



CONFÉDÉRATION SUISSE  
OFFICE FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

⑤ Int. Cl.<sup>3</sup>: F 16 F 15/30  
F 03 G 3/08  
G 01 M 1/36

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein  
Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein



⑫ FASCICULE DU BREVET A5

637 190

⑳ Numéro de la demande: 7525/79

⑦ Titulaire(s):  
Société Nationale Industrielle Aérospatiale, Paris  
16e (FR)

㉒ Date de dépôt: 16.08.1979

③ Priorité(s): 29.08.1978 FR 78 24955

⑦ Inventeur(s):  
Pierre Poubeau, Le Pecq/Yvelines (FR)

㉔ Brevet délivré le: 15.07.1983

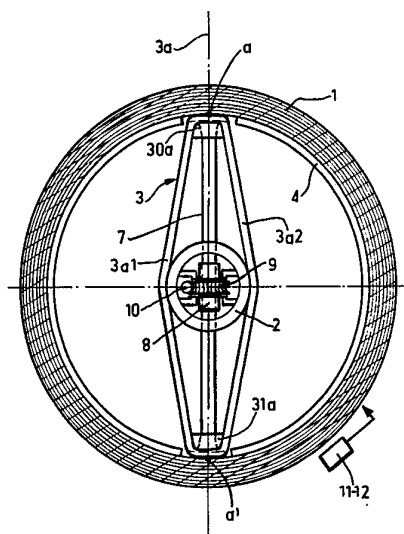
④ Fascicule du brevet  
publié le: 15.07.1983

⑦ Mandataire:  
Kirker & Cie SA, Genève

⑤ Dispositif rotatif équilibré.

⑤ Le dispositif comprend une jante (1), un moyeu (2) et un bras de liaison (3) à deux branches (3a1, 3a2) entourant le moyeu. Des masses (30a, 31a) localisées aux extrémités du bras assurent, en cours de rotation, la solidarisation, par pression, entre le bras et la jante, d'une part, et par traction sur les branches entre le bras et le moyeu, d'autre part. Des masses anisotropiques (4) réparties entre les bras conservent constante la circularité de la jante. Des moyens électromécaniques (7, 8, 9, 10, 11, 12) assurent l'équilibrage statique et dynamique de l'ensemble bras-jante-moyeu.

Le dispositif peut être utilisé pour les rotors des systèmes de stockage cinétique d'énergie.



## REVENDEICATIONS

1. Dispositif rotatif équilibré, caractérisé en ce qu'il comporte une jante circulaire reliée à un moyeu par au moins un bras de liaison à deux branches comportant des masses localisées aux extrémités de ces branches et agissant inertiellement sous l'effet de la force centrifuge pour, d'une part, permettre la solidarisation par pression de chaque bras avec la jante et, d'autre part, permettre la solidarisation par pression de chaque bras contre le moyeu par le fait que les branches de chacun des bras contournent le moyeu, des masses anisotropiques réparties à l'intérieur de la jante entre les bras, un moyen électromécanique réglable pour l'équilibrage et des capteurs détectant le défaut d'équilibrage, pour obtenir l'équilibrage statique et dynamique de l'ensemble bras-jante-moyeu et conserver constante la circularité de la jante par action du moyen électromécanique réglable selon les valeurs mesurées par les capteurs.

2. Dispositif rotatif selon la revendication 1, caractérisé en ce que la jante est constituée en un matériau anisotropique.

3. Dispositif rotatif selon la revendication 1, caractérisé en ce que la jante est de type monolithique.

4. Dispositif rotatif selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'anisotropie des masses réparties est réalisée par une disposition particulière de tissage enrobé selon laquelle un composite est mécaniquement à haute résistance dans une direction parallèle à l'axe de rotation.

5. Dispositif rotatif selon la revendication 4, caractérisé en ce que le liant d'enrobage présente un module d'élasticité relativement bas, de façon à constituer dans les directions autres que longitudinale un matériau souple.

6. Dispositif rotatif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le moyen électromécanique d'action d'équilibrage comporte un élément de jonction des masses localisées traversant le moyeu, l'élément de jonction étant muni, en sa partie centrale, d'une partie fileté engagée dans un écrou formant roue tangente animée par une vis sans fin motorisée, de telle sorte que le sens de rotation de la roue tangente détermine le sens de l'action différentielle à appliquer sur les masses localisées pour modifier la résultante des forces radiales auxquelles elles sont soumises.

7. Dispositif rotatif selon la revendication 6, caractérisé en ce que des capteurs sont agencés de façon à délivrer des signaux qui actionnent dans le sens voulu le moteur d'équilibrage.

8. Dispositif rotatif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les bras de liaison sont réalisés en matériau anisotropique.

9. Dispositif rotatif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les branches des bras de liaison contournent les masses localisées.

10. Dispositif rotatif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens électromécaniques sont disposés dans la zone de rotation à l'intérieur du moyeu et agissent différentiellement sur les masses localisées.

11. Procédé de mise en action du dispositif selon l'une des revendications 1 à 10 pour obtenir l'équilibrage statique et dynamique de l'ensemble bras-jante-moyeu et conserver constante la circularité de la jante, caractérisé par le réglage du moyen électromécanique réglable selon les valeurs mesurées par les capteurs.

La présente invention concerne un dispositif rotatif équilibré comportant une jante circulaire reliée à un moyeu par au moins un bras de liaison. L'invention concerne aussi le procédé de mise en action du dispositif pour obtenir l'équilibrage.

Les systèmes de stockage cinétique d'énergie conduisent au développement de rotors dont l'élément utile est constitué d'une jante animée d'une grande vitesse périphérique afin d'obtenir une énergie cinétique élevée par unité de masse.

Ainsi, les rotors, dans leur forme actuellement la plus élaborée, sont constitués de plusieurs éléments fonctionnels:

— la partie centrale (ou moyeu) supportée par suspension magnétique, et le circuit magnétique du moteur,

— la jante qui constitue la plus grande part du moment d'inertie,

— les liaisons par bras entre la partie centrale (ou moyeu) et la jante,

— les moyens d'équilibrage statique et dynamique.

Plusieurs problèmes difficiles sont toutefois sous-jacents dans la mise en œuvre de tels systèmes de stockage cinétique d'énergie:

Les contraintes centrifuges importantes dans la jante lui font subir un allongement dont la valeur dépasse le niveau de déformation intervenant dans les dispositifs actuels; certaines réalisations envisageables conduisent ainsi à des allongements relatifs de la jante pouvant atteindre 3%, tandis que l'amélioration des caractéristiques de contraintes à rupture et en fonctionnement permanent des matériaux composites laisse même apparaître la possibilité d'allongements atteignant ou dépassant 5%; la fixation rigide de la jante ou moyeu devient ainsi quasiment impossible pour plusieurs raisons liées au fait qu'il n'est, d'abord, par envisageable d'effectuer cette fixation par boulon ou autres systèmes coupant les fibres des matériaux composites ou détruisant l'homogénéité de la jante, par exemple en silice fondue; ensuite, les bras de liaison subissant eux-mêmes des contraintes centrifuges considérables mais différentes de celle de la jante, cela conduit, pour le même matériau et pour une section uniforme, à un allongement valant sensiblement le tiers de celui de la jante, d'où une tendance à la rupture sous contrainte de traction dans les zones de liaison bras-moyeu et bras-jante, et ce quel que soit le mode de liaison considéré.

De même, les modes de fixation par frottements entre bras et jante, envisagés dans certains cas pour absorber la dilatation de cette dernière, ne peuvent être retenus en raison de l'impossibilité de conserver le centrage du rotor au cours de la rotation.

A ces manques de moyens convenables pour lier la jante au moyeu doivent être ajoutées des considérations de stabilité de l'équilibrage statique et dynamique, ce qui revient à maintenir, pour toutes les vitesses de rotation, la coïncidence entre l'axe des systèmes de centrage du rotor et l'axe d'inertie dudit rotor; cette coïncidence doit être maintenue stable en dépit de l'allongement de la jante du rotor sous les contraintes centrifuges, ainsi que sous les variations de température et l'action cumulée de ces paramètres avec l'effet de vieillissement.

Enfin, la sustentation dans le champ de gravité de la jante, dont la masse peut dépasser la centaine de tonnes, requiert une conformation particulière du rotor.

Pour certaines applications, on connaît des types de rotor à conformation subcirculaire dans lesquels la partie centrale du rotor était munie de bras radiaux sur lesquels était bobiné, en forme polygonale, un matériau filamenteux constituant la jante.

Lors de la rotation, la jante prend dans ce cas, sous l'action des forces centrifuges, une forme comprise entre le polygone et le cercle, la résultante des forces liées à la tension dans le fil étant toujours dirigée vers l'axe, entraînant ainsi une compression des bras.

Si la forme de la jante était initialement circulaire, la force centrifuge introduirait un allongement du matériau impliquant une fixation sur les bras, difficile ou impossible à réaliser, ce qui ferait travailler ceux-ci en extension, effet s'ajoutant à l'élongation qu'ils subissent eux-mêmes selon le schéma précédemment exposé.

L'optimisation d'une telle configuration conduit à une forme initiale comprise entre la forme polygonale et la limite de subcircularité, afin d'assurer toujours une compression sur les bras.

Deux rotors de ce type ont été réalisés en 1972 et essayés jusqu'à 18 000 tr/min, l'un était en fil d'acier bobiné sur un moyeu à bras radiaux en alliage léger, l'autre en bande d'acier enroulé sur le même type de moyeu.

Hormis quelques applications limitées, les rotors à conformation subcirculaire présentent un certain nombre d'inconvénients liés au

fait que les flexions alternées de la jante, au rythme des variations de vitesse de rotation, fatiguent le matériau dans les zones où il se trouve en appui sur les bras radiaux et qu'il est difficile de mettre en place un dispositif, au niveau de la jante, pour annuler les balourds statiques et dynamiques.

La présente invention propose donc un dispositif rotatif équilibré qui évite les inconvénients précités, et qui offre de plus une solution pratique au problème de l'équilibrage statique et dynamique des rotors.

A cet effet, le dispositif selon l'invention est défini par la revendication 1.

Il sera mieux compris dans la suite du texte qui va donner, à titre d'exemple et à l'appui des dessins annexés, une forme de réalisation possible du dispositif en conformité avec l'invention.

Sur ces dessins:

la fig. 1 est une vue schématique en perspective, avec arrachement partiel, montrant l'agencement des divers éléments pour la mise en œuvre de l'invention;

la fig. 2 est une vue en plan schématique montrant plus particulièrement l'implantation du moyen d'équilibrage.

Toute conception mettant en œuvre des rotors doit passer par un mode de liaison entre la jante et le moyeu, en permettant de plus le centrage.

Si, dans un aspect théorique concernant la structure des rotors, on considère une jante mince de rayon  $R$  et de diamètre  $D$  centrée en  $O$  et une barre mince de longueur  $AB = D$  centrée en  $C$  sur laquelle la jante repose, et qu'on examine les allongements de la jante et de la barre pour des vitesses de rotation égales impliquant les mêmes vitesses périphériques pour la jante et pour les extrémités  $A$  et  $B$  de la barre, en supposant, pour l'explication et sans que cela soit une contrainte de réalisation, que la jante et la barre sont constituées de matériaux présentant la même masse spécifique  $\rho$  et le même module d'élasticité  $E$ , on voit que la contrainte dans la jante  $j$  est alors  $\sigma_1 = \rho V^2$ , où  $V$  est la vitesse périphérique de la jante, et que l'allongement correspondant est:

$$(\Delta R)_j = \frac{\rho}{E} V^2 R \quad (1)$$

La contrainte dans la barre  $b$ , nulle en  $A$  et  $B$ , croît jusqu'à un maximum en  $C$  dont la valeur est:

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \rho V^2$$

tandis que l'allongement sur les rayons  $CA = CB = R$  prend la valeur:

$$(\Delta R)_b = \frac{1}{3} \frac{\rho}{E} V^2 R \quad (2)$$

La comparaison des relations 1 et 2 montre qu'on ne peut pas centrer la jante par la barre sans introduire des liaisons en  $A$  et  $B$ , qui vont introduire elles-mêmes des contraintes pour assurer la coïncidence des points de contact barre-jante.

Ces contraintes de liaisons présentent de nombreux inconvénients de différentes sortes: quasi-impossibilité de réaliser ces liaisons sans altérer ou détériorer les caractéristiques de la jante, telles que coupures des fibres des matériaux composites, etc.; introduction de déformations de la jante au niveau de ces liaisons, d'où contraintes de flexion et de fatigue supplémentaires du matériau en relation avec les cycles de vitesses.

Conformément au procédé, des masses localisées  $K$  et  $K'$  de même valeur  $m$  sont rendues solidaires de la barre, en ses extrémités  $A$  et  $B$ .

En rotation, ces masses sont soumises à des forces centrifuges:

$$FA = FB = m \frac{V^2}{R}$$

et la barre subit ainsi un allongement supplémentaire.

L'allongement total de la barre sous l'action des forces centrifuges appliquées à ses éléments, combinées à la traction des masses localisées  $K$  et  $K'$ , devient, au rayon, égal à celui de la jante si:

$$m_o = \frac{2}{3} \rho s R$$

où  $s$  est la section de la barre.

Si  $m$  prend une valeur supérieure à  $m_o$ , la barre tend à s'allonger davantage que la jante, ce qui fait que les masses localisées  $K$  et  $K'$  se mettent en pression sur la jante.

Cette pression peut aisément être réglée à la valeur voulue pour une vitesse donnée en ajustant l'écart  $\Delta m$  de  $m$  par rapport à  $m_o$ .

Toutefois, sans précaution particulière, la pression des bras de la barre sur la jante peut conduire à une altération de la circularité en fonction de la vitesse de rotation.

A cet effet, le procédé propose également une disposition de masses réparties en appui égal sur toute la face interne de la jante, hormis les zones d'appui des bras, de telle sorte que la force centrifuge appliquée à cette dite masse la mette en pression uniforme sur la jante, afin que la circularité soit ainsi conservée quelle que soit la vitesse de rotation envisagée.

La pression ainsi exercée sur l'intérieur de la jante présente un autre avantage qui devient d'autant plus significatif que la configuration s'écarte de celle de la jante mince.

En effet, dans le cas où la jante est épaisse, les couches internes du matériau subissent des contraintes centrifuges plus faibles que les couches externes, et les contraintes radiales qui en résultent réduisent les performances de l'ensemble.

En augmentant la contrainte circonférentielle dans les couches internes de la jante, la pression résultant des bras et de la charge répartie réduit ou peut même annuler, si besoin est, la contrainte radiale qui tend à dissocier les couches externes des couches internes selon un effet dit de délaminage bien connu.

Un ajustement des paramètres permet, bien entendu, de placer la jante dans des conditions de contrainte circonférentielle constante et de contraintes radiales d'extension ou de compression faibles, voire nulles.

De plus, le choix de l'anisotropie du matériau constituant la masse répartie peut permettre en outre de renforcer les caractéristiques mécaniques axiales, par exemple, d'une jante longue par rapport à son diamètre.

Si l'on se réfère aux fig. 1 et 2, on voit que le dispositif est caractérisé, selon ses éléments constitutifs essentiels, par une jante 1, un moyeu 2 et au moins un bras de liaison, tel que 3, en appui interne sur la jante 1 et comportant des masses localisées telles que 30a, 31a en ses extrémités.

L'ensemble rotor ainsi constitué est complété, d'une manière normale, par le système de suspension haut 5 et par le système de suspension bas 6 qui peut comporter, en outre, le système d'entraînement du rotor ou de récupération d'énergie, ainsi que le dispositif d'équilibrage dont il sera parlé ci-après.

Les systèmes de suspension peuvent être, dans une forme élaborée, du type à paliers magnétiques, et le moteur générateur peut être du type à aimants permanents sans fer.

Dans la forme présentée sur cette fig. 1 et qui se rapporte à un rotor de grande dimension, les bras sont au nombre de quatre selon une disposition orthogonale alternée et les points matérialisant le contact des centres des surfaces d'appui des bras 3a, 3b, 3c, 3d avec l'intérieur de la jante sont repérés  $a, a' - b, b' - c, c'$  et  $d, d'$ , tandis que les masses localisées sont elles-mêmes repérées 30a, 31a, 30b, 31b,...

La conformation de chacun des bras 3, telle que représentée sur les fig. 1 et 2, laisse apparaître une caractéristique qui est importante.

En effet, la forme filamenteuse ou laminaire, ou plus généralement la conformation en un matériau anisotrope, utilisée pour constituer chaque branche de bras 3a1, 3a2, 3b1, 3b2 est mise à profit pour contourner à la fois les masses localisées 30a, 31a,... et le moyeu 2.

De la sorte, les contraintes de traction apparaissant dans chaque branche de bras, et qui sont les mieux appropriées pour le matériau filamenteux ou laminaire considéré, sont mises à profit pour «pincer» le moyeu et constituer ainsi le principe même de la tenue mécanique de l'ensemble.

Au cours de la rotation, les forces centrifuges apparaissant sur les masses localisées mettent en effet les branches des bras en traction; les contraintes ainsi engendrées font apparaître deux résultantes dirigées vers l'axe de rotation  $Z, Z'$  et, de ce fait, se manifestent pendant toute la durée de la rotation.

Tous les moyens de constitution de jante peuvent être envisagés, qu'ils soient de type filamenteux, laminaire ou encore monolithique.

Bien évidemment, les zones de liaison autour des points a, a' - b, b' - c, c' et d, d' sont initialement réalisées par collage, mais ce dernier mode ne constitue qu'un appoint utile pour assurer le maintien de la jante lors des périodes d'arrêt de la rotation.

Selon leur mode de réalisation préféré et en l'état actuel de la technique, les différents éléments peuvent avantageusement mais non exclusivement être réalisés de diverses manières:

La jante est en bobinage circonférentiel de type filamenteux, fibres de verre, carbone polyimide ou polyamide, fils de bore, fils de bande d'acier, ou encore en un matériau monolithique tel que silice fondue, acier à haute résistance, etc.

Les masses localisées sont en un matériau très dense tel que plomb, uranium appauvri, acier, etc., sous forme massive, sous forme de fils ou de tissus dans un liant organique ou métallique, ou sous forme pulvérulente dans un liant organique ou métallique. Les masses réparties 4 sont en matériaux constitués d'un tissu de fibres mécaniquement plus résistantes dans une direction parallèle à l'axe de rotation, donc anisotrope, enrobé dans un liant et faisant ainsi corps par collage avec la jante pour conserver constante la circularité de la jante; ledit liant peut présenter un module d'élasticité relativement bas de façon à constituer, dans les directions autres que longitudinale, un matériau souple. Ce tissu doit être ajouré au droit des zones de liaison bras-jante.

Les bras peuvent être en un matériau ayant un module d'élasticité très élevé et une masse spécifique inférieure à celle de la jante, tout en possédant une capacité d'allongement égale à celle de cette jante. Ces propriétés sont favorables à la stabilité de l'équilibrage en fonction de la vitesse, de même que sont réduites les déformations dans les directions perpendiculaires à celles des bras.

En outre, ces bras sont répartis le long du moyeu et de la jante selon une disposition et un nombre qui paraissent les meilleurs en fonction du problème à résoudre.

Ils peuvent être avantageusement bobinés en fibres croisées sur un mandrin et enrobés dans la résine, afin d'améliorer leur résistance aux efforts axiaux de tenue de la jante.

La mise en œuvre de rotors de grande dimension en matériaux composites, dotés d'une grande épaisseur de jante relativement au rayon, rend très difficile la solution du problème de l'équilibrage statique et dynamique dans toute la plage de vitesse de rotation; le présent procédé va maintenant proposer une solution à ce problème.

En se reportant à la fig. 2, on peut voir que les masses localisées 30a et 31a du bras 3a sont liées entre elles par un élément de jonction 7, qui passe au travers d'une ouverture pratiquée dans le moyeu 2, et que cet élément peut agir différemment sur la résultante radiale des forces appliquées à ces masses.

Du fait de son faible diamètre relatif par rapport à celui de la jante, le moyeu est soumis à de faibles contraintes centrifuges et peut, de ce fait, accepter des ouvertures usinées de faibles dimensions, ce qui est le cas pour le passage de l'élément de jonction 7.

Cet élément de jonction est à tension nulle ou faible lorsque la jante est à l'arrêt mais en cours de rotation il subit, outre ses propres contraintes centrifuges, celles qui résultent de la traction des masses localisées 30a, 31a qui devront, de ce fait, être dimensionnées en conséquence.

Dans la zone axiale, l'élément de jonction 7 est rendu solidaire d'une partie filetée 8 qui passe dans un écrou solidaire d'un système roue tangente 9/vis sans fin 10.

Cette roue tangente va, sous l'action de la vis sans fin 10 animée par un moteur (non représenté), déplacer l'élément 8 dans un sens ou dans l'autre selon son propre sens de rotation défini à partir de capteurs d'équilibrage appropriés 11-12, de type inductif ou capacitif par exemple.

Il est à noter que le dispositif moteur d'équilibrage sont situés dans la partie centrale du moyeu, donc dans une zone où les accélérations centrifuges sont faibles.

En outre, la puissance d'entraînement et les signaux de commande des moteurs passent de la partie statorique de l'installation au rotor par transformateur à primaire fixe et secondaire tournant sans contact mécanique ni électrique entre rotor et stator. Tout autre système de couplage BF ou HF pourrait bien entendu être envisagé.

L'agencement du dispositif convient aux rotors de grandes dimensions, dans des utilisations visant le stockage et la restitution d'une fraction de kilowatt-heure à plusieurs mégawatts-heures sur des installations fixes ou mobiles et intégrées ou non à des réseaux de distribution d'électricité.

Bien que les paliers magnétiques susmentionnés conviennent particulièrement bien pour des utilisations très prolongées sans intervention, il peut être envisagé de leur substituer des moyens plus classiques, tels que les roulements à billes ou les paliers fluides à gaz, à huile, ou encore les paliers autolubrifiants tels que polyimide dopé argente par exemple.

Dans le cas d'utilisation d'un matériau filamenteux en fils ou en bandes, ce matériau peut être noyé dans une matière présentant un bas module d'élasticité et un haut coefficient d'allongement.

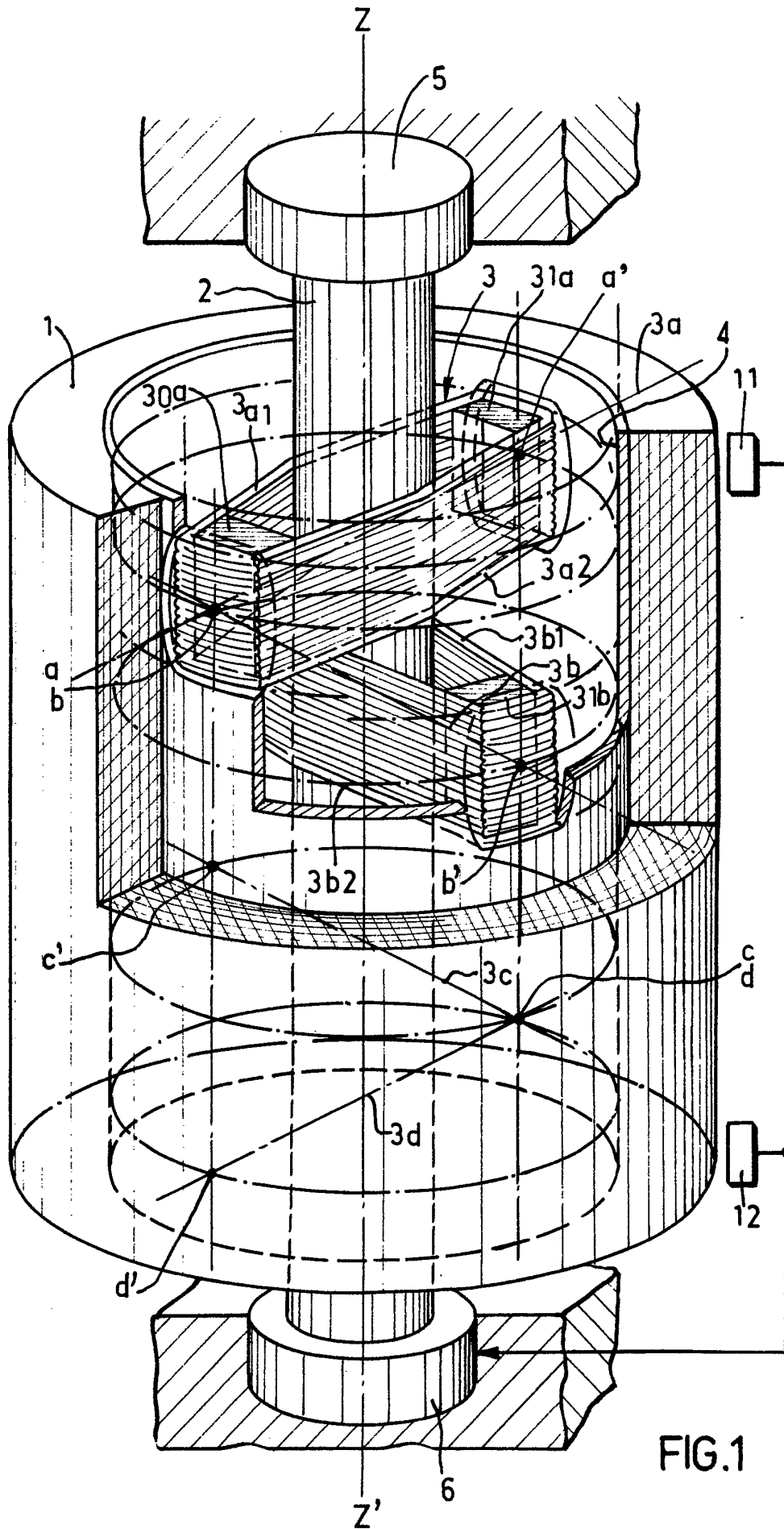


FIG.1

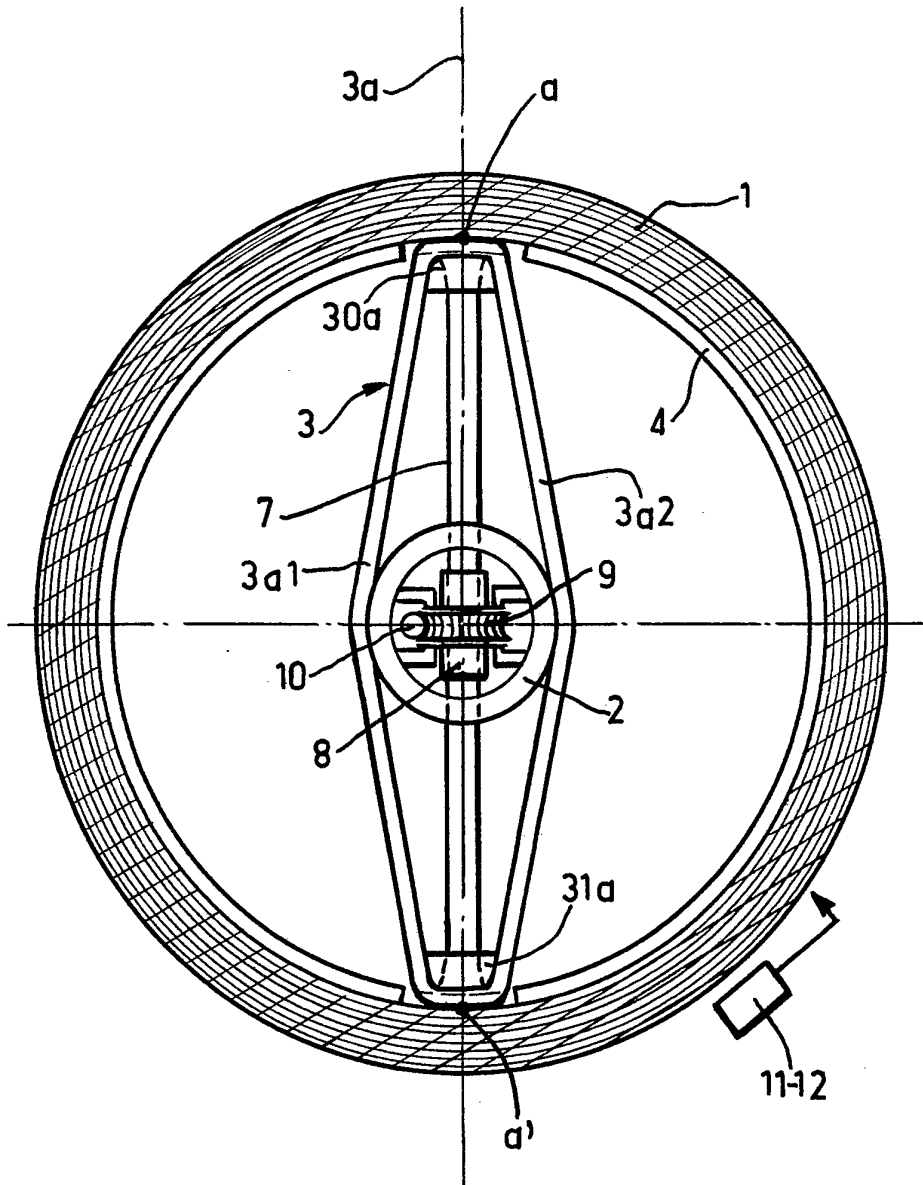


FIG. 2