



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:  
**08.07.2015 Bulletin 2015/28**

(51) Int Cl.:  
**G04C 3/10 (2006.01)** **G04C 5/00 (2006.01)**  
**H02K 7/065 (2006.01)** **G04B 17/32 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **14199882.3**

(22) Date de dépôt: **22.12.2014**

(84) Etats contractants désignés:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
 Etats d'extension désignés:  
**BA ME**

- **Favre, Jérôme**  
**2000 Neuchâtel (CH)**
- **Helfer, Jean-Luc**  
**2525 Le Landeron (CH)**
- **Hinaux, Baptiste**  
**1005 Lausanne (CH)**
- **Lécho, Dominique**  
**2732 Reconvilier (CH)**
- **Ragot, Patrick**  
**2052 Fontainemelon (CH)**
- **Piccini, Fanel**  
**2202 Chambrelieu (CH)**

(30) Priorité: **23.12.2013 EP 13199428**  
**11.07.2014 EP 14176816**

(71) Demandeur: **The Swatch Group Research and Development Ltd.**  
**2074 Marin (CH)**

(74) Mandataire: **Surmely, Gérard et al**  
**ICB**  
**Ingénieurs Conseils en Brevets**  
**Faubourg de l'Hôpital 3**  
**2001 Neuchâtel (CH)**

(72) Inventeurs:  
 • **Di Domenico, Gianni**  
**2000 Neuchâtel (CH)**  
 • **Winkler, Pascal**  
**2074 Marin (CH)**

(54) **Dispositif régulateur de la vitesse angulaire d'un mobile dans un mouvement horloger comprenant un échappement magnétique**

(57) L'invention concerne un dispositif régulateur de la vitesse angulaire relative entre une structure magnétique (42) et un résonateur (46) couplés magnétiquement et formant un oscillateur (42) qui définit un échappement magnétique. La structure magnétique comprend au moins une piste annulaire (52) formée d'un matériau magnétique dont un paramètre physique est corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur, le matériau magnétique étant agencé le long de la piste annulaire de sorte que ce paramètre physique varie angulairement de

manière périodique. La piste annulaire comprend dans chaque période angulaire une zone (56) d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur adjacente radialement à une zone d'impulsion. Le matériau magnétique, dans chaque zone d'accumulation, est agencé de manière que le paramètre physique de ce matériau magnétique augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive.

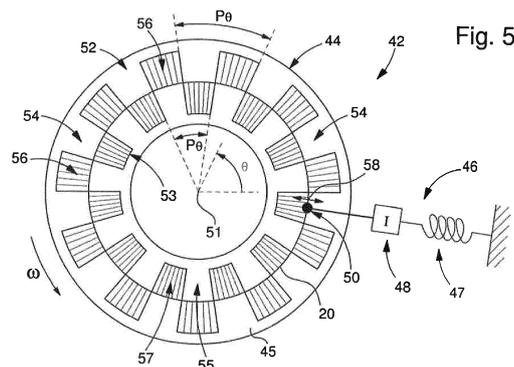


Fig. 5

## Description

### Domaine technique

**[0001]** La présente invention concerne le domaine des dispositifs régulateur de la vitesse angulaire relative entre une structure magnétique et un résonateur couplés magnétiquement de manière à définir ensemble un oscillateur. Le dispositif régulateur de la présente invention rythme la marche d'un mouvement horloger mécanique. Plus particulièrement, l'invention concerne les échappements magnétiques pour mouvements horlogers mécaniques dans lesquels il est prévu un couplage magnétique direct entre un résonateur et une structure magnétique. En général, sa fonction est d'assujettir les fréquences de rotation des mobiles d'un rouage compteur d'un tel mouvement horloger à la fréquence de résonance du résonateur. Ce dispositif régulateur comprend donc un résonateur, dont une partie oscillante est munie d'au moins un élément de couplage magnétique, et un échappement magnétique agencés de manière à commander la vitesse angulaire relative entre une structure magnétique formant cet échappement magnétique et ce résonateur. Il remplace le balancier-spiral et le mécanisme d'échappement classique, notamment l'échappement avec une ancre de type suisse et une roue d'échappement dentée.

**[0002]** Le résonateur ou la structure magnétique est solidaire en rotation d'un mobile entraîné en rotation avec un certain couple moteur qui entretient une oscillation du résonateur. En général le mobile est incorporé dans un rouage ou plus généralement une chaîne cinématique d'un mécanisme. Cette oscillation permet de régler la vitesse angulaire relative entre la structure magnétique et le résonateur grâce au couplage magnétique entre eux.

### Arrière-plan technologique

**[0003]** Les dispositifs de régulation de la vitesse d'une roue, nommé aussi rotor, par un couplage magnétique, nommé aussi accouplement magnétique, entre un résonateur et une roue magnétique sont connus depuis de nombreuses années dans le domaine horloger. Plusieurs brevets relatifs à ce domaine ont été délivrés à la société Horstmann Clifford Magnetics pour des inventions de C. F. Clifford. En particulier, on citera le brevet US 2,946,183. Les dispositifs de régulation décrits dans ces documents présentent divers inconvénients, en particulier un problème d'anisochronisme (défini comme un non-isochronisme, c'est-à-dire une absence d'isochronisme), à savoir une variation significative de la pulsation (vitesse angulaire) du rotor en fonction du couple moteur appliqué à ce rotor. Les raisons de cet anisochronisme ont été comprises dans le cadre des développements ayant conduit à la présente invention. Ces raisons ressortiront ultérieurement à la lecture de la description de l'invention.

**[0004]** Il est aussi connu de la demande de brevet japonaise JPS 5240366 (demande No JP19750116941) et des modèles d'utilité japonais JPS 5245468U (demande No JP19750132614U) et JPS 5263453U (demande No JP19750149018U) des échappements magnétiques à couplage magnétique direct entre un résonateur et une roue formée par un disque. Dans les deux premiers documents, il est prévu de remplir des ouvertures rectangulaires d'un disque non magnétique avec une poudre à haute perméabilité magnétique ou un matériau aimanté. On obtient ainsi deux pistes annulaires coaxiales et adjacentes qui comprennent chacune des zones magnétiques rectangulaires agencées régulièrement avec une période angulaire donnée, les zones de la première piste étant décalées ou déphasées d'une demi-période relativement aux zones de la seconde piste. On a donc des zones magnétiques distribuées alternativement d'un côté et de l'autre d'un cercle correspondant à la position de repos (position zéro) de l'élément ou organe de couplage magnétique du résonateur. Cet élément ou organe de couplage est réalisé par une boucle ouverte, selon le cas en matériau aimanté ou à haute perméabilité magnétique, entre les extrémités de laquelle passe le disque entraîné en rotation. Le troisième document décrit une alternative dans laquelle les zones magnétiques du disque sont formées par des plaquettes individuelles en matériau à haute perméabilité magnétique, l'élément de couplage magnétique du résonateur étant alors aimanté. Les échappements magnétiques décrits dans ces documents japonais ne permettent pas d'améliorer l'isochronisme de manière importante, notamment pour des raisons qui sont exposées ci-après à l'aide des Figures 1 à 4.

**[0005]** A la Figure 1 est représenté schématiquement un oscillateur formant un échappement magnétique 2 du type décrit dans les documents japonais susmentionnés, mais déjà optimisé par le fait que les dents magnétiques 14 et 16 de la roue 4 définissent des secteurs annulaires qui s'étendent chacun sur une demi-période d'oscillation et par la sélection d'un élément de couplage avec une extrémité ronde ou carrée pour le résonateur, afin de mieux permettre une comparaison avec un mode de réalisation de la présente invention représenté à la Figure 5 et démontrer objectivement les bénéfices de la présente invention. La roue 4 comprend une première série de dents 14 séparées respectivement par une première série de trous 15 qui définissent ensemble une première piste annulaire. Cette roue comprend encore une deuxième série de dents 16 séparées respectivement par une deuxième série de trous 17 qui définissent ensemble une deuxième piste annulaire. Les dents 14 et 16 sont formées par un matériau magnétique à haute perméabilité magnétique, en particulier un matériau ferromagnétique. Les deux séries de dents sont respectivement reliées par un anneau externe 18 et un anneau interne 19 formés du même matériau magnétique. Les deux pistes annulaires sont adjacentes et délimitées par un cercle 20 qui correspond à la position de repos de l'aimant 12, repéré

en son centre, du résonateur 6 pour toute position angulaire de la roue 4, c'est-à-dire à la position dans laquelle le résonateur a une énergie de déformation élastique minimale.

**[0006]** Le résonateur est représenté symboliquement par un ressort 8, correspondant à sa capacité de déformation élastique définie par une constante élastique, et par une inertie 10 définie par sa masse et sa structure. Le résonateur est capable d'osciller avec une fréquence propre dans au moins un mode de résonance où l'aimant 12 présente une oscillation radiale. On comprendra que cette représentation schématique du résonateur 6 signifie que, dans le cadre de la présente invention, il n'est pas limité à quelques variantes particulières. Ce qui importe, c'est que le résonateur comprend au moins un élément de couplage magnétique 12 permettant de coupler magnétiquement ce résonateur à la structure magnétique de la roue 4 qui est, dans l'exemple représenté à la Figure 1, entraînée en rotation par un couple moteur dans le sens antihoraire à la vitesse angulaire  $\omega$ . L'aimant 12 est donc situé au-dessus de la roue 4 et il est capable d'osciller radialement autour d'une position zéro située sur le cercle intermédiaire 20. Comme les dents magnétiques 14 et 16 forment des zones d'interaction magnétique situées alternativement d'un côté et de l'autre du cercle intermédiaire 20, elles définissent un chemin magnétique sinueux avec une période angulaire  $P_\theta$  déterminée, laquelle correspond à la période angulaire de chacune des première et deuxième pistes annulaires. Lorsque le résonateur est couplé magnétiquement à la roue de sorte que l'aimant 12 oscille en suivant le chemin magnétique sinueux défini par cette roue, la vitesse angulaire  $\omega$  de la roue est définie sensiblement par la fréquence d'oscillation du résonateur.

**[0007]** A la Figure 2 est représentée schématiquement pour une partie de la roue 4 l'énergie potentielle magnétique (aussi nommée énergie potentielle d'interaction magnétique) de l'oscillateur 2 qui varie angulairement et radialement en fonction de la structure magnétique de cette roue. Les courbes de niveaux 22 correspondent à différents niveaux de l'énergie potentielle magnétique. Elles définissent des courbes équipotentielles. L'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur en un point donné correspond à un état de l'oscillateur lorsque l'élément de couplage magnétique du résonateur se trouve dans une position donnée (son centre étant situé à ce point donné). Elle est définie à une constante près. En général, l'énergie potentielle magnétique est définie relativement à une énergie de référence qui correspond à l'énergie potentielle minimale de l'oscillateur. En l'absence de force dissipative, cette énergie potentielle correspond au travail nécessaire pour amener l'aimant d'une position d'énergie potentielle minimale à une position donnée. Dans le cas de l'oscillateur considéré, ce travail est fourni par le couple moteur appliqué à la roue 4. L'énergie potentielle accumulée dans l'oscillateur peut être transférée au résonateur lorsque l'aimant retourne vers une position d'énergie potentielle moindre, en particulier d'énergie po-

tentielle minimale, par un mouvement radial relativement à l'axe de rotation de la roue (c'est-à-dire selon le degré de liberté du mode de résonance utile). En l'absence de force dissipative, cette énergie potentielle est transformée en énergie cinétique et énergie élastique dans le résonateur par le travail de la force magnétique entre l'élément de couplage du résonateur et la structure magnétique. C'est ainsi que le couple moteur fourni à la roue sert à entretenir l'oscillation du résonateur qui en retour freine la roue en réglant sa vitesse angulaire.

**[0008]** La piste annulaire extérieure définit une alternance de zones d'énergie potentielle minimale 24 et de zones d'énergie potentielle maximale 25 alors que la piste annulaire intérieure définit, avec un déphasage d'une demi-période angulaire  $P_\theta/2$  relativement à la première piste (c'est-à-dire un déphasage de  $180^\circ$ ), une alternance de zones d'énergie potentielle minimale 28 et de zones d'énergie potentielle maximale 29. A la Figure 3 sont représentés deux tracés 32 et 34 donnant la position du centre de l'aimant 12 lorsque l'oscillateur 2 est en fonctionnement et que la roue 4 est donc entraînée en rotation avec une régulation de sa vitesse angulaire. Ces tracés sont donc une représentation de l'oscillation de l'aimant avec deux amplitudes différentes dans un référentiel lié à la roue. En observant les courbes de niveau 22 de l'énergie potentielle magnétique et les oscillations 32 et 34, on remarque que l'oscillateur accumule de l'énergie potentielle magnétique à chaque alternance dans des zones d'accumulation 26 et 30. La force exercée sur l'aimant du résonateur est donnée par le gradient de l'énergie potentielle magnétique, ce gradient étant perpendiculaire aux courbes de niveaux 22. La composante angulaire (degré de liberté de la roue) travaille par réaction sur la roue alors que la composante radiale (degré de liberté du résonateur) travaille sur l'organe de couplage du résonateur. Dans les zones d'accumulation, la force angulaire correspond à une force de freinage de la roue car la force de réaction angulaire s'oppose au sens de rotation de cette roue. Lorsque la force magnétique est essentiellement angulaire dans les zones d'accumulation, on peut parler de pure accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur.

**[0009]** Aux Figures 2 et 3, les zones de pure accumulation définissent sensiblement des zones annulaires  $Z1_{ac}^*$  et  $Z2_{ac}^*$ . L'énergie accumulée est ensuite transférée au résonateur dans une zone centrale d'impulsions  $ZC_{imp}^*$ . Dans la zone centrale  $ZC_{imp}^*$  et plus précisément dans les zones d'impulsion où passent les oscillations de l'aimant, le gradient de l'énergie potentielle magnétique présente une composante radiale qui augmente progressivement avec la rotation de la roue alors que la composante angulaire diminue pour finalement être nulle. Ce gradient correspond à une force de poussée pour l'aimant et donc à une impulsion. Lorsque l'amplitude est relativement importante (oscillation 32), on remarque que la force de poussée est appliquée sur toute la largeur de la zone centrale entre les points  $PE_1$  et  $PS_1$ . Pour une amplitude moindre (oscillation 34), le passage au travers

de la zone centrale  $ZC_{imp}^*$  s'étend sur une distance angulaire supérieure entre les points  $PE_2$  et  $PS_2$  et, dans la première moitié de la traversée de la zone centrale (jusqu'à environ au cercle intermédiaire 20), l'oscillation est sensiblement libre, une impulsion de moindre énergie étant donnée seulement dans la seconde moitié de cette traversée.

**[0010]** De manière générale, on comprend par 'zone d'accumulation' une zone dans laquelle l'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur augmente pour les diverses amplitudes d'oscillation dans la plage utile du couple moteur ; et on comprend par 'zone d'impulsion' une zone dans laquelle cette énergie potentielle magnétique diminue pour les diverses amplitudes d'oscillation de la plage utile du couple moteur et où une force magnétique de poussée est exercée sur l'organe de couplage du résonateur selon son degré de liberté. Par force de poussée, on comprend une force dans le sens du mouvement de l'organe de couplage oscillant. Ainsi, bien qu'une telle force de poussée puisse déjà exister dans une zone d'accumulation, on parlera dans la présente description de zones d'impulsion en dehors des zones d'accumulation.

**[0011]** Pour comprendre les courbes de niveaux 22 représentées aux Figures 2 et 3, il faut considérer un aspect important de la réalisation de l'oscillateur 2 pour qu'il soit fonctionnel. En particulier dans le domaine horloger, le couple moteur fourni par un barillet varie de manière importante en fonction du niveau de tension du ressort de barillet. Pour assurer une marche du mouvement horloger sur une période suffisamment grande, on a en général besoin que ce mouvement puisse être entraîné par un couple variant entre un couple maximal et environ la moitié de ce couple maximal. De plus, il faut évidemment assurer un bon fonctionnement au couple maximal. En pratique, pour assurer un tel fonctionnement et empêcher notamment que l'oscillateur décroche à relativement grande amplitude d'oscillation, il est nécessaire que les zones de freinage 26 et 30 s'étendent sur une certaine distance angulaire et que le freinage soit ainsi progressif. Une telle situation est obtenue en partie et de manière non optimale avec des oscillateurs de l'art antérieur par un effet de moyennage dû essentiellement à l'étendue angulaire de l'organe ou élément de couplage magnétique du résonateur en projection dans le plan général de la roue et à un entrefer assez grand entre cet organe et la structure magnétique des pistes annulaires de la roue (plus généralement du rotor ou mobile rotatif).

**[0012]** Le moyennage est obtenu par une intégration sur la totalité du champ magnétique couplé, lequel s'étend sur une région de la structure magnétique d'autant plus grande que l'aimant présente une grande surface d'extrémité parallèle audit plan général et que l'entrefer est grand. Ainsi, le flanc vertical d'une dent magnétique adjacente à une ouverture dans la structure magnétique considérée donne, dans l'espace de l'énergie potentielle magnétique, des courbes de niveaux 22 qui s'étendent sur une distance angulaire d'autant plus gran-

de que l'effet de moyennage est important. Dans le cas analysé ici, on a pris un aimant présentant une section circulaire ou carrée parallèlement au plan général de la roue. La dimension de cette section et l'entrefer choisis correspondent déjà à un agencement plus favorable que ceux des dispositifs de l'art antérieur cités précédemment pour le fonctionnement de l'oscillateur, car on assure des plages de freinage 26 et 30 suffisamment étendues tout en limitant déjà un peu la distance radiale de la zone centrale d'impulsions.

**[0013]** Lorsqu'on analyse le comportement de l'oscillateur considéré précédemment en fonction du couple moteur appliqué à la roue, on observe au moins deux inconvénients d'un tel dispositif régulateur : La plage de valeurs pour le couple moteur est relativement réduite et le dispositif régulateur présente un anisochronisme important. Ceci est montré sur le graphe de la Figure 4 où est représentée l'erreur relative de vitesse angulaire ou de pulsation  $(\omega - \omega_0) / \omega_0$  de la roue 4 ( $\omega_0$  étant la vitesse angulaire nominale) relativement au couple relatif  $M_{rot} / M_{max}$  appliqué à cette roue (pour un facteur de qualité du résonateur d'environ 200). La pulsation  $\omega_0$  est relié mathématiquement à la fréquence naturelle  $F_{res}$  de l'oscillation utile du résonateur par la formule  $\omega_0 = 2\pi F_{res} / N_p$ ,  $N_p$  étant le nombre de périodes angulaires des première et deuxième pistes annulaires. Les divers points 36 définissent une courbe 38 correspondant à un fort anisochronisme pour une application horlogère. En effet, une erreur relative de  $5 \cdot 10^{-4}$  correspond à une erreur de marche journalière très importante, à savoir d'environ quarante secondes (40 s). Ensuite, on observe une instabilité du comportement de l'oscillateur lorsque le couple relatif approche les 80% (0.8), comme en témoigne le point 40. Ainsi, pour avoir une précision du mouvement horloger inférieure à dix secondes par jour, il faudrait que le couple relatif demeure dans une plage étroite comprise entre 0.6 (60%) et 0.8 (80%). Pratiquement, le mouvement horloger doit être conçu pour que le maximum de couple acceptable corresponde au couple maximum appliqué à la roue 4 de sorte que le couple devra rester finalement au-dessus de 80% dans ce cas pratique. Et dès qu'on s'approche de cette limite inférieure l'anisochronisme augmente rapidement pour devenir énorme lorsqu'on passe en-dessous de cette limite inférieure. On comprend donc une raison importante du non succès de tels échappements magnétiques alors qu'ils sont connus depuis des dizaines d'années.

#### Résumé de l'invention

**[0014]** Dans le cadre de la présente invention, les inventeurs, après avoir constaté les problèmes d'anisochronisme et de plage de fonctionnement limitée dans les dispositifs régulateur connus mentionnés précédemment, se sont donnés pour objectif d'en comprendre les raisons et d'apporter une solution à ces problèmes.

**[0015]** Les réflexions quant aux problèmes de l'art antérieur et diverses recherches effectuées ont permis de

cerner des causes à ces problèmes. Le problème d'anisochronisme et également celui de la plage utile du couple moteur limitée sont dus en particulier au fait que les impulsions données à l'aimant du résonateur s'étendent sur une distance radiale relativement importante hors d'une zone localisée autour du cercle de position zéro. Ceci réduit les zones annulaires de pure accumulation et de plus perturbe la marche de l'oscillateur. En effet, seules des impulsions localisées à l'endroit de ce cercle de position zéro ne perturbent quasi pas l'oscillateur. Les inventeurs ont ainsi constaté qu'une force de poussée sur un chemin relativement étendu hors de ladite zone localisée perturbe le résonateur ; ce qui varie sa fréquence en fonction du couple fourni et est donc source d'anisochronisme.

**[0016]** Pour résoudre le problème de la zone centrale d'impulsions de grande largeur tout en permettant un fonctionnement efficace et stable de l'oscillateur sur une plage de couple relativement importante, la présente invention propose un dispositif régulateur de la vitesse angulaire relative entre une structure magnétique et un résonateur, couplés magnétiquement de manière à définir ensemble un oscillateur formant ce dispositif régulateur, tel que défini à la revendication 1 pour un premier mode de réalisation principal et à la revendication 2 pour un second mode de réalisation principal.

**[0017]** De manière générale, le dispositif régulateur selon l'invention présente les caractéristiques suivantes : La structure magnétique comprend au moins une piste magnétique annulaire centrée sur un axe de rotation de cette structure magnétique ou du résonateur, lesquels sont agencés pour subir une rotation l'un relativement à l'autre autour de l'axe de rotation lorsqu'un couple moteur est appliqué à la structure magnétique ou au résonateur. La piste magnétique annulaire est formée au moins partiellement d'un premier matériau magnétique dont au moins un premier paramètre physique est corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur mais différent de celle-ci. Ce premier matériau magnétique est agencé le long de la piste magnétique annulaire de sorte que cette énergie potentielle magnétique varie angulairement de manière périodique le long de cette piste magnétique annulaire et qu'il définisse ainsi une période angulaire ( $P_{\theta}$ ) de cette piste magnétique annulaire. Le résonateur comprend au moins un élément de couplage magnétique (aussi nommé organe de couplage magnétique) à la structure magnétique. Cet élément de couplage magnétique est formé d'un deuxième matériau magnétique, dont au moins un deuxième paramètre physique est corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur, et est couplé magnétiquement à la piste magnétique annulaire de manière qu'une oscillation selon un degré de liberté d'un mode de résonance du résonateur est entretenue dans une plage utile du couple moteur appliqué à la structure magnétique ou au résonateur et qu'un nombre entier déterminé de périodes, en particulier et de préférence une période, de cette oscillation intervienne lors de ladite rotation relative dans cha-

que période angulaire de la piste magnétique annulaire ; la fréquence de l'oscillation déterminant ainsi la vitesse angulaire relative. Dans la plage utile du couple moteur, la piste annulaire et l'élément de couplage magnétique définissent dans chaque période angulaire, en fonction de leur position relative définie par leur position angulaire relative et la position de l'élément de couplage selon son degré de liberté, une zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur.

**[0018]** Dans le premier mode de réalisation principal, le résonateur est agencé relativement à la structure magnétique de manière qu'une partie d'extrémité active de l'élément de couplage, située du côté de la structure magnétique, est au moins en majeure partie superposée, en projection orthogonale à une surface géométrique générale définie par la piste magnétique annulaire, à cette piste magnétique annulaire durant sensiblement une première alternance dans chaque période d'oscillation de cet élément de couplage et de manière que le trajet de l'élément de couplage magnétique lors de cette première alternance est sensiblement parallèle à ladite surface géométrique générale. Ensuite, la piste magnétique annulaire présente une dimension selon le degré de liberté de l'élément de couplage du résonateur qui est supérieure à la dimension de la partie d'extrémité active de l'élément de couplage selon ce degré de liberté. Pour la comparaison des deux dimensions, on les mesure en projection orthogonale à la surface géométrique générale définie par la piste magnétique annulaire le long d'un axe du degré de liberté passant par le centre de masse de la partie d'extrémité active de l'élément de couplage. Cet axe peut être rectiligne ou curviligne. Le premier matériau magnétique est agencé dans chaque période angulaire de manière que, au moins dans une zone de ce premier matériau magnétique couplée magnétiquement au moins partiellement à la partie d'extrémité active de l'élément de couplage magnétique pour les positions relatives de cet élément de couplage magnétique par rapport à la piste magnétique annulaire correspondant à au moins une partie de la zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans cette période angulaire, le premier paramètre physique augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive. On notera que la sélection entre une augmentation ou une diminution du paramètre physique est effectuée pour que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur soit angulairement croissante lors de ladite rotation relative; ce qui découle implicitement du fait qu'il est question de zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique.

**[0019]** Selon une variante, la variation angulaire susmentionnée du premier paramètre physique est prévue dans une zone du premier matériau magnétique correspondant au moins à la majeure partie de la zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans chaque période angulaire. Selon une variante préférée, la variation angulaire du premier paramètre physique est prévue dans une zone du premier matériau magnétique corres-

pondant substantiellement à la totalité de la zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans chaque période angulaire. Dans une variante particulière, le premier paramètre physique définit angulairement une fonction monotone croissante, respectivement monotone décroissante.

**[0020]** Dans le deuxième mode de réalisation principal, la piste magnétique annulaire présente une dimension selon le degré de liberté de l'élément de couplage du résonateur qui est inférieure à la dimension, selon ce degré de liberté, d'une partie d'extrémité active de l'élément de couplage magnétique située du côté de la structure magnétique. Pour la comparaison des deux dimensions, on les mesure en projection orthogonale à la surface géométrique générale définie par la partie d'extrémité active le long d'un axe du degré de liberté passant par le centre de masse de la partie d'extrémité active de l'élément de couplage. Cet axe peut être rectiligne ou curviligne. La surface géométrique générale comprend cet axe du degré de liberté, la partie d'extrémité active s'étendant dans cette surface générale. Ensuite, le résonateur est agencé relativement à la structure magnétique de manière que la partie d'extrémité active est traversée, en projection orthogonale à une surface géométrique générale définie par cette partie d'extrémité active, par un cercle géométrique situé au milieu de la piste magnétique annulaire durant sensiblement une première alternance dans chaque période d'oscillation de l'élément de couplage. Le deuxième matériau magnétique de l'élément de couplage est agencé de manière que, au moins dans une zone de ce deuxième matériau magnétique couplée magnétiquement au moins partiellement à la piste magnétique annulaire pour les positions relatives de cette piste magnétique annulaire par rapport à l'élément de couplage correspondant à au moins une partie de la zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans chaque période angulaire de la piste magnétique annulaire, le deuxième paramètre physique augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive. La sélection entre une augmentation ou une diminution du paramètre physique est effectuée pour que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur soit angulairement croissante dans les zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique lors de ladite rotation relative; ce qui découle du terme 'accumulation' utilisé.

**[0021]** Selon une variante, la variation angulaire susmentionnée du deuxième paramètre physique est prévue dans une zone du deuxième matériau magnétique couplée magnétiquement à la piste magnétique pour la majeure partie de chaque zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique. Selon une variante préférée, la variation angulaire du deuxième paramètre physique est prévue dans une zone du deuxième matériau magnétique couplée magnétiquement à la piste magnétique pour substantiellement la totalité de chaque zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique. En particulier, le deuxième paramètre physique définit angulairement une

fonction monotone croissante, respectivement monotone décroissante.

**[0022]** On comprend par 'matériau magnétique' un matériau ayant une propriété magnétique générant un champ magnétique externe (aimant) ou un bon conducteur du flux magnétique qui est attiré par un aimant (en particulier un matériau ferromagnétique).

**[0023]** Selon une variante de réalisation préférée des deux modes de réalisation principaux, l'énergie potentielle magnétique dans chaque zone d'accumulation ne présente sensiblement aucune variation selon le degré de liberté du mode de résonance utile du résonateur. En particulier, la variation du paramètre physique considéré est seulement angulaire, c'est-à-dire que ce paramètre physique est sensiblement constant selon une direction radiale, dans chaque zone dudit premier matériau magnétique correspondant à une zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur. On a ainsi sensiblement une pure accumulation d'énergie potentielle magnétique dans ces zones utiles d'accumulation.

**[0024]** Selon une variante particulière de l'invention, l'augmentation ou la diminution progressive du premier paramètre physique du premier matériau magnétique, respectivement deuxième paramètre physique du deuxième matériau magnétique s'étend sur une distance angulaire supérieure à vingt pourcents (20%) de la période angulaire de la piste magnétique annulaire. Selon une autre variante particulière, le rapport entre la distance angulaire de la variation du premier paramètre physique, respectivement deuxième paramètre physique et la période angulaire est supérieur ou sensiblement égal à quarante pourcents (40%).

**[0025]** Selon une variante préférée de l'invention, l'élément de couplage magnétique et la piste magnétique annulaire sont agencés de manière que l'élément de couplage magnétique reçoit lors de la rotation relative susmentionnée entre le résonateur et la structure magnétique des impulsions selon son degré de liberté autour d'une position de repos de cet élément de couplage magnétique. Ces impulsions définissent, en fonction de la position relative de l'élément de couplage magnétique et de la piste magnétique annulaire et pour la plage utile du couple moteur fourni au dispositif régulateur, des zones d'impulsion qui sont sensiblement localisées dans une zone centrale d'impulsions adjacente aux zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique. Dans une variante particulière, le rapport entre la dimension radiale des zones d'impulsion et la dimension radiale des zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique est inférieur à cinquante pourcents (50%). Dans une variante préférée, ce rapport est inférieur ou sensiblement égal à trente pourcents (30%).

**[0026]** Dans une autre variante préférée, la structure magnétique est agencée de manière que le gradient angulaire moyen de l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur dans les zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique est inférieur au gradient moyen de

cette énergie potentielle magnétique dans les zones d'impulsion selon le degré de liberté du résonateur et dans une même unité. Ainsi, la variation du premier paramètre physique du premier matériau magnétique, respectivement du deuxième paramètre physique du deuxième matériau magnétique est plus forte dans les zones d'impulsion selon le degré de liberté du résonateur, notamment radialement, que angulairement dans les zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique. Cette variation du paramètre physique dans les zones d'impulsion peut être abrupte, notamment être engendrée par une discontinuité radiale du premier matériau magnétique, respectivement du deuxième matériau magnétique le long d'une projection axiale du cercle de position zéro dans le plan général de la structure magnétique, respectivement le long du cercle de position zéro dans le plan général de l'élément de couplage.

**[0027]** D'autres caractéristiques particulières de l'invention font l'objet de revendications dépendantes et seront exposées ci-après dans la description détaillée de l'invention.

#### Brève description des dessins

**[0028]** L'invention sera décrite ci-après à l'aide de dessins annexés, donnés à titre d'exemples nullement limitatifs, dans lesquels :

- La Figure 1, déjà décrite, est une vue schématique de dessus d'un dispositif régulateur correspondant à l'art antérieur;
- Les Figures 2 et 3, déjà décrites, représentent l'énergie potentielle magnétique du dispositif régulateur de la Figure 1 et les tracés correspondant à deux oscillations du résonateur;
- La Figure 4, déjà décrite, montre l'erreur relative de pulsation en fonction du couple relatif appliqué à l'oscillateur de la Figure 1 ;
- La Figure 5 est une vue schématique de dessus d'un premier mode de réalisation du dispositif régulateur selon l'invention;
- Les Figures 6A et 6B sont des coupes angulaires respectivement le long des deux pistes annulaires définies par la structure magnétique;
- Les Figures 7 et 8 représentent l'énergie potentielle magnétique du dispositif régulateur de la Figure 5 et les tracés correspondant à deux oscillations du résonateur;
- Les Figures 9A et 9B montrent les profils de l'énergie potentielle magnétique respectivement le long du milieu des deux pistes annulaires définies par la structure magnétique, et la Figure 9C donne le profil transversal de cette énergie potentielle magnétique;
- La Figure 10 montre l'erreur relative de pulsation en fonction du couple relatif appliqué à l'oscillateur de la Figure 5;
- La Figure 11 est une vue partielle de dessus et schématique d'un deuxième mode de réalisation d'un dis-

- positif régulateur selon l'invention;
- La Figure 12 donne la différence d'énergie potentielle magnétique pour l'ensemble des oscillations lors du passage de l'élément de couplage magnétique au travers d'une zone d'impulsion définie par la structure magnétique du dispositif régulateur de la Figure 11 ;
- Les Figures 13, 14 et 15 représentent schématiquement trois variantes de profil du matériau magnétique le long d'une piste annulaire de la structure magnétique d'un dispositif régulateur selon l'invention;
- Les Figures 16 et 17 sont respectivement une vue schématique de dessus et une coupe transversale partielle d'un troisième mode de réalisation de l'invention;
- Les Figures 18 et 19 montrent en coupe deux variantes de réalisation du dispositif régulateur selon l'invention;
- Les Figures 20 et 21 montrent en coupe deux autres variantes de réalisation du dispositif régulateur selon l'invention dans lesquelles la structure magnétique présente deux plateaux superposés entre lesquels passe l'élément de couplage magnétique du résonateur;
- La Figure 22 est une vue schématique de dessus d'un quatrième mode de réalisation d'un dispositif régulateur selon l'invention;
- La Figure 23 est une vue schématique de dessus d'une variante du quatrième mode de réalisation d'un dispositif régulateur selon l'invention;
- Les Figures 24 et 25 montrent schématiquement des cinquième et sixième modes de réalisation de l'invention;
- La Figure 26 est une vue schématique de dessus d'un septième mode de réalisation comprenant deux résonateurs indépendants;
- La Figure 27 est une vue schématique de dessus d'un huitième mode de réalisation où le résonateur est entraîné en rotation;
- Les Figures 28 et 29 sont respectivement une vue schématique de dessus et une coupe transversale d'un neuvième mode de réalisation de l'invention; et
- La Figure 30 est une vue schématique de dessus d'un dixième mode de réalisation d'un dispositif régulateur selon l'invention incorporé dans un mouvement horloger.
- La Figure 31 est une première variante du dispositif régulateur de la Figure 22;
- La Figure 32 est une deuxième variante du dispositif régulateur de la Figure 22;
- La Figure 33 est une variante du dispositif régulateur de la Figure 23;
- La Figure 34 est une vue schématique d'un onzième mode de réalisation dans lequel l'élément de couplage du résonateur est étendu radialement alors que la piste magnétique annulaire présente une faible largeur;
- La Figure 35 est une vue schématique d'un douzième

- me mode de réalisation de l'invention;
- La Figure 36 est une coupe schématique de la Figure 35 selon la ligne définie par le cercle 312;
- La Figure 37 est une variante de réalisation de la Figure 36;
- La Figure 38 est une vue schématique d'un treizième mode de réalisation de l'invention, la Figure 38A étant une coupe transversale selon la ligne X-X;
- La Figure 39 est une vue schématique d'un quatorzième mode de réalisation de l'invention; et
- La Figure 40 est une vue schématique d'un quinzième mode de réalisation de l'invention.

#### Description détaillée de l'invention

**[0029]** A l'aide des Figures 5 à 10, on décrira ci-après un premier mode de réalisation d'un dispositif régulateur de la vitesse angulaire relative  $\omega$  entre une structure magnétique 44 et un résonateur 46, couplés magnétiquement de manière à définir ensemble un oscillateur 42. Ce dispositif régulateur définit avantageusement un échappement magnétique. La structure magnétique comprend une première piste magnétique annulaire 52 et une deuxième piste magnétique annulaire 53 centrées sur un axe de rotation 51 de cette structure magnétique et formées d'un matériau magnétique 45 dont au moins un paramètre physique est corrélé à l'énergie potentielle magnétique  $EP_m$  de l'oscillateur 42, ce paramètre physique étant autre que cette énergie potentielle. L'axe de rotation 51 est perpendiculaire au plan général de la structure magnétique. Le matériau magnétique est agencé le long de chaque piste magnétique annulaire de sorte que ce paramètre physique varie angulairement de manière périodique et définisse ainsi une période angulaire  $P_\theta$  de cette piste magnétique. On notera que, dans un autre mode de réalisation, la deuxième piste magnétique annulaire peut présenter une variation périodique d'un autre paramètre physique de ce matériau magnétique ou, dans une variante particulière, d'un autre matériau magnétique également corrélé à l'énergie potentielle magnétique  $EP_m$  de l'oscillateur. On notera que le paramètre physique en question est un paramètre propre à la structure magnétique qui existe indépendamment de la position angulaire relative  $\theta$  entre la structure magnétique et l'organe de couplage du résonateur. Cependant, ce paramètre physique peut être un paramètre géométrique qui est en relation avec le positionnement spatial de l'organe de couplage. En particulier, pour un rayon donné à l'intérieur d'une piste magnétique annulaire, ce paramètre physique est une distance entre la surface du matériau magnétique et un cercle défini par le centre de masse de la partie d'extrémité active de cet organe de couplage dans une position correspondante de son degré de liberté, dans un référentiel associé à la structure magnétique, lors d'une rotation relative entre cette dernière et l'organe de couplage. De manière générale, dans le cas considéré ici, le paramètre physique est, dans un référentiel lié à la structure magnétique, une distance

entre la piste magnétique annulaire et une surface de révolution ayant l'axe de rotation de la structure magnétique comme axe de révolution et le degré de liberté de l'élément de couplage comme génératrice de cette surface de révolution. Cette distance correspond sensiblement, à une constante près, à un entrefer entre l'élément de couplage magnétique et la piste magnétique annulaire considérée.

**[0030]** Le résonateur comprend un organe ou élément de couplage magnétique à la structure magnétique 44. Cet organe ou élément de couplage est formé ici par un aimant 50 qui est cylindrique ou ayant une forme de parallélépipède rectangle. En outre, ce résonateur est représenté symboliquement par un ressort 47, correspondant à sa capacité de déformation élastique définie par une constante élastique, et par une inertie 48 définie par sa masse et sa structure. L'aimant 50 est positionné relativement à la structure magnétique de manière que dans sa position de repos, correspondant ici à une énergie de déformation élastique minimale du résonateur, le centre de masse de la partie d'extrémité active de l'élément de couplage en regard de la structure magnétique est sensiblement situé sur un cercle de position zéro 20 pour toute position angulaire  $\theta$  de la structure magnétique relativement à l'aimant. Par partie d'extrémité active, on comprend la partie d'extrémité de l'élément de couplage, située du côté de la structure magnétique considérée, au travers de laquelle passe l'essentiel du flux magnétique de couplage entre cet élément de couplage et la structure magnétique. Le cercle de position zéro est centré sur l'axe de rotation 51 et a un rayon correspondant sensiblement au rayon intérieur de la première piste annulaire et au rayon extérieur de la deuxième piste annulaire, ces rayons intérieur et extérieur étant ici confondus. En d'autres termes, le cercle de position zéro 20 est situé sensiblement sur le cercle géométrique défini par l'interface entre ces deux pistes magnétiques coaxiales et contiguës, c'est-à-dire que ce cercle géométrique correspond à une projection du cercle de position zéro sur le plan général de la structure magnétique. Dans une variante, les deux pistes magnétiques sont distantes et séparées par une zone intermédiaire formée entièrement par un même milieu. Dans ce dernier cas, la projection orthogonale du cercle de position zéro est située entre ces deux pistes magnétiques sensiblement au milieu de la zone intermédiaire. Une telle zone intermédiaire, que l'on conservera de petite largeur pour diverses raisons, peut être utile pour assurer un démarrage aisé de l'oscillateur. Une première raison est relative à la faible dimension prévue pour l'élément de couplage selon son degré de liberté et radialement relativement à l'axe de rotation, étant donné qu'il faut éviter que l'oscillateur tourne 'à vide' avec l'élément de couplage restant sensiblement sur le cercle de position zéro. Une autre raison apparaîtra par la suite : Il s'agit d'obtenir des impulsions localisées qui sont proches et de préférence centrées sur le cercle de position zéro.

**[0031]** Aux Figures 6A et 6B sont représentées deux

coupes selon deux cercles passant respectivement par le milieu de la première piste magnétique annulaire et le milieu de la deuxième piste magnétique annulaire. Ces première et deuxième pistes magnétiques annulaires 52 et 53 coaxiales présentent entre elles un décalage angulaire égal à la moitié de la période angulaire susmentionnée, soit un déphasage de  $\pi$  ( $180^\circ$ ). Dans la variante représentée, le paramètre physique considéré en premier lieu est en relation avec un entrefer entre l'aimant 50 et le matériau magnétique 45, formé d'un matériau à haute perméabilité magnétique et en particulier d'un matériau ferromagnétique. On notera que dans une autre variante, le matériau magnétique est un matériau aimanté agencé en attraction relativement à l'aimant 50. Un autre paramètre physique varie également de manière concomitante, à savoir l'épaisseur du matériau à haute perméabilité magnétique ou, dans l'autre variante mentionnée, du matériau aimanté. Plus particulièrement, la piste annulaire 52 comprend en alternance des secteurs annulaires 54 dans lesquels le matériau magnétique a une épaisseur maximale et des secteurs annulaires 56 dans lesquels l'épaisseur du matériau magnétique diminue progressivement dans le sens contraire au sens de rotation de la structure magnétique 44 relativement à l'aimant 50. Dans la variante représentée ici, la distance angulaire de chaque secteur 56 est sensiblement égale à la distance angulaire de chaque secteur 54, laquelle vaut sensiblement une demi-période angulaire  $P_\theta/2$ . Dans une autre variante, les aimants des pistes magnétiques et l'aimant du résonateur formant ledit élément de couplage sont agencés en répulsion. Dans cette variante, pour obtenir un effet équivalent à celui décrit ci-avant, l'épaisseur du matériau magnétique augmente progressivement dans chaque secteur 56 dans le sens contraire au sens de rotation de la structure magnétique relativement à l'aimant 50.

**[0032]** Dans les secteurs annulaires 56, l'épaisseur diminue environ de l'épaisseur maximale à une épaisseur quasi nulle sur une distance  $V_p$ ; mais d'autres variantes sont possibles comme ceci sera exposé par la suite. La variation d'épaisseur engendre une variation de l'entrefer moyen pour le champ magnétique couplé entre l'aimant 50 et le matériau magnétique 45, formé d'un matériau à haute perméabilité magnétique ou d'un matériau aimanté agencé en attraction relativement à l'aimant 50. Cet entrefer moyen augmente progressivement, dans le sens contraire au sens de rotation de la structure magnétique 44 relativement à l'aimant 50, sur une certaine plage angulaire correspondant sensiblement à la distance angulaire de chaque secteur annulaire 56. Pour éviter un problème de clarté lié au moyennage provenant de l'étendue non nulle de l'élément de couplage 50 et de l'entrefer, ce moyennage engendrant aussi une variation de l'entrefer moyen, on parlera dans le cadre de la présente invention d'une variation de l'entrefer, le long d'un axe perpendiculaire au plan général de la piste magnétique en question, entre le centre de masse de la partie d'extrémité active de l'organe de couplage et la piste ma-

gnétique. Sur les Figures 6A et 6B, on peut considérer la surface inférieure de l'aimant 50 en regard des pistes magnétiques comme étant la partie d'extrémité active et le centre géométrique de cette surface inférieure comme étant le centre de masse, car ce dernier et le centre de masse sont ici axialement alignés. La piste annulaire 53 comprend, de manière semblable à la piste annulaire 52, en alternance des secteurs annulaires 55 dans lesquels le matériau magnétique 45 a une épaisseur maximale et des secteurs annulaires 57 dans lesquels l'épaisseur du matériau magnétique diminue progressivement. Cette piste annulaire 53 est sensiblement équivalente à la piste annulaire 52, mais elles sont décalées d'une demi-période angulaire  $P_\theta/2$  de manière à définir un chemin magnétique sinueux pour l'aimant 50, comme ceci a été exposé précédemment. Bien que le paramètre physique considéré ici soit en relation avec l'entrefer entre l'aimant et chaque piste magnétique annulaire, c'est-à-dire avec la distance entre la surface supérieure du matériau magnétique et la surface inférieure de l'aimant 50, ce paramètre physique correspond à un paramètre propre à la structure magnétique. En effet, le paramètre physique considéré est une distance à un plan 59 qui est parallèle au plan général de la structure magnétique. De plus, ce plan général est aussi parallèle à un trajet d'oscillation de l'aimant.

**[0033]** On remarquera que selon d'autres variantes non représentées, la structure magnétique peut être agencée de manière à ne varier que l'un ou l'autre des deux paramètres physiques mentionnés, à savoir l'entrefer entre l'élément de couplage magnétique du résonateur et la structure magnétique ou l'épaisseur de cette structure magnétique. On notera que dans le cas où seule l'épaisseur est variée, par exemple en effectuant une symétrie planaire de la structure magnétique 44 (ce qui correspond à la retourner sans varier la position de l'aimant 50), la variation de l'énergie potentielle magnétique corrélée seulement à l'épaisseur trouve une application particulière avec une matière aimantée, car l'intensité du flux d'aimant peut varier aisément en fonction de l'épaisseur de cette matière aimantée. Comme l'élément de couplage a une certaine étendue, on définit cette épaisseur comme l'épaisseur de la piste magnétique en question le long d'un axe perpendiculaire au plan général de cette piste magnétique et passant par le centre de masse de la partie d'extrémité active de l'organe de couplage. Dans le cas d'un matériau à haute perméabilité magnétique, la seule variation de l'épaisseur est plus limitée. En effet, il faut alors que la plage d'épaisseurs considérée corresponde à une situation où il y a saturation pour le flux d'aimant au moins dans une partie de la section variable du matériau magnétique traversé par ce flux d'aimant. Dans le cas contraire, la variation d'épaisseur n'aura pas d'effet significatif sur l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur.

**[0034]** L'aimant 50 est couplé aux première et deuxième pistes annulaires de manière qu'une oscillation 71, respectivement 72 (Figure 8) selon un degré de liberté

58 d'un mode de résonance du résonateur 46 est entretenue dans une plage utile d'un couple moteur appliqué à la structure magnétique. La fréquence de l'oscillation détermine la vitesse angulaire relative  $\omega$ . L'oscillation 71, respectivement 72 a, en projection dans un plan général de la structure magnétique (parallèle au plan des Figures 5, 7 et 8), des premières alternances 71 a, respectivement 72a, dans une première zone superposée à la première piste annulaire 52 et des deuxièmes alternances 71 b, respectivement 72b dans une deuxième zone superposée à la deuxième piste annulaire 53. De manière générale, le degré de liberté de l'élément de couplage du résonateur est sélectionné de manière que le trajet de cet élément de couplage magnétique lors des premières alternances, respectivement deuxièmes alternances de son oscillation lors du couplage magnétique à la structure magnétique est sensiblement parallèle à une surface géométrique générale de la première piste magnétique annulaire, respectivement deuxième piste magnétique annulaire. Dans un premier mode de réalisation principal, correspondant notamment à celui de la figure 5 et à celui de la figure 11 décrit par la suite, la surface géométrique générale définie par la ou les piste(s) magnétique(s) annulaire(s), ou généralement par la structure magnétique, est un plan général perpendiculaire à l'axe de rotation de la structure magnétique. Dans les modes de réalisation de ces figures 5 et 11, le degré de liberté du résonateur est entièrement dans un plan parallèle à ce plan général. Ainsi, l'entier du trajet effectué par l'élément de couplage magnétique lors de son oscillation est ici parallèle au plan général de la structure magnétique. Dans une variante d'un deuxième mode de réalisation principal, correspondant à celle des figures 28 et 29 décrit par la suite, les deux pistes magnétiques annulaires forment la paroi latérale d'un disque et la surface géométrique générale qu'elles définissent est une surface cylindrique dont l'axe central est l'axe de rotation de la structure magnétique. On notera que d'autres agencements sont envisageables, par exemple des pistes magnétiques dont la surface géométrique générale est conique. Dans des variantes, le trajet de l'élément oscillant est sensiblement dans un plan parallèle au plan général défini par la structure magnétique, ce trajet pouvant s'en écarter quelque peu notamment aux points d'extrémité de l'oscillation et ceci d'autant plus que l'amplitude est grande. Une telle situation a lieu par exemple lorsque l'élément de couplage du résonateur oscille selon un trajet sensiblement circulaire avec un axe de rotation parallèle au plan général de la structure magnétique. Dans un tel cas, il est prévu de préférence que la direction définie par le degré de liberté de l'élément de couplage dans sa position de repos est sensiblement parallèle à un plan tangent à ladite surface géométrique générale en un point correspondant à la projection orthogonale du centre de masse de la partie d'extrémité active de l'élément de couplage dans sa position de repos.

**[0035]** Aux Figures 7 et 8 est représentée schématiquement

sur une partie de la structure magnétique 44 l'énergie potentielle magnétique  $EP_m$  de l'oscillateur 42 qui varie en fonction de la structure magnétique, à savoir des deux pistes annulaires 52 et 53. On décrit ici une variante où la force magnétique est une force d'attraction, en particulier avec une structure magnétique formée d'un matériau ferromagnétique. Les courbes de niveaux 60 correspondent à divers niveaux de l'énergie potentielle magnétique, comme expliqué en relation avec les Figures 2 et 3.

**[0036]** Les Figures 9A et 9B représentent les profils de l'énergie potentielle magnétique respectivement le long du milieu de chacune des deux pistes magnétiques annulaires 52 et 53; alors que la Figure 9C donne le profil radial de cette énergie potentielle magnétique selon l'axe X (Figure 7) correspondant au degré de liberté du résonateur 46. On notera que l'on obtient une situation semblable à celle décrite aux Figures 7, 8 et 9A-9C avec des pistes magnétiques formées par des aimants agencés en répulsion relativement à l'aimant formant l'élément de couplage du résonateur. Dans une telle variante, la variation de l'entrefer et/ou de l'épaisseur du matériau aimanté est inversée relativement aux variantes décrites précédemment, notamment celle des Figures 6A et 6B. Ainsi, la piste annulaire comprend en alternance des secteurs annulaires dans lesquels le matériau aimanté a une épaisseur minimale (nulle y comprise) et des secteurs annulaires dans lesquels l'épaisseur du matériau aimanté augmente progressivement dans le sens contraire au sens de rotation de la structure magnétique relativement à l'aimant 50, ces derniers secteurs annulaires engendrant les zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur.

**[0037]** Dans la plage utile du couple moteur appliqué au rotor supportant la structure magnétique 44, chaque piste magnétique annulaire 52, 53 comprend, dans chaque période angulaire  $P_\theta$ , une zone utile d'accumulation d'énergie potentielle magnétique 63, respectivement 65 dans l'oscillateur. Ces zones 63 et 65 sont respectivement situées sensiblement dans une première zone annulaire d'accumulation d'énergie  $Z1_{ac}$  et une deuxième zone annulaire d'accumulation d'énergie  $Z2_{ac}$ . Par zone utile d'accumulation, on comprend généralement une zone balayée par le champ magnétique de l'aimant 50 qui oscille avec diverses amplitudes dans toute la plage d'amplitudes prévue (correspondant à la plage utile du couple moteur) et dans laquelle l'oscillateur essentiellement accumule une énergie potentielle magnétique  $EP_m$  à transmettre ensuite au résonateur. Cette zone est ainsi délimitée par l'amplitude minimale d'oscillation de l'élément de couplage du résonateur, correspondant au couple utile minimum, et l'amplitude maximale d'oscillation de celui-ci correspondant au couple utile maximum. Selon une variante de réalisation préférée, montrée à la Figure 7, l'énergie potentielle magnétique dans chaque zone utile d'accumulation ne présente sensiblement aucune variation selon le degré de liberté du mode de résonance utile du résonateur. Ainsi, le gradient de  $EP_m$

est essentiellement angulaire dans les zones utiles d'accumulation, ce gradient angulaire correspondant à une force de freinage agissant sur la structure magnétique et engendrant globalement un couple de freinage. Les première et deuxième zones annulaires  $Z1_{ac}$  et  $Z2_{ac}$  sont donc ici des zones de pure accumulation d'énergie potentielle magnétique. On remarquera que l'énergie potentielle magnétique sur les figures est donnée ponctuellement pour une position de l'élément de couplage repéré au centre de masse de la partie d'extrémité active de cet élément de couplage (d'autres points de repère peuvent être prévus en veillant à conserver le même point de repère pour les divers paramètres considérés en relation avec l'organe de couplage). Ainsi, les zones d'accumulation et aussi les zones d'impulsion, décrites par la suite, sont définies et représentées en prenant la position du centre de masse de la partie d'extrémité active de l'élément de couplage.

**[0038]** Les première et deuxième zones annulaires  $Z1_{ac}$  et  $Z2_{ac}$  sont séparées par une zone centrale d'impulsions  $ZC_{imp}$  définie par des zones d'impulsion 68 et 69 dans lesquelles sont respectivement effectués des transferts d'énergie au résonateur en fonction du couple moteur, comme exposé précédemment en relation avec l'art antérieur. Chaque zone d'impulsion 68, 69 est définie par une zone balayée par le champ magnétique de l'aimant 50 pour diverses amplitudes d'oscillation entre l'amplitude minimale et l'amplitude maximale susmentionnées. La zone centrale d'impulsions comprend le cercle de position zéro 20 situé sensiblement au milieu de cette zone centrale d'impulsions. Le cercle de position zéro est défini comme le cercle décrit par le point de repère de l'organe de couplage dans sa position de repos (point de repère utilisé pour établir les courbes équipotentielles dans l'espace de l'énergie potentielle magnétique en fonction des coordonnées polaires du rotor / structure magnétique) en se plaçant sur la structure magnétique lors d'une rotation relative entre le résonateur et la structure magnétique. De préférence, l'organe de couplage du résonateur est agencé radialement relativement à l'axe de rotation pour que ce cercle de position zéro passe sensiblement au milieu de toutes les zones d'impulsions associées à cet élément de couplage. Le cercle Y définit l'interface entre la zone  $Z1_{ac}$  et la zone  $ZC_{imp}$ . Ce cercle Y est centré sur l'axe de rotation de la structure magnétique 44 et il a un rayon  $R_Y$ .

**[0039]** A la Figure 9C, la courbe 76 correspond à un profil radial de  $EP_m$ . Cette courbe 76 donne la largeur  $Z_0$  d'une zone d'impulsion 69, cette largeur correspondant sensiblement à la largeur d'une zone d'impulsion 68 et également à la largeur de la zone centrale d'impulsions  $ZC_{imp}$ . Sur cette Figure 9C sont aussi données les largeurs respectives  $Z_1$  et  $Z_2$  des zones utiles d'accumulation d'énergie. Ces largeurs  $Z_1$  et  $Z_2$  sont définies par l'oscillation d'amplitude maximale pour la plage de couple moteur utile fourni au dispositif régulateur. Aux Figures 9A et 9B, la courbe 74 donne le profil angulaire de  $EP_m$  environ au milieu de la zone  $Z1_{ac}$  alors que la courbe

75 donne le profil angulaire de  $EP_m$  environ au milieu de la zone  $Z2_{ac}$ . Les zones utiles d'accumulation 63 et 65 sont caractérisées par une rampe d'énergie potentielle magnétique monotone croissante, ici sensiblement linéaire, entre des zones ou plateaux d'énergie potentielle inférieure 62, respectivement 64 et des énergies potentielles supérieures définies ici par des sommets. On notera que la hauteur des sommets de la piste annulaire extérieure 52 peut être légèrement supérieure à la hauteur des sommets de la piste annulaire intérieure 53. L'énergie potentielle magnétique étant corrélée à la structure magnétique 44, les courbes 74 et 75 sont décalées angulairement d'une demi-période angulaire  $P_\theta/2$ .

**[0040]** L'énergie transmise au résonateur lors du passage au travers d'une zone d'impulsion correspond sensiblement à la différence d'énergie potentielle  $\Delta EP_m$  entre le point d'entrée  $EP_{IN}^1$ ,  $EP_{IN}^2$  de l'élément de couplage magnétique oscillant dans cette zone d'impulsion et le point de sortie  $EP_{OUT}^1$ ,  $EP_{OUT}^2$  de cet organe oscillant hors de cette zone d'impulsion. Etant donné que toutes les zones d'énergie potentielle inférieure 62 et 64 ont ici sensiblement une même valeur constante et que toutes les oscillations dans la plage utile du couple moteur passent d'une zone utile d'accumulation 63 ou 65 à une zone d'énergie potentielle inférieure, l'énergie transmise au résonateur lors du passage au travers d'une zone d'impulsion correspond sensiblement à la différence d'énergie potentielle  $\Delta EP_m$  (Figure 9C) entre le point  $X_1$  et le point  $X_2$  pour une oscillation passant par le point  $X_1$  en projection dans le plan général de la structure magnétique.

**[0041]** On notera premièrement que, dans des variantes envisageables, la rampe d'énergie potentielle magnétique croissante peut ne pas être linéaire, mais par exemple quadratique ou présenter plusieurs segments avec différentes pentes. Ensuite, les plateaux d'énergie potentielle inférieure 62, respectivement 64, peuvent présenter d'autres profils d'énergie potentielle. Ainsi, par exemple, il est prévu dans une variante particulière un profil angulaire de l'énergie potentielle magnétique définissant une alternance de rampes montantes (rampes de freinage / zones d'accumulation d'énergie potentielle) et de rampes descendantes. Ces rampes descendantes peuvent s'étendre sur une demi-période angulaire ou moins et finir alors par un petit plateau inférieure. Elles peuvent être linéaires ou présenter un autre profil. De même, il est clair que les rampes montantes peuvent s'étendre sur une distance angulaire différente d'une demi-période angulaire, notamment inférieure mais également supérieure. Il n'y a pas d'autres limitations à ce sujet dans le cadre de la présente invention que l'entretien d'un mode de résonance utile du résonateur, et donc de la présence pour ce mode de résonance de zones d'impulsion de longueur angulaire non nulle, c'est-à-dire de zones de passage pour l'organe de couplage oscillant, à proximité du cercle de position zéro, entre une zone utile d'accumulation d'un côté de ce cercle et une zone de réception de l'autre côté de ce cercle, ces deux zones

étant configurées de manière que la différence d'énergie potentielle  $\Delta EP_m$  soit positive pour l'organe de couplage oscillant dans la plage de couple utile entre chaque zone utile d'accumulation et la zone de réception correspondante.

**[0042]** Le matériau magnétique 45 de la structure magnétique 44, dans chaque période angulaire, est donc agencé de manière que, au moins dans une zone de ce matériau magnétique correspondant à la zone utile d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans cette période angulaire, le paramètre physique considéré de ce matériau magnétique augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive de sorte que l'énergie potentielle magnétique  $EP_m$  de l'oscillateur, dans chaque zone utile d'accumulation, soit angulairement croissante lors d'une rotation de la structure magnétique relativement à l'élément de couplage magnétique. Ensuite, pour le mode de réalisation considéré ici et pour n'importe quel couple moteur de la plage utile du couple moteur, l'élément de couplage magnétique passe, dans chaque demi-période de l'oscillation du résonateur, d'une zone utile d'accumulation de la première piste annulaire, respectivement de la deuxième piste annulaire à une zone d'énergie potentielle inférieure ou minimale en traversant une des zones d'impulsion. La structure magnétique est ainsi agencée de manière que la différence d'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur entre l'entrée de l'élément de couplage dans une zone d'impulsion et la sortie de cet élément de couplage de cette zone d'impulsion soit positive pour n'importe quel couple moteur de la plage utile.

**[0043]** En observant les différences entre la Figure 8 et la Figure 3 (oscillateur correspondant à une réalisation de l'art antérieur optimisée avec un élément de couplage dont la partie d'extrémité est ronde ou carrée), on constate que, à la Figure 3, le gradient angulaire de l'énergie potentielle magnétique dans les zones d'accumulation d'énergie 26, 30 est approximativement semblable au gradient radial dans la zone centrale d'impulsions  $ZC_{imp}^*$ . Par contre, à la Figure 8, le gradient angulaire de l'énergie potentielle magnétique dans les zones d'accumulation d'énergie 63, 65 est bien plus petit que le gradient radial dans les zones d'impulsion 68, 69 ; et ceci également avec un élément de couplage dont la partie d'extrémité est ronde ou carrée. Dans le cadre de la présente invention, le gradient angulaire moyen dans les zones de pure accumulation, définissant une force de freinage pour la structure magnétique, est significativement plus petit que le gradient radial moyen (plus généralement le gradient moyen selon le degré de liberté du mode de résonance utile du résonateur) dans les zones d'impulsion, ce gradient radial moyen définissant la force de poussée sur l'aimant 50 et ainsi l'énergie transférée au résonateur sous forme d'impulsions localisées autour de la position zéro de l'élément de couplage magnétique (aimant 50) du résonateur. Pour cette comparaison, le gradient angulaire moyen et le gradient radial moyen sont calculés dans la même unité, par exemple en Joules par

mètre (J/M). Au contraire, dans le cas de l'art antérieur considéré, le gradient radial moyen dans la zone centrale d'impulsions est sensiblement égal au gradient angulaire moyen dans les zones d'accumulation. Dans l'exemple décrit aux figures 5 à 9, le rapport du gradient angulaire moyen dans les zones d'accumulation d'énergie et du gradient radial moyen dans les zones d'impulsion est inférieur à 30% pour la zone  $Z1_{ac}$  et inférieur ou sensiblement égale à 40% pour la zone  $Z2_{ac}$ .

**[0044]** De manière générale, la structure magnétique est agencée de manière que le gradient angulaire moyen de l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur dans les zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique est inférieur au gradient moyen de cette énergie potentielle magnétique dans les zones d'impulsion selon le degré de liberté de l'élément de couplage du résonateur et dans une même unité. Dans une variante particulière, le rapport du gradient angulaire moyen et du gradient moyen selon le degré de liberté est inférieur à soixante pourcent (60%). Dans une variante préférée, le rapport du gradient angulaire moyen et du gradient moyen selon le degré de liberté est inférieur ou sensiblement égal à quarante pourcent (40%).

**[0045]** On remarquera ensuite qu'à la Figure 2 relative à l'art antérieur, la distance angulaire pour passer d'une zone d'énergie maximale à une zone d'énergie minimale est semblable à la distance angulaire pour passer, selon un sens donné, d'une zone d'énergie minimale à une zone d'énergie maximale. Ainsi, en particulier, les zones d'énergie minimale 28 dans la piste annulaire intérieure sont petites. Ceci n'est pas le cas dans les réalisations préférées de la présente invention.

**[0046]** Aux Figures 7 et 8, les zones d'énergie minimale 62 et 64 s'étendent sur une relativement grande distance angulaire et la transition d'une énergie maximale à une zone d'énergie minimale est effectuée sur une courte distance angulaire bien plus petite que la distance angulaire de la zone d'accumulation d'énergie qui la précède. On notera que le fort gradient dans les zones d'impulsions et donc dans les zones de transition entre une énergie potentielle maximale et une énergie potentielle minimale est obtenu grâce à des dimensions réduites de l'élément de couplage, en projection dans le plan général de la structure magnétique, selon la direction radiale des pistes magnétiques annulaires correspondant ici au degré de liberté utile du résonateur, relativement aux dimensions correspondantes dans l'art antérieur. On remarquera notamment que la largeur des zones de pure accumulation dans l'art antérieur est environ égale à la largeur de la zone centrale d'impulsions, voir même inférieure. Ceci a pour conséquence une petite plage utile pour le couple moteur et la grande largeur de la zone centrale d'impulsions engendre une perturbation relativement importante pour le résonateur car le transfert d'énergie est effectué sur une grande partie de chaque oscillation. Par contre, grâce aux caractéristiques de la présente invention, le moyennage susmentionné est non seulement pas nécessaire mais il est même non souhaité

selon le degré de liberté utile du résonateur et donc évité dans la mesure du possible. Dans un cas théorique optimal, on s'affranchit même du moyennage; ce qui résulte en une largeur de la zone d'impulsion quasi nulle et donc très localisée. En pratique, la réduction du moyennage selon le degré de liberté utile du résonateur est limitée par la technologie et le fait que le champ magnétique d'un aimant occupe un certain volume.

**[0047]** Ce qui est remarquable dans la présente invention, c'est que l'absence de l'effet du moyennage n'a plus pour conséquence d'engendrer un oscillateur non fonctionnel, car la distance angulaire sur laquelle s'étend chaque plage d'accumulation d'énergie potentielle magnétique n'est plus déterminée par un moyennage, mais par le fait que le paramètre physique considéré du matériau magnétique 45, dans chaque zone de ce matériau magnétique correspondant à une zone utile d'accumulation de  $EP_m$ , augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive de sorte que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur soit angulairement croissante dans le sens contraire au sens de rotation de la structure magnétique relativement à l'élément de couplage magnétique. On obtient ainsi une augmentation de  $EP_m$  contrôlée et répartie sur une certaine distance dans les phases d'accumulation d'énergie potentielle magnétique; ce qui est important pour éviter que l'oscillateur décroche dès que le couple moteur est relativement élevé et pour avoir une plage de fonctionnement relativement grande sans dérive de la synchronisation.

**[0048]** Grâce aux caractéristiques de l'invention, il y a essentiellement une indépendance entre la largeur d'une zone d'impulsion et la distance angulaire d'une zone utile d'accumulation de  $EP_m$ . Ainsi, les impulsions fournies au résonateur peuvent être localisées proches de la position zéro de l'élément de couplage magnétique, alors que les zones utiles d'accumulation peuvent être plus étendues grâce à un gradient angulaire de l'énergie potentielle moins important et donc une pente plus douce dans l'augmentation de l'énergie potentielle en fonction de l'angle  $\theta$ . Les impulsions localisées autour de la position zéro du résonateur améliorent fortement l'isochronisme, alors qu'une plage angulaire  $\theta_{ZU}$  relativement étendue pour la zone d'accumulation de l'énergie fournie par le couple moteur permet d'avoir une plage utile de ce couple moteur plus étendue et donc une plage de fonctionnement plus grande. On remarquera que la localisation des impulsions est d'autant meilleure que la dimension radiale de l'organe de couplage est petite.

**[0049]** Les bénéfices de l'invention apparaissent à la Figure 10 qui donne plusieurs points 80 de l'erreur relative de pulsation (vitesse angulaire) d'un rotor supportant la structure magnétique 44 en fonction du couple relatif  $M_{rot}/M_{max}$  fourni à ce rotor (pour un facteur de qualité  $Q=200$ ). On obtient une courbe de fonctionnement 82 qui est pratiquement verticale au-dessus d'un couple moteur relatif de 50%. Ainsi, l'oscillateur est fonctionnel sur la plage 50% à 100% avec très peu d'anisochronisme

et, lorsque l'on descend à 40%, l'erreur journalière n'est que d'environ quatre secondes (4 s). Ces considérations éclairent ainsi d'une part les causes des problèmes de l'art antérieur et les avantages importants découlant de la présente invention.

**[0050]** Selon une première variante de réalisation, le rapport entre la dimension radiale (largeur  $Z_0$ ) des zones d'impulsion et la dimension radiale ( $Z_1$ , respectivement  $Z_2$ ) des zones utiles d'accumulation est inférieur ou sensiblement égal à cinquante pourcents (50%). Par dimension radiale d'une zone utile d'accumulation, on comprend l'amplitude maximale  $A_{max}$  de l'oscillation de l'élément de couplage magnétique, sur une alternance pour le couple moteur utile maximum, diminuée de la demi-largeur des zones d'impulsion, soit sensiblement  $Z_2 = Z_1 = (A_{max} - Z_0/2)$ . Le rapport ci-dessus peut également être défini par d'autres paramètres du dispositif régulateur, par exemple par  $Z_0/2A_{max}$  où  $2A_{max}$  est égal à la distance  $R_{max}-R_{min}$  (distance pic-pic sur une période) définie par l'oscillation d'amplitude maximale en projection dans le plan général de la structure magnétique annulaire (voir Figure 8). Pour cette première variante, le rapport  $Z_0 / (R_{max}-R_{min})$  est donc inférieur ou sensiblement égale à 20%. Selon une deuxième variante préférée, le rapport susmentionné  $Z_0/Z_1$  est inférieur ou sensiblement égal à trente pourcents (30%).

**[0051]** Selon une troisième variante de réalisation, l'augmentation ou la diminution progressive du paramètre physique du matériau magnétique dans chaque zone utile d'accumulation de l'énergie potentielle magnétique s'étend sur une distance angulaire (considérée ici comme un angle en radian) supérieure à vingt pourcents (20%) de la période angulaire ( $P_0$  en radian) d'une piste annulaire de la structure magnétique. Selon une quatrième variante préférée, le rapport de la distance angulaire de la variation du paramètre physique et de la période angulaire est supérieur ou sensiblement égal à quarante pourcents (40%).

**[0052]** A l'aide des Figures 11 et 12, on décrira ci-après un deuxième mode de réalisation ayant un caractère général par le fait que la structure magnétique 86 de l'oscillateur 84 comprend un seul élément de couplage magnétique (un aimant) et une seule piste annulaire 88 dont un paramètre physique du matériau magnétique 45 qui la forme varie périodiquement. La majeure partie de ce qui a été exposé précédemment en relation avec la piste annulaire extérieure du premier mode de réalisation s'applique aussi pour la piste annulaire 88. Les caractéristiques de cette piste annulaire et de l'énergie potentielle magnétique qui lui est associée ne seront donc pas à nouveau décrites ici en détails. La structure magnétique 86 comprend en outre une deuxième piste annulaire 90 formée continuellement du matériau magnétique 45. Cette deuxième piste définit une zone annulaire d'énergie potentielle magnétique minimale dont la valeur est sensiblement égale à celle des zones d'énergie potentielle magnétique inférieure définies par les secteurs annulaires 52 de la piste annulaire 88. On remarquera que, dans

une variante, la piste annulaire 90 peut être remplacée par une simple plaquette en matériau magnétique adjacente à la piste annulaire 88, placée sous l'aimant oscillant 50 et fixe relativement au résonateur 46. Comme dans le premier mode de réalisation, la projection orthogonale du cercle de position zéro 20 du résonateur 46 est située sensiblement à l'interface  $Y_0$  des deux pistes annulaires. Le cercle Y correspond sensiblement à l'interface entre des zones utiles d'accumulation de  $EP_m$  définies par les secteurs annulaires 56 et les zones d'impulsions entre ces zones utiles d'accumulation et la zone annulaire d'énergie potentielle magnétique minimale susmentionnée.

**[0053]** Dans le deuxième mode de réalisation, on a en principe les mêmes bénéfices de l'invention que ceux mentionnés précédemment en relation avec le premier mode de réalisation. Toutefois, une seule impulsion par période angulaire  $P_0$  de la piste 88 est donnée au résonateur, et ceci toujours dans le même sens lorsque l'élément de couplage magnétique oscillant 50 passe de la piste annulaire 88 à la piste annulaire uniforme 90. L'alternance de l'oscillation au-dessus de la piste 90 est effectuée sans variation de l'interaction entre le résonateur et la structure magnétique, de sorte que cette alternance est libre. A la Figure 12 est donnée la différence de  $EP_m$  ( $\Delta EP_m$ ) en fonction de l'intersection de l'axe circulaire Y par l'élément de couplage magnétique oscillant. On remarquera que la courbe 94 n'a une signification pratique que pour l'ensemble des oscillations du mode de résonance considéré pouvant être entretenues dans l'oscillateur 84. Cet ensemble d'oscillations est essentiellement situé dans une plage  $R_Y$  de l'axe circulaire Y qui est déterminée par une plage utile  $R_U$  de  $\Delta EP_m$ , cette dernière plage  $R_U$  correspondant à la plage du couple moteur utile fourni à la structure magnétique 86.

**[0054]** On remarquera que dans les deux modes de réalisation décrits précédemment, la dimension radiale de chaque piste magnétique annulaire, et donc la dimension selon le degré de liberté du résonateur, est étendue alors que la dimension de chaque organe de couplage du résonateur est réduite radialement relativement à l'axe de rotation de la structure magnétique. Dans ces deux modes de réalisation, la dimension radiale des secteurs annulaires magnétiques de la structure magnétique est supérieure à celle de chaque élément de couplage du résonateur. En particulier, la dimension radiale des secteurs annulaires magnétiques est choisie de manière que l'organe de couplage soit entièrement superposé à la piste magnétique considérée pour une amplitude maximale dans l'alternance où cet organe de couplage est couplé à cette piste magnétique. Dans une variante préférée avec des zones de pure accumulation d'énergie potentielle magnétique, il est prévu que l'organe de couplage reste dans une zone où le gradient de potentiel est perpendiculaire au degré de liberté du résonateur dans toute la plage de couple utile, c'est-à-dire pour toutes les amplitudes d'oscillation que l'organe de couplage peut présenter jusqu'à son amplitude maximale.

**[0055]** Aux Figures 13 à 15 sont représentés schématiquement en coupe trois variantes de réalisation d'une piste annulaire de la structure magnétique selon l'invention. Ces variantes constituent des alternatives à la variante déjà décrite aux Figures 6A et 6B. La piste annulaire 98 comprend une alternance de secteurs annulaires 54A, où l'épaisseur du matériau à haute perméabilité magnétique 100 est constante, et de secteurs annulaires 56A où l'épaisseur de ce matériau 100 diminue progressivement par palier sur une distance angulaire  $V_P$ . Chaque secteur annulaire 56A forme un escalier avec plusieurs marches. Cet escalier a une distance entre la surface supérieure de ses marches et un plan 59, parallèle au plan général de la piste annulaire 98, qui varie progressivement par palier. Cet escalier définit une rampe d'énergie potentielle  $EP_m$  monotone croissante qui forme les zones utiles d'accumulation d'énergie potentielle, comme exposé précédemment. Le paramètre physique considéré du matériau 100 est une distance à un plan géométrique 59, laquelle correspond à un entrefer entre l'aimant 50 et ce matériau. Dans une variante, le matériau magnétique est formé d'une matière aimantée. Les remarques concernant la contribution de la variation d'épaisseur de la structure magnétique faites pour les profils des pistes 52 et 53 s'appliquent également pour cette dernière variante, de même pour les remarques liées à un agencement en attraction ou en répulsion dans les variantes où l'élément de couplage et les pistes magnétiques sont formées par un matériau aimanté.

**[0056]** La piste annulaire 102 de la variante de la Figure 14 présente une épaisseur constante du matériau ferromagnétique 100, mais elle présente périodiquement une pluralité de trous 104. Les secteurs annulaires 54B sans trous définissent les zones d'énergie potentielle magnétique minimale. Les secteurs annulaires 56B présentent chacun une pluralité de trous dont la densité varie ou/et dont la surface des sections varie sur une distance angulaire  $V_P$ . Dans l'exemple représenté, la densité de trous, ayant un même diamètre relativement petit, augmente de manière progressive, continument où, dans une variante, par palier. Le paramètre physique du matériau ferromagnétique est ici la perméabilité magnétique moyenne de ce matériau magnétique.

**[0057]** La piste annulaire 106 de la Figure 15 est formée par un matériau aimanté 108 dont l'épaisseur est constante. Dans les secteurs annulaires 54C, l'intensité du champ magnétique 110 produit par le matériau aimanté est sensiblement constante. Par contre, dans les secteurs annulaires 56C, l'intensité du champ magnétique 110 diminue progressivement sur une distance angulaire  $V_P$  dans un agencement en attraction (variante représentée) alors qu'il est prévu qu'il augmente progressivement dans un agencement en répulsion. Dans cette variante, le paramètre physique considéré est l'intensité du flux du champ magnétique généré par le matériau aimanté entre la piste magnétique annulaire et une surface de révolution ayant l'axe de rotation de la structure magnétique comme axe de révolution et le degré de liberté de

l'aimant 50 comme génératrice de cette surface de révolution. Dans une variante, il est prévu un autre élément de couplage constitué d'un matériau à haute perméabilité magnétique (cas similaire à l'agencement en attraction de matériaux aimantés). On remarquera qu'utiliser la répulsion magnétique présente l'avantage d'éviter que l'aimant 50 ne se colle à la piste annulaire 106 en cas de choc.

**[0058]** Aux Figures 16 et 17 est représenté un troisième mode de réalisation d'un dispositif régulateur selon l'invention. Il se distingue du premier mode de réalisation essentiellement par les caractéristiques suivantes. L'oscillateur 112 comprend un résonateur 116 formé par un bras ou levier 120 relié à un point fixe par un ressort linéaire 118. Le bras ou levier 120 tourne à une première extrémité autour d'un axe 124, parallèle à l'axe de rotation 51 de la structure magnétique 114, et il porte à sa deuxième extrémité une structure de couplage magnétique 122 couplée à la structure magnétique 114. La structure 122 comprend un organe 125 en matériau ferromagnétique, en forme de U couché ou de C, dont les deux branches s'étendent respectivement dessus et dessous la structure magnétique 114. Aux extrémités libres respectives des deux branches sont agencés respectivement deux aimants 126 et 127, lesquels sont orientés de manière que leurs deux champs magnétiques se propageant dans l'entrefer entre eux soient principalement orientés parallèle à l'axe de rotation 51 et de même sens. Ces deux aimants coaxiaux définissent ensemble l'élément de couplage magnétique de l'oscillateur 112. Le degré de liberté du résonateur se trouve sur un cercle 123 de rayon R et centré sur l'axe de rotation 124 du bras ou levier 120, R étant la distance entre cet axe de rotation et un axe géométrique passant par le milieu des deux aimants 126 et 127.

**[0059]** De manière à obtenir, selon une variante préférée de l'invention, un gradient de l'énergie potentielle magnétique  $EP_m$  sensiblement nul selon le degré de liberté 123 du résonateur 116 dans les zones utiles d'accumulation, il est prévu dans ce troisième mode de réalisation que le paramètre physique de la matière magnétique 45 corrélé à  $EP_m$  soit sensiblement constant selon des arcs de cercle correspondant au cercle 123. En d'autres termes, pour toute position angulaire  $\theta$  de la structure magnétique 114, le paramètre physique considéré est invariant sur le chemin effectué par le centre de masse des parties d'extrémité des aimants 126 et 127 en projection dans le plan général de la structure magnétique. Ceci est en particulier prévu dans les secteurs 56D et 57D où le paramètre physique varie angulairement pour définir les zones utiles d'accumulation d'énergie potentielle. Ainsi, les secteurs annulaires 54D et 56D, respectivement 55D et 57D formant les deux pistes annulaires de la structure magnétique ont une forme légèrement arquée. Les diverses variantes mentionnées pour le premier mode de réalisation s'appliquent aussi à ce troisième mode de réalisation. La variante représentée ici est celle d'un escalier de plusieurs marches dans

les secteurs 56D et 57D.

**[0060]** A l'aide des Figures 18 à 20, on décrira ci-après rapidement trois variantes de réalisation d'un oscillateur selon l'invention. L'oscillateur de la Figure 18 est formé par une roue 128 comprenant à sa périphérie une structure magnétique annulaire 98A, similaire à la structure magnétique 98 (Figure 13) dans une vue en plan de dessus, mais doublée relativement à cette dernière structure magnétique par une symétrie planaire au niveau de l'axe circulaire  $\theta$  de la Figure 13. Ainsi, chaque secteur annulaire 56A comprend un premier escalier et dessous celui-ci un autre escalier, miroir du premier escalier. La roue 128 comprend un noyau central en matériau non magnétique. Le résonateur 117 comprend une structure de couplage magnétique 122A en forme de C, similaire à la structure 122 décrite ci-avant. Toutefois, ici, la structure 122A comprend un grand aimant relié à deux branches en matériau ferromagnétique dont les deux extrémités libres respectives définissent ensemble l'élément de couplage magnétique du résonateur à la structure magnétique 98A.

**[0061]** A la Figure 19, l'oscillateur comprend une roue 129 formée d'un noyau central en matériau non magnétique et une structure magnétique annulaire 106A. Cette structure 106A est fonctionnellement similaire à la structure magnétique 106 de la Figure 15, mais ici l'aimantation de la matière est homogène sur l'ensemble de la structure magnétique 106A, la variation d'intensité du champ magnétique généré par l'aimant et donc du flux magnétique couplé étant obtenue par une variation de l'épaisseur de l'anneau aimanté. Le résonateur 119 est particulier par le fait qu'il ne comprend pas d'aimant, sa structure de couplage magnétique 122B étant réalisée par une boucle ouverte en matériau à haute perméabilité magnétique, la structure aimantée 106A passant dans l'ouverture de cette boucle. La boucle 122B définit simplement un chemin de faible réluctance magnétique pour le champ magnétique de la structure aimantée. Dans une autre variante, on peut combiner la roue 129 et la structure de couplage magnétique 122A (en attraction ou en répulsion) de la Figure 18.

**[0062]** A la Figure 20, l'oscillateur se distingue par un rotor 130 formé de deux plateaux 132 et 134 en matériau ferromagnétique. Le plateau inférieur 132 présente à sa périphérie une structure magnétique avec deux pistes annulaires 52 et 53 telles que déjà décrites et formées par le matériau ferromagnétique. Le plateau supérieur 134 est semblable au plateau inférieur mais il est renversé, c'est-à-dire qu'il est l'image du plateau inférieur par une symétrie planaire par le plan milieu entre les deux plateaux. Ce plateau supérieur comprend ainsi deux pistes annulaires 52A et 53A semblables aux pistes annulaires 52 et 53 et en regard de ces dernières. Ces deux plateaux se rejoignent dans la région centrale pour former un chemin magnétique de faible réluctance pour le champ magnétique de l'aimant 50 du résonateur 46. On notera que les variantes représentées aux Figures 18 et 20 présentent l'avantage d'éviter qu'une force soit appli-

quée axialement sur l'élément de couplage du résonateur.

**[0063]** A la Figure 21 est représentée encore une autre variante de réalisation d'un dispositif régulateur 136 selon l'invention. Ce dispositif est remarquable par le fait qu'il comprend deux structures magnétiques 106A et 106B qui sont coaxiales et mécaniquement indépendantes (non solidaire en rotation par des moyens mécaniques). La structure magnétique inférieure 106A est portée par une roue 129 semblable à celle décrite à la Figure 19, cette roue étant solidaire d'un arbre 140 aligné sur l'axe de rotation 51. La roue supérieure 142 est formée d'un noyau central 143 en matériau non magnétique relié à un canon 144 monté librement autour de l'arbre 140, et d'une structure magnétique 106B semblable à la structure 106A, mais image de celle-ci par une symétrie planaire relativement au plan milieu entre les deux roues. Le résonateur 148 est schématisé par un ressort 151 et un élément de couplage magnétique 149 en matériau ferromagnétique agencé à l'extrémité d'un bras 150 en matériau non magnétique. L'aimantation dans les deux structures 106A et 106B est prévue de même sens. Dans une première variante, les deux roues 129 et 142 sont respectivement entraînées par une même source d'énergie mécanique, en particulier un ressort de barillet. Dans une deuxième variante, ces deux roues sont entraînées respectivement par deux sources d'énergie mécanique différentes, en particulier deux barillets agencés dans un mouvement horloger. Les autres variantes décrites précédemment pour la structure magnétique peuvent aussi être prévues ici. On notera encore que l'élément de couplage magnétique peut aussi être un aimant.

**[0064]** A la Figure 22 est représenté un quatrième mode de réalisation d'un dispositif régulateur 152 selon l'invention. Cette réalisation se distingue notamment par le fait que la structure magnétique 154 comprend une seule piste annulaire 156 formée par une alternance de secteurs annulaires 54 et 56 tels que décrits précédemment. On notera que dans ce mode de réalisation ainsi que dans les modes de réalisation exposés par la suite, comme dans les modes de réalisation décrits précédemment, les secteurs non hachurés correspondent à des zones d'énergie potentielle magnétique inférieure ou minimale, alors que les secteurs hachurés correspondent à des zones dans lesquelles l'énergie potentielle magnétique augmente angulairement selon l'invention. Dans ces secteurs hachurés, le matériau magnétique utilisé présente au moins un paramètre physique qui est corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur lorsque l'élément de couplage magnétique du résonateur est couplé magnétiquement à la piste magnétique annulaire. Le matériau magnétique dans chaque secteur hachuré est agencé de manière que le paramètre physique en question augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive de sorte que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur soit angulairement croissante lors de la rotation relative prévue entre le résonateur et la structure magné-

tique. On notera encore que, dans ce mode de réalisation ainsi que dans les modes de réalisation exposés par la suite à l'exception du huitième mode de réalisation, le matériau magnétique est agencé dans les secteurs hachurés de manière que le paramètre physique en question soit radialement constant, mais qu'il varie angulairement de manière progressive pour assurer une accumulation d'énergie potentielle magnétique qui soit progressive sur une distance angulaire de freinage relativement étendue et dépendante de l'amplitude de l'oscillation de l'élément de couplage du résonateur.

**[0065]** Le résonateur 158 est du type balancier-spiral avec un balancier rigide 160 associé à un ressort-spiral 162. Le balancier peut prendre diverses formes, notamment circulaire comme dans un mouvement horloger classique. Le balancier pivote autour d'un axe 163 et il comprend deux organes de couplage magnétique 164 et 165 (aimants de section carrée) qui sont décalés angulairement relativement à l'axe de rotation 51 de la structure magnétique 154. Ce décalage angulaire des deux aimants 164 et 165 et leur positionnement relativement à la structure 154 sont prévus pour que le cercle de position zéro 20 des deux aimants du résonateur (situation où ce dernier est au repos et donc non excité) soit superposé au cercle extérieur (variante représentée) ou au cercle intérieur de la piste annulaire 156 et qu'ils présentent alors un décalage angulaire  $\theta_D$  égal à un nombre entier de période angulaire  $P_0$  augmenté d'une demi-période. Ainsi ces deux aimants présentent un déphasage de  $\pi$ . De préférence, l'axe de rotation 163 du balancier est positionné à l'intersection des deux tangentes au cercle de position zéro 20 respectivement aux deux points définis par les deux organes de couplage 164 et 165 sur le cercle de position zéro. On notera qu'il est préférable que le balancier soit équilibré, plus précisément que son centre de masse se trouve sur l'axe du balancier. L'homme du métier saura facilement configurer des balanciers de diverses formes présentant cette caractéristique importante. On comprendra donc que les diverses variantes représentées aux figures sont schématiques et la problématique liée à l'inertie du résonateur n'est pas traitée concrètement sur ces figures, lesquelles présentent les différentes caractéristiques de l'invention. De plus, des agencements garantissant une résultante nulle des forces magnétiques agissant radialement et axialement sur l'axe du balancier sont préférés. On notera, que dans une variante, il est prévu un balancier à lames flexibles définissant un axe de rotation fictif, c'est-à-dire sans pivotement, en lieu et place du balancier-spiral.

**[0066]** On remarquera que, grâce à la présence des deux organes de couplage magnétique, le résonateur 158 est continuellement couplé magnétiquement à la piste annulaire 156 par l'un ou l'autre de ces deux organes. Dans chaque période de l'oscillation du balancier, ce dernier reçoit deux impulsions. Le phénomène physique engendrant ces impulsions est le même que celui décrit précédemment en prenant en considération les deux

aimants et la piste annulaire. En effet, lorsqu'un aimant gravite une rampe d'énergie potentielle dans un secteur annulaire 56 et qu'il revient en direction du cercle 20, l'autre aimant arrive au-dessus d'un secteur annulaire 54 dont l'énergie potentielle est minimale. C'est donc l'effet combiné des deux interactions qui intervient dans ce mode de réalisation. Dans une variante de réalisation, un simple anneau en matériau à haute perméabilité magnétique, de manière similaire au deuxième mode de réalisation, est prévu à l'extérieur de la piste annulaire 156, adjacent à cette dernière. Ce simple anneau définit donc une même énergie potentielle inférieure sur toute sa surface pour l'oscillateur. Ainsi, cet anneau peut être solidaire de la structure magnétique 154 ou agencé fixe relativement au résonateur 158. Dans ce dernier cas, deux plaquettes ferromagnétiques agencées respectivement selon les deux directions radiales des deux aimants du résonateur relativement à l'axe 51 suffisent à la fonction.

**[0067]** A la Figure 23 est encore représentée une autre variante de réalisation où le dispositif régulateur, formé par l'oscillateur 168, comprend une structure magnétique 44 déjà décrite précédemment et un résonateur 158 décrit ci-avant. Cette variante se distingue de celle de la Figure 22 par l'agencement d'une deuxième piste annulaire 52 en plus de la piste annulaire 53 correspondant à la piste annulaire 156. Grâce à cet agencement, lors du passage dans la zone centrale d'impulsions, chacun des aimants 164 et 165 reçoit une impulsion. On a donc ici une double impulsion alors que la variante de la Figure 22 n'en reçoit globalement qu'une seule. La variante de la Figure 23 est particulièrement efficace et présente une plage de fonctionnement relativement étendue. De fait, ce mode de réalisation correspond à un doublement du couplage magnétique entre le résonateur et la structure magnétique relativement à la variante de la Figure 22 et au premier mode de réalisation; comme ceci est également le cas dans les deux modes de réalisation exposés ci-après.

**[0068]** La Figure 24 montre un cinquième mode de réalisation de l'invention. L'oscillateur 172 comprend une structure magnétique 44A semblable à la structure 44 déjà décrite et comportant un nombre pair de périodes angulaires  $P_0$ . Le résonateur 174 est formé par un diapason 176 à deux branches vibrantes. Les deux extrémités libres respectives des deux branches portent respectivement deux aimants cylindriques 177 et 178 diamétralement opposés relativement à l'axe de rotation 51. La raison du choix d'un nombre pair de périodes angulaires  $P_0$  est lié au fait que, dans le mode de résonance fondamental du diapason, les deux branches oscillent en opposition de phase, c'est-à-dire à contre-sens. Chaque aimant du résonateur expérimente une interaction avec la structure magnétique 44A qui est semblable à celle décrite en relation avec le premier mode de réalisation. Ainsi chaque aimant contribue à l'entretien de son oscillation et donc à l'entretien de la vibration du diapason 176.

**[0069]** La Figure 25 montre un sixième mode de réalisation de l'invention. L'oscillateur 180 se distingue essentiellement du précédent par le fait que les deux aimants 177 et 178 du résonateur 182 sont reliés rigidement par une barrette 185, et par le fait que la structure magnétique 44B comprend un nombre impair de périodes angulaires  $P_0$ . Chaque aimant est agencé à l'extrémité d'une tige élastique 183, respectivement 184 ancrée dans un socle 186. Dans une variante, on peut utiliser un diapason comme à la Figure 24 avec les deux aimants reliés rigidement. Ainsi, le mode de résonance utile du résonateur 182 définit une oscillation en phase des deux aimants à cause du lien rigide entre eux. C'est la raison pour laquelle la structure magnétique 44B comprend ici un nombre impair de périodes angulaires  $P_0$ . Chaque aimant du résonateur expérimente une interaction avec la structure magnétique 44B qui est semblable à celle décrite en relation avec le premier mode de réalisation. Ainsi chaque aimant contribue à l'entretien de l'oscillation de la tige élastique correspondante, et donc à l'entretien de la vibration du résonateur 182.

**[0070]** La Figure 26 montre un septième mode de réalisation d'un dispositif régulateur 190 selon l'invention. Ce mode de réalisation est particulier et intéressant par le fait qu'il comprend une structure magnétique 44B couplée magnétiquement à deux résonateurs 191 et 192 indépendants l'un de l'autre hormis par le couplage magnétique via la structure magnétique. Chaque résonateur est représenté schématiquement par une tige élastique 183, respectivement 184 ancrée à une première extrémité et portant un aimant 177, respectivement 178. Chaque résonateur a donc sa propre fréquence naturelle. On a ainsi une sorte de moyennage des deux fréquences propres pour la vitesse angulaire  $\omega$  de la roue solidaire de la structure magnétique 44B, cette dernière ayant une fonction supplémentaire de différentiel. Evidemment, les deux fréquences naturelles sélectionnées doivent être proches, voir sensiblement égales. Cependant, on peut imaginer que les deux oscillateurs réagissent différemment aux conditions environnantes, de préférence de manière que l'un compense la dérive de l'autre lorsque ces conditions environnantes varient. On remarquera que les deux oscillateurs sont orientés selon des sens opposés, de manière à compenser l'effet de la gravitation selon leur direction. Dans une variante, il est prévu d'agencer en plus deux autres résonateurs également orientés selon des sens opposés dans une direction perpendiculaire aux deux résonateurs représentés à la Figure 26, de manière à compenser aussi l'effet de la gravitation selon cette direction perpendiculaire.

**[0071]** A la Figure 27 est représenté un huitième mode de réalisation de l'invention. Le dispositif régulateur 196 se distingue essentiellement des modes de réalisation précédents par deux caractéristiques particulières. Premièrement, la structure magnétique 198 est prévue fixe sur un support ou une platine 200, alors que les deux résonateurs 191 A et 192A sont entraînés en rotation à la vitesse angulaire  $\omega$  par un couple moteur fourni à un

rotor 202 qui comprend deux bras rigides 205 et 206 aux extrémités libres respectives desquelles sont agencées respectivement les deux résonateurs. On remarquera que cette inversion au niveau du dispositif auquel est appliqué le couple moteur ne change rien à l'interaction magnétique entre le / les résonateurs et la / les structures magnétiques qui a été exposée précédemment, de sorte que cette inversion peut être implémentée à titre de variante dans les autres modes de réalisation. On notera qu'il est prévu ici deux résonateurs définissant chacun avec la structure magnétique 198 un oscillateur. Toutefois, dans une autre variante non représentée, un seul résonateur est prévu.

**[0072]** Le deuxième aspect particulier de ce mode de réalisation provient du fait que l'oscillation n'est pas radiale, relativement à l'axe de rotation 51 A du rotor 202, lorsque l'aimant 177, respectivement 178 intercepte le cercle de position zéro 20. Comme dans plusieurs modes de réalisation décrits précédemment, le degré de liberté de l'élément de couplage de chaque résonateur se trouve sensiblement sur un cercle dont le rayon est ici sensiblement égal à la longueur L de la tige élastique de ce résonateur et centré au point d'ancrage de cette tige sur le bras du résonateur. De manière à obtenir, selon une variante préférée de l'invention, un gradient de l'énergie potentielle magnétique  $EP_m$  sensiblement nul selon le degré de liberté de chaque résonateur (les deux résonateurs présentant une symétrie axiale d'axe géométrique 51 A) dans les zones utiles d'accumulation de  $EP_m$ , il est prévu dans ce mode de réalisation que le paramètre physique de la matière magnétique de la structure magnétique 198 soit sensiblement constant selon des arcs de cercle correspondant au cercle géométrique défini par les éléments de couplage. En d'autres termes, pour toute position angulaire du rotor 202, le paramètre physique considéré est invariant sur le chemin effectué par les aimants 177 et 178 en projection dans le plan général de la structure magnétique fixe. Ceci est en particulier prévu dans les secteurs 56E et 57E où le paramètre physique varie pour définir les zones utiles d'accumulation de  $EP_m$ . On remarquera que les secteurs annulaires 54E et 56E, respectivement 55E et 57E formant les deux pistes annulaires de la structure magnétique ont une forme arquée, l'alternance des secteurs de la piste annulaire intérieure étant légèrement décalés angulairement par rapport aux secteurs de la piste annulaire extérieure.

**[0073]** Aux Figures 28 et 29 est représenté en plan et en coupe un neuvième mode de réalisation d'un dispositif régulateur selon l'invention. L'oscillateur 210 comprend une roue 212 dont au moins la partie annulaire périphérique est formée d'un matériau à haute perméabilité magnétique. La surface latérale de cette roue est configurée pour former une structure magnétique cylindrique 214. Cette structure magnétique reste annulaire, mais elle ne s'étend plus dans le plan général de la roue, mais axialement. Dans les autres modes de réalisation, le couplage magnétique entre le résonateur et la structure magnétique est de direction axiale (la composante princi-

pale est parallèle à l'axe de rotation), alors qu'ici ce couplage magnétique est radial. La structure 214 définit deux pistes cylindriques 218 et 219, équivalentes aux pistes annulaires décrites précédemment. Ainsi l'essentiel des considérations pour les modes de réalisation précédents s'appliquent également à diverses variantes possibles de ce mode de réalisation. Dans la variante représentée, chaque piste est formée par une succession de dents asymétriques qui définissent la période angulaire  $P_0$  de la structure magnétique. Chaque dent présente un plat ou une petite section cylindrique 215 suivi d'une creusure formant une rampe / un plan incliné 216. Les dents de la piste inférieure 219 sont décalées angulairement d'une demi-période  $P_0/2$  relativement aux dents de la piste supérieure 218. Cette structure magnétique agit de manière similaire à celle exposée dans les autres modes de réalisation pour le résonateur 220. Ce résonateur comprend une structure légère 221 de préférence en matériau ferromagnétique. Cette structure 221 comprend deux bras élastiques 222 et 223 diamétralement disposés relativement à un arbre 224 centré sur l'axe de rotation 51 de la roue 212. Le résonateur est monté fixement sur l'arbre, la structure 221 étant fixée à un disque 225 solidaire de cet arbre. Les deux bras élastiques sont respectivement prolongés à leurs extrémités libres par deux branches axiales 226 et 227 qui portent respectivement à leurs extrémités inférieures les aimants 230 et 231. Ces deux aimants sont agencés de manière que le champ magnétique généré par chacun d'eux soit principalement radial. Il est prévu d'utiliser une résonance dans laquelle les deux bras élastiques 222 et 223 vibrent axialement, ce qui engendre une oscillation axiale des aimants 230 et 231. Pour que la roue puisse tourner indépendamment du résonateur, il est prévu un trou central dans la roue 212 dans lequel passe librement cet arbre. On notera encore que la roue est solidaire d'un pignon 228 servant à l'entraînement de la roue par un couple moteur provenant par exemple d'un barillet horloger. D'autres résonateurs peuvent être prévus par l'homme du métier avec la roue 212, notamment un type de résonateur fonctionnant en torsion.

**[0074]** A l'aide de la Figure 30, on décrira ci-après un dixième mode de réalisation agencé dans un mouvement horloger 234. Le dispositif régulateur 236 comprend un résonateur 238 représenté de manière schématique par une lame ou tige élastique fixée à une première extrémité et portant à son extrémité libre un aimant. La structure magnétique est particulière par le fait qu'elle est formée par deux pistes magnétiques annulaires 241 et 243 selon l'invention qui sont respectivement portées par deux mobiles 240 et 242 agencés l'un à côté de l'autre. Chaque piste magnétique annulaire est agencée dans la zone périphérique d'un plateau du mobile respectif. Les deux pistes sont situées ici dans un même plan géométrique et comprennent une alternance de secteurs annulaires 245 et 246 respectivement semblables aux secteurs annulaires 54 et 56 du premier mode de réalisation. Lorsque les deux plateaux ont un même diamètre, les deux mo-

biles sont positionnés de manière que la position de repos (position zéro) de l'aimant du résonateur soit située au milieu d'une droite orthogonale à leurs axes de rotation respectifs et interceptant ces deux axes de rotation. Plus généralement, l'élément de couplage dans sa position de repos est situé sur une droite reliant les deux axes de rotation respectifs des deux mobiles et à l'interface des deux pistes ou au milieu de celles-ci en projection dans ledit plan géométrique, ces deux pistes présentant un décalage d'une demi-période angulaire sur ladite droite.

**[0075]** Les deux mobiles 240 et 242 sont couplés en rotation par une roue d'entraînement 252 solidaire d'un pignon 254 recevant le couple moteur. La roue 252 engrène avec une roue 248 du premier mobile 240 située sous son plateau et entraîne ainsi directement en rotation ce premier mobile dans un sens de rotation déterminé. La roue 252 transmet également le couple moteur au deuxième mobile 242 via une roue intermédiaire 256 qui engrène avec une roue 250 de ce deuxième mobile située sous son plateau. Ainsi, le deuxième mobile tourne dans un sens contraire au premier mobile. Les deux pistes annulaires ont un même diamètre extérieur et les rapports d'engrenage sont prévus pour que la vitesse angulaire des deux mobiles soit identique. Dans une variante, les deux mobiles peuvent être couplés directement l'un à l'autre par un engrenage, au moins un des deux mobiles recevant un couple de force en fonctionnement. Lors du montage du mouvement horloger, on veille à positionner ces deux pistes annulaires pour qu'au point de position zéro de l'aimant elles présentent un déphasage de  $\pi$  (décalage d'une demi-période comme représenté à la Figure 30).

**[0076]** On remarquera que ce dixième mode de réalisation présente l'avantage que les deux pistes magnétiques ont des dimensions identiques tout en étant agencées dans un même plan géométrique. Il en résulte une parfaite symétrie d'interaction magnétique entre le résonateur et la structure magnétique dans les deux alternances de l'oscillation de ce résonateur. Dans une variante particulière, les deux mobiles sont entraînés par deux couples moteur provenant de deux barillets incorporés dans un même mouvement horloger. On remarquera encore que, dans une variante non représentée, le résonateur pourrait porter au moins deux éléments de couplage couplés respectivement avec la première piste et la deuxième piste et placés ailleurs que sur la droite susmentionnée reliant les deux axes de rotation. On veillera alors que le deuxième élément de couplage entre en interaction avec la deuxième piste magnétique lorsque le premier élément de couplage sort de la première piste magnétique et vice versa. Cette dernière variante ouvre plusieurs degrés de liberté supplémentaire dans l'agencement de l'oscillateur et notamment des deux mobiles. On peut par exemple prévoir que les deux pistes magnétiques soient respectivement agencées sur deux plateaux parallèles mais à différents niveaux.

**[0077]** A la Figure 31 est représenté un oscillateur 260

selon l'invention qui est une première variante de la Figure 22. Cette variante se distingue de cette Figure 22 par le fait que le résonateur 158A comprend un balancier rigide 160A qui porte sur chacun de ses deux bras deux aimants 164 et 264, respectivement 165 et 265. Les deux aimants de chaque bras subissent simultanément une interaction magnétique avec la piste magnétique annulaire 156. Ils sont déphasés d'une période angulaire  $P_\theta$ . Ainsi, on comprend que sur un cercle de position zéro donné, pour le résonateur considéré dans sa position de repos, on peut augmenter le nombre d'éléments de couplage en prévoyant un décalage angulaire égal à  $N \cdot P_\theta$ , où N est un nombre entier positif, (correspondant à un déphasage de  $N \cdot 360^\circ$ ) entre les éléments de couplage qui subissent un même mouvement (c'est-à-dire même degré de liberté et même sens du mouvement) relativement à une piste magnétique correspondante.

**[0078]** A la Figure 32 est représenté un oscillateur 270 selon l'invention qui est une deuxième variante de la Figure 22. Cette deuxième variante se distingue de la première variante par le fait que les deux éléments de couplage, associés à un même bras du balancier 160B du résonateur 158B, sont positionnés respectivement sur les deux cercles de position zéro 20 et 20A définis par la piste magnétique annulaire 156, à savoir par les cercles extérieur et intérieur délimitant cette piste, pour le résonateur considéré dans sa position de repos. Dans ce cas-ci, les deux éléments de couplage 164 et 266, respectivement 165 et 267 présentent entre eux un déphasage angulaire de  $P_\theta / 2$  (soit de  $180^\circ$ ). On comprend donc que, pour une piste magnétique annulaire donnée, on peut positionner, lorsque le résonateur est dans sa position de repos, un ou plusieurs élément(s) de couplage sur chacun des deux cercles de position zéro définis par cette piste. Pour un bras du balancier, un premier élément de couplage associé au premier cercle de position zéro est décalé angulairement d'un deuxième élément de couplage associé au second cercle de position zéro de  $(N+1) \cdot P_\theta / 2$ ,  $N > 0$ .

**[0079]** En combinant les enseignements tirés des réalisations des Figures 31 et 32 et en utilisant plusieurs pistes magnétiques annulaires, on peut concevoir divers oscillateurs selon l'invention, notamment l'oscillateur 280 représenté à la Figure 33. Cet oscillateur comprend un résonateur 158C formé par un balancier 160C qui comprend deux bras 282 et 284 portant chacun quatre éléments de couplage répartis sur sensiblement une période angulaire de la structure magnétique 44 (période de chacune des deux pistes magnétiques 52 et 53). On a ici un élément de couplage ayant une interaction avec la structure magnétique dans chaque demi-période de trois demi-périodes successives de cette structure magnétique au-dessus desquelles s'étendent simultanément les quatre éléments de couplage associés à un même bras du balancier. Comme la variation du paramètre physique considéré dans chaque secteur hachuré est prévue angulaire (sans variation radiale sur tout rayon donné), on prévoit de préférence que le centre de rotation 163 du

balancier-spiral soit situé sur une tangente au cercle de position zéro 20 au croisement avec la branche intermédiaire 286, respectivement 288, qui porte deux éléments de couplage alignés radialement. Chacun des organes de couplage est ainsi soumis seulement à une faible force radiale en dehors de zones d'impulsion localisées autour des trois cercles de position zéro 20, 20A et 20B utilisés dans le mode de réalisation de cette Figure 33. Un tel mode de réalisation présente l'avantage d'augmenter le couplage magnétique entre le résonateur et la structure magnétique tout en conservant des éléments de couplage ayant une petite dimension radiale et ainsi des impulsions fournies au résonateur qui restent localisées.

**[0080]** A l'aide des figures suivantes, on décrira par la suite des modes de réalisation présentant une inversion technique relativement aux dispositifs régulateurs déjà décrits. Dans les modes de réalisation précédents, les pistes magnétiques annulaires sont étendues pour couvrir au moins l'amplitude maximale d'oscillation prévue (sur une alternance) alors que les organes de couplage des résonateurs ont une relativement faible dimension selon la direction radiale de pistes magnétiques annulaires associées à ces résonateurs. Il est cependant possible d'obtenir une interaction similaire et les bénéfices de la présente invention en inversant les dimensions des secteurs magnétiques des pistes magnétiques et des organes de couplage des résonateurs.

**[0081]** A la Figure 34 est représentée schématiquement une variante d'un onzième mode de réalisation correspondant à une inversion technique du mode de réalisation général de la Figure 11. Le dispositif régulateur 300 comprend une structure magnétique 304 formant une roue et comprenant une piste magnétique annulaire 306 formée par des aimants 308 ayant une dimension radiale réduite et agencés périodiquement le long d'un cercle 312. Ainsi, ce cercle passe sensiblement par le milieu des aimants ou par les centres de masse des aimants. De manière générale, la piste magnétique annulaire définit, en projection axiale dans son plan général, un cercle géométrique situé radialement au milieu de cette piste ou passant sensiblement par les centres de masse d'une pluralité d'éléments magnétiques formant cette piste magnétique. Ce cercle est aussi nommé cercle de position zéro par analogie avec les modes de réalisation précédents. Le résonateur 302 est agencé pour subir une oscillation radiale. Son élément ou organe de couplage 310 est formé par un matériau aimanté et sa partie d'extrémité active, définissant une plage aimantée en face de la structure magnétique, s'étend en projection axiale dans un plan parallèle au plan général de la piste magnétique dans une zone sensiblement rectangulaire avec son bord angulaire intérieur, c'est-à-dire selon la direction angulaire de la roue, suivant sensiblement en projection axiale le cercle de position zéro lorsque le résonateur est dans une position de repos (énergie potentielle du résonateur minimale). Cette zone sensiblement rectangulaire présente une distance angulaire au niveau du cercle 312 sensiblement égale à une demi-période

( $P_{\theta}/2$ ) de la piste magnétique 306 et une distance radiale au moins égale à l'amplitude maximale d'oscillation de l'élément de couplage sur l'alternance où il est couplé à cette piste magnétique 306. Le résonateur est agencé relativement à la structure magnétique de sorte que le cercle 312 traverse en projection axiale la partie d'extrémité active de l'élément de couplage 310 durant sensiblement une première alternance de chaque période d'oscillation de cet élément de couplage lorsqu'un couple moteur dans une plage de couple utile est fourni à l'oscillateur (formé par le résonateur et la structure magnétique). Le matériau aimanté de l'élément de couplage forme un aimant orienté axialement selon l'axe géométrique 51 tout comme les aimants 308, ces derniers présentant ici une inversion des pôles magnétiques de sorte qu'ils sont agencés en répulsion avec l'aimant de l'élément de couplage.

**[0082]** Le matériau aimanté de l'élément de couplage présente au moins un paramètre physique qui est corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur lorsque cet élément de couplage magnétique est couplé magnétiquement à la piste magnétique annulaire 306. De manière générale, le dispositif régulateur selon ce onzième mode de réalisation est caractérisé en ce que, dans la plage utile du couple moteur, la piste magnétique annulaire et l'élément de couplage magnétique définissent dans chaque période angulaire, en fonction de leur position angulaire relative  $\theta$  et de la position de l'élément de couplage selon son degré de liberté, une zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur ; et en ce que le matériau magnétique de l'élément de couplage est agencé de manière que, au moins dans une zone de ce matériau magnétique couplée à la piste magnétique pour au moins une partie de la zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique de chaque période angulaire, le paramètre physique corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive. La variation positive ou négative du paramètre physique est choisie pour que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur soit angulairement croissante lors d'une rotation relative entre le résonateur et la structure magnétique sous l'action d'un couple moteur. Selon diverses variantes de réalisation, le paramètre physique en question est notamment un entrefer ou le flux du champ magnétique généré par l'aimant de l'élément de couplage, comme décrit précédemment.

**[0083]** Un douzième mode de réalisation est représenté schématiquement aux Figures 35 et 36. Le dispositif régulateur 320 correspond à une inversion technique du dispositif régulateur de la Figure 5. La structure magnétique 304 est identique à celle de la Figure 34. Le résonateur 322 comprend une plaquette 324 oscillant radialement relativement au centre de la piste magnétique annulaire 306 et supportant deux éléments de couplage 326 et 328 rigidement fixés à cette plaquette. Ces deux éléments de couplage sont formés par deux plages

aimantées 326 et 328 qui s'étendent chacune sur une distance angulaire au niveau du cercle 312 sensiblement égale à une demi-période  $P_0/2$  de la piste magnétique 306 et sont décalés angulairement d'une demi-période (déphasage de  $180^\circ$ ). De plus, ils sont décalés radialement de manière que le bord angulaire intérieur de la plage aimantée 328 et le bord angulaire extérieur de la plage aimantée 326 suivent en projection axiale le cercle de position zéro 312 lorsque le résonateur est dans une position de repos. Le matériau aimanté formant les deux éléments de couplage présente un paramètre physique corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur. Sur au moins une certaine distance angulaire de chaque élément de couplage, ce paramètre physique augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive de sorte que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur soit angulairement croissante lors d'une rotation relative. Le paramètre physique est une distance entre la surface inférieure de la plaquette 324 et un plan géométrique général 325 de cette plaquette. Ce plan géométrique général est parallèle à la surface supérieure de la structure magnétique 304 et donc au plan général de cette dernière. De plus, le trajet de cette plaquette lorsqu'elle oscille est également parallèle à ce plan 325. Dans le cas d'une inversion technique, on remarquera que cette énergie potentielle doit augmenter dans le sens de la rotation relative de la structure magnétique 304, comme représenté dans la coupe de la Figure 36 où les aimants couplés sont agencés en répulsion.

**[0084]** On notera que les zones magnétiques d'une variante du dispositif régulateur de la Figure 35 peuvent être obtenues par une symétrie axiale, selon un axe radial situé au milieu d'une période angulaire et au milieu de la piste annulaire et de l'organe de couplage, d'une période angulaire des deux pistes magnétiques 52 et 53 et de l'organe de couplage 50 de la Figure 5. Ensuite, cet organe magnétique ainsi transféré est reproduit à chaque période de la piste magnétique. Le résultat n'est toutefois pas optimal pour ce qui concerne la variation du paramètre physique considéré du matériau aimanté dans les zones d'accumulation d'énergie potentielle. Ainsi, dans la variante préférée représentée à la Figure 35, les zones aimantées 326 et 328 ont été modifiées suite à la symétrie axiale pour que l'énergie potentielle magnétique dans chaque zone d'accumulation ne présente sensiblement aucune variation selon le degré de liberté utile du résonateur. C'est pourquoi, à la Figure 35, la variation du paramètre physique considéré est prévue perpendiculaire à la direction d'oscillation de la plaquette 324. L'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur est ainsi similaire à celle décrite précédemment à l'aide des Figures 7, 8 et 9A-9C.

**[0085]** On remarquera que toute réalisation décrite précédemment, avec au moins une piste magnétique étendue radialement et un résonateur comprenant un élément de couplage de faible dimension radiale ou plusieurs tels éléments de couplage décalés d'un nombre

entier de périodes angulaires, peut engendrer une réalisation inverse en appliquant pour chaque élément de couplage la présente méthode dans laquelle on transfère selon le cas un seul secteur annulaire (une demi-période magnétique) comme à la Figure 34 ou deux secteurs annulaires (une période magnétique) comme à la Figure 35. Un avantage du dispositif régulateur selon le douzième mode de réalisation découle du fait que les zones magnétiques étendues 326 et 328 sont sur le résonateur et peuvent ainsi présenter de mêmes dimensions, une variation linéaire identique du paramètre physique considéré pour engendrer des rampes d'accumulation d'énergie potentielle magnétique, et des bords latéraux avec une courbe exactement selon le degré de liberté de l'organe de couplage. Un autre avantage est la plus grande simplicité de fabrication de l'oscillateur. En effet, pour obtenir le potentiel magnétique périodique souhaité, on peut fabriquer une structure magnétique (roue avec au moins une piste magnétique) qui soit sans variation d'un paramètre physique du matériau magnétique qui la forme; car il suffit ici de former le ou les élément(s) de couplage étendu(s) du résonateur avec un matériau magnétique présentant une variation angulaire d'un paramètre physique corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur. Ceci est plus aisé à réaliser vu le nombre plus limité d'éléments de couplage du résonateur relativement au nombre de périodes angulaires de la ou des piste(s) annulaire(s) magnétique(s).

**[0086]** A la Figure 37 est représentée une variante de la Figure 35. Le dispositif régulateur 330 se distingue par le fait que les deux éléments de couplage 326A et 328A agencés sur la plaquette 324A du résonateur 322A présentent à leur extrémité faisant face à la structure magnétique une zone ayant une forme carrée ou rectangulaire en projection axiale dans un plan parallèle à la piste magnétique. En particulier, le bord angulaire intérieur de la zone annulaire 328A et le bord angulaire extérieur de la zone annulaire 326A sont rectilignes. Dans la mesure où la période angulaire reste relativement petite, en particulier inférieure à  $45^\circ$ , cette variante est fonctionnellement très proche de celle de la Figure 35 en réglant au mieux la position de repos du résonateur relativement à la piste magnétique annulaire. On peut ainsi obtenir également un bon isochronisme et une plage de fonctionnement correct qui est relativement étendue.

**[0087]** Les Figures 38 et 38A concernent un treizième mode de réalisation de l'invention dans lequel il est prévu une interaction magnétique en attraction. Dans ce cas, il est nécessaire d'introduire un matériau magnétique dans les zones situées radialement en face des zones d'accumulation d'énergie, de l'autre côté du cercle de position zéro, pour que ces zones présentent une énergie potentielle magnétique inférieure ou minimale. Le dispositif régulateur 332 comprend une piste magnétique annulaire 306 décrite précédemment et un résonateur 334 représenté schématiquement, ce dernier comprenant une plaquette 336 en matériau ferromagnétique qui os-

cille à la fréquence de résonance prévue. La plaquette 336 s'étend dans un plan général 325 et comprend deux zones 326B et 328B dont la distance à ce plan général, respectivement l'entrefer avec la piste magnétique augmente dans le sens de rotation de cette piste magnétique pour engendrer chacune une zone d'accumulation d'énergie potentielle sur une distance angulaire relativement importante. De plus, cette plaquette comprend deux zones complémentaires 337 et 338 formées également par le matériau ferromagnétique et présentant un entrefer minimum avec la piste magnétique. Ainsi il est possible d'obtenir les impulsions pour entretenir l'oscillation du résonateur 334. On remarquera que la dimension angulaire de la plaquette est prévue de préférence égale à la distance linéaire entre les centres de deux aimants 308 successifs. Ceci résout un problème lié au fait que hors de la zone de superposition avec la plaquette, les aimants présentent une haute énergie potentielle. En effet, avec une telle distance angulaire, simultanément à la sortie d'un aimant de la région de superposition il y a l'entrée d'un aimant suivant dans cette zone de superposition de sorte que les forces angulaires sur la plaquette 336 s'annulent. On comprend donc qu'il est possible d'effectuer une inversion technique pour les dix premiers modes de réalisation et leurs variantes envisageables.

**[0088]** A la Figure 39 est représenté schématiquement un quatorzième mode de réalisation en appliquant la méthode d'inversion technique exposée ci-avant au dispositif régulateur de la Figure 24. On obtient ainsi un dispositif régulateur 340 avec un résonateur 174A formé par un diapason 176A présentant à ses deux extrémités libres deux plaquettes magnétiques 344 et 345 similaires à la plaquette 324A de la Figure 37 ou à la plaquette 336 de la Figure 38. Les deux plaquettes 344 et 345 oscillent en sens opposé et comprennent chacune deux éléments de couplage similaires aux zones magnétiques 326A et 328A, respectivement 326B et 328B dans une variante, des Figures 37 et 38. La structure magnétique 304 correspond à celle décrite précédemment. Dans une variante avantageuse dans laquelle le diapason est parfaitement symétrique (en faisant subir une symétrie axiale à l'une des deux plaquettes selon un axe de symétrie sensiblement tangent au cercle de position zéro), il faut prévoir un nombre impair d'éléments de couplages 308 sur la roue 304.

**[0089]** La Figure 40 représente un quinzième mode de réalisation du type décrit dès la Figure 34. Ce mode de réalisation concerne un cas avec deux pistes magnétiques concentriques de faible dimension radiale sur la structure. Le dispositif régulateur 350 est fonctionnellement similaire à la réalisation de la Figure 32. Ce dispositif régulateur 350 est formé par un oscillateur comprenant un résonateur 352 du type balancier-spiral et une structure magnétique 358 formant une roue entraînée en rotation autour de l'axe géométrique 51 par un couple moteur fourni par le mouvement horloger dans lequel ce dispositif régulateur est incorporé. Le résonateur a donc un spiral 162 ou autre élément élastique approprié et un

balancier 160D ayant deux bras dont les deux extrémités libres respectives portent respectivement deux éléments de couplage 354 et 356. Chaque élément de couplage est formé par une zone aimantée similaire à l'élément 310 de la Figure 34. La structure magnétique 358 comprend une première piste magnétique 306 déjà décrite et encore une deuxième piste magnétique 360 concentrique à la première piste magnétique et formée par une pluralité d'aimants 362 répartis régulièrement avec une période angulaire identique à celle de la première piste magnétique mais avec un décalage angulaire d'une demi-période ; ces deux pistes présentant ainsi un déphasage de 180°. Dans la variante représentée, les aimants 308 et 362 sont agencés en répulsion relativement aux deux zones aimantées 354 et 356. Les première et deuxième pistes magnétiques sont agencées de manière que deux cercles de position zéro 312 et 312A sont sensiblement situés respectivement à la perpendiculaire des bords angulaires intérieur et extérieur de chacune des deux zones aimantées 354 et 356. Ces deux zones aimantées sont décalées d'un angle  $\theta_D = P_0 \cdot (2N+1)/2$ , N étant un nombre entier.

**[0090]** On remarquera que l'on obtient la réalisation de la Figure 40 en appliquant la méthode d'inversion technique décrite précédemment en partant de la Figure 32 et en l'appliquant avec un premier bras du balancier portant les aimants 164 et 266. Ensuite, comme les aimants 165 et 267 du second bras sont déphasés de 180° relativement à ceux du premier bras, la zone hachurée de la piste magnétique transférée sur le résonateur doit être déphasée de 180° pour obtenir une situation équivalente avec les aimants déjà agencés sur la structure magnétique par une symétrie axiale appliquée au premier bras. L'interaction magnétique au sein de l'oscillateur est donc équivalente pour les dispositifs des Figures 32 et 40.

**[0091]** Finalement, on notera que l'oscillateur 350 peut aussi être obtenu à partir de l'oscillateur de la Figure 23 à l'aide d'une deuxième méthode consistant à inverser les dimensions des zones magnétiques de la structure magnétique et du résonateur. Chaque zone hachurée des pistes magnétiques est remplacée par un aimant de petite largeur radiale au centre de la zone hachurée et les deux aimants du résonateur sont remplacés par deux zones aimantées ayant sensiblement les dimensions d'un secteur hachuré d'une piste de l'oscillateur de la Figure 23. En utilisant les première et deuxième méthodes d'inversion technique, l'homme du métier peut aisément réaliser d'autres dispositifs régulateurs ayant les plages magnétiques étendues radialement portées par le résonateur.

## Revendications

1. Dispositif régulateur (42;84;112;152;168;172;180;190;196;210;236;260;270;280) de la vitesse angulaire relative ( $\omega$ ) entre une structure magnétique (44;86;114;154;198;214;240,242) et un résonateur

(46;116; 117;119;148;158;158A;158B;158C;174; 182,184;202;238) qui sont couplés magnétiquement de manière à définir ensemble un oscillateur formant ce dispositif régulateur, la structure magnétique comprenant au moins une piste magnétique annulaire centrée sur un axe de rotation (51,51 A) de cette structure magnétique ou du résonateur, la structure magnétique et le résonateur étant agencés pour subir une rotation l'un relativement à l'autre autour dudit axe de rotation lorsqu'un couple moteur est appliqué à la structure magnétique ou au résonateur ; le résonateur comprenant au moins un élément de couplage magnétique (50;126,127;149;164,165; 177, 178;230,231) à ladite piste magnétique annulaire; cette piste magnétique annulaire étant formée au moins partiellement d'un premier matériau magnétique (45) dont au moins un paramètre physique est corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur mais différent de celle-ci, ce premier matériau magnétique étant agencé le long de la piste magnétique annulaire de sorte que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur varie angulairement de manière périodique le long de cette piste magnétique annulaire et qu'il définisse ainsi une période angulaire ( $P_{\theta}$ ) de la piste magnétique annulaire ; ledit élément de couplage magnétique ayant une partie d'extrémité active, située du côté de ladite structure magnétique, qui est couplée magnétiquement à ladite piste magnétique annulaire de manière qu'une oscillation selon un degré de liberté d'un mode de résonance du résonateur est entretenue dans une plage utile du couple moteur appliqué à la structure magnétique ou au résonateur et qu'un nombre entier déterminé de périodes de cette oscillation intervient lors de ladite rotation relative dans chaque période angulaire de la piste magnétique annulaire, la fréquence de ladite oscillation déterminant ainsi ladite vitesse angulaire relative ; ledit résonateur étant agencé relativement à ladite structure magnétique de manière que ladite partie d'extrémité active dudit élément de couplage magnétique est au moins en majeure partie superposée, en projection orthogonale à une surface géométrique générale définie par ladite piste magnétique annulaire, à cette piste magnétique annulaire durant sensiblement une première alternance dans chaque période de ladite oscillation, et de manière que le trajet de l'élément de couplage magnétique lors de cette première alternance est sensiblement parallèle à ladite surface géométrique générale, la piste magnétique annulaire présentant une dimension selon ledit degré de liberté qui est supérieure à la dimension de ladite partie d'extrémité active dudit élément de couplage magnétique selon ce degré de liberté; le dispositif régulateur étant **caractérisé en ce que**, dans ladite plage utile du couple moteur, ladite piste magnétique annulaire et ledit élément de couplage magnétique définissent dans chaque période angu-

laire, en fonction de leur position relative définie par leur position angulaire relative et la position de l'élément de couplage selon son degré de liberté, une zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique (63, 65) dans l'oscillateur ; et **en ce que** ledit premier matériau magnétique est agencé dans chaque période angulaire de manière que, au moins dans une zone de ce premier matériau magnétique couplée magnétiquement au moins partiellement à ladite partie d'extrémité active pour des positions relatives de l'élément de couplage magnétique par rapport à la piste magnétique annulaire correspondant à au moins une partie de la zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans cette période angulaire, ledit paramètre physique augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive.

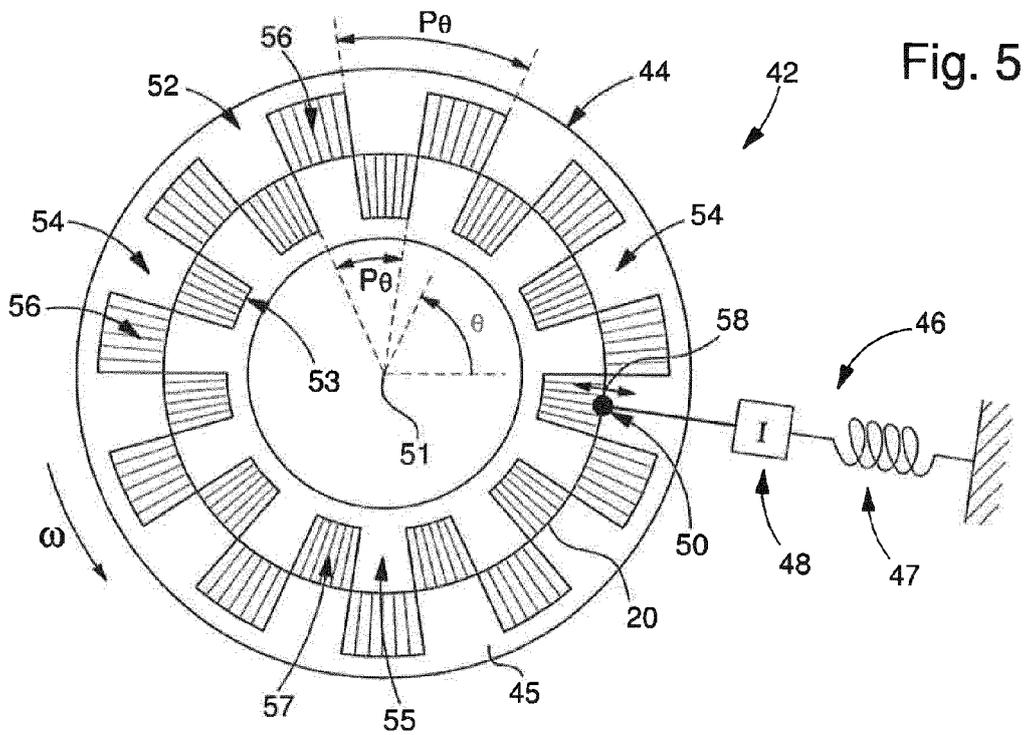
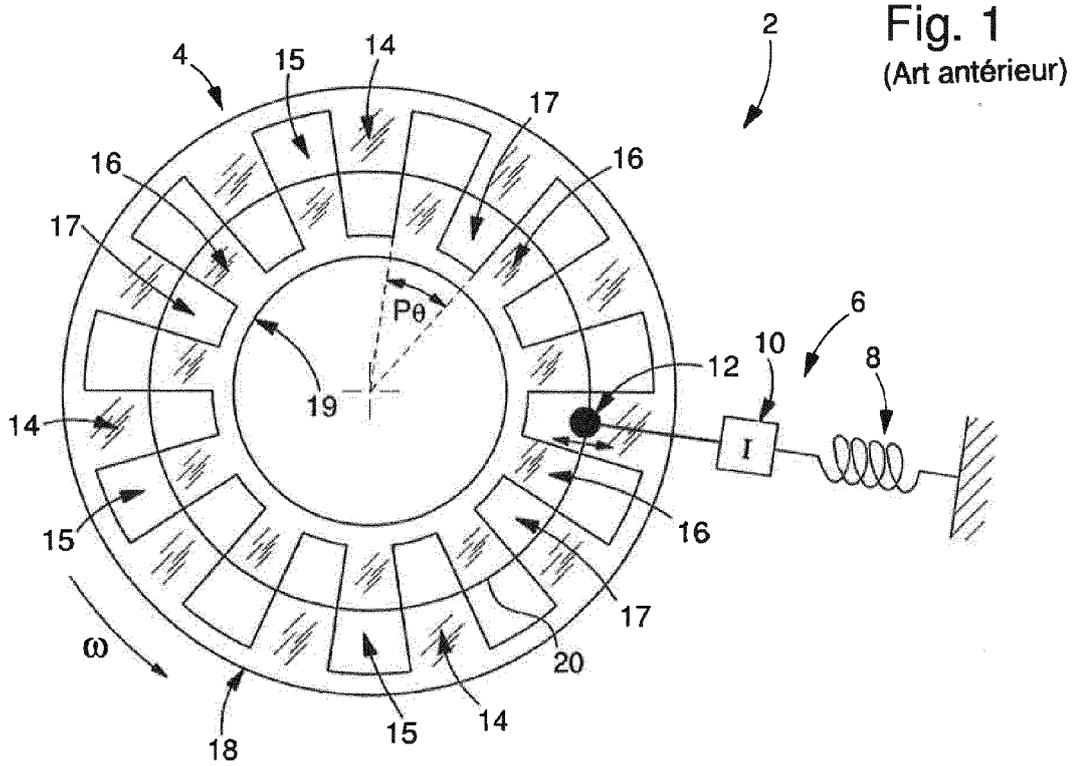
2. Dispositif régulateur (300;320;330;340;350) de la vitesse angulaire relative ( $\omega$ ) entre une structure magnétique (304;358) et un résonateur (302;322; 322A;174A;352) couplés magnétiquement de manière à définir ensemble un oscillateur formant ce dispositif régulateur, la structure magnétique comprenant au moins une piste magnétique annulaire centrée sur un axe de rotation (51) de cette structure magnétique et le résonateur étant agencés pour subir une rotation l'un relativement à l'autre autour dudit axe de rotation lorsqu'un couple moteur est appliqué à la structure magnétique ou au résonateur ; le résonateur comprenant au moins un élément de couplage magnétique (310;326,328;326A,328A; 344,345; 354,356) à ladite piste magnétique annulaire, cette piste magnétique annulaire étant formée au moins partiellement d'un premier matériau magnétique agencé de sorte que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur varie angulairement de manière périodique le long de la piste magnétique annulaire et qu'il définisse ainsi une période angulaire ( $P_{\theta}$ ) de cette piste magnétique annulaire ; ledit élément de couplage magnétique ayant une partie d'extrémité active, située du côté de ladite structure magnétique, qui est formée d'un deuxième matériau magnétique, dont au moins un paramètre physique est corrélé à l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur mais différent de celle-ci, et qui est couplée magnétiquement à la piste magnétique annulaire de manière qu'une oscillation selon un degré de liberté d'un mode de résonance du résonateur est entretenue dans une plage utile du couple moteur appliqué à la structure magnétique ou au résonateur et qu'un nombre entier déterminé de périodes de cette oscillation intervient lors de ladite rotation relative dans chaque période angulaire de la piste magnétique annulaire, la fréquence de ladite oscillation déterminant ainsi ladite vitesse angulaire relative; le dispositif régulateur étant **caractérisé en ce que**

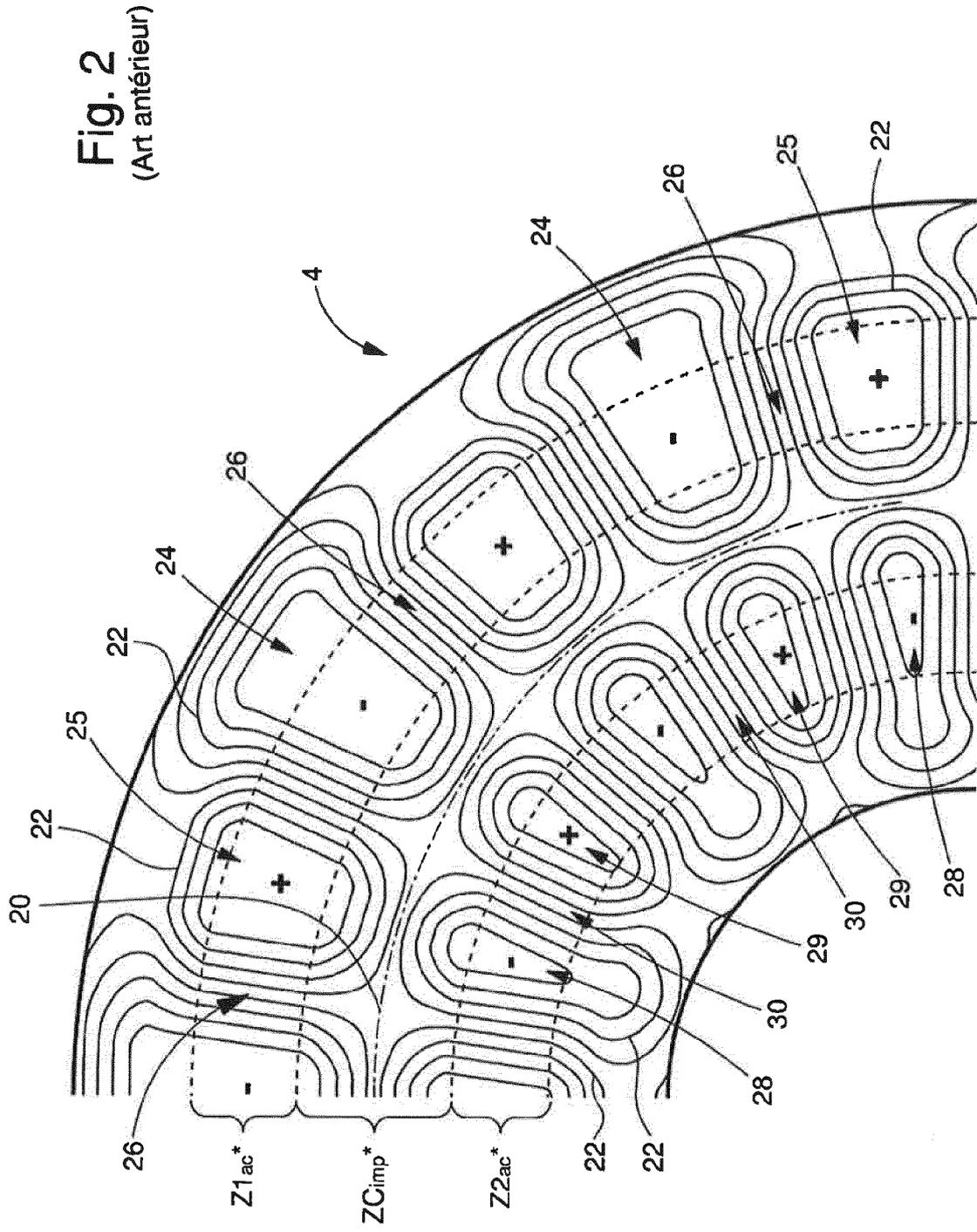
- ladite piste magnétique annulaire présente une dimension selon ledit degré de liberté de l'élément de couplage magnétique qui est inférieure à la dimension, selon ce degré de liberté, de ladite partie d'extrémité active de l'élément de couplage magnétique; **en ce que** le résonateur est agencé relativement à la structure magnétique de manière que ladite partie d'extrémité active est traversée, en projection orthogonale à une surface géométrique générale définie par cette partie d'extrémité active, par un cercle géométrique passant par le milieu de la piste magnétique annulaire durant sensiblement une première alternance dans chaque période de ladite oscillation; **en ce que**, dans ladite plage utile du couple moteur, ladite piste magnétique annulaire et ledit élément de couplage magnétique définissent dans chaque période angulaire, en fonction de leur position relative définie par leur position angulaire relative et la position de l'élément de couplage selon son degré de liberté, une zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique (63, 65) dans l'oscillateur ; **et en ce que** ledit deuxième matériau magnétique est agencé de manière que, au moins dans une zone de ce deuxième matériau magnétique couplée magnétiquement au moins partiellement à ladite piste magnétique annulaire pour les positions relatives de cette piste magnétique annulaire par rapport à l'élément de couplage magnétique correspondant à au moins une partie de la zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans chaque période angulaire, ledit paramètre physique augmente angulairement de manière progressive ou diminue angulairement de manière progressive.
3. Dispositif régulateur selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** ledit élément de couplage magnétique et ladite piste magnétique annulaire sont agencés de manière que l'élément de couplage magnétique reçoit lors de ladite rotation relative des impulsions selon son degré de liberté autour d'une position de repos de cet élément de couplage magnétique, ces impulsions définissant, en fonction de ladite position relative de l'élément de couplage magnétique et de la piste magnétique annulaire et pour ladite plage utile du couple moteur fourni au dispositif régulateur, des zones d'impulsion (68, 69) qui sont sensiblement localisées dans une zone centrale d'impulsions adjacente aux zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique.
  4. Dispositif régulateur selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** ladite structure magnétique est agencée de manière que le gradient angulaire moyen de ladite énergie potentielle magnétique dans lesdites zones d'accumulation de celle-ci est inférieur au gradient moyen de cette énergie potentielle magnétique dans lesdites zones d'impulsion selon ledit degré de liberté et dans une même unité.
  5. Dispositif régulateur selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** le rapport dudit gradient angulaire moyen et dudit gradient moyen selon ledit degré de liberté est inférieur à soixante pourcent (60%).
  6. Dispositif régulateur selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** le rapport dudit gradient angulaire moyen et dudit gradient moyen selon ledit degré de liberté est sensiblement égal ou inférieur à quarante pourcent (40%).
  7. Dispositif régulateur l'une quelconque des revendications 3 à 6, **caractérisé en ce que** le rapport entre la dimension radiale ( $Z_0$ ) des zones d'impulsion et la dimension radiale ( $Z_1, Z_2$ ) des zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique est inférieur à cinquante pourcents (50%).
  8. Dispositif régulateur l'une quelconque des revendications 3 à 6, **caractérisé en ce que** le rapport entre la dimension radiale ( $Z_0$ ) des zones d'impulsion et la dimension radiale ( $Z_1, Z_2$ ) des zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique est inférieur ou sensiblement égal à trente pourcents (30%).
  9. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'énergie potentielle magnétique dans chaque zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique (63, 65) ne présente sensiblement aucune variation selon le degré de liberté du mode de résonance utile du résonateur.
  10. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'augmentation ou la diminution progressive dudit paramètre physique, dans chaque zone magnétique correspondant à une zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique, s'étend sur une distance angulaire relativement audit axe de rotation qui est supérieure à vingt pourcents (20%) de la période angulaire de ladite piste magnétique annulaire.
  11. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** l'augmentation ou la diminution progressive dudit paramètre physique, dans chaque zone magnétique correspondant à une zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique, s'étend sur une distance angulaire relativement audit axe de rotation qui est supérieure ou sensiblement égale à quarante pourcents (40%) de la période angulaire de ladite piste magnétique annulaire.
  12. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ledit paramètre physique considéré est une distance entre la piste magnétique annulaire et une surface

- de révolution ayant ledit axe de rotation comme axe de révolution et ledit degré de liberté comme génératrice de cette surface de révolution, cette distance correspondant sensiblement, à une constante près, à un entrefer entre ledit élément de couplage magnétique et ladite piste magnétique annulaire.
- 5
13. Dispositif régulateur selon la revendication 1 ou l'une quelconque des revendications 3 à 11 dépendantes de la revendication 1, dans lequel ledit premier matériau magnétique est constitué d'un matériau aimanté, **caractérisé en ce que** ledit paramètre physique considéré est l'intensité du flux du champ magnétique généré par le matériau aimanté entre ladite piste magnétique annulaire et une surface de révolution ayant ledit axe de rotation comme axe de révolution et ledit degré de liberté comme génératrice de cette surface de révolution.
- 10
14. Dispositif régulateur selon la revendication 2 ou l'une quelconque des revendications 3 à 11 dépendantes de la revendication 2, dans lequel ladite partie d'extrémité active est constituée d'un matériau aimanté, **caractérisé en ce que** ledit paramètre physique considéré est l'intensité du flux du champ magnétique généré par le matériau aimanté entre ledit élément de couplage et ladite piste magnétique annulaire.
- 15
- 20
- 25
15. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** la variation dudit paramètre physique est obtenue par une pluralité de trous (104) dans ledit matériau magnétique considéré dont la densité ou/et la surface des sections varie.
- 30
- 35
16. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications 3 à 8 et dans lequel la position de repos de l'élément de couplage définit un cercle de position zéro dans un référentiel lié à la structure magnétique lors d'une rotation relative entre cette structure magnétique et le résonateur, **caractérisé en ce que** ce cercle de position zéro et ledit degré de liberté sont sensiblement orthogonaux à leur point d'intersection.
- 40
- 45
17. Dispositif régulateur selon la revendication 16 dépendante de la revendication 1, **caractérisé en ce que** la variation dudit paramètre physique est seulement angulaire dans des zones dudit premier matériau magnétique correspondant respectivement aux zones d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur.
- 50
18. Dispositif régulateur selon la revendication 16 dépendante de la revendication 2, **caractérisé en ce que** la variation dudit paramètre physique, dans une zone dudit deuxième matériau magnétique corres-
- pondant sensiblement à chaque zone d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'oscillateur, est essentiellement selon une direction linéaire orthogonale audit degré de liberté dudit élément de couplage audit point d'intersection lorsque cet élément de couplage est dans sa position de repos.
19. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes et dans lequel ladite piste magnétique annulaire définit une première piste, **caractérisé en ce que** ladite structure magnétique comprend en outre une deuxième piste magnétique annulaire couplée audit élément de couplage de manière similaire que cet élément de couplage est couplé à la première piste, cette deuxième piste étant formée au moins partiellement d'un matériau magnétique qui présente une variation le long de cette deuxième piste de sorte que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur varie angulairement, avec ladite période angulaire et de manière similaire à la variation de la première piste, le long de cette deuxième piste, les première et deuxième pistes présentant un décalage angulaire égal à la moitié de ladite période angulaire.
20. Dispositif régulateur (236) selon l'une quelconque des revendications 1 à 18 et dans lequel ladite piste magnétique annulaire définit une première piste, **caractérisé en ce qu'**il comprend en outre une deuxième piste magnétique annulaire couplée audit élément de couplage ou à un autre élément de couplage dudit résonateur, de manière similaire que ledit élément de couplage est couplé à la première piste, et formée au moins partiellement d'un matériau magnétique, ce matériau magnétique présentant une variation le long de cette deuxième piste magnétique annulaire de sorte que l'énergie potentielle magnétique de l'oscillateur varie angulairement, de manière similaire à la variation pour la première piste, le long de cette deuxième piste; et **en ce que** les première et deuxième pistes magnétiques annulaires sont respectivement solidaires de deux mobiles.
21. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes et dans lequel ledit élément de couplage est un premier élément de couplage, **caractérisé en ce qu'**il comprend au moins un deuxième élément de couplage également couplé magnétiquement à ladite structure magnétique.
22. Dispositif régulateur selon la revendication 21, **caractérisé en ce que** ledit résonateur (158) est du type balancier-spiral ou balancier à lames flexibles.
23. Dispositif régulateur selon la revendication 21, **caractérisé en ce que** ledit résonateur est formé par un diapason (176) dont les deux extrémités libres de sa structure résonnante portent respectivement les

premier et deuxième éléments de couplage magnétique.

24. Dispositif régulateur selon la revendication 21, **caractérisé en ce que** ledit résonateur (182) comprend une structure sensiblement rigide (185) portant les premier et deuxième éléments de couplage magnétique et associée à un ou respectivement deux élément(s) élastique(s) du résonateur. 5  
10
25. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications 21 à 24 dépendantes de la revendication 3, **caractérisé en ce que** les premier et deuxième éléments de couplage définissent un même cercle de position zéro pour ladite piste magnétique annulaire. 15
26. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications 21 à 24 dépendantes de la revendication 3 elle-même dépendante de la revendication 1, **caractérisé en ce que** les premier et deuxième éléments de couplage définissent pour ladite piste magnétique annulaire respectivement deux cercles de position zéro différents qui sont sensiblement superposés aux cercles intérieur et extérieur définissant cette piste. 20  
25
27. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ledit résonateur définit un premier résonateur (191; 191 A), et **en ce qu'**il comprend au moins un deuxième résonateur (192; 192A) couplé magnétiquement à ladite structure magnétique de manière semblable au premier résonateur. 30  
35
28. Dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** lesdits premier et deuxième matériaux magnétiques sont des matériaux aimantés en répulsion. 40
29. Mouvement horloger **caractérisé en ce qu'**il comprend un dispositif régulateur selon l'une quelconque des revendications précédentes, ce dispositif régulateur définissant un résonateur et un échappement magnétique et servant à régler la marche d'au moins un mécanisme de ce mouvement horloger. 45  
50  
55





**Fig. 3**  
(Art antérieur)

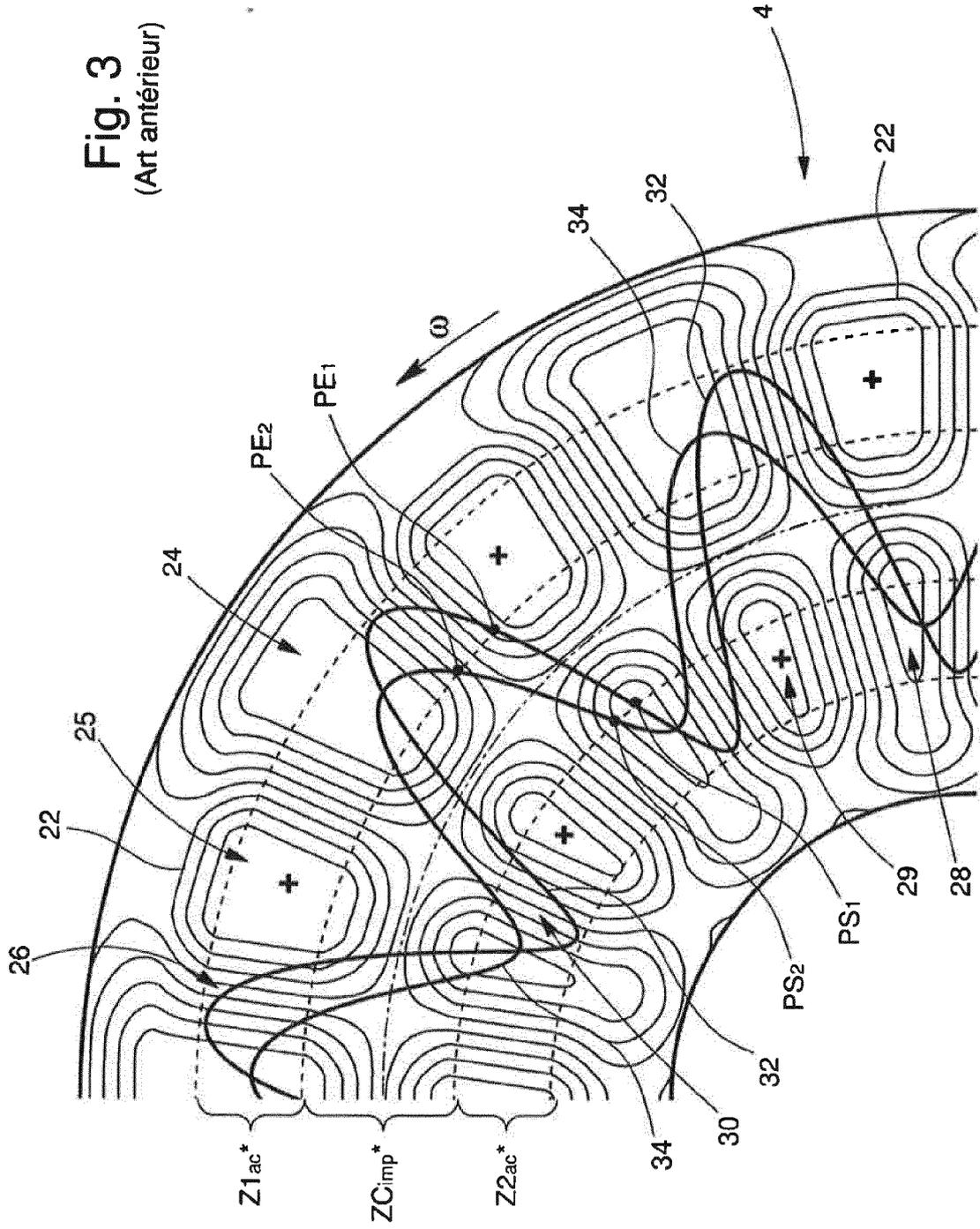


Fig. 4  
(Art antérieur)

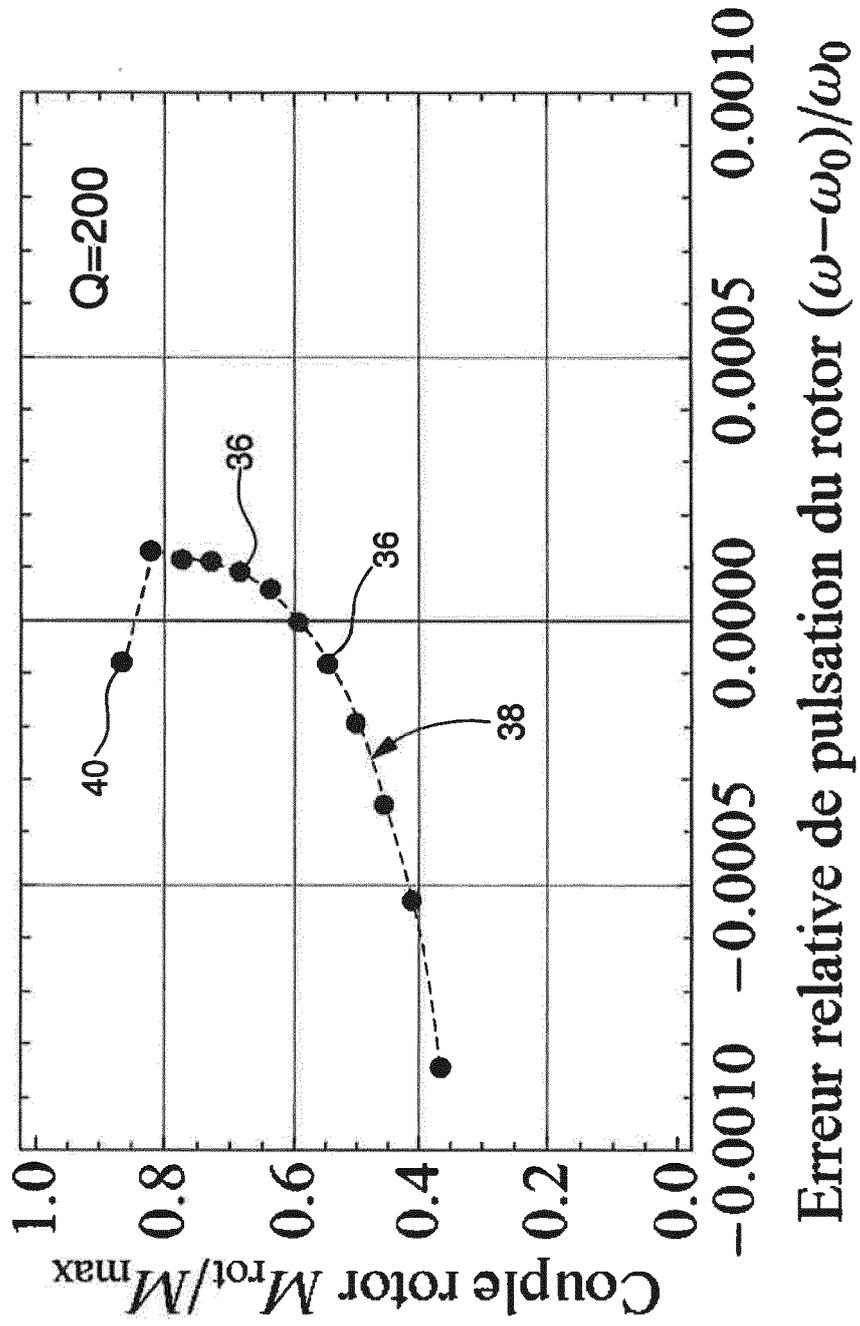


Fig. 6A

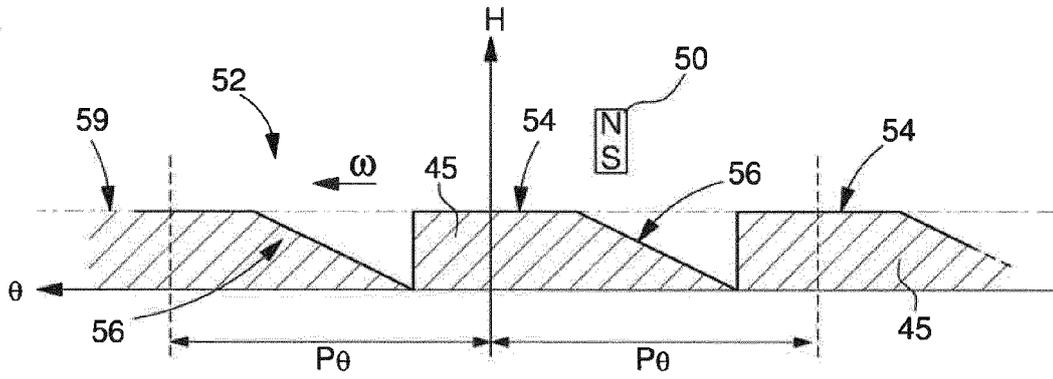


Fig. 6B

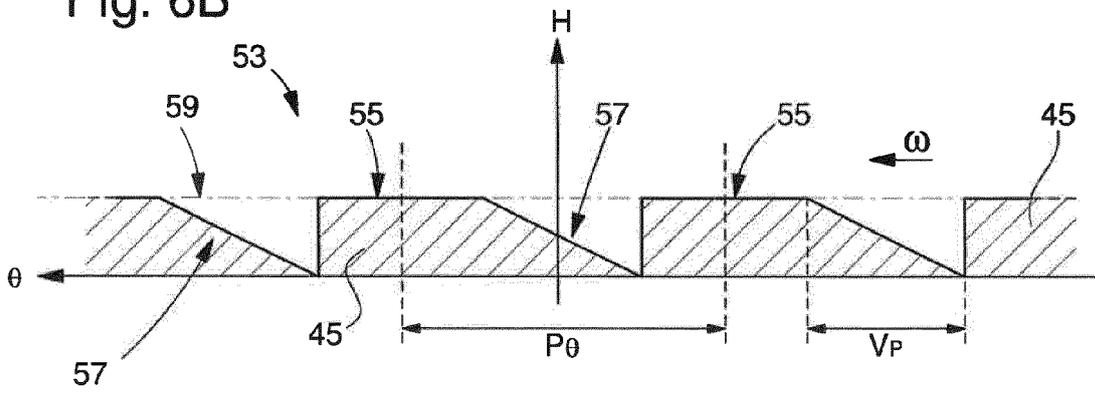


Fig. 13

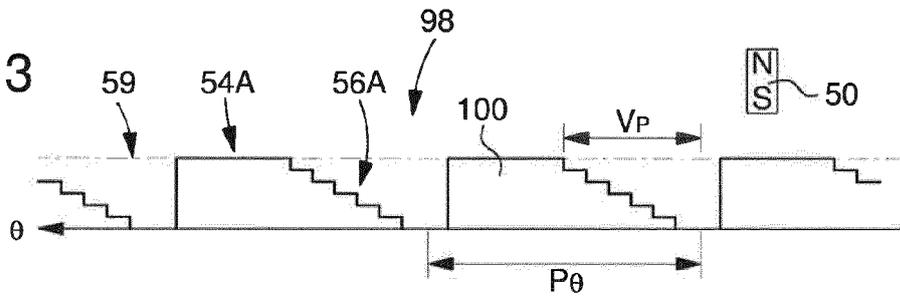


Fig. 14

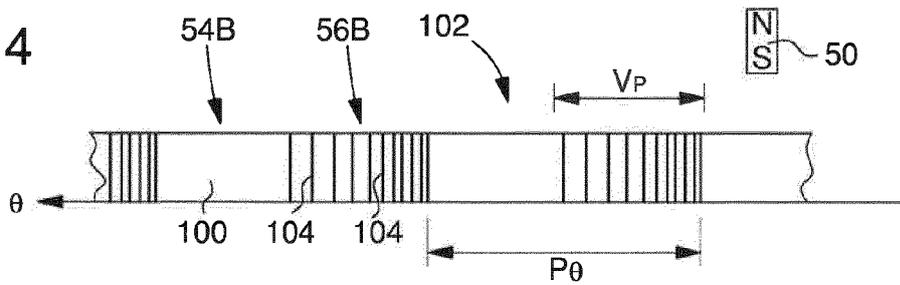


Fig. 7

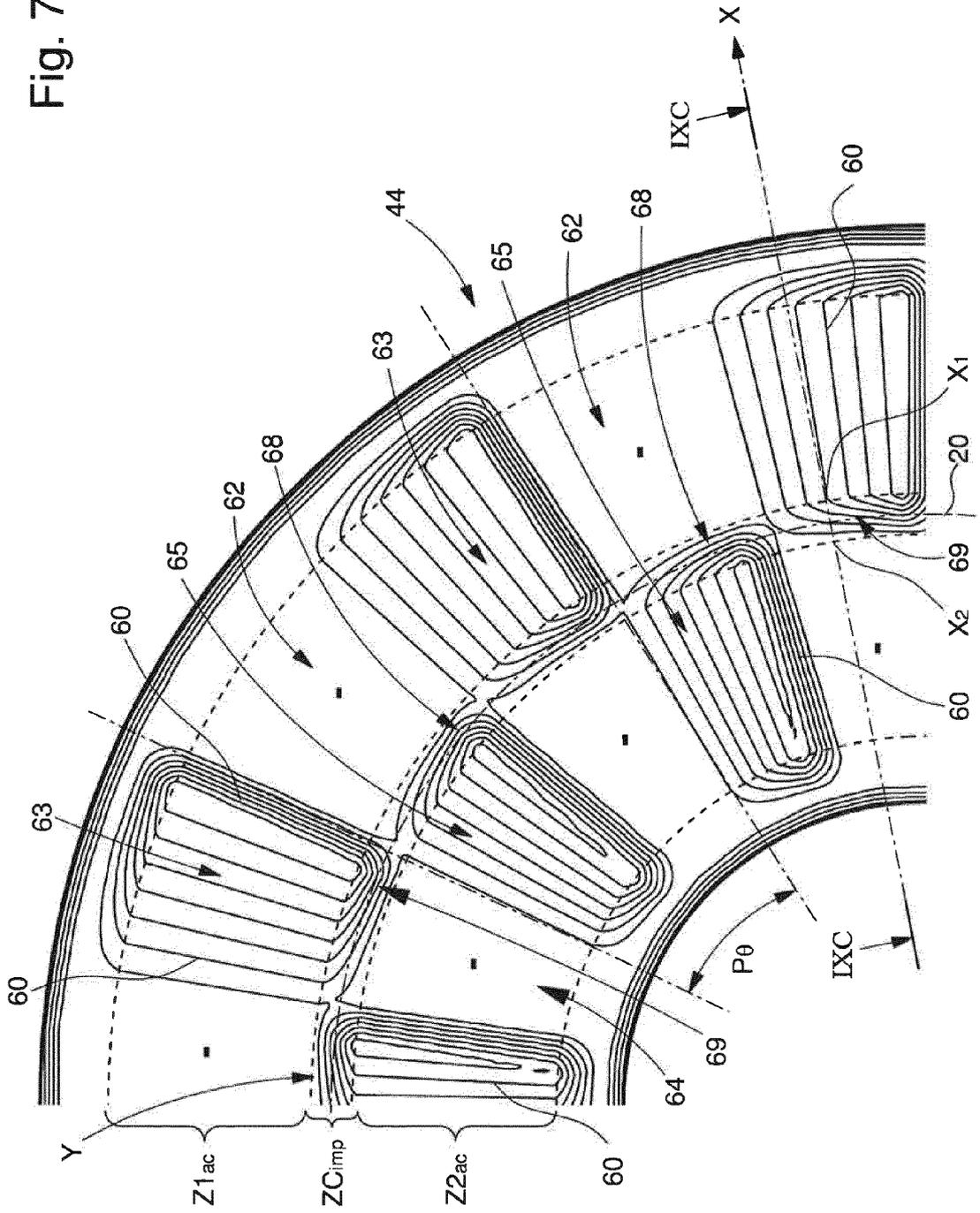
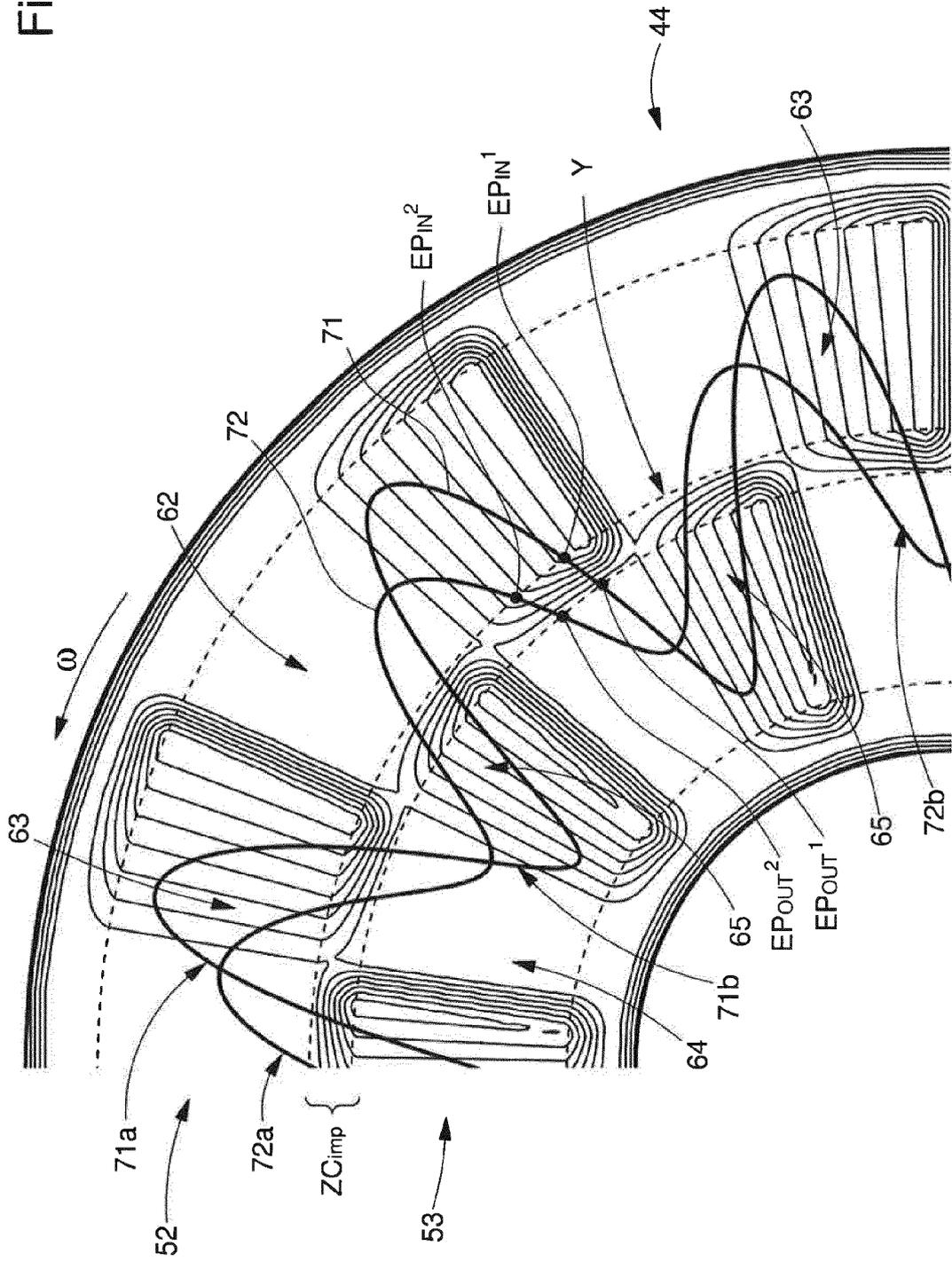


Fig. 8



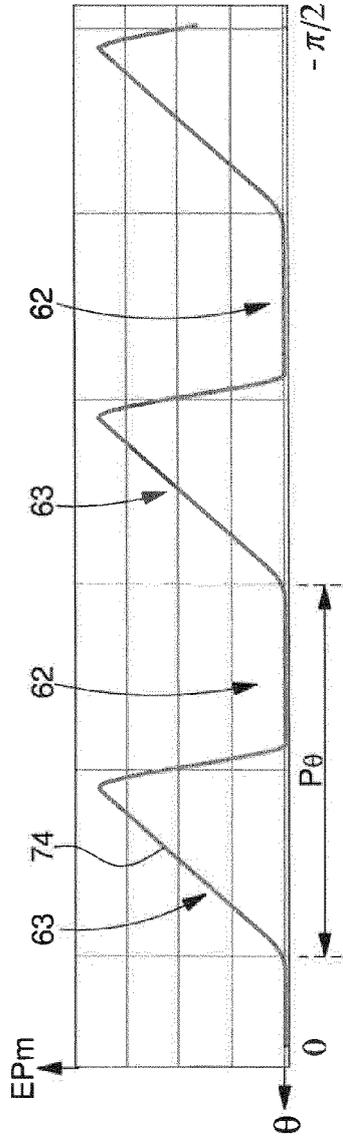


Fig. 9A

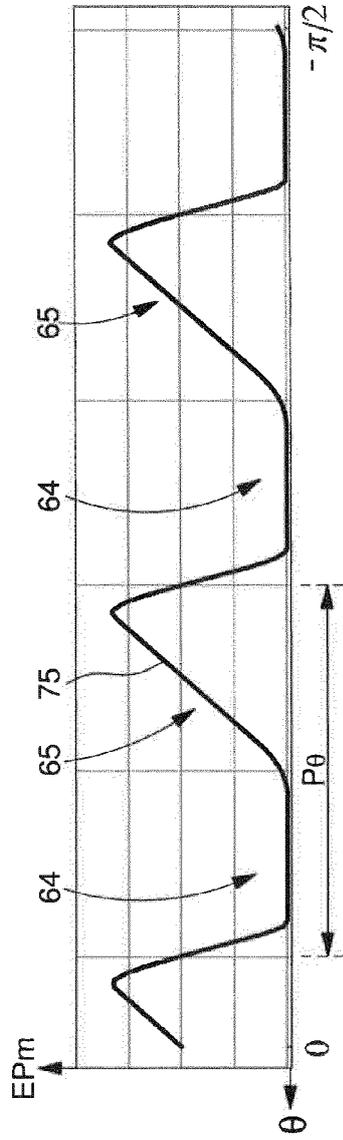


Fig. 9B

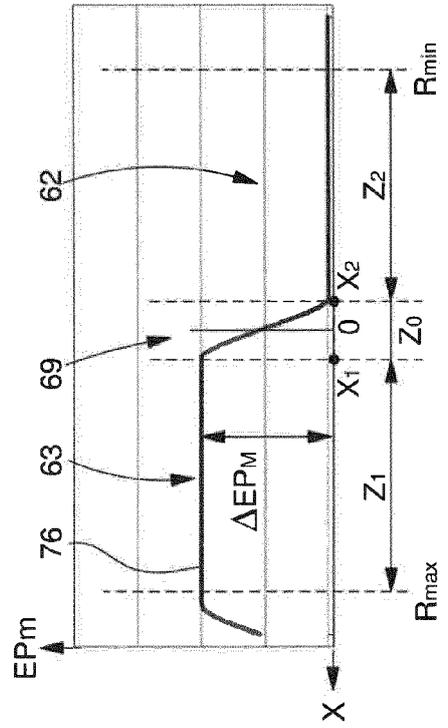


Fig. 9C

Fig. 10

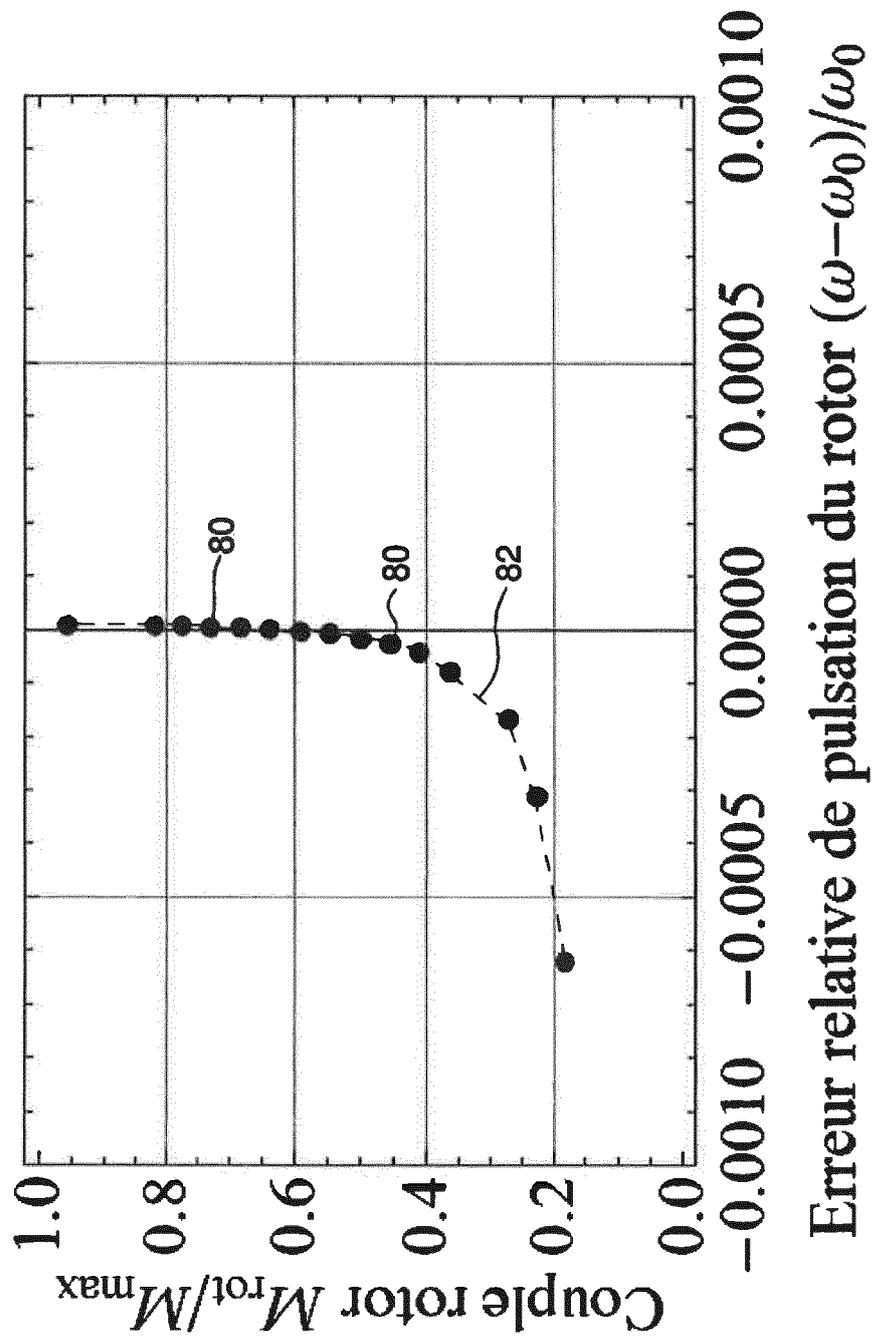


Fig. 11

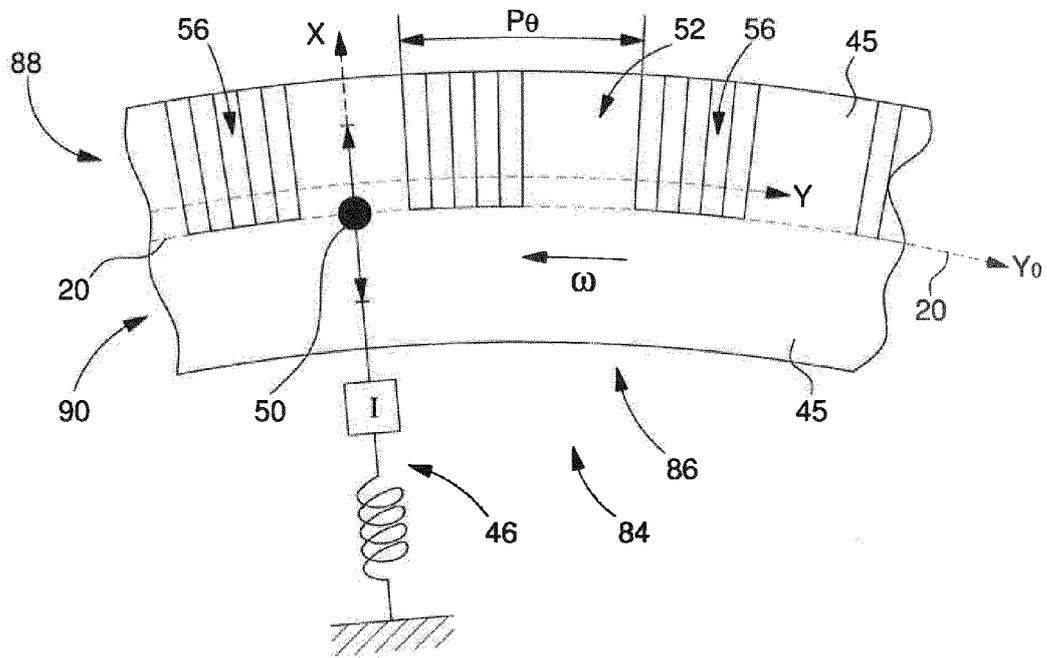


Fig. 12

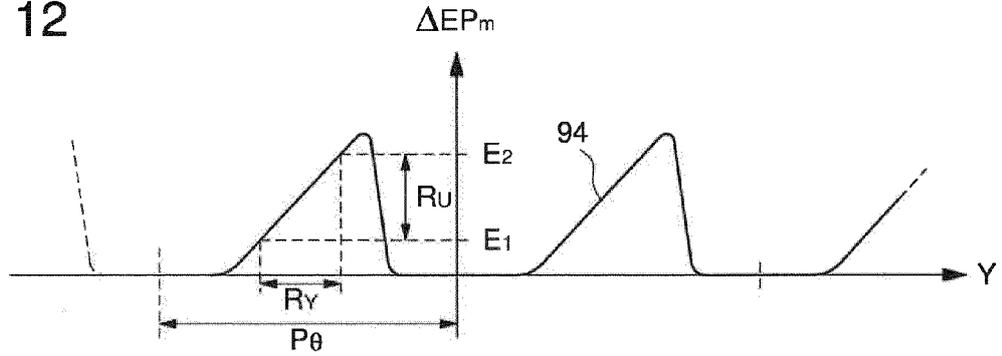


Fig. 15

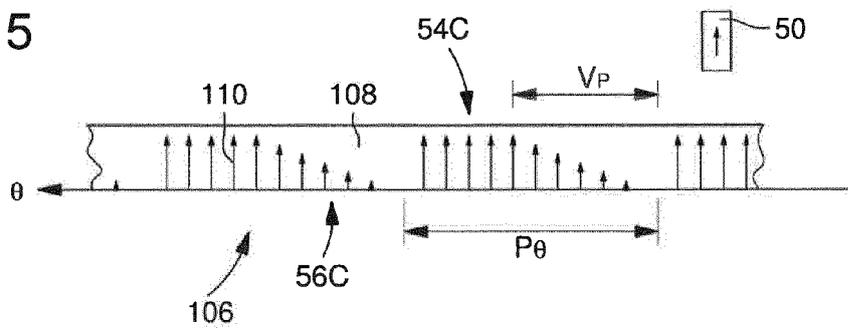


Fig. 16

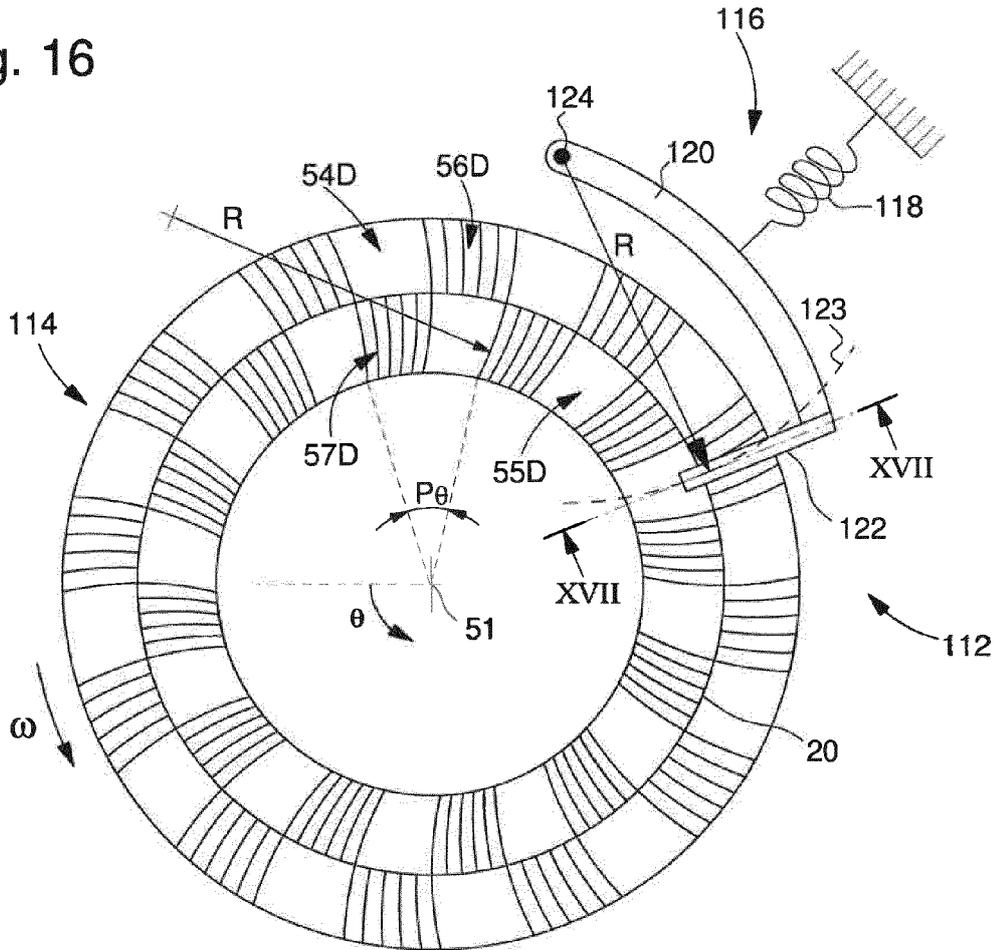


Fig. 17

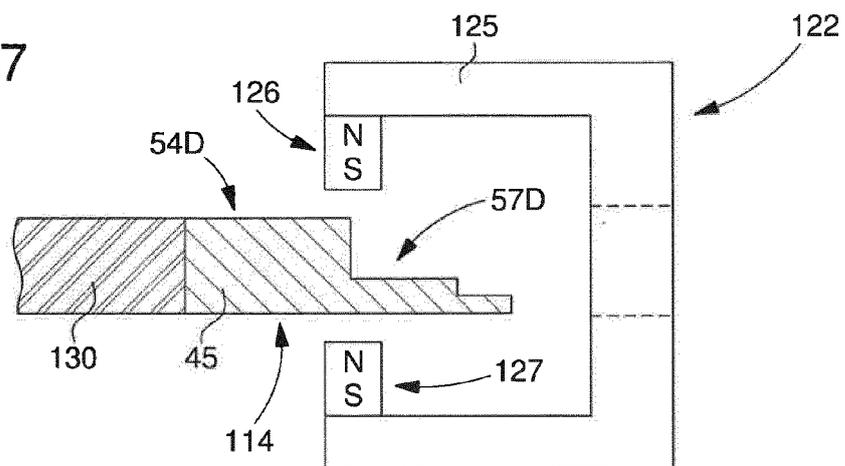


Fig. 18

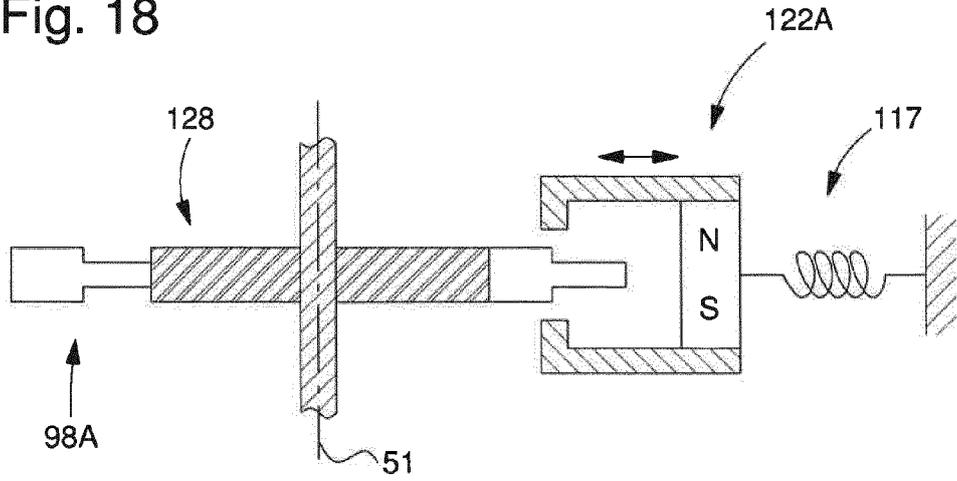


Fig. 19

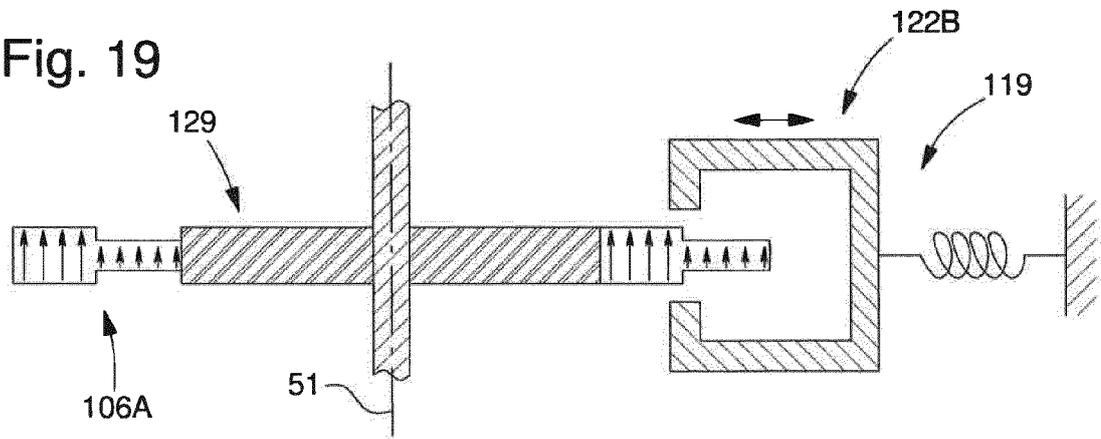


Fig. 20

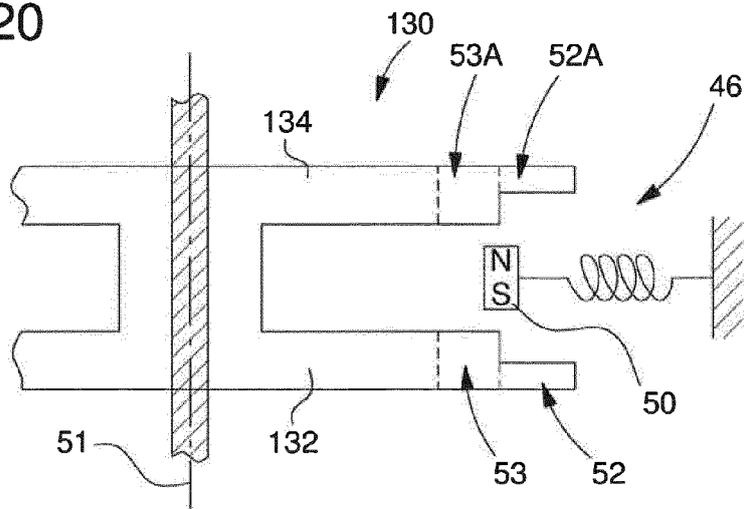


Fig. 21

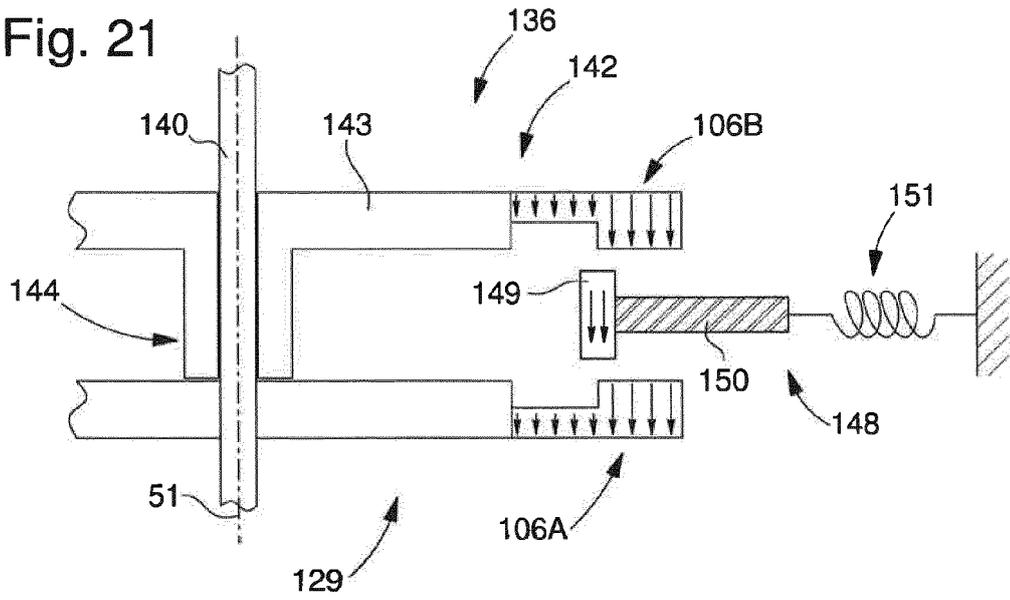


Fig. 22

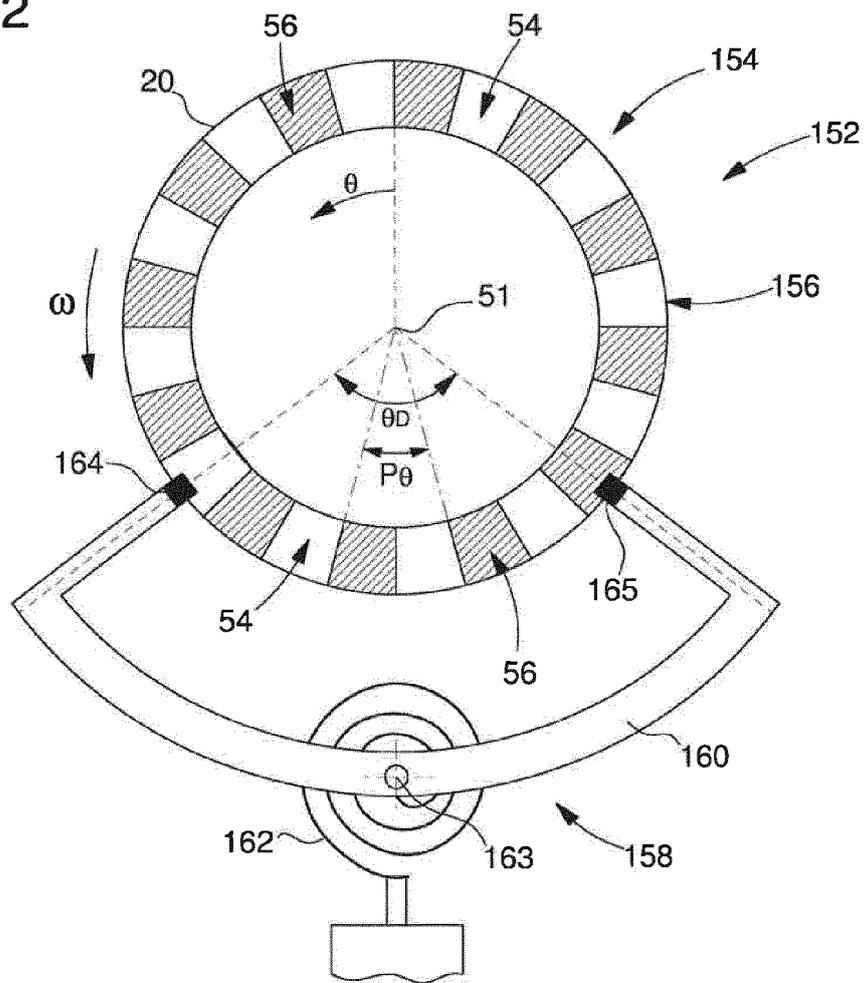




Fig. 25

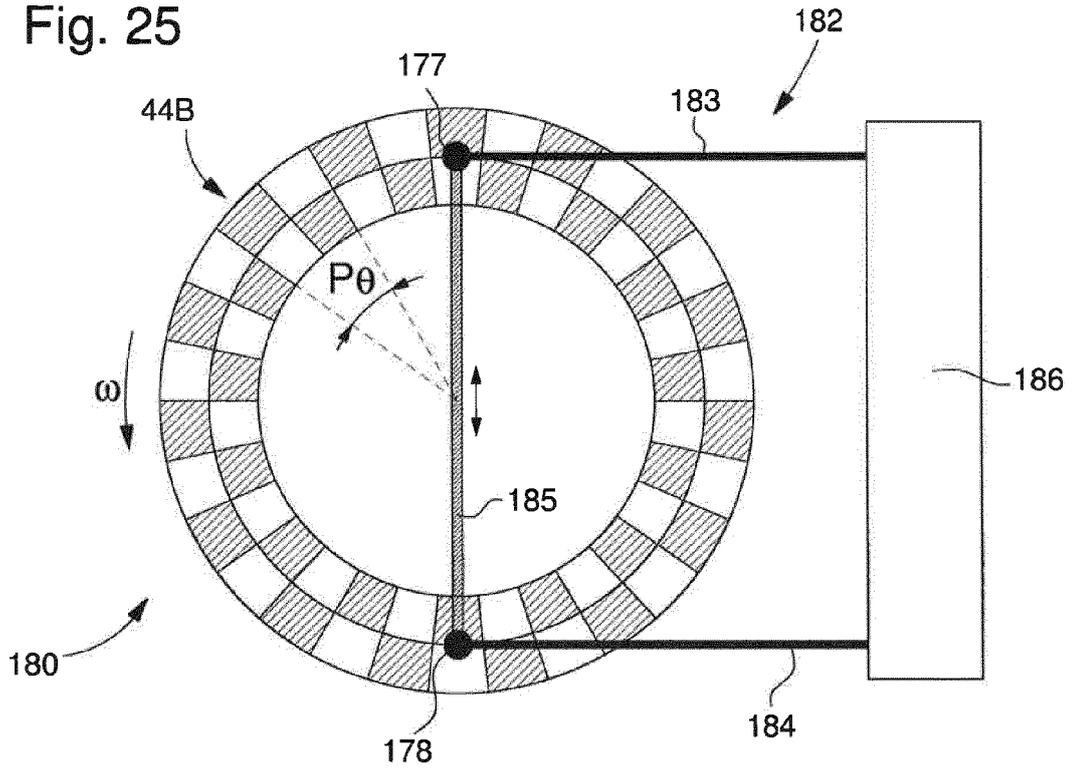


Fig. 26

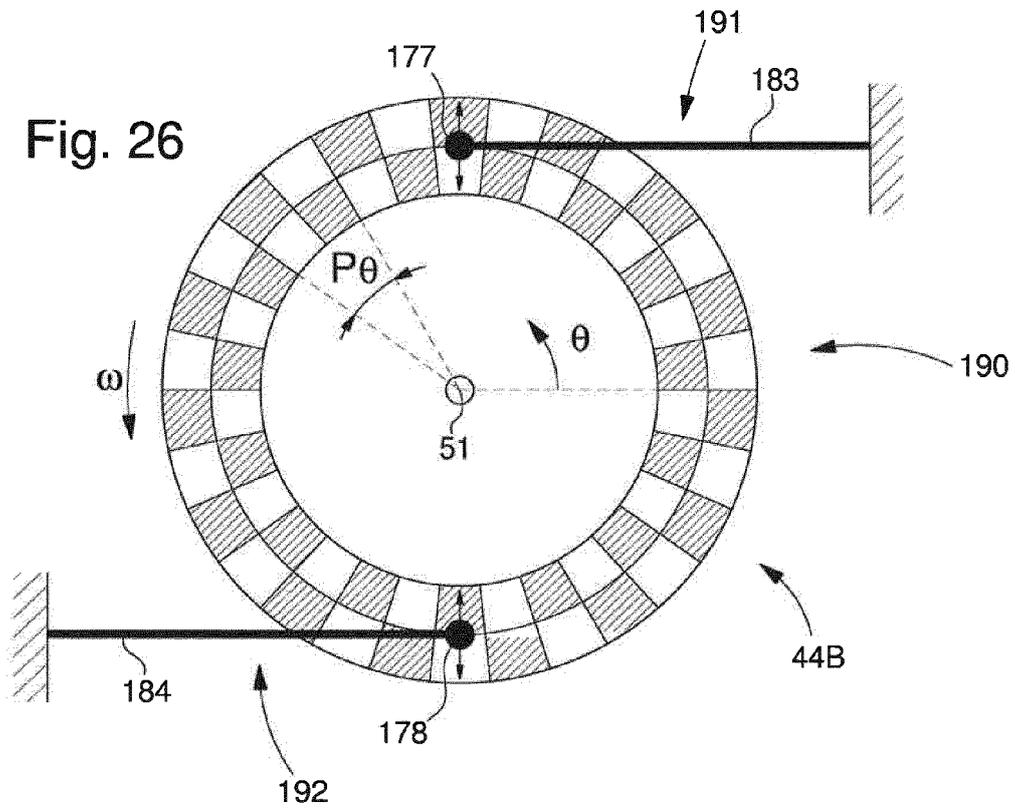




Fig. 30

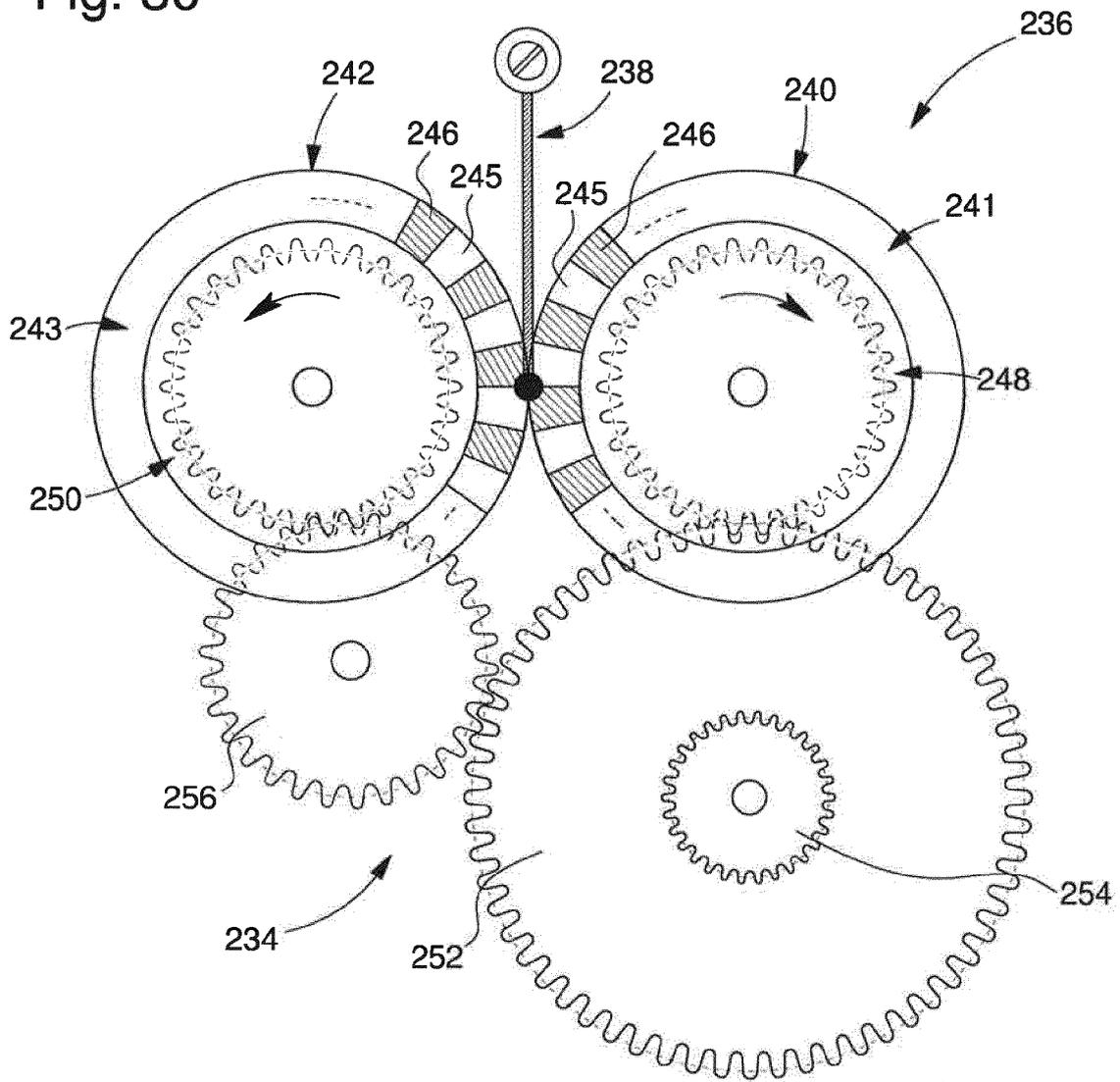


Fig. 32

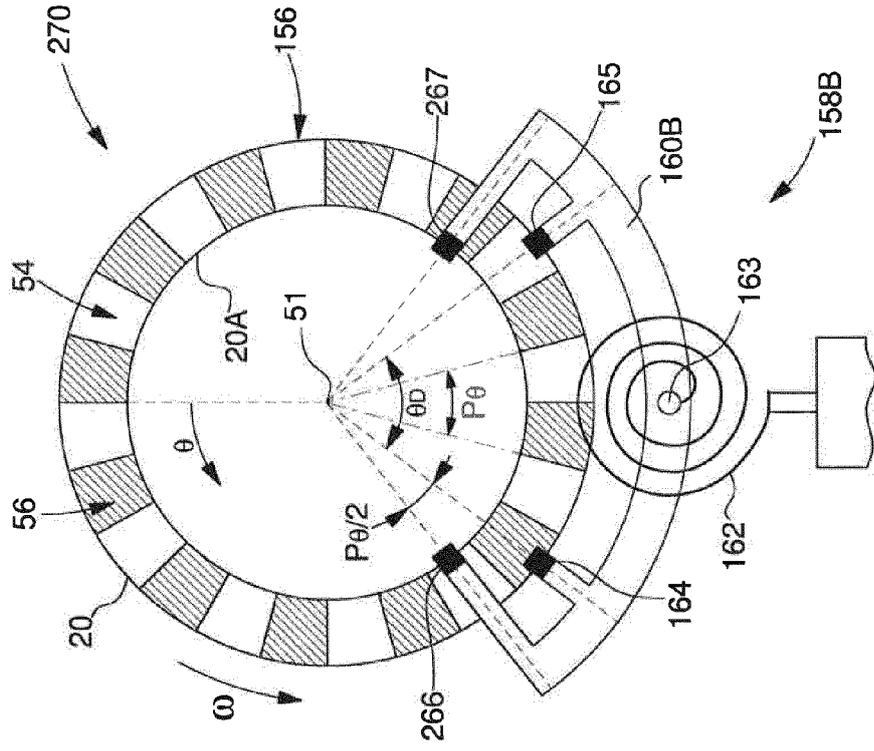
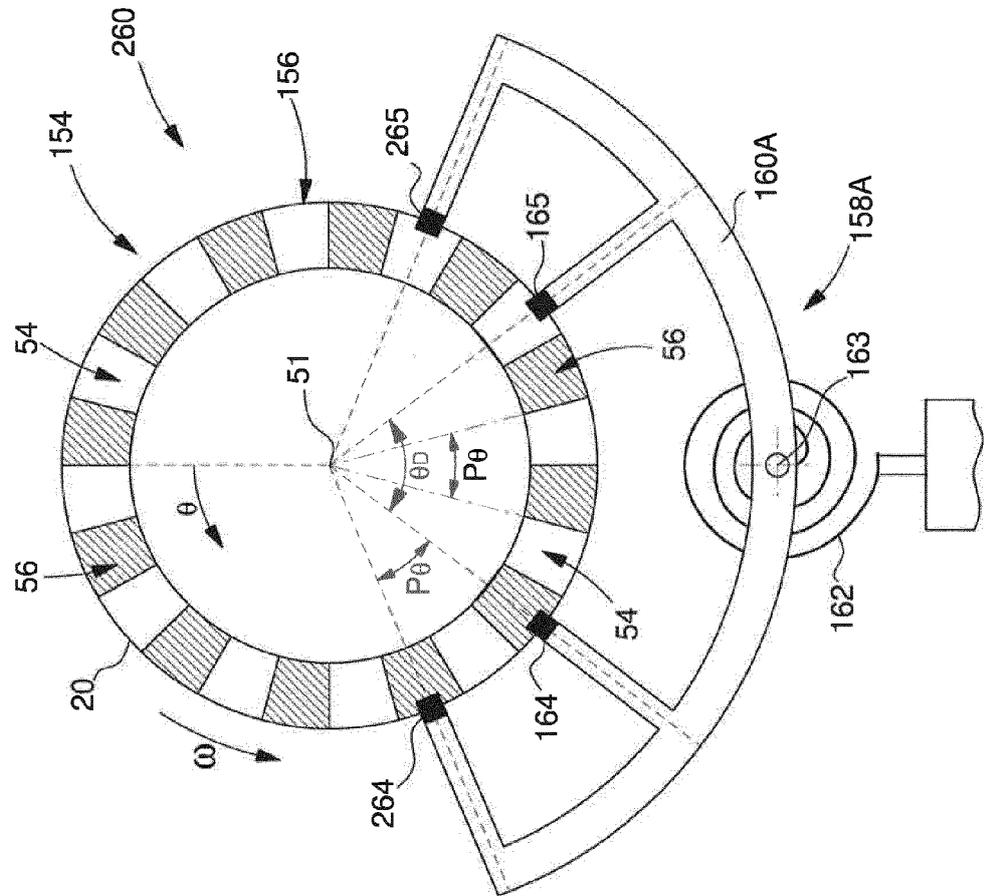


Fig. 31



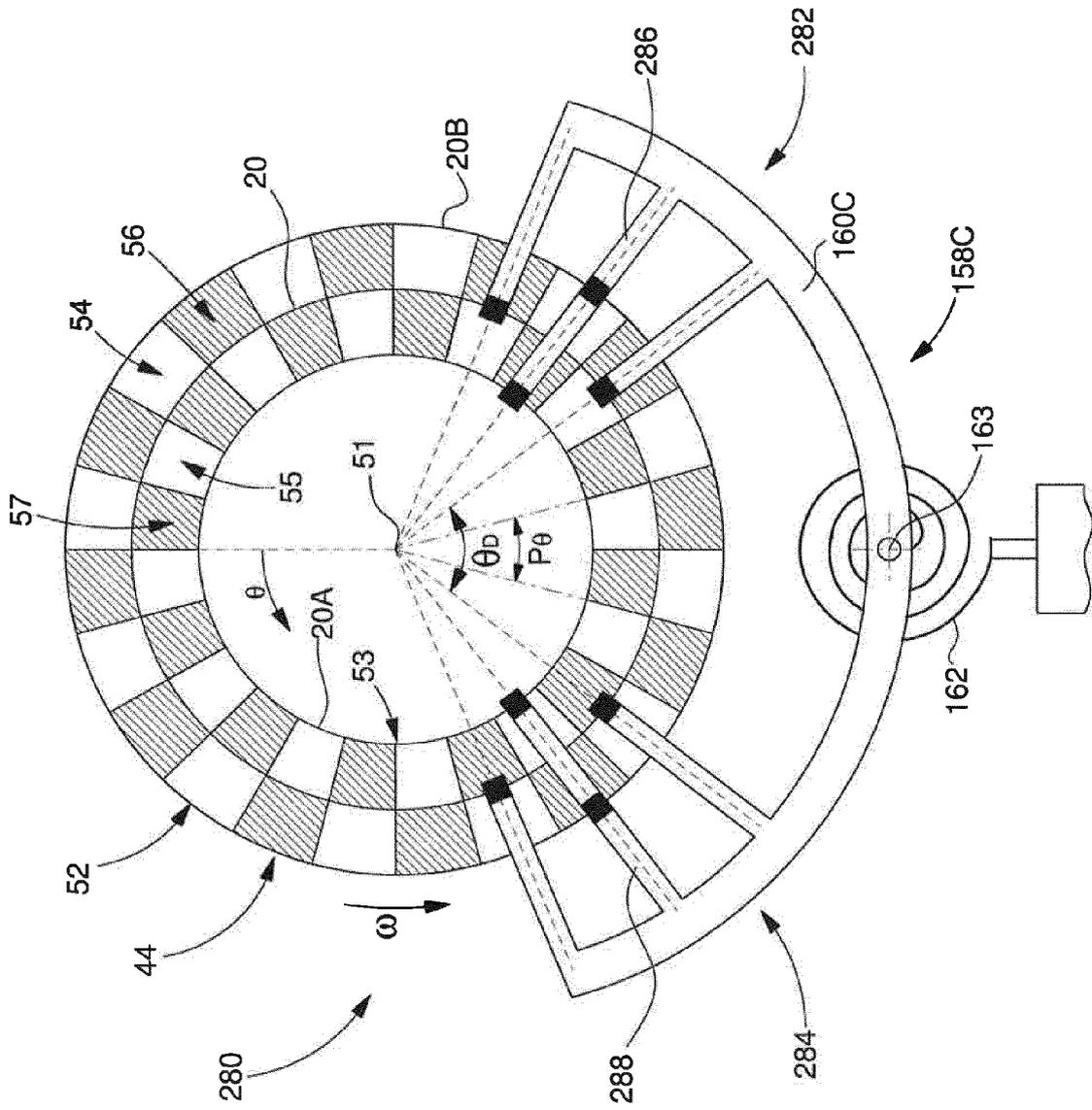


Fig. 33

Fig. 34

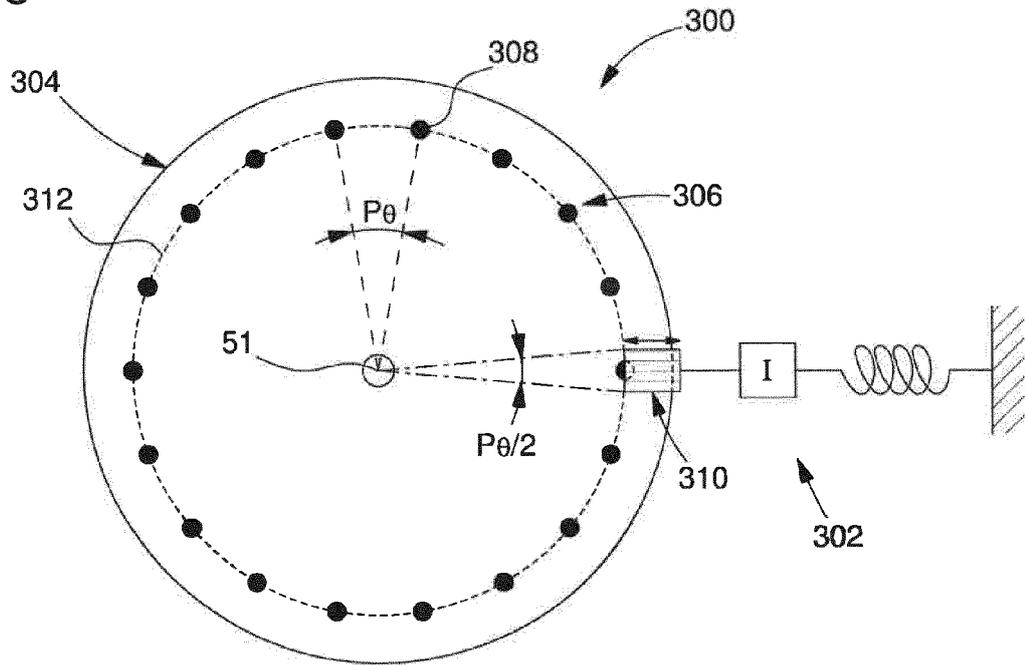


Fig. 35

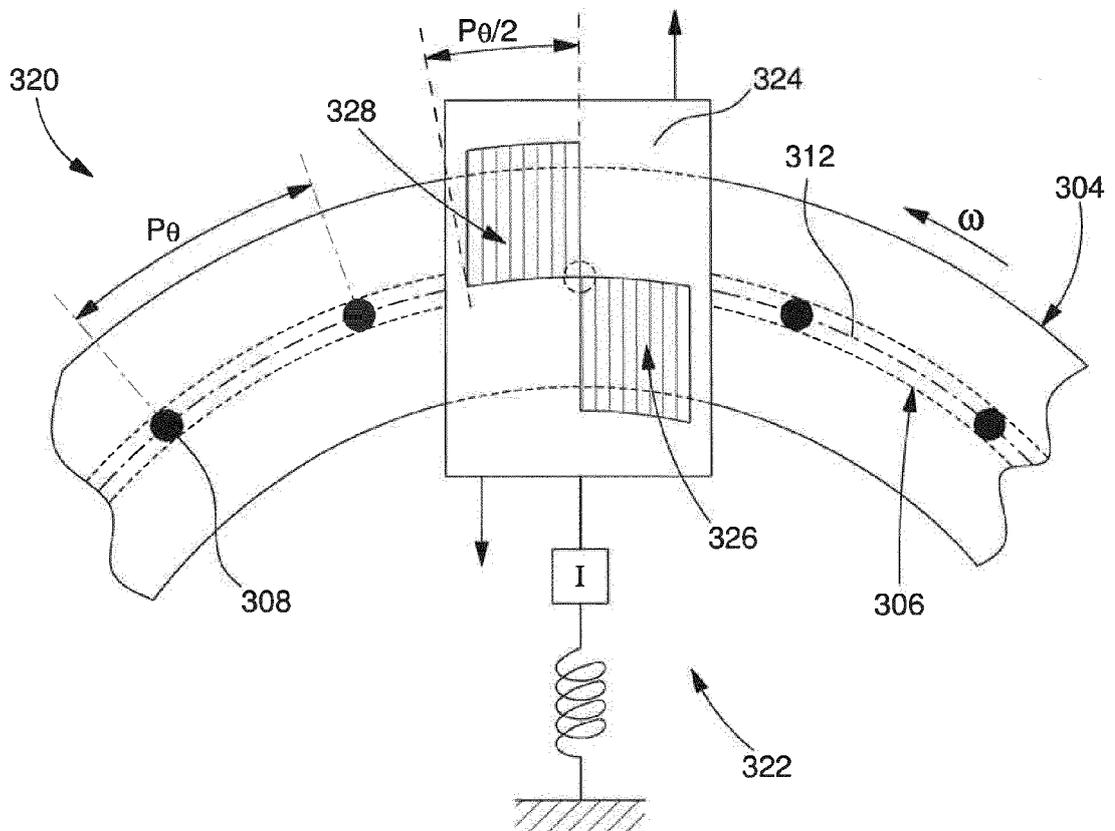


Fig. 36

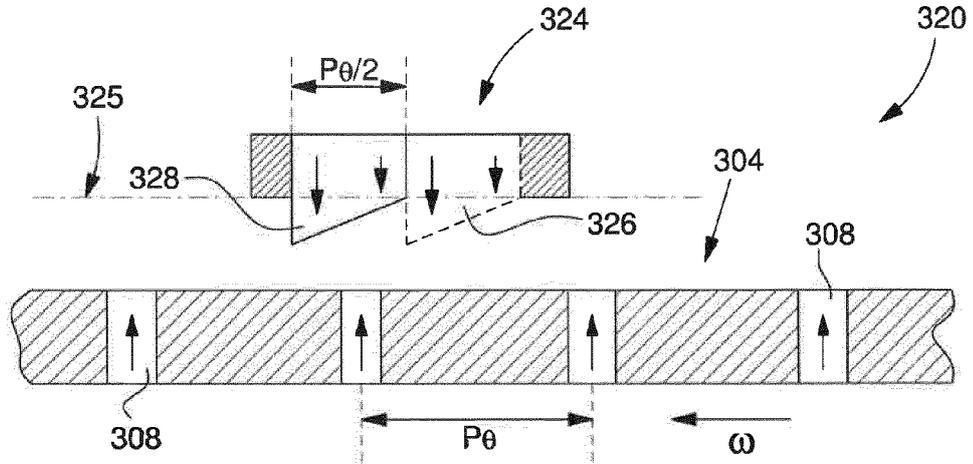
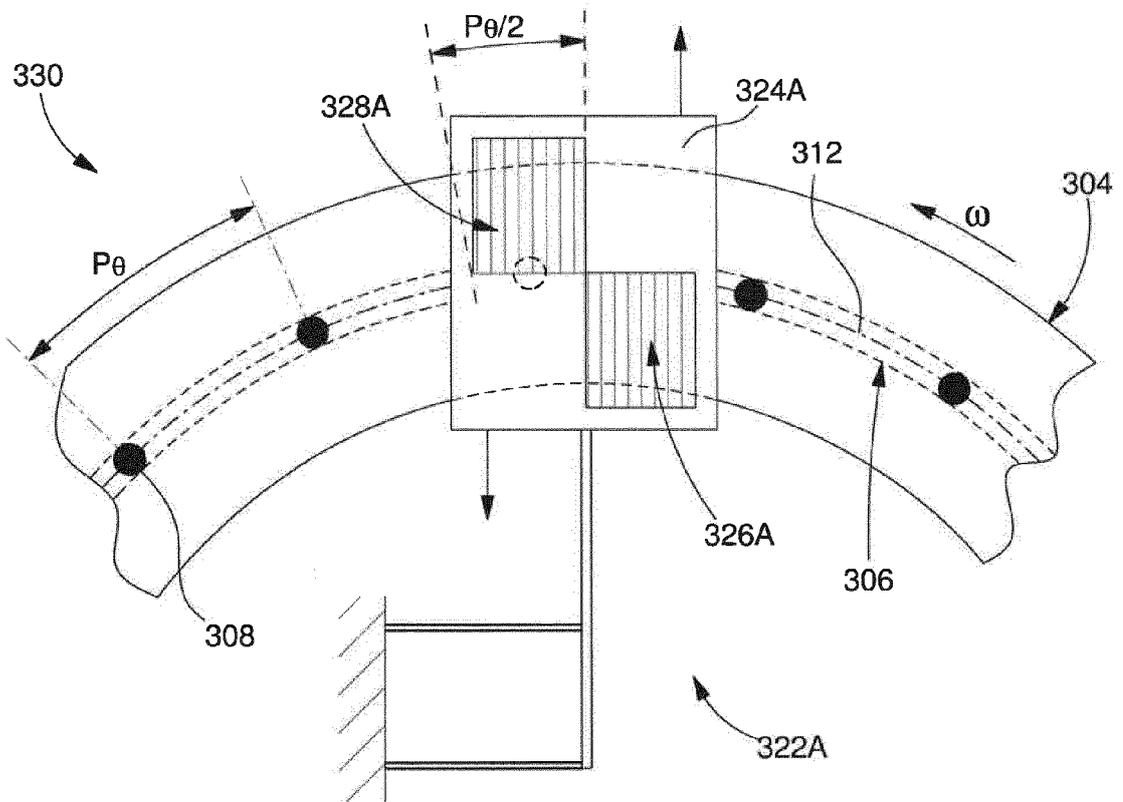


Fig. 37



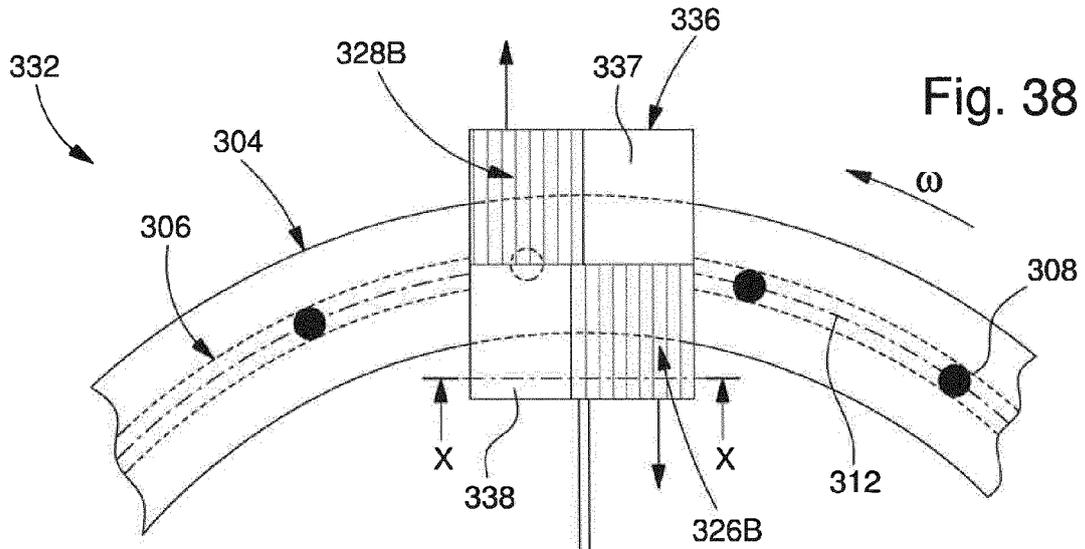


Fig. 38

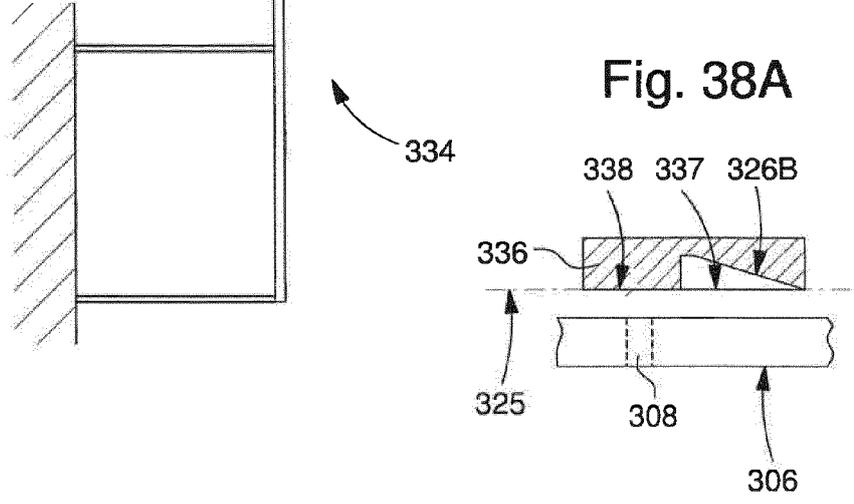


Fig. 38A

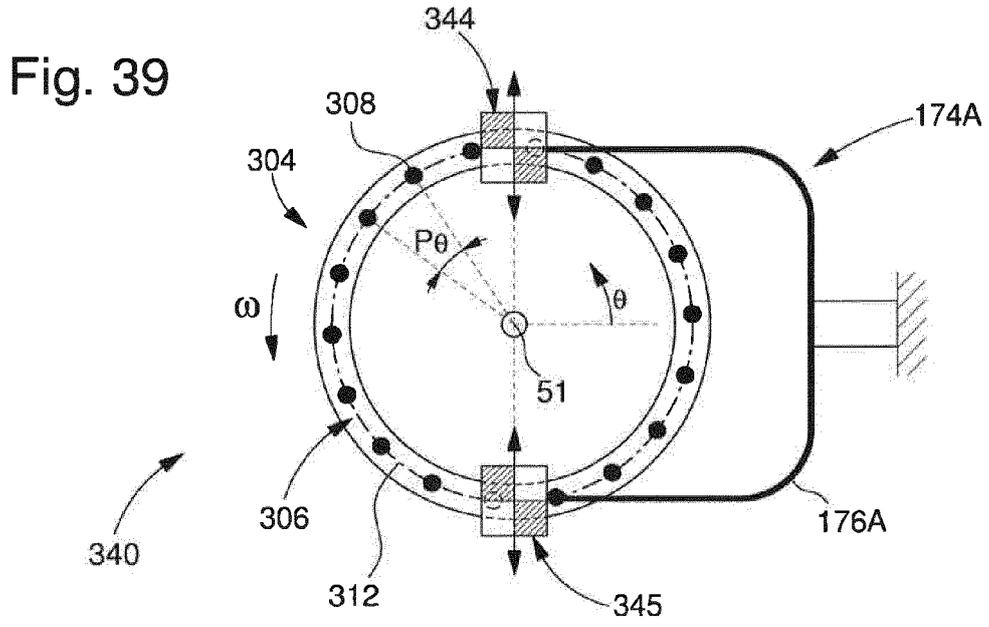
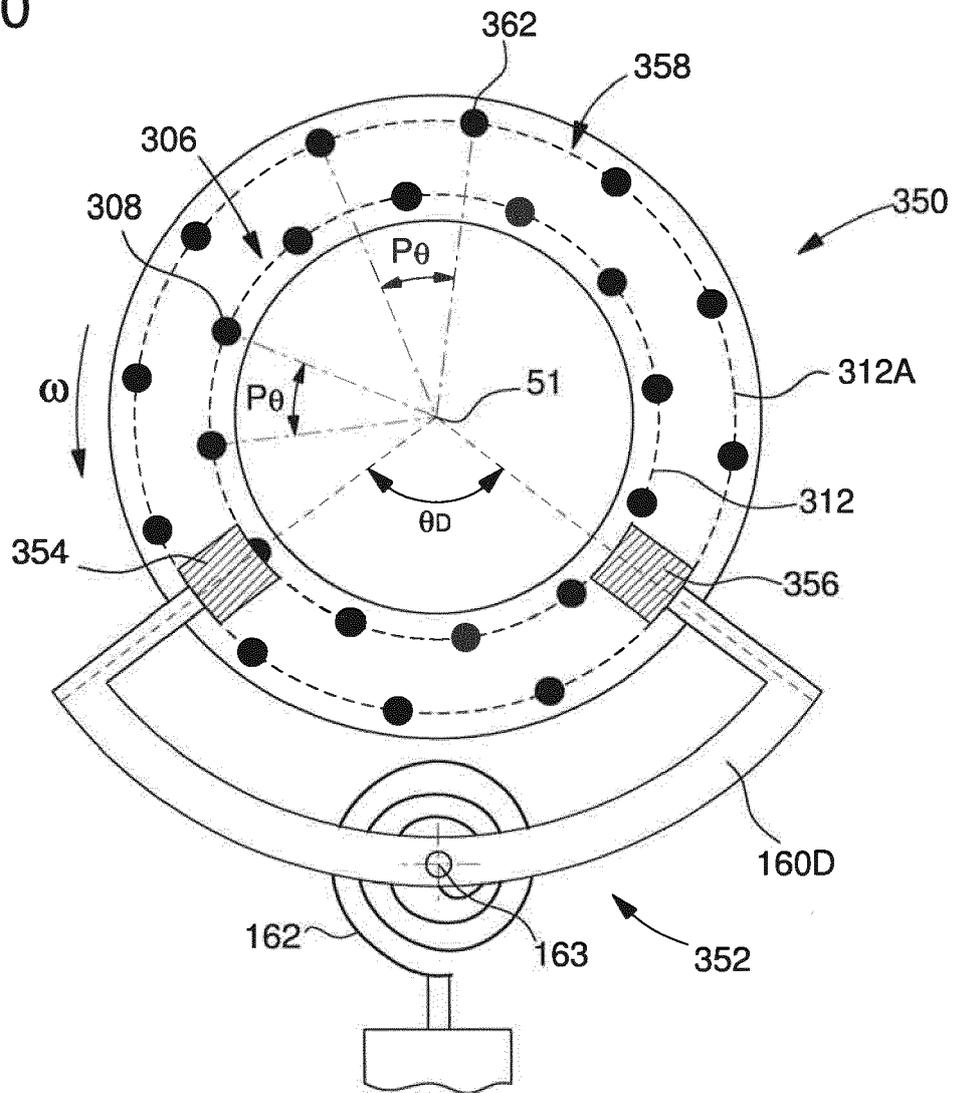


Fig. 39

Fig. 40



**RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION**

*Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.*

**Documents brevets cités dans la description**

- US 2946183 A [0003]
- JP S5240366 B [0004]
- JP 19750116941 B [0004]
- JP S5245468 U [0004]
- JP 19750132614 U [0004]
- JP S5263453 U [0004]
- JP 19750149018 U [0004]