(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 541 775**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **83 03257**

(51) Int Cl³ : G 01 P 15/02.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) Date de dépôt : 28 février 1983.

(30) Priorité :

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 35 du 31 août 1984.

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

(71) Demandeur(s) : *OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES (O.N.E.R.A.).* — FR.

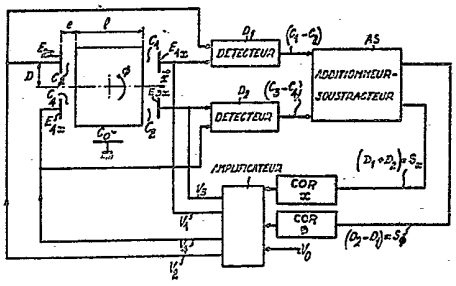
(72) Inventeur(s) : Alain Maurice Bernard et Bernard René Sacleux.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Martinet.

(54) Accéléromètres à suspension électrostatique.

(57) Accéléromètre électrostatique comprenant une masse d'épreuve mobile par rapport à un corps d'accéléromètre et des électrodes planes 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 l'aide de tensions de mesure appliquées sur les électrodes et des moyens de positionner cette masse d'épreuve grâce à des forces électrostatiques développées à partir de tensions d'asservissement appliquées aux électrodes. Il est caractérisé en ce que la masse d'épreuve comporte des éléments de surface plane deux à deux opposés et parallèles formant trois paires d'éléments de surface disposés face auxdites électrodes, les trois directions normales à ces éléments de surface n'étant pas coplanaires.



FR 2 541 775 - A1

ACCELEROMETRES A SUSPENSION ELECTROSTATIQUE

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.

Dans ce cas, 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 $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$.

$\vec{\nabla}_{x, y, z}$: 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 $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$:

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

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 FR-A-2495328 du 28 Novembre 1980.

On connaît déjà des accéléromètres du type concerné par les brevets français FR-B-2124055 du 2 Février 1971 et FR-A-2511509 du 31 Décembre 1980, le premier concernant un accéléromètre ultra-sensible et le second un accéléromètre de navigation.

En vue de la réalisation d'un accéléromètre ultra-sensible la suspension électrostatique d'une masse sphérique présente l'avantage de ne nécessiter que trois asservissements de position (les rotations sont laissées libres). Suivant chaque axe, des mesures capacitives différentielles effectuées au moyen d'électrodes diamétralement opposées (E_1 et E_2 figure 1), déterminent la translation de la sphère et donc l'accélération à laquelle est soumis le centre de masse G de celle-ci.

Dans le cas d'une masse idéale parfaitement sphérique et équipotentielle, les propriétés mécaniques et électriques sont isomorphes par changement de repères centrés en G. Les rotations laisseraient inchangés les capacités ainsi que les différences de potentiel entre électrodes et masse d'épreuve.

En réalité, les défauts de sphéricité et les fluctuations de différence de potentiel de contact sur la masse d'épreuve peuvent notablement affecter les performances de l'accéléromètre lorsque les portions de surface de la masse suspendue, situées en regard des électrodes, changent au gré des rotations.

Ainsi, par exemple :

a) la rotation ϕ de la masse d'épreuve (figure 1) autour de l'axe $\vec{z}$ est susceptible d'engendrer une variation de la différence C_2-C_1 des capacités en l'absence de tout changement de position du centre de masse G de la sphère. Dans ces conditions, l'asservissement en translation selon l'axe $\vec{x}$ recentre la masse d'épreuve de façon à rétablir l'égalité des capacités C_1 et C_2. L'accélération communiquée

à la masse d'épreuve pour ce recentrage entache directement la mesure d'un bruit à basse fréquence (n fois la fréquence de rotation de la sphère pour un défaut de sphéricité d'ordre n).

b) - Si la bande passante de l'asservissement est suffisante pour assurer l'égalité des capacités C_1 et C_2 avec une erreur négligeable, les variations simultanées de ces capacités correspondent essentiellement à des variations Δe de la distance moyenne e entre électrodes et sphère. Il en résulte pour l'accéléromètre une variation relative de sensibilité égale à $2\frac{\Delta e}{e}$. Ainsi pour un accéléromètre ultra-sensible tel que celui rappelé (destiné à ne mesurer que des accélérations inférieures à 10^{-4} m/s)^2 on a pour une masse d'épreuve de 4 cm de diamètre et des électrodes de 25 mm^2 :

$$e \simeq 300\ \mu m$$

$$\Delta e \geqslant 0{,}1\ \mu m$$

$$\frac{2\Delta e}{e} > 6{,}10^{-4}$$

Pour des accéléromètres moins sensibles, la situation est pire car il faut diminuer la distance e pour obtenir les forces électrostatiques nécessaires avec des tensions d'action de valeurs raisonnables (< 300 volts).

c) - En dépit du soin apporté à la réalisation de la masse d'épreuve et au choix des matériaux conducteurs la constituant, les fluctuations de potentiel rencontrées à la surface de cette sphère peuvent atteindre plusieurs dizaines de millivolts. Lorsque la sphère tourne, ces fluctuations de potentiel sont à l'origine de variations des forces électrostatiques d'interaction entre la masse d'épreuve et les conducteurs disposés autour (électrodes et cage).

Une autre difficulté rencontrée avec la suspension d'une masse d'épreuve sphérique provient des variations de la géométrie des espaces entre les électrodes et la sphère lorsque celle-ci se déplace orthogonalement à l'axe sensible qui est théoriquement l'axe des électrodes.

Ces variations de géométrie entraînent des couplages non linéaires entre les axes de l'accéléromètre : l'application de tensions sur les électrodes disposées pour asservir la sphère en translation selon l'axe $\vec{y}$ (figure 2a) provoque une force parasite selon l'axe $\vec{x}$ lorsque la sphère est décentrée sous l'effet, par exemple, d'une accélération selon $\vec{x}$ (figure 2b), même si les axes $\vec{x}$ et $\vec{y}$ sont rigoureusement perpendiculaires. Dans le cas d'accéléromètres ultra-sensibles, destinés aux applications spatiales, les coefficients de sensibilité ne peuvent pas être déterminés au sol où ces accéléromètres sont saturés par l'accélération due à la pesanteur. Il s'avère alors très difficile de déterminer et de prendre en compte ces couplages.

Toutes les sources d'erreurs décrites ci-dessus sont particulièrement préjudiciables pour l'exploitation de mesures différentielles entre plusieurs accéléromètres (application à la mesure en orbite du gradient de gravité par exemple). En effet, en plus de l'obtention des performances souhaitées pour chacun des accéléromètres, toute variation différentielle de leurs caractéristiques doit être évitée.

Il résulte de l'exposé qui précède que certaines applications des accéléromètres ultra-sensibles requièrent des caractéristiques aussi précises que celles exigées pour les accéléromètres de navigation. En particulier, il convient de réaliser des accéléromètres linéaires avec une sensibilité très fidèle pour effectuer des mesures différentielles entre accéléromètres (mesure des gradients de gravité).

Conformément à l'invention, pour réaliser ces accéléromètres à la fois très précis et très sensibles (au moins aussi sensibles que celui qui a été rappelé plus haut), il est préconisé de remplacer la masse d'épreuve sphérique par une masse d'épreuve présentant six portions de surface planes et parallèles deux à deux (particulièrement que la masse d'épreuve soit un cube).

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

- la Fig. 1 représente un schéma montrant une bille et ses électrodes et a été commentée dans l'entrée en matière;
- les Figs. 2a et 2b montrent la modification de la géométrie et des lignes de champ électrique lorsque la masse d'épreuve se décentre par rapport aux électrodes; elles ont été commentées dans l'entrée en matière;
- les Figs. 3a et 3b représentent la masse d'épreuve cubique et les électrodes relatives aux asservissements des translations en $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$ et des rotations en ψ , θ et ϕ ;
- la Fig. 4 représente plus particulièrement les électrodes agissant sur x et sur ϕ ;
- la Fig. 5 montre la configuration des lignes de champ électrique en présence de défauts de positionnement des électrodes;
- la Fig. 6 montre la réalisation des asservissements d'une translation et d'une rotation à partir des quatre électrodes qui sont utilisées simultanément pour les fonctions de détection et de positionnement par action électrostatique; et
- la Fig. 7 représente le circuit de superposition des signaux de détection et des signaux d'action électrostatique.

La masse d'épreuve 10 a la forme d'un cube (Fig. 3). En face de chaque face du cube sont disposées deux électrodes respectivement

E_{1x} et E_{3x} sur la face avant perpendiculaire à Ox

E_{2x} et E_{4x} sur la face arrière perpendiculaire à Ox

E_{1y} et E_{3y} sur la face de droite perpendiculaire à Oy

E_{2y} et E_{4y} sur la face de gauche perpendiculaire à Oy

E_{1z} et E_{3z} sur la face d'en haut perpendiculaire à Oz

E_{2z} et E_{4z} sur la face d'en bas perpendiculaire à Oz

Les quatre électrodes situées en regard de deux faces parallèles du cube permettent d'assurer l'asservissement d'un degré de liberté en translation et d'un degré de liberté en rotation.

Les électrodes E_{ix} ($i = 1$ à 4) sont utilisées pour la translation en $\vec{x}$ et la rotation en ϕ autour de $\vec{z}$, les électrodes E_{iy} pour la translation en $\vec{y}$ et la rotation en θ autour de $\vec{x}$, les électrodes E_{iz} pour la translation en $\vec{z}$ et la rotation en ψ autour de $\vec{y}$.

Le cube asservi en translation et en rotation présente en regard de chaque électrode toujours le même élément de surface : les effets néfastes liés à la rotation de la masse d'épreuve sont supprimés.

De plus, quelle que soit la disposition des électrodes, les directions orthogonales aux faces du cube (directions des lignes de champ au niveau du cube) sont des directions privilégiées d'action et de détection (figure 5).

Il est donc souhaitable de choisir, pour les directions des axes sensibles de l'accéléromètre, celles correspondant au mieux aux normales aux faces du cube c'est-à-dire aux directions des forces électrostatiques exercées sur le cube. Dans ces conditions, les coefficients de couplage entre axes sont fixés essentiellement par les défauts de parallélisme entre les faces opposées du cube.

Ainsi (figure 5) quelles que soient les tensions appliquées aux électrodes E_{ix}, la force exercée selon l'axe $\vec{y}$ parallèle aux faces en regard des électrodes E_{ix} est nulle. De la même façon, si le cube se déplace en translation selon

l'axe $\vec{y}$, les forces exercées selon l'axe $\vec{x}$ restent inchangées. Ces propriétés se conservent même si le positionnement des électrodes présente des défauts (en distance et en orientation).

La figure 6 illustre la réalisation des asservissements de la translation et de la rotation à partir des quatre électrodes qui sont utilisées simultanément pour les fonctions de détection de position et de positionnement électrostatique.

Les détecteurs capacitifs D_1 et D_2 fournissent des tensions proportionnelles aux différences de capacités $(C_1 - C_2)$ et $(C_3 - C_4)$. Compte tenu de la translation $\vec{x}$ et de la rotation ϕ de la masse d'épreuve, en désignant par S la surface des électrodes, e leur distance à la masse d'épreuve, 2D la distance entre les centres de deux électrodes d'un même côté, il vient au premier ordre :

$$\left.\begin{aligned} C_1 - C_2 &\approx \frac{2\varepsilon S}{e^2}\left[x - D\,\phi\right] \\ C_3 - C_4 &\approx \frac{2\varepsilon S}{e^2}\left[x + D\,\phi\right] \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

où ε est la permittivité du vide.

Des équations (1) on tire :

$$\left.\begin{aligned} x &\approx \frac{e^2}{\varepsilon S}\left[(C_1 + C_3) - (C_2 + C_4)\right] \\ \phi &\approx \frac{e^2}{\varepsilon SD}\left[(C_3 - C_4) - (C_1 - C_2)\right] \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Les opérations donnant les valeurs de x et de ϕ sont effectuées dans l'additionneur-soustracteur AS qui donne en sortie les signaux S_x et S_ϕ.

Ces signaux S_x et S_ϕ sont appliqués respectivement aux circuits correcteurs COR_x et COR_ϕ qui permettent de produire des signaux d'asservissement V_x et V_ϕ (correcteur proportionnel, différentiel, intégral).

Enfin un ensemble de circuits amplificateurs AMP fournit les signaux d'action électrostatique suivants :

$V_1 = V_o - V_x + V_\phi$ qui est appliqué à E_{1x}

$V_2 = V_o + V_x - V_\phi$ qui est appliqué à E_{2x}

$V_3 = - V_o + V_x + V_\phi$ qui est appliqué à E_{3x}

$V_4 = - V_o - V_x - V_\phi$ qui est appliqué à E_{4x}

où V_o est une tension d'amplitude constante.

Ces tensions d'action électrostatique peuvent être alternatives à une pulsation ω_A petite devant la pulsation ω_D utilisée pour les tensions de détection. En ce cas, la tension d'action appliquée à l'électrode Ei est de la forme :

$$V_i \cdot \sin \omega_A t$$

Les électrodes E_1, E_2, E_3, E_4 étant utilisées à la fois pour la détection de position et l'action de positionnement, il est nécessaire de définir une disposition permettant d'appliquer à ces électrodes les tensions d'action sans perturber le fonctionnement des détecteurs capacitifs.

La disposition choisie est très voisine de celle décrite dans la demande de brevet FR-A-2495328.

La figure 7 représente cette disposition.

Des électrodes de garde 11 coaxiales aux électrodes actives telles que E_1 et E_3, permettent de réaliser un écran équipotentiel 12 autour des électrodes actives, autour du transformateur différentiel 13 et autour du système d'amplificateurs 30, utilisé pour alimenter le primaire du transformateur 13 à la pulsation ω_D choisie pour les tensions de détection. L'écran 12 est relié au point milieu du transformateur 13 et à l'entrée d'un amplificateur opéra-

tionnel 14 dans le taux de contre-réaction, fixé par la capacité 15 permet de ramener son potentiel à une valeur très proche de celui de la référence des potentiels.

En continu, l'inductance 16 permet de réaliser une liaison entre l'écran et la référence des potentiels. A la pulsation ω_D, cette inductance peut être accordée avec la capacité 17 de façon à réduire encore sa faible influence sur la mesure obtenue en sortie de l'amplificateur 14.

La pulsation ω_A des tensions d'action V_3 et V_4 étant petite devant ω_D, des filtres constitués des inductances 18, 19 et 20, 21 et des capacités 22, 23, 24, 25 permettent de découpler les signaux d'action et de détection.

De même, les filtres 26-27 et 28-29 permettent d'introduire les tensions continues d'alimentation de l'amplificateur 30 sans altérer l'efficacité de l'écran à la pulsation ω_D de détection.

D'une manière connue, les détecteurs capacitifs utilisent une détection synchrone; la synchronisation de la détection synchrone et de l'oscillateur alimentant le transformateur différentiel est avantageusement réalisée à travers l'écran équipotentiel 12 par une liaisen opto-électronique 31.

Ordres de grandeur :

Masse d'épreuve :

- cube de 3 cm de côté
- masse comprise entre 0,1 et 0,5 kg

Electrode E :

- surface voisine de 1 cm^2

Distance e entre électrodes et masse d'épreuve :

- $e \simeq 100\ \mu m$

Tensions appliquées aux électrodes :

- tensions efficaces d'action : $V_o \simeq 20$ V
  $V_{translation} < 15$ V
  $V_{rotation} < 5$ V
  } pulsation $\omega_A < 6.10^3$ rd/s

- tension efficace de détection : $V_D \simeq 10$ V } pulsation $\omega_D \simeq 2.10^6$ rd/s

étendue de mesure :

- accélération maximale mesurée de l'ordre de quelques $10^{-4} m/s^2$

- pulsation propre de l'accéléromètre :

- $\omega_N \simeq 10$ rd/s

- Biais : inférieur à un millième de l'étendue de mesure soit quelques $10^{-8} m/s^2$

- Résolution : de l'ordre de 10^{-6} fois l'étendue de mesure soit 10^{-10} m/s^2.

Dans la description de détail qui vient d'être faite, la masse d'épreuve est un cube creux ou plein. Mais il suffit que la masse d'épreuve présente sur sa face externe, six surfaces planes, parallèles et opposées deux à deux, faisant face aux électrodes. D'autres formes sont possibles (parallélépipède, rectangle, sphère à facettes planes), à condition qu'elles disposent de trois paires de faces planes, parallèles et opposées deux à deux et de plus, situées sur trois directions orthogonales pour éviter certains couplages.

La masse d'épreuve est conductrice (métal alliage..) ou non conductrice (par exemple silice) et recouverte par un dépôt métallique (par exemple Or). Elle peut être creuse, pleine ou évidée localement.

Revendications.

1 - Accéléromètre électrostatique comprenant une masse d'épreuve mobile par rapport à un corps d'accéléromètre et des électrodes planes 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 l'aide de tensions de mesure appliquées 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 comporte des éléments de surface plane deux à deux opposés et parallèles formant trois paires d'éléments de surface disposés face auxdites électrodes, les trois directions normales à ces éléments de surface n'étant pas coplanaires.

2 - Accéléromètre conforme à la revendication 1, caractérisé en ce que les électrodes planes ont des surfaces égales et sont au nombre de douze réparties en six paires d'électrodes, chaque paire se trouvant en regard d'un élément de surface plane de la masse d'épreuve, deux paires opposées (E_1, E_2) et (E_3, E_4), E_1 faisant face à E_2 et E_3 face à E_4, assurant exclusivement les asservissements d'un degré de liberté en translation et d'un degré de liberté en rotation.

3 - Accéléromètre conforme aux revendications 1 et 2, caractérisé en ce que les tensions de mesure appliquées aux électrodes E_1, E_2, E_3, E_4 étant obtenues à partir d'une tension de détection V_D, d'une tension de polarisation V_o, d'une tension d'asservissement en translation V_T et d'une tension d'asservissement en rotation V_R, les tensions appliquées à E_1, E_2, E_3, E_4 sont respectivement

$$E_1 : V_D + V_o - V_T + V_R$$

$$E_2 : -V_D + V_o + V_T - V_R$$

$$E_3 : -V_D - V_o + V_T + V_R$$

$$E_4 : V_D - V_o - V_T - V_R$$

de sorte que si les capacités entre électrodes et masse d'épreuve sont égales, les charges induites par influence par les tensions de détection, de polarisation et d'asservissement en translation se neutralisent pour chaque paire d'électrodes alors que celles dues aux tensions d'asservissement en rotation se neutralisent pour chaque ensemble de deux paires d'électrodes opposées .

FIG.1

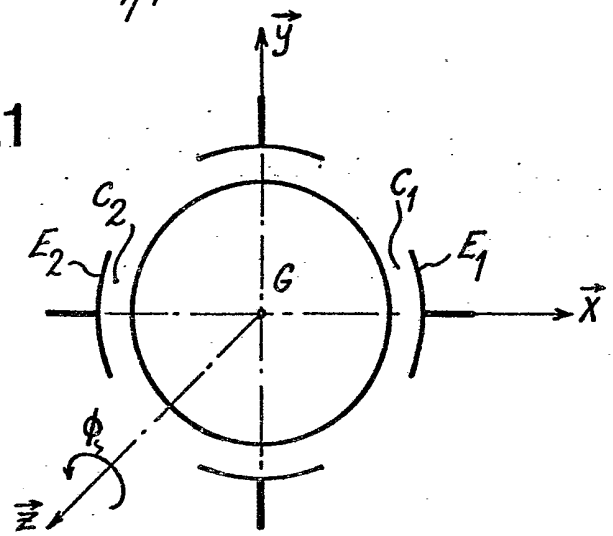


FIG.2A

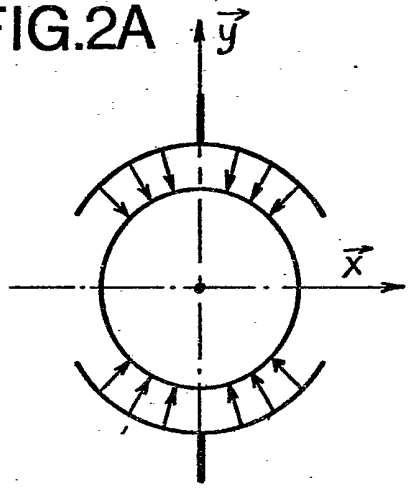


FIG.2B

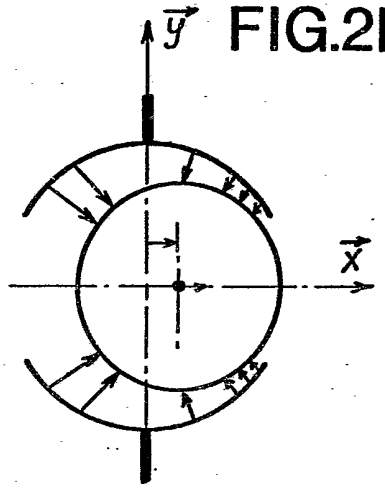


FIG.3A

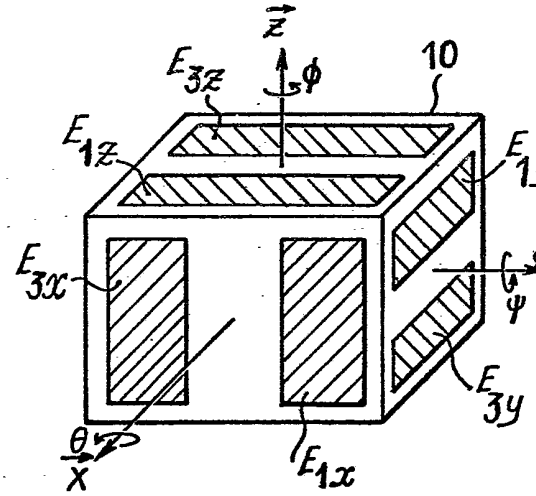


FIG.3B

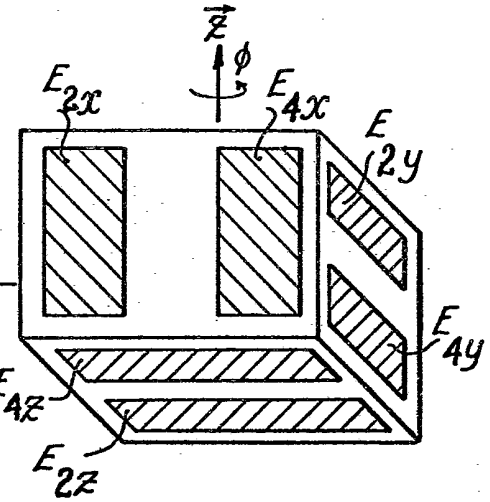


FIG.4

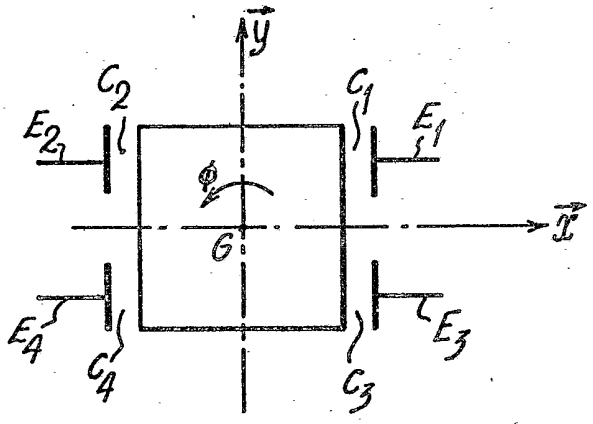

$\vec{y}$
C_2
C_1
E_2
E_1
Φ
G
$\vec{x}$
E_4
C_4
C_3
E_3

FIG.5

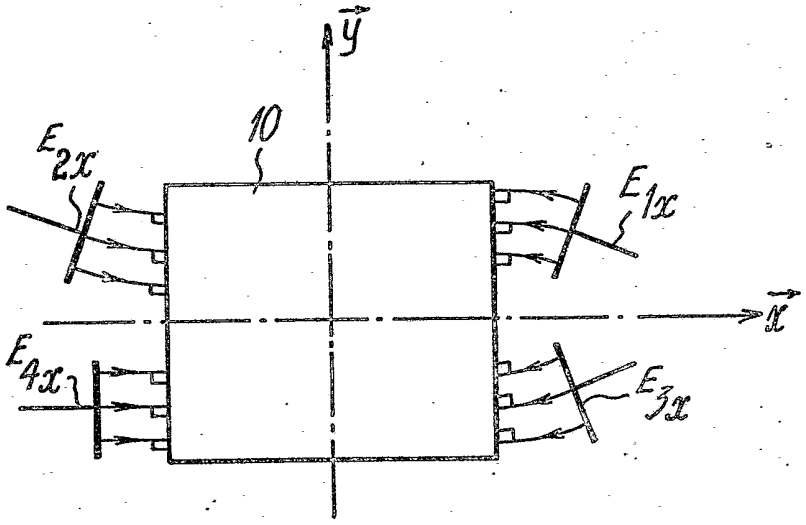

$\vec{y}$
10
E_{2x}
E_{1x}
$\vec{x}$
E_{4x}
E_{3x}

FIG.6

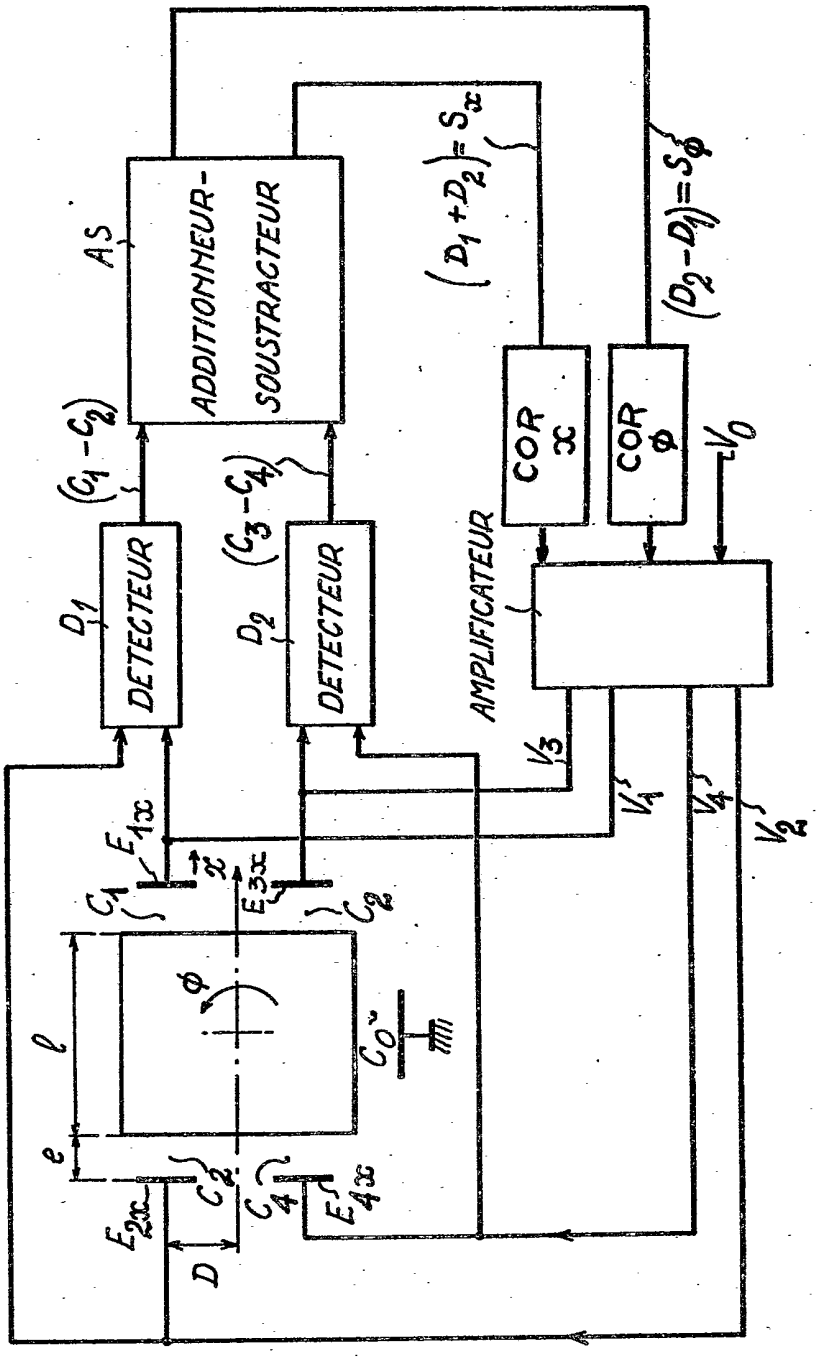
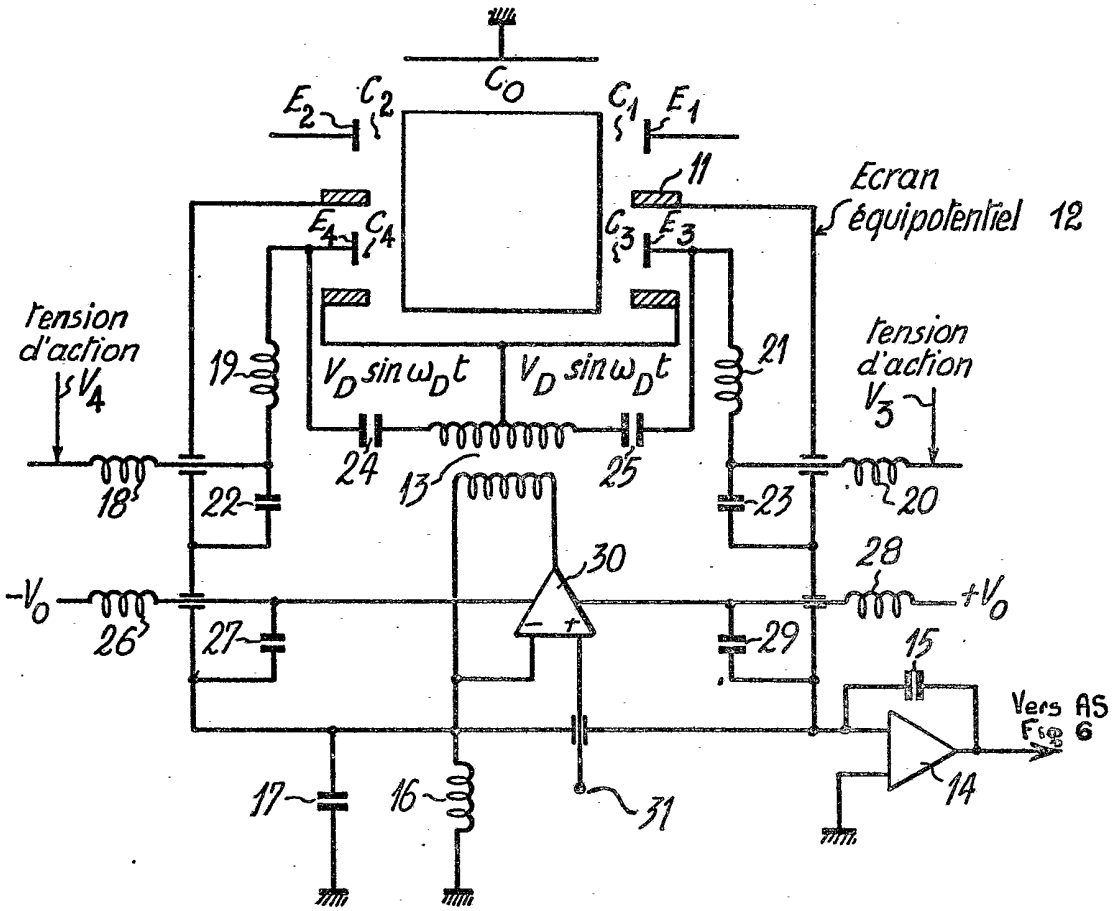

AS
ADDITIONNEUR-SOUSTRACTEUR
$(D_1+D_2)=S_x$
$(D_2-D_1)=S_\phi$
(C_1-C_2)
(C_3-C_4)
D_1
DETECTEUR
D_2
DETECTEUR
COR x
COR φ
V_0
AMPLIFICATEUR
V_3
V_1'
V_4'
V_2'
E_{1x}
E_{3x}
C_1
C_2
x
φ
C_0
l
e
E_{2x}
C_3
C_4
E_{4x}
D

FIG.7


C_0
E_2
C_2
C_1
E_1
11
Ecran équipotentiel 12
E_4
C_4
C_3
E_3
Tension d'action V_4
19
$V_D \sin \omega_D t$
$V_D \sin \omega_D t$
21
Tension d'action V_3
18
22
24
13
25
23
20
30
28
$-V_0$
26
27
$+V_0$
29
15
Vers AS Fig 6
17
16
31
14