

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

(11) N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 706 955

(21) N° d'enregistrement national : 93 07612

(51) Int Cl<sup>5</sup> : F 16 C 32/06 , G 05 B 11/01

(12)

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 23.06.93.

(30) Priorité :

(71) Demandeur(s) : SOCIETE DE MECANIQUE  
MAGNETIQUE (S.A.) Société Anonyme — FR.

(72) Inventeur(s) : Schroder Ulrich et Helene Eric.

(43) Date de la mise à disposition du public de la  
demande : 30.12.94 Bulletin 94/52.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : Se reporter à la fin du  
présent fascicule.

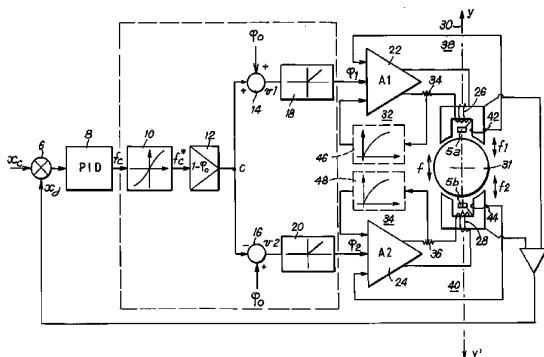
(60) Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire : Cabinet Beau de Loménie.

(54) Circuit d'asservissement de palier magnétique actif.

(57) Le circuit d'asservissement de la position d'un rotor (31) supporté selon un axe prédéterminé (y', y) à l'aide de deux éléments de palier magnétique actif placés en opposition de part et d'autre du rotor selon l'axe y' y et munis chacun d'enroulement d'électroaimant (26, 28), à partir de signaux xd délivrés par un détecteur (5a, 5b) de la position du rotor selon cet axe y' y, assure la commande de l'alimentation des enroulements en réponse aux signaux délivrés par le détecteur (5a, 5b). Le circuit d'asservissement comprend un réseau de correction (8) et deux circuits d'amplification de puissance (22, 24) à chacun desquels sont associées des boucles de contre-réaction de courant (32, 34) et de flux (38, 40). Des moyens électriques supplémentaires (10, 12, 14, 16, 18, 20) délivrant un signal de consigne  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  pour chacun des amplificateurs de puissance (22, 24), sont placés en sortie du réseau de correction (8) de telle sorte que le rapport entre la commande de force  $f_c$  issue de ce réseau de correction (8) et la force  $f$  résultante selon l'axe prédéterminé y' y soit maintenu constant en fonction de la charge dynamique, c'est à dire quelle que soit l'amplitude de cette commande  $f_c$ .



FR 2 706 955 - A1



## CIRCUIT D'ASSERVISSEMENT DE PALIER MAGNETIQUE ACTIF

La présente invention concerne un circuit d'asservissement de palier magnétique actif, pouvant être mis en oeuvre dans tous types de machines tournantes, notamment les compresseurs, les turboexpendeurs ou les pompes turbomoléculaires par exemple.

Classiquement, la boucle d'asservissement de la position d'un rotor à l'aide d'un palier magnétique actif (PMA) muni selon un axe prédéterminé de deux enroulements d'électroaimants, comporte un détecteur de la position du rotor selon cet axe, un réseau correcteur ou régulateur de type proportionnel, intégral et dérivé, et deux amplificateurs de puissance alimentant les deux électroaimants agissant en opposition. Le signal de sortie du régulateur commande l'alimentation des enroulements des électroaimants, les courants nécessaires étant fournis par les amplificateurs de puissance bouclés chacun en courant et par un signal proportionnel à la variation de flux dans l'entrefer du PMA. Les amplificateurs bouclés ainsi constitués se comportent comme une source de flux (le flux de l'entrefer) commandée par une tension (le signal de sortie du régulateur).

Le but de l'asservissement de la position du rotor à l'aide d'un PMA à partir des signaux délivrés par le détecteur de position est d'obtenir une force d'attraction des électroaimants directement proportionnelle au signal de sortie du régulateur (voir par exemple le brevet FR 2 417 797 qui montre des éléments d'un tel circuit d'asservissement d'un enroulement de PMA).

Pour assurer la commande d'un PMA selon un axe prédéterminé, deux systèmes de traitement des signaux présents au niveau du circuit d'asservissement sont possibles, selon que les amplificateurs de puissance sont commandés simultanément ou alternativement.

Dans le fonctionnement en mode simultané, qui pourrait être qualifié de fonctionnement en "classe A" (par analogie avec le fonctionnement des amplificateurs basse-fréquence), c'est à dire dans lequel le flux dans l'entrefer présente une valeur de repos correspondant à 50% du flux maximal, il est possible d'obtenir une très grande linéarité associée à de très bonnes performances dynamiques, mais malheureusement au détriment de pertes élevées dans les circuits magnétiques. Ces pertes sont dues non seulement aux amplificateurs, aux câbles ou aux bobines mais aussi et surtout à la rotation des armatures rotoriques du PMA qui engendre notamment à grande vitesse des pertes rotoriques importantes, liées à la

commutation du champ magnétique dans le rotor et dépendant quadratiquement de la valeur de repos du flux.

Au contraire, dans le fonctionnement en mode alterné, qui pourrait de même être qualifié de fonctionnement en "classe B", c'est à dire dans lequel la valeur de repos du flux de l'entrefer est nulle ou quasi-nulle, il est possible de réduire considérablement ces pertes rotoriques. Toutefois, l'emploi d'un linéarisateur quadratique (à racine carrée) en entrée de chaque amplificateur de puissance est alors indispensable pour réaliser un transfert linéaire entre la commande et la force résultante. En outre, de nombreux inconvénients apparaissent alors. En particulier, la force maximale admissible comme la force de démarrage restent réduites, des non-linéarités subsistent au passage à zéro dans le transfert commande/force, et le comportement dynamique de l'ensemble est détérioré.

C'est pourquoi, la présente invention se propose de réaliser un asservissement qui ait à la fois les avantages d'un fonctionnement en mode simultané et d'un fonctionnement en mode alterné, c'est à dire permettre d'assurer un bon compromis entre les pertes dans les différents circuits constituant cet asservissement et les performances dynamiques qui peuvent en être demandées.

Ce but est atteint grâce à un circuit d'asservissement de la position d'un rotor supporté selon un axe prédéterminé y' y à l'aide de deux éléments de palier magnétique actif placés en opposition de part et d'autre du rotor selon ledit axe y' y et munis chacun d'enroulement d'électroaimant, à partir de signaux délivrés par un détecteur de la position du rotor selon cet axe y' y, le circuit d'asservissement assurant la commande de l'alimentation des enroulements en réponse aux signaux délivrés par ce détecteur et comprenant un réseau de correction et deux circuits d'amplification de puissance à chacun desquels sont associées des boucles de contre-réaction de courant et de flux, caractérisé en ce qu'il comporte en sortie du réseau de correction des moyens électriques supplémentaires délivrant un signal de consigne  $\varphi_1, \varphi_2$  pour chacun des amplificateurs de puissance, de telle sorte que le rapport entre la commande de force  $f_C$  issue de ce réseau de correction et la force résultante selon ledit axe prédéterminé y' y soit maintenu constant en fonction de la charge dynamique, c'est à dire quelle que soit l'amplitude de cette commande  $f_C$ .

Ainsi, pour des machines tournantes n'ayant pas une charge dynamique élevée en permanence, il est possible d'obtenir une importante réduction des pertes magnétiques des PMA dans les tôles du rotor et du stator, mais aussi des pertes par

effet Joule dans les enroulements du stator et dans les différents câbles de liaison de cette machine.

Les moyens électriques supplémentaires comportent des premiers moyens de linéarisation dont la fonction de transfert répond à l'équation suivante:

5  $Y = 1/4\varphi_0(1-\varphi_0)$  pour une commande de force en valeur absolue  $|f_C| < 4\varphi_0^2$ ,  
et,

$Y = (\sqrt{f_C} - \varphi_0)/(1 - \varphi_0)$  pour  $|f_C| > 4\varphi_0^2$ .

avec  $\varphi_0$  valeur de repos du flux dans l'entrefer.

10 Ainsi, il est obtenu une relation linéaire ( $f/f_C = 1$ ) entre la commande en force  $f_C$  et la force résultante  $f$ .

De préférence, les premiers moyens de linéarisation délivrent plusieurs courbes de linéarisation correspondant chacune à une valeur de repos du flux dans l'entrefer déterminée et distincte.

15 Par cette configuration, il est ainsi possible de mettre en oeuvre cet asservissement avec différents types de machines tournantes pouvant présenter des charges dynamiques variables.

Avantageusement, le passage d'une courbe de linéarisation à une autre est réalisé automatiquement.

20 Dans une variante de réalisation, la boucle de contre-réaction de courant de l'amplificateur de puissance comporte des seconds moyens de linéarisation permettant une reproduction de la courbe flux/courant du PMA.

25 Par cette structure, il est possible de compenser l'effet de la saturation en induction, c'est à dire de la non-linéarité induction/courant due à la diminution de la perméabilité des tôles pour les inductions élevées. L'asservissement est ainsi plus linéaire et cela pour toutes les fréquences.

Dans un premier exemple de réalisation, les premiers et seconds moyens de linéarisation comportent un générateur de fonction à diodes.

30 Cette solution pratique est particulièrement intéressante puisqu'elle peut être mise en oeuvre simplement avec un générateur à deux, trois ou quatre pentes qui offre l'intérêt de présenter une linéarité parfaite autour de zéro.

Dans un second exemple de réalisation, les premiers et seconds moyens de linéarisation comportent une mémoire non volatile dans laquelle la fonction de transfert de ces moyens de linéarisation est emmagasinée sous forme d'un tableau de valeurs.

Cette seconde solution numérique présente l'avantage d'une approximation plus fine de la ou des courbes des linéarisateurs.

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention ressortiront mieux de la description suivante, faite à titre indicatif et non limitatif, en regard des dessins annexés, sur lesquels:

- 5 –La figure 1 est un schéma de principe d'un circuit d'asservissement de la position d'un rotor selon un axe prédéterminé à l'aide d'éléments de PMA selon l'invention,
- 10 –La figure 2 représente la fonction de transfert du linéarisateur (dans le premier quadrant) pour différentes valeurs de repos du flux dans l'entrefer,
- 15 –La figure 3 montre dans les quatre quadrants des courbes caractéristiques de l'asservissement de la figure 1,
- La figure 4 donne des courbes caractéristiques du comportement dynamique du circuit d'asservissement selon l'invention,
- La figure 5 est un exemple de réalisation de l'ensemble de commande des 15 amplificateurs de puissance de la figure 1, et
- la figure 6 est un schéma de principe d'un circuit d'asservissement de la position d'un rotor selon un axe prédéterminé à l'aide d'éléments de PMA, lequel circuit met en oeuvre un processeur de calcul numérique.

Sur la figure 1 est présenté un schéma de principe du circuit d'asservissement 20 selon l'invention permettant d'asservir la position d'un rotor 31 selon un axe prédéterminé y' y à l'aide d'éléments de palier magnétique actif. Afin de faciliter la compréhension de ce schéma et des suivants, les références apparaissant sur les différentes figures sont sans dimensions, les valeurs des signaux (représentés en majuscule) étant divisées par leur valeur maximale. Ainsi, le signal de commande de 25 force  $F_C$  en sortie du régulateur PID qui normalement présente une excursion de tension de +/- 10 Volts devient un signal sans dimension  $f_C$  (représenté par la minuscule correspondante) d'excursion +/- 1.

Un réseau de correction 8 (par exemple un régulateur PID) dont le signal d'entrée est obtenu à l'aide d'un sous-tracteur 6 à partir de la différence entre un 30 signal de consigne  $x_C$  et le signal  $x_d$  issu d'un détecteur 5a, 5b de la position du rotor selon l'axe y' y, délivre en sortie le signal de commande de force  $f_C$  qui est appliqué à un linéarisateur 10, de fonction de transfert Y, dont la sortie commande un atténuateur 12 de gain  $(1-\varphi_0)$ .  $\varphi_0$  correspond à la valeur de repos du flux dans l'entrefer lorsque  $f_C$  est égal à zéro. La sortie de cet atténuateur c est appliquée d'une 35 part à la première entrée d'un premier sommateur 14 et d'autre part, après inversion,

à la première entrée d'un second sommateur 16, chaque sommateur recevant sur sa seconde entrée le signal  $\varphi_0$ . Le signal de sortie  $v1, v2$  de chacun des sommateurs 14, 16 est appliqué, par l'intermédiaire d'un circuit d'écrêtage négatif 18, 20 (fonction pouvant être assurée directement par l'amplificateur), à un amplificateur de puissance 22, 24 dont la sortie est reliée à un enroulement 26, 28 d'un electroaimant d'un palier magnétique actif 30. La différence entre les forces d'attraction  $f1, f2$  des deux electroaimants constitue la force résultante  $f$  du PMA selon l'axe  $y'$ . Une boucle de contre-réaction de courant 32, 34, associée à chaque amplificateur, réinjecte en entrée de chacun d'eux un signal de mesure de courant issu d'un élément de mesure de courant 34, 36. De même, une boucle de contre-réaction de flux 38, 40 réinjecte en entrée de ces amplificateurs un signal proportionnel aux variations de flux dans l'entrefer lequel signal est issu d'un circuit de détection 42, 44. Les circuits d'écrêtage négatif 18, 20 permettent de garantir un flux dans l'entrefer  $\varphi_1, \varphi_2$  toujours positif quelle que soit la consigne en sortie des sommateurs 14, 16, une consigne négative entraînant un flux nul.

Pour compenser dans la boucle de contre-réaction de courant 32, 34 de chaque amplificateur la non-linéarité induction/courant due à la diminution de la perméabilité des tôles pour les inductions élevées (notamment supérieures à 1 Tesla), un second linéarisateur 46, 48 peut être disposé entre l'élément de mesure du courant 34, 36 et l'entrée de chacun des amplificateurs. La fonction de transfert de ce linéarisateur reproduit la courbe de flux/courant du PMA permettant ainsi de compenser l'effet de la saturation de l'induction. L'asservissement est plus linéaire et sa compréhension comme ses réglages en sont facilités.

La détermination de la fonction de transfert  $Y$  du premier linéarisateur 10 est effectuée de telle sorte qu'il existe une relation linéaire entre la commande en force  $f_c$  et la force  $f$  résultante, c'est à dire  $f/f_c=1$ .

Normalement, sans saturation de courant ou de tension dans la contre-réaction de l'amplificateur de puissance, la consigne de flux  $\varphi$  et le flux dans l'entrefer sont identiques. Il en résulte les relations suivantes:

$$\begin{aligned}
 30 \quad f1 &= F1/Fmax = (\Phi1/\Phimax)^2 = \varphi_1^2 \\
 f2 &= F2/Fmax = (\Phi2/\Phimax)^2 = \varphi_2^2 \\
 f &= (F1-F2)/Fmax = \varphi_1^2 - \varphi_2^2 \\
 f &= (f_c Y(1-\varphi_0) + \varphi_0)^2 - (-f_c Y(1-\varphi_0) + \varphi_0)^2 = 4f_c Y \varphi_0 (1-\varphi_0)
 \end{aligned}$$

Pour vérifier  $f/f_c=1$ , le gain du linéarisateur doit être:

$$35 \quad Y_{cons} = 1/(4\varphi_0(1-\varphi_0))$$

La courbe du linéarisateur répond alors à l'équation suivante:

$$f_C^* = f_C / 4\varphi_0(1-\varphi_0)$$

En dehors de ce domaine linéaire, c'est à dire lorsque la consigne flux d'un amplificateur devient négative, soit pour  $f_C > 4\varphi_0^2$  (dans le premier quadrant), on 5 peut montrer que la courbe du linéarisateur (dans le premier quadrant) répond à l'équation suivante:

$$f_C^* = (\sqrt{f_C} - \varphi_0) / (1 - \varphi_0)$$

Il est intéressant de noter que le passage du domaine linéaire à celui non linéaire 10 s'effectue sans changement de pente. En effet, pour  $f_C = 4\varphi_0^2$  on obtient pour cette pente:  $df_C^*/df_C = 1/4\varphi_0(1-\varphi_0)$ .

La figure 2 représente, dans le premier quadrant, la fonction de transfert  $Y$  du linéarisateur pour deux valeurs de repos du flux  $\varphi_0$  déterminées et distinctes. Dans le premier cas (en pointillés) on ne quitte pas le domaine linéaire et la courbe du linéarisateur est une droite de pente 1. Au contraire, avec  $\varphi_0=0.2$  la courbe du 15 linéarisateur est d'abord une droite de pente  $df_C^*/df_C = 1.5625$  jusqu'à  $f_C = 0.16$  puis à partir de cette valeur de  $f_C$  la courbe d'équation  $f_C^* = (\sqrt{f_C} - 0.2) / 0.8$ . Quelle que soit la valeur de  $\varphi_0$ , la courbe résultante de la force selon l'axe prédéterminé  $y'$  du PMA en fonction du signal de commande force est une droite de pente 1 comme le montre la figure 3 qui représente les courbes caractéristiques de l'asservissement dans les 20 quatre quadrants. La courbe 1 est la courbe du linéarisateur (pour  $\varphi_0=0.3$  par exemple), la courbe 2 représente la force  $f_2$  de l'électroaimant n°2 en fonction du signal de commande force  $f_C$ , la courbe 3 représente la force  $f_1$  de l'électroaimant n°1 en fonction du signal de commande force  $f_C$  et la courbe 4 est la force  $f$  résultante sur l'axe du PMA.

25 Le comportement en dynamique du circuit d'asservissement selon l'invention est illustré par la figure 4 qui montre les flux et tensions dans le PMA en réponse à une force fournie par ce PMA.

La force résultante  $f$  fournie par le PMA peut être décomposée en une force statique ou précharge  $f_0 = F_0/F_{max}$  et une force perturbatrice  $f_p = F_p/F_{pmax}$  à la 30 pulsation  $w = 2\pi/T$  ( $T$  étant la période de la pulsation), soit:

$$f(t) = f_0 + f_p \sin wt.$$

En l'absence de saturation, courant et flux dans le PMA sont proportionnels et alors:

$$i(t) = I(t)/I_{max} = \Phi/\Phi_{max} = \varphi(t).$$

La tension aux bornes de l'électroaimant s'écrit:

35  $U_{1,2}(t) = LdI_{1,2}/dt$  soit en normalisant:

$$u(t) = (I_{max}/U_{max})Ld\varphi(t)/dt$$

$I_{max}$  et  $U_{max}$  sont les courant et tension maximal admissibles par l'amplificateur de puissance. les signaux  $i(t)$  et  $u(t)$  étant sans dimensions, l'état de saturation de l'amplificateur correspondant à une valeur supérieure à 1 en valeur absolue.

5 On peut montrer que le circuit de la figure 1 répond aux équations suivantes:

Section A : Pour  $f(t) < 4\varphi_0^2$  en valeur absolue,

$$\varphi_1(t) = \varphi_0 + f(t)/4\varphi_0$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_0 - f(t)/4\varphi_0$$

$$u_1 = \hat{u}(\cos \omega t / 2\varphi_0)$$

$$10 \quad u_2 = -\hat{u}(\cos \omega t / 2\varphi_0)$$

Section B : Pour  $f(t) > 4\varphi_0^2$

$$\varphi_1(t) = \sqrt{f(t)}$$

$$\varphi_2(t) = 0$$

$$u_1 = \hat{u}(\cos \omega t / \sqrt{f(t)})$$

$$15 \quad u_2 = 0$$

Section C : Pour  $f(t) < -4\varphi_0^2$

$$\varphi_1(t) = 0$$

$$\varphi_2(t) = \sqrt{-f(t)}$$

$$u_1 = 0$$

$$20 \quad u_2 = -\hat{u}(\cos \omega t / \sqrt{-f(t)})$$

Pour  $f(t) = 0.2 + 0.8 \sin \omega t$  et  $\varphi_0 = 0.3$  il peut être observé les courbes de la figure 4.

Dans ce cas, la force varie dans les trois sections décrites ci-dessus.

La figure 5 montre un exemple de réalisation des moyens électriques supplémentaires 10,12,14,16,18,20 de l'asservissement de la figure 1 (matérialisés en pointillés au niveau de la figure 1), caractéristiques de la présente invention. Dans cet exemple de réalisation, le linéarisateur 10 est réalisé simplement par un générateur de fonctions à diodes comportant de façon connue un premier amplificateur opérationnel OP1 auquel est associé une boucle de contre-réaction comprenant un réseau de résistances R0 à R4 et Ra à Rd et de diodes D1 à D6. Pour une tension d'entrée faible, les diodes sont toutes bloquées et le gain de cet amplificateur est constant et déterminé. Avec une tension plus importante, les diodes deviennent conductrices les unes après les autres entraînant une baisse déterminée du gain de l'amplificateur. L'expérimentation de la déposante a permis de constater que la courbe théorique de la figure 2 pouvait, avec une bonne approximation, être approchée par un générateur à quatre pentes. Le signal de sortie du linéarisateur 10

est appliqué à l'entrée inverseuse d'un deuxième amplificateur opérationnel OP2 dont l'entrée non-inverseuse est à un potentiel déterminé proportionnel à la valeur de repos du flux. Cet amplificateur OP2 qui réalise la fonction du sommateur 16 délivre en sortie une tension déterminée V2 égale à la différence entre une tension 5 proportionnelle à la tension Vs de sortie du linéarisateur et une tension proportionnelle à la valeur de repos du flux. Cette tension V2 est reliée à l'entrée inverseuse d'un troisième amplificateur opérationnel OP3 réalisant la fonction du sommateur 14 et qui reçoit sur son entrée non-inverseuse une tension pré-déterminée proportionnelle à la valeur de repos du flux et délivre en sortie une tension 10 déterminée V1 égale à la somme de cette tension pré-déterminée et d'une tension proportionnelle à la tension Vs de sortie du linéarisateur. Les signaux V1 et V2 constituent après écrêtage (les amplificateurs de puissance ne délivrant pas de courant négatif) les signaux de commande de ces amplificateurs de puissance. La détermination des valeurs des différents composants précédents peut être effectuée 15 simplement par l'homme de l'art à partir des caractéristiques du PMA.

Il peut être noté que la structure du linéarisateur 10 peut parfaitement convenir pour la réalisation pratique des seconds linéariseurs 46,48. La déposante a ainsi expérimenté un générateur à trois pentes qui permet une très bonne reproduction de la courbe de flux/courant. Mais, un générateur à deux pentes peut 20 convenir également.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée à l'exemple de réalisation précédent et une réalisation des linéariseurs précités sous une forme numérique est tout aussi possible comme le montre l'exemple de réalisation de la figure 6 qui met en oeuvre un processeur de calcul numérique.

25 Ce processeur 50 assure à la fois la régulation de position en élaborant l'algorithme PID de détermination de  $f_c$ , le calcul de la consigne C de commande des amplificateurs de puissance, et la délivrance de la consigne de flux de repos  $\varphi_0$  dont la variation est fonction de l'amplitude des perturbations. Des convertisseurs analogique-numérique 52, 54 assurent respectivement la conversion sous forme 30 numérique, avantageusement sur 12 bits, des données analogiques de position  $x_d$  et de consigne  $x_c$ , pour permettre l'élaboration par le processeur 50, également sur 12 bits, de la consigne de commande des amplificateurs C (préalablement convertie par un premier convertisseur numérique-analogique 56). L'algorithme de calcul de cette consigne C répond aux équations définies précédemment qui dépendent de la

valeur de repos du flux  $\varphi_0$  qui varie automatiquement et de façon prédéterminée avec le niveau des perturbations :

	Ainsi pour	$ f_c  < 4 \varphi_0^2$	on aura	$C = f_c / 4\varphi_0$
	pour	$4\varphi_0^2 < f_c < 1$	on aura	$C = \sqrt{ f_c } - \varphi_0$
5	et pour	$-1 < f_c < -4 \varphi_0^2$	on aura	$C = \varphi_0 - \sqrt{ f_c }$

- La valeur de repos du flux  $\varphi_0$  est délivrée par le processeur 50, par exemple sur 8 bits, puis envoyée sur un second convertisseur numérique-analogique 58 qui délivre l'information analogique correspondante aux premier et second sommateurs 14, 16. Chaque valeur de  $\varphi_0$  définit une courbe de linéarisation particulière et la prise en compte de l'une ou l'autre de ces courbes est assurée automatiquement par le processeur 50 qui définit de façon prédéterminée cette valeur de repos du flux en fonction de l'amplitude des perturbations. Notons, qu'avec une telle solution, les courbes théoriques peuvent être reproduites plus exactement qu'avec la structure analogique initiale.
- 10
- 15 Dans ce qui précède, on a considéré par mesure de simplification le circuit d'asservissement assurant un asservissement selon un axe prédéterminé  $y'$  mais l'invention s'applique naturellement de la même manière aux différentes paires d'électro-aimants disposées selon différents axes, par exemple à deux paires d'électro-aimants disposées selon deux axes  $xx'$  et  $yy'$  perpendiculaires entre eux et
- 20 situés dans un plan radial du rotor.

## REVENDICATIONS

1. Circuit d'asservissement de la position d'un rotor (31) supporté selon un axe prédéterminé ( $y',y$ ) à l'aide de deux éléments de palier magnétique actif placés en opposition de part et d'autre du rotor selon ledit axe  $y'$   $y$  et munis chacun d'enroulement d'électroaimant (26,28), à partir de signaux  $xd$  délivrés par un détecteur (5a, 5b) de la position du rotor selon cet axe  $y'$   $y$ , le circuit d'asservissement assurant la commande de l'alimentation des enroulements en réponse aux signaux délivrés par ce détecteur (5a, 5b) et comprenant un réseau de correction (8) et deux circuits d'amplification de puissance (22,24) à chacun desquels sont associées des boucles de contre-réaction de courant (32,34) et de flux (38,40), caractérisé en ce qu'il comporte en sortie du réseau de correction (8) des moyens électriques supplémentaires (10,12,14,16,18,20) délivrant un signal de consigne  $\varphi_1, \varphi_2$  pour chacun des amplificateurs de puissance (22,24), de telle sorte que le rapport entre la commande de force  $f_C$  issue de ce réseau de correction (8) et la force  $f$  résultante selon ledit axe prédéterminé  $y'$   $y$  soit maintenu constant en fonction de la charge dynamique, c'est à dire quelle que soit l'amplitude de cette commande  $f_C$ .

2. Circuit d'asservissement selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens électriques supplémentaires comportent des premiers moyens de linéarisation (10) dont la fonction de transfert répond à l'équation suivante:

$$Y = 1/4\varphi_0(1-\varphi_0) \text{ pour une commande de force en valeur absolue } |f_C| < 4\varphi_0^2,$$

et,

$$Y = (\sqrt{f_C} - \varphi_0) / (1 - \varphi_0) \text{ pour } |f_C| > 4\varphi_0^2.$$

25 avec  $\varphi_0$  valeur de repos du flux dans l'entrefer.

3. Circuit d'asservissement selon la revendication 2, caractérisé en ce que les premiers moyens de linéarisation (10) délivrent plusieurs courbes de linéarisation correspondant chacune à une valeur de repos du flux dans l'entrefer  $\varphi_0$  déterminée et distincte.

30 4. Circuit d'asservissement selon la revendication 3, caractérisé en ce que les différentes courbes de linéarisation sont obtenues par un processeur de calcul numérique (50) qui calcule en outre les paramètres de correction à partir des données de consigne  $xc$  et des données de position  $xd$ , le passage d'une courbe de linéarisation à une autre étant réalisé automatiquement en fonction d'amplitudes 35 prédéterminées des perturbations.

5. Circuit d'asservissement selon la revendication 1, caractérisé en ce que la boucle de contre-réaction de courant (32,34) de l'amplificateur de puissance (22,24) comporte des seconds moyens de linéarisation (46,48) permettant une reproduction de la courbe flux/courant du palier magnétique actif.
5. Circuit d'asservissement selon la revendication 2 ou la revendication 5, caractérisé en ce que les premiers et seconds moyens de linéarisation (10,46,48) comportent un générateur de fonction à diodes.
7. Circuit d'asservissement selon la revendication 2 ou la revendication 5, caractérisé en ce que les premiers et seconds moyens de linéarisation (10,46,48) comportent une mémoire non volatile dans laquelle la fonction de transfert de ces moyens de linéarisation est emmagasinée sous forme d'un tableau de valeurs.

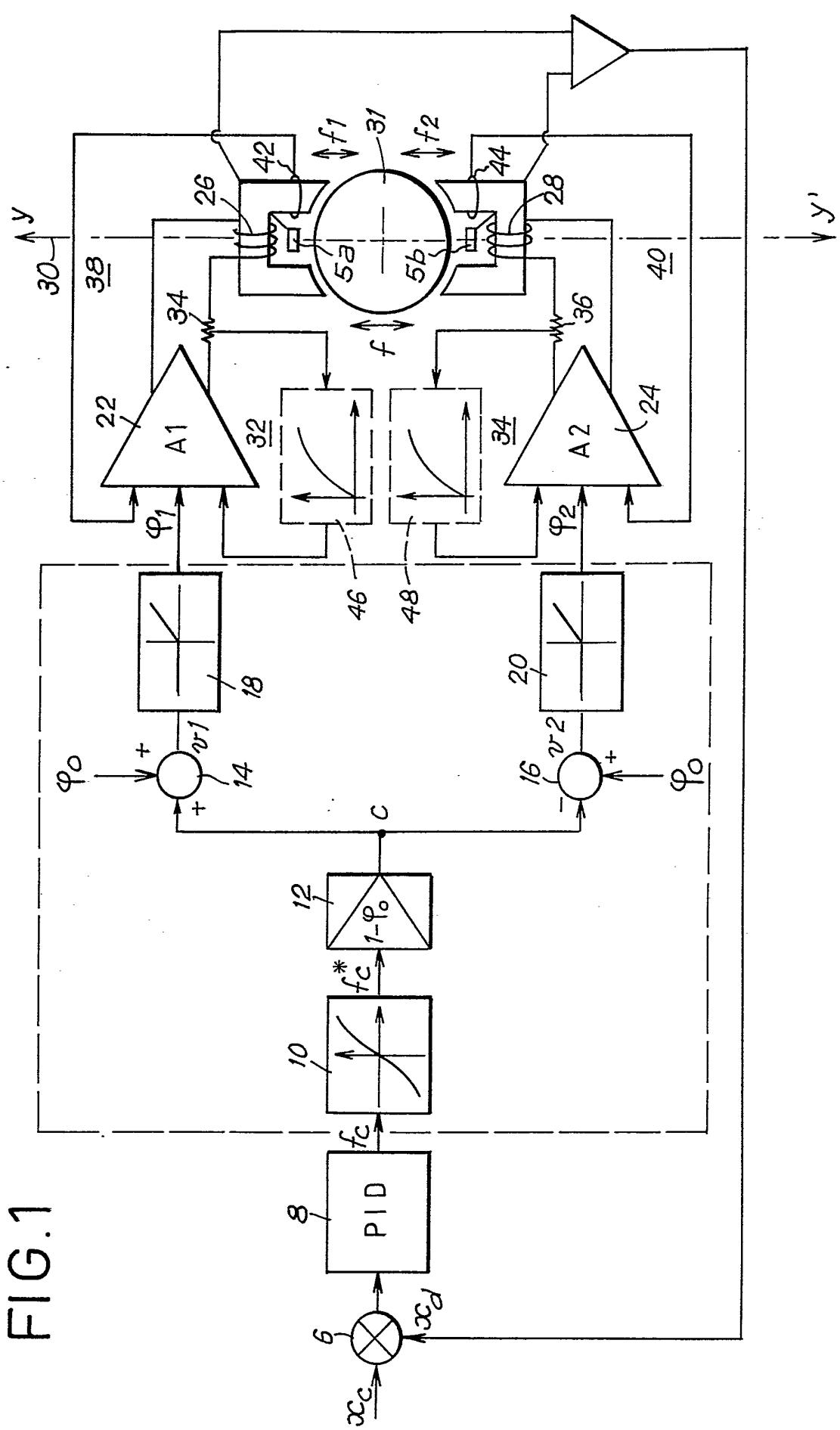


FIG. 2

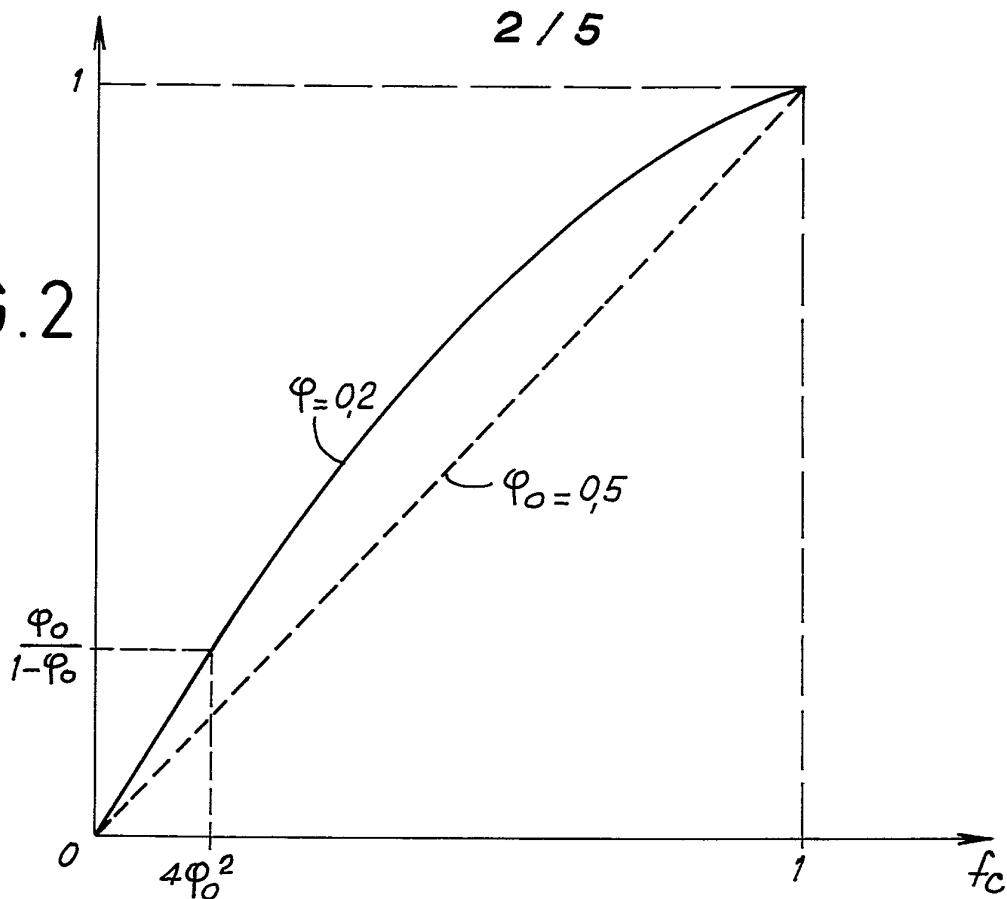
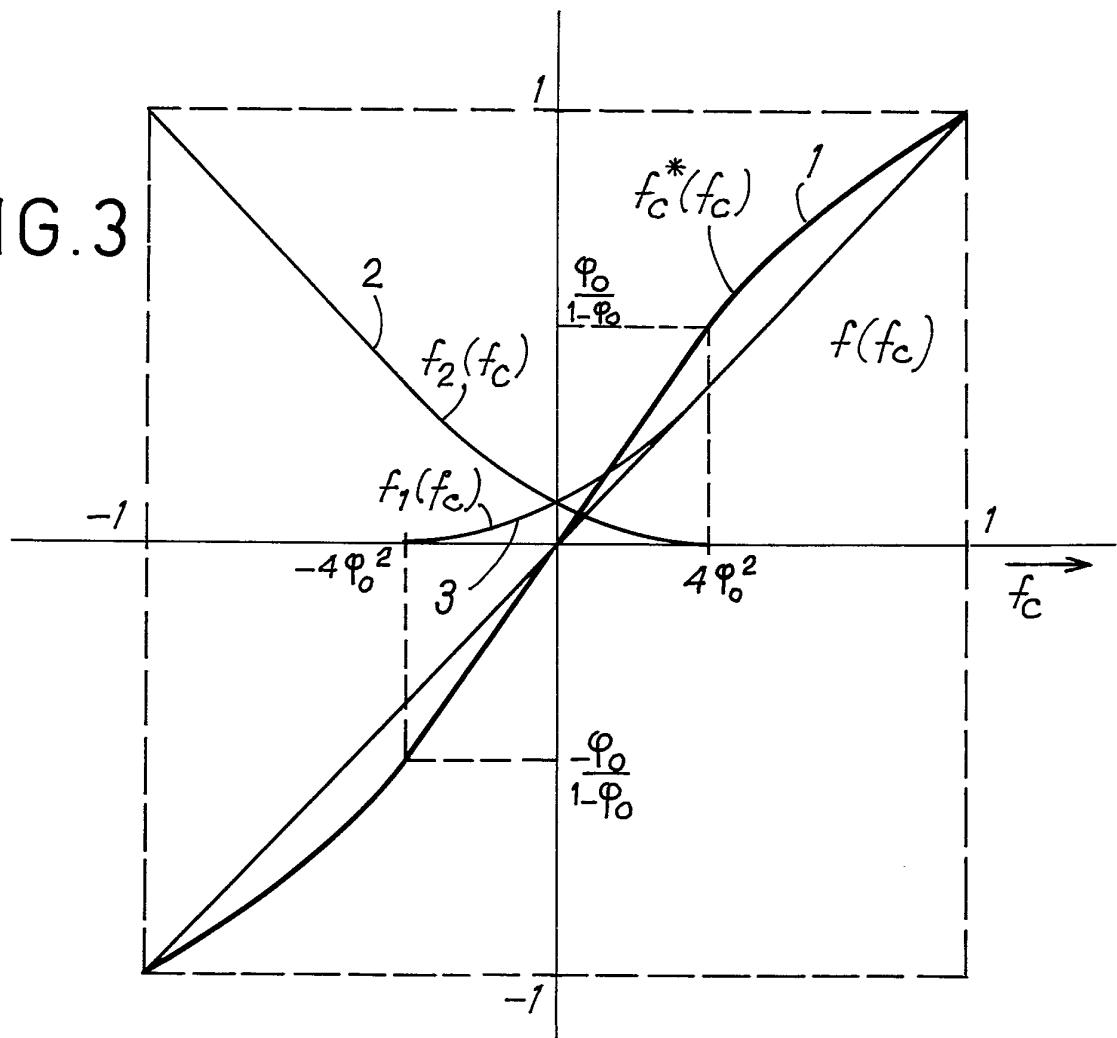
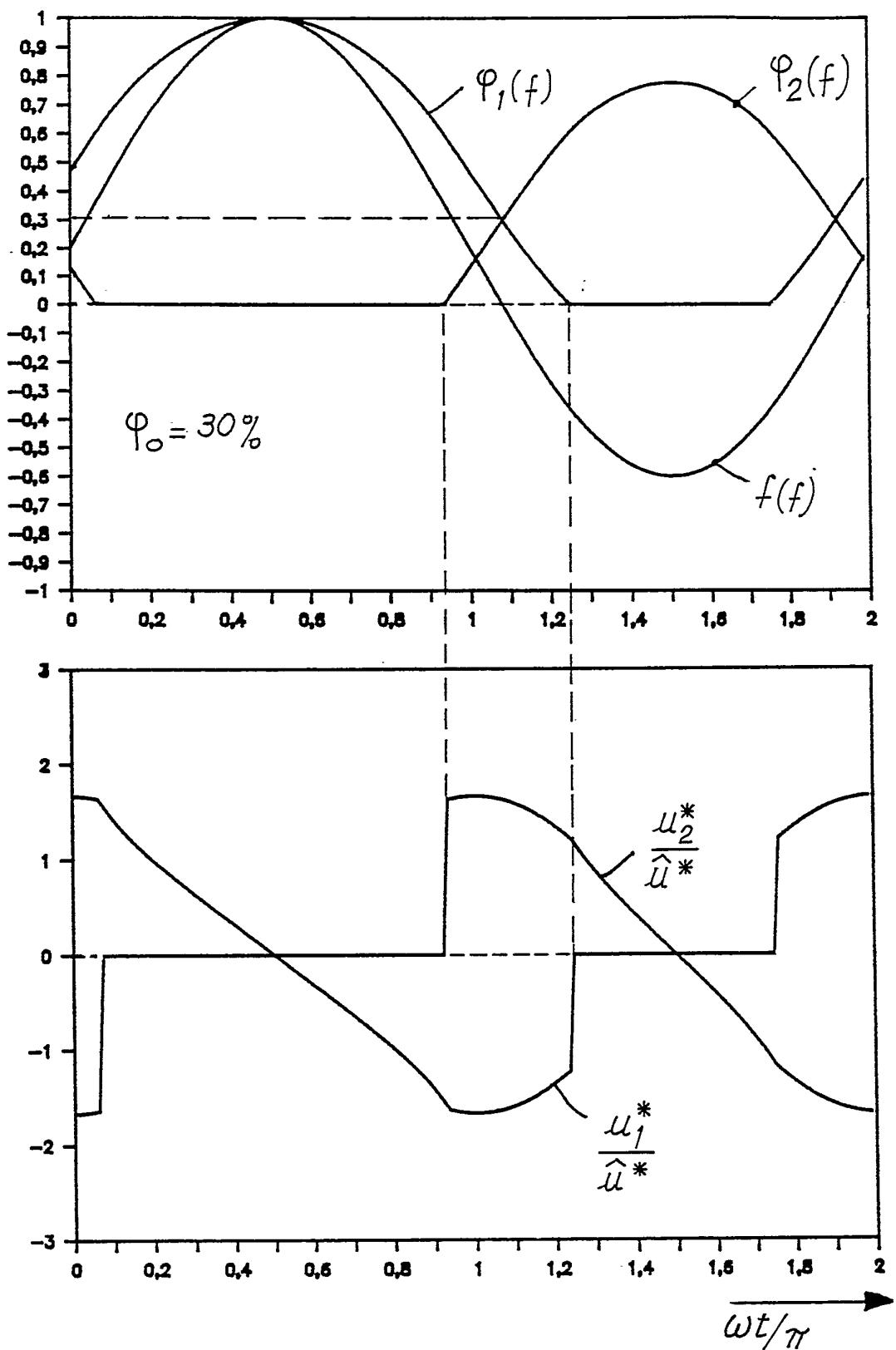


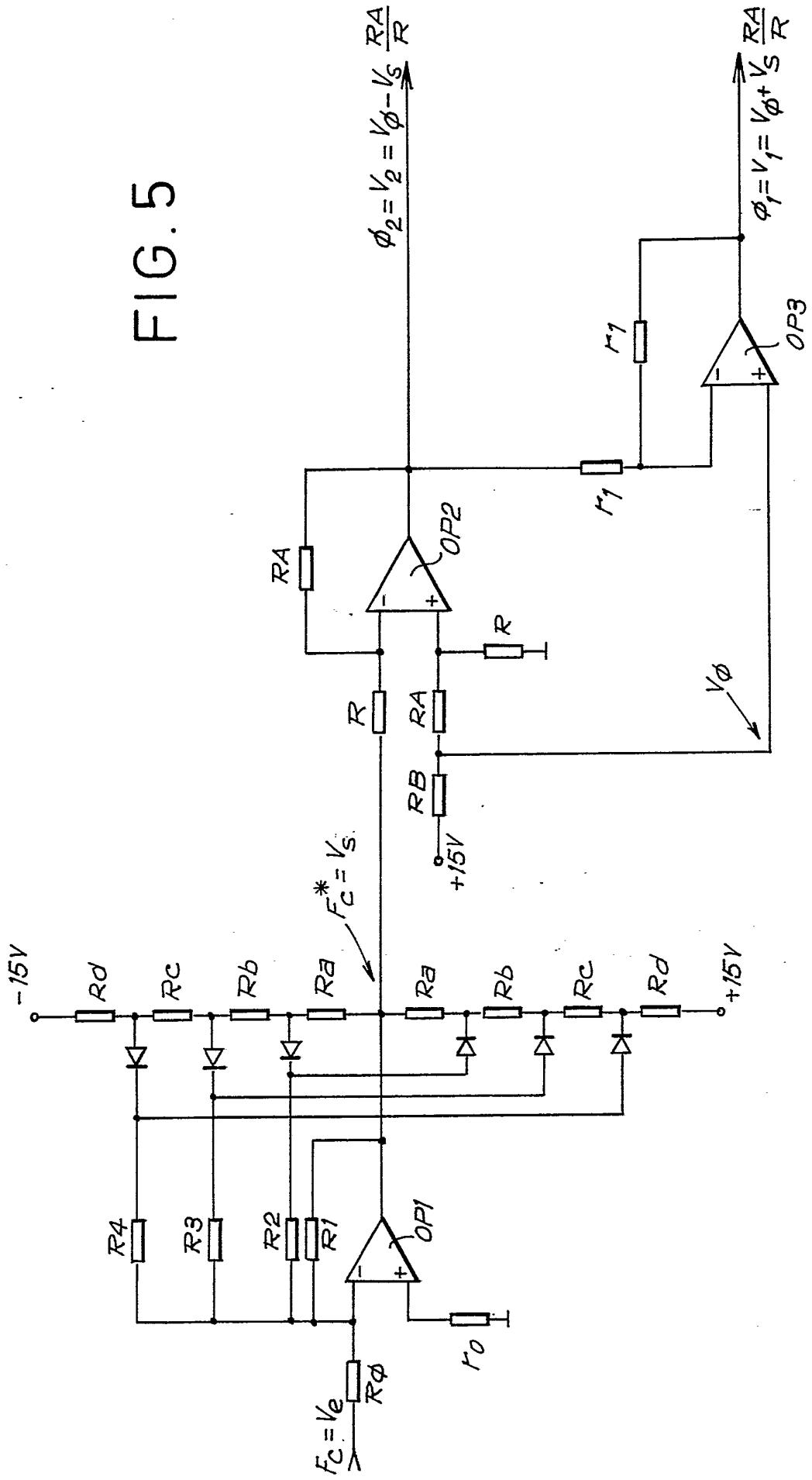
FIG. 3



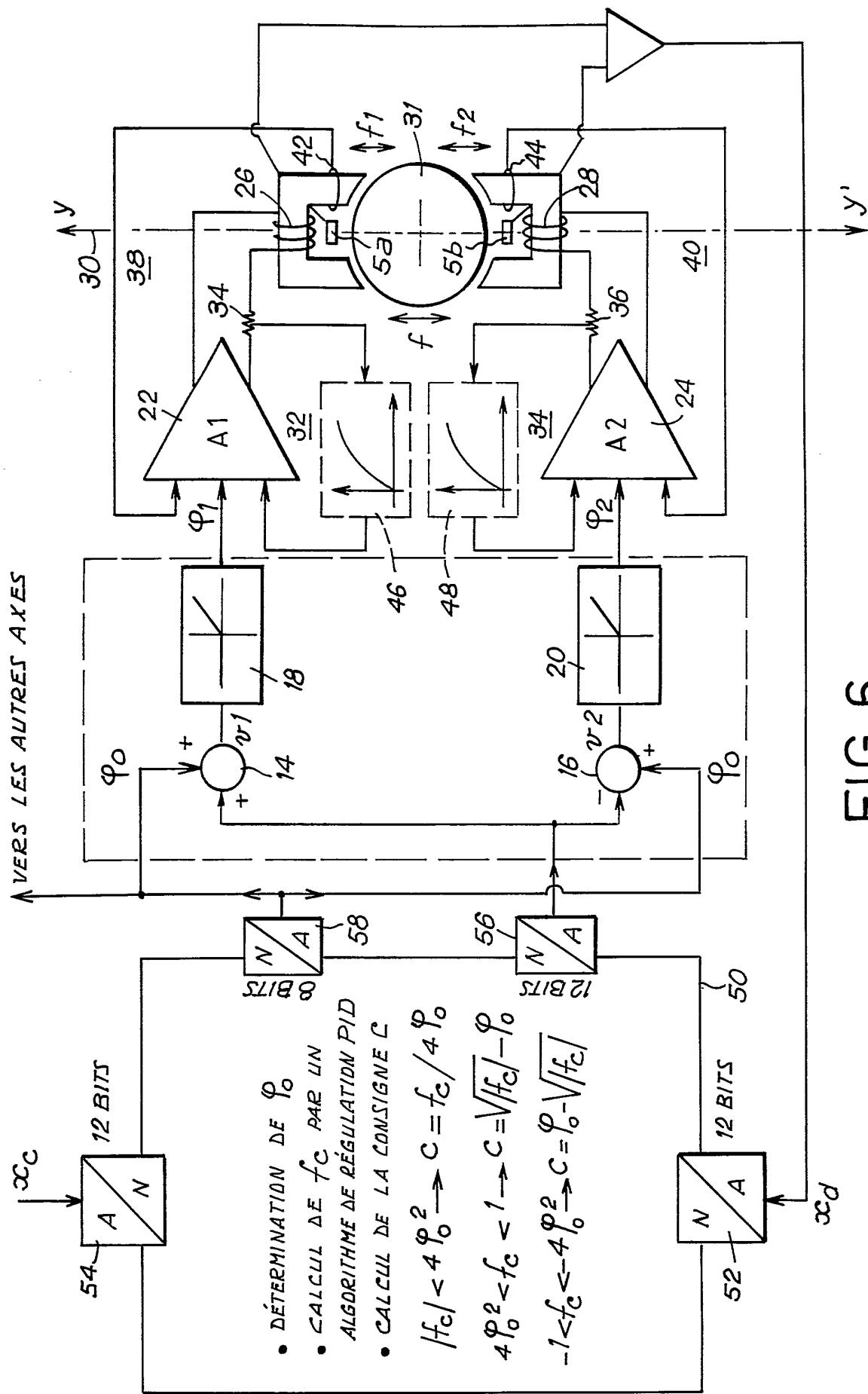
3 / 5  
FIG. 4



5  
EIG.



5/5



INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIETE INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 487032  
FR 9307612

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendications concernées de la demande examinée	
Y	EP-A-0 446 816 (EBARA CORP.)	1	
A	* colonne 2, ligne 58 - colonne 3, ligne 51 * * colonne 7, ligne 51 - colonne 8, ligne 8; figures 1,6 *	4,7	
Y	VDI-ZEITSCHRIFT,, vol.132, no.12, Décembre 1990, DÜSSELDORF,DE, pages 77 - 79 W.HÖRSEMANN 'Prozessregelung beim Innenrundschleifen mit aktiv magnetgelagerten Spindeln' * page 77, colonne de gauche, ligne 1 - page 78, colonne de gauche, ligne 30; figure 1 *	1	
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 17, no. 494 (E-1428) 7 Septembre 1993 & JP-A-05 122 891 (TOSHIBA CORP) 18 Mai 1993 * abrégé *	1,4,7	
A	EP-A-0 222 513 (HONEYWELL INC.) * abrégé * * page 2, ligne 49 - page 3, ligne 29; figures 4,6 *	5,6	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.S) H02K F16C

1

EPO FORM 1500 03/82 (PO4C1G)

Date d'achèvement de la recherche

16 Mars 1994

Examinateur

Weihs, J

## CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

X : particulièrement pertinent à lui seul  
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie  
A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général  
O : divulgation non-écrite  
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention

E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.

D : cité dans la demande

L : cité pour d'autres raisons

.....

&amp; : membre de la même famille, document correspondant