(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENTAMT

(12) Übersetzung der europäischen Patentschrift

(87) EP 0 281 632 B1

(10) DE 37 87 091 T 2

(51) Int. Cl.[5]: F 16 C 32/04

(21) Deutsches Aktenzeichen: 37 87 091.2
(86) PCT-Aktenzeichen: PCT/JP87/00342
(86) Europäisches Aktenzeichen: 87 903 432.0
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: WO 88/02073
(86) PCT-Anmeldetag: 28. 5. 87
(87) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung: 24. 3. 88
(87) Erstveröffentlichung durch das EPA: 14. 9. 88
(87) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: 18. 8. 93
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 20. 1. 94

(30) Unionspriorität: (32) (33) (31)
12.09.86 JP 213903/86

(73) Patentinhaber:
Hitachi, Ltd., Tokio/Tokyo, JP

(74) Vertreter:
Beetz, R., Dipl.-Ing. Dr.-Ing.; Timpe, W., Dr.-Ing.; Siegfried, J., Dipl.-Ing.; Schmitt-Fumian, W., Prof. Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Mayr, C., Dipl.-Phys.Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte, 80538 München

(84) Benannte Vertragstaaten:
DE, FR, GB

(72) Erfinder:
MATSUSHITA, Osami, Ibaraki 307-17, JP; TAKAGI, Michiyuki, Ibaraki 300-12, JP; YONEYAMA, Mitsuho, Niiharigun Ibaraki 315, JP; SUGAYA, Toyomi, Chiyodamura Niiharigun Ibaraki 315, JP; SAITO, Ikuhiro, Chiyodamura Niiharigun Ibaraki 315, JP

(54) REGELVORRICHTUNG FÜR ELEKTROMAGNETISCHES LAGER.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 37 87 091 T 2

DE 37 87 091 T 2

EP 0 281 632

TECHNISCHES GEBIET

Die Erfindung betrifft eine Regelvorrichtung für einen magnetisch gleitenden Rotor, der von einem elektromagnetischen Lager abgestützt wird, und insbesondere eine Regelvorrichtung für ein magnetisches Lager, die geeignet ist, die Schwingungsamplitude der Wirbelbewegung des Rotors bis auf ein Minimum zu unterdrücken.

TECHNISCHER HINTERGRUND

Ein Rotor einer rotierenden Maschine, der sich auf ein elektromagnetisches Lager abstützt, das Elektromagnete, die Anziehungskräfte ausüben, als Lager verwendet, wird wie nachfolgend beschrieben geregelt. Elektromagnetische Spulen sind längs einer Achse zur rechten und linken Seite des Rotors angeordnet und wenn der Rotor nach rechts ausgelenkt wird, fließt ein Steuerstrom in die elektromagnetische Spule auf der linken Seiten, um eine Anziehungskraft auszuüben, so daß der Rotor kräftig nach links bewegt wird. Umgekehrt, wenn der Rotor nach links ausgelenkt wird, fließt ein Strom in die andere magnetische Spule auf der rechten Seite, um eine Anziehungskraft auszuüben. Auf diese Weise wird der Rotor in Abhängigkeit von der Verschiebung des Rotors nach rechts oder links so geregelt, daß der Steuerstrom zur elektromagnetischen Spule, die sich auf der zur Verschiebung entgegengesetzten Seite befindet, fließt, so daß eine Anziehungskraft durch die elektromagnetischen Spulen erzeugt wird, die den Rotor in die Mittelstellung zurückbringt.

Die US-A-4 128 795 zeigt eine Regelvorrichtung für ein elektromagnetisches Lager nach dem Stand der Technik und entsprechend dem Oberbegriff des Anspruchs 1, die schematisch in Fig. 14 dieser Anmeldung veranschaulicht ist.

Bei dieser an sich bekannten Vorrichtung werden x- und y-Komponentensignale der Verschiebung (nachfolgend abgekürzt Verschiebungssignale $\underline{x}$ und $\underline{y}$ genannt) differenziert, um x- und y-Komponentensignale der Geschwindigkeit zu bilden (nachfolgend abgekürzt als Geschwindigkeitssignale $\dot{x}$ und $\dot{y}$) und die Geschwindigkeitssignale $\dot{\underline{x}}$ und $\dot{\underline{y}}$ werden in den Blöcken 11 und 12 zu den Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$ addiert, um $ax + b\dot{x}$ und $ay + b\dot{y}$ zu bilden. Die Verschiebungssignale, zu denen die Geschwindigkeitssignale addiert sind, werden durch ein drehsynchrones Nachlauffilter 7 geleitet (getriggert durch ein Impulssignal), um nur drehsynchrone Komponenten der Verschiebungs- und Geschwindigkeitssignale auszufiltern, nämlich $x_0 = ax_N + b\dot{x}_N$ und $y_0 = ay_N + b\dot{y}_N$, die mit den Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$ addiert werden und verarbeitet werden durch die Steuerungsschaltungen 6 bzw. 8. Die Summensignale werden zu den elektromagnetischen Spulen 2 und 3 über zugeordnete Verstärker 9 und 10 geliefert, um lediglich eine unausgeglichene, drehsynchrone Vibration zu regeln. Auf diese Weise kann die Lagersteifheit durch Verändern der Größe der Verschiebungssignale eingestellt werden und die Lagerdämpfung kann durch die Veränderung der Größe der Geschwindigkeitssignale eingestellt werden.

Bei der Regeleinrichtung nach dem Stand der Technik ist es nachteilig, daß die Geschwindigkeitssignale durch Differentiationsschaltungen aus den Verschiebungssignalen hergeleitet werden müssen, so daß der Schaltungsaufbau der Einrichtung kompliziert ist.

Die EP-A-0 201 894, die als ältere Anmeldung unter Artikel 54(3) EPC fällt, zeigt eine Regelvorrichtung für ein elektromagnetisches Lager, die mit Bezug auf die Fig. 1 bis 8 in dieser Anmeldung beschrieben ist.

WO-A-84 00198 beschreibt ein magnetisches Lager, das aus zwei entgegengesetzten Teilen besteht, die längs der Achse des Rotors angeordnet sind. Diese zwei Teile ermöglichen es, die Lage des Rotors einzustellen unter Inbetrachtziehung der seitlichen Verschiebungen der Achse in bezug auf einen Referenzwert, wobei die Neigungsbewegungen der Achse mit Bezug auf die Senkrechte ebenfalls korrigiert werden. Die Nutationsbewegungen des Rotors und eines angetriebenen Elements, z.B. eines Satellitenritzels, werden durch kreuzgekoppelte Elemente gedämpft.

BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Regelvorrichtung für ein elektromagnetisches Lager zur Unterdrückung selbsterregter Vibrationen des Rotors und zur Stabilisierung des Rotors anzugeben.

Nach der Erfindung wird diese Aufgabe durch die im Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

Mit der erfindungsgemäßen Konstruktion werden zu regelnde Frequenzkomponentensignale aus den ermittelten Verschiebungssignalen x und y herausgefiltert und vertauscht zur Verbindung mit den verarbeiteten Verschiebungssignalen x und y, um sicherzustellen, daß Differentiationssignale, d.h. Vibrations-Unterdrückungssignale, ohne Differentiationsschaltungen erhalten werden können. Die Vibration, die die Drehung des Rotors begleitet, ist eine orbitale Bahn-

bewegung, welche von der Drehzahl des Rotors abhängt, um die Form einer instabilen Vibration in Richtung der orbitalen Bahnbewegung anzunehmen, die mit der Drehrichtung des Rotors um seine eigene Achse zusammenfällt, d.h. einer "vorwärts" gerichteten orbitalen Bewegung, und um die Form einer instabilen orbitalen Bewegung anzunehmen, die nicht mit der Drehrichtung des Rotors um seine eigene Achse übereinstimmt, d.h. einer "rückwärts" gerichteten orbitalen Bewegung. Die Addition oder die Subtraktion der miteinander kreuzweise vertauschten Signale wird durch eine Schalteinheit bestimmt, um entweder die vorwärtsgerichtete oder die rückwärtsgerichtete instabile Vibration zu verhindern.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Fig. 1 ist ein Blockschaltbild, das ein Regelsystem entsprechend der EP-A-0 201 894 veranschaulicht.

Fig. 2 zeigt schematisch eine Regelschaltung, die auf dem System der Fig. 1 basiert, für einen Rotor, der von einem elektromagnetischen Lager gehalten wird.

Fig. 3 ist ein Diagramm eines dynamischen Modells, das zur Erläuterung der Rotorverschiebung und der Ungleichgewichtigkeit dienlich ist.

Fig. 4 ist ein Diagramm, das eine Bahnbewegung des Mittelpunkts eines sich drehenden Rotors mit Vibrationen zeigt, der asymmetrisch gelagert ist und der einer unausgeglichenen Vibration unterworfen ist.

Fig. 5 ist ein Diagramm, das eine vibrierende Drehbewe-

gungsspur der Achse eines homogenen Rotors zeigt, der einer unausgeglichenen Vibration unterworfen ist.

Fig. 6 ist ein Blockdiagramm zur Erklärung des Prinzips eines drehsynchronen Filters.

Fig. 7 ist ein Blockdiagramm, das eine andere Regeleinrichtung nach EP-A-0 201 894 zeigt.

Fig. 8 ist eine graphische Darstellung der Charakteristiken unausgeglichener Vibrationen.

Fig. 9 zeigt schematisch ein Modell einer Rotationsmaschine zur Veranschaulichung der Lehren der Erfindung.

Fig. 10 ist eine graphische Darstellung der Beziehung zwischen der Drehzahl und der Eigenfrequenz der rotierenden Maschine nach Fig. 9.

Fig. 11 veranschaulicht eine vibrierende Drehbewegungsspur der Bewegungsachse eines Rotors, der eine eigenerregte Vibration ausführt.

Fig. 12 ist ein Blockdiagramm, das eine Regelvorrichtung entsprechend einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung zeigt.

Fig. 13 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Fig. 14 ist ein Blockdiagramm, das eine Regeleinrichtung nach dem Stand der Technik veranschaulicht.

AUSFÜHRUNGSBEISPIELE, DIE AM BESTEN ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG GEEIGNET SIND

Eine Regeleinrichtung entsprechend der EP-A-0 201 894 wird nun mit Bezug auf die Fig. 1 und 2 beschrieben. Ein x-Komponentensignal der Verschiebung (Verschiebungssignal $\underline{x}$), das von einem Verschiebungssensor 4 ermittelt ist, wird an eine Steuerschaltung 6 geliefert, die auf das Verschiebungssignal $\underline{x}$ hin einen Steuerstrom in Übereinstimmung mit der rechten oder linken Verschiebung des Rotors 1 vom Mittelpunkt bestimmt. Der Steuerstrom wird mit den rechtsseitigen und linksseitigen Verstärkern 9 verstärkt, um die Steuerströme i_x zu erzeugen, die in die Spulen 2 fließen. Die Richtung der Eingangssteuerströme zu den rechts- und linksseitigen Verstärkern 9 ist so gewählt, daß die durch jeden Elektromagneten ausgeübte Anziehungskraft zentripetal (auf den Mittelpunkt gerichtet) auf den Rotor 1 wirkt. In ähnlicher Weise wird ein durch den Verschiebungssensor 5 ermitteltes Verschiebungssignal $\underline{y}$ an eine Steuerschaltung 8 geliefert und die von den Verstärkern 10 gelieferten Steuerströme i_y werden durch die Spulen 3 geleitet. Die Verschiebungssignale $\underline{x}$ und $\underline{y}$ werden auch an ein resynchrones Komponentennachlauffilter 7 angelegt, welches von den Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$ nur die resynchronen Komponentensignale x_N und y_N herausfiltert. Die drehsynchronen Komponentensignale x_N und y_N werden miteinander kreuzweise vertauscht und mit entgegengesetzter Polarität, bezogen auf die betreffenden Hauptregelkanäle, addiert.

Die Vibrationsdrehbewegung wird besonders beschrieben. Üblicherweise wird die Fig. 3 zur Erklärung einer unausgeglichenen Vibration verwendet. Es wird angenommen, daß die Bewegungsachse O_r des Rotors 1 verschoben ist und die Koordinatenwerte $\underline{x}$ und $\underline{y}$ eingenommen hat, betrachtet von einem

raumfesten Koordinatensystem O-XY, daß der Schwerpunkt G des Rotors 1 die Koordinaten ε_x und ε_y hat, betrachtet von einem rotierenden Koordinatensystem O_r-X_rY_r, das mit dem Rotor 1 fest verbunden ist, und daß der Rotor 1 eine Drehgeschwindigkeit Ω hat. Dann bilden zu einer beliebigen Zeit t die Achse OX und die Achse O_rX_r einen Winkel Ωt, gemessen in Einheiten des Drehwinkels.

Da der Rotor nicht im Gleichgewicht ist, sind die x- und y-Komponenten der Kräfte, die auf den Rotor 1 einwirken,

$$\left.\begin{aligned} F_x &= m\Omega^2 (\varepsilon_x \cos \Omega t - \varepsilon_y \sin \Omega t) \\ F_y &= m\Omega^2 (\varepsilon_x \sin \Omega t + \varepsilon_y \cos \Omega t) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

wobei m die Masse des Rotors ist. Die Kraft F kann in der komplexen Ebene mit $F = F_x + iF_y$ angegeben werden, d.h.

$$\begin{aligned} F &= F_x + iF_y \\ &= m\varepsilon\Omega^2 e^{i\Omega t} \end{aligned} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

wobei i die imaginäre Einheit und $\varepsilon = \varepsilon_x + i\,\varepsilon_y$ ist. Deshalb ist F die vorwärts wirkende Kraft, die sich gleichsinnig mit dem Rotor dreht.

Andererseits kann die Vibration des Rotors 1 durch die Größen der x- und y-Komponenten von x und y festgestellt werden. Die Vibrationsfrequenz stimmt mit der Drehgeschwindigkeit Ω überein und die x- und y-Komponenten x und y werden angegeben mit

$$\left.\begin{aligned} x &= a_x \cos (\Omega t - \theta_x) \\ y &= a_y \cos (\Omega t - \theta_y) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

wobei a_x und a_y die Amplitude der x- und y-Komponenten von $\underline{x}$ und $\underline{y}$ darstellen und θ_x und θ_y stellen die Phasenverschiebung dar, betrachtet vom Drehwinkel aus. Die Vibration kann somit in gleicher Weise in der komplexen Ebene angegeben werden und gezeigt werden, daß die Bewegungsachse eine elliptische Bahn beschreibt, wie das in Fig. 4 gezeigt ist. Da $\theta_y - \theta_x < 180^\circ$ ist, stimmt die Richtung der Bahn mit der der Drehgeschwindigkeit Ω überein und ist daher vorwärtsgerichtet, wie das mit einem Pfeil angegeben ist.

Wenn die Auflagersteifheit durch den Elektromagneten unter der Steuerung der x-Komponentenregelschaltung gleich der infolge des Elektromagneten unter der Steuerung der y-Komponentenregelschaltung ist, d.h. wenn die x- und y-Komponenten der Lagersteifheit in gleicher Weise eingestellt sind, haben die x- und y-Koordinaten $\underline{x}$ und $\underline{y}$ der Vibration die gleiche Amplitude. Die Phasendifferenz zwischen der x- und y-Komponente $\underline{x}$ und $\underline{y}$ beträgt 90°, wobei die x-Komponente $\underline{x}$ 90° der y-Komponente $\underline{y}$ vorauseilt. Dies wird angegeben durch

$$\left.\begin{aligned} a_x &= a_y \\ \theta_y &= \theta_x + 90^\circ \end{aligned}\right\} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (4).$$

In diesem besonderen Fall wirken die x- und y-Komponentenkräfte F_x und F_y symmetrisch auf den Rotor ein, wie in Gleichung (2) angegeben, und die Steifheit des Lagers, das den Rotor trägt, ist symmetrisch. Die x- und y-Komponenten $\underline{x}$ und $\underline{y}$ der Rotorvibration werden zu:

$$\left.\begin{aligned} &\text{x-Komponente } x = a \cos(\Omega t - \theta) \\ &\text{y-Komponente } y = a \sin(\Omega t - \theta) \end{aligned}\right\} \qquad \ldots\ldots\ldots (5)$$

wobei $\underline{a}$ anstelle von $a_x = a_y$ gesetzt ist und θ anstelle θ_x

eingesetzt ist. Die Vibration kann daher in gleicher Weise in der komplexen Ebene angegeben werden, wobei gezeigt wird, daß der Mittelpunkt der Rotorbewegung eine Kreisbahn, wie in Fig. 5 gezeigt, ausführt. Die Richtung der Kreisbahn ist dieselbe wie die der Drehgeschwindigkeit Ω und ist deshalb vorwärts gerichtet.

Wie vorstehend beschrieben, beschreibt die Rotorvibration eine Kreisbahn, wenn die Lagersteifheit gleichförmig ist, jedoch eine elliptische Bahn bei unterschiedlicher Lagersteifheit. Die Bahnrichtung stimmt mit der Drehrichtung des Rotors überein und ist deshalb vorwärts gerichtet. Wenn deshalb die Verschiebung als komplexer Ausdruck angegeben wird, d.h.

$$Z = x + iy \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6),$$

wird die Verschiebung mit den nachfolgenden Formeln angegeben, abhängig davon, ob die Lagersteifheit gleich- oder ungleichmäßig ist.

Für ein homogenes Lager gilt

$$Z = ae^{i\Omega t} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

und für ein inhomogenes Lager gilt

$$Z = a_f e^{i\Omega t} + a_b e^{-i\Omega t} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

wobei $\underline{a}$, a_f und a_b komplexe Zahlen sind, die eine komplexe Amplitude angeben, und $|a_f| > |a_b|$ ist. Im allgemeinen tendiert das elektromagnetische Lager bei niedrigen Drehzahlen zur Inhomogenität und nähert sich mit zunehmenden Drehzahlen dem homogenen Zustand.

Die x- und y-Komponenten der oben beschriebenen Verschiebung infolge der unausgeglichenen Vibration werden durch die Veschiebungssensoren 4 und 5 ermittelt. Die ermittelten Verschiebungssignale $\underline{x}$ und $\underline{y}$ werden dem drehsynchronen Nachlauffilter 7 zugeleitet, das nur die drehsynchronen Komponentensignale x_N und y_N von den Vibrationsverschiebungskomponenten des Rotors ausfiltert. Wenn die Lagerreaktionskräfte symmetrisch sind, wird die drehsynchrone unausgeglichene Vibration $Z_N = x_N + iy_N$ entsprechend Formel (7) und wird zu

$$Z_N = ae^{i\Omega t} \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (9),$$

wobei

$$\left.\begin{aligned} x_N &= a_N \cos(\Omega t - \theta_N) \\ y_N &= a_N \sin(\Omega t - \theta_N) \end{aligned}\right\} \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

und $a = a_N e^{-i\theta N}$.

Nun ist es wichtig zu wissen, daß

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_N &= -\Omega y_N \\ \dot{y}_N &= +\Omega x_N \end{aligned}\right\} \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

sind. Wenn die unausgeglichene Vibration eine Kreisbahn beschreibt, die von der x-Achse zur y-Achse in der gleichen Richtung wie die Drehrichtung des Rotors, wie in Fig. 5 gezeigt, fortschreitet, entspricht eine Signal, das einer Vibration in x-Richtung um 90° vorauseilt, einer Vibration in y-Richtung und ein Signal, das einer Vibration in y-Richtung um 90° voreilt, wird durch eine Vibration in x-Richtung vorhergesagt. Diese Vorhersage bedeutet eine Dif-

ferentiationsoperation, die physikalisch mit der obigen Gleichung (11) übereinstimmt.

Wenn nur die drehsynchronen Vibrationskomponenten betrachtet werden, gilt die Gleichung (11) und das Ausgangssignal x_N des Nachlauffilters 7 kann vorteilhaft für das Differentiationssignal $\dot{y}_N$ und das Ausgangssignal y_N kann vorteilhaft für das Differentiationssignal $-\dot{x}_N$ verwendet werden. Deshalb wird, um die y-Komponente der Dämpfung zu erhalten, das Signal x_N mit α multipliziert und in den y-Komponentenkanal zur Addition eingegeben. Andererseits, um die x-Komponente der Dämpfung zu erhalten, wird das Signal y_N mit $-\alpha$ multipliziert und zur Addition in den x-Komponentenkanal eingegeben. So wird in Fig. 1 das Signal y_N mit α multipliziert und zur Subtraktion in den x-Komponentenkanal eingegeben.

Für die drehsynchronen Vibrationskomponenten werden die Signale x_N und y_N kreuzweise vertauscht und zur Addition und Subtraktion in die entgegengesetzten Kanäle eingegeben, um auf diese Weise die Reaktionskräfte zu erhalten, die angegeben sind mit

$$F_x = -\alpha y_N \equiv k_{xy} y \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

$$F_y = +\alpha x_N \equiv +k_{yx} x \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

Für $k_{xy} < 0$ wird gesetzt $k_{yx} > 0$. Somit kann die Dämpfung der auftretenden Vibration des Rotors wirkungsvoll verbessert werden.

Obgleich bessere Resultate mit einem größeren Koeffizienten für die Kanalvertauschungs-Additions- und -subtraktionseingabe erhalten werden könnten, ist die Größe des Koeffizien-

ten begrenzt, um eine Sättigung der elektronischen Schaltungen zu vermeiden, und der Verstärkungsgrad von α kann so eingestellt werden, daß eine passende Resonanzamplitude erhalten wird.

Nachfolgend wird das Prinzip des Nachlauffilters mit Bezug auf Fig. 6 beschrieben. Wenn der Rotor in der Nähe eines Resonanzpunktes im Biegungsmomentmodus sich dreht, wird die Rotorvibration teilweise, aber grundsätzlich wegen der vorwärtsdrehsynchronen Vibrationskomponente verursacht und teilweise wegen einer Schwankung des Rotors, die durch äußere Kräfte verursacht ist, z.B. durch Schütteln des Gehäuses. Die Schwankung weist eine Vibrationsfrequenz auf, die sich der Eigenvibrationsfrequenz im Festkörpermodus nähert und die deshalb niedriger als die Drehzahl des Rotors ist. Folglich wird dem Nachlauffilter 7 eine Eingangs-Rotor-Vibration Z_{in} zugeführt, deren komplexer Ausdruck durch die Gleichung (7) gegeben ist und angegeben werden kann mit

$$Z_{in} = (\text{Schwankung}) + ae^{i\Omega t} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

und das Filter 7 liefert nur die drehsynchronen Komponenten Z_{out} (in komplexer Form), das ist

$$Z_{out} = ae^{i\Omega t} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

Im wesentlichen ist das Nachlauffilter wie in Blockform in Fig. 6 gezeigt aufgebaut.

Wie aus Fig. 6 ersichtlich, wird das Eingangssignal Z_{in} zuerst mit $e^{-i\Omega t}$ multipliziert, um es in eine Signal Z_1 umzuwandeln, bezogen auf das Drehkoordinatensystem. Dies wird angegeben durch

$$Z_1 \equiv e^{-i\Omega t} Z_{in} \equiv (\text{Schwankung}) \times e^{i\Omega t} + a \quad .... (16)$$

Die Gleichung (16) zeigt, daß die drehsynchrone Komponente $ae^{i\Omega t}$ in Gleichung (14) in eine Gleichspannungskomponente a im Signal Z_1 umgewandelt worden ist, betrachtet vom Drehkoordinatensystem aus. Es ist auch anzumerken, daß der erste Term niedriger Frequenz im festen Koordinatensystem für Z_{in} wechselt zum ersten Term hoher Frequenz im Drehkoordinatensystem für Z_1.

Um die drehsynchrone Gleichspannungskomponente a auszufiltern, wird das Signal Z_1 durch ein Tiefpaßfilter 12 geleitet. Das Tiefpaßfilter 12 erzeugt ein Ausgangssignal Z_2 gleich

$$Z_2 \approx a \quad ..... (17)$$

Die Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters 12 ist kleiner als die Drehzahl und liegt bei einigen Hz oder weniger und beträgt ungefähr 0,1 Hz. Die Verstärkung dieses Tiefpaßfilters 12 ist 1 (eins).

Nachfolgend wird das Signal Z_2 des Drehkoordinatensystems mit $e^{i\Omega t}$ multipliziert, um invers in ein Signal im festen Koordinatensystem umgewandelt zu werden. es ergibt sich, daß nur die synchrone Koordinate vom Eingangssignal Z_{in} ausgefiltert wird, um das Ausgangssignal Z_{out} nach Gleichung (15) zu liefern.

Die Fig. 7 veranschaulicht eine andere Regelvorrichtung nach der EP-A-0 201 894. Eine in Fig. 7 gezeigte Schaltungsanordnung dient zur Unterdrückung der unausgeglichenen Vibration nach Gleichung (8) bei ungleichmäßiger Lagersteifheit, die die elliptische Umlaufbahn der Fig. 4 be-

schreibt.

Bei diesem Ausführungsbeispiel kann der vorwärtsgerichtete Vibrationsterm $a_f e^{i\Omega t}$ in Gleichung (8) in der gleichen Weise wie im vorhergehenden Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 unterdrückt werden. Um den rückwärtsgerichteten Vibrationsterm $a_b e^{-i\Omega t}$ zu unterdrücken, kann die Verarbeitung der vorwärtsgerichteten Vibration umgekehrt werden. Genauer gesagt, ein drehsynchrones Nachlauffilter 11 für die Rückwärtsdrehung ist zusätzlich vorgesehen und die drehsynchronen Komponenten x_{NB} und y_{NB} (die vorwärtsgerichteten drehsynchronen Komponenten sind mit x_{NF} und y_{NF} in Fig. 7 bezeichnet) werden einer gekreuzten Kanal-Addition und -Subtraktion unterworfen durch Eingabe unter Verwendung des Koeffizienten ß, der die umgekehrte Polarität von α aufweist. Durch Anwendung dieses Nachlauffilters ist es möglich, die unausgeglichene Vibration des von einem asymmetrischen Lager getragenen Rotors zu unterdrücken.

Durch Anwendung des drehsynchronen Nachlauffilters und der kreuzweisen Kanalvertauschung entsprechend der Erfindung werden Versuchsergebnisse erzielt, die in Fig. 8 graphisch veranschaulicht sind, wobei die Abszisse die Drehzahl und die Ordinate die Vibrationsamplitude darstellen. Die Kurve ist bei der Unstetigkeitsstelle bezeichnet mit "AN", wenn das System nach Fig. 1 in Betrieb ist, und bei Unstetigkeitsstelle bezeichnet mit "AUS", wenn die Kanalvertauschung abgeschaltet ist und α zu Null gemacht ist. Man sieht, daß die Vibrationsamplitude abrupt bei "AN" verringert wird und einen großen Wert bei "AUS" annimmt.

Aus der vorangehenden Beschreibung kann entnommen werden, daß die unausgeglichene Vibration aktiv durch die nachfolgenden Schritte unterdrückt werden kann. An erster Stelle

werden die x- und y-Komponenten der Rotorvibration (Verschiebungssignale $\underline{x}$ und $\underline{y}$) ermittelt und dem Nachlauffilter zugeleitet, das die drehsynchronen Komponentensignale x_N und y_N aus den Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$ ausfiltert, und an zweiter Stelle werden die ausgefilterten Signale x_N und y_N gekreuzt (vertauscht) und in den y-Komponentenkanal eingegeben, um mit dem verarbeiteten Verschiebungssignal $\underline{y}$ addiert zu werden, bzw. in den x-Komponentenkanal, um mit dem verarbeiteten Verschiebungssignal $\underline{x}$ addiert zu werden. Die Vorzeichen der Signale x_N und y_N sind voneinander verschieden, das eine stellt die Addition und das andere die Subtraktion dar.

Zusammengefaßt ergibt sich, daß diese Erfindung dadurch gekennzeichnet ist, daß die zu regelnden Frequenzkomponentensignale aus den ermittelten Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$ hergeleitet werden, und kreuzweise vertauscht mit entgegengesetzten Vorzeichen mit der Hauptregelschaltung in $\underline{x}$- und $\underline{y}$-Richtung verbunden sind, um sicherzustellen, daß Differentiationssignale, d.h. Vibrationsunterdrückungssignale, erhalten werden.

Es wird bemerkt, daß ein Rotor, der eine Flüssigkeit umschließt, eine selbsterregte Vibration mit einer von der Drehzahl abhängigen Frequenz erfährt. Eine derartige selbsterregte Vibration kann, wie nachfolgend beschrieben, unterdrückt werden.

Die Fig. 9 zeigte einen Augenblick, bei dem ein Rotor eine selbsterregte Vibration erfährt infolge einer im Inneren des Rotors befindlichen Flüssigkeit. Nach Fig. 9 besteht ein Rotor aus einer Trommel 15, die mit einer einzigen Drehwelle 14 verbunden ist, die von üblichen passiven oberen und unteren Kugellagern 16 und 12 getragen wird. Dieser

Rotor bildet eine Zentrifuge, bei der die Flüssigkeit durch einen oberen Teil der Drehwelle 14 in die Trommel 15 eingefüllt wird und durch einen unteren Teile der Drehwelle 14 abgelassen wird. Der axiale Fluß der Flüssigkeit im Rotor verursacht eine selbsterregte Rotorvibration mit einer Frequenz in einem bestimmten Frequenzbereich A, wie in Fig. 10 gezeigt. Diese Vibration findet statt innerhalb eines bestimmten Drehzahlbereiches B.

Die Frequenz der selbsterregten Vibration ist mit einem "Δ"-Symbol in Fig. 10 eingezeichnet. Um diese selbsterregte Vibration zu unterdrücken, ist ein elektromagnetisches Lager 13 vorgesehen, wie das in Fig. 9 gezeigt ist. Ein Sensor 17 ermittelt den Betrag der Verschiebung der Drehwelle 14 und bildet ein Verschiebungssignal. Ein Steuersignal, das auf dem Verschiebungssignal beruht, wird durch das elektromagnetische Lager 13 geleitet, um die selbsterregte Vibration zu unterdrücken.

Um auf die Verhinderung der selbsterregten Vibration im einzelnen einzugehen, ist zu berücksichtigen, daß die mit "Δ" bezeichnete Frequenz der selbsterregten Vibration von der Drehzahl verschieden ist und vorhersehbar ist in der Entwicklungsphase als Eigenvibrationsfrequenz in Abhängigkeit von der Rotorkonfiguration und der Auflagersteifheit der Kugellager. Die Kurven W_f und W_b stellen Vorhersagewerte der vorwärts- bzw. der rückwärtsgerichteten Eigenvibrationsfrequenz dar. Die Richtung der selbsterregten Vibration infolge des Flüssigkeitsflusses ist vorwärtsgerichtet, wie in Fig. 11 gezeigt. Die gemessene Frequenz Δ der selbsterregten Vibration kann vorhergesagt werden durch die Berechnung als vorwärtsgerichtete Eigenvibrationsfrequenz W_f, wie aus Fig. 10 ersichtlich ist. Die selbsterregte Vibration kann mittels einer Regelschaltung, die in

Fig. 12 gezeigt ist und die eine erste Ausführungsform der Erfindung darstellt, verhindert werden.

Nach Fig. 12 sind die x- und y-Koordinatensteuerschaltungen 6 und 8 identisch mit denen der früheren Ausführungsbeispiele. Im Ausführungsbeispiel nach Fig. 12 wird ein Signal W_n anstelle eines Impulses verwendet, um das Nachlauffilter 7 zu triggern, wobei das Signal W_n durch einen Oszillator 18 mit der gleichen Frequenz wie die der Eigenvibrationsfrequenz erzeugt wird. Das Nachlauffilter 7 filtert die x- und y-Komponentensignale x_f und y_f der selbsterregten Vibration von den Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$ aus. Insbesondere infolge des Umstandes, daß die selbsterregte Vibration vorwärtsgerichtet ist, werden die Komponentensignale x_f und y_f kreuzweise vertauscht, so daß das Komponentensignal y_f negativ zum x-Komponentenkanal addiert wird und das Komponentensignal x_f wird positiv zum y-Komponentenkanal addiert. Das elektromagnetische Lager 13 kann infolgedessen eine Vibrationsverhinderungsdämpfung bewirken, wie im Falle einer unausgeglichenen Vibration.

Wie in Fig. 10 gezeigt, verändert sich die Frequenz der selbsterregten Vibration geringfügig mit der Drehzahl. Die selbsterregte Vibrationsfrequenz ist jedoch inhärent vom Rotor und zu einem gewissen Grad vorhersehbar. Folglich werden Bandpaßfilter 19 und 20 in einem Nachlauffilter 7' verwendet, wie in Fig. 13 gezeigt, zur Ausfilterung der Sollfrequenzkomponentensignale x_n und y_n aus den Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$. Unter Berücksichtigung, daß die selbsterregte Vibration vorwärtsgerichtet ist, werden die Ausgangssignale x_n und y_n des Nachlauffilters 7' kreuzweise vertauscht und den y- und x-Komponentenkanälen hinzugefügt, so daß sie zu den verarbeiteten Verschiebungssignalen $\underline{y}$ und $\underline{x}$ mit entgegengesetzter Polarität addiert werden.

Die selbsterregte Vibration tendiert mit zunehmender Drehzahl rückwärtsgerichtet zu sein. In Fig. 10 z.B. konvergiert die rückwärtsgerichtete selbsterregte Vibration mit niedrigen Eigenvibrationsfrequenzen, wie das mit dem Symbol "□" angegeben ist. Um die rückwärtsgerichtete selbsterregte Vibration zu verhindern ist das Nachlauffilter 7' der Fig. 13 mit Tiefpaßfiltern 19' und 20' ausgestattet und filtert die niederfrequenten Komponentensignale x_n und y_n aus den Verschiebungssignalen $\underline{x}$ und $\underline{y}$ aus. Die Ausgangssignale x_n und y_n des Nachlauffilters 7' werden kreuzweise vertauscht und zu den y- und x-Komponentenkanälen zu den verarbeiteten Verschiebungssignalen $\underline{y}$ und $\underline{x}$ mit entgegengesetzten Vorzeichen addiert. Der Gesamtsummenpunkt wird auf einen positiven Wert beim x-Komponentenkanal gesetzt und auf einen negativen Wert beim y-Komponentenkanal, um so es zu ermöglichen, die rückwärtsgerichtete selbsterregte Vibration zu unterdrücken.

Auf diese Weise werden die Ausgangssignale des Filters zur Ausfilterung der Vibrationsfrequenzsignale innerhalb eines Sollfrequenzbereichs kreuzweise vertauscht und zu den x- und y-Komponentenkanälen so eingegeben, daß sie zur Hauptregeleinrichtung in den x- und y-Kanälen mit entgegengesetzten Vorzeichen addiert werden. Die Polarität des Gesamtsummenpunktes der x- und y-Komponentenkanäle hängt davon ab, ob die zu regelnde Vibration vorwärts- oder rückwärtsgerichtet ist.

Da die Richtung der Vibration mit der Drehzahl des Rotors wechselt, kann ein vor dem Filter angebrachter Schalter in Abhängigkeit von der Drehzahl betätigt werden, um entweder die vorwärts- oder die rückwärtsgerichtete Vibration zu unterdrücken. Aus der Fig. 10 ist ersichtlich, daß die selbsterregte Vibration innerhalb des angegebenen Drehzahl-

bereichs verursacht wird. Die Anordnung zur Unterdrückung der selbsterregten Vibration braucht deshalb nur innerhalb dieses Bereichs betätigt werden.

Wie vorstehend beschrieben worden ist, kann entsprechend der Erfindung sogar dann, wenn sich der Rotor nahe der Resonanzfrequenz dreht, die vorwärtsgerichtete unausgeglichene Vibration ohne Zuhilfenahme irgendeiner Differentiationsschaltung unterdrückt werden. Es kann ferner auch die selbsterregte Vibration unterdrückt werden.

INDUSTRIELLE ANWENDBARKEIT

Diese Erfindung ist für eine Regeleinrichtung für einen magnetisch gleitenden Rotor, der von einem elektromagnetischen Lager getragen wird, und insbesondere für eine elektromagnetische Lagerregeleinrichtung zur Unterdrückung der Vibrationsamplitude der Vibrationsdrehbewegung des Rotors auf ein Minimum anwendbar.

Patentansprüche

1. Regeleinrichtung für ein elektromagnetisches Lager mit Mitteln (4, 5) zur Ermittlung orthogonaler x- und y-Komponentensignale der radialen Verschiebung des Rotors (1) und Servoschaltungsmitteln (6, 7, 7', 8, 9, 10) zur Steuerung von Strömen, die zu elektromagnetischen Spulen (2, 3) geliefert werden in Übereinstimmung mit den Verschiebungs-x- und -y-Komponentensignalen der Ermittlungsmittel (4, 5) in der Weise, daß der Rotor (1) in einer vorbestimmten radialen Stellung gehalten wird, wobei die Servoschaltungsmittel bestehen aus:

   einer x-Komponentensteuerschaltung (6) zur Verarbeitung des Verschiebungs-x-Komponentensignals;

   einer y-Komponentensteuerschaltung (8) zur Verarbeitung des Verschiebungs-y-Komponentensignals;

   selektiven Filtermitteln (7, 7') zur Ausfilterung einer zu regelnden Frequenzkomponente von den Verschiebungs-x- und -y-Koordinatensignalen; und

   Mitteln zur Lieferung dieser Verschiebungs-x- und -y-Komponentensignale zu den selektiven Filtermitteln (7, 7');

   d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß das selektive Filtermittel (7, 7') eine Frequenz einer selbsterregten Vibration ausfiltert, die bei der Drehung des Rotors (1) entsteht; und

   eine Komponente der x- und y-Komponentensignale (x_f; X_n/oder Y_n), geliefert vom selektiven Filtermittel (7, 7'), wird zu der anderen Komponente der verarbeiteten

x- und y-Komponentensignale, geliefert von der anderen der x- und y-Komponentensteuerschaltungen (8; 8 oder 6), addiert; und
die andere der x- und y-Komponentensignale der Frequenzkomponenten (Y_f; Y_n oder X_n), geliefert vom selektiven Filtermittel (7, 7'), wird subtrahiert von einer Komponente der verarbeiteten Verschiebungs-x- und -y-Komponentensignalen, geliefert als Ausgangssignale der x- und y-Komponentensteuerschaltungen (6; 6 oder 8).

2. Regeleinrichtung nach Anspruch 1, bei der das Filtermittel ein Bandpaß-Filtermittel (19, 20; 19', 20') ist, dessen Frequenz mit der Frequenz der selbsterregten Vibration übereinstimmt.

3. Regeleinrichtung nach Anspruch 1, bei der das Filtermittel (7, 7') aus einem Nachlauffilter zur Ausfilterung der Frequenz der selbsterregten Vibration ist.

FIG. 1

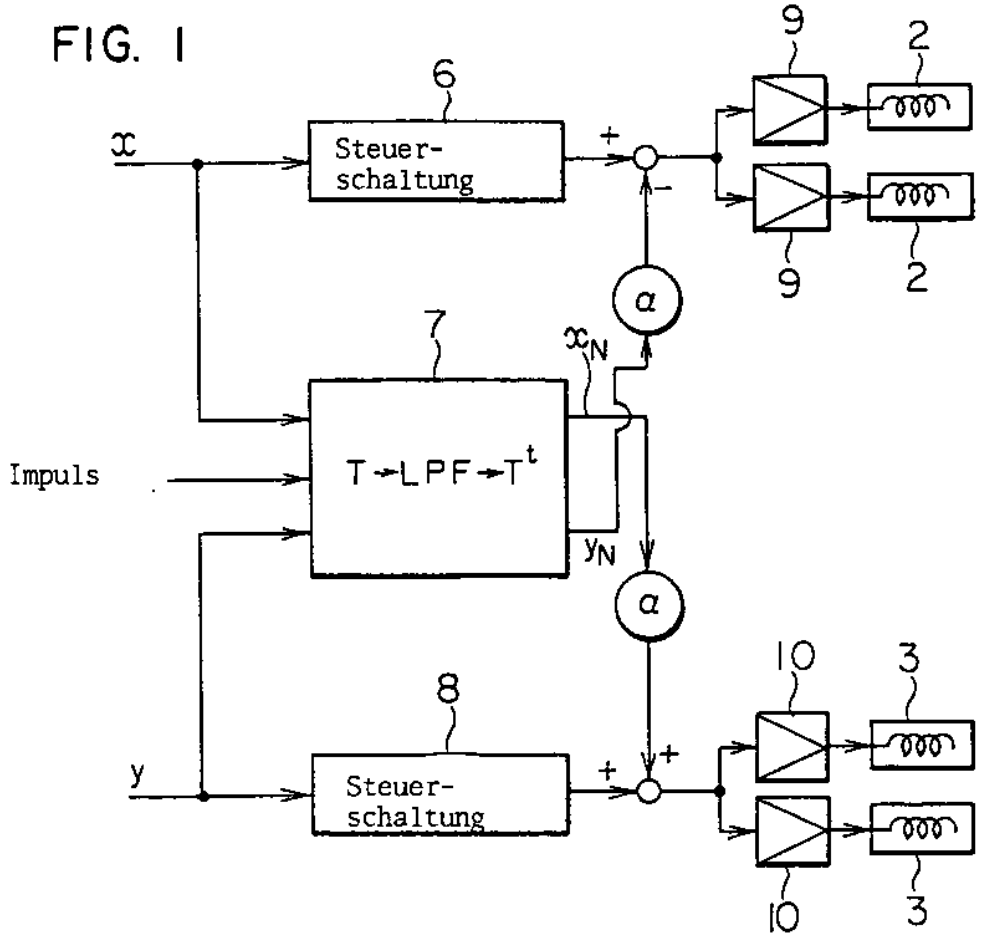

x
6
Steuer-
schaltung
+
−
9
2
9
2
α
7
x_N
Impuls
T→LPF→T^t
y_N
α
10
3
8
y
Steuer-
schaltung
+
+
10
3

FIG. 2

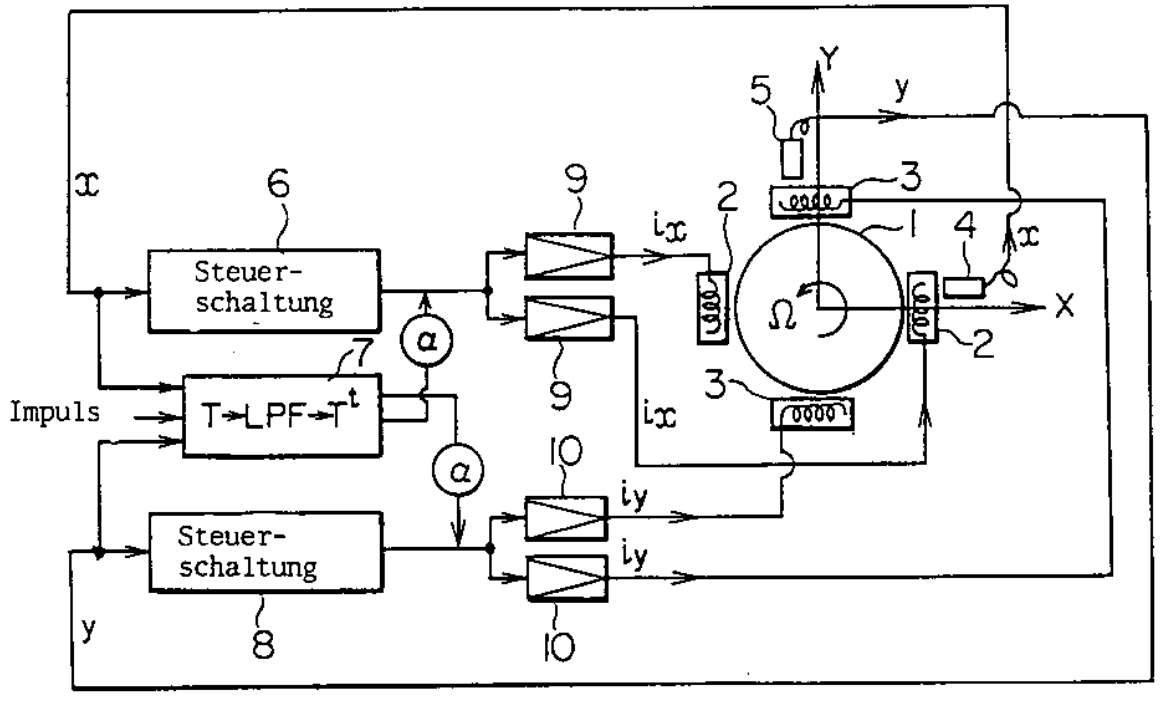

Y
y
5
x
6
9
2
3
1
4
i_x
x
Steuer-
schaltung
α
Ω
X
7
Impuls
T→LPF→T^t
9
i_x
2
3
α
10
i_y
Steuer-
schaltung
i_y
y
8
10

FIG. 3

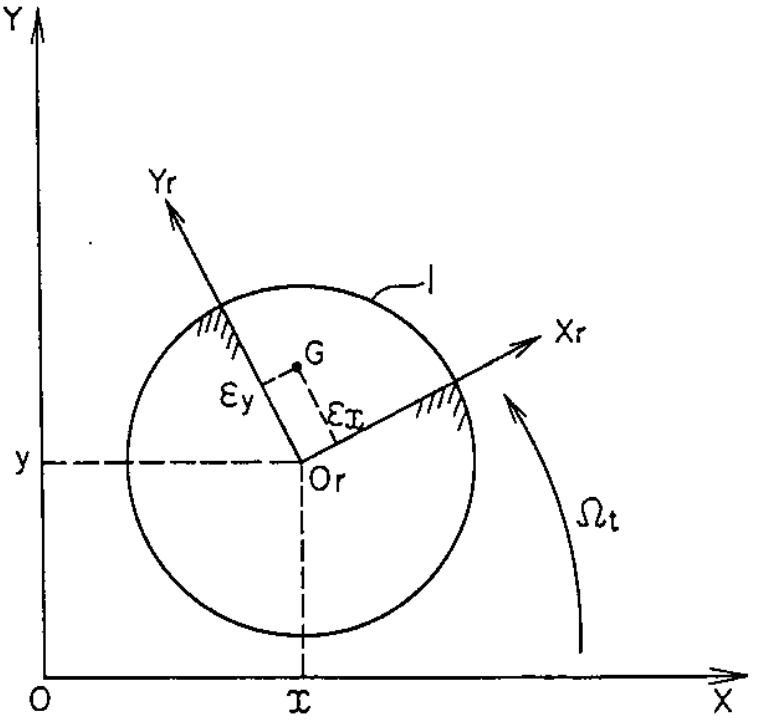


FIG. 4

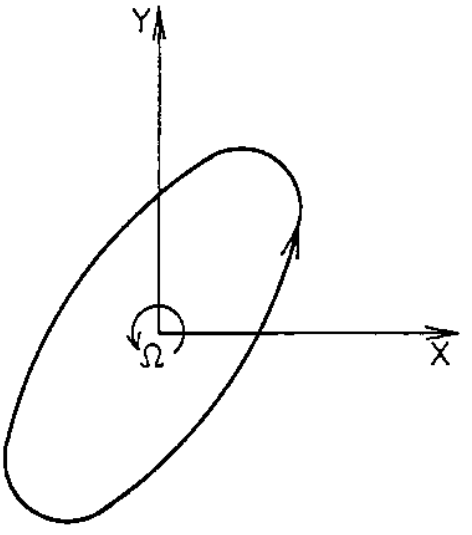


FIG. 5

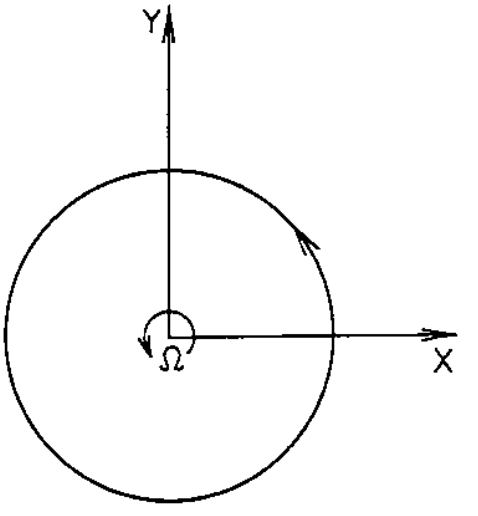


FIG. 6

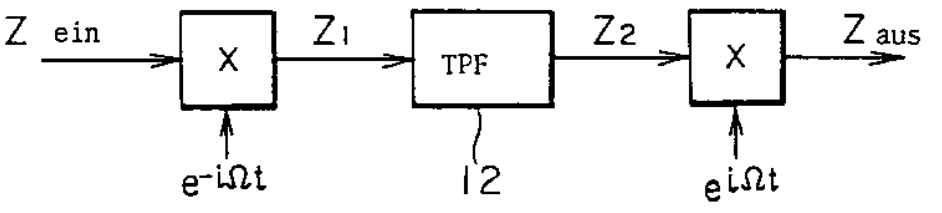


FIG. 7

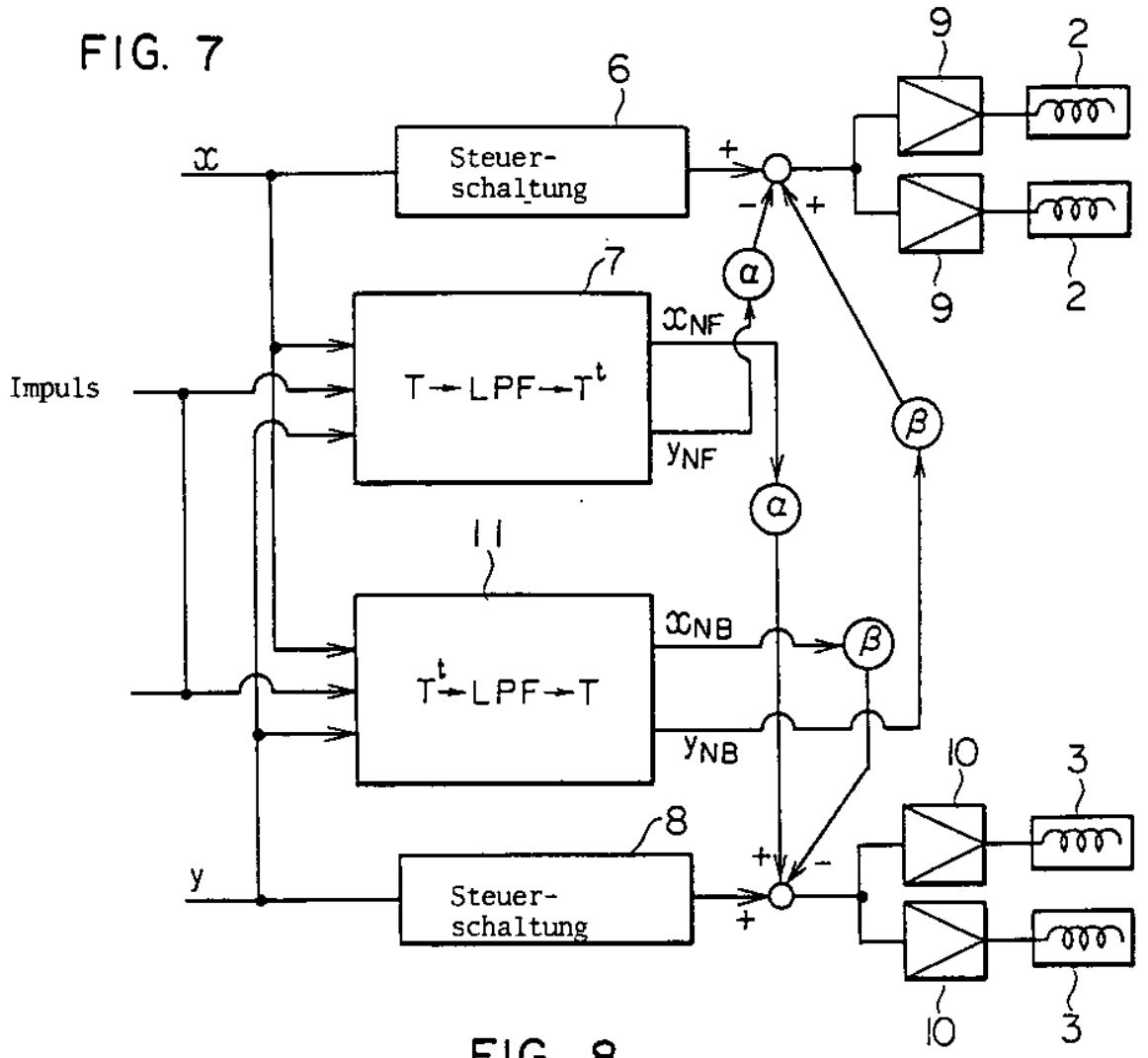

6
Steuer-
schaltung
x
+
−
+
9
2
9
2
α
7
x_{NF}
T→LPF→T^t
y_{NF}
Impuls
β
α
11
x_{NB}
T^t→LPF→T
β
y_{NB}
10
3
8
y
Steuer-
schaltung
+
−
+
10
3

FIG. 8

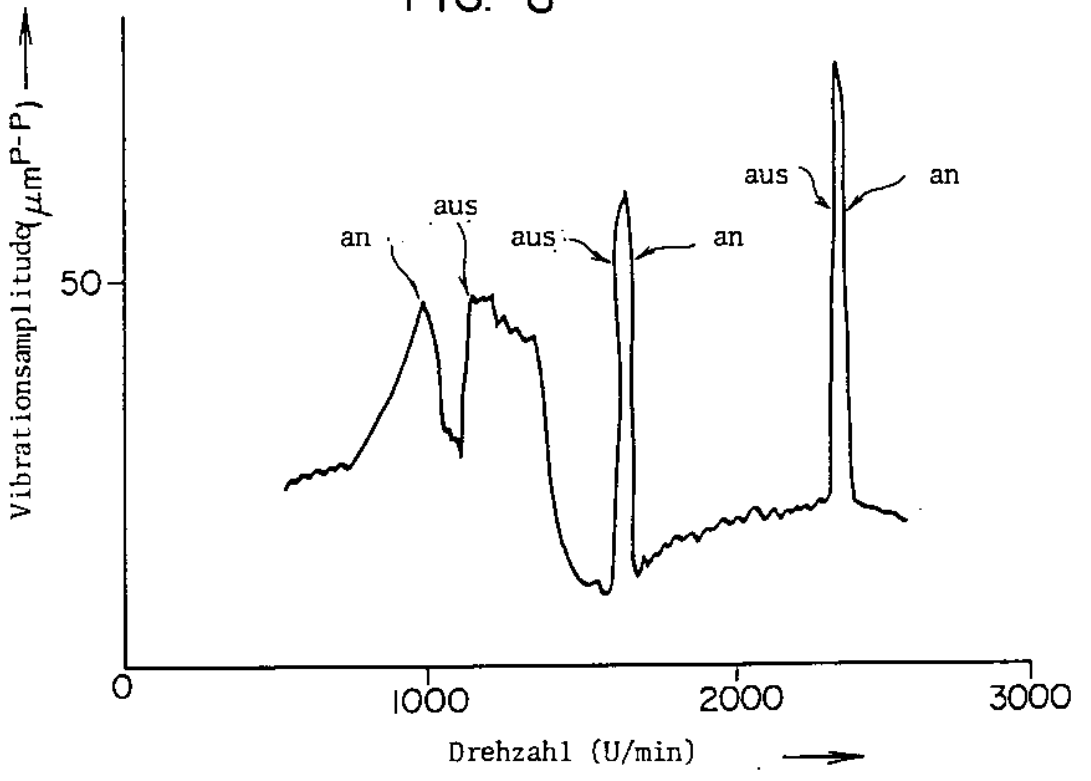

Vibrationsamplitude (μm^{P-P})
50
0
1000
2000
3000
Drehzahl (U/min)
an
aus
aus
an
aus
an

FIG. 9

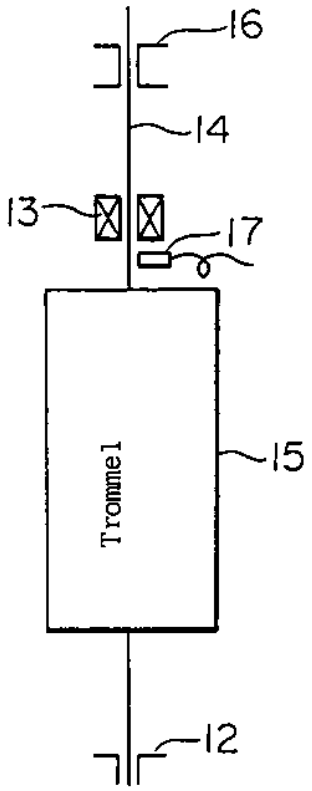


FIG. 11

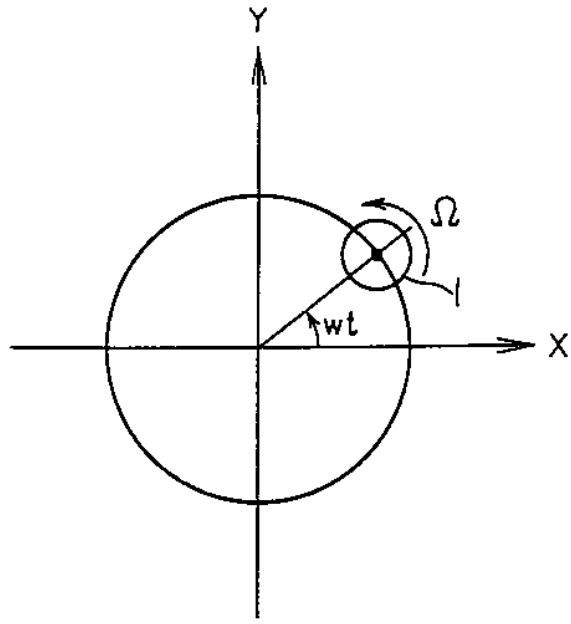


FIG. 10

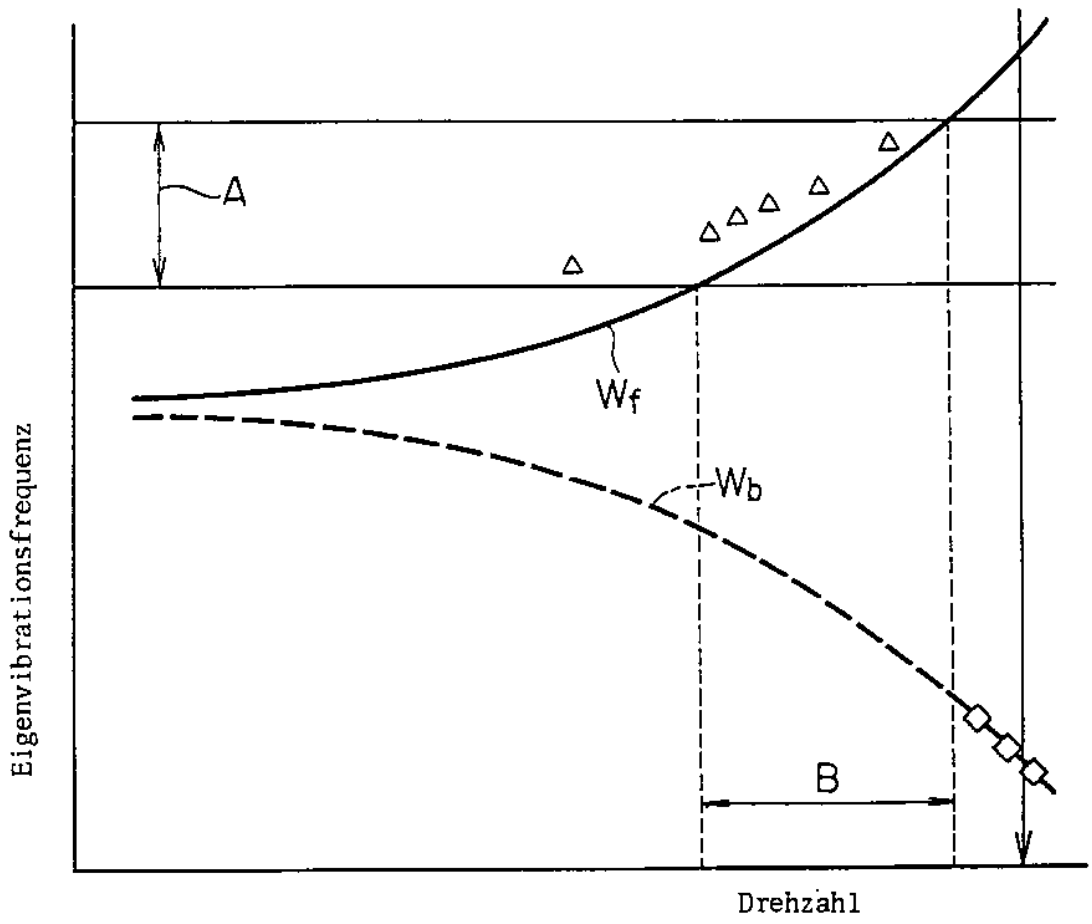


FIG. 12

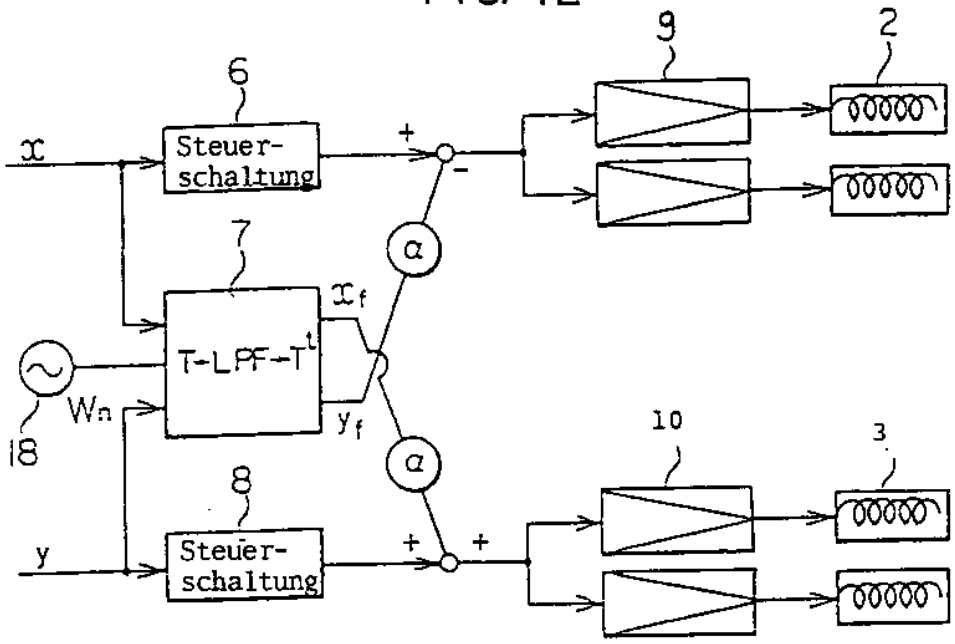

9
2
6
x
Steuer-
schaltung
+
-
α
7
x_f
T-LPF-T'
y_f
Wn
18
10
3
8
y
Steuer-
schaltung
+
+

FIG. 13

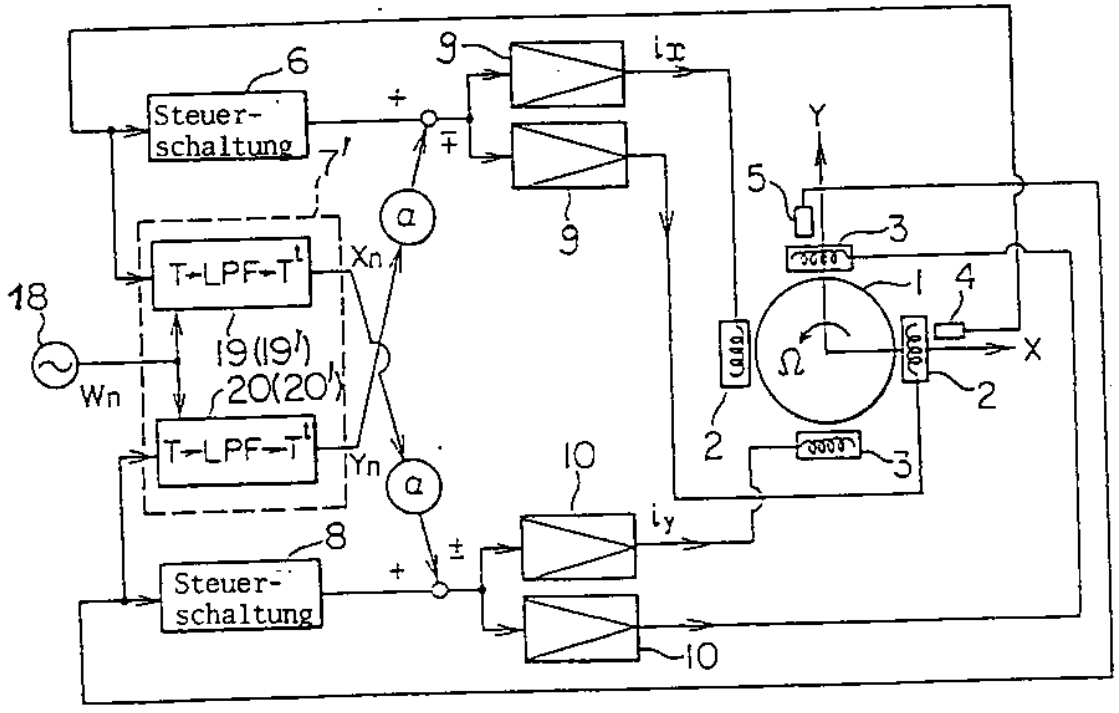
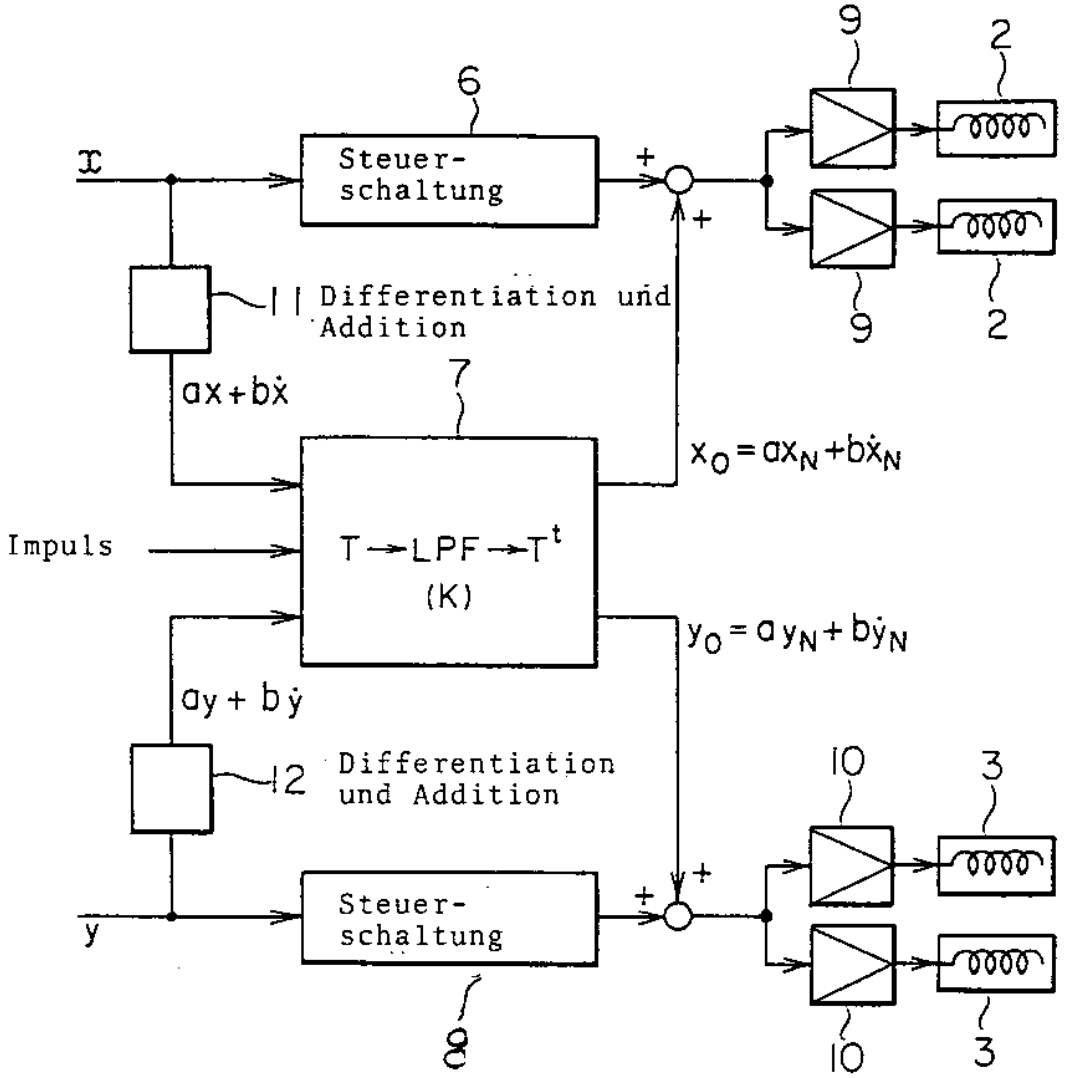

9
i_x
6
Steuer-
schaltung
+
∓
7'
α
Y
5
3
T-LPF-T'
Xn
1
4
18
19(19')
20(20')
Wn
Ω
X
2
T-LPF-T'
Yn
3
10
i_y
8
Steuer-
schaltung
+
±
10

FIG. 14

Stand der Technik