



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 53 101 A1** 2005.06.23

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 53 101.7**
(22) Anmeldetag: **12.11.2003**
(43) Offenlegungstag: **23.06.2005**

(51) Int Cl.⁷: **F16C 32/04**

(71) Anmelder:
Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, DE

(74) Vertreter:
Ilberg, Roland, Dipl.-Ing.; Weißfloh, Ingo, Dipl.-Ing. (FH) Patentanwälte, 01328 Dresden

(72) Erfinder:
Rudolph, Joachim, Dr.-Ing., 01069 Dresden, DE;
Eckhardt, Stephan, Dipl.-Ing., 01445 Radebeul, DE

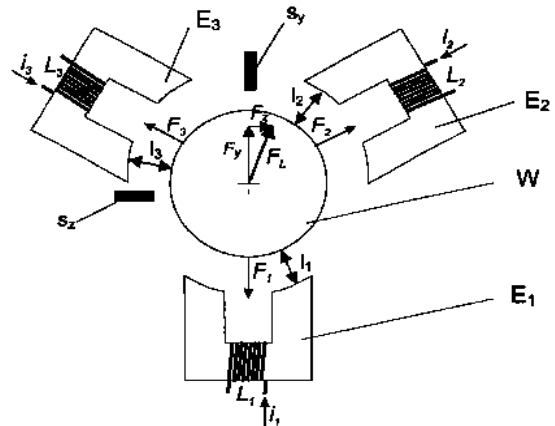
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
DE 26 44 380 C2
DE 100 34 017 A1
DE 100 23 973 A1
DE 100 19 761 A1
DE 42 27 015 A1
DE 695 03 613 T2
EP 09 89 315 A1
EP 09 74 763 A1
WO 97/07 341 A1
WO 97/07 340 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Regelung dreiphasiger elektromagnetischer Lager**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur Regelung dreiphasiger elektromagnetischer Lager, bei denen die Lagerwicklungen der Elektromagnete in Sternschaltung geschaltet sind, eine Positionsauslenkung des zu lagern- den ferromagnetischen Teils erfasst wird und eine dreipha- sige Strom-Regelungseinrichtung die Wicklungsströme so berechnet, dass diese eine geforderte magnetische Kraft erzeugen, die auf das ferromagnetische Teil wirkt, werden bei der Berechnung der Wicklungsströme (i_1 , i_2 , i_3) in den Lagerwicklungen (L_1 , L_2 , L_3) der Elektromagnete (E_1 , E_2 , E_3) die Lage des zu lagern- den ferromagnetischen Teils (W) im Lager und/oder weitere Größen berücksichtigt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung dreiphasiger elektromagnetischer Lager, bei denen die Lagerwicklungen in Sternschaltung geschaltet sind.

[0002] Eine elektromagnetische Lagerung stellt eine zu den herkömmlich benutzten Lagern alternative Möglichkeit dar, bewegliche ferromagnetische Maschinenteile zu lagern. Wesentliche Eigenschaft der Magnetlagerung ist die Berührungsfreiheit zwischen einem gelagerten ferromagnetischen Teil und dem Lager. Die benötigten Lagerkräfte werden durch ein geeignetes magnetisches Feld erzeugt. Damit ist ein Magnetlager verschleißfrei und benötigt keinerlei Schmiermittel.

[0003] Grundsätzlich unterscheidet man zwischen passiven und aktiven Magnetlagern. Bei passiven Magnetlagern benutzt man Dauermagnete. Bei aktiven Magnetlagern wird ein veränderliches Magnetfeld mit Hilfe von Elektromagneten erzeugt. Durch Veränderung des Stromes in den Wicklungen der Elektromagnete kann das Magnetfeld und damit die Lagerkraft verändert werden. Dazu ist eine Regelung notwendig, die dafür sorgt, dass die augenblicklich benötigte Lagerkraft auch tatsächlich erzeugt wird.

[0004] Aus DE 100 19 761 A1 ist ein magnetisches Radiallager bekannt, bei dem drei Wicklungen in Stern- oder Dreieckschaltung angeordnet sind, die von einer dreiphasigen Strom-Steuereinrichtung versorgt werden. Durch diese Anordnung wird die Anzahl der Phasen des gesteuerten Stromes auf drei begrenzt. Außerdem verringern sich gegenüber herkömmlichen Konstruktionen die Anzahl der Leistungstransistoren für die Steuerung des Stromes und die Kosten der Steuervorrichtung für den Strom entsprechend.

[0005] Die DE 100 34 017 A1 gibt eine Steuerung für ein Magnetlager gemäß der vorgenannten Druckschrift DE 100 19 761 A1 an. Ein Magnetlager ist mit Sensoren zum Erfassen einer Positionsauslenkung der Welle in zwei zueinander rechtwinkligen Richtungen versehen. Eine Dreiphasenstrom-Steuerschaltung steuert die Ströme der drei in Stern- oder Dreieckschaltung angeordneten Wicklungen so, dass diese eine magnetische Kraft zum Kompensieren der Positionsauslenkung der Welle quer zu ihrer Längsachse erzeugen. Die von den Sensoren erlangten Informationen werden dazu benutzt, die Wicklungsströme zu berechnen, die die erforderliche Kraft für die Lageregelung erzeugen können. Die Berechnung der Wicklungsströme erfolgt insofern ohne Berücksichtigung der Position der Welle im Lager, als die Komponenten der Kraft in der jeweiligen Lagerrichtung proportional zu den zugehörigen Stromquadraten sind. Das hat zur Folge, dass bei einer von der Mitte abweichenden Position der Welle durch das Magnetlager von der Vorgabe abweichende Kräfte erzeugt werden. Die Proportionalitätskonstante ist bei der angegebenen Steuerung unabhängig von der Lage der Welle im Lager. Das kann zu erheblichen Genauigkeitsverlusten der Lageregelung und zu Instabilität führen. Insbesondere ist ausgehend von einer Ruhelage der Welle in einem mechanischen Fanglager infolge unbestromter Wicklungen eine automatische Selbstzentrierung der Welle bei Bestromung der Wicklungen nicht zu gewährleisten. Ferner ist es nicht möglich, die Welle gezielt unrund um ihre Mittenlage zu führen, beispielsweise um unrunde Bohrungen in ein Werkstück einzubringen.

[0006] Objekt der Erfindung ist ein dreiphasiges elektromagnetisches Lager, bei dem die Lagerwicklungen in Sternschaltung geschaltet sind. Mit einer derartigen Anordnung kann gegenüber einem Lager mit drei unabhängigen Phasen ein Leistungsverstärker pro Lager eingespart werden bzw. es kann die Ansteuerung des dreiphasigen Magnetlagers kostengünstig durch einen Zwischenkreisumrichter erfolgen.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Regelung dreiphasiger elektromagnetischer Lager mit in Stern geschalteten Lagerwicklungen zu finden, bei dem die Welle auf eine sehr stabile und genaue Lage geregelt werden kann, oder alternativ eine solche Regelung, bei der die Welle einer vorgegebenen Bahn folgt. Auf eine Vormagnetisierung durch ein stationäres magnetisches Grundfeld soll verzichtet werden können.

[0008] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0009] Die aktuelle Lage des zu lagernden Teils wird in bekannter Weise von Positionssensoren erfasst oder durch geeignete Algorithmen aus anderen gemessenen Größen rekonstruiert. Ein Lageregler gibt die gewünschte Lagerkraft vor. Bei der Berechnung der Lagerkraft werden die Längen der Luftspalte im Magnetlager, die sich aus der aktuellen Position des gelagerten Teils ergeben, sowie ggf. weitere Größen, wie der magnetische Fluss, berücksichtigt. Die Wicklungsströme werden dann ebenfalls unter Berücksichtigung der aktuellen Lage des gelagerten Teils so berechnet, dass die durch die Regelung geforderte Kraft bei beliebiger Position des gelagerten Teils auch tatsächlich eingestellt wird. Das Verfahren ermöglicht somit eine derartige Vorgabe

der Wicklungsströme, dass eine resultierende Lagerkraft unabhängig von der Position des gelagerten Teils eingestellt werden kann. Der Vorteil ist zum einen, dass keine Probleme beim Startvorgang, keine Probleme hinsichtlich der Stabilisierung durch die Lageregelung und keine Genauigkeitsverluste während des Betriebs auftreten, und zum anderen, dass das gelagerte Teil gezielt eine vorgegebene exzentrische oder zentrische Bahn beschreiben kann. Es ist keine Vormagnetisierung für den Betrieb erforderlich.

[0010] Den Magnetkräften kann nach einer Ausprägung der Erfindung eine in alle drei Richtungen gleichgroße veränderliche „Grundkraft“ überlagert werden, ohne dass die erforderliche resultierende Lagerkraft beeinflusst wird. Diese „Grundkraft“ wird bei der Berechnung der Wicklungsströme stets so gewählt, dass die durch die Sternschaltung vorgegebene Bedingung: „Summe aller drei Wicklungsströme gleich Null“ erfüllt ist.

[0011] Die Erfindung soll anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert werden, bei dem das zu lagernde Teil eine ferromagnetische Welle ist.

[0012] In den zugehörigen Zeichnungen zeigen:

[0013] Fig. 1 schematisch ein dreiphasiges magnetisches Lager für eine ferromagnetische Welle,

[0014] Fig. 2 schematisch den Aufbau einer magnetischen Lagerung einer ferromagnetischen Welle,

[0015] Fig. 3 das Schema eines Lageregelkreises,

[0016] Fig. 4 ein beispielbezogenes Schema zur Veranschaulichung der Beziehungen zwischen den Kräften und der Lage der gelagerten Welle, und

[0017] Fig. 5 die Sternschaltung der Lagerwicklungen.

[0018] Fig. 1 zeigt eine Prinzipdarstellung eines dreiphasigen magnetischen Lagers. Es besteht aus drei Elektromagneten E_1, E_2, E_3 und einem zu lagernden ferromagnetischen Welle W . Jeder Magnetwicklung L_1, L_2, L_3 wird ein Strom i_1, i_2, i_3 zugeführt, wodurch die so erregten Elektromagnete E_1, E_2, E_3 das gelagerte ferromagnetische Teil W anziehende, elektromagnetische Kräfte F_1, F_2, F_3 erzeugen. Die resultierende Lagerkraft $F_L = F_y + F_z$ ergibt sich aus der Summe der Magnetkraftvektoren F_1, F_2 und F_3 . Mindestens zwei Sensoren S_y, S_z erfassen die Länge der Luftspalte $1_1, 1_2, 1_3$ und damit die Ist-Position der ferromagnetischen Welle W und übergeben diese an eine hier nicht dargestellte Regelungsschaltung, die die ferromagnetische Welle W durch Veränderung der Erregerströme i_1, i_2, i_3 in eine gewünschte Position bringt.

[0019] Dreiphasige Magnetlager können in einer Vielzahl von Konstruktionsformen ausgeführt werden. Beispielsweise kann die Anzahl der Lagerschenkel variieren und die drei Lagerwicklungen können auf unterschiedliche Weise auf die Lagerschenkel verteilt werden. Außerdem können die zu einem Elektromagnet gehörenden Lagerschenkel in Längsrichtung einer zu lagernden Welle angeordnet werden.

[0020] In einer bevorzugten Anwendung gemäß Fig. 2 besitzt die ferromagnetische Welle W ein vorderes und ein hinteres Radiallager, mit denen Kräfte F_1 bis F_3 (vorn) und F'_1 bis F'_3 (hinten) in Querrichtung (y, z) zur Welle W erzeugt werden können. Die in den Lagerebenen in Richtung der Koordinaten y, z wirkenden, resultierenden Lagerkräfte sind mit F_y, F_z bzw. F'_y, F'_z bezeichnet. Mit Hilfe eines Axiallagers lässt sich zusätzlich eine Kraft F_x in Längsrichtung x der Welle W erzeugen, die die Welle W in Längsrichtung positioniert. Optional kann ferner ein nicht dargestellter Motor eingebaut sein, der es ermöglicht, die Welle W mit einem Drehmoment D_w anzutreiben.

[0021] Fig. 3 zeigt das Schema einer Regelung. Positionssensoren S_y, S_z erfassen die Ist-Lage der Welle W in der Lagerebene ($y - z$). Ein Lageregler 1 ermittelt aus dem Vergleich zwischen der gemessenen Ist-Position (Y_{ist}, Z_{ist}) und einer Sollposition (Y_{soll}, Z_{soll}) die Soll-Lagerkraft F_{Lsoll} so, dass die Welle W in Richtung der vorgegebenen Position bewegt wird und damit einer vorgegebenen Bahn folgt. Durch einen Kraft-Strom-Wandler 2 können die Soll-Wicklungsströme $i_{1,soll}, i_{2,soll}, i_{3,soll}$ so berechnet werden, dass die vorgegebene Lagerkraft F_{Lsoll} eingestellt wird. Ein Stromregler 3 stellt die Stromstärken i_1, i_2, i_3 in den in Stern geschalteten Lagerwicklungen L_1, L_2, L_3 ein.

[0022] Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die Soll-Wicklungsströme $i_{1,soll}, i_{2,soll}, i_{3,soll}$ trotz Sternverschaltung der Lagerwicklungen L_1, L_2, L_3 (siehe Fig. 5) des Magnetlagers und ohne Vormagnetisierung so vorzugeben, dass unabhängig von der Position der Welle W eine gewünschte resultierende Lagerkraft eingestellt

wird.

[0023] Das Modell für die Kräfte im Magnetlager lässt sich mit Bezug auf **Fig. 4** in Richtung jedes einzelnen Elektromagneten E_1 , E_2 , E_3 wie folgt beschreiben:

$$|F_1| = \lambda \frac{i_1^2}{l_1^2}, \quad |F_2| = \lambda \frac{i_2^2}{l_2^2}, \quad |F_3| = \lambda \frac{i_3^2}{l_3^2} \quad (1)$$

mit:

$|F_1|$ Betrag der Kraft in Richtung des Elektromagneten E_1

$|F_2|$ Betrag der Kraft in Richtung des Elektromagneten E_2

$|F_3|$ Betrag der Kraft in Richtung des Elektromagneten E_3

i_1 Stromstärke in der Wicklung L_1 des Elektromagneten E_1

i_2 Stromstärke in der Wicklung L_2 des Elektromagneten E_2

i_3 Stromstärke in der Wicklung L_3 des Elektromagneten E_3

l_1 Luftspalt am Magneten E_1 durch Auslenkung des Teils W

l_2 Luftspalt am Magneten E_2 durch Auslenkung des Teils W

l_3 Luftspalt am Magneten E_3 durch Auslenkung der Teils W

λ Proportionalitätsfaktor

[0024] Die in jeder Lagerebene resultierende Lagerkraft für die ferromagnetische Welle W ergibt sich aus

$$F_y = |F_1| \sin \alpha_1 + |F_2| \sin \alpha_2 + |F_3| \sin \alpha_3 \quad (2)$$

$$F_z = |F_1| \cos \alpha_1 + |F_2| \cos \alpha_2 + |F_3| \cos \alpha_3 \quad (3)$$

mit

F_y Betrag der Lagerkraft in y – Richtung

F_z Betrag der Lagerkraft in z – Richtung

α_1 Winkel des Elektromagneten E_1 gegenüber der z – Achse

α_2 Winkel des Elektromagneten E_2 gegenüber der z – Achse

α_3 Winkel des Elektromagneten E_3 gegenüber der z – Achse, wobei

$\alpha_1=90^\circ$, $\alpha_2=210^\circ$, $\alpha_3=330^\circ$

[0025] Die resultierende Lagerkraft F_L , d.h. die vektorielle Summe von F_y und F_z , wird durch den Lageregler 1 (**Fig. 3**) vorgegeben.

[0026] Die Sternschaltung der Lagerwicklungen L_1 , L_2 , L_3 erfordert für die Wicklungsströme

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0. \quad (4)$$

[0027] Zu den Beträgen jeder der Magnetkräfte F_1 , F_2 , F_3 kann ein zusätzlicher, veränderlicher Kraftbetrag $|F_0|$ addiert werden, ohne die resultierende Lagerkraft F_L zu beeinflussen. Der Betrag $|F_0|$ der zusätzlichen Magnetkraft wird so gewählt, dass die durch die Sternschaltung bestehende Kirchhoffsche Bedingung (Gleichung 4) erfüllt ist:

$$|F_0| = -p/2 \pm \sqrt{(p/2)^2 - q} \quad (5)$$

mit den Koeffizienten der quadratischen Gleichung

$$p = \frac{2(l_1^2 |F_1| + l_2^2 |F_2| - l_3^2 |F_3|)(l_1^2 + l_2^2 - l_3^2) - 4l_1^2 l_2^2 (|F_1| + |F_2|)}{(l_1^2 + l_2^2 - l_3^2)^2 - 4l_1^2 l_2^2}, \quad (6)$$

$$q = \frac{(l_1^2 |F_1| + l_2^2 |F_2| - l_3^2 |F_3|)^2 - 4l_1^2 l_2^2 |F_1| |F_2|}{(l_1^2 + l_2^2 - l_3^2)^2 - 4l_1^2 l_2^2}. \quad (7)$$

[0028] Daraus ergeben sich die bei einer Sternschaltung geforderten Beträge der Magnetkräfte zu

$$|\tilde{F}_1| = |F_1| + |F_0|, \quad |\tilde{F}_2| = |F_2| + |F_0|, \quad |\tilde{F}_3| = |F_3| + |F_0| \quad (8)$$

und die Beträge der Wicklungsströme zu

$$|i_1| = I_1 \sqrt{|\tilde{F}_1|/\lambda}, \quad |i_2| = I_2 \sqrt{|\tilde{F}_2|/\lambda}, \quad |i_3| = I_3 \sqrt{|\tilde{F}_3|/\lambda}. \quad (9)$$

[0029] Seien die Augenblickswerte der Strombeträge der Größe nach unterschieden. Derjenige Augenblicksstrom, dessen Betrag den kleinsten Wert hat, sei mit $i_{\min}$ bezeichnet, derjenige Augenblicksstrom mit dem mittleren Betrag mit i_{med} und jener mit dem größten Wert mit $i_{\max}$. Dann sind die Ströme so vorzugeben, dass

$$i_{\min} = -\text{sign}(i_{\max}) \cdot |i_{\min}| \text{ und} \quad (10)$$

$$i_{\text{med}} = -\text{sign}(i_{\max}) \cdot |i_{\text{med}}|. \quad (11)$$

[0030] Zusammengefasst können bei dreiphasigen Magnetlagern erfindungsgemäß anziehende Magnetkräfte in drei unterschiedliche Richtungen stromgesteuert erzeugt werden. Um beispielsweise zu einem gegebenen Zeitpunkt eine Lagerkraft F_L zu generieren (vgl. **Fig. 3**), genügt es, die Magnetkräfte F_2 und F_3 geeignet einzustellen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Beträge jeder der Magnetkräfte F_1, F_2, F_3 um einen Kraftbetrag $|F_0|$ zu erhöhen, ohne die aus den Magnetkräften resultierende Lagerkraft F_L zu verändern.

[0031] Die Welle W kann, motorisch angetrieben, endseitig beispielsweise ein spanabhebendes Bearbeitungswerkzeug, wie einen Bohrer oder Fräser, tragen. Dadurch arbeitet das Lager nicht nur verschleißfrei, sondern es lassen sich, entsprechend programmgesteuert, hochgenau unrunde Bohrungen herstellen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung dreiphasiger elektromagnetischer Lager, bei denen die Lagerwicklungen der Elektromagnete in Sternschaltung geschaltet sind, eine Positionsauslenkung des zu lagernden ferromagnetischen Teils erfasst wird, und eine dreiphasige Strom-Regelungseinrichtung die Wicklungsströme so berechnet, dass diese eine geforderte magnetische Kraft erzeugen, die auf das ferromagnetische Teil wirkt, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Berechnung der Wicklungsströme (i_1, i_2, i_3) in den Lagerwicklungen (L_1, L_2, L_3) der Elektromagnete (E_1, E_2, E_3) die Lage des zu lagernden ferromagnetischen Teils (W) im Lager und/oder weitere Größen berücksichtigt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Positionssensoren (S_y, S_z) die aktuelle Lage des ferromagnetischen Teils (W) erfassen, dass ein Lageregler (1) aus dem Vergleich zwischen der gemessenen Position ($(Y_{\text{ist}}, Z_{\text{ist}})$) und einer Sollposition ($(Y_{\text{soll}}, Z_{\text{soll}})$) eine Soll-Lagerkraft ($F_{L,\text{soll}}$) ermittelt, dass ein Kraft-Strom-Wandler (2) abhängig von der gemessenen Position die Soll-Wicklungsströme ($i_{1,\text{soll}}, i_{2,\text{soll}}, i_{3,\text{soll}}$) berechnet, und dass ein Stromregler (3) die Sollstromstärken (i_1, i_2, i_3) in den sterngeschalteten Lagerwicklungen (L_1, L_2, L_3) und damit die Lagerkraft (F_L) für das Lager einstellt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass durch eine definierte Vorgabe der Lagerströme (i_1, i_2, i_3) beliebige resultierende Lagerkräfte (F_L) unabhängig von der Position ($(Y_{\text{ist}}, Z_{\text{ist}})$) des zu lagernden Teils (W) eingestellt werden, indem der Betrag jeder der Magnetkräfte (F_1, F_2, F_3) um einen veränderlichen Kraftbetrag ($|F_0|$) erhöht wird.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasen des Magnetlagers räumlich um 120° versetzt angeordnet sind.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Ansteuerung des Magnetlagers über einen Zwischenkreisumrichter erfolgt.

6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das zu lagernde ferromagnetische Teil eine Welle (W) ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass, ausgehend von einer Ruhelage der Welle (W) in einem Fanglager, eine automatische Selbstzentrierung der Welle (W) bei Bestromung der Lagerwicklungen (L_1, L_2, L_3) erfolgt.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Welle (W) geregelt einer vorgegebenen exzentrischen oder zentrischen Bahn folgt.

9. Verfahren nach Anspruch 6, 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Welle (W) ein spanabhebendes Bearbeitungswerkzeug trägt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Bearbeitungswerkzeug ein Bohrer oder Fräser ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

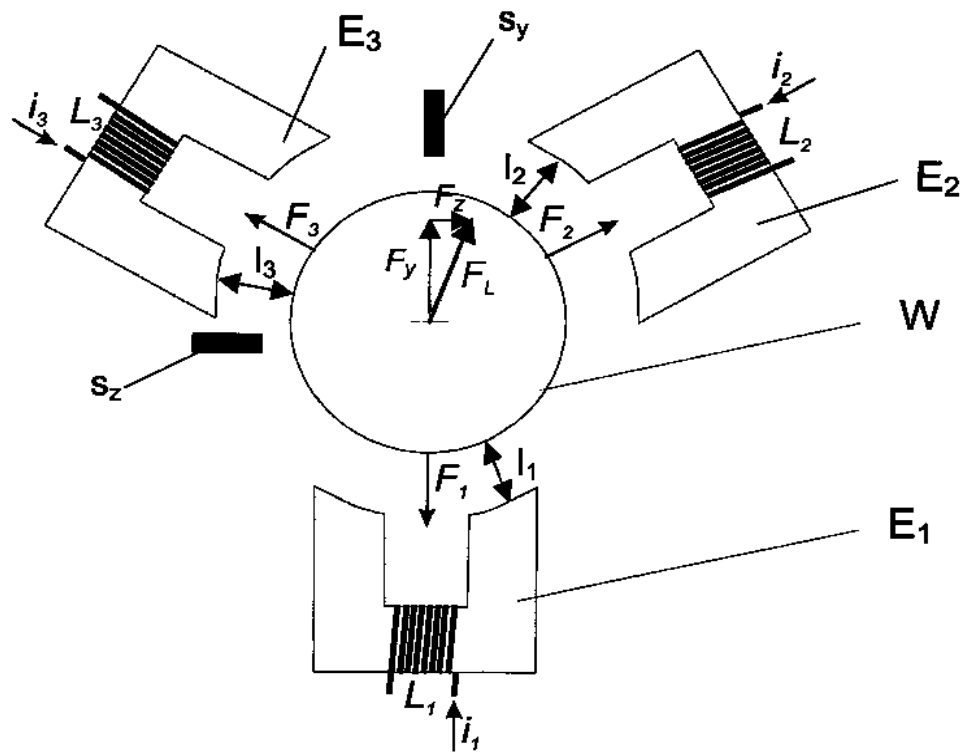


Fig. 1

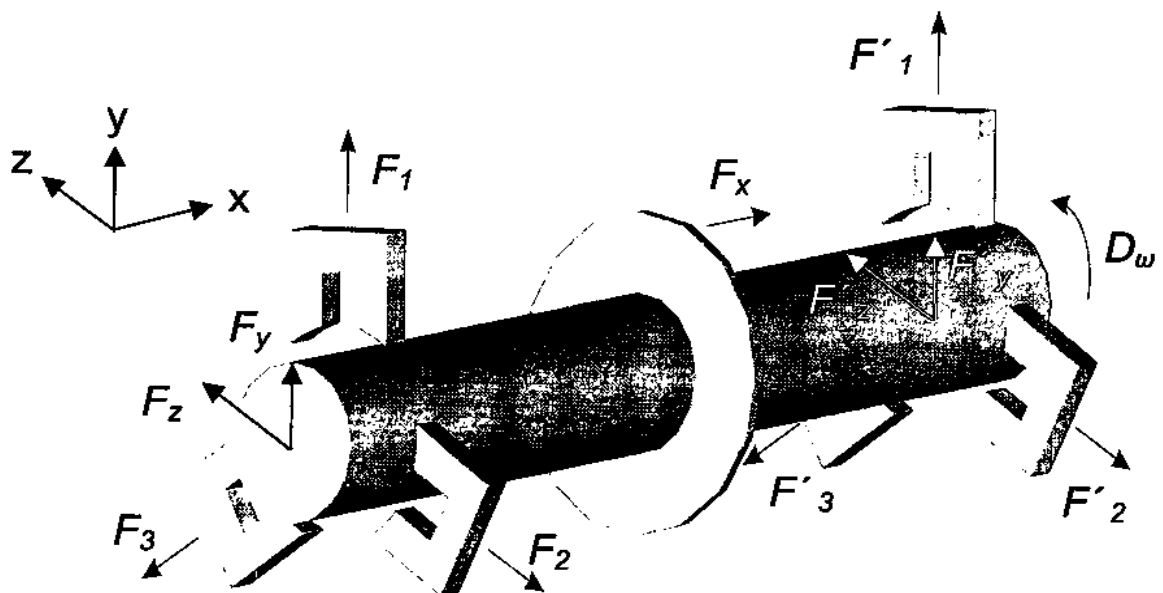


Fig. 2

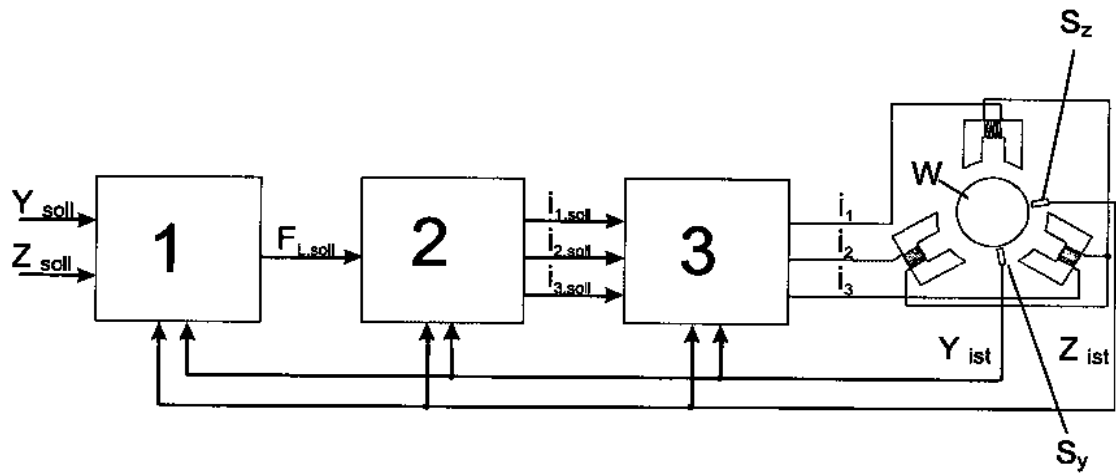


Fig. 3

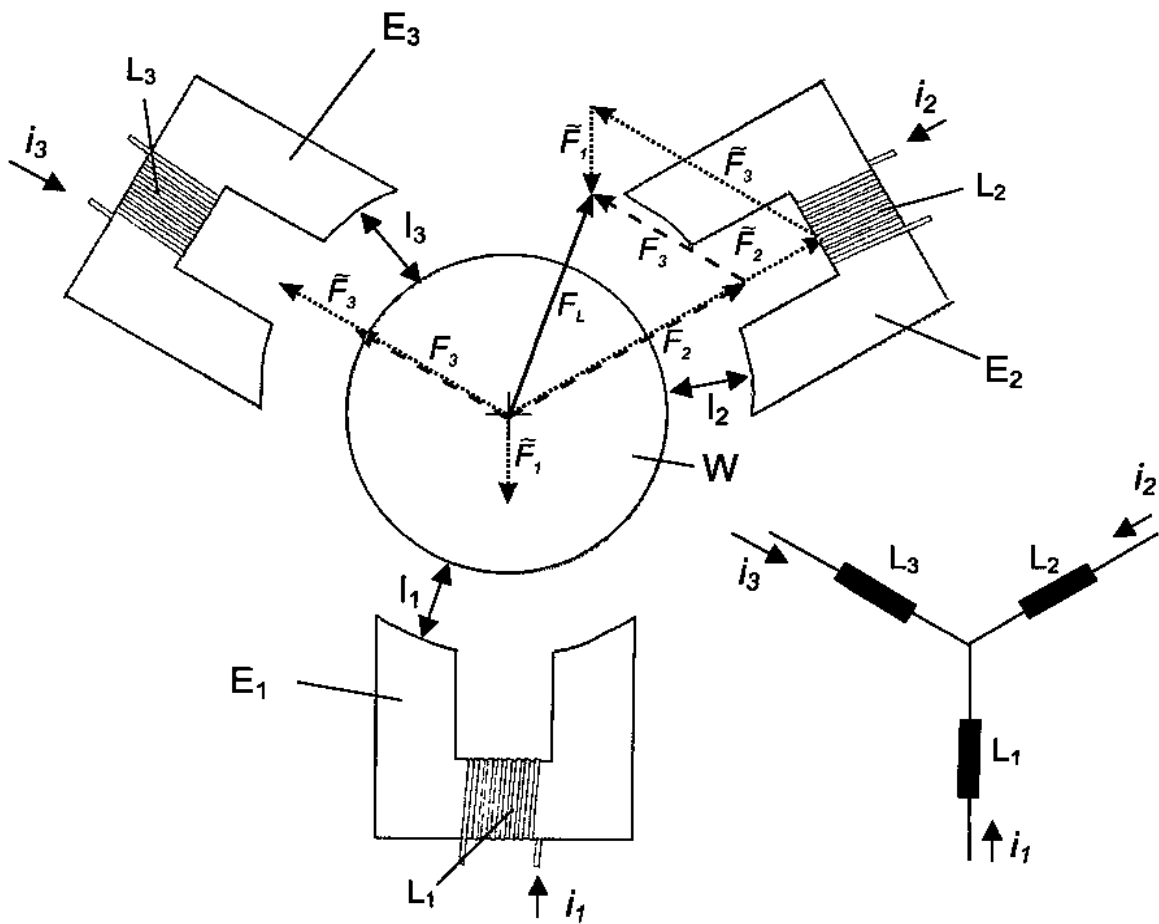


Fig. 4

Fig. 5