(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 563 626**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **80 25273**

(51) Int Cl⁴ : G 01 L 1/10; H 04 R 9/00.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) Date de dépôt : 28 novembre 1980.

(30) Priorité :

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 44 du 31 octobre 1985.

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

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

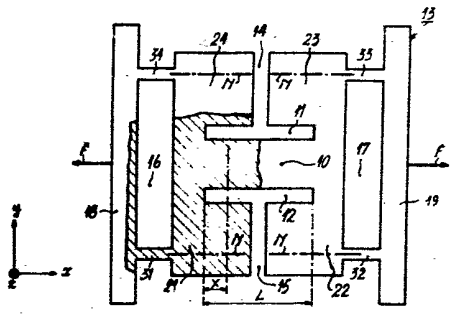
(72) Inventeur(s) : Jean-Louis Gay.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Cabinet Martinet.

(54) Perfectionnements aux transducteurs à lame vibrante.

(57) Transducteur à lame vibrante comprenant une lame vibrante ayant une direction donnée et vibrant en flexion dans une direction perpendiculaire à ladite direction donnée, deux lames-masselottes coopérant avec les extrémités de la lame vibrante et des barrettes souples reliant lesdites lames-masselottes à un support. Il est caractérisé en ce que la lame vibrante 10 et les lames-masselottes 21-24 et 22-23 sont découpées dans une plaque d'épaisseur uniforme 13, en ce que les lames-masselottes ont des directions perpendiculaires à celle de la lame vibrante et à celle de la vibration de la lame vibrante et vibrent en flexion dans la même direction que la lame vibrante et en ce que la lame vibrante est attachée aux lames-masselottes en un ventre du mouvement de flexion de ces dernières et que les barrettes souples 31-34 sont attachées aux lames-masselottes en un nœud du mouvement de flexion de ces dernières.



FR 2 563 626 - A1

PERFECTIONNEMENTS AUX TRANSDUCTEURS A LAME VIBRANTE

L'invention porte sur des perfectionnements aux transducteurs constitués d'une lame vibrant en flexion, dont l'oscillation est entretenue et dont la fréquence est en relation directe avec une grandeur physique d'entrée.

La résolution de ces transducteurs est d'autant meilleure que le coefficient de surtension du résonateur est élevé et que la stabilité de l'oscillateur ainsi constitué est également élevée.

Les capteurs de forces utilisant une lame vibrant en flexion sont utilisés depuis de nombreuses années. Leur intérêt principal est que la fréquence de vibration de la lame est fonction de la force appliquée à ses extrémités.

Les difficultés technologiques de réalisation d'un tel capteur résident dans l'encastrement des extrémités de la lame au support et dans le guidage des extrémités, de telle façon que les conditions aux limites du mouvement de la lame soient parfaitement définies et rigoureusement constantes. Lorsque cela est réalisé on peut montrer que la fréquence de résonance ne dépend , à température constante, que de la force appliquée.

Si Z (x, t) représente l'élongation du point de la lame d'abscisse x l'équation différentielle définissant le mouvement s'écrit, dans le cas d'une lame de section rectangulaire constante :

$$(1) \qquad EI \frac{\partial^4 Z}{\partial x^4} - f \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \rho \ell e \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = 0$$

où E, ρ sont le module de Young et la masse volumique du matériau de la lame, et ℓ, e sont respectivement la largeur et l'épaisseur de la lame ;

$I = \frac{\ell e^3}{12}$ est le moment d'inertie de la section de la lame

La vibration peut s'effectuer suivant une infinité de modes, de fréquences croissantes. Pour le mode fondamental qui est le plus sou-

vent utilisé, et dans le cas où les extrêmités de la lame sont encastrées, un développement limité de la fréquence est donné par l'expression suivante dans laquelle L est la longueur de la lame :

$$(2)\ F = 1{,}0279\sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{e}{L^2}\left\{1 + 9{,}831.10^{-2}\left[\frac{3L^2 f}{2E\,1e^3}\right] - 5{,}31.10^{-3}\left[\frac{3L^2 f}{2E\,1e^3}\right]^2 + 5{,}5.10^{-4}\left[\frac{3L^2 f}{2E\,1e^3}\right]^3 + \ldots\ldots\right\}$$

Les qualités métrologiques de ces dispositifs sont d'autant meilleures que le confinement de l'énergie mécanique vibratoire dans la lame est lui-même élevé. Ceci implique :

- d'une part, de réduire le plus possible la dissipation d'énergie aux encastrements, ce qui ne peut être obtenu que par un usinage monobloc de la lame et d'une partie de son support ;
- d'autre part, de trouver des structures telles que l'énergie mécanique, évacuée par les supports soit minimale. Ce découplage permet, de plus, de se prémunir contre l'effet sur la fréquence, des grandeurs d'influence (par exemple température), effet qui se manifeste, de façon indirecte, par le biais des variations du coefficient de surtension Q du résonateur.

Deux types de solutions ont été proposés dans l'art antérieur.

La première consiste à utiliser deux lames symétriques de façon à diminuer l'énergie mécanique de vibration évacuée par le support. Cette solution implique malheureusement une parfaite identité des deux lames. En effet pour obtenir le découplage par rapport aux supports, ces deux lames doivent vibrer en opposition de phase, ce qui n'est pratiquement jamais obtenu rigoureusement.

La deuxième solution représentée dans la Fig. 1 et décrite dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique N°3 470 400 du 30 Septembre 1969 consiste à réaliser un encastrement équivalent à un encastrement parfait au point de vue de l'équation aux fréquences (2). On peut montrer que, pour le mode fondamental, cela est réalisé si les mouvements des masselottes M_A et M_B sont des translations pures et identiques selon la direction 0z. Il faut pour cela compenser les moments

en A et B dus à la déformation de la lame par des moments de réaction inertielle. Cette compensation est obtenue grâce à ces masselottes M_A et M_B, de forme particulière, solidaires des extrémités de la lame et dont les centres de gravité respectifs G_A et G_B sont situés dans le plan des fibres neutres de la lame au repos et à une distance prédéterminée X des encastrements.

Si cette condition des moments est réalisée, le mouvement de translation des masselottes M_A et M_B est en opposition de phase avec le mouvement du centre de la lame et son amplitude est réduite dans le rapport des masses $\frac{m_A + m_B}{m_L}$, m_A et m_B étant les masses des masselottes M_A et M_B et m_L étant la masse généralisée de la lame vibrante. Cette condition de compensation des moments en A et B conduit, pour chaque mode de vibration en flexion à une valeur particulière de X. Pour le mode fondamental, cette valeur est approximativement égale à 0,22 L.

La fuite d'énergie par les supports est alors ramenée à celle provenant du très faible mouvement de translation des masselottes et qui est canalisée par les fixations souples F_A et F_B vers les parties fixes du montage A' et B'.

Ce dispositif présente deux difficultés fondamentales :

a) - les valeurs relativement élevées des rapports X/L et $\frac{m_A + m_B}{m_L}$ conduisent à des volumes de matière relativement importants de part et d'autre de la lame vibrante, ce qui rend particulièrement difficile, du point de vue technologique, les opérations d'usinage et de polissage de la lame 1 -dont les dimensions sont petites- ainsi que la mise en place sur la lame (ou à proximité immédiate) des électrodes d'entretien du mouvement (par exemple dépôt de couches conductrices dans le cas de lame piézoélectrique).

Le fait de disposer les masselottes dans le plan x 0 y parallèle au plan de la lame au lieu du plan x0z perpendiculaire au plan de la lame (par rapport à la figure 1, rotation des masselottes de 90° autour de 0x) n'est pas une solution satisfaisante car leur épaisseur reste grande

devant celle de la lame et l'accès à cette dernière reste malaisé.

b) - Afin de maintenir le confinement d'énergie dans la lame 1, la fréquence de résonance du système constitué par les masses m_A, m_B et m_L soutenues par les lames souples F_A et F_B doit être très inférieure à la fréquence de résonance de la lame principale 1. Il résulte la nécessité d'utiliser des lames supports F_A et F_B très fines, par conséquent fragiles et d'usinage difficile.

Un objet de l'invention est de réaliser un transducteur à lame vibrante ayant un grand coefficient de surtension grâce à une géométrie particulière de la lame vibrante et de ses fixations.

Un autre objet de l'invention est de fournir un moyen d'optimiser expérimentalement et avec une grande précision la géométrie de la lame vibrante.

Un autre objet de l'invention est de prévoir un transducteur à lame vibrante dans lequel l'entretien de la vibration de la lame est obtenu par un système d'électrodes non adhérentes agissant par effet électrostatique.

Le transducteur de l'invention peut constituer l'élément sensible de capteurs dans lesquels la grandeur physique d'entrée à mesurer est transformée en force ou contrainte agissant sur la lame et modifiant ainsi la fréquence de l'oscillateur, tels qu 'accéléromètres, manomètres, dynamomètres, etc ... Ce transducteur peut également constituer l'élément sensible de capteurs dans lesquels la grandeur d'entrée agit directement sur la fréquence de l'oscillation, tels que : thermomètres, etc ...

Selon l'invention, le mouvement de translation d'ensemble des masselottes est supprimé et remplacé par un mouvement vibratoire en flexion tel que, à l'encastrement de la lame active, le mouvement local soit pratiquement ramené à une translation (ventre de la vibration) et que, aux points de fixation des masselottes, le mouvement local ne soit plus une translation mais soit ramené à une rotation d'amplitude très faible (noeud de la vibration).

Ce résultat est obtenu en découpant la lame vibrante et les masselottes dans une plaque plane d'épaisseur uniforme, en entaillant la plaque supposée substantiellement rectangulaire par deux T opposés par le sommet dont les jambages sont alignés et dont les barres sont parallèles, ce

qui délimite une lame entre les barres des deux T et quatre masselottes raccordées à la lame vibrante et délimitées chacune par deux côtés de la plaque et le jambage et la demi-barre d'un T.

La structure en plaque plane d'épaisseur uniforme élimine toutes les difficultés technologiques de polissage de la lame sensible ainsi que celles de l'accès à cette lame pour entretenir son mouvement.

La suppression du mouvement de translation de l'extrêmité des supports F_A et F_B de la Fig. 1 augmente le découplage du mouvement vibratoire de la lame sensible et permet d'avoir des supports ne travaillant qu'en rotation de très faible amplitude, ce qui permet de les tailler dans la même plaque plane que l'ensemble vibratoire et ainsi de les rendre moins fragiles.

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

- la Fig. 1 représente un transducteur à lame vibrante de l'art antérieur qui a été décrit dans la partie de l'introduction discutant l'art antérieur ;
- la Fig. 2 représente un transducteur à lame vibrante conforme à l'invention ;
- la Fig. 3 est une vue arrachée et en perspective d'une partie du transducteur de la Fig. 2 ;
- les Figs. 4, 5 et 6 sont des variantes du transducteur à lame vibrante de la Fig. 2 ;
- la Fig. 7 représente l'appareillage de localisation des lignes nodales du mouvement des masselottes ; et
- la Fig. 8 représente un capteur de forces utilisant le transducteur à lame vibrante de l'invention muni d'un système électrostatique d'entretien de l'oscillation de la lame.

En se référant à la Fig. 2, le système vibrant ainsi qu'une partie au moins des supports est découpé dans une plaque d'épaisseur uniforme. La plaque 13 est sensiblement rectangulaire et sa découpe comprend deux T dont les barres 11 et 12 sont parallèles et délimitent la lame vibrante 10 et dont les jambages 14 et 15 sont alignés et délimitent des masselottes 21-24 . Des découpes 16 et 17 laissant subsister des barrettes - souples 31-34 unissant le système vibrant et les supports

18 et 19.

Les masselottes 21 - 24 et 22 - 23 forment des lames qui vibrent en flexion dans le plan y 0 z avec une ligne nodale N dans le prolongement de la fibre neutre des barrettes 31 - 34 et un ventre au milieu dans l'alignement de la lame vibrante 10. La lame vibrante vibre dans le plan x 0 z.

Les supports 18 et 19 transmettent la force à mesurer f à la lame 10 par l'intermédiaire des barrettes souples 31 - 34.

La condition qui fixe la position du centre de gravité, sur l'axe 0x, des masselottes 21-24 et 22-23 est toujours la même, soit X = 0,22 L pour le mode fondamental de la lame 10.

En conclusion, on voit que l'on a remplacé les masselottes de découplage agissant par un mouvement de translation d'ensemble, par une structure souple -que l'on continuera à appeler masselottes- de même épaisseur que la lame vibrante et travaillant selon un mouvement vibratoire de flexion. Cette disposition permet de réduire la masse des masselottes, d'avoir des supports moins fragiles, d'usiner tout l'ensemble dans une plaque plane de même épaisseur et ainsi d'éliminer les difficultés technologiques de réalisation et d'utilisation des dispositifs existants.

La Fig. 3 montre en perspective la forme prise par la lame formée par les masselottes 21-24 qui vibre en flexion et présente un ventre d'amplitude z_2 et la forme prise par la lame vibrante 10 vibrant également en flexion qui présente un ventre d'amplitude z_1 .

A titre d'exemple, le demandeur a réalisé un dispositif vibratoire du type de la Fig. 2 en alliage d'aluminium (AU4G) de 3mm d épaisseur et dont la lame 10 avait 18mm de long, résonnait à 24 kHz et avait un coefficient de surtension Q égal à 240 000.

D'autres réalisations ont été faites dans lesquelles la lame 10 était excitée sur un mode supérieur d'ordre pair ou impair et où chaque masselotte 21 - 24 et 22-23 était conçue pour vibrer sur un mode supérieur, les fixations 31-34 pouvant être placées sur des lignes nodales quelconques du mode choisi.

Les figures 4, 5 et 6 sont des exemples de ces autres réalisations.

Sur la Fig. 4, la lame 10' est prévue pour vibrer sur l'harmonique 3.

Dans la Fig. 5 la lame 10' vibre en flexion sur l'harmonique 3. Deux barrettes souples 31-34 sont sur le côté externe de la lame formée par deux masselottes 21 et 24 et deux barrettes souples 32'-33' sont sur le côté interne de l'autre lame formée par les deux masselottes 22 et 23.

Sur la Fig. 6, la lame vibrante 10' vibre en flexion sur l'harmonique 3 et les lames formées par les masselottes 21' - 24' et 22' - 23' vibrent également en flexion sur l'harmonique 3. Les barrettes souples sont toutes sur les côtés internes des lames vibrantes formées par les masselottes. Il y a deux lignes neutres N et N' ; certaines des barrettes souples 31'' - 34'' sont sur la ligne neutre N et d'autres, 32'' - 33'' , sur la ligne neutre N'.

Quand un éléments n'est pas changé dans les Figs. 4 et 6, il porte le même numéro que sur la Fig. 2.

La Fig. 7 représente l'appareillage pour la détermination expérimentale précise de la position des lignes nodales N, N', ... qui définit l'emplacement optimal de la fibre neutre des barrettes souples.

Le système vibrant est attaché au support par des barrettes souples provisoires qui n'occupent pas leur position optimale. Deux de ces barrettes souples provisoires sont représentées en 41 et 42 sur la Fig. 7 ; elles sont, bien entendu, décalées par rapport au plan de la figure. La lame vibrante est excitée comme il sera vu à propos de la Fig. 8.

Une électrode capacitive 43 de très petites dimensions est placée en face du centre de la lame 10 afin de délivrer un signal alternatif dont l'amplitude est proportionnelle à l'amplitude (z_1, Fig. 3) de la vibration de flexion.

Une deuxième électrode capacitive 44 semblable ou identique à 43 est portée par un chariot 45 permettant un déplacement parallèle à 0y pour des valeurs prédéterminées de x. Le signal capté par le condensateur 44 est appliqué à l'amplificateur 46 puis au détecteur synchrone 47 qui reçoit d'autre part le signal capté par le condensateur 43 et amplifié

dans l'amplificateur 48.

Le signal de sortie du détecteur synchrone 47 fournit en fonction des coordonnées (x, y) de l'électrode 44 portée par le chariot 45, l'amplitude $z_2(x, y)$ du mouvement des masselottes. On détermine les lignes neutres en notant les valeurs de y pour lesquelles $z_2(x, y)$ est nul.

L'électrode 44 doit avoir une section suffisamment petite pour obtenir la résolution spatiale cherchée ; la sensibilité peut être néanmoins élevée (quelques nm crête à crête à 24 kHz pour une section de $1 mm^2$). La valeur de la sensibilité, fonction de l'intervalle entre l'électrode et la lame, peut être maintenue constante si la valeur moyenne de la capacité de 44 est elle-même maintenue constante. Ceci est obtenu en prélevant la composante continue $z_0(x, y)$ du signal délivré par 47 au moyen du condensateur 49 et du filtre passe-bas 40 et en maintenant cette composante constante en faisant varier la distance séparant l'électrode 44 de la lame 10.

Un mauvais réglage de l'emplacement des barrettes souples de fixation se traduit par des pertes d'énergie supérieures -d'où un facteur de surtension Q non optimal- mais n'affecte pas d'une façon sensible la position des lignes nodales, tout au moins lorsque le facteur de surtension dépasse déjà quelques centaines. Cette remarque justifie le fait que le tracé de la cartographie du mouvement vibratoire peut se faire sur une maquette sur laquelle l'emplacement des fixations 31-34 n'est pas optimal.

Cette recherche expérimentale des lignes nodales se fait sans difficultés à la pression atmosphérique, les pertes dues au frottement visqueux de l'air ambiant n'affectant pas non plus de façon sensible la forme de la cartographie.

Le système vibrant qui vient d'être défini permet d'obtenir un résonateur mécanique de très grand coefficient de surtension, susceptible d'être entretenu par tout moyen approprié ; par exemple résonateur en matériau piézoélectrique, résonateur en matériau magnétique, etc...

La Fig. 8 décrit à titre d'exemple un capteur de force à résonateur entretenu par un moyen électrostatique.

La capacité 51 de détection du mouvement vibratoire de la lame 10 est polarisée par une tension V_p délivrée par un générateur de tension continue 50 aux bornes d'une impédance 52 de valeur R élevée, de telle sorte que la tension alternative disponible aux bornes de la capacité 53 soit proportionnelle à l'élongation de la lame sensible 10. Cette tension s'écrit $v \sin \omega t$, ω étant la pulsation du mouvement de la lame.

Après amplification et introduction du déphasage convenable (au travers des amplificateurs 54, 55, 56)et saturation du niveau pour stabiliser l'amplitude (au travers de l'amplificateur 57), cette tension devenue égale à $V_a \sin (\omega t + \pi/2)$ est appliquée à un transformateur 58 permettant de lui ajouter la tension continue de polarisation V_p (ou une autre tension continue, de valeur différente).

La tension résultante $\left[V_p + V_a \sin (\omega t + \pi/2)\right]$ est alors appliquée à une électrode 59 située face à la lame vibrante et agissant sur elle par attraction électrostatique. La force électrostatique est proportionnelle au carré du champ électrique ainsi développé, soit à :

$$(V_p^2 + V_a^2/2) + 2 V_p V_a \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{Va}{2} \cos 2\omega t$$

Le premier terme conduit à une élongation statique de valeur négligeable.

Le second terme constitue la force alternative qui entretient le mouvement vibratoire.

Le troisième terme (harmonique deux du mouvement) a également un effet négligeable.

La force à mesurer est appliquée aux supports 18 et 19, ce qui se traduit par une contrainte sur le système vibrant. Comme déjà expliqué la fréquence de l'oscillateur ainsi réalisé est en relation directe avec la force. Cette fréquence est disponible, par exemple, sur la sortie S (Fig. 8).

Revendications

1 -. Transducteur à lame vibrante comprenant une lame vibrante ayant une direction donnée et vibrant en flexion dans une direction perpendiculaire à ladite direction donnée, deux lames-masselottes coopérant avec les extrémités de la lame vibrante et des barrettes souples reliant lesdites lames-masselottes à un support, caractérisé en ce que la lame vibrante (10) et les lames-masselottes (21-24) et (22-23) sont découpées dans une plaque d'épaisseur uniforme (13), en ce que les lames - masselottes ont des directions perpendiculaires à celle de la lame vibrante et à celle de la vibration de la lame vibrante et vibrent en flexion dans la même direction que la lame vibrante et en ce que la lame vibrante est attachée aux lames-masselottes en un ventre du mouvement de flexion de ces dernières et que les barrettes souples (31-34) sont attachées aux lames-masselottes en un noeud du mouvement de flexion de ces dernières .

2 -. Transducteur à lame vibrante conforme à la revendication 1, caractérisé en ce que la lame vibrante et les lames-masselottes sont découpées dans une plaque d'épaisseur uniforme, en entaillant ladite plaque supposée substantiellement rectangulaire par deux T opposés par le sommet dont les jambages (14,15) sont alignés et dont les barres (11,12) sont parallèles, ce qui délimite la lame vibrante (10) entre les barres des deux T et quatre masselottes (21-24) raccordées à la lame vibrante et délimités chacune par deux côtés de la plaque et le jambage et la demi-barre d'un T.

3 -. Transducteur à lame vibrante conforme à la revendication 1, caractérisé en ce que, la lame vibrante 10 et les lames-masselottes (21-24) et (22-23) vibrent en mode fondamental de flexion.

4 -. Transducteur à lame vibrante conforme à la revendication 1, caractérisé en ce que la lame vibrante (10) et les lames-masselottes (21-24) et (22-23) vibrent en mode harmonique de flexion.

5 -. Transducteur à lame vibrante conforme à la revendication 1, caractérisé en ce que les lames-masselottes vibrent en mode harmonique de flexion présentant plusieurs noeuds N, N', du mouvement et en ce que les barrettes souples (31-34) sont attachées aux lames-masselottes en un desdits noeuds.

6 -. Transducteur à lame vibrante conforme aux revendications 1 et 3 caractérisé en ce que les centres de gravité des lames-masselottes (21,22,23,24) se projettent sur la lame vibrante en des points distants des extrémités de la lame vibrante de la quantité X telle que X/L est sensiblement égal à 0,22 où L est la longueur de la lame vibrante.

7 -. Appareillage de réglage d'un transducteur à lame vibrante conforme à la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de relever, sur une maquette de transducteur à lame vibrante dans laquelle les points d'attache des barrettes souples aux lames-masselottes ne sont pas situés en des noeuds du mouvement de flexion desdites lames-masselottes, l'emplacement desdits noeuds et de transférer lesdits points d'attache à ces noeuds.

8 -. Transducteur à lame vibrante à vibration entretenue, caractérisé en ce que le système d'entretien des vibrations de la lame vibrante est composé d'une électrode de détection formant condensateur avec la lame vibrante et alimenté en courant continu et d'une électrode d'action formant condensateur avec la lame vibrante et exerçant sur elle une action électrostatique, ladite électrode d'action étant alimentée par le courant capté par l'électrode de détection après amplification.

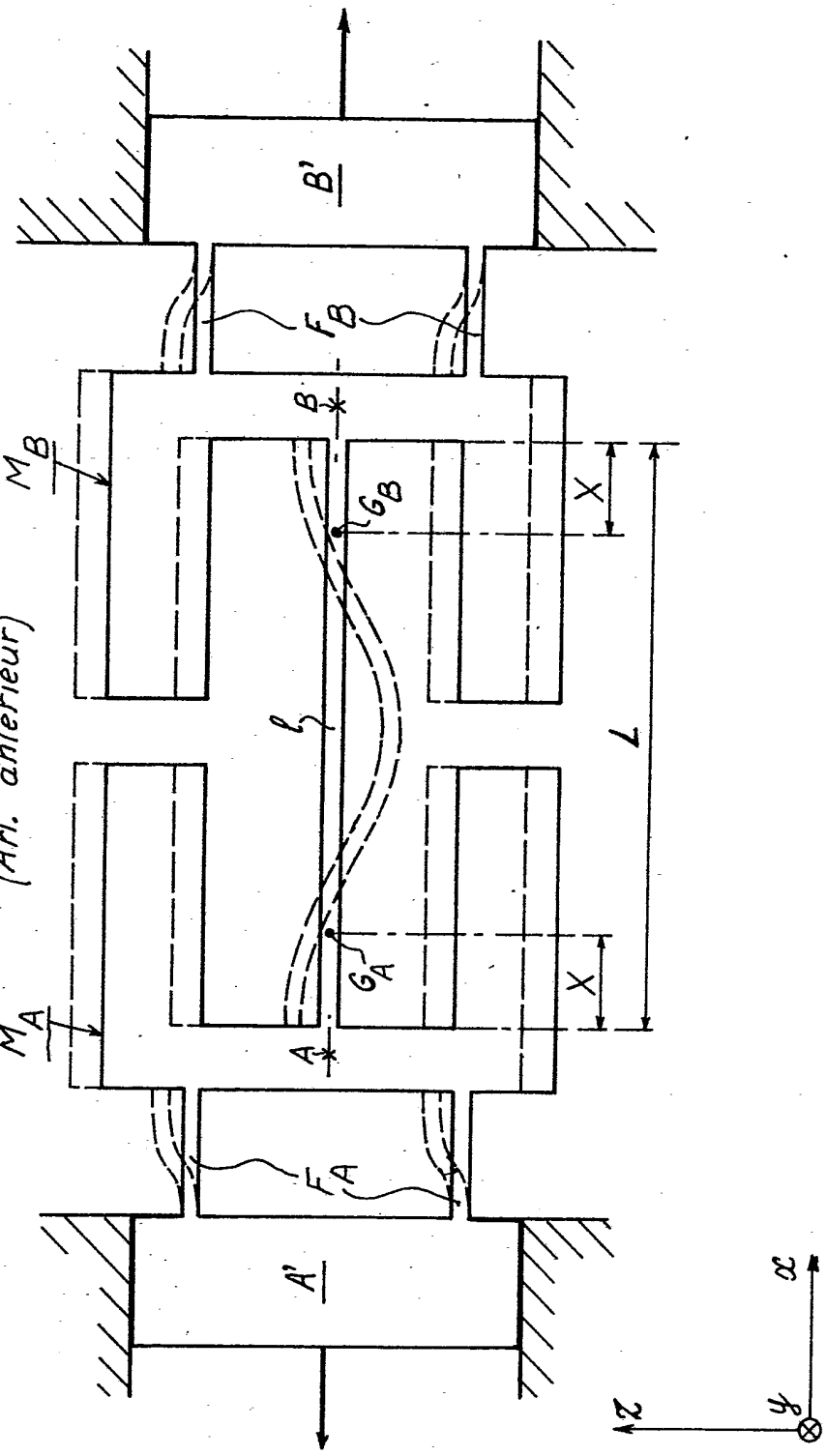


FIG.1
(Art. antérieur)

FIG.2

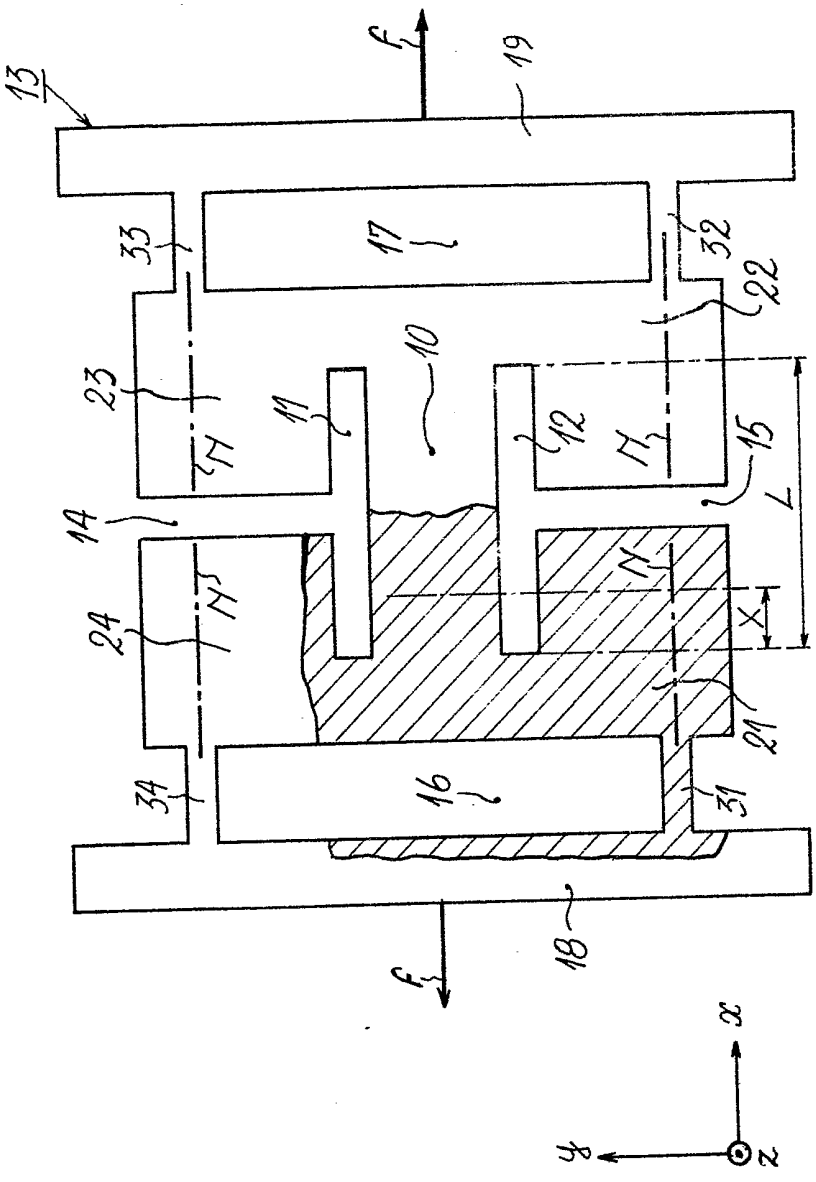


FIG. 3

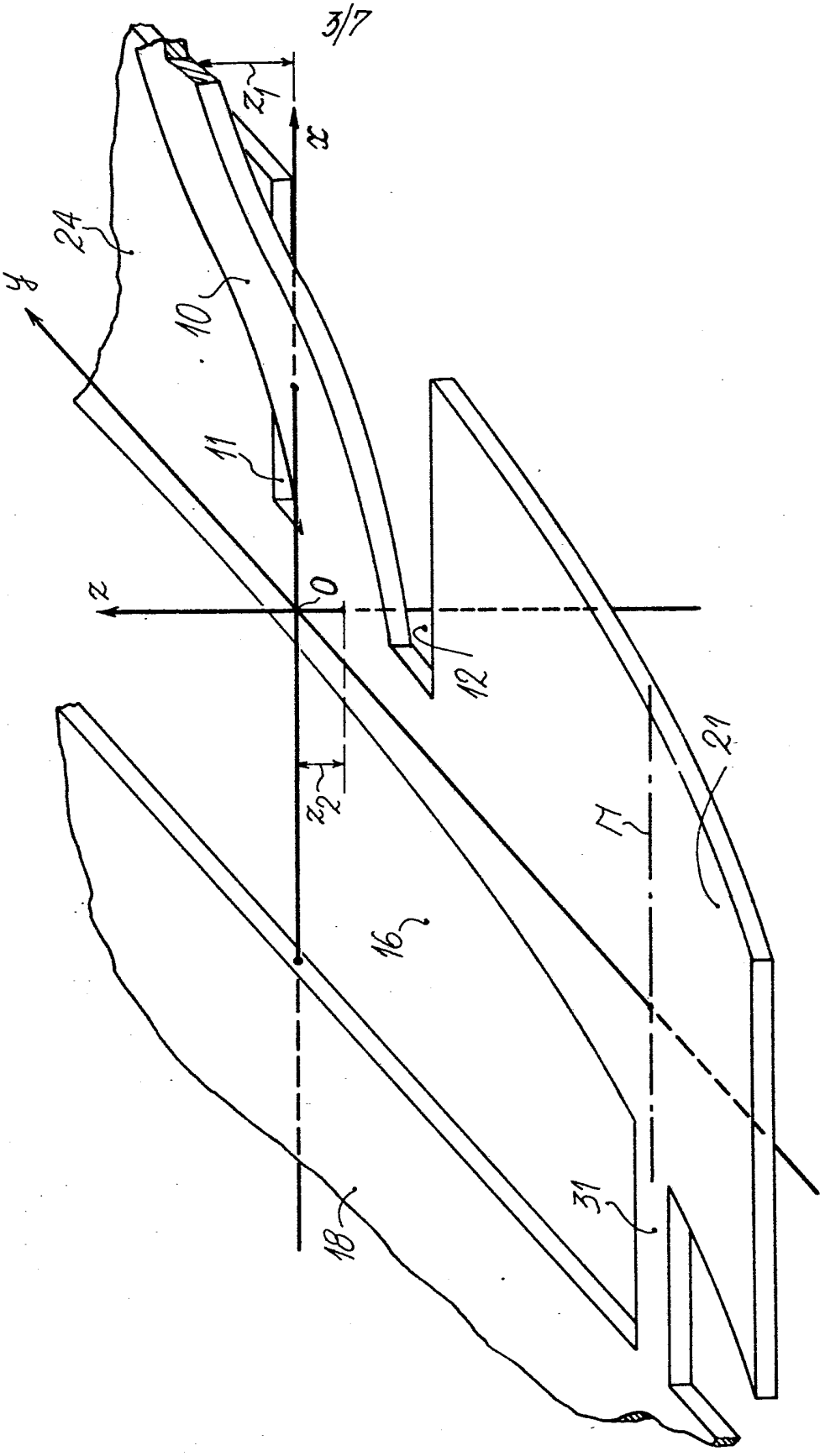


FIG.4

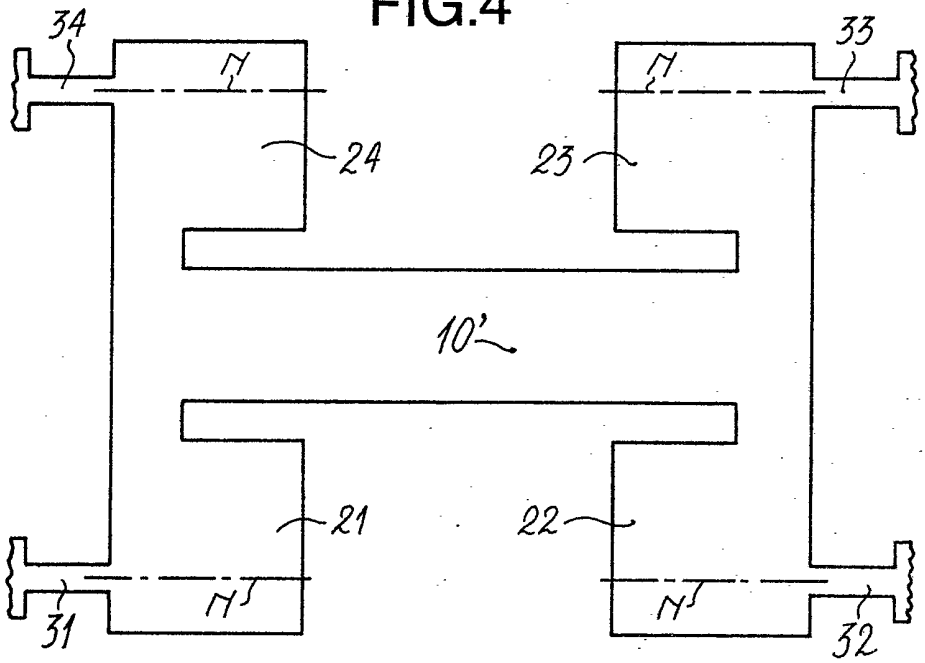


FIG.5

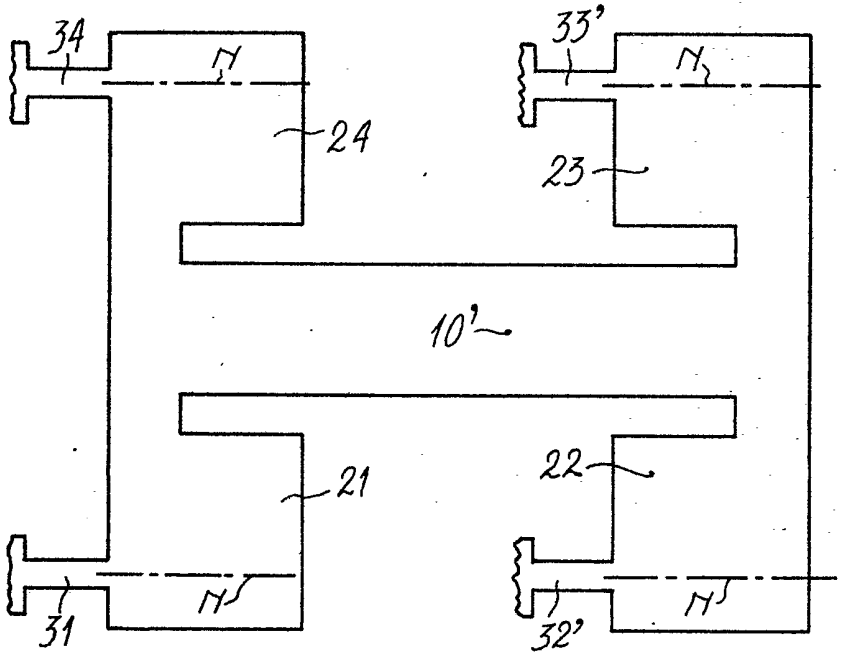


FIG.6

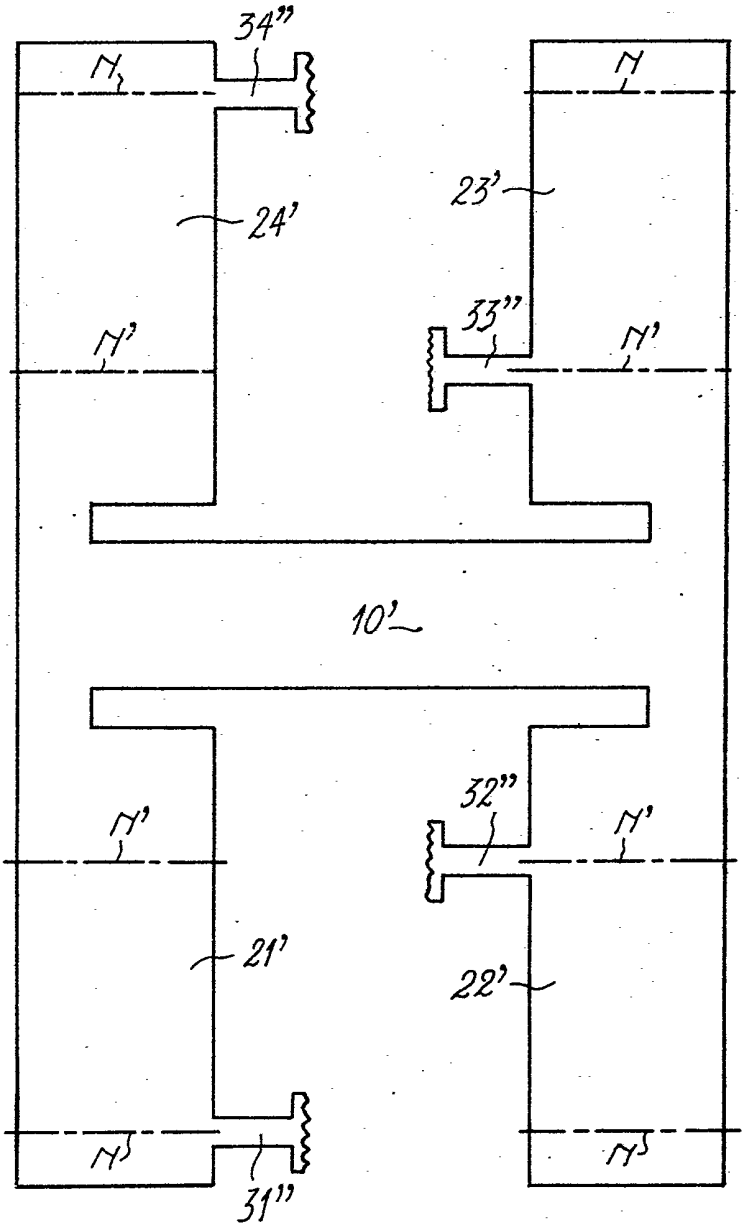


FIG.7

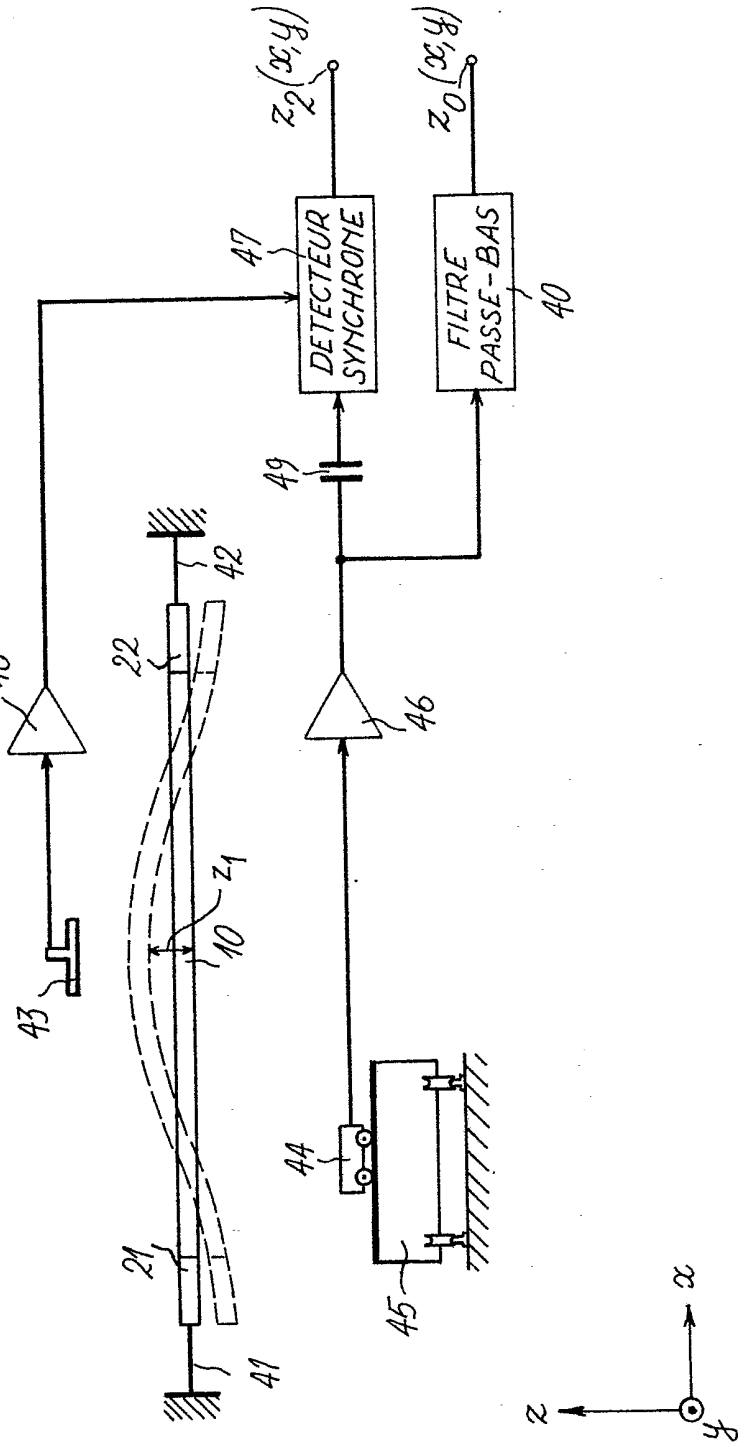
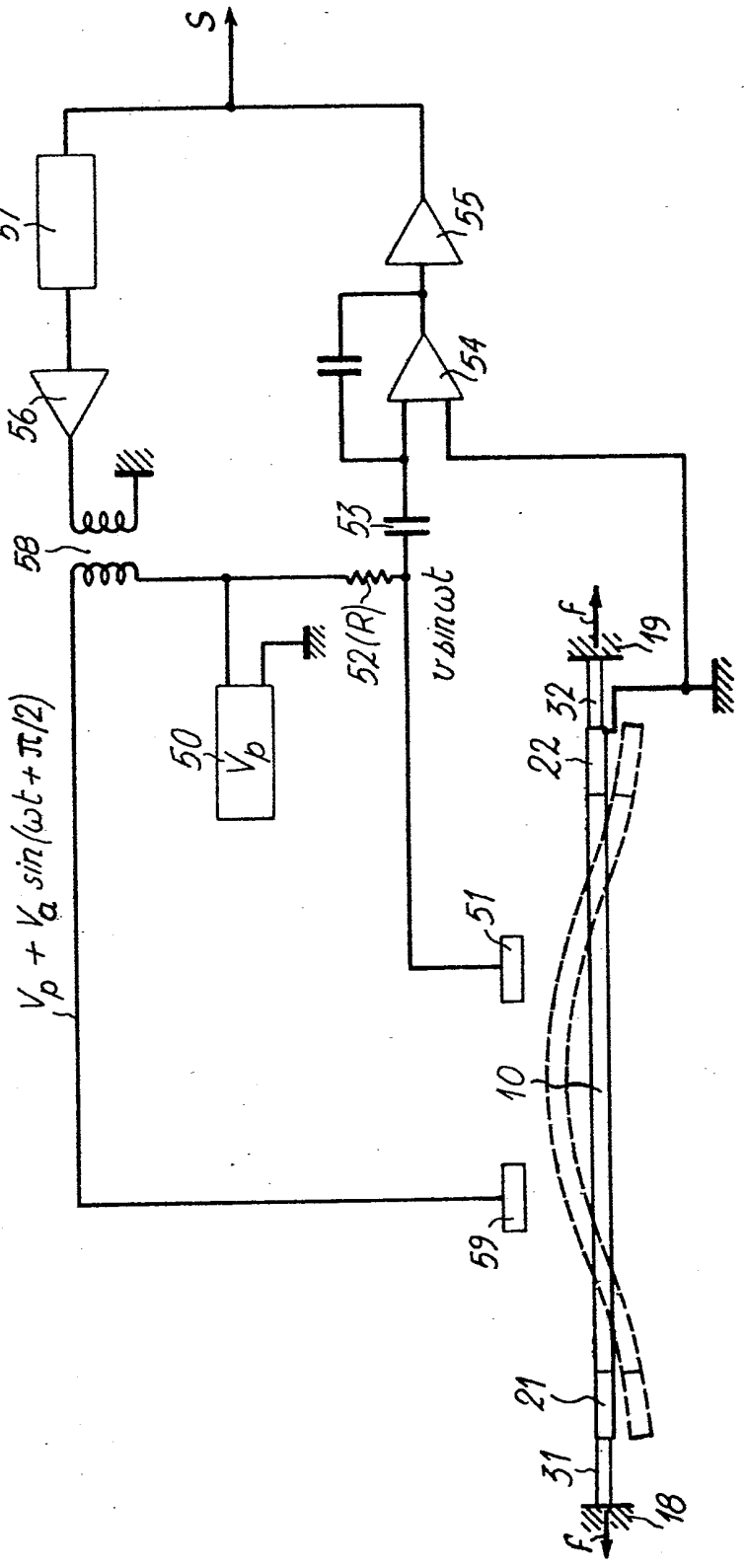

$z_2(x,y)$
$z_0(x,y)$
47
DETECTEUR SYNCHRONE
FILTRE PASSE-BAS
40
49
42
22
48
46
z_1
10
43
44
21
41
45
x
z
y

FIG.8


S
57
55
56
54
53
58
52(R)
$v \sin \omega t$
50
V_b
$V_b + V_a \sin(\omega t + \pi/2)$
51
59
19
32
22
10
21
31
18