



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 018 267 B4** 2008.08.14

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 018 267.7**

(22) Anmeldetag: **20.04.2006**

(43) Offenlegungstag: **22.11.2007**

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **14.08.2008**

(51) Int Cl.⁸: **F16C 32/04 (2006.01)**

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, DE

(74) Vertreter:

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

(72) Erfinder:

**Eckhardt, Stephan, Dipl.-Ing., 01217 Dresden, DE;
Klaucke, Carsten, 01187 Dresden, DE; Rudolph,
Joachim, Dr.-Ing., 01069 Dresden, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

**DE 103 53 101 B4
DE10 2004 025356 A1
DE 100 34 017 A1
DE 43 34 662 A1
DE 35 23 344 A1
DE 28 00 960 A1
DE 693 22 191 T2
US 56 96 412 A
US 55 76 587 A
US 53 47 190 A
US 48 66 318 A
WO 95/18 925 A1**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Ansteuern aktiver Magnetlager**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Ansteuern aktiver Magnetlager, bei dem

ein ferromagnetischer Rotor mittels elektromagnetischer Radiallager und einem elektromagnetischen Axiallager magnetisch gelagert ist und bei dem in den Magnetlagern jeweils mindestens zwei spindelgehäusefeste Abstandssensoren vorgesehen sind,

wobei entweder

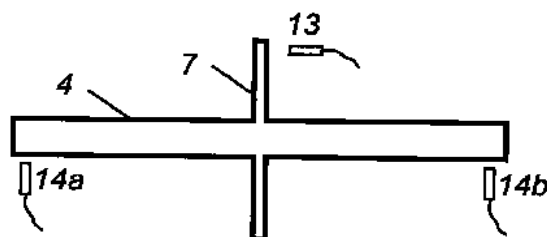
a) das Axiallager eine mit dem Rotor starr verbundene, ferromagnetische Lagerscheibe aufweist, beiderseits derer über je einen Lagerspalt beabstandete spindelgehäusefeste Statoranordnungen angeordnet sind, die jeweils um den Rotor verteilt einzeln ansteuerbare Lagerwicklungen tragen, oder

b) mindestens eines der Radiallager aus zwei spindelgehäusefesten Radiallagerhälften aufgebaut ist, die in Richtung der Rotorachse gesehen hintereinander angeordnet sind und den Rotor umschließende Lagerringe aufweisen, die jeweils um den Rotor verteilt einzeln zur Erzeugung eines radialen Magnetfeldes ansteuerbare Lagerwicklungen tragen,

mit folgenden Schritten

c) in den Magnetlagern wird durch die Abstandssensoren die jeweilige Rotorposition erfasst,

d) aus...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ansteuern aktiver Magnetlager, bei dem ein ferromagnetischer Rotor mittels elektromagnetischer Radiallager und eines elektromagnetischen Axiallagers magnetisch gelagert ist und Abstandssensoren vorgesehen sind, mit denen sowohl die Lage als auch die Biegung des Rotors erfasst werden können.

[0002] Als typisches Anwendungsbeispiel für das Verfahren soll im Weiteren ein in einer Spindel mit Hilfe zweier radial und einer axial wirkenden Elektromagnetvorrichtung gelagerter ferromagnetischer Rotor herangezogen werden, ohne dass die Erfindung hierauf in irgendeiner Weise beschränkt wäre. Beispielsweise kann zusätzlich ein Motor für den Antrieb des Rotors eingebaut sein.

[0003] Bei Magnetlagern wird grundsätzlich zwischen aktiven und passiven Magnetlagern unterschieden. Während bei passiven Magnetlagern die Magnetkräfte meist nur durch Permanentmagnete erzeugt werden, können bei aktiven Magnetlagern durch das Verändern der Wicklungsstromstärken die Magnetkräfte variiert werden. Bei letzteren Magnetlagern wird die Lage des Rotors erfasst, und die Wicklungsströme zur Erzeugung der Lagerkräfte werden durch eine Regelvorrichtung berechnet und ausgegeben.

[0004] Magnetisch gelagerte Rotoren bieten gegenüber konventionell gelagerten Rotoren, beispielsweise wälzgelagerten Rotoren, wesentliche Vorteile. Da kein mechanischer Kontakt zwischen Rotor und Stator besteht, tritt kein Verschleiß auf, und es wird keine Schmierung benötigt. Darum eignen sich magnetisch gelagerte Rotoren sehr gut für Arbeiten im Vakuum oder im Reinraum, kommen aber auch bei Anwendungen zum Einsatz, bei denen sich der Rotor mit hohen Drehzahlen dreht. Außerdem kann der Rotor innerhalb der Luftspalte der Magnetlager frei bewegt werden. Durch geeignetes Ansteuern der Magnetlager kann der Rotor positioniert oder auf vorgebbaren Bahnen bewegt werden. Beispielsweise wird bei der spanenden Fertigung von Formbohrungen der Rotor winkelsynchron und dennoch hochgenau auf einer vorgegebenen Bahn geführt.

Stand der Technik

[0005] Bei jeder spanenden Fertigung, wie zum Beispiel Feindrehen, wirken sich Biegeschwingungen des Rotors stark negativ auf die Bearbeitungsqualität aus. Durch Biegeschwingungen werden die für die Lageregelung benötigten Messwerte für die Position des Rotors verfälscht, wodurch sich die Positioniergenauigkeit des Werkzeugs verschlechtert oder die Positionierung sogar instabil wird. Die Inbetriebnahme eines magnetisch gelagerten Rotors und die Optimierung eines Fertigungsprozesses hinsichtlich technologischer Parameter werden dadurch deutlich erschwert. Im Rotor können Biegungen und Biegeschwingungen unter anderem durch die Vorgänge am Werkzeug aber auch durch die magnetische Lagerung selbst angeregt werden.

[0006] In der DE 100 34 017 A1 und DE 103 53 101 B4 sind beispielsweise Regelverfahren für magnetische Radiallager eines ferromagnetischen Rotors unter Verwendung von Abstandssensoren beschrieben.

[0007] In der DE 43 34 662 A1 ist ein magnetisches Lager einer drehenden Luftumwälzmaschine für insbesondere ein Strahlflugzeug mit zwei Radiallagern und einem Axiallager beschrieben, welche auch bei schweren Umgebungsvibrationen, hohen Stoßbelastungen und hohen Temperaturen die Welle in einer vorgegebenen axialen Position halten.

[0008] Nach der DE 28 00 960 A1 soll über drei elektromagnetische Rotorlager sowohl ein Axialversatz des Rotors als auch ein Kippen des Rotors verhindert werden.

[0009] Über ein Einleiten von Momenten für eine Biegekomensation der Welle ist in allen vorgenannten Dokumenten nichts gesagt.

[0010] Nach der gattungsfremden DE 10 2004 025 356 A1 wird ein magnetgelagerter Tisch für große Lasten hochgenau positioniert. Zusätzlich zur Ansteuerung der Tragsmagnete zur Tischpositionierung werden Deformationen der Arbeitsplatte des Tisches mittels separater Sensoren erfasst und durch eine geeignete Ansteuerung separater Aktuatoren, z. B. piezoelektrischer, hydraulischer oder pneumatischer Aktuatoren, soweit als möglich kompensiert. Als nachteilig erweist sich insbesondere die Notwendigkeit separater Aktuatoren und Sensoren, die den konstruktiven Aufwand enorm erhöhen.

[0011] Gemäß der Offenlegungsschrift DE 198 37 624 A1 wird bereits eine Werkzeugspindel mit integrierter Biegeschwingungsdämpfung vorgestellt. Dabei ist der Rotor allerdings mittels Wälzlager gelagert. Aus-

schließlich durch den eingebauten Antriebsmotor werden zusätzlich zum Antriebsdrehmoment radial wirkende Kräfte erzeugt, die benutzt werden, um die Spindel genügend schwingungssteif zu halten.

[0012] Aus der US-5,576,587 A lässt sich die Lehre entnehmen, Biegeschwingungen zu begrenzen, indem der Rotor in solchen Drehzahlbereichen gefahren wird, in denen die Biegeschwingungen gegen ein Minimum gehen.

[0013] Letztlich ist in WO 95/18925 A1 ein Verfahren und ein Steuergerät für eine „lagerlose“ Drehfeldmaschine angegeben, bei dem die auf den Läufer wirkenden Lorentz- und Maxwellquerkräfte ausgesteuert werden. Außerdem wird gezeigt, dass bei einem konventionell gelagerten Läufer auch Biegeschwingungen gedämpft werden können, indem das aktiv magnetische Axiallager entsprechende Kräfte senkrecht zum Läufer ausübt.

Technisches Problem

[0014] Mit Hilfe zusätzlicher Sensoren können auftretende Biegeschwingungen und Biegungen eines Rotors gemessen werden. Um die detektierten Biegeschwingungen bedämpfen bzw. Biegungen kompensieren zu können, müssen zusätzlich zur Lagerung Kräfte oder Drehmomente auf den Rotor eingepreßt werden.

[0015] Solche Kompensationskräfte könnten beispielsweise durch zusätzliche radiale elektromagnetische Lager erzeugt werden. Diese zusätzlichen Magnetlager würden allerdings eine größere Baulänge des Rotors bedingen. Bei einem längeren Rotor sind jedoch die Eigenfrequenzen niedriger, was gleichbedeutend mit einer Verschlechterung der rotordynamischen Eigenschaften ist. Außerdem steigen durch zusätzliche Lager die Kosten.

Offenbarung der Erfindung

[0016] Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Ansteuerung von aktiven Magnetlagern und eine entsprechende Magnetlageranordnung anzugeben, bei denen ohne zusätzliche aktive magnetische Lager und ohne Verwendung von Wälzlagern eine aktive Dämpfung von Biegeschwingungen und/oder eine Kompensation von Biegungen eines Rotors erreicht wird.

[0017] Erfindungsgemäß wird bei einem aktiv magnetisch gelagerten ferromagnetischen Rotor eine Biegeschwingungsdämpfung und/oder Biegunskompensation integriert, ohne zusätzlichen Bauraum in der Spindel zu beanspruchen, indem die räumliche Verteilung der aktiven Lagermagnete um den Rotor bei bestimmten Magnetlagerkonstruktionen ausgenutzt wird, um zusätzlich zu den Lagerkräften auch Kompensationskräfte bzw. -drehmomente zu erzeugen. Werden die räumlich verteilten Lagermagnete einzeln angesteuert, so können die einzelnen Magnetkräfte eingestellt werden, wodurch bei geeigneten Lagerkonstruktionen Lagerkräfte und zusätzliche Drehmomente erzeugt werden. Wird die Biegung bzw. Biegeschwingung des Rotors erfasst, so kann durch gezieltes Einstellen der einzelnen Magnetkräfte eine Biegeschwingungsdämpfung und/oder eine Biegunskompensation erzielt werden. Die Erfassung der Biegung kann direkt durch Anbringung von Sensoren oder indirekt beispielsweise durch die Auswertung der Spuleninduktivitäten der vorhandenen aktiven Magnetlager erfolgen, wobei zusätzlich die Positionsmesswerte der Sensoren für die Lageregelung berücksichtigt werden können. Weitere Merkmale der Erfindung sind in den Patentansprüchen offenbart.

[0018] Die Erfindung soll anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden.

[0019] In den zugehörigen Zeichnungen zeigen:

[0020] Fig. 1 schematisch ein magnetisch gelagerter Rotor,

[0021] Fig. 2 schematisch den Aufbau einer Axiallagerhälfte,

[0022] Fig. 3 schematisch die Verschaltung der Lagerwicklungen eines Axiallagers zu einem Dreiphasensystem,

[0023] Fig. 4 schematisch die Verschaltung der Lagerwicklungen eines Axiallagers zu einem sternverschalteten Dreiphasensystem,

[0024] Fig. 5 schematisch ein Radiallager, aufgebaut als vierphasiges Unipolarlager,

[0025] **Fig. 6** schematisch ein Radiallager, aufgebaut als dreiphasiges Unipolarlager,

[0026] **Fig. 7** schematisch ein Radiallager, aufgebaut als rein elektromagnetisches Homopolarlager,

[0027] **Fig. 8** schematisch die Messung der Biegung eines Rotors:

8a) nicht gebogener Rotor,

8b) gebogener Rotor,

[0028] **Fig. 9** schematisch auf den Rotor wirkende Kräfte:

9a) nicht gebogener Rotor,

9b) gebogener Rotor mit Kompensation und

[0029] **Fig. 10** ein Blockschaltbild der Funktionsblöcke zur erfindungsgemäßen Durchbiegungskompensation und/oder Biegeschwingungsdämpfung.

[0030] **Fig. 1** zeigt schematisch den Aufbau eines elektromagnetisch gelagerten Rotors 4. Zur Lagerung des Rotors 4 werden zwei radiale Lagervorrichtungen 1 und 2 in den Endbereichen des Rotors 4 sowie eine zwischen den radialen Lagervorrichtungen 1, 2 angeordnete axiale Lagervorrichtung 3 verwendet. Die Wahl der Lageranordnung ist frei, die in **Fig. 1** dargestellte Lageranordnung ist exemplarisch. In der in **Fig. 1** beispielhaft dargestellten Konfiguration werden zur radialen Lagerung zwei dreiphasige rein elektromagnetische Lager 1, 2 eingesetzt. Bei dem magnetischen Axiallager 3 können durch zwei noch näher zu beschreibende Statoren (z. B. zwei Elektromagnete), die sich auf den beiden Seiten einer fest mit dem Rotor 4 verbundenen Lagerscheibe des Axiallagers 3 befinden, Lagerkräfte erzeugt werden. Zudem kann ein Motor an einen solchen magnetisch gelagerten Rotor 4 angebaut sein, durch den der Rotor 4 angetrieben wird.

[0031] In **Fig. 2** ist eine Hälfte eines Axiallagers 3 in so genannter Tempelbauform dargestellt. Die vorgelegte Erfindung beschränkt sich nicht auf die Ausführung mit sechs Magnetpolen. Das hier vorgestellte Verfahren ist auch für Magnetlager mit einer von sechs abweichenden Anzahl von Magnetpolen anwendbar. Das Axiallager 3 besteht aus zwei ringförmigen Statoren 5 beiderseits einer Lagerscheibe 7. Die Statoren 5 verfügen über Polflächen. Die Pole sind von Lagerwicklungen 6 umgeben. Durch Ströme in den Lagerwicklungen 6 werden magnetische Flüsse in den Statoren 5, im Luftspalt und in der Lagerscheibe 7 erzeugt, wodurch eine die Lagerscheibe 7 anziehende Kraft entsteht. Durch gezieltes Ansteuern der einzelnen Lagerwicklungen 6 können unterschiedliche Kräfte an jeder Polfläche erzeugt werden, wodurch sowohl eine anziehende, in axialer Richtung wirkende Kraft als auch ein Drehmoment um eine in radialer Richtung liegende Achse erzeugt werden können. Die Winkellage dieser gedachten Achse kann durch gezieltes Ansteuern der einzelnen Lagerwicklungen 6 ebenfalls eingestellt werden.

[0032] Durch geeignete Verschaltung der Lagerwicklungen 6 können Kanäle an der Stromstelleinrichtung eingespart werden, jedoch ergeben sich in Abhängigkeit von der Verschaltungsvariante unterschiedliche Ansteuerungsverfahren. In **Fig. 3** und **Fig. 4** sind zwei vorteilhafte Verschaltungsvarianten für je eine Lagerhälfte des Axiallagers 3 dargestellt. In **Fig. 3** sind sechs Lagerwicklungen 6a bis 6f gezeigt, die entsprechend der Zeichnung auf den ringförmigen Stator 5 aufgeteilt sind. Jeweils zwei Lagerwicklungen 6a, 6b; 6c, 6d; 6e, 6f bilden ein Wicklungspaar, gerade so, dass der durch einen Strom in einem Wicklungspaar erzeugte magnetische Fluss eine Masche bildet, erkennbar anhand des Vergleichs der mit dem Punkt markierten Anzapfung der Lagerwicklung und der Stromrichtung. Daraus folgt, dass jeweils durch einen Strom, i_1 , i_2 bzw. i_3 , in einem Wicklungspaar je eine Kraft in axialer Richtung und ein Drehmoment um eine gedachte radiale Achse erzeugt werden. Die Sternverschaltung der Wicklungspaare schränkt das erfindungsgemäße Verfahren nur insofern ein, dass zusätzlich die algebraische Bedingung $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ beim Entwurf der Ansteuerung berücksichtigt werden muss (siehe hierzu DE 103 53 101 B4).

[0033] In **Fig. 4** ist eine besonders vorteilhafte Verschaltungsvariante eines Axiallagers 3 in Tempelbauform mit sechs Lagerwicklungen dargestellt. Je zwei Lagerwicklungen 6a, 6b; 6d, 6e; 6c, 6f sind in Reihe geschaltet, jedoch so, dass bei einem der Wicklungspaare 6c, 6f bei Bestromung i_w eine axiale Kraft generiert wird, ohne ein Drehmoment um eine gedachte radiale Achse zu erzeugen. Durch einen Strom i_u bzw. einen Strom i_v werden ein positives bzw. ein negatives Drehmoment um eine in der Zeichnung horizontale Achse und eine axiale Kraft erzeugt. Wie in **Fig. 4** können die drei Wicklungspaare 6a, 6b; 6d, 6e; 6c, 6f außerdem zum Stern verschaltet werden, wodurch die Ansteuerung mit Hilfe eines Zwischenkreisumrichters möglich wird. Für den Entwurf der Ansteuerung des Axiallagers 3 muss die Bedingung $i_u + i_v + i_w = 0$ berücksichtigt werden.

[0034] Bei den Lagern in **Fig. 5**, **Fig. 6** und **Fig. 7** handelt es sich um aktive magnetische Radiallager. Bei-

spielsweise können die in **Fig. 5** bis **Fig. 7** gezeigten Radiallager alternativ zu den in **Fig. 1** dargestellten Radiallagern **1**, **2** verwendet werden, bei denen es, wie im Folgenden beschrieben werden soll, durch gezieltes Ansteuern der Lagerwicklungen ebenfalls möglich ist, zusätzlich zur Lagerkraft auch Drehmomente um eine gedachte radiale Achse einzuprägen.

[0035] In **Fig. 5** sind ein Längs- und ein Querschnitt eines so genannten Unipolarlagers dargestellt. Unipolarlager sind Hybridlager, bei denen eine Kombination aus Permanentmagneten und Elektromagneten verwendet wird. Ein Unipolarlager besteht aus zwei Radiallagerhälften **10** und **11**, die einen Rotor **4** umschließen. Jede Radiallagerhälfte **10**, **11** entspricht dem links dargestellten Querschnitt. Ausgehend von einem Lagerring **9** ragen vier Lagerschenkel in den Lagerinnenraum. Um die Lagerschenkel sind Lagerwicklungen **8** angebracht. Stand der Technik ist es, die zu einer Richtung – in **Fig. 5** jeweils horizontal bzw. vertikal – gehörenden Lagerwicklungen **8** in Reihe zu schalten. Dies geschieht so, dass der durch Permanentmagnete **12** erzeugte magnetische Fluss, auf der rechten Seite in **Fig. 5** durchgezogen eingezeichnet, durch die elektromagnetischen Lagerhälften **10**, **11** je auf einer Seite betragsmäßig gestärkt und auf der gegenüberliegenden Seite betragsmäßig geschwächt wird, so dass eine auf den Rotor **4** wirkende Kraft entsteht. Werden nun die jeweiligen Lagerwicklungspaare der beiden Radiallagerhälften **10**, **11** separat angesteuert, ist man in der Lage, die Lagerkräfte in beiden Radiallagerhälften **10**, **11** unabhängig voneinander einzustellen. Dadurch können zusätzlich zur Lagerkraft Drehmomente um hinsichtlich ihrer Orientierung einstellbare radiale gedachte Achsen erzeugt werden.

[0036] Die **Fig. 6** zeigt eine dreiphasige Ausführung des Unipolarlagers. Ausgehend von einem Lagerring **9** ragen drei Lagerschenkel in den Lagerinnenraum. Das Funktionsprinzip der dreiphasigen Unipolarlagerausführung ist grundsätzlich gleich jenem des Radiallagers in **Fig. 5**. Durch die dreiphasige Wicklungsausführung ist die Sternverschaltung der Lagerwicklungen **8** möglich. Durch separates Ansteuern der beiden Radiallagerhälften **10**, **11** können unabhängig Kräfte erzeugt werden, wodurch zusätzlich zu den Lagerkräften auch Drehmomente um hinsichtlich ihrer Orientierung einstellbare, gedachte radiale Achsen entstehen. Ein Ring aus Permanentmagnetmaterial ist mit **12** bezeichnet.

[0037] Im Gegensatz zu den in **Fig. 5** und **Fig. 6** gezeigten hybridmagnetischen Radiallagern ist in **Fig. 7** ein rein elektromagnetisches Homopolarlager dargestellt. Das Radiallager besteht wiederum aus zwei Radiallagerhälften **10** und **11**, die wenigstens durch magnetisch leitfähige Stege **10a** verbunden sind und den Rotor **4** umgeben. Jede Radiallagerhälfte **10**, **11** besteht aus einem Lagerring **9**, von welchem drei Lagerschenkel in den Lagerinnenraum ragen. Um jeden Lagerschenkel ist eine Lagerwicklung **8** angebracht. Stand der Technik ist es, diejenigen beiden Lagerwicklungen, die sich bezüglich der beiden Lagerhälften **10**, **11** gegenüberstehen, in Reihe zu schalten. So wird ein Elektromagnet gebildet, der in axialer Richtung des Rotors **4** ausgedehnt ist. Durch die dreiphasige Ausführung der Lagerwicklungen ist es möglich, die Lagerwicklungen zum Stern zu verschalten. In diesem Fall kann das Radiallager mit Hilfe eines Zwischenkreisumrichters angesteuert werden. Durch separates Ansteuern der beiden Radiallagerhälften **10**, **11**, die in einer vorteilhaften Ausführung gegeneinander verdreht angeordnet werden, können unterschiedliche Kräfte, und damit zusätzlich zur Lagerkraft auch Drehmomente um einstellbare gedachte radiale Achsen, erzeugt werden.

[0038] Durch **Fig. 8** soll die messtechnische Erfassung einer Biegung eines Rotors **4** illustriert werden. Unter **Fig. 8a**) ist der Rotor **4** im nicht gebogenen Zustand dargestellt. Im Vergleich dazu ist unter **Fig. 8b**) der gebogene Rotor **4** gezeigt. Da nur das Grundprinzip veranschaulicht werden soll, sind nur die Biegung in der Zeichenebene und auch nur die Sensorik für die vertikale Richtung dargestellt. Die Abstandssensoren **14a** und **14b** sind an einem nicht dargestellten Spindelgehäuse montiert, da sie für die Lageregelung benötigt werden. Wird ein zusätzlicher Sensor **13** montiert, der beispielsweise den Abstand zur Axiallagerscheibe **7** misst, kann auf die Biegung des Rotors **4** geschlossen werden. Anhand **Fig. 8** ist es anschaulich, dass trotz gleicher vertikaler Lage des Rotors **4** der durch den Zusatzsensor **13** gemessene Abstand im Vergleich zwischen **Fig. 8a**) und **Fig. 8b**) deutlich variiert. Aus den Messwerten der Abstandssensoren **14a** und **14b** können die vertikale Position und die Neigung des Rotors **4** berechnet werden. Besonders vorteilhaft ist es dabei, wenn die Positionsmessungen mittels der Abstandssensoren **14a** und **14b** je in einem Schwingungsknoten des Rotors **4** stattfinden. Mit Hilfe der berechneten Neigung des Rotors **4** kann die vom Zusatzsensor **13** gelieferte Abstandsinformation um den der Neigung des Rotors **4** entsprechenden Betrag korrigiert werden.

[0039] In **Fig. 9** ist nochmals schematisch der Rotor **4** in gebogenem (**Fig. 9b**) und nicht gebogenem (**Fig. 9a**) Zustand dargestellt. Anhand **Fig. 9** wird veranschaulicht, wie eine Biegung kompensiert bzw. eine Biegeschwingung gedämpft werden kann. Auf den Rotor **4** wirkt die Gewichtskraft F_g . Für die Lagerung des Rotors **4** müssen entsprechende Lagerkräfte F_{L1} und F_{L2} erzeugt werden. Um eine Biegung des Rotors **4** zu kompensieren (siehe **Fig. 9b**), können beispielsweise an der Axiallagerscheibe **7** zusätzliche Kräfte F_{k1} und F_{k2} er-

zeugt werden. Die Kraftbeträge $|F_{k,1}|$ und $|F_{k,2}|$ sind gleich groß und die Kräfte kompensieren einander, sodass keine axiale Bewegung des Rotors 4 entsteht. Jedoch wird durch die Kräfte $F_{k,1}$ und $F_{k,2}$ ein Drehmoment erzeugt, das durch die Lagerkräfte $F_{L,1}$ und $F_{L,2}$ kompensiert werden muss, um die Positioniergenauigkeit des Rotors 4 nicht zu verschlechtern.

[0040] Mit Hilfe des Blockschaltbildes in **Fig. 10** sollen die Verschaltung der einzelnen Funktionsblöcke und die Blöcke selbst erklärt werden. Der Block 18 repräsentiert den magnetisch gelagerten Rotor mit einem geeigneten Lager oder einem lagerlosen Motor zum Erzeugen von zusätzlichen Drehmomenten. Die Lage des Rotors X_{mess} wird beispielsweise mittels fünf Positionssensoren gemessen. Alternativ können Vorrichtungen oder Algorithmen zur Messung bzw. Rekonstruktion der Lagerwicklungsinduktivitäten vorgesehen sein, durch die indirekt auf die Lage des Rotors geschlossen werden kann. Mit Hilfe zusätzlicher Sensoren wird die Position X_s des Rotors 4 an einer zusätzlichen Stelle gemessen. Durch das in der Beschreibung zu **Fig. 8** beschriebene Verfahren wird im Biegungsberechnungsblock 19 ein Maß für die Biegung $\tilde{X}_s$ rekonstruiert. Im Lageregler 15 wird aus der gewünschten Lage X_{sol} des Rotors und dessen gemessener Lage X_{mess} die Soll-Lagerkraft $F_{L,\text{sol}}$ berechnet. Außerdem werden die zur Kompensation der Biegung ausgegebenen Drehmomente $M_{k,\text{sol}}$ entsprechend gewichtet auf die Soll-Lagerkräfte $F_{L,\text{sol}}$, aufgeschaltet, sodass sich $\tilde{F}_{L,\text{sol}}$ ergibt. Zum Entwurf des Lagereglers 15 sind dem Fachmann eine Vielzahl von Methoden, wie beispielsweise PID-Regelung oder Trajektorienfolge-Regelung, bekannt. Im Block 20 werden je nach gewünschtem Verhalten die Kompensationsdrehmomente $M_{k,\text{sol}}$ in Abhängigkeit von der gemessenen Biegung $\tilde{X}_s$, der zeitlichen Änderung der gemessenen Biegung und/oder der zeitlich kumulierten gemessenen Biegung berechnet. Auf diese Weise kann ein Verhalten derart erreicht werden, dass mit einem beliebigen Nachgiebigkeits- und/oder einem beliebigen Dämpfungsverhalten auf eine Biegung reagiert wird. Durch Kompensationsdrehmomente $M_{k,\text{sol}}$, die beispielsweise proportional zur zeitlichen Kumulation des Biegungsmesswertes vorgegeben werden, kann eine bleibende Durchbiegung am Messort verhindert werden. Ein Kraft- bzw. Drehmomenten-Stromstärke-Wandler 16 berechnet aus den Soll-Lagerkräften $\tilde{F}_{L,\text{sol}}$ und den Kompensationsdrehmomenten $M_{k,\text{sol}}$, ggf. in Abhängigkeit von der gemessenen Lage X_{mess} des Rotors, die Soll-Stromstärken i_{sol} . Die Stromstärkenstelleinrichtung 17 stellt den in den Spulen fließenden Strom i_{ist} auf den geforderten Wert i_{sol} ein. Dazu können die tatsächlich fließenden Ströme gemessen werden und mit Hilfe eines Stromreglers, bspw. eines PI- oder Dead-Beat-Reglers, ggf. in Abhängigkeit von der gemessenen Position X_{mess} , geeignete Stellspannungen berechnet und ausgegeben werden.

Regelungstechnische Beschreibung der Erfindung

[0041] Anhand von Berechnungsansätzen soll die Erfindung näher dargelegt werden. Dazu wird allgemein das Funktionsprinzip dargestellt und anschließend für mehrere unterschiedliche, vorteilhafte Magnetlagerkonstruktionen das Verfahren zur Ansteuerung der Magnetlager beschrieben.

[0042] Ein elektromagnetisch gelagerter Rotor hat den in **Fig. 1** dargestellten Aufbau. Dabei wird der Rotor 4 durch zwei dreiphasige elektromagnetische Radiallager 1, 2 und ein axiales Magnetlager 3 gelagert. Die Wahl der Lageranordnung ist frei, die in **Fig. 1** dargestellte Lageranordnung ist exemplarisch. Die Radiallager 1 und 2 bestehen jeweils aus drei hufeisenförmigen Elektromagneten. Durch die Wicklungsströme $i_{v,1}$, $i_{v,2}$, $i_{v,3}$ bzw. $i_{h,1}$, $i_{h,2}$, $i_{h,3}$ im vorderen bzw. im hinteren Radiallager 1, 2 können Magnetkräfte $F_{v,1}$, $F_{v,2}$, $F_{v,3}$ bzw. $F_{h,1}$, $F_{h,2}$, $F_{h,3}$ erzeugt werden. Der Zusammenhang zwischen Magnetkraft und Wicklungsstrom kann näherungsweise zu

$$F_{v,1} = \lambda_v \frac{i_{v,1}^2}{s_{v,1}}, \quad F_{v,2} = \lambda_v \frac{i_{v,2}^2}{s_{v,2}}, \quad F_{v,3} = \lambda_v \frac{i_{v,3}^2}{s_{v,3}}$$

$$F_{h,1} = \lambda_h \frac{i_{h,1}^2}{s_{h,1}}, \quad F_{h,2} = \lambda_h \frac{i_{h,2}^2}{s_{h,2}}, \quad F_{h,3} = \lambda_h \frac{i_{h,3}^2}{s_{h,3}}$$

angenommen werden. Dabei hängen die Koeffizienten λ_v und λ_h vom Aufbau, der Windungszahl und den Materialeigenschaften der Radiallager 1, 2 ab. Die Luftspaltlängen der einzelnen Elektromagnete $s_{v,1}$, $s_{v,2}$, $s_{v,3}$ bzw. $s_{h,1}$, $s_{h,2}$, $s_{h,3}$ lassen sich aus der gemessenen Lage des Rotors 4 in den Radiallagern 1, 2 und den Nominalluftspaltlängen berechnen. Durch Überlagerung der Magnetkräfte $F_{v,1}$, $F_{v,2}$, $F_{v,3}$ bzw. $F_{h,1}$, $F_{h,2}$, $F_{h,3}$ und unter Berücksichtigung der Winkelstellungen der einzelnen Elektromagnete $\alpha_{v,1}$, $\alpha_{v,2}$, $\alpha_{v,3}$ bzw. $\alpha_{h,1}$, $\alpha_{h,2}$, $\alpha_{h,3}$ können die resultierenden Lagerkraftkomponenten $F_{v,h}$, $F_{v,v}$ bzw. $F_{h,h}$, $F_{h,v}$ in horizontaler und vertikaler Richtung berechnet werden:

$$F_{v,h} = F_{v,1} \cos \alpha_{v,1} + F_{v,2} \cos \alpha_{v,2} + F_{v,3} \cos \alpha_{v,3}$$

$$F_{v,v} = F_{v,1} \sin \alpha_{v,1} + F_{v,2} \sin \alpha_{v,2} + F_{v,3} \sin \alpha_{v,3}$$

$$F_{h,h} = F_{h,1} \cos \alpha_{h,1} + F_{h,2} \cos \alpha_{h,2} + F_{h,3} \cos \alpha_{h,3}$$

$$F_{h,v} = F_{h,1} \sin \alpha_{h,1} + F_{h,2} \sin \alpha_{h,2} + F_{h,3} \sin \alpha_{h,3}$$

[0043] Für den Sonderfall $\alpha_{v,1} = 0^\circ$, $\alpha_{v,2} = 120^\circ$ und $\alpha_{v,3} = 240^\circ$ vereinfachen sich die Gleichungen zu

$$F_{v,h} = F_{v,1} - \frac{1}{2} F_{v,2} - \frac{1}{2} F_{v,3}$$

$$F_{v,v} = \frac{\sqrt{3}}{2} F_{v,2} - \frac{\sqrt{3}}{2} F_{v,3}$$

$$F_{h,h} = F_{h,1} - \frac{1}{2} F_{h,2} - \frac{1}{2} F_{h,3}$$

$$F_{h,v} = \frac{\sqrt{3}}{2} F_{h,2} - \frac{\sqrt{3}}{2} F_{h,3}$$

[0044] Wird für das elektromagnetische Axiallager 3 ein Lager nach **Fig. 2** verwendet, kann der Zusammenhang zwischen Wicklungsströmen $i_{p,1}$, $i_{p,2}$, $i_{p,3}$ bzw. $i_{n,1}$, $i_{n,2}$, $i_{n,3}$ (abhängig von der Axiallagerhälfte), Lagerkraft F_x und Lagerdrehmomenten M_h , M_v bei paarweiser Verschaltung der Lagerwicklungen nach **Fig. 4** – dabei soll die Sternschaltung der Wicklungspaare zunächst nicht verwendet werden – bei Verdrehung der Lagerhälften um 90° zueinander durch

$$F_x = F_{p,1} + F_{p,2} + F_{p,3} - F_{n,1} - F_{n,2} - F_{n,3},$$

$$M_v = r(F_{n,2} - F_{n,3}), \quad M_h = r(F_{n,2} - F_{p,3})$$

mit

$$F_{p,1} = \frac{\lambda_{p,1} i_{p,1}^2}{(s_0 - p_x)^2}, \quad F_{p,2} = \frac{\lambda_{p,2} i_{p,2}^2}{(s_0 - p_x)^2}, \quad F_{p,3} = \frac{\lambda_{p,3} i_{p,3}^2}{(s_0 - p_x)^2},$$

$$F_{n,1} = \frac{\lambda_{n,1} i_{n,1}^2}{(s_0 + p_x)^2}, \quad F_{n,2} = \frac{\lambda_{n,2} i_{n,2}^2}{(s_0 + p_x)^2}, \quad F_{n,3} = \frac{\lambda_{n,3} i_{n,3}^2}{(s_0 + p_x)^2}$$

beschrieben werden. Für jedes Wicklungspaar wurde ein Lagerparameter $\lambda_{p,1}$, $\lambda_{p,2}$, $\lambda_{p,3}$ bzw. $\lambda_{n,1}$, $\lambda_{n,2}$, $\lambda_{n,3}$ eingeführt. Aus der Nominalluftspaltlänge s_0 und der gemessenen axialen Position p_x des Rotors 4 wird die jeweilige Luftspaltlänge berechnet. Der Faktor r steht für den radialen Abstand des Angriffspunktes der Magnetkraft von der Lagermitte. Durch jede Axiallagerhälfte des Axiallagers 3 können bei dieser vorteilhaften Verschaltungsvariante eine axiale Kraft und ein Drehmoment um die Vertikale bzw. Horizontale erzeugt werden.

[0045] Mit Hilfe eines Starrkörpermodells für den Rotor 4 lassen sich dessen Bewegungsgleichungen in der Form

$$m\ddot{p}_x = F_x$$

$$m\ddot{p}_h = F_{v,h} + F_{h,h}$$

$$m\ddot{p}_v = F_{v,v} + F_{h,v}$$

$$J\ddot{d}_h = l_v F_{v,v} + l_h F_{h,v} + M_h$$

$$J\ddot{d}_v = l_v F_{v,h} + l_h F_{h,h} + M_v$$

schreiben. Aufgrund der einwirkenden Kräfte F_x , $F_{v,h}$, $F_{h,h}$, $F_{v,v}$, $F_{h,v}$ und Drehmomente M_v , M_h wird der starre Rotor 4 mit der Masse m und dem Trägheitsmoment J in den Richtungen der Koordinaten p_x , p_h , p_v , d_h , d_v beschleunigt. Die Lagerkräfte $F_{v,h}$, $F_{v,v}$ bzw. $F_{h,h}$, $F_{h,v}$ wirken im Abstand l_v bzw. l_h vom Massenmittelpunkt auf den Rotor 4.

[0046] Für die Regelung der Position des Rotors **4** wird ein Folgeregler mit den Parametern k_0 und k_1 verwendet, der aus der vorgegebenen Position des Rotors **4** und deren zeitlichen Ableitungen die geforderten Beschleunigungen $\ddot{X}_d$ berechnet:

$$\ddot{X}_d = \ddot{X}_{\text{soll}} + k_1(\dot{X}_{\text{mess}} - \dot{X}_{\text{soll}}) + k_0(X_{\text{mess}} - X_{\text{soll}}) + \ddot{X}_{\text{Stör}}$$

[0047] Der Vektor $X_{\text{mess}} = (p_x, p_y, p_h, d_x, d_y)$ setzt sich aus den Koordinaten zur Beschreibung der Lage des Rotors **4** zusammen (Entsprechend die Vektoren der Soll-Positionen X_{soll} , der Soll-Geschwindigkeiten $\dot{X}_{\text{soll}}$ und der Soll-Beschleunigungen $\ddot{X}_{\text{soll}}$). Zusätzlich kann ein Vektor der Störbeschleunigungen $\ddot{X}_{\text{Stör}}$ aufgeschaltet werden, um die Positioniergenauigkeit zu verbessern. Der Positionsvektor X_{mess} , die erste Zeitableitung des Positionsvektors $\dot{X}_{\text{mess}}$ des Rotors **4** und der Störbeschleunigungsvektor $\ddot{X}_{\text{Stör}}$ können durch Sensoren gemessen oder aus anderen Messwerten rekonstruiert werden.

[0048] Wählt man die Sollwerte für die Drehmomente M_h, M_v , so können mit den Bewegungsgleichungen für einen Starrkörper aus den Komponenten des Soll-Beschleunigungsvektors $\ddot{X}_d$ die Soll-Lagerkräfte (zusammengefasst zu einem Vektor $\tilde{F}_{L,\text{soll}}$) für $F_x, F_{v,h}, F_{v,v}, F_{h,h}, F_{h,v}$ berechnet werden.

[0049] Mit Hilfe der mathematischen Lagermodelle (Zusammenhang zwischen den Luftspalten, den Spulenströmen und den dadurch entstehenden Lagerkräften) können aus den Messgrößen p_x, p_h, p_y, d_x, d_y für die Lage des Rotors **4** (zusammengefasst zum Vektor X_{mess}) und dem zuvor berechneten Soll-Lagerkraftvektor $\tilde{F}_{L,\text{soll}}$ (bestehend aus den Sollwerten für $F_x, F_{v,h}, F_{v,v}, F_{h,h}$ und $F_{h,v}$) und den vorgegebenen Werten (zusammengefasst zum Vektor $M_{k,\text{soll}}$) für die Lagerdrehmomente M_h, M_v die Sollwerte i_{soll} (Vektor der Soll-Stromstärken) für die Lagerstromstärken $i_{p,1}, i_{p,2}, i_{p,3}, i_{h,1}, i_{h,2}, i_{h,3}$ (Axiallagerströme) und $i_{v,1}, i_{v,2}, i_{v,3}, i_{h,1}, i_{h,2}, i_{h,3}$ (Radiallagerströme) berechnet werden. (Diese Berechnung wird in **Fig. 10** durch den Block **16** repräsentiert.) Die Berechnung der Soll-Lagerströme kann beispielsweise für das vordere Radiallager **1** für die vorteilhafte Ausführung mit $\alpha_{v,1} = 0^\circ, \alpha_{v,2} = 120^\circ$ und $\alpha_{v,3} = 240^\circ$ durch

$$F_{v,1} = \begin{cases} F_0 & \text{für } F_{v,h} < -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}} \\ F_{v,h} + \frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}} + F_0 & \text{für } F_{v,h} \geq -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}} \end{cases},$$

$$F_{v,2} = \begin{cases} \frac{2F_{v,v}}{\sqrt{3}} + F_0 & \text{für } F_{v,h} \geq -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} \geq 0 \\ F_0 & \text{für } F_{v,h} \geq -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} < 0 \\ -F_{v,h} + F_0 & \text{für } F_{v,h} < -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} \geq 0 \\ -F_{v,h} + F_0 - \frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}} & \text{für } F_{v,h} < -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} < 0 \end{cases},$$

$$F_{v,3} = \begin{cases} F_0 & \text{für } F_{v,h} \geq -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} \geq 0 \\ -\frac{2F_{v,v}}{\sqrt{3}} + F_0 & \text{für } F_{v,h} \geq -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} < 0 \\ -F_{v,h} + F_0 - \frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}} & \text{für } F_{v,h} < -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} \geq 0 \\ -F_{v,h} + F_0 & \text{für } F_{v,h} < -\frac{2|F_{v,v}|}{\sqrt{3}}, F_{v,v} < 0 \end{cases}$$

und

$$i_{v,1} = s_{v,1} \sqrt{\frac{F_{v,1}}{\lambda_v}}, \quad i_{v,2} = s_{v,2} \sqrt{\frac{F_{v,2}}{\lambda_v}}, \quad i_{v,3} = s_{v,3} \sqrt{\frac{F_{v,3}}{\lambda_v}}$$

erfolgen, wobei F_0 eine positiv frei wählbare Arbeitspunktkraft ist. Die Soll-Lagerströme für das Axiallager **3** können aus der Vorgabe für die Lagerdrehmomente M_v , M_h und der Axialkraft F_x sowie der gemessenen Axialposition p_x durch

$$F_{p,2} = \begin{cases} \frac{M_h}{r} + F_{p,0} & \text{für } M_h \geq 0 \\ F_{p,0} & \text{für } M_h < 0 \end{cases},$$

$$F_{p,3} = \begin{cases} F_{p,0} & \text{für } M_h \geq 0 \\ \frac{M_h}{r} + F_{p,0} & \text{für } M_h < 0 \end{cases},$$

$$F_{n,2} = \begin{cases} \frac{M_v}{r} + F_{n,0} & \text{für } M_v \geq 0 \\ F_{n,0} & \text{für } M_v < 0 \end{cases},$$

$$F_{n,3} = \begin{cases} F_{n,0} & \text{für } M_v \geq 0 \\ \frac{M_v}{r} + F_{n,0} & \text{für } M_v < 0 \end{cases},$$

$$F_{p,1} = \begin{cases} F_{x,0} + F_x - F_{p,2} - F_{p,3} + F_{n,2} + F_{n,3} & \text{für } F_x - F_{p,2} - F_{p,3} + F_{n,2} + F_{n,3} \geq 0 \\ F_{x,0} & \text{für } F_x - F_{p,2} - F_{p,3} + F_{n,2} + F_{n,3} < 0 \end{cases},$$

$$F_{n,1} = \begin{cases} F_{x,0} & \text{für } F_x - F_{p,2} - F_{p,3} + F_{n,2} + F_{n,3} \geq 0 \\ F_{x,0} - F_x + F_{p,2} + F_{p,3} - F_{n,2} - F_{n,3} & \text{für } F_x - F_{p,2} - F_{p,3} + F_{n,2} + F_{n,3} < 0 \end{cases}$$

mit

$$i_{p,1} = (s_0 - p_x) \sqrt{\frac{F_{p,1}}{\lambda_{p,1}}}, \quad i_{p,2} = (s_0 - p_x) \sqrt{\frac{F_{p,2}}{\lambda_{p,2}}}, \quad i_{p,3} = (s_0 - p_x) \sqrt{\frac{F_{p,3}}{\lambda_{p,3}}},$$

$$i_{n,1} = (s_0 + p_x) \sqrt{\frac{F_{n,1}}{\lambda_{n,1}}}, \quad i_{n,2} = (s_0 + p_x) \sqrt{\frac{F_{n,2}}{\lambda_{n,2}}}, \quad i_{n,3} = (s_0 + p_x) \sqrt{\frac{F_{n,3}}{\lambda_{n,3}}},$$

berechnet werden, wobei $F_{x,0}$, $F_{p,0}$ und $F_{n,0}$ positiv frei wählbare Arbeitspunktkräfte sind.

[0050] Für das Verfahren zur Ansteuerung des Axiallagers 3 als Lager mit zusätzlicher Kraft- bzw. Drehmomenteneinprägung sind mehrere Verschaltungsvarianten denkbar. In **Fig. 3** und **Fig. 4** sind beispielhaft zwei Varianten dargestellt. In beiden Fällen sind Sternschaltung oder separate Ansteuerung der Lagerwicklungen möglich. Für den Entwurf des Ansteueralgorithmus muss das zu verwendende mathematische Modell entsprechend der Wicklungsverteilung, der Verschaltung der Lagerwicklungen und der Orientierung der Axiallagerhälften angepasst werden. Dem Fachmann ist beispielsweise die Modellierung als magnetisches Netzwerk bekannt. Für die Sternverschaltung muss eine zusätzliche algebraische Bedingung $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ bzw. $i_u + i_v + i_w = 0$ berücksichtigt werden.

[0051] Der in **Fig. 10** dargestellte Block Nr. 19 repräsentiert den Berechnungsalgorithmus für die Biegung des Rotors 4. Bei einer vorteilhaften Ausführung sind die Abstandssensoren 14a, 14b an Stellen montiert, an denen keine Auslenkung durch Verbiegen des Rotors 4 zu erwarten ist. Durch zusätzlich am Rotor 4 montierte Sensoren 13 wird beispielsweise die Lage X_s der Axiallagerscheibe 7 erfasst. Diese Messwerte X_s geben aber nicht ausschließlich die Biegung des Rotors 4 wieder, sondern werden auch von einer gewünschten Lageänderung des Rotors 4 beeinflusst. Mit Hilfe der bekannten geometrischen Zusammenhänge ist es dem Fachmann möglich, aus den Messwerten X_{mess} der Sensoren 14a, 14b die Lage des Rotors 4 zu berechnen, mit denen die Messwerte X_s so korrigiert werden können, dass man ein Maß X_s für die Biegung des Rotors erhält.

[0052] Werden die Messwerte der Lagesensoren 14a, 14b durch die Biegung des Rotors 4 beeinflusst, so können die Sensormesswerte durch Filtern in einzelne Frequenzbereiche zerlegt werden, um geeignete Messwerte zu erhalten. Mit Hilfe einer Modalanalyse können die Biegeschwingungsamplituden an den Montagestel-

len der Sensoren **14a**, **14b** abgeschätzt und für die Berechnung der Biegung des Rotors **4** hinzugezogen werden.

[0053] Magnetisch gelagerte Rotoren werden meist so ausgelegt, dass der zu erwartende Frequenzbereich der Erregungen des Rotors, beispielsweise durch die Rotation, durch Bearbeitungskräfte an einem Werkzeug usw., unterhalb kritischer Eigenfrequenzen des Rotors liegt. Bei einer solchen vorteilhaften Ausführung genügt es zur Ermittlung der Biegung des Rotors **4**, die Sensorsignale X_s mit Hilfe eines Hochpassfilters zu verarbeiten. Das Hochpassfilter wird so dimensioniert, dass die Anteile des Messsignals, die der gewollten Bewegung des Rotors **4** und der Bewegung durch einwirkende Störungen entsprechen, bedämpft werden, so dass man den Anteil $\tilde{X}_s$ erhält, der der Biegung des Rotors **4** entspricht.

[0054] Der Regler für die Biegung ist in **Fig. 10** als Block **20** dargestellt. Dabei wird das Kompensationsdrehmoment $M_{k,soll}$ in Abhängigkeit vom Messwert $\tilde{X}_s$, der ein Maß für die Biegung darstellt, und dessen zeitlicher Änderung $\dot{\tilde{X}}_s$ durch

$$M_{k,soll} = k_0 \tilde{X}_s + k_1 \dot{\tilde{X}}_s$$

berechnet, wobei die Koeffizienten k_0 und k_1 Reglerparameter sind. Die zeitliche Änderung $\dot{\tilde{X}}_s$ des Biegemesswertes kann durch einen Differenzenquotienten oder mittels geeigneter Filter (z. B. durch Beobachter) aus $\tilde{X}_s$ ermittelt werden. Um eine bleibende Regelabweichung bezüglich der Biegung zu unterbinden, kann zusätzlich ein Integralanteil ergänzt werden:

$$M_{k,soll} = k_0 \tilde{X}_s + k_1 \dot{\tilde{X}}_s + k_2 \int \tilde{X}_s dt .$$

[0055] Das so berechnete, zusätzlich auf den Rotor **4** wirkende Kompensationsdrehmoment $M_{k,soll}$ (bestehend aus den Komponenten M_v und M_h) kann zur Vermeidung unnötiger Regelabweichungen bei der Berechnung des Lagereglers **15** berücksichtigt werden (Berechnung von $\tilde{F}_{L,soll}$). Zur Berechnung der Soll-Lagerkräfte $\tilde{F}_{L,soll}$ werden in den Starrkörpergleichungen die entsprechenden Drehmomente eingesetzt, wodurch die Radiallager **1**, **2** zusätzliche Gegenkräfte aufbringen (vgl. **Fig. 9b**).

[0056] Anstelle des Axiallagers **3** können auch die Radiallager **1**, **2** für die Erzeugung von Kompensationskräften bzw. von Kompensationsdrehmomenten verwendet werden. Besonders vorteilhaft sind dafür Radiallager **1**, **2** in homopolarer Bauweise, wie in **Fig. 5** bis **Fig. 7** dargestellt. Der Kraft-Stromstärke-Zusammenhang, beispielhaft für das in **Fig. 5** dargestellte Unipolarlager, entspricht in guter Näherung

$$F_{v,1} = k_{i,1} i_{v,1} + k_{p,1} p_{f,v} \quad F = k_{i,h,1} + k_{p,1} p_{f,h}$$

$$F_{v,2} = k_{i,2} i_{v,2} + k_{p,2} p_{f,v} \quad F_{h,2} = k_{i,h,2} + k_{p,2} p_{f,h}$$

mit den Lagerkoeffizienten $k_{i,1}$, $k_{i,2}$, $k_{p,1}$, $k_{p,2}$, den Positionen des Rotors **4** im Lager $p_{f,v}$, $p_{f,h}$ und den Lagerstromstärken $i_{v,1}$, $i_{h,2}$ (erste Lagerhälfte), $i_{v,2}$, $i_{h,2}$ (zweite Lagerhälfte). Aus den erzeugten Magnetkräften $F_{v,1}$, $F_{h,1}$, $F_{v,2}$, $F_{h,2}$ resultieren Lagerkräfte und Kompensationsdrehmomente

$$F_v = F_{v,1} + F_{v,2} \quad , \quad F_h = F_{h,1} + F_{h,2} \quad ,$$

$$M_v = \frac{l_l}{2} F_{h,1} - \frac{l_l}{2} F_{h,2} \quad , \quad M_h = \frac{l_l}{2} F_{v,1} - \frac{l_l}{2} F_{v,2} \quad ,$$

wobei l_l den Abstand zwischen den Mitten der beiden Radiallagerhälften bezeichnet. Daraus ergibt sich für die Vorgabe gewünschter Lagerkräfte und gewünschter Kompensationsdrehmomente eine Berechnungsvorschrift für die Magnetkräfte $F_{v,1}$, $F_{h,1}$, $F_{v,2}$, $F_{h,2}$ und damit auch für die Wicklungsströme $i_{v,1}$, $i_{h,1}$, $i_{v,2}$, $i_{h,2}$:

$$F_{v,1} = \frac{F_v}{2} + \frac{M_h}{l_l}, \quad F_{v,2} = \frac{F_v}{2} - \frac{M_h}{l_l},$$

$$F_{h,1} = \frac{F_h}{2} + \frac{M_v}{l_l}, \quad F_{h,2} = \frac{F_h}{2} - \frac{M_v}{l_l}$$

und

$$i_{v,1} = \frac{F_{v,1} - k_{p,1} p_{f,v}}{k_{i,1}}, \quad i_{h,1} = \frac{F_{h,1} - k_{p,1} p_{f,h}}{k_{i,1}}, \quad i_{v,2} = \frac{F_{v,2} - k_{p,2} p_{f,v}}{k_{i,2}}, \quad i_{h,2} = \frac{F_{h,2} - k_{p,2} p_{f,h}}{k_{i,2}}.$$

[0057] Für die Dämpfung von Biegeschwingungen und die Kompensation von Biegungen können die zuvor vorgestellten aktiven Magnetlager kombiniert werden, d. h. beispielsweise, dass die Verwendung von zwei Unipolarlagern als Radiallager 1, 2 und einem Axiallager 3 mit zusätzlicher Drehmomenteneinprägung möglich ist.

[0058] Zusammengefasst heißt das, dass bei Verwendung eines anderen geeigneten Magnetlagers (siehe beispielsweise **Fig. 6** und **Fig. 7**) oder bei einer Veränderung der Verschaltung der Lagerwicklungen lediglich der Algorithmus im Block 16 der **Fig. 10** angepasst werden muss.

Anwendungsgebiet der Erfindung

[0059] Der erfindungsgemäße Rotor kann, motorisch angetrieben, beispielsweise ein spanabhebendes Werkzeug, wie einen Bohrer, Fräser oder Drehmeißel, tragen und hochgenaue Bohrungen und Konturen herstellen. Die Regelung der elektromagnetischen Lager lässt es dabei zu, programmgesteuert runde oder unrunde Konturen herzustellen, wobei Biegeschwingungen und Biegungen der Welle, bedingt durch den Eingriff des Werkzeugs am Material, kompensiert werden. Ferner können diese zusätzlichen Kräfte und/oder Drehmomente verwendet werden, um eine weitere Lagerfunktion für den Rotor zu übernehmen oder weitere Lagervorrichtungen des Rotors zu unterstützen.

Bezugszeichenliste

1, 2	Radiallager
3	Axiallager
4	Rotor
5	Stator
6, 8	Lagerwicklung
7	Lagerscheibe
9	Lagerring
10, 11	Radiallagerhälften
10a	Stege aus magnetisch leitfähigem Material
12	Permanentmagnet
13	Zusatzsensor
14a, 14b	Abstandssensor
15	Lagereglerblock
16	Drehmomenten-Stromstärke-Wandler
17	Stromstärkenstelleinrichtung
18	Block für den magnetisch gelagerten Rotor
19	Biegunsberechnungsblock
20	Biegunsgreglerblock

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ansteuern aktiver Magnetlager, bei dem ein ferromagnetischer Rotor mittels elektromagnetischer Radiallager und einem elektromagnetischen Axiallager magnetisch gelagert ist und bei dem in den Magnetlagern jeweils mindestens zwei spindelgehäusefeste Abstandssensoren vorgesehen sind, wobei entweder

a) das Axiallager eine mit dem Rotor starr verbundene, ferromagnetische Lagerscheibe aufweist, beiderseits derer über je einen Lagerspalt beabstandete spindelgehäusefeste Statoren angeordnet sind, die jeweils um

den Rotor verteilt einzeln ansteuerbare Lagerwicklungen tragen,
oder

b) mindestens eines der Radiallager aus zwei spindelgehäusefesten Radiallagerhälften aufgebaut ist, die in Richtung der Rotorachse gesehen hintereinander angeordnet sind und den Rotor umschließende Lagerringe aufweisen, die jeweils um den Rotor verteilt einzeln zur Erzeugung eines radialen Magnetfeldes ansteuerbare Lagerwicklungen tragen,
mit folgenden Schritten

c) in den Magnetlagern wird durch die Abstandssensoren die jeweilige Rotorposition erfasst,

d) aus den Messwerten der Abstandssensoren wird der vom Sollzustand abweichende Biegezustand des Rotors ermittelt,

e) in den Lagerwicklungen des Magnetlagers aus a) oder aus b) werden die einzelnen Wicklungsströme von einer Lagerregelung so eingestellt, dass am Rotor zusätzlich zu den Lagerkräften ein Drehmoment um eine Achse senkrecht zur Rotorsollachse erzeugt wird und

f) in den Lagerwicklungen der übrigen Magnetlager werden die einzelnen Wicklungsströme von der Lagerregelung so eingestellt, dass die am Rotor angreifenden Lagerkräfte aller Magnetlager insgesamt die Lagerung und eine Biegung des Rotors hervorrufen, die den im Schritt d) ermittelten Biegezustand kompensiert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung der Wicklungsströme in den Lagerwicklungen der Magnetlager in Abhängigkeit von der gemessenen Luftspaltkonstellation in den Magnetlagern erfolgt.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Dämpfung von Biegeschwingungen und/oder Kompensation von Biegungen des Rotors durch Kräfte und/oder Drehmomente erfolgt, die in Abhängigkeit von einer zeitlichen Änderung der erfassten Biegung des Rotors erzeugt werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Dämpfung von Biegeschwingungen und/oder Kompensation von Biegungen des Rotors durch Kräfte und/oder Drehmomente erfolgt, die in Abhängigkeit von einer über die Abstandssensoren erfassten Biegeamplitude erzeugt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass bei einer Dämpfung von Biegeschwingungen und/oder Biegeungskompensation durch einen Integral-Anteil in einem Regler (20) solange die Kompensationskräfte und/oder Kompensationsdrehmomente erhöht werden, bis keine bleibende Restbiegung des Rotors zurückbleibt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die für die Biegeschwindigkeitsdämpfung und/oder Biegeungskompensation des Rotors zusätzlich erzeugten Kräfte und Drehmomente bei der Lagerregelung des Rotors berücksichtigt werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Messwerte zur Erfassung der Biegung/Biegeschwingung mittels Vorrichtungen zur Messung der Lagerwicklungsinduktivitäten gewonnen werden.

8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagerwicklungen der Magnetlager jeweils zum Stern verschaltet sind.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagerwicklungen der Magnetlager jeweils mit einem Zwischenkreisumrichter angesteuert werden.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

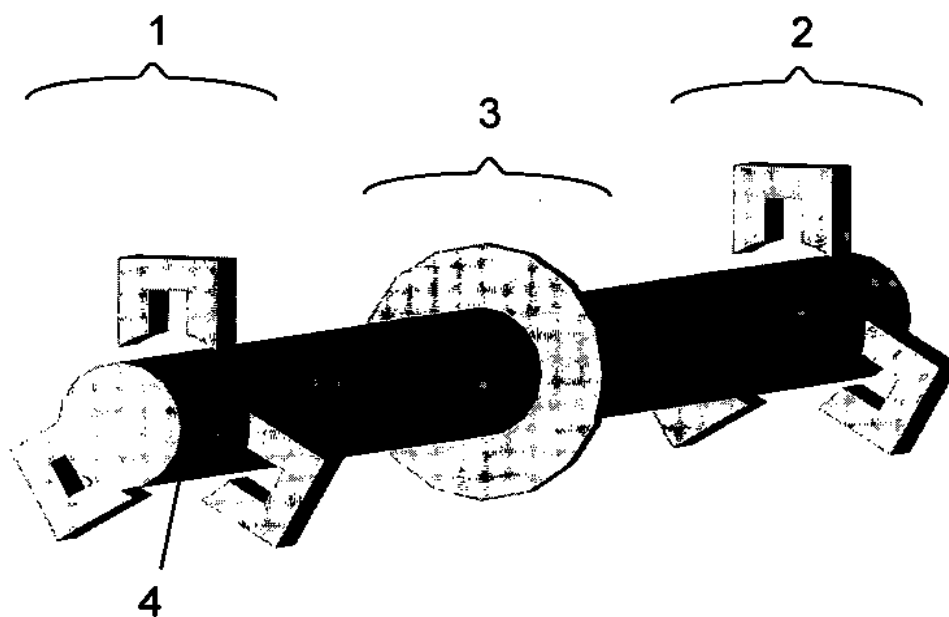


Fig. 1

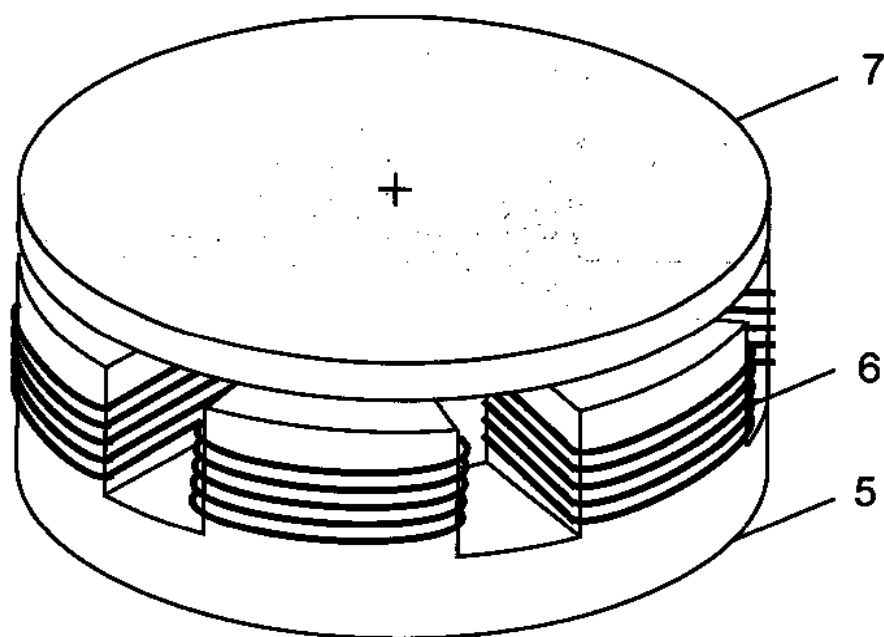


Fig. 2

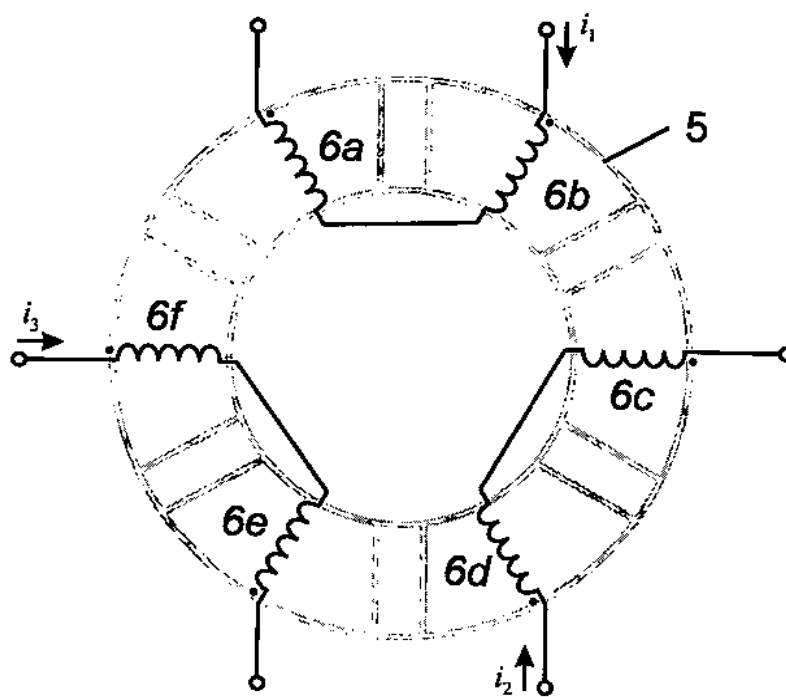


Fig. 3

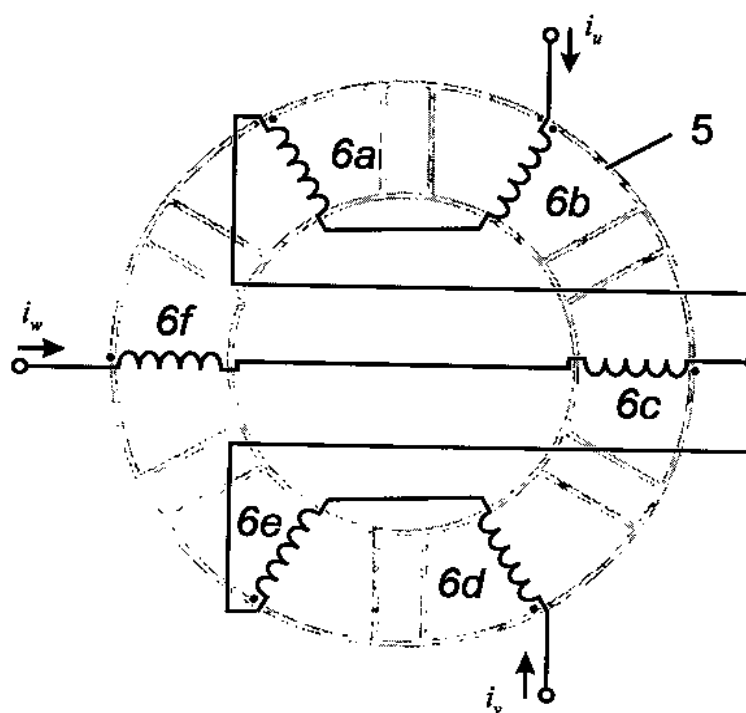


Fig. 4

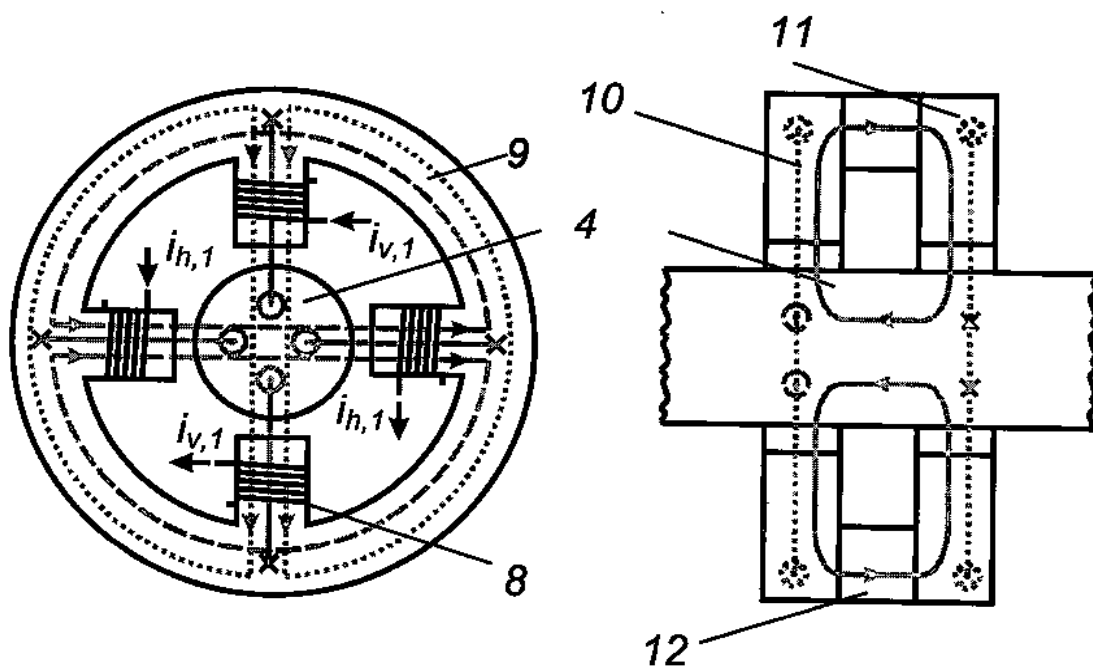


Fig. 5

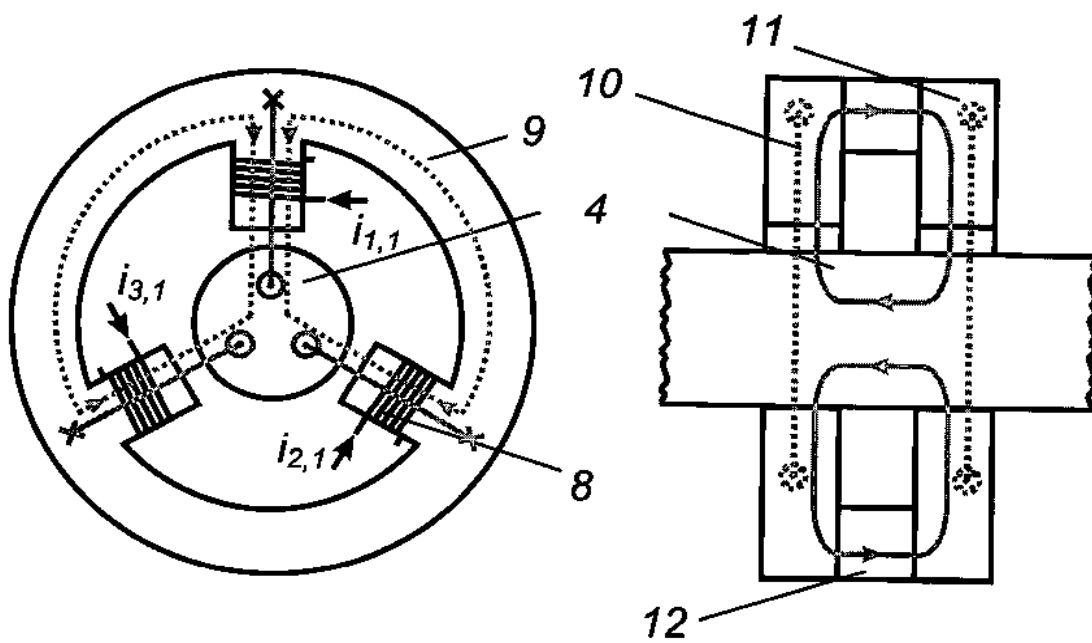


Fig. 6

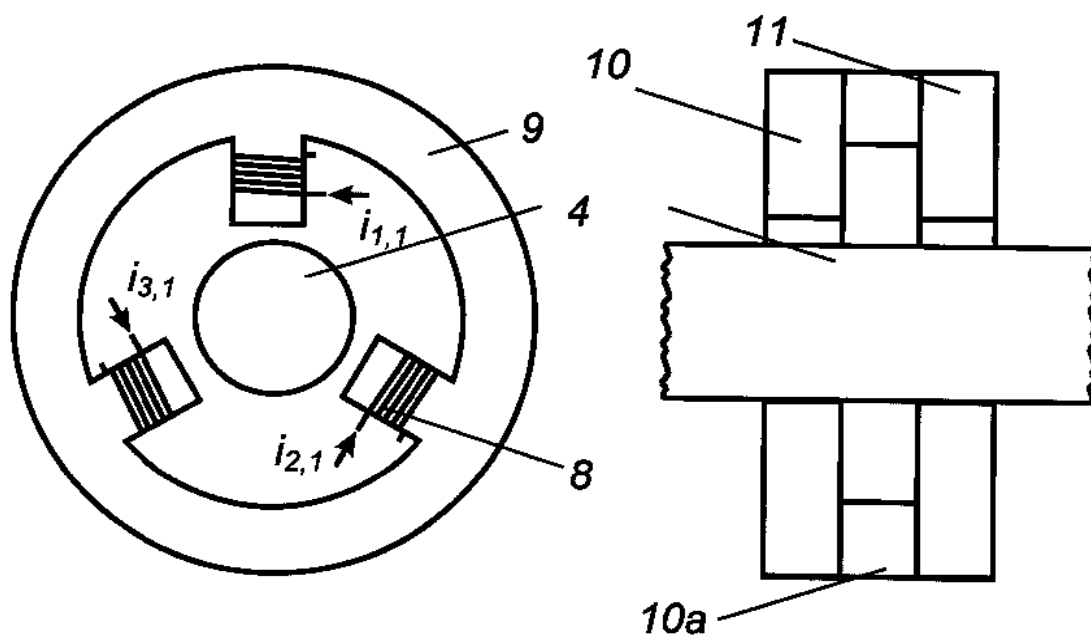


Fig. 7

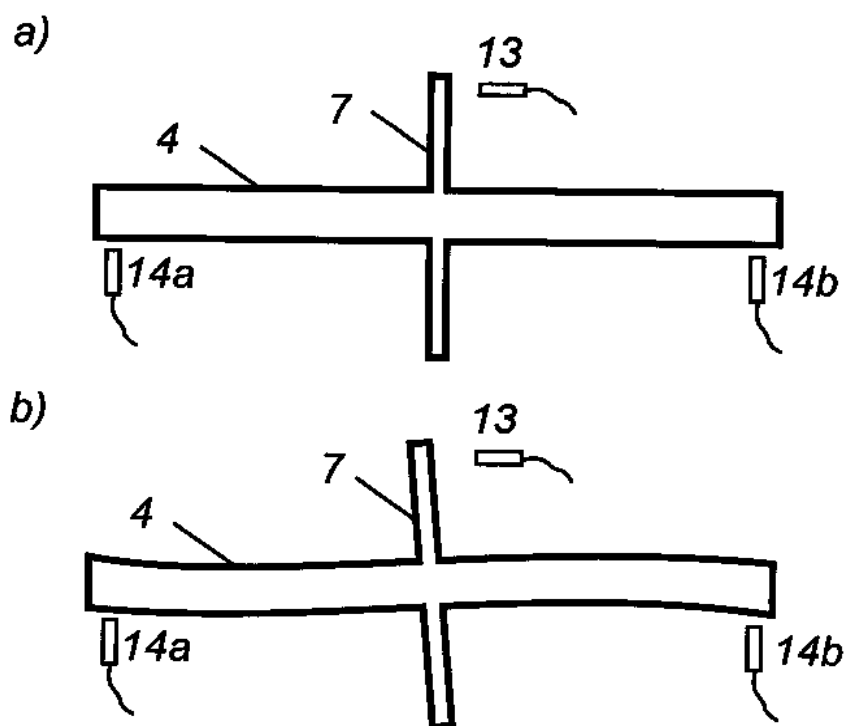


Fig. 8

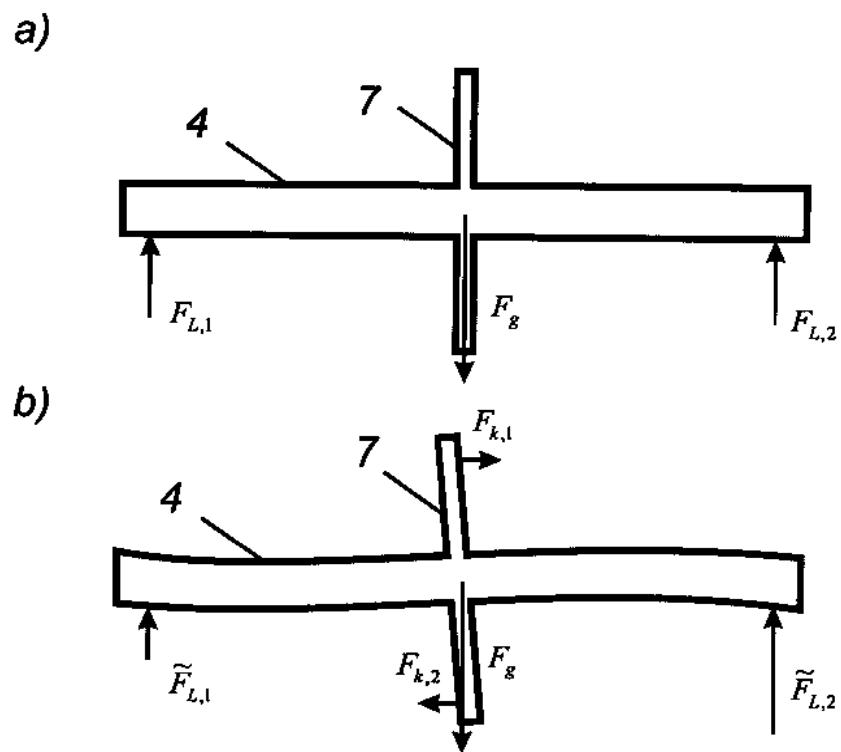


Fig. 9

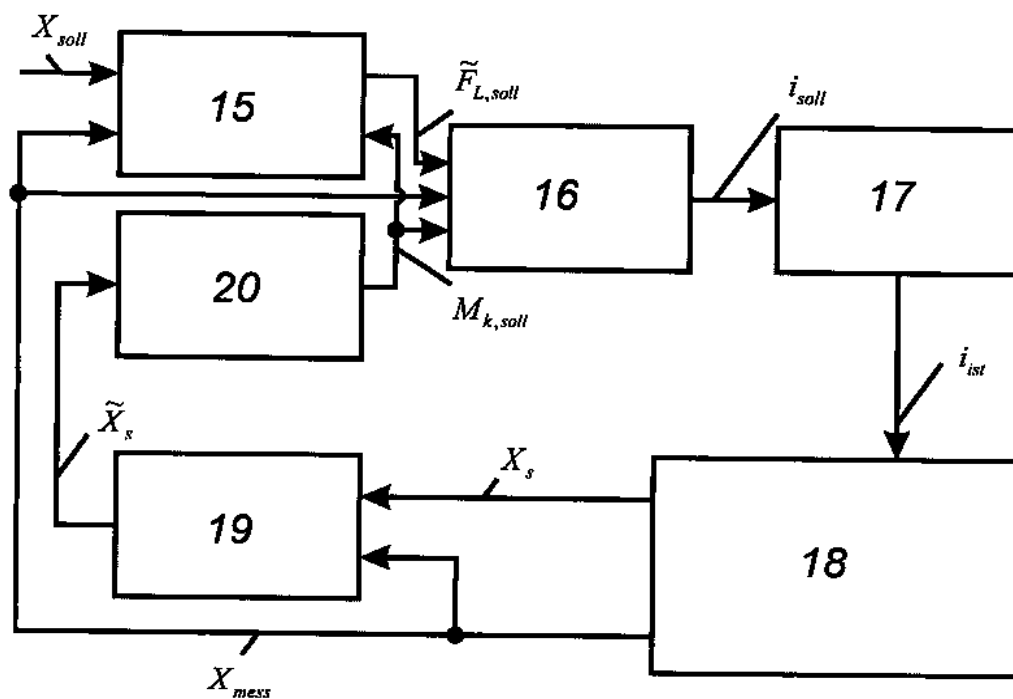


Fig. 10