



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Patentschrift
10 DE 33 40 909 C 2

51 Int. Cl.⁶:
F 16 C 32/04
G 01 M 1/38
G 05 B 5/00
G 05 D 19/02
H 02 K 7/09

21 Aktenzeichen: P 33 40 909.9-51
22 Anmeldetag: 11. 11. 83
43 Offenlegungstag: 17. 5. 84
46 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 15. 2. 96

DE 33 40 909 C 2

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

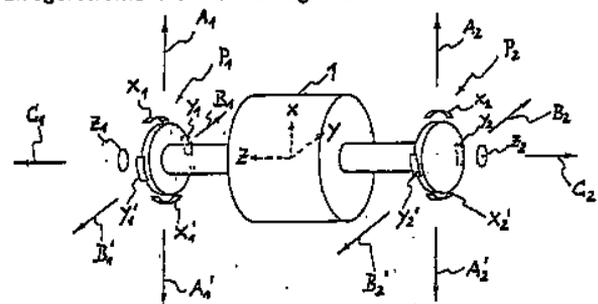
30 Unionspriorität: 32 33 31
11.11.82 JP P197968-82
73 Patentinhaber:
Seiko Instruments & Electronics Ltd., Tokio/Tokyo,
JP
74 Vertreter:
Endlich, F., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 82110 Germering

72 Erfinder:
Mizuno, Takeshi, Tokyo, JP; Higuchi, Toshiro, Tokyo,
JP
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 32 41 507 A1
DE 22 63 096 A1
GB 14 58 687
JP 57-97 916 A mit Patents Abstracts of Japan,
M-159, Sept. 29, 182 Vol. 6/No. 190;

54 Steuereinrichtung für ein Magnetlager

57 Steuereinrichtung für ein Magnetlager, das mindestens zwei magnetische Radiallager aufweist, mit wenigstens zwei Sensoren pro Magnetlager zur Überwachung der relativen Radiallage der Elektromagneten des Magnetlagers und des rotierenden Körpers zueinander, mit folgenden Merkmalen:
a) eine Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') zerlegt die Ausgangssignale der Sensoren in erste Signale, die zwei rechtwinklig zur Rotationsachse des rotierenden Körpers (1) verlaufende Translationsbewegungen repräsentieren, und in zweite Signale, die zwei Rotations-Freiheitsgrade repräsentieren, welche eine Neigung der Rotationsachse des rotierenden Körpers (1) angeben;
b) eine erste Kompensationsschaltung (4) erzeugt aus den ersten Signalen der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') Ausgangssignale zur Stabilisierung jedes der Translationsbewegungssignale;
c) eine zweite Kompensationsschaltung (11) erzeugt aus den zweiten Signalen der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') Ausgangssignale zur Stabilisierung jedes der Rotationsbewegungssignale;
d) eine dritte Kompensationsschaltung (14, 15) erhält als Eingangssignale die ersten Signale der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') getrennt von den zweiten Signalen der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6'), sowie das Ausgangssignal eines Drehzahldetektors (16), und erzeugt als Ausgangssignale Steuersignale zur Unterdrückung solcher Schwingungen oder Taumelbewegungen, die auf der Drehfrequenz (ω) des Rotationskörpers liegen;
e) die Ausgangssignale der ersten Kompensationsschaltung (4) und die auf die ersten Eingangssignale zurückzuführen-

den Ausgangssignale der dritten Kompensationsschaltung sowie die Ausgangssignale der zweiten Kompensationsschaltung und die auf die zweiten Eingangssignale zurückzuführenden Ausgangssignale der dritten Kompensationsschaltung werden in einer nachgeschalteten Verarbeitungsstufe zusammengeführt;
f) es sind Mittel (8, 9) zur Berechnung eines Erregerstroms für jeden Elektromagneten in Abhängigkeit der Ausgangssignale der Verarbeitungsstufe vorgesehen; und
g) Leistungsverstärker (10) erregen in Abhängigkeit des Ausgangssignals der Mittel (8, 9) zur Berechnung der Erregerströme die Elektromagneten ...



DE 33 40 909 C 2

Die Erfindung betrifft eine Steuereinrichtung für ein Magnetlager, das mindestens zwei magnetische Radiallager aufweist, mit wenigstens zwei Sensoren pro Magnetlager zur Überwachung der relativen Radiallage der Elektromagneten des Magnetlagers und des rotierenden Körpers zueinander.

Bei Magnetlagern werden bekanntlich magnetische Kräfte genutzt, um einen rotierenden Körper zu lagern. Derartige Magnetlager weisen den Vorteil auf, daß praktisch keine Abnutzungs- und Ermüdungserscheinungen auftreten. Magnetlager finden beispielsweise in Turbo-Molekularpumpen, in Zentrifugalseparatoren oder für Spindeln von Werkzeugmaschinen Verwendung.

Wenn der in einem Magnetlager rotierende Körper eine Unwucht aufweist, werden dadurch starke Wirbelbewegungen verursacht, wodurch sich die folgenden Probleme ergeben:

1. Verursachung von Schwingungen und Geräuschen;
2. Erhöhung elektrischer Leistungsverluste aufgrund der Erhöhung der Stromstärke, die der Erregerspule wegen der Erhöhung der Wirbelbewegung zugeführt werden muß. Als Folge davon sind entsprechend leistungsfähig ausgelegte elektrische Versorgungsschaltungen erforderlich;
3. Verschlechterung der Arbeitsweise der betreffenden Werkzeugmaschine, weil durch die Unwucht Ungenauigkeiten der Drehbewegung des Werkzeugs verursacht werden; und
4. für das Unwuchten ist ein verhältnismäßig großer Arbeitsaufwand erforderlich.

Aus der DE 22 63 096 ist eine Steuereinrichtung für ein Magnetlager bekannt, das mindestens zwei magnetische Radiallager und wenigstens zwei Sensoren pro Magnetlager zur Überwachung der relativen Radiallage der Elektromagneten des Magnetlagers und des rotierenden Körpers zueinander aufweist und ferner eine Kompensationsschaltung zum Ausgleich einer statischen und/oder dynamischen Unwucht.

Der Nachteil jener bekannten Steuereinrichtung besteht jedoch darin, daß sie die durch die Unwucht des rotierenden Körpers erzeugten Wirbelbewegungen, d. h. die dynamischen und die statischen Unwuchtschwingungen, immer noch nicht in ausreichender Weise unterdrückt. Aufgrund der vorstehend beschriebenen Problematik ist es für einen ruhigen Lauf höchster Präzision des rotierenden Körpers allerdings erforderlich, diese Unwuchtschwingungen äußerst präzise zu unterdrücken. Das ist mit der bekannten Steuereinrichtung noch nicht in ausreichendem Maß erzielbar.

Aus der GB 1 458 687 ist eine Steuereinrichtung für ein Magnetlager mit mindestens zwei magnetischen Radiallagern bekannt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Steuereinrichtung für ein Magnetlager mit mindestens zwei magnetischen Radiallagern der eingangs genannten Art derart zu verbessern, daß eine noch präzisere Unterdrückung der durch die Unwucht des rotierenden Körpers erzeugten Wirbelbewegungen möglich ist.

Diese Aufgabe wird durch die vorliegende Erfindung im Umfang der Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen des Erfindungsgegenstands sind in den Unteransprüchen angegeben.

Im folgenden werden zwei Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 eine Ansicht eines in einem schematisch dargestellten Magnetlager rotierenden Körpers;

Fig. 2 ein Schaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels einer Steuerschaltung für das Magnetlager gemäß Fig. 1;

Fig. 3 ein detailliertes Schaltbild der Kompensationseinrichtungen in der Steuerschaltung gemäß Fig. 2;

Fig. 4 ein Schaltbild eines zweiten Ausführungsbeispiels einer Steuerschaltung für das Magnetlager in Fig. 1;

Fig. 5 ein detailliertes Schaltbild der einen Kreiselektroeffekt kompensierenden Einrichtung gemäß Fig. 4;

Fig. 6 eine graphische Darstellung von Wirbelbewegungen entsprechenden Wellenformen; und

Fig. 7 eine zur Erläuterung der Erfindung dienende Lissajousfigur.

Fig. 1 zeigt die prinzipielle Konstruktion eines Magnetlagers. Es sind zwei Spulen Z_1 und Z_2 zum Nachweis der Lage des rotierenden Körpers 1 in axialer Richtung vorgesehen. Durch eine nicht dargestellte Steuereinrichtung wird in Abhängigkeit von dem die axiale Lage kennzeichnenden Ausgangssignal der Spulen Z_1 , Z_2 ein Leistungsverstärker über eine Kompensationsschaltung angetrieben, um Erregerspulen C_1 und C_2 zu erregen, die den rotierenden Körper 1 in der vorherbestimmten Lagerposition in axialer Richtung lagern.

Die in Fig. 2 dargestellte Steuerschaltung enthält Addierer 2, die an Spulenpaare X_1 , X_1' und X_2 , X_2' bzw. die Spulenpaare Y_1 , Y_1' und Y_2 , Y_2' ; in Fig. 1 angeschlossen sind, um die radiale Lage nachzuweisen. Ein Addierer 3 dient zum Addieren der Ausgangssignale der X-Addierer, um ein die Translationsbewegung in Richtung der X-Achse beinhaltendes Ausgangssignal zu erzeugen. Ein weiterer Addierer 3' dient zum Addieren der Ausgangssignale der Y-Addierer, um ein die Translationsbewegung in Richtung der Y-Achse beinhaltendes Ausgangssignal zu erzeugen. Die Ausgangssignale der Addierer 3, 3' werden einer Schaltung 4 zur Kompensation des Phasenunterschieds bzw. einer Proportional-Differential-Kompensationsschaltung 4 zugeführt, deren Ausgangssignale Leistungsverstärker 10 über Addierer 7, 8, 9 antreiben. Dadurch werden die Erregerspulen A_1 , A_1' und A_2 , A_2' erregt. Durch das Ausgangssignal eines Addierers 6, dem das Ausgangssignal des Addierers 2 der Spulen X_1 und X_1' und, über einen Inverter 5, das Ausgangssignal des Addierers 2 der Spulen X_2 und X_2' zugeführt werden, ergibt sich eine Komponente der Drehbewegung um die X-Achse. Entsprechend ergibt sich eine Komponente der Drehbewegung um die y-Achse durch das Ausgangssignal eines Addierers 6', dem das Ausgangssignal des Addierers 2 der Spulen Y_2 und Y_2' und, über einen weiteren Inverter 5, das Ausgangssignal des Addierers 2 der Spulen Y_1 und Y_1' zugeführt werden. Es ist eine breitbandige Kompensationsschaltung zur Kompensation der Phasenvoreilung oder Proportional-Differential-Kompensationsschaltung 11 vorgesehen, um Leistungsverstärker 10 über Addierer 12, 8, 9 anzutreiben, um die Erregerspule A_1 oder A_1' zu erregen. Das Ausgangssignal des Addierers 12 treibt die Leistungsverstärker 10 über je einen Inverter 13 und einen Addierer 9 an, um die Erregerspulen A_2 und A_2' bzw. B_1 und B_1' zu erregen.

Dadurch wird die Translationsbewegung des rotierenden Körpers 1 in Richtung der X-Achse und die Rotationsbewegung um die Y-Achse begrenzt. Es ist

ersichtlich, daß die Translationsbewegung in Richtung der Y-Achse und die Rotationsbewegung um die X-Achse ebenfalls in entsprechender Weise begrenzt werden.

Durch die Erfindung werden statische Unwuchtschwingungen aufgrund der Exzentrizität des rotierenden Körpers 1 und/oder dynamische Unwuchtschwingungen aufgrund des Winkelunterschieds zwischen der Hauptträgheitsachse und der Drehachse unterdrückt. Dies wird bei dem beschriebenen Ausführungsbeispiel der Erfindung dadurch erreicht, daß eine Kompensationsschaltung 14 für die statische Unwucht und/oder eine Kompensationsschaltung 15 für die dynamische Unwucht vorgesehen sind, mit denen ein Drehzahldetektor 16 verbunden ist. Diese Schaltungen sind in der Steuereinrichtung für die magnetischen Radiallager vorgesehen, um die beschriebene magnetische Abstützung zu stabilisieren.

Fig. 3 zeigt ein Schaltbild der statischen Kompensationsschaltung 14 und der dynamischen Kompensationsschaltung 15. Die Schaltung enthält Proportional-Kompensationsschaltungen 17, 18, 19, eine Differenzier-Kompensationsschaltung 20, eine Integrierschaltung 21, einen Addierer 22, einen Multiplizierer 23, einen Addierer 24 sowie Inverter 25 und 26. In einer sich überkreuzenden geschlossenen Schleife, die durch die Integrierschaltung 21, den Addierer 22, den Multiplizierer 23 und den Inverter 26 sowie durch eine weitere Integrierschaltung 21, einen weiteren Addierer 22 und einen weiteren Multiplizierer 23 gebildet wird, wird ein elektrisches Signal erzeugt, das synchron mit der Drehbewegung des rotierenden Körpers schwingt, und zwar in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit ω , die durch den Drehzahldetektor 16 ermittelt wird.

Die Amplitude und die Phase des elektrischen Signals (S) können durch die Proportional-Kompensationsschaltungen 17, 18 und 19, die Differenzier-Kompensationsschaltung 20 und den Inverter 25 eingestellt werden. Wenn die statische Kompensationsschaltung 14 und die dynamische Kompensationsschaltung 15 wie in Fig. 2 dargestellt angeschlossen sind, können die Amplituden- und Phasendifferenz zwischen den Synchronisationssignalen (S) in diesen Unwucht-Kompensationsschaltungen und die periodische Wirbelenergie aufgrund der Unwucht durch ein Positionsnachweissignal auf der Basis der Funktion der Korrekturereinrichtung kompensiert werden, welche die Proportional-Kompensationsschaltungen 17, 18, 19, die Differenzier-Kompensation 20 und den Inverter 25 enthält. Das Positionsnachweissignal bedeutet in diesem Zusammenhang a) das Ausgangssignal des Addierers 3, das die Komponente der Translationsbewegung des rotierenden Körpers 1 im Falle der statischen Kompensationsschaltung 14 anzeigt, und b) das Ausgangssignal des Addierers 6, das die Komponente der Drehbewegung um die X-Achse und um die Y-Achse im Falle der dynamischen Kompensationsschaltung 15 anzeigt. Wenn der Erregerstrom der Erregerwindungen entsprechend den Ausgangssignalen (S) dieser Kompensationsschaltungen 14 und 15 gesteuert wird, kann eine durch eine Unwucht verursachte Wirbelbewegung des rotierenden Körpers 1 vermieden werden, weil eine dem Effekt der Unwucht entgegenwirkende Kraft auf den rotierenden Körper 1 ausgeübt wird.

Das Ausführungsbeispiel in Fig. 4 betrifft eine Steuereinrichtung für eine magnetische Radiallagereinrichtung mit einer überkreuzten Rückkopplungs-Kompensation, um eine sofortige Verringerung von Präzes-

sions- und Nutationsbewegungen zu bewirken, die durch einen Kreiseffekt verursacht werden, wenn die Drehbewegung des rotierenden Körpers 1 um die X-Achse und die Y-Achse gesteuert wird. In dieser Schaltung sind eine Proportional-Kompensationsschaltung 27 und ein Inverter 28 als Kompensationseinrichtung mit überkreuzter Rückkopplung vorgesehen, um den Kreiseffekt des rotierenden Körpers zu unterdrücken. Maßnahmen für eine derartige Rückkopplungs-Kompensation sind an sich bekannt (Japanische Patentanmeldung Nr. 180712/81). Die Schaltung einer dynamischen Unwucht-Kompensationsschaltung 29 mit überkreuzter Rückkopplung ist in Fig. 5 dargestellt.

Die in Fig. 5 dargestellte Schaltung enthält eine Proportional-Kompensationsschaltung 30 und einen Inverter 31, die überkreuzt mit der dynamischen Kompensationsschaltung 15 in Fig. 3 in Abhängigkeit von der Rückkopplungs-Kompensation überkreuzt verbunden werden. Die Proportional-Kompensationsschaltung 30 und der Inverter 31 arbeiten zusammen mit den Proportional-Kompensationsschaltungen 17, 18 und 19, der Differenzier-Kompensationsschaltung 20 und dem Inverter 25 als Korrekturereinrichtung, wie in Verbindung mit Fig. 3 beschrieben wurde. In der dynamischen Unwucht-Kompensationsschaltung 29 schwingt ein Signal periodisch synchron mit der Drehbewegung des rotierenden Körpers, das durch das Ausgangssignal des Drehzahldetektors 16 erzeugt wird, mit Hilfe von zwei Integrierschaltungen 21, zwei Addierern 22, zwei Multiplizierern 23 und einem Inverter 26. Die Amplitude und Phase des Signals wird durch die Korrekturereinrichtung korrigiert, so daß eine Koinzidenz mit Signalen entsprechend der periodischen momentanen Kraft auftritt, die auf den rotierenden Körper aufgrund der dynamischen Unwucht einwirkt.

Das Korrektursignal wird durch die Proportional-Kompensationsschaltungen 17, 18, 19 und 30, die Differenzier-Kompensationsschaltung 20 und die Inverter 25, 31 erzeugt, aufgrund des Ausgangssignals des Addierers 6, also des die Position nachweisenden Signals. Wenn der Erregerstrom der Erregerwindungen in Abhängigkeit von dem Ausgangssignal der dynamischen Kompensationsschaltung 29 gesteuert wird, wird ein Moment auf den rotierenden Körper 1 ausgeübt, um dessen Wirbelbewegung aufgrund seiner Unwucht zu unterdrücken.

Mit Hilfe von Fig. 6 und 7 sollen die Vorteile der beschriebenen Ausführungsbeispiele näher erläutert werden. Dabei ist Θ_x der Drehwinkel um die X-Achse, und Θ_y der Drehwinkel um die Y-Achse. Die Kurve 32 in Fig. 6 zeigt eine Wellenform der Wirbelbewegung, falls die dynamische Kompensationseinrichtung 29 nicht vorgesehen ist. Wenn die dynamische Kompensationsschaltung jedoch vorgesehen ist, ergibt sich eine Kurve 33, die schnell abklingt und gegen Null konvergiert. Fig. 7 zeigt eine Fig. 6 entsprechende Wellenform in Form einer Lissajoursfigur. Wenn die Kompensationsschaltung 29 nicht vorgesehen ist, ergibt sich ein in gestrichelten Linien dargestellter Kreis 34 entsprechend der Rotation im Gegenuhrzeigersinn. Beim Einschalten der Kompensationseinrichtung 29 im Punkt P wird die Amplitude der Wirbelbewegung entsprechend der Kurve 35 verringert.

Bei dem beschriebenen Ausführungsbeispielen ermöglicht deshalb die Verwendung einer statischen Kompensationsschaltung und/oder einer dynamischen Kompensationsschaltung eine Unterdrückung der Wirbelbewegung, die durch eine Unwucht des rotierenden

Körpers verursacht wird, so daß eine erhöhte Genauigkeit der Drehbewegung des rotierenden Körpers erzielt werden kann, der elektrische Leistungsverbrauch verringert und ebenfalls Vibrationen und Geräusche verringert werden können.

Patentansprüche

1. Steuereinrichtung für ein Magnetlager, das mindestens zwei magnetische Radiallager aufweist, mit wenigstens zwei Sensoren pro Magnetlager zur Überwachung der relativen Radiallage der Elektromagneten des Magnetlagers und des rotierenden Körpers zueinander, mit folgenden Merkmalen:

a) eine Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') zerlegt die Ausgangssignale der Sensoren in erste Signale, die zwei rechtwinklig zur Rotationsachse des rotierenden Körpers (1) verlaufende Translationsbewegungen repräsentieren, und in zweite Signale, die zwei Rotations-Freiheitsgrade repräsentieren, welche eine Neigung der Rotationsachse des rotierenden Körpers (1) angeben;

b) eine erste Kompensationsschaltung (4) erzeugt aus den ersten Signalen der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') Ausgangssignale zur Stabilisierung jedes der Translationsbewegungssignale;

c) eine zweite Kompensationsschaltung (11) erzeugt aus den zweiten Signalen der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') Ausgangssignale zur Stabilisierung jedes der Rotationsbewegungssignale;

d) eine dritte Kompensationsschaltung (14, 15) erhält als Eingangssignale die ersten Signale der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') getrennt von den zweiten Signalen der Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6'), sowie das Ausgangssignal eines Drehzahldetektors (16), und erzeugt als Ausgangssignale Steuersignale zur Unterdrückung solcher Schwingungen oder Taumelbewegungen, die auf der Drehfrequenz (ω) des Rotationskörpers liegen;

e) die Ausgangssignale der ersten Kompensationsschaltung (4) und die auf die ersten Eingangssignale zurückzuführenden Ausgangssignale der dritten Kompensationsschaltung sowie die Ausgangssignale der zweiten Kompensationsschaltung und die auf die zweiten Eingangssignale zurückzuführenden Ausgangssignale der dritten Kompensationsschaltung werden in einer nachgeschalteten Verarbeitungsstufe zusammengeführt;

f) es sind Mittel (8, 9) zur Berechnung eines Erregerstroms für jeden Elektromagneten in Abhängigkeit der Ausgangssignale der Verarbeitungsstufe vorgesehen; und

g) Leistungsverstärker (10) erregen in Abhängigkeit des Ausgangssignals der Mittel (8, 9) zur Berechnung der Erregerströme die Elektromagneten entsprechend.

2. Steuereinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Entkopplungsstufe (3, 3'; 6, 6') Addierer (3, 3') zum Erzeugen der ersten Signale und Addierer (6, 6') zum Erzeugen der zweiten Signale enthält.

3. Steuereinrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel (8, 9) zur Be-

rechnung der Erregerströme Addierer sind.

4. Steuereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die dritte Kompensationsschaltung (14, 15) einen Kompensator für die statische Unwucht enthält.

5. Steuereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die dritte Kompensationsschaltung (14, 15) einen Kompensator für die dynamische Unwucht enthält.

6. Steuereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die dritte Kompensationsschaltung (14, 15) sowohl einen Kompensator für die statische Unwucht als auch einen Kompensator für die dynamische Unwucht enthält.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

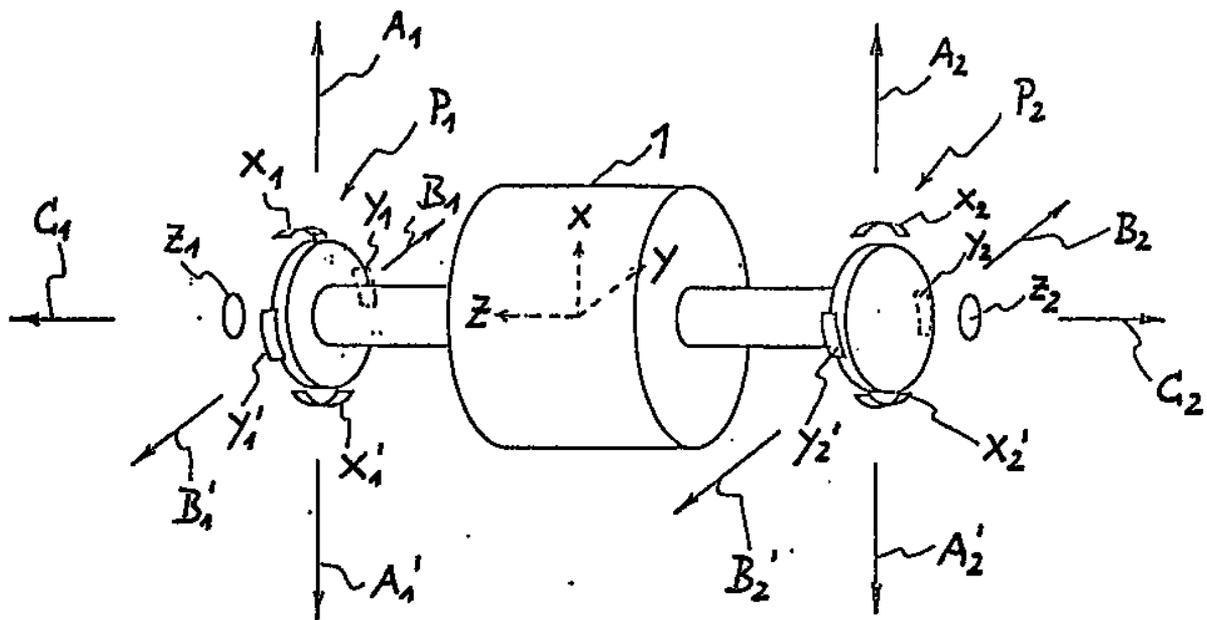


FIG. 2

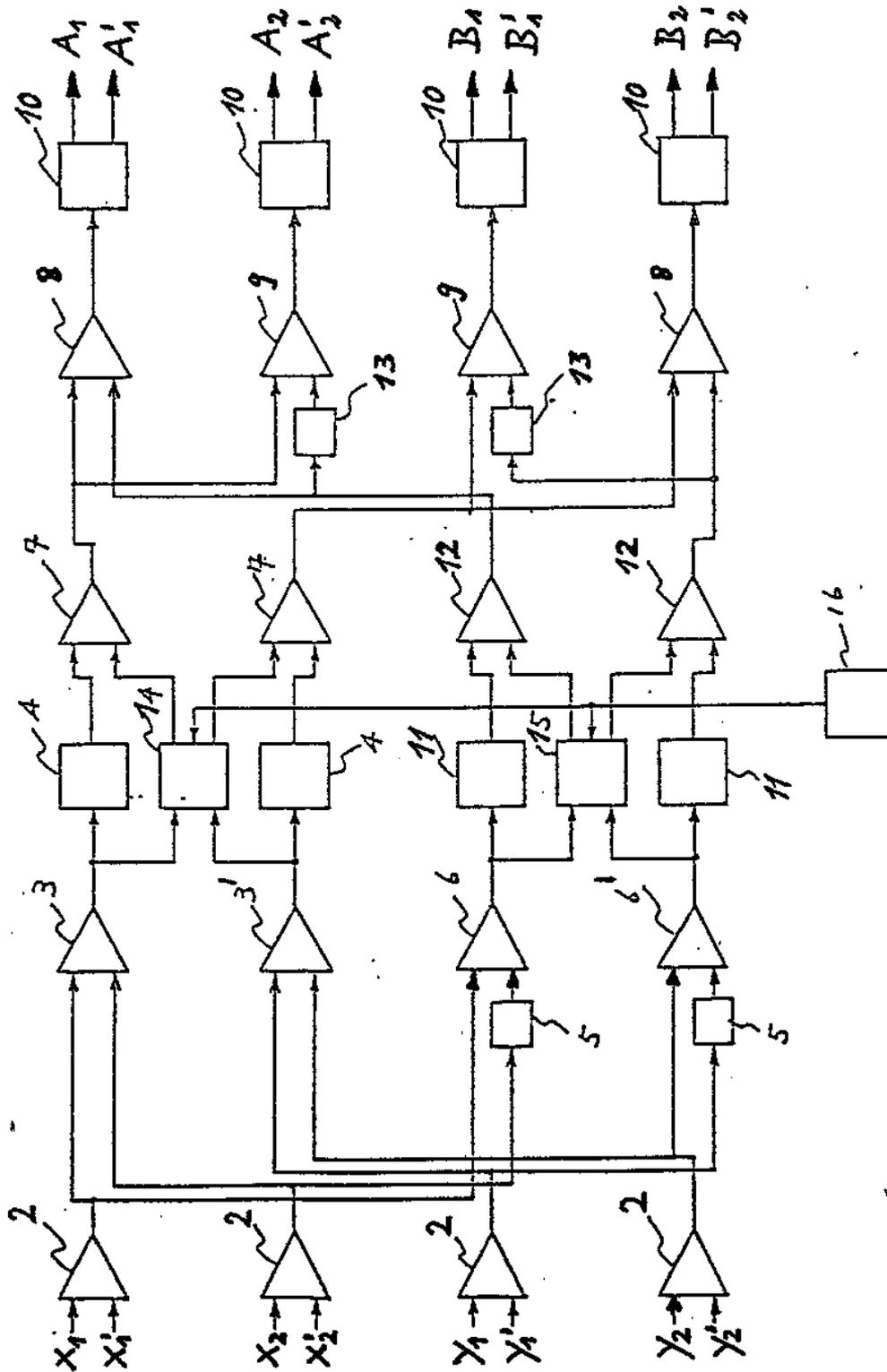


FIG. 3

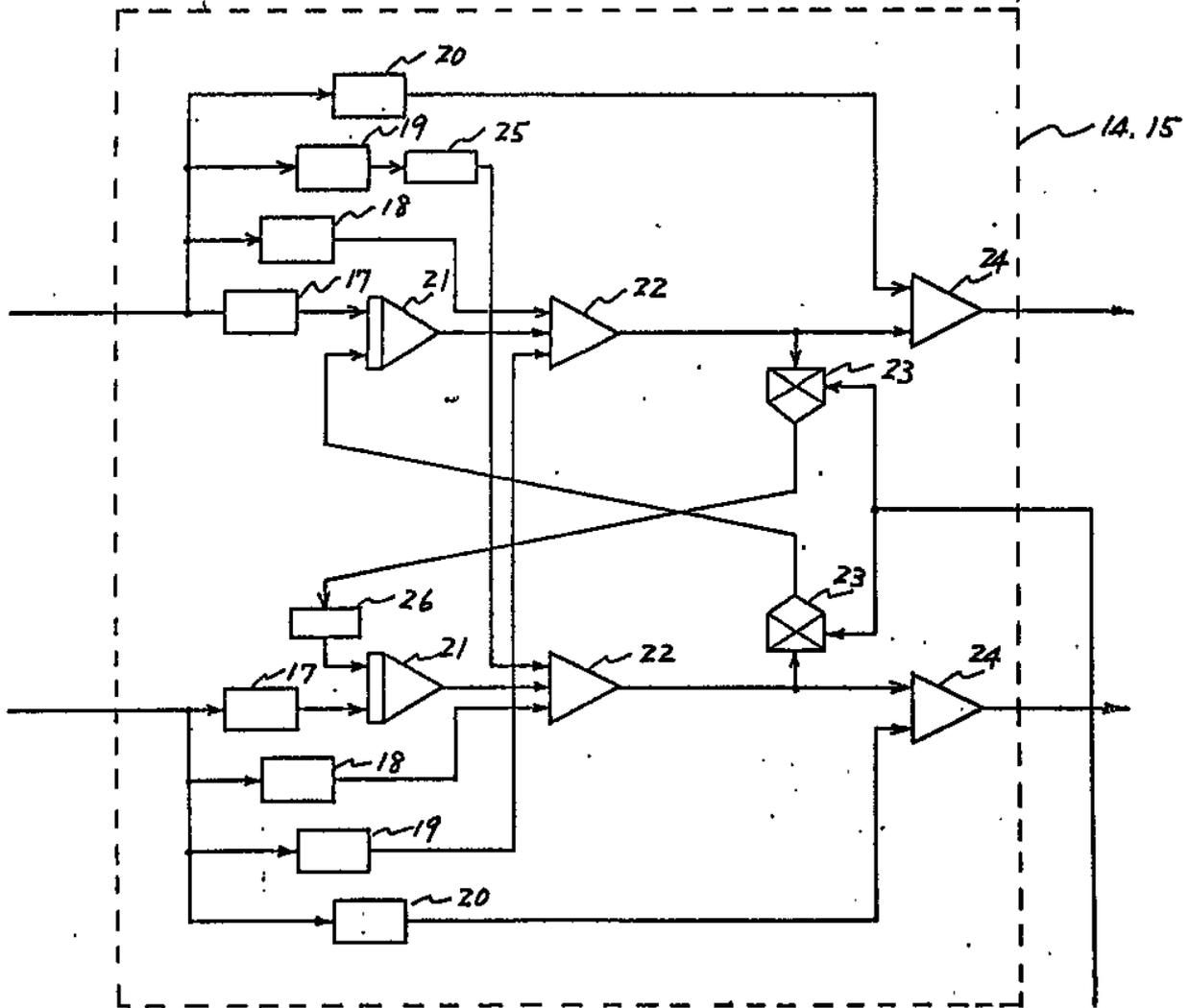


Fig. 4

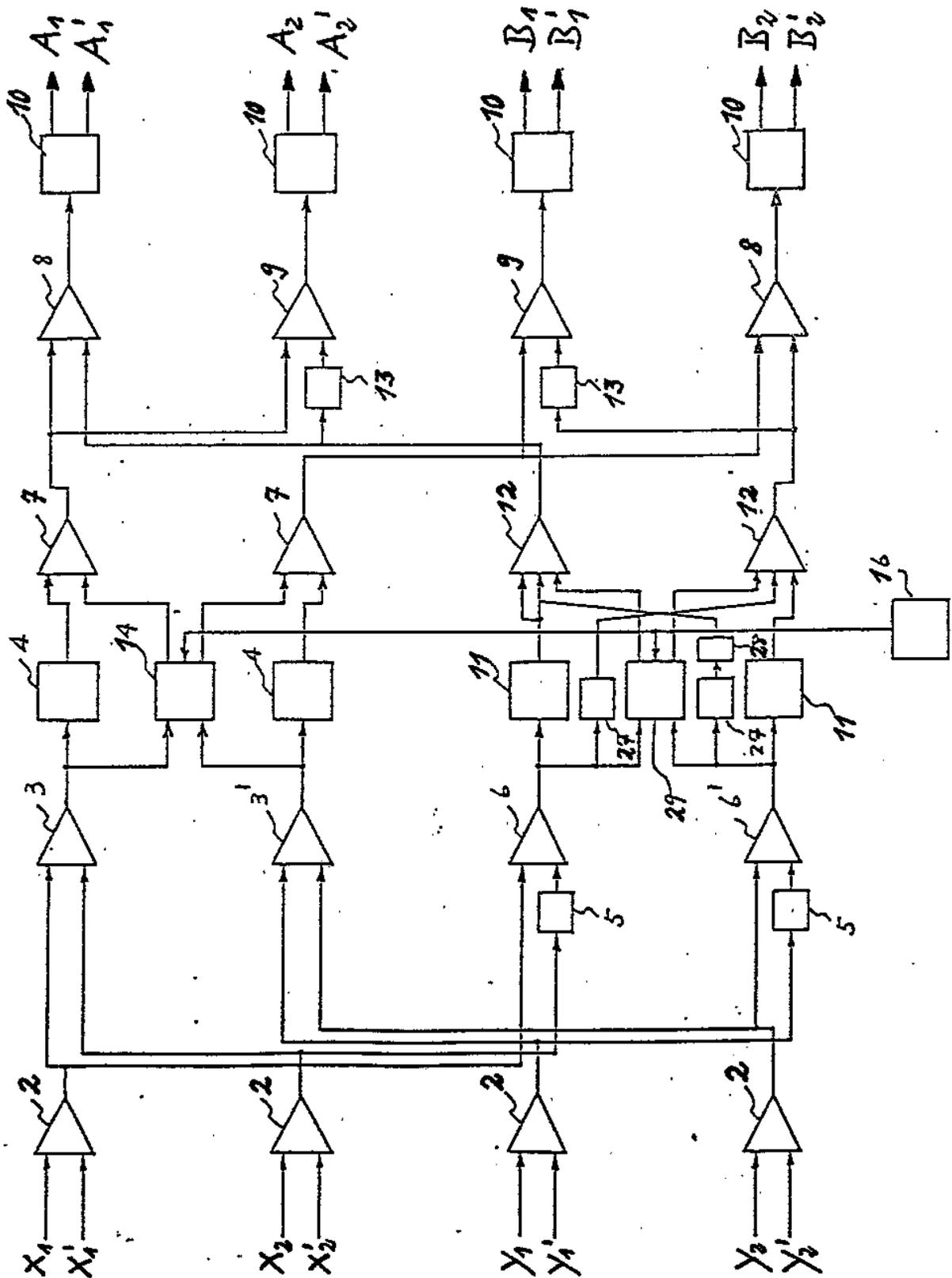


FIG. 5

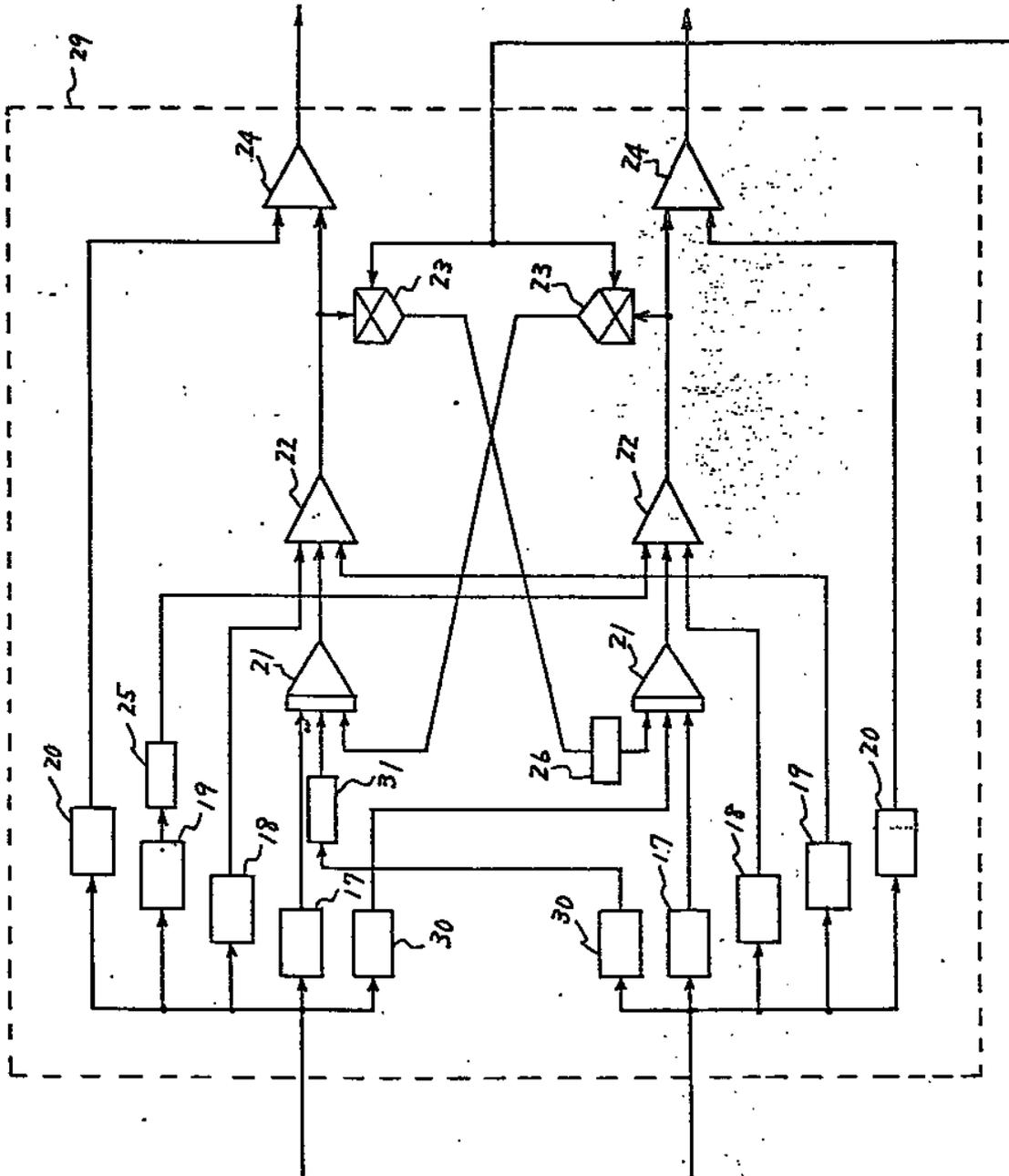


FIG. 6

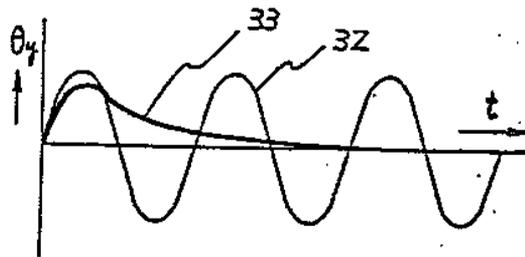


FIG. 7

