

DEUTSCHE DEMOKRATISCHE REPUBLIK
AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

PATENTCHRIFT 147 029

Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 5 Absatz 1 des Änderungsgesetzes zum Patentgesetz

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

Int. Cl.³

(11) 147 029 (44) 11.03.81 3 (51) H 02 K 41/03
(21) WP H 02 K / 216 572 (22) 31.10.79

-
- (71) VEB Elektromat im VEB Kombinat Mikroelektronik, Dresden, DD
(72) Rießland, Eberhard, Dipl.-Ing.; Opitz, Günther, Dipl.-Phys., DD
(73) siehe (72)
(74) VEB Elektromat im VEB Kombinat Mikroelektronik, 8080 Dresden, Karl-Marx-Straße
-

- (54) Verfahren und Schaltungsanordnung zum Neutralisieren des Hystereseinflusses
-

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren und die zugehörige Schaltungsanordnung zum Neutralisieren des Hystereseinflusses weichmagnetischer Werkstoffe vorzugsweise in Positioniersystemen. Dabei werden den Wicklungen außer den ortsbestimmenden Strömen beim Erreichen der Sollposition noch zusätzliche Neutralisationsströme zugeführt. Die Neutralisationsströme stellen dabei abklingende Wechselstromimpulse unterschiedlicher Phasenlage dar, um die durch die Neutralisation hervorgerufene zusätzliche Tangentialkraft gering bis Null zu halten. Beim Neutralisieren wird dabei für jeden Pol durch das resultierende Magnetfeld die Neukurve geschnitten, wie das in Fig.4 gezeigt ist. Dadurch wird der Arbeitspunkt durch eine abklingende Hysteresespirale um den Arbeitspunkt eingestellt.

- Fig.4 -

Verfahren und Schaltungsanordnung zum Neutralisieren des Hystereseeinflusses

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Neutralisieren des Hystereseeinflusses, insbesondere in elektromechanischen Positioniersystemen sowie die Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens.

Derartige Positioniersysteme werden in der Automatisierungstechnik zur Lösung der vielfältigsten Positionieraufgaben benötigt. Ebenfalls ist die Erfindung in magnetischen Kreisen einsetzbar, die weichmagnetische Materialien enthalten und bei denen eine feinstufige Magnetisierung benötigt wird.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Aus der DE-OS 2265246 ist ein Positioniersystem bekannt, bei welchem die Tangentialkraft nach folgender Formel bestimmt ist.

$$F = F_A + F_B = c \cdot I \cdot \sin \alpha$$

Dabei gilt für $F_A = -c \cdot I \cdot \sin \frac{2\pi x}{p} \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \vartheta \right)$

$$\text{und } F_B = c \cdot I \cdot \cos \frac{2\pi x}{p} \sin \left(\frac{2\pi x}{p} + \vartheta \right)$$

Im statischen Fall gilt $\vartheta = 0$ und im dynamischen Fall nimmt ϑ folgende Werte an $-\frac{\pi}{2} < \vartheta < +\frac{\pi}{2}$.

Im statischen Fall herrscht dabei ein Kraftgleichgewicht für die Position x unter der Voraussetzung, daß die Ströme I_A und I_B entsprechend für die Position x eingestellt werden und keine weiteren magnetischen Spannungen vorhanden sind. Bei weichmagnetischen Werkstoffen aber ist, zumindest bei ökonomisch vertretbaren Werkstoffen, stets eine - wenn auch kleine Hysterese zu beobachten. Besonders hochsättigbare Werkstoffe werden aber zur Realisierung großer Tangentialkräfte bei diesen Positioniersystemen benötigt. Sie besitzen jedoch meist eine nicht vernachlässigbare Hysterese.

Die Hysterese des magnetischen Kreises der Wicklung bedingt dabei zusätzliche magnetische Urspannungen Θ_A und Θ_B , die die letztgenannte Gleichung für $F = 0$ und $\vartheta = 0$ wie folgt verändern

$$c \left(I_{\max} \sin \frac{2\pi x}{p} + \frac{\Theta_A(z)}{w} \right) \cos \frac{2\pi (x + \Delta x)}{p} = c \cdot$$

$$\left(I_{\max} \cos \frac{2\pi x}{p} + \frac{\Theta_B(z)}{w} \right) \sin \frac{2\pi (x + \Delta x)}{p}$$

$\Theta_A(z)$ und $\Theta_B(z)$ sind dabei die durch die Hysterese bedingten, vom momentanen und vorhergehenden Systemzustand abhängigen, wirksamen Durchflutungen und w ist die Windungszahl der von I durchflossenen Spule. Um die Gleichgewichtsbedingung zu genügen, ist ein Argument der tri-

gonometrischen Wegfunktion die Größe Δx einzuführen, die so groß ist, daß die Einflüsse von Θ_A und Θ_B ausgeglichen werden. Dies bedeutet aber, daß sich eine Abweichung zwischen Soll- und Istwert von x einstellt. Der Hystereseeinfluß, bedingt durch den Restmagnetismus in den weichmagnetischen Teilen, ist daher eine wesentliche Störgröße.

Zum Entmagnetisieren, das heißt zum Beseitigen dieses Einflusses gibt es verschiedene Verfahren mit den zugehörigen Schaltungsanordnungen.

Beispielsweise beschreibt die DE-AS 2447363 eine Schaltung sowohl zum Magnetisieren als auch zum Entmagnetisieren, bei der ein schwingender und verschieden stark gedämpfter Energieaustausch zwischen einem Kondensator und der Induktivität mit dem zu entmagnetisierenden Material erfolgt. Auf Grund der möglichen feinen Stromabstufung lassen sich definierte Abmagnetisierungen des Magnetwerkstoffes erzielen.

Für den Einsatz in Positioniersystemen ist hierbei nachteilig, daß das Magnetfeld insgesamt jeweils umgepolt wird.

Ein weiteres Verfahren beschreibt in der DE-AS 2534419 die Abmagnetisierung eines Permanentmagneten auf den Arbeitspunkt zum Einsatz in polarisierten Relais. Hierbei wird auf der inneren Einhüllenden der möglichen Entmagnetisierungskurven beziehungsweise auf einer angenommenen Entmagnetisierungskurve bis zu einem theoretisch vorbestimmten Arbeitspunkt abmagnetisiert, um Steuungen der Entmagnetisierungskurven auszugleichen.

Der Unterschied zu einer Neutralisation des Hystereseeinflusses ist dabei, daß die Magnetisierungskennlinie einen vorbestimmten Verlauf besitzt. Somit verbietet sich der Einsatz in den betrachteten Positioniersystem.

Ziel der Erfindung

Das Ziel der Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur Neutralisation des Hystereseeinflusses weichmagnetischer Werkstoffe, vorzugsweise in elektromagnetischen Positioniersystemen zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit bei gleichzeitigen Einsatz ökonomisch vertretbarer Werkstoffe zu schaffen, ohne daß wesentliche Nebenwirkungen, wie zum Beispiel größere Tangentialkräfte, beim Neutralisieren auftreten.

Die Erfindung schließt die Schaffung der entsprechenden Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens ein.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist es, durch Neutralisation des Hystereseeinflusses weichmagnetischer Werkstoffe, vorzugsweise in analog gesteuerten, luftgelagerten Positioniereinrichtungen, die Hysteresefehler der Positionierung zu beseitigen, indem alle Polsysteme beim Abschluß des Positioniervorganges ein definiertes Neutralisationssignal zugeführt erhalten, welches die in den magnetischen Steuerkreisen durch die Hysterese bedingten Durchflutungsanteile beseitigt und so den Schritt-antrieb auf die exakte Sollposition bewegt.

Merkmale der Erfindung

Das erfindungsgemäße Verfahren zum Neutralisieren des Hystereseeinflusses weichmagnetischer Werkstoffe wird vorzugsweise in luftgelagerten Linearschrittantrieben angewendet.

Ein Hystereseeinfluß in derartigen Schrittantrieben hat ein Abweichen der Ist-Position von der Soll-Position im stationären Zustand zur Folge, was sich als Positionierfehler äußert.

Zur reproduzierbaren Arbeitsweise für die wechselnden

Bewegungsrichtungen muß der Betrieb auf der Neukurve der Hystereseschleife angestrebt werden. Um diese Betriebsverhältnisse zu erreichen, wird ein abklingendes Wechselfeld, wie es aus anderen Entmagnetisierungsverfahren bekannt ist, verwendet. Dieses abklingende Magnetwechselfeld wird jedoch einem Magnetgleichfeld, welches durch einen von der Soll-Position bestimmten Wicklungsstrom und ein Permanentfeld gegeben ist, überlagert. Das resultierende zeitlich variable Magnetfeld ist so bemessen, daß die Neukurve der weichmagnetischen Elemente des magnetischen Kreises geschnitten wird. Durch das abklingende Wechselfeld wird somit der Arbeitspunkt auf der Neukurve durch eine abklingende Hysteresespirale eingestellt. Die Neutralisation wird dabei in allen Polen der Positioniereinrichtung vorzugsweise zeitlich parallel durchgeführt und dadurch die Soll-Position eingestellt. Die Pole werden mit Neutralisationsströmen I_N definierter Amplitude und Phasenlage angesteuert, um die Tangentralkräfte des Systems zu minimieren, das heißt die Soll-Position auf einem möglichst kurzen Weg zu erreichen.

Die erfindungsgemäße Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens zum Neutralisieren des Hystereseeinflusses enthält einen Gleichstromgenerator für die ortsabhängigen Ströme I_A ; I_B ; I_C ; I_D , die jeweils einer Wicklung zugeordnet sind. Weiterhin ist den Wicklungen ein Generator zum Erzeugen abklingender Wechselstromimpulse mit jeweils einer Phasendrehschaltung zugeordnet, die die Phase des Wechselstromimpulses um den Winkel φ_A ; φ_B ; φ_C ; φ_D drehen.

Dabei ist der Wechselstromgenerator mit einer Signalleitung verbunden, wodurch bei dem Signal "Stop" der abklingende Wechselstromimpuls ausgelöst wird.

Der Gleichstromgenerator mit je einem Stromausgang und die zugehörige Phasendrehschaltung sind mit den Eingängen von Leistungsverstärkern verbunden, welche ihrerseits mit den entsprechenden Wicklungen verbunden sind.

In Ausgestaltung der Erfindung betragen die Winkel

$$\varphi_A = \varphi_B = 0 \text{ und } \varphi_C = \varphi_D = \pi.$$

Die Phasendrehschaltungen für $\varphi = 0$ werden dabei durch normale Eingänge und die Phasendrehschaltung für $\varphi = \pi$ durch invertierende Eingänge der Leistungsverstärker gebildet.

Ausführungsbeispiel

Die Erfindung ist an einem Ausführungsbeispiel und anhand von Zeichnungen näher erläutert.

Dabei zeigen

Fig. 1 die Polsysteme des Schrittantriebes

Fig. 2 den Verlauf der Wicklungsströme in Abhängigkeit vom Ort

Fig. 3 ein Prinzipschaltbild der Schaltungsanordnung

Fig. 4 den schematischen Verlauf der Neutralisation des Hystereseeinflusses

Fig. 5 die verwendete Schaltungsanordnung

Bei der in Fig. 1 dargestellten vierphasigen Positioniereinrichtung gilt folgende Kraftgleichung für die Sollposition, das heißt im Stillstand:

$$F = a \sin \frac{4\pi x}{p} + 2b \Theta \cdot \sin \frac{2\pi x}{p}$$

mit $\Theta = \Theta_{\max} \cdot \cos \frac{2\pi x}{p}$ für ein Einzelsystem, wobei x

die Auslenkung des Systems aus seiner Nullage, p die Nutteilung, Θ die durch den Spulenstrom bedingte magnetische Ursprungsspannung sowie a und b Konstanten sind.

Wird das Einzelsystem mit einer Neutralisationsdurchflutung $\Delta \Theta(t)$ beaufschlagt, so ändert sich vorstehende Gleichung in

$$F = a \sin \frac{4\pi x}{p} + 2b (\Theta + \Delta \Theta(t)) \sin \frac{2\pi x}{p}$$

Nach Umformung gelten damit folgende Gleichungen für die Einzelsysteme A; B; C; D:

$$F_A = \sin \frac{4\pi x}{p} (a + b \Theta_{\max}) + 2b \sin \frac{2\pi x}{p} \cdot \Delta \Theta_A (t)$$

$$F_B = -\sin \frac{4\pi x}{p} (a + b \Theta_{\max}) + 2b \sin \left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{2} \right) \Delta \Theta_B (t)$$

$$F_C = \cos \frac{4\pi x}{p} (a + b \Theta_{\max}) + 2b \sin \left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{4} \right) \Delta \Theta_C (t)$$

$$F_D = -\cos \frac{4\pi x}{p} (a + b \Theta_{\max}) + 2b \sin \left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{3\pi}{4} \right) \Delta \Theta_D (t)$$

Die Gesamtkraft ergibt sich somit während des Neutralisationsvorganges zu

$$F = 2b \left(\sin \left(\frac{2\pi x}{p} \right) \Delta \Theta_A + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} \right) \Delta \Theta_B + \sin \left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{4} \right) \Delta \Theta_C + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{4} \right) \Delta \Theta_D \right)$$

Um die Bewegung des Gesamtsystems als Folge der Neutralisationssignale zu minimieren, muß F möglichst klein werden. Speziell sollen die Kräfte, die auf das System wirken, verschwinden, wenn die Sollposition bereits erreicht ist.

$$\text{Bei } \Delta \Theta = \Theta_N \cdot \sin (\omega t + \varphi) \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$$

$$\text{gilt } F_{AN} = -K \Theta_N e^{\frac{-t}{\tau}} \sin \left(\frac{2\pi x}{p} \right) \sin (\omega t + \varphi_A)$$

$$F_{BN} = +K \Theta_N e^{\frac{-t}{\tau}} \cos \left(\frac{2\pi x}{p} \right) \sin (\omega t + \varphi_B)$$

$$F_{CN} = -K \Theta_N e^{\frac{-t}{\tau}} \sin \left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{4} \right) \sin (\omega t + \varphi_C)$$

$$F_{DN} = +K \Theta_N e^{\frac{-t}{\tau}} \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{4} \right) \sin (\omega t + \varphi_D)$$

Eine Durchrechnung zeigt, daß zum Beispiel bei einer Phasenbeziehung von

$$\begin{array}{ll} \varphi_A = 0 & \varphi_C = \frac{3\pi}{4} \\ \varphi_B = \frac{\pi}{2} & \varphi_D = \frac{5\pi}{4} \end{array}$$

und Vorliegen der Soll-Position sich die tangentialen Kräfte aufheben. Diese Ansteuerart der Neutralisationsströme ist jedoch in der Praxis zu aufwendig. Wirtschaftlicher ist der Fall zu realisieren, daß die Neutralisationsströme und damit die Neutralisationsdurchflutungen durch folgende Gleichung bestimmt werden:

$$\Delta\Theta = \pm \Theta_N \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \cdot \sin(\omega t).$$
 Bei gleicher Amplitude kann in der Praxis nur das Vorzeichen variiert werden, wobei sich folgende Varianten $V_1 \dots V_4$ ergeben.

		V_1	V_2	V_3	V_4
sign	A	1	1	1	1
sign	B	1	1	-1	-1
sign	C	1	-1	-1	1
sign	D	1	-1	+1	-1

Aus der numerischen Auswertung folgt sofort, daß sich die auftretenden zusätzlichen Maximalwerte der tangentialen Gesamtkraft wie folgt verhalten:

$$/F_{V2}/ = /F_{V3}/ \approx /0,4 F_{V1}/ = /0,4 F_{V4}/$$

Somit ergeben die Varianten V_2 und V_3 die geringsten zusätzlichen Reaktionskräfte und sind für die Durchführung des Verfahrens besonders geeignet.

Über einer ferromagnetischen Grundplatte 1 mit Zähnen 2 sind vier luftgelagerte Polsysteme angeordnet. Die Polsysteme sind in einen Läufer 3 angeordnet. Dabei korrespondieren jeweils zwei Polsysteme, so daß sich zwei Gruppen mit den Polsystemen 10 und 10' sowie den Polsystemen 20 und 20' ergeben. In der Zählung von links beginnend enthält das Polsystem 10 den Pol 11 mit der Wicklung 12 und den Zähnen 13 und 14 sowie den Pol 15 mit der Wicklung 16 und den Zähnen 17; 18. Das Polsystem 20' enthält den Pol 21' mit der Wicklung 22' und den Zähnen 24'; 23' sowie den Pol 25' mit der Wicklung 26' und den Zähnen 28'; 27'. Entsprechend dazu enthält das Polsystem 20 den Pol 21 mit der Wicklung 22 und den Zähnen 23; 24 sowie den Pol 25 mit der Wicklung 26 und den Zähnen 27; 28.

Weiterhin enthält der Pol 10' den Pol 11' mit der Wicklung 12' und den Zähnen 14'; 13' sowie den Pol 15' mit der Wicklung 16' und den Zähnen 18'; 17'. Die Zähne der Pole sind dabei über den Zähnen 2 derart angeordnet, daß folgender Versatz bei Grundstellung der Zähne 13; 13' mit der Zahnteilung p der Zähne 2 entsteht.

Zähne 13; 13' $\triangleq 0p$	Zähne 23; 23' $\triangleq 0p + \frac{p}{8}$
14; 14' $\triangleq \frac{p}{2}$	24; 24' $\triangleq \frac{p}{2} + \frac{p}{8}$
17; 17' $\triangleq \frac{p}{4}$	27; 27' $\triangleq \frac{p}{4} + \frac{p}{8}$
18; 18' $\triangleq \frac{3p}{4}$	28; 28' $\triangleq \frac{3p}{4} + \frac{p}{8}$

Die Wicklungen 12; 12' werden dabei von dem Strom I_A durchflossen. Weiterhin ist der Strom I_B den Wicklungen 16; 16', der Strom I_C den Wicklungen 22; 22' und der Strom I_D den Wicklungen 26; 26' zugeordnet.

Den Verlauf der Ströme $I_A \dots I_D$ in Abhängigkeit des Ortes des Läufers für eine Bewegung um die Polteilung p zeigt Fig. 2. Die Ströme sind phasenverschobene Sinusfunktionen, wie im Verfahren erläutert wurde und in Fig. 2 gezeigt ist. Wie in der Diskussion mit dem Stand der Technik bereits gezeigt wurde, bedingt der Hystereseeinfluß ein Nacheilen der Ist-Position des Läufers 3 hinter der Soll-Position auch im stationären Zustand.

Fig. 3 zeigt ein Prinzipschaltbild der Schaltungsanordnung zum Neutralisieren des Hystereseeinflusses. Den Wicklungen 12; 12', die in Reihe geschaltet sind und deren Eisenkreise durch die Pole 11; 11' gebildet werden, sind mit einem Verstärker 30.1 verbunden. Dessen positive Eingänge sind mit einem Steuerteil 31, der ein dem in dem Verstärker 30.1 gebildeten Strom I_A analoges Signal A erzeugt, und über einem Phasenschieber 32.1 der Phasendrehung φ_A mit einem Generator 33 verbunden. Dieser Generator 33 erzeugt einen abklingenden Wechselstromimpuls. Zwischen dem Gleichstromkreis und dem Wechselstromkreis können dabei nicht gezeichnete Entkopplungsmittel wie Widerstände und Dioden angeordnet sein.

Eine gleichartige Zuordnung besteht dabei zwischen den Wicklungen 16; 16' mit den Verstärker 30.2, den Wicklungen 22; 22' mit dem Verstärker 30.3 und den Wicklungen 26; 26' mit dem Verstärker 30.4 und den übrigen Schaltelementen. Der Generator 33 ist dabei mit einer Signalleitung "Stop" verbunden, die bei Erreichen der Sollposition positives Signal führt und damit den abklingenden Wechselimpuls auslöst.

Bei Erreichen der Sollposition und Auslösen des Wechselimpulses ergibt sich ein resultierendes Magnetfeld in den Polen 11; 11' wie auch in den anderen Polen, dessen Wechselgröße bei entsprechender Dimensionierung des Neutralisationsstromes

$$I_N = I'_0 e^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\omega t + \varphi_A)$$
 die Neukurve der Magnetisierung schneidet. Durch die abklingende e-Funktion des Neutralisationsstromes ergibt sich eine Hysteresespirale um den Arbeitspunkt auf der Neukurve. Dabei werden die störenden Durchflutungen beseitigt und der Schrittantrieb auf der genauen Soll-Position eingestellt.

Fig. 4 zeigt den schematischen Verlauf der Neutralisation des Hystereseinflusses für einen Strom in zwei angenommenen momentanen Durchflutungswerten.

Damit die Tangentialkraft beim Neutralisieren gleich Null wird, drehen die Phasenschieber 32.1; 32.2; 32.3; 32.4 den Phasenwinkel des Stromes I_{NA} ; I_{NB} ; I_{NC} ; I_{ND} um den Winkel $\varphi_A = 0$; $\varphi_B = \frac{\pi}{2}$; $\varphi_C = \frac{3\pi}{2}$; $\varphi_D = \frac{\pi}{2}$

Falls geringe Tangentialkräfte zulässig sind, werden die Phasenschieber 32.1; 32.2 durch die positiven Eingänge der Verstärker 30.1; 30.2 und die Phasenschieber 32.3; 32.4 durch negative Eingänge der Verstärker 30.3; 30.4 gebildet, wie Fig. 5 zeigt.

Damit ergeben sich folgende Phasenwinkel

$$\varphi_A = 0; \varphi_B = 0; \varphi_C = \pi; \varphi_D = \pi$$

und als resultierende Tangentialkraft beim Neutralisieren ergibt sich eine minimierte Tangentialkraft, wie in der Offenbarung des Verfahrens aufgezeigt wurde. Eine Umstellung der Schaltungsanordnung auf eine andere Anzahl von Polen, deren Hystereseinfluß neutralisiert werden soll, ist hierbei möglich.

Erfindungsanspruch

1. Verfahren zum Neutralisieren des Hystereseeinflusses weichmagnetischer Werkstoffe, vorzugsweise in elektromechanischen Positioniereinrichtungen zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit durch Verwendung eines abklingenden Magnetwechselfeldes, gekennzeichnet dadurch, daß einem Magnetgleichfeld ein abklingendes Magnetwechselfeld überlagert wird, daß durch das resultierende Magnetfeld die Neukurve geschnitten wird und der genaue Arbeitspunkt durch eine abklingende Hysteresespirale auf der Neukurve eingestellt wird.
2. Verfahren nach Punkt 1, gekennzeichnet dadurch, daß in mehreren Polen der Arbeitspunkt gleichzeitig eingestellt wird.
3. Verfahren nach Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß die Pole während der Neutralisation mit Magnetwechselfeldern unterschiedlicher Phasenlage angesteuert werden.
4. Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens nach Punkt 3, gekennzeichnet dadurch, daß den Wicklungen (12; 12'; 16; 16'; 22; 22'; 26; 26') der Pole (11; 11'; 15; 15'; 21; 21'; 25; 25') jeweils ein Ausgang eines Steuerteiles (31) mit den Strömen (I_A ; I_B ; I_C ; I_D) und ein Generator (33) mit jeweils einem Phasenschieber (32.1; 32.2; 32.3; 32.4) und ein Verstärker (30.1; 30.2; 30.3; 30.4) zugeordnet ist, wobei die Wicklungen paarweise in Reihe geschaltet sind.
5. Schaltungsanordnung nach Punkt 4, gekennzeichnet dadurch, daß die Phasenschieber (32.1; 32.2) ein positiver Eingang des Verstärkers (30.1; 30.2) mit $\varphi_A = \varphi_B = 0$ und die Phasenschieber (32.3; 32.4) ein negativer Eingang des Verstärkers (30.3; 30.4) mit $\varphi_C = \varphi_D = \pi$ ist.

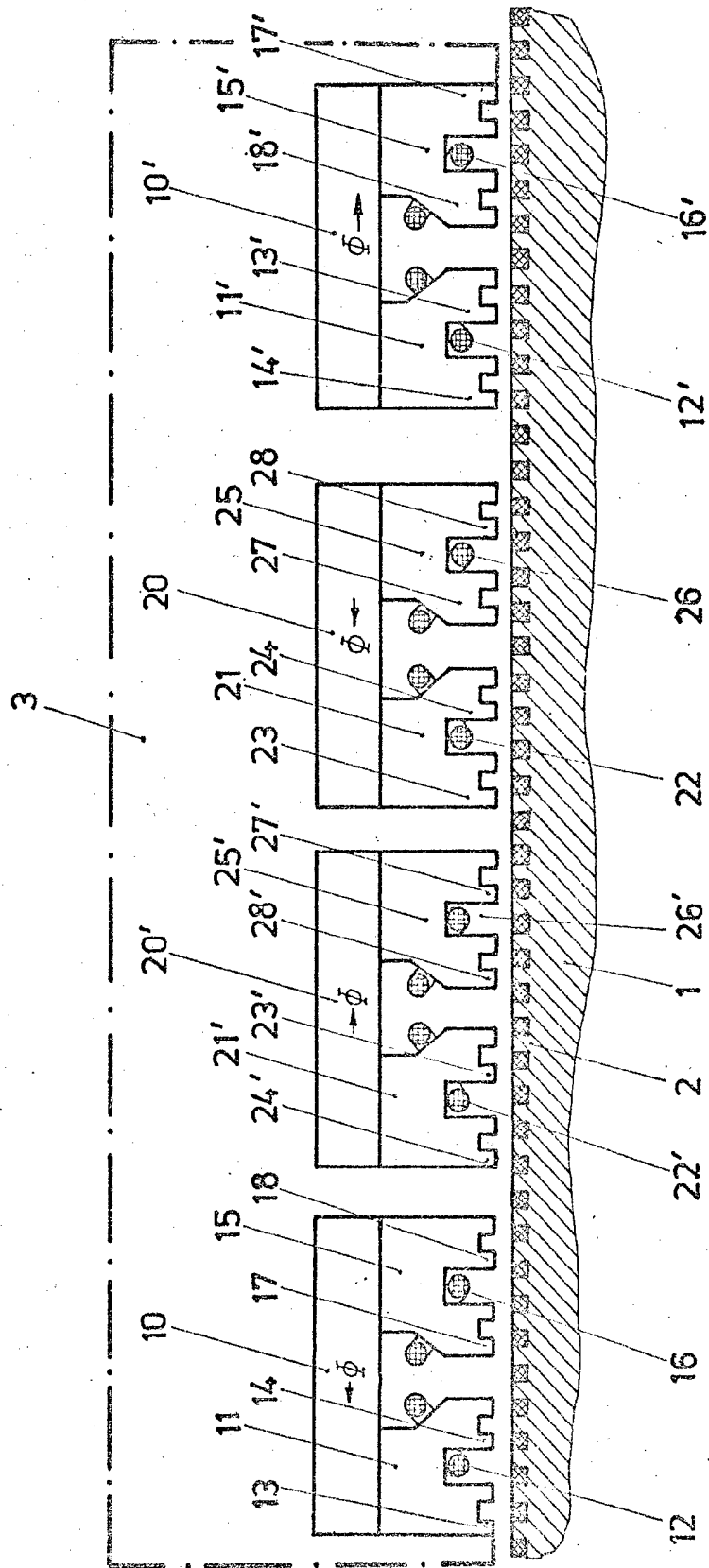


Fig. 1

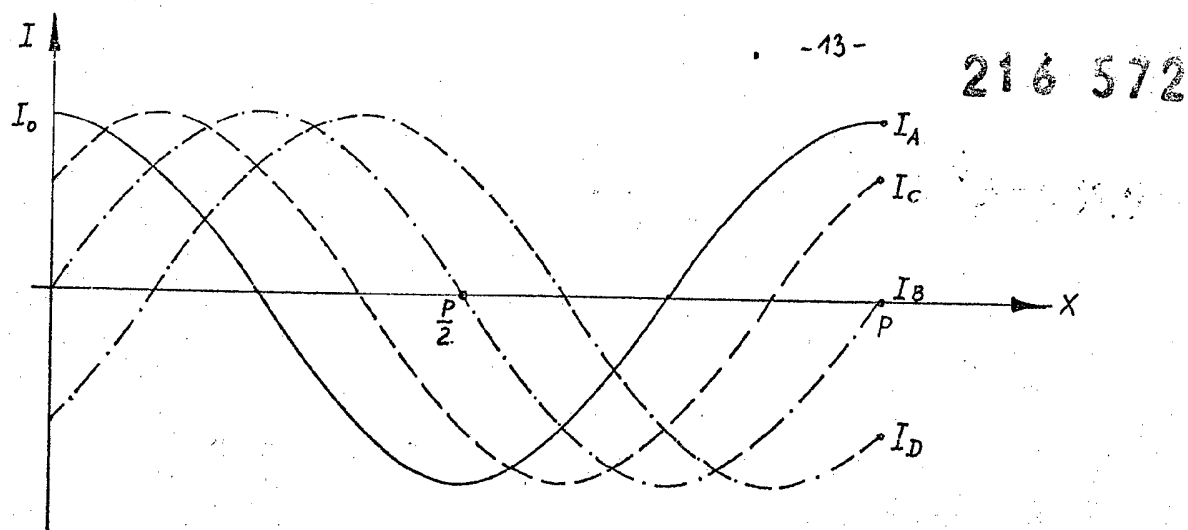


Fig. 2

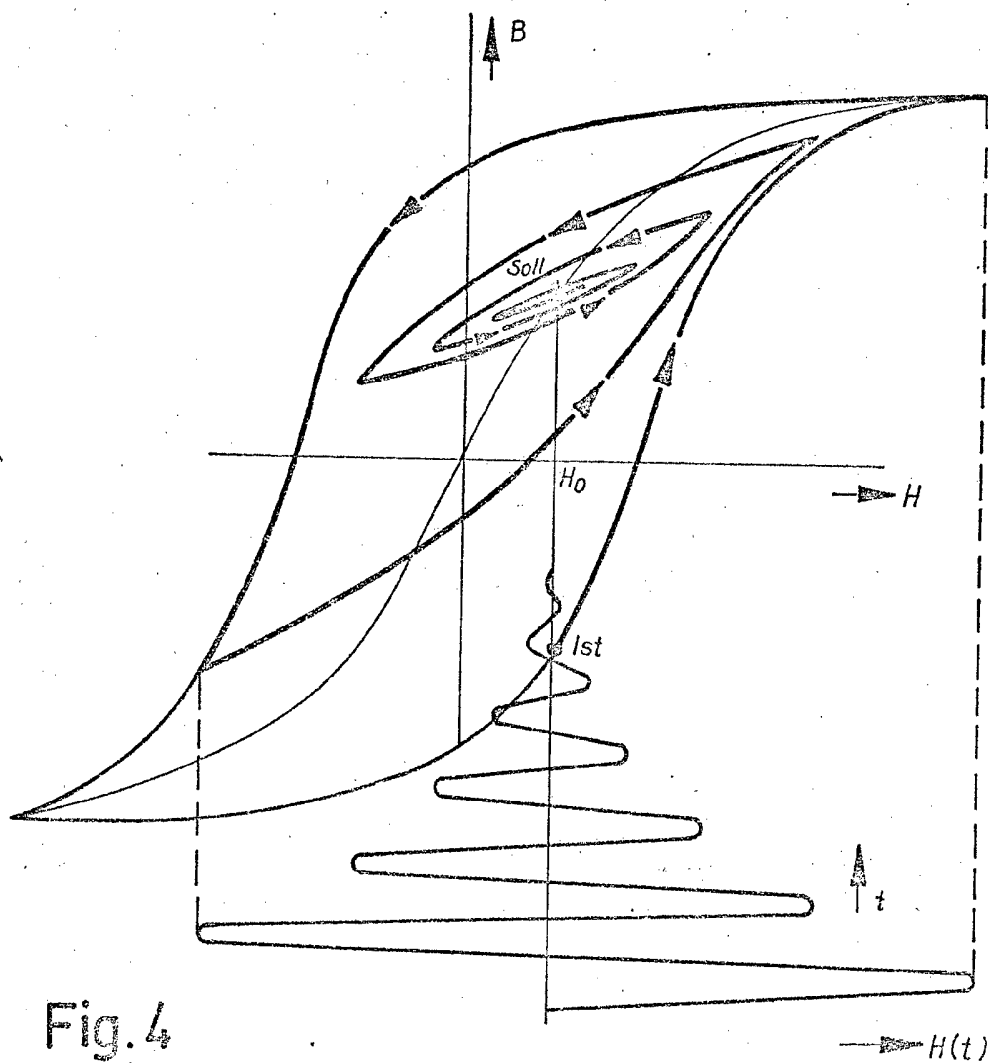
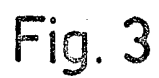


Fig. 4



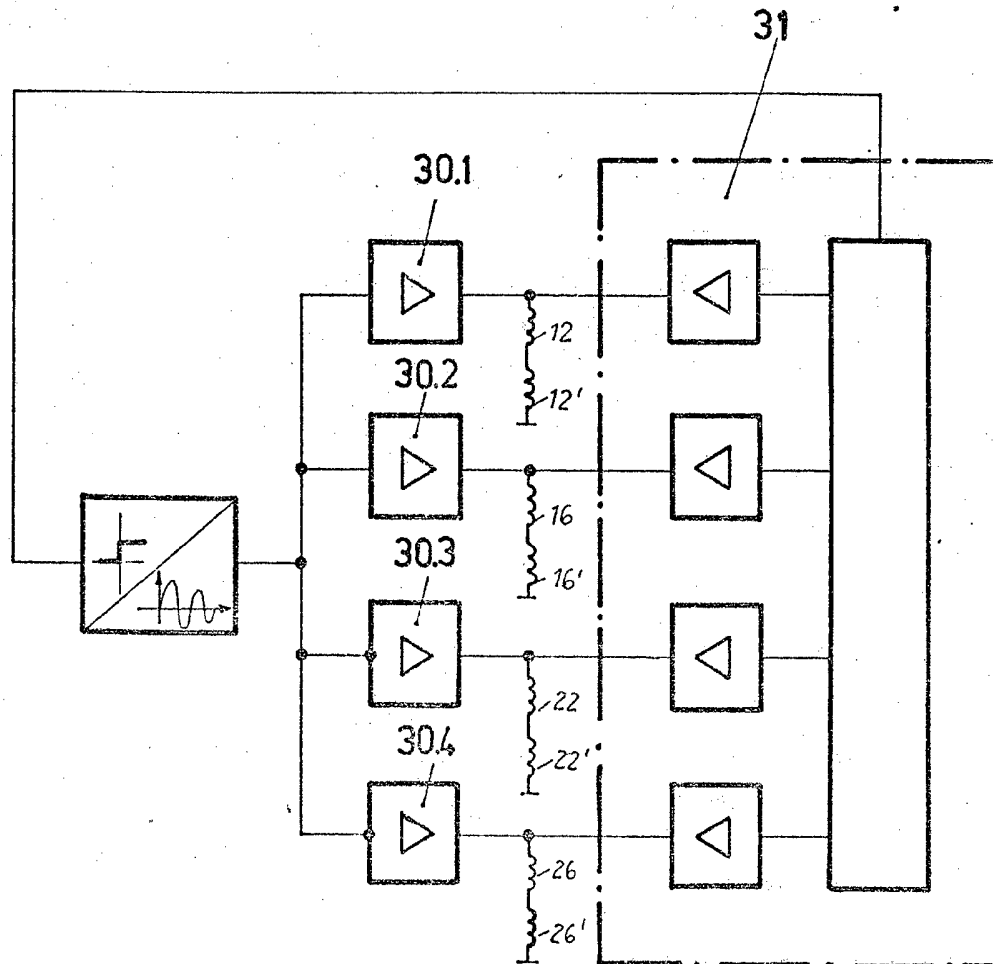


Fig. 5