

⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑪ DE 2905583 C2

⑤ Int. Cl. 4:
F16C 32/04

⑲ Aktenzeichen: P 29 05 583.2-51
⑳ Anmeldetag: 14. 2. 79
㉑ Offenlegungstag: 30. 8. 79
㉒ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 21. 7. 88

DE 2905583 C2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

③① Unionspriorität: ③② ③③ ③④
20.02.78 FR 7804769

③⑤ Patentinhaber:
Société Européenne de Propulsion, Putaux,
Hauts-de-Seine, FR

③⑥ Vertreter:
Kohler, R., Dipl.-Phys.; Schwindling, H., Dipl.-Phys.;
Rüdel, D., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.,
Pat.-Anwälte, 7000 Stuttgart

③⑦ Erfinder:
Hebermann, Helmut; Brunet, Maurice, Vernon, FR

③⑧ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:
DE-OS 25 01 218
DE-OS 22 63 093
US-Buch: Fundamentals of Solid-State Electronics,
R.Pascoe, 1976, S. 159-161;

③⑨ Regelschaltung für ein elektromagnetisches Lager mit Strom-Gegenkopplungsschleife

DE 2905583 C2

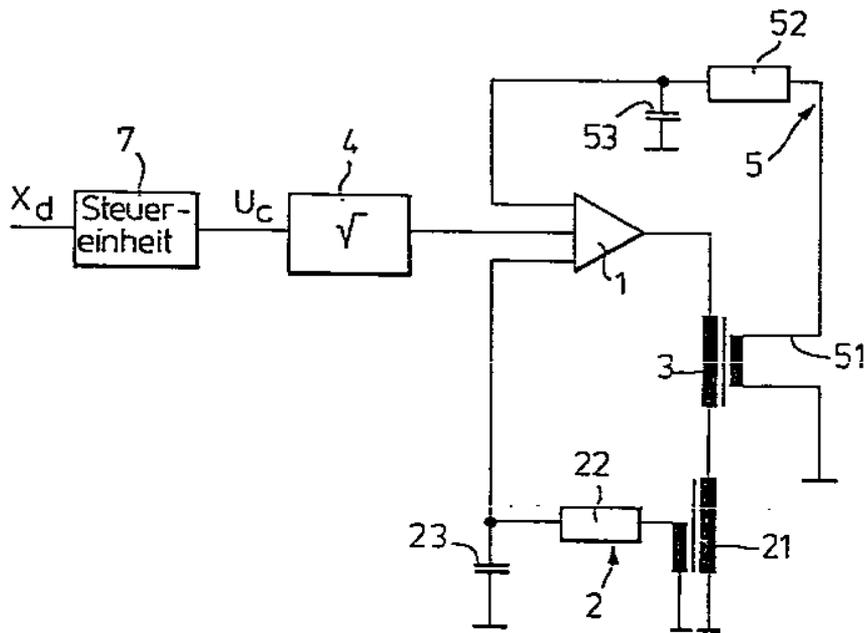


Fig. 1

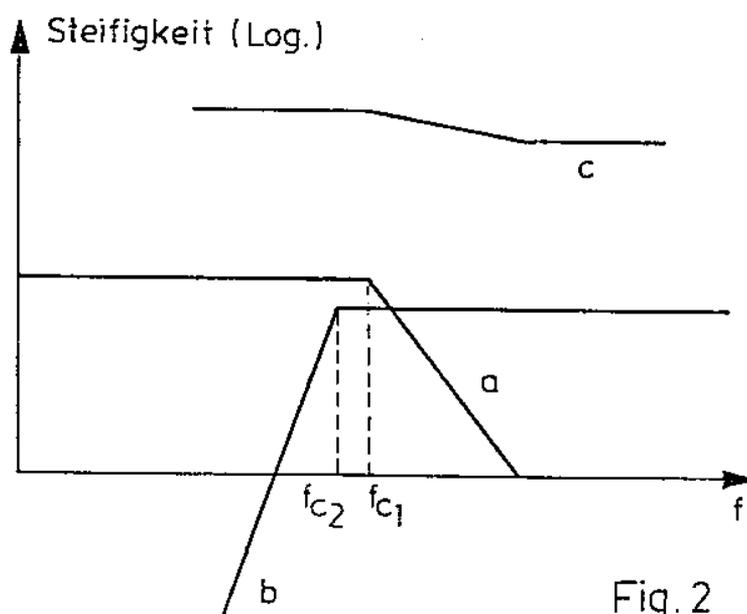


Fig. 2

Patentansprüche

1. Regelschaltung für ein elektromagnetisches Lager, mit einer elektromagnetischen Wicklung, die ein einen Rotor stützendes Magnetfeld erzeugt, mit einer auf die Stellung des Rotors im Lager ansprechenden Sensoranordnung und mit einem Verstärker mit einer Strom-Gegenkopplungsschleife, der in Abhängigkeit von einem ihm von der Sensoranordnung zugeführten Signal die Stärke des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes bestimmt, dadurch gekennzeichnet, daß in der Nähe der elektromagnetischen Wicklung (3) eine Hilfsspule (51) mit verminderter Windungszahl angeordnet ist, die mit der elektromagnetischen Wicklung gekoppelt ist und ein Signal liefert, das den Schwankungen des magnetischen Flusses im Luftspalt des elektromagnetischen Lagers proportional ist, daß das von der Hilfsspule (51) gelieferte Signal einem ersten Hilfsintegrationskreis (52, 53) zugeführt wird, dessen Ausgang mit dem Eingang des Verstärkers (1) der Regelschaltung verbunden ist, und daß die Strom-Gegenkopplungsschleife (2) einen zweiten Hilfsintegrationskreis (22, 23) enthält.

2. Regelschaltung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Hilfsintegrationskreis (22, 23) einen Durchlaßbereich und eine Verstärkung aufweist, der bzw. die ebenso groß ist wie der Durchlaßbereich bzw. die Verstärkung des ersten Hilfsintegrationskreises (52, 53).

3. Regelschaltung für ein elektromagnetisches Lager, mit einer elektromagnetischen Wicklung, die ein einen Rotor stützendes Magnetfeld erzeugt, mit einer auf die Stellung des Rotors im Lager ansprechenden Sensoranordnung und mit einem Verstärker mit einer Strom-Gegenkopplungsschleife, der in Abhängigkeit von einem ihm von der Sensoranordnung zugeführten Signal die Stärke des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes bestimmt, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Sensoranordnung (8) und Verstärker (1) eine Kompensationsschaltung (6) geschaltet ist, die ein Additionsmitglied (61) mit zwei Eingängen, deren erstem unmittelbar das Ausgangssignal (x_0) der Sensoranordnung (8) und deren zweitem ein für die mittlere Stellung des Rotors charakteristisches Signal (x_0) zugeführt wird, und ein dem Verstärker (1) vorangehendes Multiplikationsglied (62) umfaßt, welches das Produkt aus dem von der Sensoranordnung (8) abgeleiteten Signal (U_0) und dem Ausgangssignal des Additionsmitgliedes (61) bildet.

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Regelschaltung für ein elektromagnetisches Lager, mit einer elektromagnetischen Wicklung, die ein einen Rotor stützendes Magnetfeld erzeugt, mit einer auf die Stellung des Rotors im Lager ansprechenden Sensoranordnung und mit einem Verstärker mit einer Strom-Gegenkopplungsschleife, der in Abhängigkeit von einem ihm von der Sensoranordnung zugeführten Signal die Stärke des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes bestimmt.

Eine solche Regelschaltung ist aus der DE-OS 25 01 218 bekannt. Sie weist eine zusätzliche Einrichtung zur Erhöhung der Steifigkeit des Lagers während

der Anlaufphase des Rotors auf, die einen Tachometer zum Feststellen der Drehzahl der Welle, einen Schwellenwertdetektor und Quellen für Zusatzströme mit Schaltern umfaßt, die den Leistungsverstärkern für die den einzelnen Lagern zugeordneten elektromagnetischen Wicklungen zusätzliche Leistung zuführen, bis der Schwellenwertdetektor, dem das Ausgangssignal des Tachometers zugeführt wird, das Überschreiten einer vorgegebenen Drehzahl meldet.

Diese Einrichtung ist kompliziert und erfordert einen erheblichen Aufwand bei der Regelung elektromagnetischer Lager. Andererseits ist es aber notwendig, eine Anordnung zur Verfügung zu haben, die eine solche Steifigkeit des Lagers gewährleistet, daß auch beim Anfahren des Rotors auftretende Resonanzen nicht zu übermäßigen Schwingungen des Rotors führen.

Demgemäß liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Regelschaltung der eingangs genannten Art so weiterzubilden, daß mit einfachen Mitteln die notwendige Lagersteifigkeit gewährleistet ist.

Gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß in der Nähe der elektromagnetischen Wicklung eine Hilfsspule mit verminderter Windungszahl angeordnet ist, die mit der elektromagnetischen Wicklung gekoppelt ist und ein Signal liefert, das den Schwankungen des magnetischen Flusses im Luftspalt des elektromagnetischen Lagers proportional ist, daß das von der Hilfsspule gelieferte Signal einem ersten Hilfsintegrationskreis zugeführt wird, dessen Ausgang mit dem Eingang des Verstärkers der Regelschaltung verbunden ist, und daß die Strom-Gegenkopplungsschleife einen zweiten Hilfsintegrationskreis enthält.

Die Erfindung macht von der Tatsache Gebrauch, daß die von der elektromagnetischen Wicklung auf den Rotor ausgeübte Kraft nicht allein von der Stärke des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes abhängig ist, sondern auch von der Größe des Luftspaltes zwischen Wicklung und Rotorwelle. Eine konstante Steifigkeit des Lagers liegt dann vor, wenn die von der Wicklung ausgeübte Kraft unabhängig von der Größe des Luftspaltes des Lagers ist. Durch die Erfindung werden die auf die Änderungen der Größe des Luftspaltes zurückzuführenden Schwankungen des magnetischen Flusses im Luftspalt erfaßt und mittels der genannten Integrationskreise in entsprechende Änderungen des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes umgesetzt, derart, daß die Steifigkeit des Lagers wenigstens annähernd konstant gehalten wird.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist der zweite Hilfsintegrationskreis einen Durchlaßbereich und eine Verstärkung auf, der bzw. die ebenso groß ist wie der Durchlaßbereich bzw. die Verstärkung des ersten Hilfsintegrationskreises.

Das der Erfindung zugrunde liegende Prinzip, mittels einer Kompensationsschaltung in die Stärke des Stromes, der die elektromagnetische Wicklung durchfließt, die das den Rotor stützende Magnetfeld erzeugt, eine Komponente einzuführen, die eine solche Funktion der Änderung der Größe des Luftspaltes des Lagers ist, daß die effektive Steifigkeit des Lagers im wesentlichen unabhängig von der Frequenz der Lagestörungen des Rotors ist, wird bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung in der Weise angewandt, daß bei einer Regelschaltung der eingangs genannten Art zwischen Sensoranordnung und Verstärker eine Kompensationsschaltung geschaltet ist, die ein Additionsmitglied mit zwei Eingängen, deren erstem unmittelbar das Ausgangssignal

der Sensoranordnung und deren zweitem ein für die mittlere Stellung des Rotors charakteristisches Signal zugeführt wird, und ein dem Verstärker vorangehendes Multiplikationsglied umfaßt, welches das Produkt aus dem von der Sensoranordnung abgeleiteten Signal und dem Ausgang des Additionsgliedes bildet.

Bei dieser Ausführungsform der Erfindung werden die von den Detektoren beobachteten Lageänderungen des Rotors unmittelbar dazu benutzt, um das an dem Additionsglied anstehende Signal zu modifizieren, das für die mittlere Stellung des Rotors charakteristisch ist. Auf diese Weise wird wiederum ein Signal erzeugt, das für die Schwankungen des magnetischen Flusses im Luftspalt des elektromagnetischen Lagers charakteristisch ist, auch wenn es nicht unmittelbar durch die Beobachtung des magnetischen Flusses gewonnen worden ist. Dieses Signal wird über das Multiplikationsglied einem Eingang des Verstärkers zugeführt und bewirkt daher wiederum eine solche Korrektur der Stärke des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes, daß die Steifigkeit des Lagers von der Frequenz der Lagestörungen des Rotors im wesentlichen unabhängig ist.

Es ist ersichtlich, daß auch hier wiederum nur eine sehr einfache Schaltungsanordnung benötigt wird, um die Erfindungsaufgabe zu lösen. Insbesondere erlaubt es die Erfindung, die Stärke des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes und damit die auf den Rotor durch das von der Wicklung erzeugte Magnetfeld ausgeübten Kraft weitgehend konstant zu halten, ohne daß hierzu komplizierte Einrichtungen notwendig wären. So wäre es zwar beispielsweise durch Einsetzen einer nach dem Hall-Effekt arbeitenden Sonde in den Luftspalt der Elektromagneten des magnetischen Lagers möglich, ein Rückkopplungssignal zu erzeugen, das eine vollkommene Proportionalität zwischen den Arbeitskräften des Lagers und der Steuerung gewährleistet, welche die Stärke des die elektromagnetische Wicklung durchfließenden Stromes bestimmt, jedoch bereitet das Einsetzen einer solchen Sonde in der Praxis bedeutende Schwierigkeiten und führt zu einem leicht verletzlichen System. Demgegenüber erlauben es die nach der Erfindung vorgesehenen Mittel durch Anwendung von elektrischen Hilfseinrichtungen, die sich außerhalb des Luftspaltes der Elektromagneten befinden und mit einer klassischen Strom-Gegenkopplungsschleife zusammenwirken, Schwankungen in der Starrheit eines magnetischen Lagers zu vermeiden, die auf Variationen des Luftspaltes in dem Lager zurückzuführen sind.

Weitere Einzelheiten, Ausgestaltungen und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der folgenden Beschreibung der in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiele. Es zeigt

Fig. 1 das Schaltbild einer Schaltungsanordnung zur Regelung eines elektromagnetischen Lagers mit einer Einrichtung zur Verstärkungskompensation gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung.

Fig. 2 ein Diagramm, das die Steifigkeit eines durch eine Schaltungsanordnung nach Fig. 1 geregelten elektromagnetischen Lagers als Funktion der Frequenz von Störungen wiedergibt, und

Fig. 3 das Schaltbild einer Schaltungsanordnung zur Regelung eines elektromagnetischen Lagers mit einer zweiten Ausführungsform einer Vorrichtung zur Verstärkungskompensation.

Der in Fig. 1 dargestellte Regelkreis enthält die klassischen Elemente einer Schaltungsanordnung zum Re-

geln der Speisung der Erregerwicklungen eines elektromagnetischen Lagers. Bei dieser Schaltungsanordnung wird eine Steuerspannung U_c von Signalen x_d mittels einer Steuereinheit 7 abgeleitet, welche Korrekturkreise, wie beispielsweise Phasenschiebernetze, umfaßt. Die Signale x_d werden in klassischer Weise von nicht dargestellten Sensoren geliefert, die auf die Stellung des Rotors ansprechen (siehe z. B. FR-PS 21 49 644). Die Steuerspannung U_c wird über ein Linearisierungsglied 4 einem Verstärker 1 zugeführt, dessen Ausgang an die Wicklung 3 eines Elektromagneten des magnetischen Lagers angeschlossen ist. Dem Verstärker 1 ist eine Strom-Gegenkopplungsschleife 2 zugeordnet, die ein Strommeßglied 21, bei dem es sich beispielsweise um eine Strommeßzange oder einen Widerstand handeln kann, umfaßt. Das von dem Strommeßglied 21 gelieferte Signal wird dem Eingang des Verstärkers 1 zugeführt.

Die Strom-Gegenkopplungsschleife 2 der bisher beschriebenen Schaltungsanordnung ist mit allen Fehlern behaftet, die auf die Größe des Luftspaltes in dem geregelten elektromagnetischen Lager zurückzuführen sind, denn sie berücksichtigt nur den Strom, der die Wicklung 3 durchfließt. Eine elektrische Zusatzeinrichtung in Form einer Schleife 5 bewirkt jedoch in einem bestimmten Frequenzband eine solche Veränderung der vom Verstärker 1 bewirkten Verstärkung, daß die Schwankungen des Luftspaltes des geregelten Lagers berücksichtigt werden. Die Schleife 5 umfaßt eine kleine Hilfsspule 51, die aus einigen Windungen besteht, welche die Wicklung 3 in solcher Weise umgeben, daß sie auf Änderungen des magnetischen Flusses im Luftspalt des geregelten Lagers ansprechen. Die Hilfsspule 51 ist mit einem Integrationskreis 52, 53 verbunden, der aus einem Widerstand 52 und einem Kondensator 53 besteht. Der Integrationskreis 52, 53 ist seinerseits mit einem Eingang des Verstärkers 1 verbunden, um in den Verstärker ein Signal zurückzuführen, das dem magnetischen Fluß im Luftspalt des Lagers proportional ist, also insbesondere dem tatsächlichen Wert des Luftspaltes des geregelten Lagers entspricht.

Übrigens ist ein Korrekturglied oder Tiefpaßfilter, das aus einem Widerstand 22 und einem Kondensator 23 besteht, in die Strom-Gegenkopplungsschleife 2 eingeschaltet, um den Integrationskreis 52, 53 in der Schleife 5 zu kompensieren. Das Integrationsglied 52, 53 hat die gleiche Verstärkung und den gleichen Durchlaßbereich wie das Korrekturglied 22, 23 in der Strom-Gegenkopplungsschleife 2. Weiterhin sind die Zeitkonstanten der beiden Kreise 52, 53 und 22, 23 gleich oder größer als die Zeitkonstante der Hauptregelschleife mit der Steuereinheit 7 der Schaltungsanordnung. Insbesondere kann die Zeitkonstante dieser Kreise das 1- bis 5fache der Zeitkonstanten der Hauptregelschleife betragen.

In Fig. 2 veranschaulicht die Kurve (c) die auf die Ordinate logarithmisch aufgetragene Steifigkeit des durch die Schaltungsanordnung nach Fig. 1 geregelten Lagers als Funktion der auf die Abszisse aufgetragenen Frequenz von Störungen.

Die Kurve (a) in Fig. 2 veranschaulicht die Steifigkeit eines Lagers, das durch eine Schaltungsanordnung geregelt wird, die nur eine klassische Strom-Gegenkopplungsschleife 2 aufweist.

Die Kurve (b) in Fig. 2 veranschaulicht die Steifigkeit eines Lagers, das durch eine Schaltungsanordnung der in Fig. 1 dargestellten Art geregelt wird, wobei jedoch nur die Rückkopplungsschleife 5 berücksichtigt ist, die auf Schwankungen des magnetischen Flusses anspricht.

Beim Fehlen einer Korrektur, die dem Wert des Luftspaltes in dem geregelten Lager Rechnung trägt, hängt die Regelverstärkung von der Größe des Luftspaltes ab. Demgemäß kann der Augenblickswert der Arbeitskraft F durch die folgende Formel wiedergegeben werden:

$$F = K U_c \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right)^2, \quad (1)$$

in der U_c die Steuerspannung für den Verstärker 1, ϵ_0 der Mittelwert des Luftspaltes des Lagers, ϵ der Augenblickswert des Luftspaltes des Lagers und K eine Proportionalitätskonstante bedeuten.

Bei Frequenzen, die unterhalb der Grenzfrequenz f_{c1} des Hauptregelkreises liegen, ist die klassische Strom-Gegenkopplungsschleife 2 ausreichend, um die Regelverstärkung als Funktion der Frequenz der Störungen annähernd konstant zu halten [s. Kurve (a) in Fig. 2]. Wenn jedoch die Frequenz von Störungen die Grenzfrequenz f_{c1} überschreitet, nimmt die Steifigkeit ab, und es wird die Betriebssicherheit des Systems durch die Größe des Luftspaltes ungünstig beeinflusst.

Die Schleife 5, welche Schwankungen der Größe des Luftspaltes berücksichtigt, indem sie auf die Ableitung $d\phi/dt$ des magnetischen Flusses anspricht, wird bei Frequenzen wirksam, die größer sind als die Grenzfrequenz f_{c2} des Integrationskreises 52, 53 [s. Kurve (b) in Fig. 2]. Die Grenzfrequenzen f_{c1} und f_{c2} können einander dicht benachbart und sogar gleich sein. Allgemein ist die Grenzfrequenz f_{c2} niedriger als die Grenzfrequenz f_{c1} . Beispielsweise kann f_{c1} einen Wert von 5 Hz und f_{c2} einen Wert von 1 Hz haben. Wenn in dieser Weise die Strom-Gegenkopplungsschleife 2 und die auf das Magnetfeld ansprechende Schleife 5 der Schaltungsanordnung nach Fig. 1 beide gleichzeitig wirksam sind, weist die resultierende Kurve (c) der Steifigkeit des Lagers als Funktion der Frequenz der Störungen auf ein Minimum reduzierte Schwankungen auf, insbesondere in dem Arbeitsbereich, bei relativ hohen, jenseits von f_{c1} und f_{c2} liegenden Frequenzen.

Fig. 3 gibt das Schaltbild einer anderen Ausführungsform der Erfindung wieder. Bei dieser Ausführungsform der Erfindung sind die zusätzlichen elektrischen Einrichtungen, die den Schwankungen des Luftspaltes Rechnung tragen sollen, vor dem Verstärker 1 angeordnet und bilden keine Rückkopplungsschleife, sondern sprechen auf Signale an, die von den Sensoren geliefert werden, welche die Stellung des Rotors überwachen. In dem Maße, wie diese Detektoren in unmittelbarer Nähe der geregelten Lager angeordnet sind, sind die Signale x_d die von den Sensoren abgeleitet sind, welche die auf die Stellung des Rotors ansprechenden Sensoren liefern, für die Schwankungen in der Rotorstellung charakteristisch und dem gemäß auch mit guter Genauigkeit für die Schwankungen des Luftspaltes in dem geregelten Lager. Wie das Schaltbild nach Fig. 3 zeigt, wird dieses Signal x_d dem ersten Eingang eines Additionsgliedes 61 zugeführt, während ein Signal, das für den Mittelwert ϵ_0 des Luftspaltes des geregelten Lagers charakteristisch ist, dem zweiten Eingang des Additionsgliedes 61 zugeführt wird. Das Ausgangssignal des Additionsgliedes 61, das die Form $\epsilon = \epsilon_0 + x_d$ hat, wird einem Eingang eines Multiplikationsgliedes 62 zugeführt. Der zweite Eingang des Multiplikationsgliedes 62 empfängt die Steuerspannung U_c , die von der klassischen Steuereinheit 7 aus den Signalen gebildet wird, die von einem oder mehreren Detektoren 8 zugeführt werden. Der Ausgang des Multiplikationsgliedes 62 ist mit dem Eingang eines Li-

nearisierungsgliedes 4 verbunden, dessen Ausgangssignal der Quadratwurzel des Eingangssignals proportional ist. Der übrige Teil der Schaltungsanordnung entspricht der Schaltungsanordnung nach Fig. 1 unter Fortlassung der Kompensations-Schleife 5 und der Korrekturglieder 22, 23 in der Strom-Gegenkopplungsschleife 2.

Demgemäß weist die Schaltungsanordnung nach Fig. 3 eine zusätzliche elektrische Einrichtung 6 auf, die aus dem Additionsglied 61 zum Zuführen des Wertes ϵ_0 und dem Multiplikationsglied 62 zur Korrektur der Steuerspannung U_c durch die von der Größe des Augenblickswertes des Luftspaltes abhängige Signale ϵ besteht und die es gestattet, die Verstärkung der Regelschleife in Abhängigkeit von den Schwankungen des Luftspaltes des geregelten Lagers ständig zu beeinflussen, da das Steuersignal, das dem Eingang des Verstärkers 1 zugeführt wird, selbständig gegenüber der Steuerspannung U_c korrigiert wird, die in klassischer Weise gewonnen wird. Die Sensoren zur Überwachung der Lage des Rotors, wie der in Fig. 3 angedeutete Sensor 8, können insbesondere elektromagnetische Sensoren sein.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

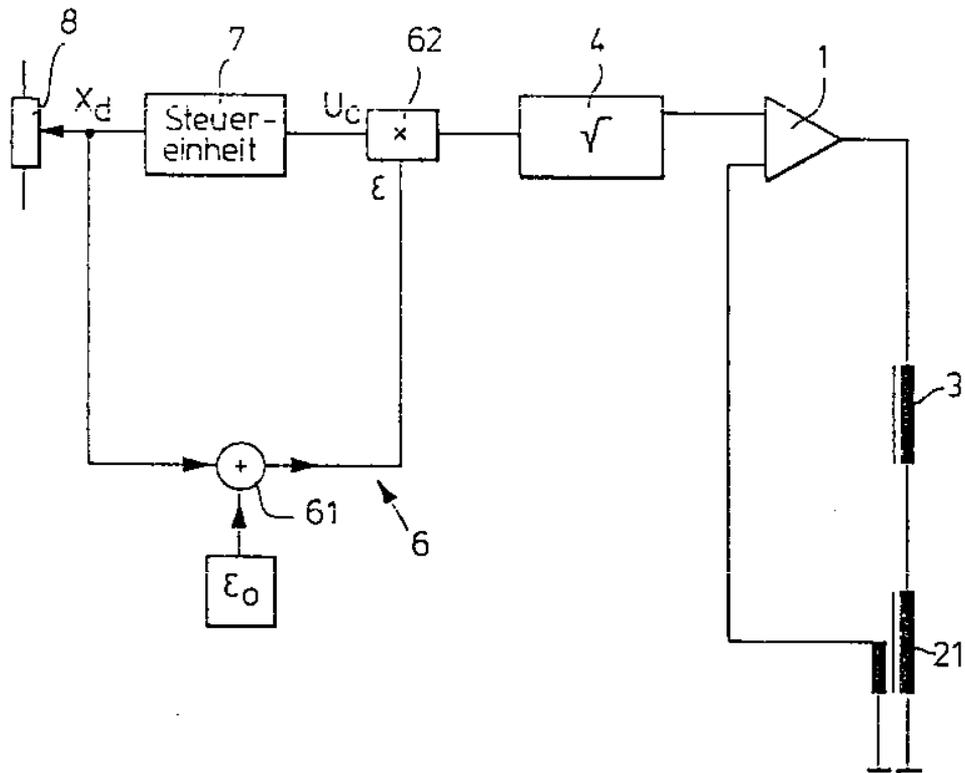


Fig. 3