RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 511 509**
(A n'utiliser que pour les commandes de reproduction).

A1

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

(21) **N° 80 27901**

(54) **Accéléromètre triaxial à suspension électrostatique d'une masse d'épreuve cruciforme.**

(51) Classification internationale (Int. Cl. 3). **G 01 P 15/125; G 01 C 21/10.**

(22) Date de dépôt..... 31 décembre 1980.
(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 7 du 18-2-1983.

(71) Déposant : OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES DIT ONERA. — FR.

(72) Invention de : Alain Maurice Bernard.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Cabinet Martinet,
62, rue des Mathurins, 75008 Paris.

ACCELEROMETRE TRIAXIAL A SUSPENSION ELECTROSTATIQUE D'UNE MASSE D'EPREUVE CRUCIFORME

La présente invention concerne les accéléromètres dans lesquels la mesure de l'accélération est déduite de celle des forces nécessaires pour maintenir ou ramener une masse d'épreuve dans une position définie par rapport au corps de l'appareil. Elle concerne plus particulièrement les accéléromètres où ces forces sont d'origine électrostatique et vise à définir des dispositions permettant d'obtenir la précision et la linéarité requises pour les applications dans le domaine de la navigation inertielle (100 ms^{-2} à 10^{-5} ms^{-2} soit 10 g à 1 µg).

La plupart des accéléromètres basés sur le principe de l'asservissement en position d'une masse d'épreuve sont monoaxiaux. Tous les degrés de liberté de la masse d'épreuve sauf un, la translation selon l'axe sensible, sont supprimés par un organe mécanique destiné à réaliser la liaison souhaitée entre la masse d'épreuve et le corps de l'appareil. L'accéléromètre du type pendulaire constitue un exemple de réalisation où cette liaison mécanique est assurée par une charnière.

En contrepartie de la simplicité de cette disposition, la liaison élastique (charnière ou autre type de liaison mécanique) introduit une raideur parasite dont les fluctuations avec le vieillissement, la température ou les efforts mécaniques limitent la précision de l'accéléromètre. Cette perte de précision devient déterminante lorsqu'il s'agit de mesurer de faibles accélérations comme c'est par exemple le cas dans les applications spatiales. C'est pourquoi, dans les accéléromètres très sensibles conçus pour ces

applications, une suspension sans contact matériel de la masse d'épreuve est réalisée au moyen de forces qui, en général, sont d'origine électrostatique.

Ainsi, des accéléromètres monoaxiaux et triaxiaux ont été réalisés avec des masses d'épreuve respectivement cylindriques et sphériques. En fait, dès l'instant où l'utilisation d'une suspension sans contact matériel s'impose, il est souhaitable d'envisager la réalisation d'un accéléromètre triaxial puisque, quelle que soit la forme de la masse d'épreuve, il y a toujours au moins les 3 degrés de liberté en translation à asservir.

Dans le cas de la suspension électrostatique, le générateur de forces utilise un ensemble de n électrodes E_1, E_2,... E_i, ..., E_n réparties autour de la masse d'épreuve et solidaires du corps de l'accéléromètre. On notera

V_O : le potentiel de la masse d'épreuve

v_i : le potentiel de l'électrode E_i

C_i : la capacité de l'électrode E_i par rapport à la masse d'épreuve

x, y, z : les coordonnées du centre de la masse d'épreuve dans un repère $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ lié au corps de l'accéléromètre

θ, Ψ, Φ : les trois angles définissant l'attitude de la masse d'épreuve par rapport au repère $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ Aux petits angles : θ, Ψ, et Φ correspondent à des rotations respectivement autour des axes $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$.

$\vec{\nabla}_{xyz}$: l'opérateur gradient relativement aux variables x, y, z

$\vec{\nabla}_{\theta\Psi\Phi}$: l'opérateur gradient relativement aux variables θ, Ψ, Φ

Appliqués aux capacités C_i, ces opérateurs conduisent aux vecteurs suivants dans le repère x, y, z :

$$\vec{\nabla}_{xyz}(C_i) = \begin{vmatrix} \frac{\partial C_i}{\partial x} \\ \frac{\partial C_i}{\partial y} \\ \frac{\partial C_i}{\partial z} \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{\nabla}_{\theta\Psi\Phi}(C_i) = \begin{vmatrix} \frac{\partial C_i}{\partial \theta} \\ \frac{\partial C_i}{\partial \Psi} \\ \frac{\partial C_i}{\partial \Phi} \end{vmatrix}$$

Avec ces notations, on démontre que la force $\vec{F}$ et le couple $\vec{\mathcal{M}}$ électrostatiques exercés sur la masse d'épreuve s'écrivent respectivement dans le repère $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$:

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \vec{\nabla}_{xyz}(C_i) \, (V_i - V_0)^2$$

$$\vec{\mathcal{M}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \vec{\nabla}_{\theta\Psi\Phi}(C_i) \, (V_i - V_0)^2$$

Seule la valeur de la force électrostatique $\vec{F}$ importe dans le fonctionnement en accéléromètre mais sa détermination nécessite, en plus des mesures des potentiels V_i, de disposer des valeurs des gradients $\vec{\nabla}_{xyz}(C_i)$ et du potentiel V_0 de la masse d'épreuve.

La détermination des gradients $\vec{\nabla}_{xyz}(C_i)$ d'une part et l'asservissement à zéro du potentiel V_0 d'autre part ont déjà fait l'objet de la demande de brevet n° 80-25272 du 28 Novembre 1980.

L'objet de la présente invention est de réaliser des accéléromètres peu sensibles (étendue de mesure de 100 ms^{-2} soit 10 g), ayant une structure permettant d'éliminer en grande partie ces problèmes.

Une part des difficultés rencontrées dans les accéléromètres à suspension électrostatique provient de ce que la masse d'épreuve est électriquement isolée de sorte que son potentiel V_0 dépend non seulement des potentiels V_i mais aussi de la géométrie du système et de la charge électrique de la masse d'épreuve. Or, si les 6 degrés de liberté de celle-ci sont asservis, la masse d'épreuve occupe en régime permanent une position et une attitude fixes dans le repère de l'accéléromètre. En vue de réaliser un accéléromètre peu sensible mais très précis, il est alors concevable d'établir une liaison électrique par un fil conducteur très fin (diamètre de l'ordre de 20 µm) entre la masse d'épreuve et le corps de l'accéléromètre, corps qui représente la référence des potentiels. Cette liaison ne jouant normalement aucun rôle sur le plan mécanique, la raideur parasite due au fil est à priori beaucoup plus faible que celles dues aux charnières des accéléromètres pendulaires. Les incertitudes liées à cette raideur parasite sont estimées à 10^{-7} de l'accélération maximale à mesurer.

La nécessité d'asservir en particulier l'attitude de la masse d'épreuve conduit à abandonner la forme sphérique pour ladite masse puisque dans ce cas le couple électrostatique $\mathcal{M}_i$ est nul.

$$\frac{\partial C_i}{\partial \theta} = \frac{\partial C_i}{\partial \Psi} = \frac{\partial C_i}{\partial \Phi} = 0$$

Il y a de plus avantage à utiliser des électrodes planes en regard de faces planes de façon à obtenir des gradients des capacités $\vec{\nabla}_{xyz}(C_i)$ colinéaires aux axes sensibles de l'accéléromètre. Ceci permet en particulier de découpler les fonctionnements selon les trois axes. Ces considérations conduisent à donner à la masse d'épreuve une forme de croix constituée de trois plaques rectangulaires d'égale superficie

formant les plans d'un trièdre trirectangle et la suspension étant obtenue à partir d'un système de 12 électrodes planes et circulaires. Les axes sensibles $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$ sont perpendiculaires aux faces de la masse d'épreuve ; l'asservissement en translation selon chacune de ces directions est réalisé à partir de deux paires d'électrodes et les asservissements angulaires sont également effectués au moyen des électrodes précédentes.

L'invention va être maintenant décrite en détail en relation avec les dessins annexés dans lesquels :

- la Fig. 1 représente la masse d'épreuve ; et
- la Fig. 2 représente shématiquement la masse d'épreuve et les électrodes relatives à la translation suivant l'axe Oz et à la rotation Ψ autour de l'axe Oy ainsi que, sous la forme d'un diagramme de blocs, les circuits électroniques de l'accéléromètre.

La masse d'épreuve 100 est représentée sur la Fig. 1. Elle comprend trois plaques 21, 22, et 23 en matériau conducteur, ayant même superficie $a \times b$. Les plans de ces plaques forment les plans d'un trièdre trirectangle. La plaque 21 est dans le plan xOy et délimitée dans ce plan par $x = \pm a$ et $y = \pm b$. La plaque 22 est dans le plan xOz et délimitée dans ce plan par $z = \pm a$ et $x = \pm b$ et la plaque 23 est dans le plan yOz et délimitée dans de plan par $y = \pm a$ et $z = \pm b$.

On a également représenté sur la Fig. 1, douze électrodes 1 à 12 qui 4 par 4 agissent sur les trois plaques 21-23 de la masse d'épreuve. Les électrodes 1 et 3 sont au dessus de la plaque 21 et les électrodes 2 et 4 au dessous. Les

électrodes 5 et 7 sont à gauche de la plaque 22 et les électrodes 6 et 8 à droite. Les électrodes 9 et 11 sont devant la plaque 23 et les électrodes 10 et 12 derrière. Les électrodes 1-12 se projettent sur les plaques selon des cercles et ces cercles sont tous à la même distance de l'origine O.

L'asservissement selon l'axe Ox est réalisé par les paires d'électrodes 9-10 et 11-12.

L'asservissement selon l'axe Oy est réalisé par les paires d'électrodes 5-6 et 7-8.

L'asservissement selon l'axe Oz est réalisé par les paires d'électrodes 1-2 et 3-4.

L'asservissement en Φ autour de l'axe de rotation Oz est réalisé avec les paires d'électrodes 9-10 et 11-12.

L'asservissement en Ψ autour de l'axe de rotation Oy est réalisé avec les paires d'électrodes 1-2 et 3-4.

L'asservissement en θ autour de l'axe de rotation Ox est réalisé avec les paires d'électrodes 5-6 et 7-8.

La Fig. 2 représente schématiquement le corps de l'accéléromètre et la masse d'épreuve 100. On y retrouve les plaques 21, 22 et 23 et les électrodes 1, 2, 3, 4 coopérant avec la plaque 21. Les électrodes 1, 2, 3, 4 sont portées respectivement aux potentiels V_1, V_2, V_3, V_4 par les circuits d'amplification 24 à travers les enroulements primaires des quatre transformateurs 31, 32, 33, 34. Une tension continue de polarisation V_0 est appliquée à la masse d'épreuve par le générateur 25 à travers le fil fin 26 ainsi qu'aux électrodes de garde 41, 42, 43, 44 qui font écran entre les électrodes actives 1, 2, 3, 4 et les deux autres plaques 22 et 23 de la masse d'épreuve. Ainsi les forces électrostatiques correspondent exclusivement aux lignes de champ entre les électrodes actives et la plaque disposée entre ces électrodes. Un générateur 27 permet d'appliquer à la masse d'épreuve, en série avec la polarisation V_0, une tension

alternative V_D de faible amplitude afin de réaliser la détection de position. En pratique, comme $V_D \ll V_O$, les forces électrostatiques dues à la tension de détection sont absolument négligeables devant celles dues à la tension de polarisation V_O.

Les signaux à la fréquence angulaire ω_D de la tension de détection de position recueillis par les électrodes 1, 2, 3, 4 à travers les condensateurs C_1, C_2, C_3, C_4 sont appliqués deux par deux, à travers les secondaires des transformateurs 31-34 à un amplificateur opérationnel suivi d'un détecteur synchrone.

Le signal proportionnel à $(C_1 - C_2)$, obtenu en sortie de l'amplificateur opérationnel 28 est appliqué au détecteur synchrone 29 qui reçoit la porteuse à la fréquence angulaire ω_D du générateur 27. Le signal proportionnel à $(C_3 - C_4)$, obtenu en sortie de l'amplificateur opérationnel 38 est appliqué au détecteur synchrone 39 qui reçoit également la porteuse à la fréquence angulaire ω_D du générateur 27. Les amplificateurs opérationnels 28 et 38 ont un condensateur de contre-réaction C et par suite les signaux de sortie qu'ils délivrent sont proportionnels à

$$\frac{C_1 - C_2}{C} V_D \quad \text{et} \quad \frac{C_3 - C_4}{C} V_D$$

Cette disposition est intéressante pour différentes raisons :

1°) l'entrée de l'amplificateur 28 ou 38 du fait de la contre-réaction par la capacité C, constitue une masse virtuelle pour les signaux à la fréquence angulaire ω_D. En conséquence, aucun courant à cette fréquence angulaire ne traverse les capacités parasites entre les électrodes actives et les conducteurs autres que la masse d'épreuve. Ces capacités parasites n'affectent donc pas les mesures.

2°) selon le branchement des secondaires des transformateurs, il est tout aussi possible si le besoin s'en fait sentir, pour corriger des effets du second ordre, de mesurer la somme des capacités :

$(C_1 + C_2)$ et $(C_3 + C_4)$.

3°) le fonctionnement des 6 détecteurs, un par paire d'électrodes, et dont deux seulement sont représentées sur la Fig. 2, est assuré à partir d'un générateur 27 de tension alternative V_D unique.

En prenant le cas des électrodes 1-4 qui commandent la translation en z et la rotation en Ψ, les expressions approchées des capacités sont les suivantes :

$$C_1 = \frac{\varepsilon S}{e} \left(1 + \frac{z}{e} - \frac{D\Psi}{e}\right)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon S}{e} \left(1 - \frac{z}{e} + \frac{D\Psi}{e}\right)$$

$$C_3 = \frac{\varepsilon S}{e} \left(1 + \frac{z}{e} + \frac{D\Psi}{e}\right)$$

$$C_4 = \frac{\varepsilon S}{e} \left(1 - \frac{z}{e} - \frac{D\Psi}{e}\right)$$

où D est la distance entre le centre de la projection d'une électrode circulaire sur une plaque et l'axe de rotation de cette plaque.

Si les deux détecteurs synchrones 29 et 39 ont la même sensibilité K, les tensions de sortie S_1 et S_2 de ces détecteurs s'écrivent :

$$S_{12} = K (C_1 - C_2) = 2 K \frac{\varepsilon S}{e^2} (z - D\Psi)$$

$$S_{34} = K (C_3 - C_4) = 2 K \frac{\varepsilon S}{e^2} (z + D\Psi)$$

Les mesures des écarts z en translation et Ψ en rotation sont obtenues par la somme et la différence des tensions S_{12} et S_{34} :

$$S_z = S_{12} + S_{34} = \frac{4\,K\varepsilon S}{e^2}\ x\ z = p_z\ z \qquad (1)$$

$$S_\psi = S_{12} - S_{34} = \frac{4\,K\varepsilon S\,D}{e^2}\ x^\psi = p_\psi\ \psi \qquad (2)$$

A partir de ces mesures, les asservissements sont définis de façon à respecter simultanément, en régime strictement permanent les conditions :

$$S_z = S_\psi = 0$$

ce qui correspond à :

$$C_1 = C_2$$

$$C_3 = C_4$$

Les tensions d'action V_1, V_2, V_3, V_4, obtenues en sortie des circuits amplificateurs 24, sont des combinaisons linéaires des deux tensions V_z et V_ψ appliquées à l'entrée de ces circuits :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_z - V_\psi \\ V_2 &= -V_z + V_\psi \\ V_3 &= V_z + V_\psi \\ V_4 &= -V_z - V_\psi \end{aligned} \qquad (3)$$

Les tensions d'asservissement V_z et V_ψ sont elles-mêmes obtenues au moyen des réseaux correcteurs 35 et 36 à partir des tensions de détection S_z et S_ψ . Les tensions V_z et V_ψ sont de la forme :

$$V_z = p_z z + m_z \dot{z} + n_z \int z\,dt \qquad (4)$$

$$V_\psi = p_\psi \psi + q_\psi \dot{\psi} + r_\psi \int \psi\,dt \qquad (5)$$

où p_z, m_z, n_z, p_ψ, q_ψ , r_ψ sont des constantes. Des développements semblables peuvent être établis pour les autres coordonnées et les autres angles d'attitude. Le terme en z et le terme en ψ assurent le rappel de position, les termes en $\dot{z}$ et en $\dot{\psi}$ assurent l'amortissement et les termes intégraux assurent la précision en régime permanent.

En désignant par m la masse et par J le moment d'inertie de la masse d'épreuve, les expressions des accélérations de commande sont les suivantes :

$$\ddot{z}_u = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^{4} \frac{\partial C_i}{\partial z} (V_i - V_O)^2 \qquad (6)$$

$$\ddot{\psi}_u = \frac{1}{2J} \sum_{i=1}^{4} \frac{\partial C_i}{\partial \psi} (V_i - V_O)^2 \qquad (7)$$

En l'absence de tout défaut dans la géométrie de l'ensemble constitué par la masse d'épreuve et les électrodes, il vient, en régime permanent :

$$\frac{\partial C_1}{\partial z} = \frac{\partial C_3}{\partial z} = - \frac{\partial C_2}{\partial z} = - \frac{\partial C_4}{\partial z} = \frac{\varepsilon S}{e^2}$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial \psi} = - \frac{\partial C_3}{\partial \psi} = - \frac{\partial C_2}{\partial \psi} = \frac{\partial C_4}{\partial \psi} = - D \frac{\varepsilon S}{e^2}$$

de sorte que les accélérations s'écrivent, compte tenu des relations (3) (6) et (7) :

$$\ddot{z}_u = - 4 \frac{\varepsilon S}{me^2} V_O V_z \qquad (8)$$

$$\ddot{\psi}_u = - 4 \frac{D}{J} \frac{\varepsilon S}{e^2} V_O V_\psi \qquad (9)$$

Dans le cas idéal, l'appareil est strictement linéaire et exempt de biais. De plus les gradients des capacités étant colinéaires aux axes sensibles, les couplages entre axes sont également nuls.

En réalité des imperfections géométriques font que les égalités $C_1 = C_2$ et C_3 et C_4 satisfaites en régime permanent

n'entraînent plus strictement la nullité des sommes

$$\sum_{i=1}^{4} \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^{4} \frac{\partial C_i}{\partial \psi}$$

Il en résulte essentiellement des biais (termes en V_o^2), une altération de la linéarité (termes en V_z^2 ou en V_ψ^2) et des couplages entre axes (termes en V_x et V_y dans l'expression de $\ddot{z}_u$ ou termes en V_θ et V_ϕ dans l'expression $\ddot{\psi}_u$).

Il est toutefois possible de montrer que l'accélération de commande $\ddot{z}_u$ peut toujours s'écrire, avec une très grande précision, sous la forme suivante :

$$\ddot{z}_u = A_o + A_1 V_z + A_2 V_x + A_3 V_y + A_4 V_\psi + A_5 V_z^2 \qquad (10)$$

où les six coefficients A_o-A_5 sont à déterminer pour chacun des trois axes par des étalonnages de l'appareil.

En revenant à la Fig. 2, les détecteurs synchrones 29 et 39 qui fournissent les signaux S_{12} et S_{34} respectivement proportionnels à $(C_1 - C_2)$ et $(C_3 - C_4)$ sont reliés à un circuit additionneur soustracteur 30 qui élabore S_z et S_ψ selon les formules (1) et (2). Ces derniers signaux sont appliqués aux réseaux correcteurs 35 et 36 et de là aux circuits amplificateurs 24 qui génèrent les tensions V_1-V_4 respectivement appliquées aux électrodes 1-4.

En ce qui concerne la conception de ce type d'accéléromètre il convient de noter que :

1°) la polarisation V_o étant assurée par une source de tension de référence unique 25 appliquée à la masse d'épreuve, les biais ne sont pas affectés par les variations de gain des amplificateurs utilisés pour délivrer les tensions V_z et V_ψ aux électrodes ;

2°) toutes les surfaces en regard de la masse d'épreuve, autres que celles correspondant aux électrodes actives, sont portées au même potentiel V_o que la masse d'épreuve. Cette disposition élimine par conséquent toute force

d'intéraction, d'origine électrostatique, entre la masse d'épreuve et ces surfaces ;

3°) la masse d'épreuve cruciforme présente une géométrie bien appropriée à la réalisation d'une suspension électrostatique en ce qu'elle présente un rapport surface/masse très favorable. Ainsi, si les trois plaques rectangulaires constituant la masse d'épreuve ont des dimensions de 30 x 10 mm et une épaisseur de 0,5 mm, la masse à suspendre n'est que de 1 gramme pour une densité de 2,7. Le diamètre des électrodes peut être de 7 mm. En utilisant une tension V_0 de 240V et des distances de 20 µm entre masse d'épreuve et électrodes, des tensions d'action de 140V sont suffisantes pour assurer une étendue de mesure de $100ms^{-2}$ (10 g) ;

4°) les dimensions précédentes peuvent être ajustées pour assurer un amortissement visqueux de valeur convenable au moyen d'un gaz à haute rigidité diélectrique (SF6 par exemple) à pression égale ou supérieure à la pression atmosphérique. Dans ces conditions, il n'est plus nécessaire de créer un amortissement électrique en introduisant des termes dérivés dans les tensions d'asservissement. A fréquence propre donnée, le rapport signal/bruit s'en trouve notablement amélioré ;

5°) avec les ordres de grandeur précédents et en limitant à 60V les tensions V_Ψ, les accélérations angulaires $\ddot{\Psi}_u$ disponibles sont de l'ordre de 5000 rd/s^2. L'accéléromètre peut donc être utilisé sans plateforme (montage strap-down) sans se soucier des mouvements angulaires de l'engin dont on veut mesurer l'accélération.

REVENDICATIONS

1 - Accéléromètre électrostatique comprenant une masse d'épreuve mobile par rapport à un corps d'accéléromètre et reliée électriquement à ce corps par un fil fin très sup des électrodes fixées audit corps et formant des capacités par rapport à la masse d'épreuve, des moyens de détecter la position de la masse d'épreuve à partir de tensions recueillies sur lesdites électrodes et des moyens de positionner cette masse d'épreuve grâce à des forces électrostatiques développées à partir de tensions d'asservissement appliquées auxdites électrodes

caractérisé en ce que

la masse d'épreuve est cruciforme et est formée de trois plaques rectangulaires identiques ayant des centres qui coincident et des plans deux à deux rectangulaires.

2 - Accéléromètre conforme à la revendication 1 caractérisé en ce que les électrodes sont au nombre de douze réparties en six paires d'électrodes, les électrodes de deux paires étant situées de part et d'autre d'une plaque aux extrémités de cette plaque respectivement d'où il résulte que, quand les mêmes tensions sont appliquées entre les électrodes des deux paires agissant sur une plaque, la plaque est commandée électrostatiquement en translation selon une direction perpendiculaire à la plaque et que, quand des tensions égales et opposées sont appliquées entre les électrodes des deux paires agissant sur ladite plaque, la plaque est commandée électrostatiquement en rotation autour d'un axe situé dans son plan.

3 - Accéléromètre conforme à la revendication 1 caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de porter à un potentiel continu de référence, la masse d'épreuve à travers

le fil souple.

4 - Accéléromètre conforme à la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens d'appliquer un signal alternatif de détection de position à la masse d'épreuve à travers le fil souple.

5 - Accéléromètre conforme aux revendications 1 et 4, caractérisé en ce qu'il comprend des amplificateurs différentiels auxquels sont appliqués les signaux recueillis sur les électrodes des paires; des détecteurs synchrones recevant les signaux différentiels fournis par lesdits amplificateurs et ledit signal alternatif de détection de position, et des moyens de déduire des signaux de sortie des détecteurs synchrones relatifs aux paires d'électrodes les signaux de positionnement de la masse d'épreuve appliqués auxdites paires d'électrodes.

FIG.1

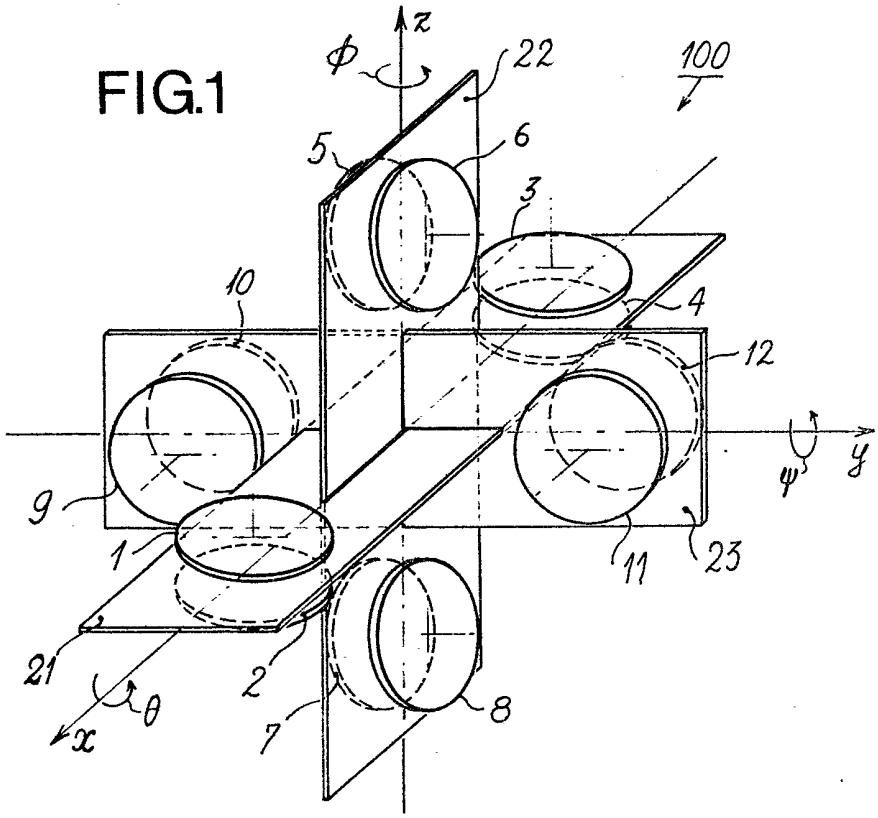
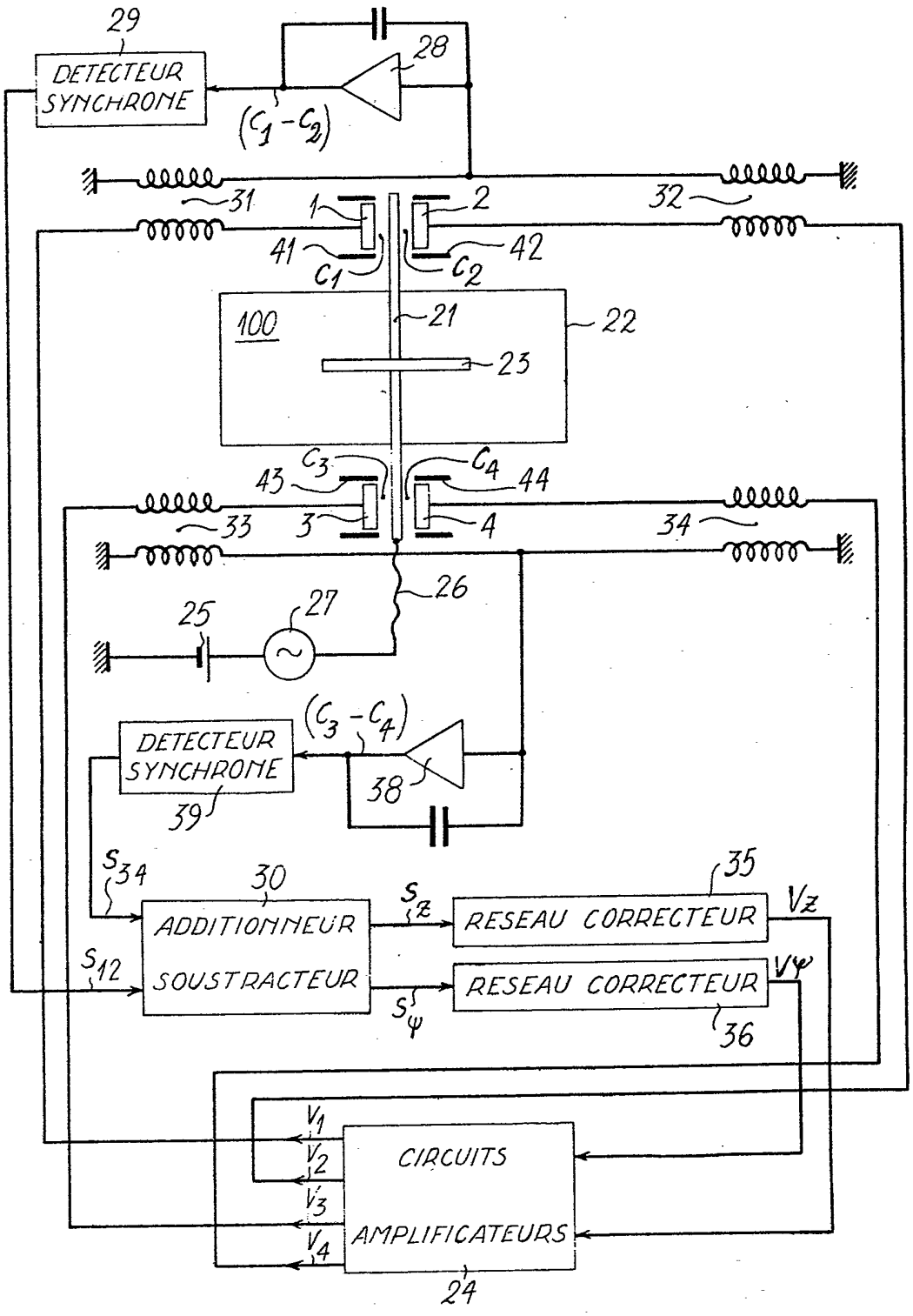


FIG.2


29
DETECTEUR SYNCHRONE
28
$(C_1 - C_2)$
31
32
1
2
41
42
C_1
C_2
100
21
22
23
C_3
C_4
43
44
33
3
4
34
26
25
27
$(C_3 - C_4)$
DETECTEUR SYNCHRONE
38
39
S_{34}
30
35
V_Z
S_Z
ADDITIONNEUR SOUSTRACTEUR
RESEAU CORRECTEUR
S_{12}
V_Ψ
S_Ψ
RESEAU CORRECTEUR
36
V_1
V_2
V_3
V_4
CIRCUITS AMPLIFICATEURS
24