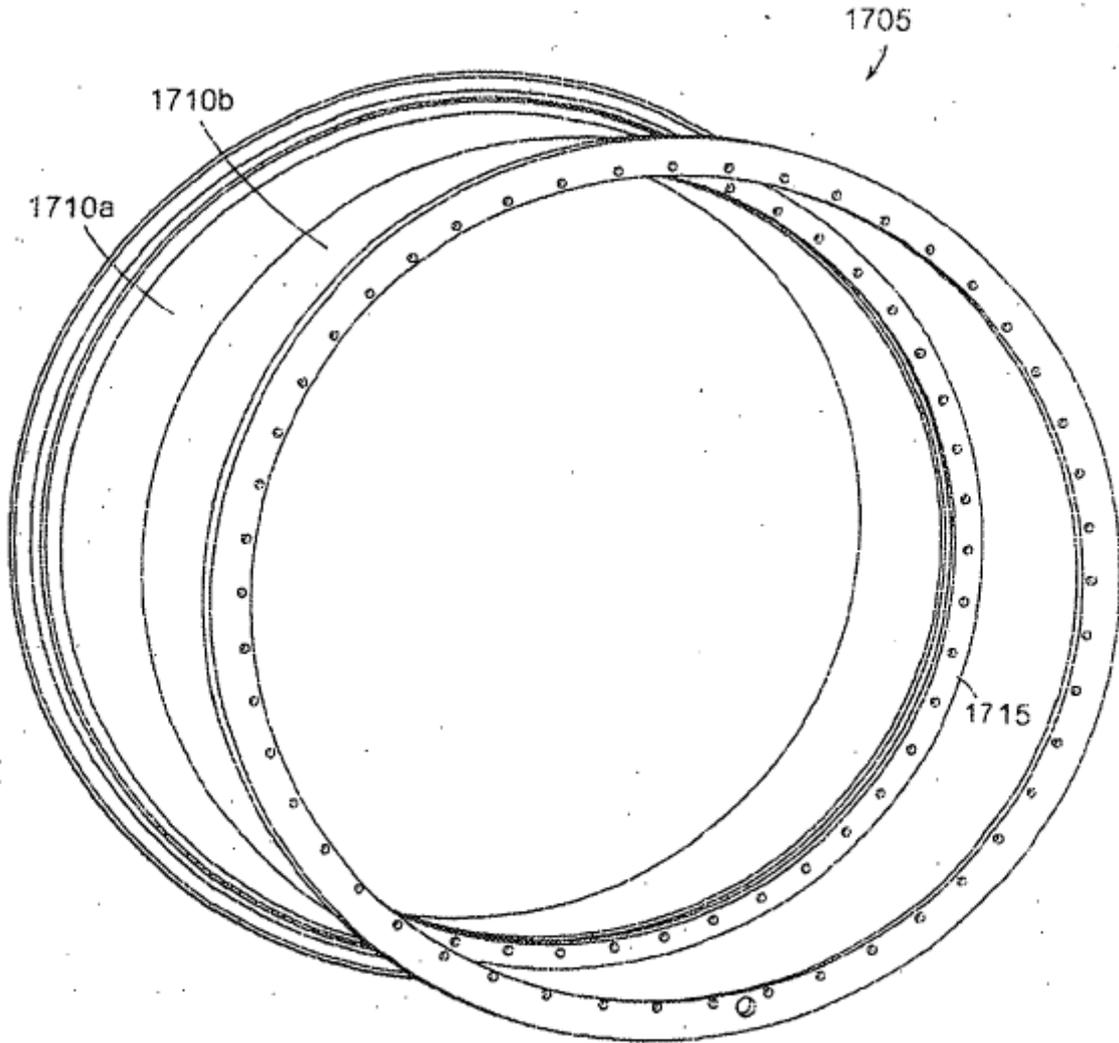


FIG. 9 A

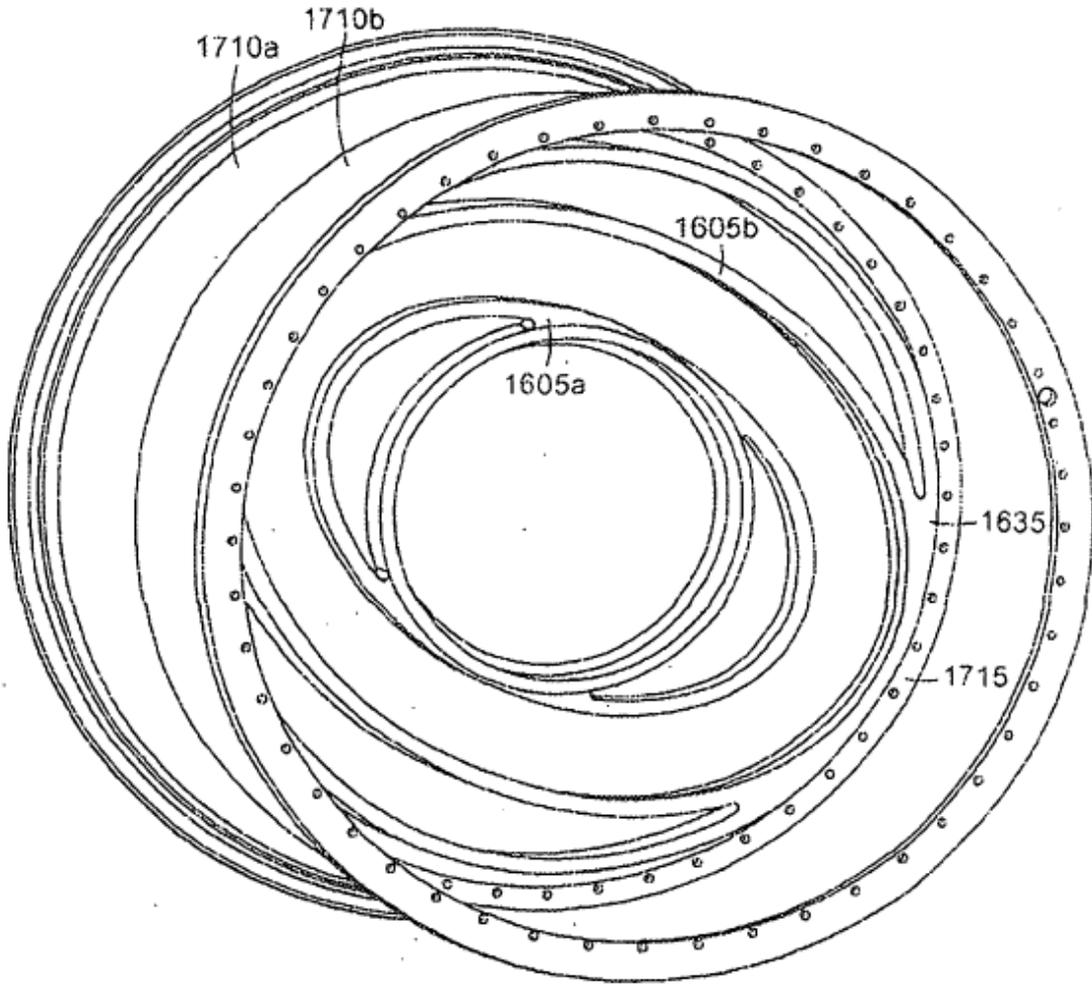


FIG. 9B

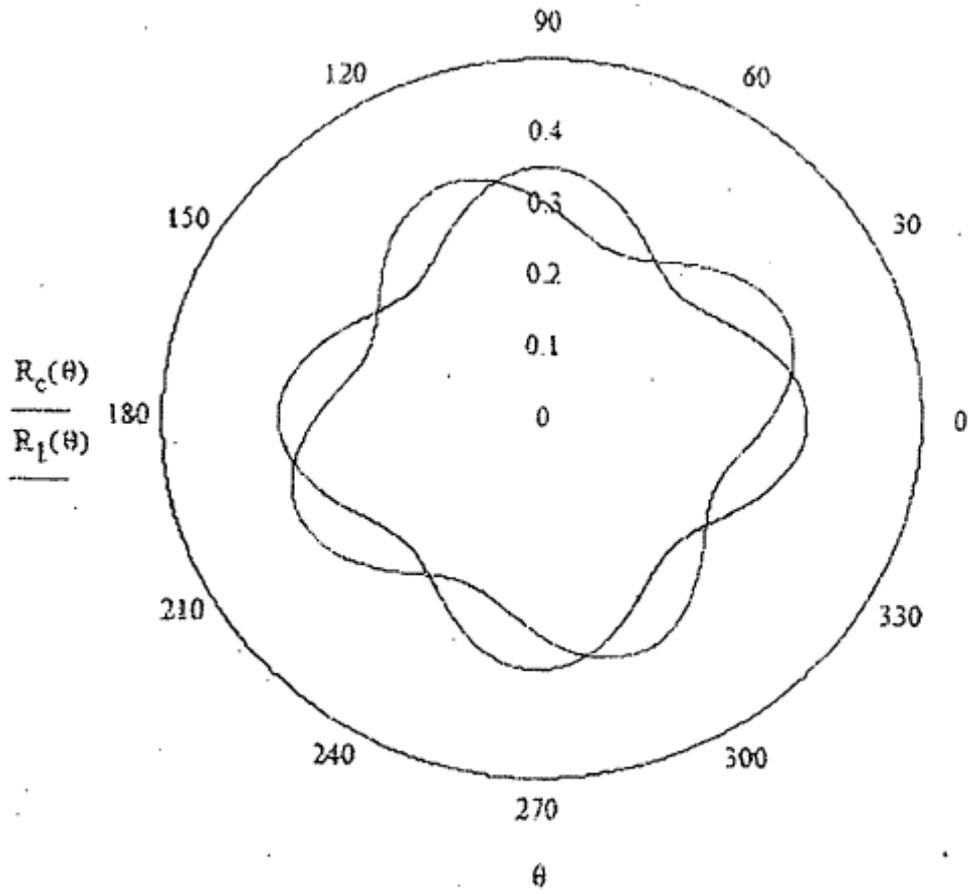


FIG. 10

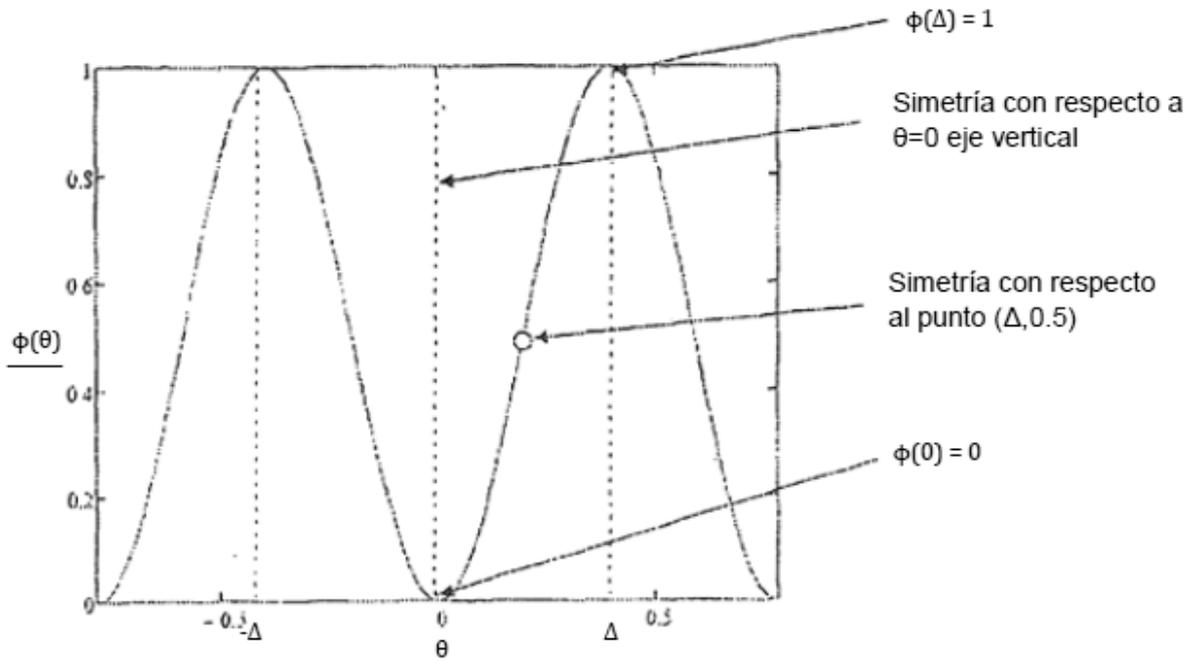


FIG. 11

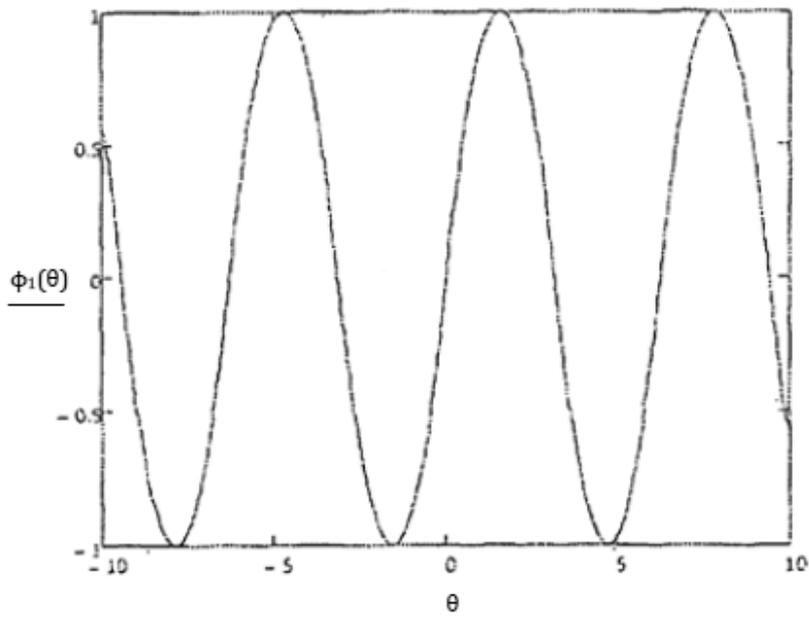


FIG. 12

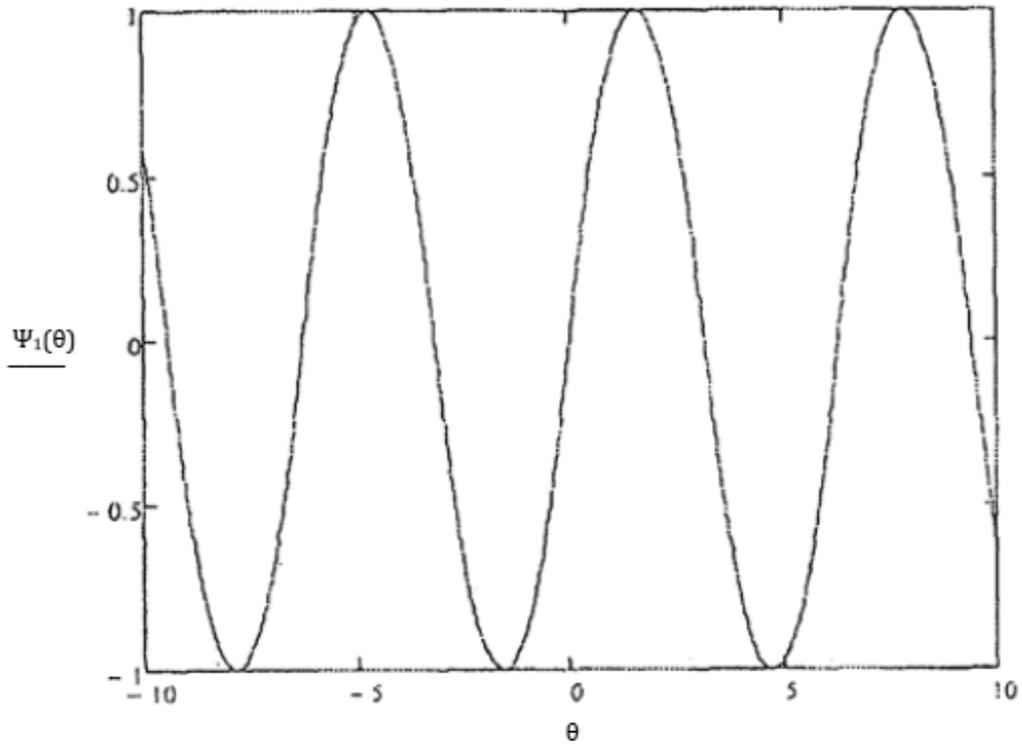


FIG. 13

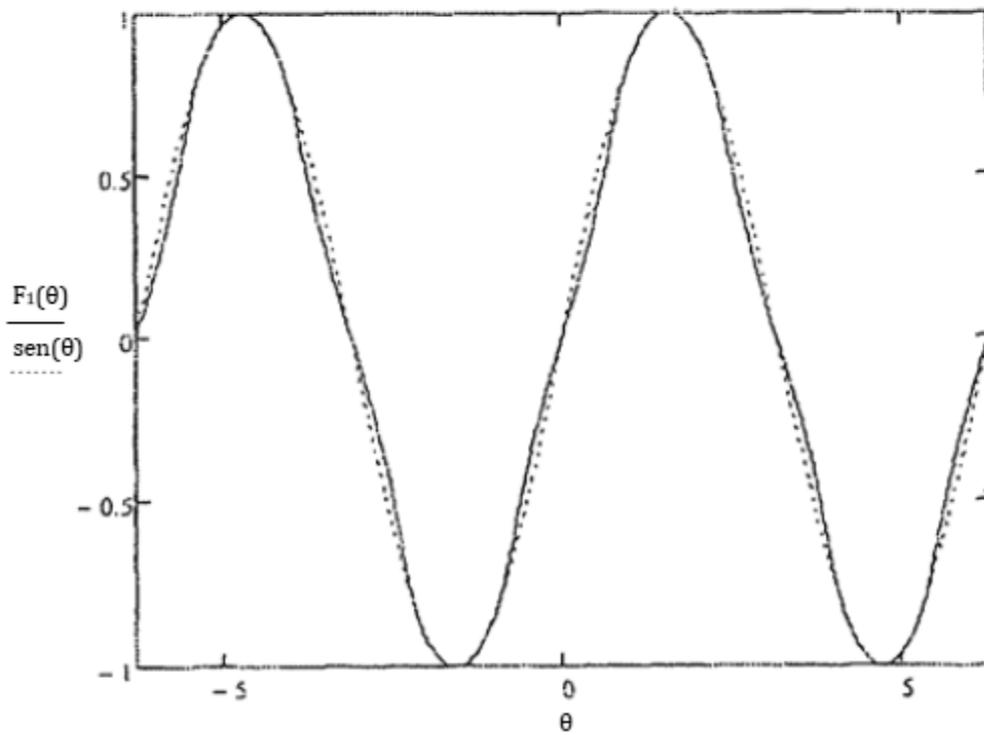


FIG. 14

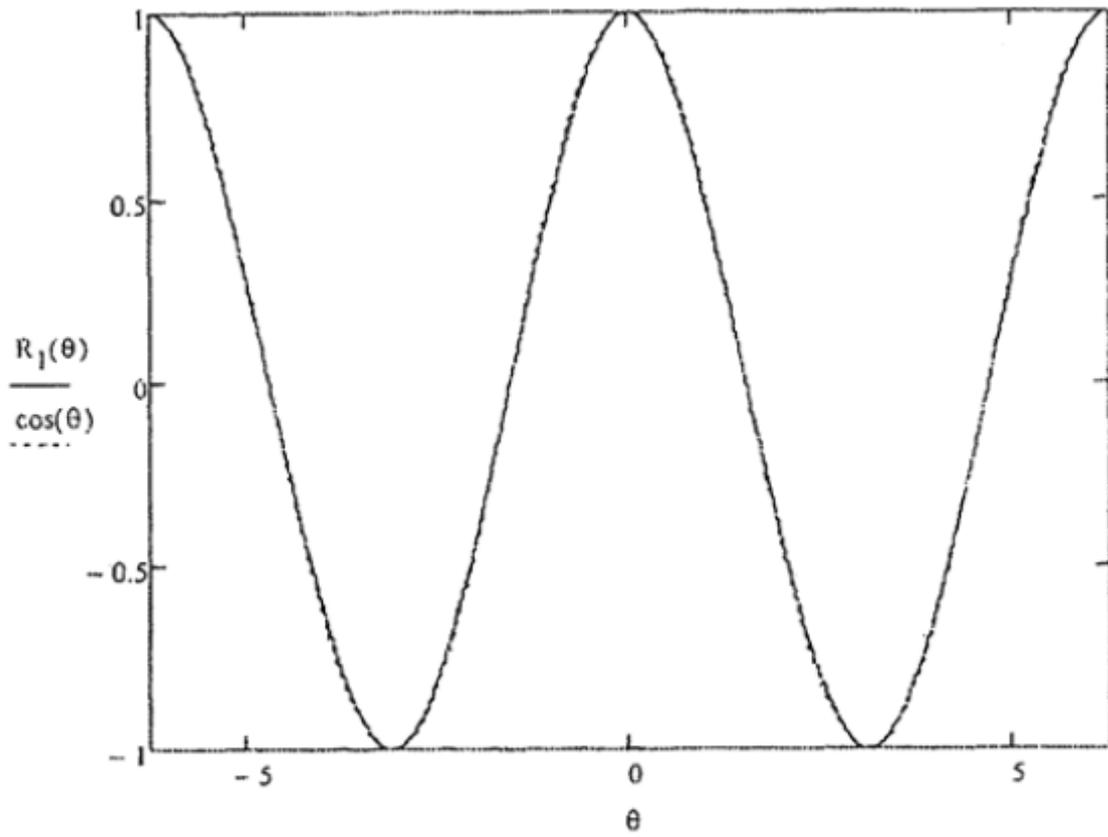


FIG. 15



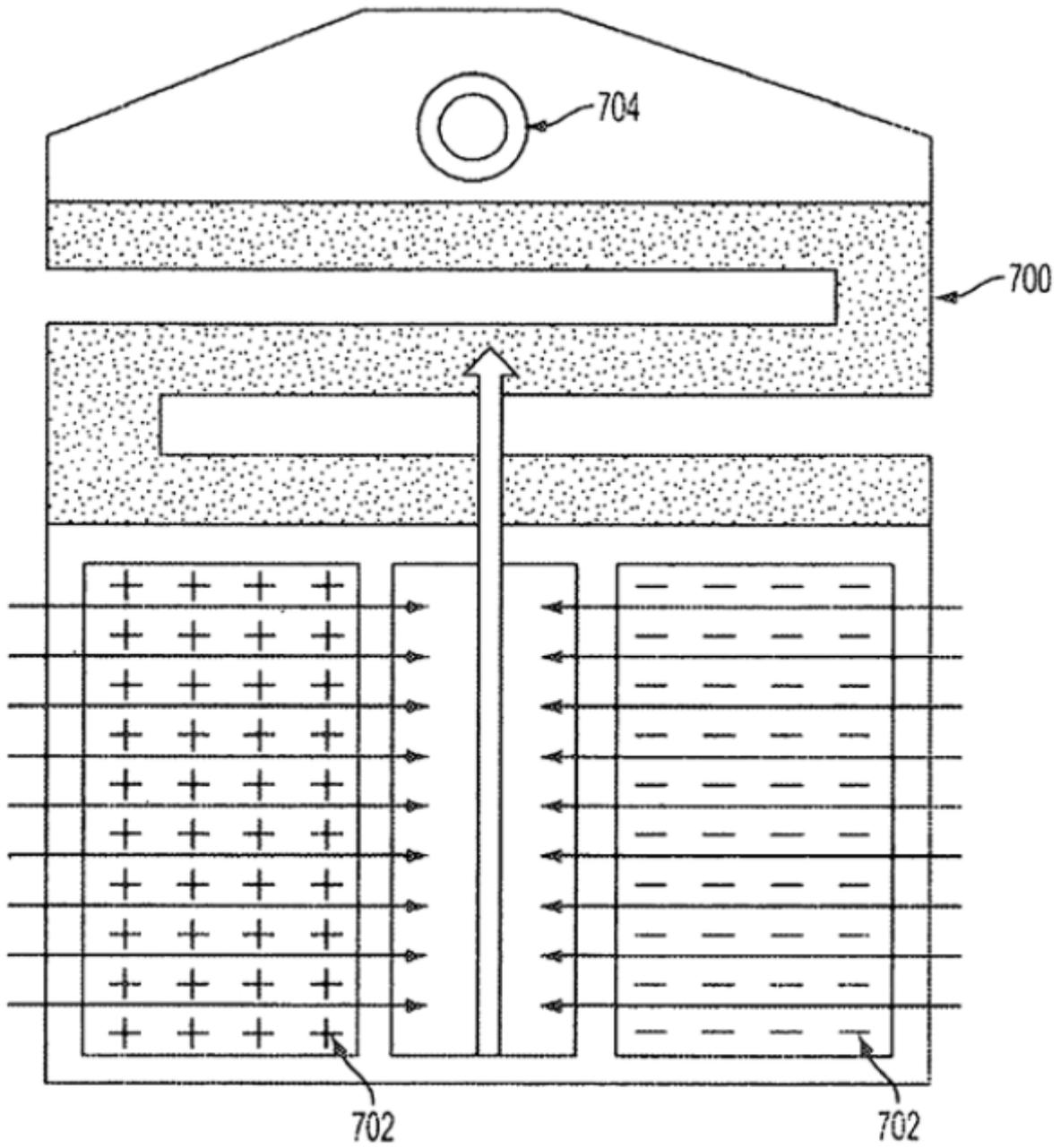


FIG. 17

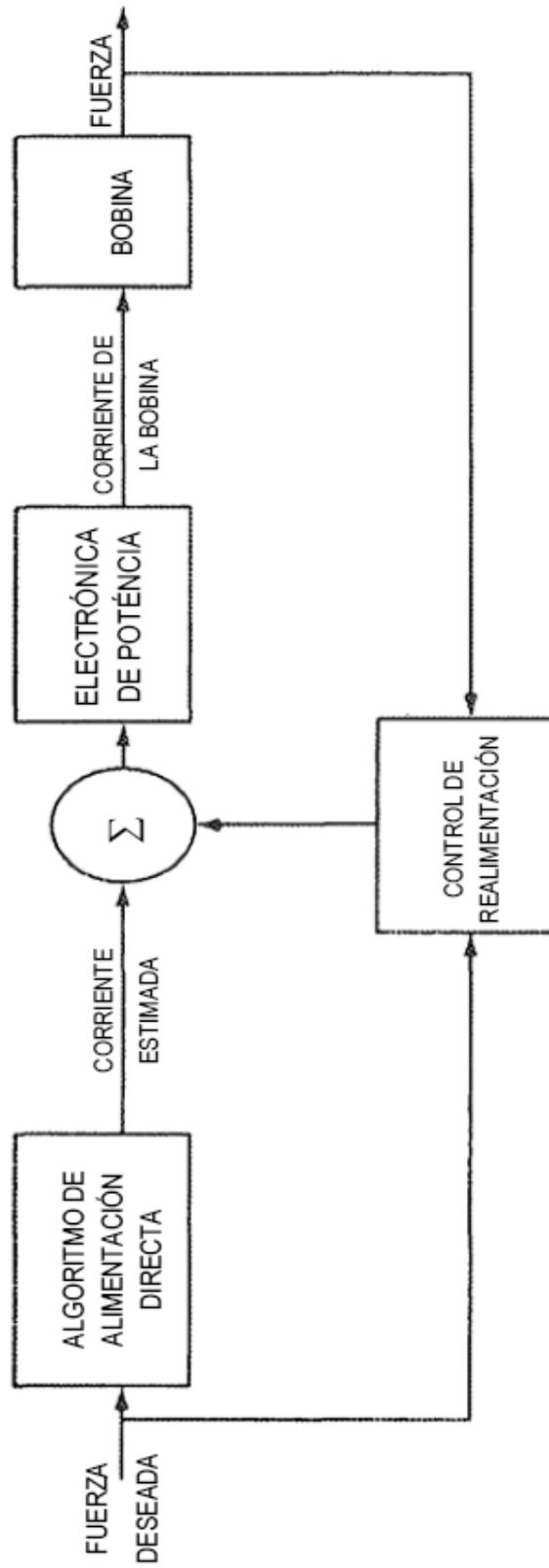


FIG. 18