

⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑪ **DE 3240809 A1**

⑥ Int. Cl. 3:  
**F16C 32/04**

⑰ Aktenzeichen: P 32 40 809.9  
⑱ Anmeldetag: 5. 11. 82  
⑲ Offenlegungstag: 10. 5. 84

DE 3240809 A1

⑦ Anmelder:  
TELDIX GmbH, 6900 Heidelberg, DE

⑦ Erfinder:  
Auer, Werner, Dr.-Ing., 6901 Wiesenbach, DE;  
Sindlinger, Rainer, Dipl.-Ing., 6945 Hirschberg, DE

⑥ Rechercheergebnisse nach § 43 Abs. 1 PatG:  
DE-AS 22 63 096  
DE-OS 28 00 960  
DE-OS 27 41 062  
DE-OS 25 01 218  
EP 00 49 300

Patentamt

⑥ Magnetlager

Es wird ein Magnetlager beschrieben, das kurz ausgebildet ist. Dieses Magnetlager enthält eine radial passive Lagerung und axial aktive Regelung.

Unter Verwendung von nur vier Sensoranordnungen und drei Regelverstärkern wird ein Magnetlager geschaffen, bei dem neben der axialen Regelung noch eine Regelung um zwei zur Drehachse senkrechte Kippachsen erfolgt.

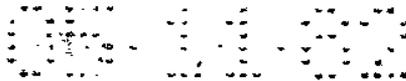
DE 3240809 A1

Patentansprüche

1. Magnetlager, bei dem der Luftspaltdurchmesser groß gegenüber der axialen Länge des Lagers ist, bei dem der Rotor durch Permanentmagnete zumindest auf der Rotorseite radial passiv gelagert ist, bei dem die axiale Lage des Rotors durch eine Regeleinrichtung aktiv geregelt wird, bei dem mehrere Sensoranordnungen zur Bestimmung der axialen Lage sowie Regelverstärker und Wicklungen zur Ausübung von Kräften auf den Rotor verwendet sind, dadurch gekennzeichnet, daß vier Sensoranordnungen (1-4) auf zueinander senkrechten und zur Drehachse senkrecht stehenden Achsen und paarweise diametral zur Drehachse liegend angeordnet sind, daß drei Regelverstärker (7,8,21) vorgesehen sind, von denen dem ersten (7) und zweiten (2) jeweils die Differenz der Sensorsignale sich diametral gegenüberliegender Sensoranordnungen (1,2 bzw. 3,4) und dem dritten (21) die Summe aller Sensorausgangssignale zugeführt werden und daß die Ausgänge der drei Regelverstärker mit Wicklungen (16-19; 72-76) derart verbunden und diese derart angeordnet sind, daß bei Ansteuerung des ersten und zweiten Verstärkers (7 und 8) auf den Rotor Rückstellmomente um die zu der Achse, auf der die zugehörigen Sensoranordnungen (1-4) liegen, jeweils senkrecht liegenden Achse einwirken und daß bei Ansteuerung des dritten Verstärkers (21) eine axiale Rückstellkraft auf den Rotor einwirkt.
2. Magnetlager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jede der vier Sensoranordnungen (1-4) aus einem Paar von axial gegeneinander versetzten, auf axiale Rotorbewegungen entgegengesetzt reagierende (39, 39' bis 42, 42') Sensoren besteht und daß die Differenz der Ausgangssignale jedes Sensorpaars (39, 39' bis 42, 42') als Ausgangssignal der Sensoranordnung dient.

3. Magnetlager nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß auf dem Stator den vier Sensoranordnungen (1-4) zugeordnet vier Wicklungen (16-19; 72-76) derart angeordnet sind, daß sie bei Ansteuerung Kräfte in axialer Richtung auf den Rotor ausüben, und daß an die Ausgänge des ersten und zweiten Regelverstärkers (7 und 8) jeweils sich diametral gegenüberliegende Wicklungen (16 und 17, bzw. 18 und 19; 72 und 73 bzw. 74 und 75) derart angeschaltet sind, daß sie auf den Rotor entgegengesetzt
4. Magnetlager nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß alle vier Wicklungen (16-19) an den Ausgang des dritten Regelverstärkers (21) angeschaltet sind.
5. Magnetlager nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß eine zusätzliche Ringwicklung (76) vorgesehen und mit dem dritten Regelverstärker (21) verbunden ist.
6. Magnetlager nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die diametral liegenden Wicklungen (72 und 73 bzw. 74 und 75) mit entgegengesetztem Wickelsinn in Reihe liegend an die Regelverstärker (7 bzw. 8) angeschaltet sind.
7. Magnetlager nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die diametral liegenden Wicklungen (16 und 17 bzw. 18 und 19) parallel an den ersten und zweiten Regelverstärker (7 und 8) angeschaltet sind, wobei jeweils einer dieser zwei Wicklungen (17 bzw. 19) das Ausgangssignal invertiert zugeführt wird und daß alle Wicklungen (16-19) parallel an den dritten Regelverstärker (21) angeschaltet sind.

- 5 8. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß jede Wicklung aus zwei Teilwicklungen (39, 39' - 42, 42') besteht, die von ersten bzw. zweiten Regelverstärker (7 bzw. 8) abhängig von der Richtung der zu erzeugenden Kräfte angesteuert werden und deren Magnetkräfte von verschiedenen axialen Richtungen auf ein ferromagnetisches Teil des Rotors einwirken.
- 10 9. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die vier Wicklungen (86) teilweise in den Luftspalt eines rotorseitigen radialen Magnetfeldes eintauchen.
- 15 10. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß dem ersten und zweiten Regelverstärker (7 und 8) Signale zur definierten Verkipfung der Laufachse zuführbar sind.
- 20 11. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Eingangssignale des ersten und zweiten Regelverstärkers (7 oder 8) jeweils auch dem anderen Regelverstärker (8 oder 7) zugeführt werden (Kreuzkopplung).
- 25 12. Magnetlager nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Kreuzkopplung mit zunehmender Drehzahl des Rotors erhöht wird.



4

T E L D I X G m b H

Postfach 10 56 08

Grenzhöfer Weg 36

6900 Heidelberg 1

Heidelberg, 22. Okt. 1982

PT-Ka/kn

E-535

Magnetlager

Die Erfindung betrifft ein Magnetlager, bei dem der Luftspaltdurchmesser groß gegenüber der axialen Länge des Lagers ist, bei dem der Rotor durch Permanentmagnete zumindest auf der Rotorseite radial passiv gelagert ist, bei dem die axiale Lage des Rotors durch eine Regeleinrichtung aktiv geregelt wird, und bei dem mehrere Sensoranordnungen zur Bestimmung der axialen Lage sowie Regelverstärker und Wicklungen zur Ausübung von Kräften auf den Rotor verwendet sind.

- 10 Ein Magnetlager mit diesen Merkmalen ist aus der EU-Patentanmeldung 49 300 bekannt. Dort wird ein Schwungring mit Hilfe eines derartigen Magnetlagers gelagert. Gemäß dem einen Ausführungsbeispiel enthält der Schwungring an den axialen Oberflächen zwei Permanentmagnetringe. Mit diesen und mit Hilfe von Jochringen auf dem Rotor und Stator werden dort 15 Magnetkreise gebildet, die axiale Luftspalte zwischen Rotor und Stator aufweisen. Hierdurch wird der Rotor radial stabilisiert. Der Rotor trägt drei segmentförmige Wicklungen. Die hierdurch erzeugten Magnetflüsse werden ebenfalls über 20 die Luftspalte geleitet; damit sind sektorweise die auf den

Rotor einwirkenden axialen Kräfte variiert. Jeder der Wicklungen ist ein die axiale Lage des Rotors überwachender Sensor und ein nachgeschalteter Regelverstärker zugeordnet. Hiermit wird der Rotor in eine vorgegebene axiale Stellung gezwungen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Lagereigenschaften eines solchen Magnetlagers mit im Vergleich zur radialen Ausdehnung geringer axialer Ausdehnung zu verbessern.

Dies wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß vier Sensoranordnungen auf zueinander senkrechten und zur Drehachse senkrecht stehenden Achsen und paarweise diametral zur Drehachse liegend angeordnet sind, daß drei Regelverstärker vorgesehen sind, von denen dem ersten und zweiten jeweils die Differenz der Sensorsignale sich diametral gegenüberliegenden Sensoranordnungen und dem dritten die Summe aller Sensorausgangssignale zugeführt werden und daß die Ausgänge der drei Regelverstärker, mit Wicklungen derart verbunden und diese derart angeordnet sind, daß bei Ansteuerung des ersten und zweiten Verstärkers auf den Rotor Rückstellmomente um die zu der Achse, auf der die zugehörigen Sensoranordnungen liegen, jeweils senkrecht liegenden Achse einwirken und daß bei Ansteuerung des dritten Verstärkers eine axiale Rückstellkraft auf den Rotor einwirkt.

Bei der erfindungsgemäßen Lösung wird somit nicht nur in axialer Richtung aktiv geregelt, sondern es werden zusätzlich Kippregler für zwei zueinander und zur Drehachse senkrechte Achsen geschaffen. Ausgehend von vier Sensoranordnungen wird durch Verschaltung auf einen dreikanaligen Regler übergegangen, der dann wieder mindestens vier Wicklungen bedient.

Es genügt an sich vier Sensoren zu verwenden. Günstiger ist es jedoch, jede Sensoranordnung aus einem Paar von axial gegeneinander versetzten und auf axiale Rotorbewegungen entgegengesetzt reagierenden Sensoren zu bilden, und deren Differenzsignal als Sensorausgangssignal zu verwenden.

Es sind verschiedene Anordnungen und Ansteuerungen der Wicklungen zur Erzeugung der geforderten Rückstellmomente und Kräfte möglich. Hierauf wird anhand der Ausführungsbeispiele näher eingegangen.

Bei dem erfindungsgemäßen Lager ist es durch Einkoppeln von Signalen in den ersten und zweiten Regelverstärker möglich, den 0-Punkt der Regelcharakteristik zu verschieben, d.h., in einem gewissen Rahmen die Drehachse bewußt schief zu stellen, was z.B. bei Lagerung eines Schwungrads für Raumfahrzeuge von Interesse ist.

Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung werden die Eingangssignale des ersten und zweiten Regelverstärkers kreuzgekoppelt, d.h., ein Anteil des Eingangssignals des einen Verstärkers wird dem Eingangssignal des anderen Verstärkers überlagert. Dies hat den Vorteil, daß ausreichende Stabilität bereits mit einfachen Reglern erreicht wird, da die um eine Achse erzeugten Momente eine Präzessions-Winkelgeschwindigkeit um die dazu senkrechte radiale Achse erzeugen. Allerdings verschwindet dieser Effekt bei Stillstand.

Vorzugsweise wird diese Kreuzkopplung dazu drehzahlabhängig ausgebildet, d.h., mit steigender Drehzahl wird der kreuzgekoppelte Anteil erhöht.

Anhand der Ausführungsbeispiele der Zeichnung wird die Erfindung näher erläutert.

Es zeigen

- Fig. 1 ein erstes Ausführungsbeispiel einer Ansteuerung für ein erfindungsgemäßes Magnetlagers,  
Fig. 2 ein möglicher Aufbau des Magnetlagers, das wie in Fig. 1 gezeigt geregelt wird,  
5 Fig. 3 andere Ausführungsformen für das radiale passive Lager,  
Fig. 4 andere Ausführungsformen für die Aufbringung von Momenten und Kräften,  
10 Fig. 5 eine andere Möglichkeit der Ansteuerung,  
Fig. 6 eine Ausführungsform für den Aufbau des Lagers, das gemäß Fig. 5 angesteuert werden kann.

In Fig. 1 sind vier Sensoranordnungen 1-4 vorgesehen, von denen die Sensoranordnungen 1 und 2 auf einer Achse (x-Achse) senkrecht zur Drehachse (z-Achse) und diametral zur Drehachse liegen und auf axiale Bewegungen in ihren Ausgangssignalen in gleicher Weise reagieren. Entsprechend sind die Sensoranordnungen 3 und 4 auf der zur x- und z-Achse senkrechten y-Achse angeordnet. In Differenzverstärkern 5 und 6 werden aus den Ausgangssignalen der Anordnungen 1 und 2 bzw. 3 und 4 Differenzsignale gebildet, wobei eine Differenz auftritt, wenn der von den Sensoranordnungen abgetastete Rotor eine Kippbewegung um die jeweils senkrecht zur Achse, auf der die zusammenschalteten Sensoranordnungen liegen, liegenden Achse erfolgt. Über Regelverstärker 7 und 8, Inverter 9 und 10, Summierglieder 11 bis 14 und Leistungsverstärker 15 gelangen dann die Signale zu Wicklungen 16 bis 19; jede dieser Wicklungen 16 bis 19 ist einem der Sensoranordnungen 1 bis 4 räumlich zugeordnet und erzeugt bei Ansteuerung eine axiale Kraft auf den Rotor.  
15  
20  
25  
30

Alle 4 Sensoranordnungen 1 bis 4 sind auch an einen Summier-  
verstärker 20 angeschaltet, dessen Ausgangssignal über einen  
Regelverstärker 21 und die Summierverstärker 11 bis 14 sowie  
die Leistungsverstärker 15 ebenfalls zu den Wicklungen 16  
5 bis 19 gelangen.

Werden an den Klemmen 22 und 23 Gleichspannungssignale ein-  
gekoppelt, so läßt sich der 0-Punkt der Kippregler verstellen,  
sodaß es zu einer definierten Schiefstellung der Rotor-  
10 achse kommt.

Mit der in Fig. 1 dargestellten Steuerschaltung läßt sich  
ein entsprechend Fig. 2 aufgebautes Magnetlager regeln.  
Fig. 2a zeigt eine perspektivische Ansicht und Fig. 2b einen  
15 Schnitt.

Ein mit 31 bezeichneter Rotor des Lagers besteht aus einem  
radial magnetisierten Permanentmagnetring 32, an dessen Po-  
len sich zwei Polblechringe 33 und 34 anschließen. Diesem  
20 Rotor stehen axial versetzt zu beiden Seiten u-förmige Stä-  
torringsegmente 35 bis 38 bzw. 35' bis 38' aus magnetisch  
gut leitendem Material gegenüber; dabei ist die Ausbildung  
so getroffen, daß die freien Schenkel des U gerade den Pol-  
blechringen 33 und 34 gegenüberstehen. Um diese Ringsegmente  
25 sind in Umfangsrichtung Segment-Wicklungen 39 bis 42 bzw. 39'  
bis 42' gewickelt. Die beiden Wicklungsgruppen werden von  
der in Fig. 1 dargestellten Steuereinrichtung, in Abhängig-  
keit von Abstandssignalen, die von Sensoranordnungen 43 bis  
46 bzw. 43' bis 46' erzeugt werden, angesteuert. Dabei wird  
30 aus den Signalen je eines Sensorpaars z. B. 45 und 45' je-  
weils die Differenz gebildet; dieses Differenzsignal stellt  
das Ausgangssignal einer der Sensoranordnungen 1 bis 4 der  
Fig. 1 dar.



Die Luftspalte zwischen Rotor 1 und Stator sind mit 47 und 47' bzw. 48 und 48' bezeichnet.

Aus den Figuren 1 und 2 ergibt sich folgende Wirkungsweise.

5

Bei einer Kippung um die y-Achse erzeugen die Sensorpaare 45 und 45' sowie 43 und 43' und die diesen entsprechenden Sensoranordnungen 1 und 2 der Fig. 1 Ausgangssignale. Hierdurch werden die Wicklungen 16 und 17 entgegengesetzt ange-  
10 steuert und erzeugen ein Gegenkippmoment. In Fig. 2 entsprechen der Wicklung 16 die hintereinander geschalteten Teilwicklungen 41 und 41', die entgegengesetzt gewickelt sind und sich in der Wirkung unterstützen. Entsprechendes gilt für die Wicklung 17 und die Teilwicklungen 39 und 39'.  
15 Hier werden in den Luftspalten 47 und 47' die Flüsse des Permanentmagnetings und der Elektromagnete überlagert.

Entsprechend wird von dem andern Kippregler 8 eine Kippung um die x-Achse ausgeregelt.

20

Erfolgt dagegen eine axiale Verschiebung des Rotors so geben alle Sensoranordnungen 1 bis 4 gleiche Signale ab. Die Kippregler 7 und 8 erhalten kein Signal, dagegen der Regelverstärker 21, der alle Wicklungen 16 bis 19 (und entsprechend  
25 39 bis 42 bzw. 39' bis 42') ansteuert und eine Rückstellkraft erzeugt.

30

Zu erwähnen sind noch die Kreuzkoppelleitungen 24 und 25, über die ein Anteil der Eingangssignale der Regelverstärker 7 bzw. 8 in den jeweils anderen Regelverstärker gekoppelt werden kann. Vorzugsweise steigen die Kreuzgekoppelten Anteile mit der Drehzahl an, was durch einen Verstärker mit verstellbarem Verstärkungsfaktor in jeder Kreuzkoppelleitung realisiert werden kann.

In den Fig. 3a bis 3c sind andere Ausführungsbeispiele für eine mögliche passive Radiallagerung gezeigt, wobei hier jeweils ein Statorring 50 koaxial zu einem Rotorring 51 angeordnet ist und die radiale Lagerung durch einander abstoßende Magnetpole von Permanentmagneten erzielt wird.

Entsprechend zeigt Fig. 4a und 4b andere Ausführungsformen für das Aufbringen von Kräften auf den hier aus Weicheisen bestehenden Rotorring 60, an dem noch das rotorseitige Teil 61 des Radiallagers angedeutet ist. Die Elektromagnete 62 und 62' müssen hier allerdings alternativ angesteuert werden. Beide Lösungen erlauben eine relativ große Schrägstellung des Rotors.

In der Fig. 5 entspricht die Verschaltung bis zum Ausgang der Regelverstärker 7, 8 und 21 der der Fig. 1, weshalb gleiche Bezugszeichen benutzt sind. Die für die Kippregelung zuständigen Regelverstärker 7 und 8 sind über Leistungsverstärker 70 mit hintereinander geschalteten aber entgegengesetzt gewickelten Wicklungen 72 und 73 bzw. 74 und 75 verbunden. Die Wicklungspaare 72 und 73 bzw. 74 und 75 sind wieder diametral zur Drehachse angeordnet.

Mit dem Ausgang des Reglers 21 ist eine gesonderte Wicklung 76 verbunden, die eine Axialkraft erzeugt, während die Wicklungspaare 72 und 73 bzw. 74 und 75 Kippmomente erzeugen. Diese Verschaltung kann z.B. bei einem Magnetlager gemäß Fig. 6 verwendet werden. In Fig. 6a ist mit 80 ein Rotorring bezeichnet, mit 81 ein Statorring und mit 82 ein passives Radiallager. In einem Luftspalt 83 des Rotorrings 80 wird mit Hilfe der Magnete 82a und 84 ein radiales Magnetfeld erzeugt, in dem eine statorseitig befestigte Ringspule 85 liegt und eine ebenfalls statorseitig befestigte Sektorwicklung 86 teilweise eintaucht. Die Fig. 6b zeigt, daß 4 Sektorwicklungen 86 und eine Ringwicklung 85 vorgesehen sind.

- Wird die Ringwicklung 85, die der Wicklung 76 der Fig. 5 entsprechen kann, angesteuert, so wird eine axiale Kraft auf den Rotor 80 ausgeübt, deren Richtung von der Stromrichtung abhängt. Bei Ansteuerung der Wicklung 86 und entgegengesetzter Ansteuerung der diametral gegenüberliegenden Wicklung wird dagegen ein Moment um eine zur Zeichenebene senkrechte Achse erzeugt, dessen Drehrichtung von der Stromrichtung abhängig ist.
- 10 In Fig. 5 erfolgt schließlich noch je eine Rückkopplung 77 bis 79 auf die Regelverstärker 7 und 8. Dadurch wird unabhängig von den Spuleninduktivitäten ein "stromsteuerndes" Verhalten erzielt, d.h. die Regler-Ausgangsspannungen werden in proportionale Kräfte bzw. Kippmomente umgewandelt.

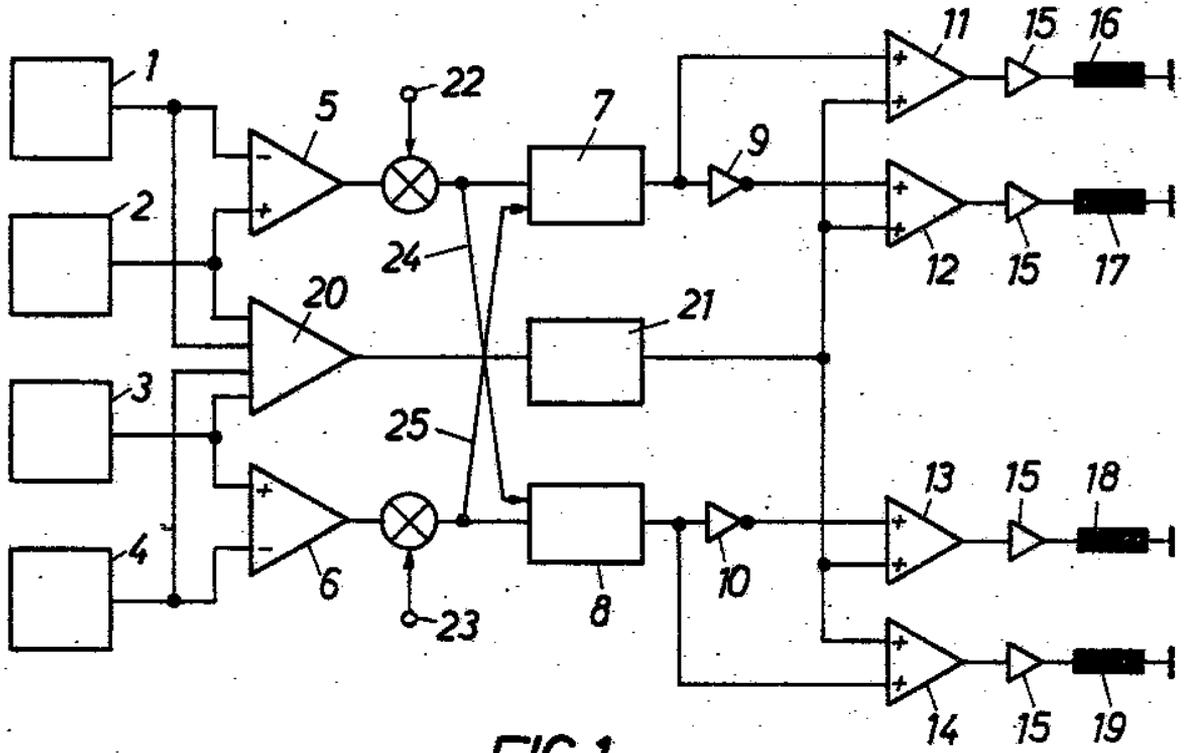


FIG. 1

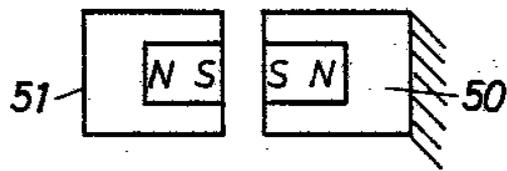


FIG. 3a

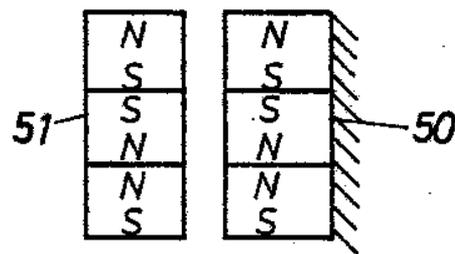


FIG. 3b

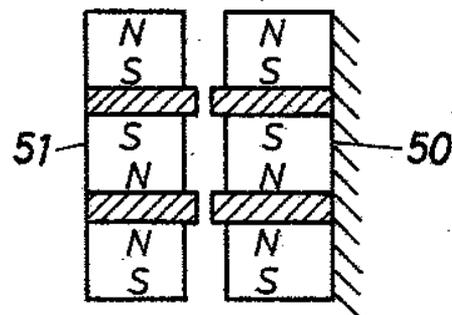


FIG. 3c

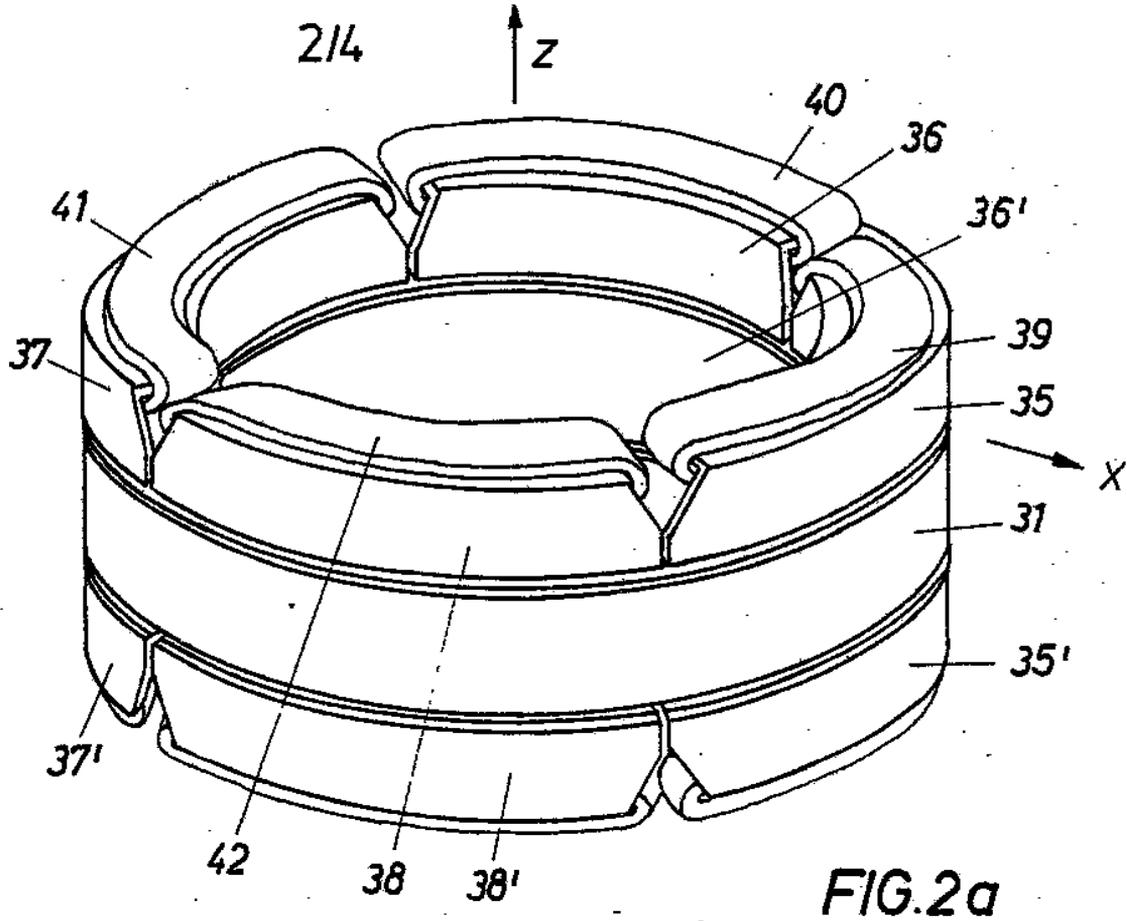


FIG. 2a

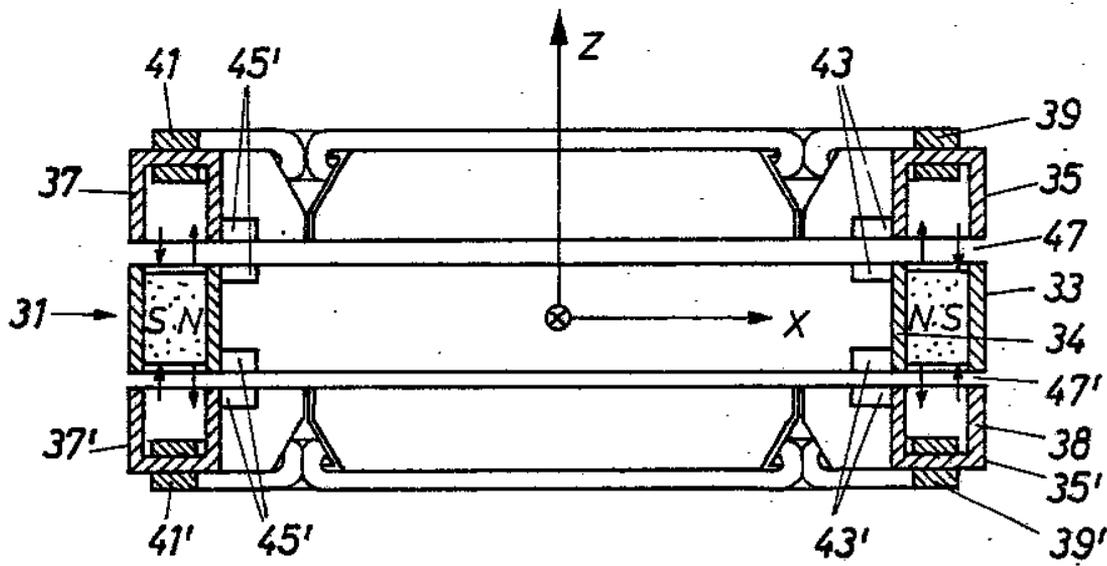


FIG. 2b

05-1-62

- 13 -

3/4

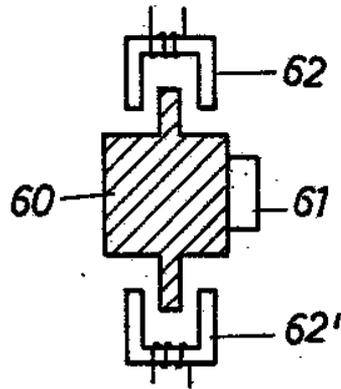


FIG. 4a

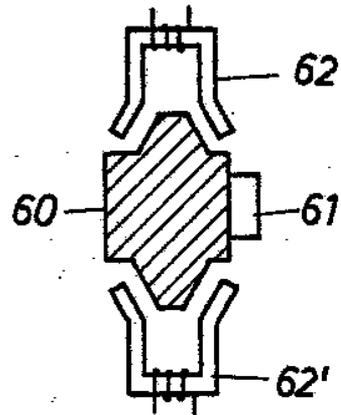


FIG. 4b

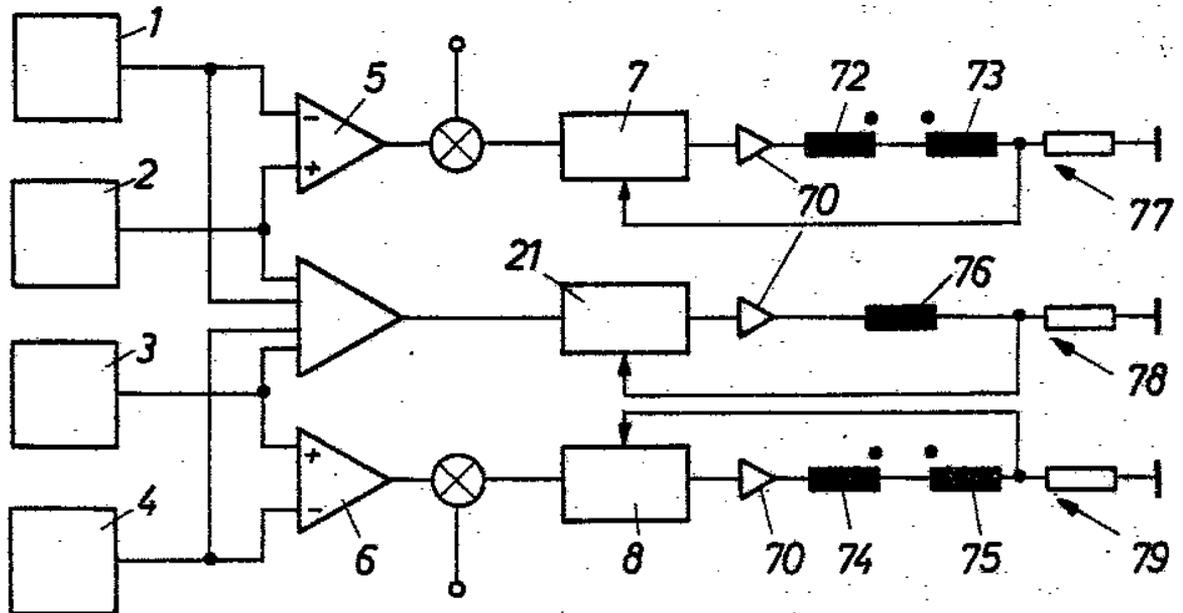


FIG. 5

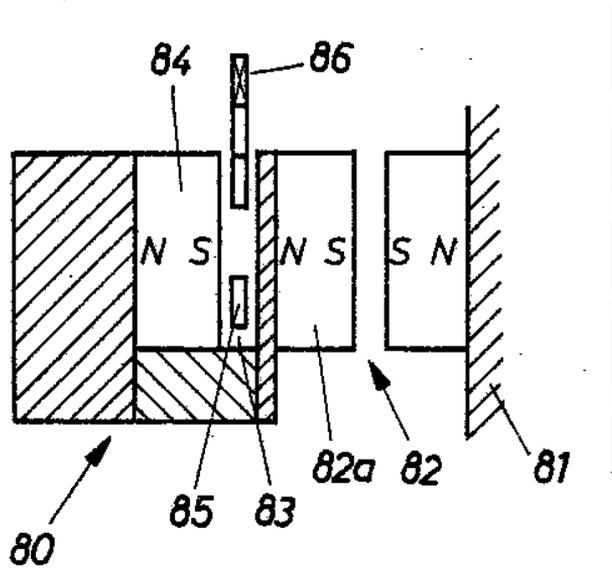


FIG.6a

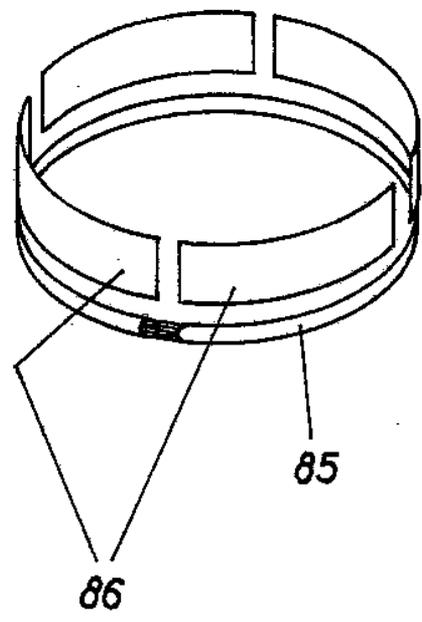


FIG.6b