

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 108 897**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **20 03380**

⑤① Int Cl⁸ : **B 81 B 3/00** (2019.12), G 01 P 15/08, G 01 C 19/572

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé de commande d'un capteur.

②② Date de dépôt : 03.04.20.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 08.10.21 Bulletin 21/40.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 08.04.22 Bulletin 22/14.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public — FR.*

⑦② Inventeur(s) : SANS PERNA Marc et DEFOORT
Martial.

⑦③ Titulaire(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public.*

⑦④ Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

FR 3 108 897 - B1



Description

Titre de l'invention : *Procédé de commande d'un capteur*

Domaine technique

[0001] La présente description concerne de façon générale les dispositifs électroniques et, plus particulièrement, les capteurs basés sur des microsystèmes électromécaniques (en anglais MicroElectroMechanical Systems - MEMS) et leurs procédés de commande.

Technique antérieure

[0002] Un capteur basé sur un microsystème électromécanique, ou capteur MEMS, comprend typiquement un élément mécanique de dimensions micrométriques sensible à une grandeur physique, par exemple à une accélération, à une vitesse angulaire, à une force, etc. Cet élément mécanique est généralement associé à un ou plusieurs éléments de transduction, ou transducteurs, capables de convertir des mouvements de l'élément mécanique en des signaux électriques ou optiques représentatifs de la grandeur physique à mesurer.

[0003] Dans les capteurs MEMS usuels, des circuits électroniques permettent notamment de commander les éléments de transduction et de traiter les signaux qui en sont issus. De tels circuits sont souvent complexes et coûteux à réaliser.

Résumé de l'invention

[0004] Il existe un besoin d'améliorer les circuits des capteurs MEMS existants.

[0005] Un mode de réalisation pallie tout ou partie des inconvénients des circuits des capteurs MEMS connus.

[0006] Un mode de réalisation prévoit un procédé de commande d'un capteur micro-électromécanique, comprenant les étapes suivantes :

exciter, par un même premier signal, un premier élément résonnant et au moins un deuxième élément résonnant ; et

évaluer un déphasage entre le premier signal et un deuxième signal image de vibrations du deuxième élément résonnant.

[0007] Selon un mode de réalisation, le premier signal est périodique et de fréquence sensiblement égale, de préférence égale, à une fréquence de résonance du premier élément résonnant.

[0008] Selon un mode de réalisation, le deuxième élément résonnant possède, lorsque le capteur est en position d'équilibre, une fréquence de résonance sensiblement égale, de préférence égale, à la fréquence de résonance du premier élément résonnant.

[0009] Selon un mode de réalisation, le premier signal est imposé au premier élément résonnant par une boucle d'asservissement.

[0010] Selon un mode de réalisation, le déphasage est évalué par un détecteur de phase

propre à chaque deuxième élément résonnant.

- [0011] Selon un mode de réalisation, le capteur comporte une ou plusieurs masses sismiques, chaque deuxième élément résonnant étant lié à ladite ou à l'une desdites masses sismiques.
- [0012] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend en outre une étape consistant à exercer une force de rétroaction sur chaque masse sismique.
- [0013] Selon un mode de réalisation, la force de rétroaction est produite par une boucle de rétroaction comportant un régulateur, de préférence un régulateur proportionnel et/ou intégral et/ou dérivé, plus préférentiellement un régulateur proportionnel, intégral et dérivé.
- [0014] Selon un mode de réalisation, le premier élément résonnant est découplé mécaniquement de ladite ou desdites masses sismiques.
- [0015] Un mode de réalisation prévoit un circuit adapté à mettre en œuvre le procédé tel que décrit.
- [0016] Un mode de réalisation prévoit un capteur micro-électromécanique comportant au moins un circuit tel que décrit.
- [0017] Un mode de réalisation prévoit un capteur à un axe, comportant exactement un deuxième élément résonnant et un détecteur de phase.
- [0018] Un mode de réalisation prévoit un capteur à trois axes, comportant exactement trois deuxièmes éléments résonnants et trois détecteurs de phase.
- [0019] Un mode de réalisation prévoit un accéléromètre comportant au moins un capteur tel que décrit.
- [0020] Un mode de réalisation prévoit un gyromètre comportant au moins un capteur tel que décrit.

Brève description des dessins

- [0021] Ces caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres, seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :
- [0022] [fig.1] la figure 1 représente, de façon très schématique et partielle, un exemple d'accéléromètre ;
- [0023] [fig.2] la figure 2 est une vue de côté, schématique et partielle, d'un autre exemple d'accéléromètre du type auquel s'appliquent, à titre d'exemple, des modes de réalisation décrits ;
- [0024] [fig.3] la figure 3 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un exemple de circuit de commande d'un capteur ;
- [0025] [fig.4] la figure 4 est un graphique représentant des courbes caractéristiques de l'accéléromètre de la figure 2 ;

- [0026] [fig.5] la figure 5 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un mode de réalisation d'un circuit de commande d'un capteur ;
- [0027] [fig.6] la figure 6 comprend des graphiques représentant d'autres courbes caractéristiques de l'accéléromètre de la figure 2 ;
- [0028] [fig.7] la figure 7 est une vue en perspective, schématique et partielle, d'un autre exemple d'accéléromètre du type auquel s'appliquent, à titre d'exemple, des modes de réalisation décrits ; et
- [0029] [fig.8] la figure 8 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un autre mode de réalisation d'un circuit de commande d'un capteur.

Description des modes de réalisation

- [0030] De mêmes éléments ont été désignés par de mêmes références dans les différentes figures. En particulier, les éléments structurels et/ou fonctionnels communs aux différents modes de réalisation peuvent présenter les mêmes références et peuvent disposer de propriétés structurelles, dimensionnelles et matérielles identiques.
- [0031] Par souci de clarté, seuls les étapes et éléments utiles à la compréhension des modes de réalisation décrits ont été représentés et sont détaillés. En particulier, les applications et dispositifs dans lesquels les capteurs décrits sont susceptibles d'être mis en œuvre ne sont pas détaillés.
- [0032] Sauf précision contraire, lorsque l'on fait référence à deux éléments connectés entre eux, cela signifie directement connectés sans éléments intermédiaires autres que des conducteurs, et lorsque l'on fait référence à deux éléments reliés (en anglais "coupled") entre eux, cela signifie que ces deux éléments peuvent être connectés ou être reliés par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres éléments.
- [0033] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à des qualificatifs de position absolue, tels que les termes "avant", "arrière", "haut", "bas", "gauche", "droite", etc., ou relative, tels que les termes "dessus", "dessous", "supérieur", "inférieur", etc., ou à des qualificatifs d'orientation, tels que les termes "horizontal", "vertical", etc., il est fait référence, sauf précision contraire, à l'orientation des figures.
- [0034] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.
- [0035] La figure 1 représente, de façon très schématique et partielle, un exemple d'accéléromètre 100.
- [0036] Dans l'exemple de la figure 1, l'accéléromètre 100 comporte un corps d'épreuve 102, par exemple une masse sismique de masse m . La masse sismique 102 est reliée à un élément fixe ou ancrage 104 par un ressort 106, de constante de raideur k , et par un amortisseur 108 monté en parallèle du ressort 106. Dans la représentation schématique de la figure 1, l'amortisseur 108 permet de modéliser des pertes dynamiques ou

phénomènes d'amortissement, par exemple des pertes par frottement, susceptibles d'affecter le fonctionnement de l'accéléromètre 100.

- [0037] Au repos, autrement dit en l'absence d'accélération, la masse sismique 102 est séparée de l'ancrage 104 par une distance $D1$. En figure 1, la position de la masse sismique 102 au repos est symbolisée par un rectangle 102a en trait plein.
- [0038] Lorsque la masse sismique 102 est écartée de la position 102a, par exemple sous l'effet d'une force $F1$ résultant d'une accélération $a1$, le ressort 106 exerce alors, sur la masse sismique 102, une force Fr . Dans le cas illustré en figure 1 où la force $F1$ tend à éloigner la masse sismique 102 par rapport à l'ancrage 104, la force Fr est une force de rappel s'opposant à la force $F1$, c'est-à-dire tendant à rapprocher la masse sismique 102 par rapport à l'ancrage 104.
- [0039] En supposant que l'accélération $a1$ soit constante, la masse sismique 102 atteint alors une position d'équilibre statique, symbolisée en figure 1 par un rectangle 102b en trait pointillé, dans laquelle la force de rappel Fr compense la force $F1$. Les forces Fr et $F1$ sont dans ce cas de même valeur et de même direction, parallèle à un axe horizontal Ox , mais de sens opposés.
- [0040] Dans la position d'équilibre 102b, la masse sismique 102 est séparée de l'ancrage 104 par une distance $D2$, supérieure à la distance $D1$. En mesurant le déplacement de la masse sismique 102, autrement dit en évaluant un écart ΔD entre les distances $D1$ et $D2$, on peut alors, connaissant la masse m et la constante de raideur k , en déduire l'accélération $a1$ subie par la masse sismique 102 de l'accéléromètre 100.
- [0041] Dans la suite de la description, on désigne par résolution d'un accéléromètre l'accélération minimale susceptible d'être détectée par cet accéléromètre. En d'autres termes, la résolution d'un accéléromètre correspond à la plus petite force, ou au déplacement minimal, détectable par cet accéléromètre.
- [0042] La figure 2 est une vue de côté, schématique et partielle, d'un autre exemple d'accéléromètre 200 du type auquel s'appliquent, à titre d'exemple, des modes de réalisation décrits.
- [0043] Dans l'exemple de la figure 2, l'accéléromètre 200 comporte une masse sismique 202 analogue à la masse sismique 102 de l'accéléromètre 100 (figure 1). En figure 2, la masse sismique 202 est reliée à des éléments fixes ou ancrages 204L et 204R par des éléments de transduction 206L et 206R, ou transducteurs. Les éléments de transduction 206L et 206R sont, par exemple, des éléments résonnants ou résonateurs, par exemple des poutres résonnantes. Dans l'orientation de la figure 2, les éléments résonnants 206L et 206R sont situés de part et d'autre de la masse 202 le long d'un axe horizontal Ox , de sorte que l'élément résonnant 206L, 206R relie la masse sismique 202 à l'ancrage 204L, 204R. Dit autrement, chaque élément résonnant 206L, 206R est lié d'une part à la masse sismique 202 et d'autre part à l'ancrage 204L, 204R.

- [0044] Dans cet exemple, l'accéléromètre 200 est capable de détecter uniquement des accélérations qui possèdent une composante non nulle en projection sur l'axe Ox. En revanche, l'accéléromètre 200 n'est pas capable de détecter des accélérations qui possèdent une composante nulle suivant l'axe Ox, autrement dit des accélérations perpendiculaires à l'axe Ox (par exemple des accélérations vers le haut ou vers le bas, dans l'orientation de la figure 2). On qualifie alors l'accéléromètre 200 de capteur à un axe, ou capteur mono axe.
- [0045] La masse sismique 202 et/ou les éléments résonnants 206L et 206R de l'accéléromètre 200 sont, par exemple, des microsystemes électromécaniques (en anglais MicroElectroMechanical Systems - MEMS). En d'autres termes, la masse sismique 202 et/ou les éléments résonnants 206L et 206R possèdent par exemple au moins une dimension micrométrique, c'est-à-dire une dimension typiquement comprise entre dix micromètres (10 μm) et plusieurs centaines de micromètres, par exemple entre dix micromètres (10 μm) et cent micromètres (100 μm).
- [0046] Les éléments résonnants 206L et 206R sont, par exemple, des poutres cylindriques (vues de côté en figure 2). À titre d'exemple, chaque poutre 206L, 206R présente un diamètre de l'ordre de plusieurs centaines de nanomètres, par exemple égal à environ deux cent cinquante nanomètres (250 nm). Les poutres 206L et 206R sont alors qualifiées de nanosystemes électromécaniques (en anglais NanoElectroMechanical Systems - NEMS).
- [0047] En variante, chaque poutre 206L, 206R est une poutre MEMS. Chaque poutre 206L, 206R présente alors, par exemple, un diamètre de l'ordre de plusieurs dizaines de micromètres, par exemple égal à environ cinquante micromètres (50 μm).
- [0048] Au repos, la masse sismique 202 est située à égale distance des ancrages 204L et 204R en supposant, pour simplifier, que les éléments résonnants 206L et 206R sont identiques, aux dispersions de fabrication près. Les éléments résonnants 206L et 206R sont ainsi soumis à des contraintes équivalentes lorsque la masse sismique 202 est au repos. Les éléments résonnants 206L et 206R sont, par exemple, soumis chacun à une même tension mécanique, cette tension suffisant à maintenir la masse sismique 202 en suspension au-dessus d'un support (non représenté en figure 2).
- [0049] Lorsque la masse sismique 202 subit une force F2 résultant, par exemple, d'une accélération a_2 orientée vers l'ancrage 204L (c'est-à-dire vers la gauche, dans l'orientation de la figure 2), la masse sismique 202 tend alors à se rapprocher de l'ancrage 204L et à s'éloigner de l'ancrage 204R. La force F2 exerce ainsi des contraintes axiales, c'est-à-dire parallèles à l'axe Ox, sur les éléments résonnants 206L et 206R. Plus précisément, dans le cas où la force F2 est orientée vers l'ancrage 204L, l'élément résonnant 206L subit une contrainte en compression, tandis que l'élément résonnant 206R subit une contrainte en extension.

- [0050] L'accéléromètre 200 de la figure 2 permet généralement d'atteindre une résolution supérieure à celle de l'accéléromètre 100 de la figure 1. Le fonctionnement de l'accéléromètre 200 est détaillé ci-après en relation avec les figures 3 et 4.
- [0051] La figure 3 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un exemple de circuit 300 de commande d'un capteur. Le circuit de commande 300 fait par exemple partie de, ou est associé à, l'accéléromètre 200 de la figure 2.
- [0052] En figure 3, on a symbolisé :
- par des traits pleins, des liaisons véhiculant des signaux $x(t)$ analogiques permettant de coder une information sous forme d'amplitude ; et
 - par des traits en pointillé, des liaisons véhiculant d'autres signaux $x(t)$ analogiques permettant de coder une information sous forme de fréquence.
- [0053] À titre d'exemple, les signaux $x(t)$ symbolisés par des traits pleins en figure 3 sont de type :
- [Math.1]
- $$x(t) = B1 + a(t)$$
- [0054] Dans l'équation Math 1 ci-dessus, B1 représente une constante et $a(t)$ représente une amplitude variable en fonction du temps t .
- [0055] À titre d'exemple, les signaux $x(t)$ symbolisés par des traits en pointillé en figure 3 sont de type :
- [Math.2]
- $$x(t) = B2 \cos(2\pi \times f(t) \times t)$$
- [0056] Dans l'équation Math 2 ci-dessus, B2 représente une constante et $f(t)$ représente une fréquence variable en fonction du temps t .
- [0057] L'information transmise se trouve dans la partie variable, c'est-à-dire la variation d'amplitude $a(t)$ ou la variation de fréquence $f(t)$.
- [0058] Dans la suite de la description, on entend par circuit de commande d'un capteur un circuit électronique configuré pour commander ou piloter des éléments constitutifs de ce capteur, par exemple des éléments de transduction ou éléments résonnants, et/ou pour traiter des signaux issus de ces éléments de transduction ou éléments résonnants afin de produire, en sortie, un ou plusieurs signaux de mesure.
- [0059] Le circuit de commande 300 comporte des blocs 302L et 302R symbolisant chacun une source de signal périodique de fréquence réglable. Lorsque l'accéléromètre 200 est en fonctionnement, la boucle d'asservissement 302L, 302R fournit un signal d'excitation périodique dont la fréquence est réglée de sorte à faire vibrer l'élément résonnant 206L, 206R au plus près de sa fréquence de résonance f_{resL} , f_{resR} .
- [0060] Dans le cas où l'accéléromètre 200 est en position d'équilibre, les éléments résonnants 206L et 206R, supposés identiques, ont des fréquences de résonance respectives f_{resL} et f_{resR} de même valeur, notée f_0 . Dans la position d'équilibre, la

boucle d'asservissement 302L, 302R excite donc l'élément résonnant 206L, 206R à une valeur de fréquence de résonance f_{resL} , f_{resR} égale à f_0 .

- [0061] Dans le cas où la masse sismique 202 subit des accélérations, les contraintes exercées sur les éléments résonnants 206L et 206R sous l'action des déplacements latéraux de la masse sismique 202 entraînent des variations des fréquences de résonance respectives f_{resL} et f_{resR} des éléments résonnants 206L et 206R hors équilibre. Les boucles d'asservissement 302L et 302R du circuit 300 de l'accéléromètre 200 sont configurées pour s'adapter à ces variations des fréquences de résonance f_{resL} et f_{resR} , autrement dit pour régler les fréquences des signaux d'excitation des éléments résonnants 206L et 206R afin qu'elles correspondent aux fréquences f_{resL} et f_{resR} .
- [0062] La boucle d'asservissement 302L, 302R est en particulier configurée de sorte que l'élément résonnant 206L, 206R soit excité à sa fréquence de résonance f_{resL} , f_{resR} quelle que soit l'accélération subie par la masse sismique 202, autrement dit quelle que soit la contrainte exercée sur l'élément résonnant 206L, 206R. On dit alors que l'accéléromètre 200 fonctionne en mode de détection résonnante.
- [0063] En évaluant un écart ou décalage, noté Δf , de chaque fréquence de résonance f_{resL} , f_{resR} hors équilibre par rapport à la fréquence de résonance f_0 à l'équilibre, on en déduit l'accélération a_2 subie par la masse sismique 202. Le décalage Δf est, par exemple, évalué grâce à un mélangeur de fréquences 304 (FM). Dans l'exemple de la figure 3, une valeur $2\Delta f$, correspondant au double du décalage Δf , c'est-à-dire à la différence entre les deux fréquences de résonance f_{resL} et f_{resR} hors équilibre, est transmise à un compteur de fréquence 306 (FC). En sortie du compteur de fréquence 306, on obtient par exemple un signal électrique proportionnel à l'accélération a_2 .
- [0064] De manière plus générale, le compteur de fréquence 306 est par exemple adapté à convertir un signal analogique permettant de coder une information sous forme de fréquence en un autre signal analogique permettant de coder cette information, ou une image de cette information, sous forme d'amplitude.
- [0065] En pratique, la fréquence de résonance f_{resL} , f_{resR} est recherchée en évaluant une amplitude du mouvement vibratoire de chaque élément résonnant 206L, 206R grâce à au moins un élément de transduction, par exemple piézorésistif. À titre d'exemple, on couple une jauge piézorésistive (non représentée) à chaque élément résonnant 206L, 206R de façon à obtenir un signal résistif proportionnel à son amplitude de vibration. En variante, les vibrations de chaque élément résonnant 206L, 206R sont par exemple converties en un signal analogique par un transducteur capacitif.
- [0066] La détection résonnante mise en œuvre par le circuit 300 permet d'accéder à une gamme dynamique améliorée et est moins susceptible d'être impactée par des variations de température, notamment par rapport à d'autres méthodes de lecture par exemple capacitives ou piézorésistives dans lesquelles les éléments 206L et 206R

n'entrent pas en résonance. Le circuit 300 est toutefois souvent complexe et coûteux, car il comporte une boucle d'asservissement 302L, 302R pour chaque élément résonnant 206L, 206R et un compteur de fréquence 306 comprenant généralement une source de signal de synchronisation de haute précision et des interfaces de traitement de signal numériques (non représentées en figure 3).

- [0067] Les accéléromètres à détection résonnante sont parfois utilisables dans des plages d'accélération restreintes dont les valeurs extrêmes sont liées à des contraintes mécaniques, par exemple à des limites de tenue au flambage ou à la rupture des éléments résonnants 206L et 206R. Pour s'affranchir de ces contraintes, on utilise le plus souvent un circuit de commande comportant une boucle de rétroaction en force (en anglais force feedback). Cela permet, en outre, d'éviter ou de limiter des résonances parasites de la masse sismique de l'accéléromètre considéré.
- [0068] Dans le circuit 300, une telle boucle de rétroaction est par exemple obtenue grâce à un bloc 308 (Hc(s)) symbolisant un régulateur ou correcteur qui applique, en sortie du compteur de fréquence 306, une fonction de transfert Hc(s). Le régulateur 308 est, par exemple, un régulateur proportionnel, intégral et dérivé, ou régulateur PID. Le régulateur 308 est configuré pour exercer une force de compensation Fcomp, ou force de rétroaction, sur la masse sismique 202.
- [0069] La force de compensation Fcomp possède, par exemple, une amplitude égale et un sens opposé à la force F2 (figure 2). En d'autres termes, le circuit 300 ajuste l'amplitude et le sens de la force de compensation Fcomp, au gré des variations d'accélération subies par la masse sismique 202 de l'accéléromètre 200, afin de compenser la force F2. La force de compensation Fcomp permet ainsi, malgré l'action de la force F2, de ramener la masse sismique 202 vers ou dans sa position d'équilibre, ce qui a pour effet de réduire ou de relâcher les contraintes mécaniques exercées sur les éléments résonnants 206L et 206R.
- [0070] En pratique, la force de compensation Fcomp est, par exemple, une force électrostatique exercée sur la masse sismique 202 par une ou plusieurs électrodes (non représentées). Dans l'exemple de la figure 3, le circuit 300 produit un signal de sortie SO qui est par exemple égal ou proportionnel à une tension électrique utilisée pour appliquer la force électrostatique Fcomp.
- [0071] La figure 4 est un graphique représentant des courbes caractéristiques de l'accéléromètre 200 de la figure 2. Le graphique de la figure 4 représente, plus précisément, des variations d'amplitude (axe des ordonnées, AMPL) des mouvements vibratoires des éléments résonnants 206L et 206R en fonction de la fréquence (axe des abscisses, FREQ) d'excitation des éléments résonnants 206L et 206R de l'accéléromètre 200 commandé par le circuit 300 de la figure 3.
- [0072] En figure 4 :

une courbe 400 en trait plein représente des variations d'amplitude, en fonction de la fréquence, des mouvements vibratoires auxquels sont soumis les éléments résonnants 206L et 206R lorsque la masse sismique 202 est à l'équilibre ; et des courbes 402L et 402R en trait pointillé représentent des variations d'amplitude, en fonction de la fréquence, des mouvements vibratoires auxquels sont respectivement soumis les éléments résonnants 206L et 206R lorsque la masse sismique 202 est hors équilibre.

[0073] Les courbes 402L et 402R proviennent, par exemple, d'une situation analogue à celle exposée en relation avec la figure 2, dans laquelle la masse sismique 202 est soumise à une accélération a_2 dirigée vers l'ancrage 204L. Dans cette situation, par rapport à la position d'équilibre :

la fréquence de résonance f_{resL} , qui diminue à cause de la compression de l'élément résonnant 206L, est alors égale à $f_0 - \Delta f$; et

la fréquence de résonance f_{resR} , qui augmente à cause de l'extension de l'élément résonnant 206R, est alors égale à $f_0 + \Delta f$.

[0074] L'accélération a_2 subie par la masse sismique 202 est alors proportionnelle à la différence entre les fréquences de résonance respectives f_{resL} et f_{resR} des éléments résonnants 206L et 206R, autrement dit proportionnelle à $2\Delta f$. On qualifie généralement l'accéléromètre 200 (figure 2) d'accéléromètre à détection résonnante différentielle, les deux éléments résonnants 206L et 206R étant positionnés de sorte que l'accélération a_2 soit proportionnelle au décalage de leurs fréquences de résonance f_{resL} et f_{resR} .

[0075] Dans l'exemple représenté, le circuit 302L fournit, en sortie, un signal sinusoïdal de fréquence $f_0 + \Delta f$ tandis que le circuit 302R fournit, en sortie, un signal sinusoïdal de fréquence $f_0 - \Delta f$.

[0076] En pratique, le mélangeur de fréquences 304 permet par exemple d'obtenir :
un signal basse fréquence, de fréquence sensiblement égale au décalage $2\Delta f$ entre les fréquences des signaux de sortie des circuits 302L et 302R ; et
un autre signal haute fréquence, de fréquence sensiblement égale à $2f_0$.

[0077] À titre d'exemple, on ne conserve, en sortie du mélangeur de fréquences 304, que le signal image du décalage $2\Delta f$. Le signal haute fréquence est par exemple filtré par le mélangeur de fréquences 304 ou par un autre composant (non représenté) situé en aval du mélangeur de fréquences 304, de façon à éliminer la composante de fréquence $2f_0$.

[0078] Un avantage des accéléromètres à détection résonnante différentielle tient au fait qu'ils ne sont pas sensibles (ou sont peu sensibles) à des variations de température car de telles variations affectent généralement simultanément et de la même façon les éléments résonnants 206L et 206R. En effet, bien qu'une variation de température puisse décaler les fréquences de résonance f_{resL} et f_{resR} , ce décalage, souvent sensiblement identique pour les deux éléments résonnants 206L et 206R, n'aura pas (ou

aura peu) d'influence sur le résultat du calcul de la différence $2\Delta f$ entre les fréquences f_{resL} et f_{resR} .

- [0079] On a décrit précédemment en relation avec les figures 1 et 2 des exemples d'accéléromètres 100, 200 dans lesquels la masse sismique 102, 202 n'est pas volontairement soumise à un mouvement vibratoire. Il existe néanmoins d'autres types d'accéléromètres, par exemple des accéléromètres résonnants qui comportent au moins une masse sismique que l'on fait vibrer à sa fréquence de résonance. Dans ce cas, une variation de la fréquence de résonance de la masse sismique permet de remonter à l'accélération subie. Il existe encore d'autres types d'accéléromètres, notamment des accéléromètres résonnants à détection résonnante. Un système semblable à l'accéléromètre 200 dont on ferait vibrer la masse sismique 202 à sa fréquence de résonance constitue un exemple d'un tel accéléromètre.
- [0080] Bien que cela ne soit pas détaillé dans la présente description, les caractéristiques précédemment décrites en relation avec un exemple d'accéléromètre 200 à détection résonnante sont transposables par la personne du métier à des accéléromètres résonnants à détection résonnante. En particulier, l'adaptation du circuit de commande 300 à de tels accéléromètres est à la portée de la personne du métier à partir des indications ci-dessus.
- [0081] La figure 5 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un mode de réalisation d'un circuit 500 de commande d'un capteur. Le circuit 500 fait par exemple partie de, ou est associé à, l'accéléromètre 200 de la figure 2.
- [0082] En figure 5, de façon analogue à ce qui a été exposé précédemment en relation avec la figure 3, on a symbolisé :
- par des traits pleins, des liaisons véhiculant des signaux $x(t)$ analogiques permettant de coder une information sous forme d'amplitude ; et
 - par des traits en pointillé, des liaisons véhiculant d'autres signaux $x(t)$ analogiques permettant de coder une information sous forme de fréquence.
- [0083] Selon un mode de réalisation, le circuit 500 comporte un bloc 502L symbolisant une boucle d'asservissement, par exemple une boucle à verrouillage de phase (en anglais Phase-Locked Loop – PLL) ou une boucle d'auto-oscillation. La boucle d'asservissement 502L du circuit 500 est, par exemple, analogue aux boucles d'asservissement 302L et 302R du circuit 300 exposées en relation avec la figure 3.
- [0084] En particulier, lorsque l'accéléromètre 200 est en fonctionnement, la boucle d'asservissement 502L fournit un signal d'excitation périodique dont la fréquence est ajustée de sorte à faire vibrer l'élément résonnant 206L (figure 2) à une fréquence sensiblement égale, de préférence égale, à sa fréquence de résonance f_{resL} . Dans le circuit 500, on utilise une sortie de la boucle d'asservissement 502L pour appliquer, à l'élément résonnant 206R, ce même signal d'excitation de fréquence f_{resL} .

- [0085] Dans le cas où l'accéléromètre 200 est en position d'équilibre, les éléments résonnants 206L et 206R, supposés identiques, sont tous deux en résonance et vibrent en phase à la même fréquence f_0 . Autrement dit, en position d'équilibre, les éléments résonnants 206L et 206R ont la même fréquence de résonance f_0 et vibrent, l'un par rapport à l'autre, avec un déphasage nul.
- [0086] Dans le cas où la masse sismique 202 subit des accélérations, les contraintes exercées sur les éléments résonnants 206L et 206R sous l'action des déplacements latéraux de la masse sismique 202 entraînent un déphasage des mouvements vibratoires des éléments résonnants 206L et 206R l'un par rapport à l'autre. Dans ce cas, bien que les éléments résonnants 206L et 206R soient tous deux excités à la même fréquence f_{resL} , seul l'élément résonnant 206L est en résonance.
- [0087] Cela provient du fait que, à la différence de la position d'équilibre, la fréquence de résonance f_{resL} de l'élément résonnant 206L est dans ce cas, c'est-à-dire lorsque la masse sismique 202 est hors équilibre, différente de la fréquence de résonance f_{resR} de l'élément résonnant 206R. Il en résulte que l'élément résonnant 206R vibre alors à la fréquence de résonance f_{resL} de l'élément résonnant 206L, mais avec un déphasage non nul par rapport aux vibrations qui animent l'élément résonnant 206L.
- [0088] Selon un mode de réalisation, le circuit 500 comporte un détecteur de phase 504 (PHD) ou comparateur de phase recevant, en entrée :
- un signal FSL correspondant au signal périodique d'excitation de l'élément résonnant 206L à la fréquence f_{resL} ; et
 - un autre signal FSR image de vibrations de l'élément résonnant 206R à la fréquence f_{resL} , déphasées par rapport aux vibrations de l'élément résonnant 206L lorsque l'accéléromètre 200 subit une accélération.
- [0089] Dans le mode de réalisation illustré en figure 5, le détecteur de phase 504 reçoit le signal FSL d'excitation de l'élément résonnant 206L et le signal FSR représentatif des vibrations, à la fréquence f_{resL} , de l'élément résonnant 206R. En variante, le détecteur de phase 504 reçoit un signal image des vibrations de l'élément résonnant 206L et le signal FSR. Le détecteur de phase 504 est configuré pour évaluer un déphasage, noté $\Delta\varphi$, entre les signaux FSL et FSR.
- [0090] Selon un mode de mise en œuvre, le déphasage $\Delta\varphi$ est évalué en valeur relative, le signe du déphasage $\Delta\varphi$ permettant alors d'indiquer le sens de l'accélération subie par la masse sismique 202 de l'accéléromètre 200 (figure 2). En variante, le déphasage $\Delta\varphi$ est évalué en valeur absolue, l'accélération étant dans ce cas supposée être toujours orientée dans le même sens.
- [0091] Selon un mode de réalisation préféré, le déphasage $\Delta\varphi$ est transmis à un bloc 508 (Hc(s)) symbolisant un régulateur ou correcteur configuré pour appliquer, au déphasage $\Delta\varphi$, une fonction de transfert Hc(s).

- [0092] Le bloc 508 d'application de la fonction de transfert $H_c(s)$ est, par exemple, analogue au bloc 308 du circuit 300 de la figure 3. En particulier, le régulateur 508 du circuit 500 est, de préférence, un régulateur proportionnel et/ou intégral et/ou dérivé, plus préférentiellement un régulateur proportionnel, intégral et dérivé, ou régulateur PID. Le régulateur PID 508 permet de soumettre la masse sismique 202 à la force de compensation F_{comp} comme exposé en relation avec la figure 3. Dans le mode de réalisation illustré en figure 5, le déphasage $\Delta\varphi$ est utilisé comme signal d'erreur de la boucle de rétroaction.
- [0093] Les caractéristiques et avantages du bloc 308 du circuit 300 sont également applicables au bloc 508 du circuit 500. L'accéléromètre 200 équipé du circuit de commande 500 possède notamment une étendue de mesure, ou gamme de mesure, supérieure à celle d'un capteur analogue dont le circuit de commande serait dépourvu du bloc 508.
- [0094] Un avantage du circuit 500 tient au fait qu'il ne comporte qu'une seule boucle d'asservissement 502L, contre deux boucles d'asservissement 302L et 302R dans l'exemple du circuit 300 de la figure 3. Le circuit 500 est par conséquent moins complexe, et susceptible d'être moins coûteux, que le circuit 300.
- [0095] Un autre avantage du circuit 500 tient au fait qu'il ne comporte pas de compteur de fréquence 306, contrairement au circuit 300. Cela réduit encore davantage la complexité du circuit 500 par rapport au circuit 300.
- [0096] En pratique, le détecteur de phase 504 du circuit 500 peut être réalisé à partir d'un circuit électronique simple, par exemple un circuit comportant six transistors. Contrairement au compteur de fréquence 306, un tel détecteur de phase 504 peut être dépourvu de source de signal d'horloge et/ou de composants numériques. Cela permet avantageusement de faire en sorte que le circuit 500 soit tout analogique, autrement dit qu'il ne comprenne aucun composant numérique.
- [0097] Le circuit 500 permet, en tirant profit du déphasage $\Delta\varphi$ entre les vibrations des éléments résonnants 206L et 206R, de conserver les avantages de la détection résonnante décrits ci-dessus. Le circuit 500 possède en particulier des performances, par exemple une efficacité de transduction et une résolution, équivalentes à celles du circuit 300. Toutefois, le circuit 500 permet de s'affranchir des inconvénients liés aux mesures de fréquences de résonance telles que celles effectuées par le circuit 300.
- [0098] On a décrit précédemment un mode de réalisation d'un circuit 500 de commande d'un accéléromètre 200, dans lequel les éléments résonnants 206L et 206R sont tous deux excités à la fréquence de résonance f_{resL} de l'élément résonnant 206L par la boucle d'asservissement 502L. Cela n'est toutefois pas limitatif. La personne du métier est en particulier capable de prévoir un circuit de commande configuré pour exciter les éléments résonnants 206L et 206R de l'accéléromètre 200 à la fréquence de résonance

fresR de l'élément résonnant 206R, grâce à une boucle d'asservissement associée à l'élément résonnant 206R, et pour évaluer le déphasage correspondant.

[0099] La figure 6 comprend des graphiques représentant d'autres courbes caractéristiques de l'accéléromètre 200 de la figure 2 commandé par le circuit 500 de la figure 5. Plus précisément, en figure 6 :

un graphique représente des variations d'amplitude (axe des ordonnées, AMPL) des mouvements vibratoires des éléments résonnants 206L et 206R en fonction de la fréquence (axes des abscisses, FREQ) d'excitation des éléments résonnants 206L et 206R ; et

un autre graphique représente des variations de phase (axe des ordonnées, PHASE) des mouvements vibratoires des éléments résonnants 206L et 206R en fonction de la fréquence (axes des abscisses, FREQ) d'excitation des éléments résonnants 206L et 206R.

[0100] En figure 6 :

des courbes 600L et 602L en trait pointillé représentent respectivement des variations d'amplitude et des variations de phase, en fonction de la fréquence, des mouvements vibratoires auxquels est soumis l'élément résonnant 206L lorsque la masse sismique 202 est hors équilibre ; et

des courbes 600R et 602R en trait plein représentent respectivement des variations d'amplitude et des variations de phase, en fonction de la fréquence, des mouvements vibratoires auxquels est soumis l'élément résonnant 206R lorsque la masse sismique 202 est hors équilibre.

[0101] Les courbes 600L et 600R de la figure 6 sont analogues aux courbes 402L et 402R de la figure 4. Ainsi, en figure 6, la différence entre les fréquences de résonance fresL et fresR des éléments résonnants 206L et 206R, c'est-à-dire entre les sommets des courbes 600L et 600R, est égale à $2\Delta f$ comme exposé précédemment en relation avec la figure 4.

[0102] Lorsque la masse sismique 202 (figure 2) est hors équilibre, et que les éléments résonnants 206L et 206R de l'accéléromètre 200 sont tous deux excités à la fréquence de résonance fresL de l'élément résonnant 206L, on note φ_L et φ_R les phases représentatives des vibrations auxquelles sont soumis les éléments résonnants 206L et 206R, respectivement. Comme illustré en figure 6, le déphasage $\Delta\varphi$ représente ici par convention l'écart $\varphi_L - \varphi_R$, évalué à l'aplomb du point d'inflexion de la courbe 602L à la fréquence fresL, entre les courbes 602L et 602R. Comme exposé précédemment, le déphasage $\Delta\varphi$ peut être considéré en valeur relative ou en valeur absolue, selon que l'on cherche, ou non, à déterminer le sens de l'accélération.

[0103] Dans l'exemple de la figure 6, à la fréquence fresL, la phase φ_L est inférieure à la phase φ_R . En valeur relative, selon la convention $\Delta\varphi = \varphi_L - \varphi_R$, le déphasage $\Delta\varphi$ est

alors négatif. Cela correspond à un déplacement de la masse sismique 202 de l'accéléromètre 200 vers l'ancrage 204L, c'est-à-dire vers la gauche dans l'orientation de la figure 2.

[0104] Bien que cela ne soit pas représenté en figure 6, lorsque la masse sismique 202 est en position d'équilibre :

les fréquences de résonance f_{resL} et f_{resR} sont égales à f_0 , le décalage Δf est donc nul et les courbes 600L et 600R sont alors superposées ; et

les phases φ_L et φ_R sont égales, le déphasage $\Delta\varphi$ est donc nul et les courbes 602L et 602R sont alors superposées.

[0105] On a décrit ci-dessus, en relation avec les figures 5 et 6, un mode de réalisation d'un circuit 500 de commande d'un exemple d'accéléromètre 200 (figure 2) dans lequel la masse sismique 202 applique des contraintes sur les éléments résonnants 206L et 206R par un couplage mécanique direct. Le circuit 500 peut toutefois commander d'autres exemples d'accéléromètres (non représentés), dans lesquels la masse sismique 202 applique des contraintes sur les éléments résonnants 206L et 206R :

par un couplage mécanique indirect, par exemple grâce à un ou plusieurs leviers ; ou par un couplage électrique, le mouvement de la masse sismique 202 entraînant alors une variation d'un champ électrique interagissant avec chaque élément résonnant 206L, 206R.

[0106] On peut en outre prévoir que le circuit 500 commande encore d'autres exemples d'accéléromètres (non représentés), en particulier :

des accéléromètres comportant une masse sismique possédant deux modes de vibration couplés à l'accélération ; et

des accéléromètres comportant au moins deux masses sismiques en résonance, et dont les fréquences de résonance sont couplées à l'accélération.

[0107] De manière plus générale, on peut tirer profit du circuit 500 pour commander tout type de capteur dans lequel une grandeur physique entraîne une différence de phase entre un résonateur et au moins deux autres résonateurs, les résonateurs pouvant être liés à au moins une masse sismique ou bien être directement constitués par des masses sismiques en vibration.

[0108] On a par ailleurs décrit ci-dessus, en relation avec les figures 5 et 6, un mode de réalisation d'un circuit 500 de commande d'un exemple d'accéléromètre 200 (figure 2) dans lequel les deux éléments résonnants 206L et 206R possèdent la même fréquence de résonance en position d'équilibre. Lorsque l'accéléromètre 200 est soumis à une accélération a_2 , chaque élément résonnant 206L, 206R subit une variation de fréquence de résonance f_{resL} , f_{resR} identique, au signe près ($f_{resL} = f_0 - \Delta f$ et $f_{resR} = f_0 + \Delta f$).

[0109] Selon le mode de réalisation de la figure 5, le circuit 500 applique alors une force de compensation F_{comp} d'amplitude égale et de signe opposé à la force F_2 résultant de

l'accélération a_2 . Cela permet ainsi de ramener la masse sismique 202 en position d'équilibre ($\Delta f = 0$), où les fréquences de résonance f_{resL} et f_{resR} sont toutes deux égales à f_0 .

[0110] Selon un autre mode de réalisation, les deux éléments résonnants 206L et 206R de l'accéléromètre 200 de la figure 2 ont la même fréquence de résonance f_0 en position d'équilibre, mais possèdent une sensibilité différente à l'accélération. Dans ce cas, on peut par exemple faire en sorte que, lorsque l'accéléromètre 200 est en fonctionnement et subit une accélération a_2 :

la fréquence de résonance f_{resL} de l'élément résonnant 206L soit égale à $f_0 - \Delta f$; et
la fréquence de résonance f_{resR} de l'élément résonnant 206R soit égale à $f_0 + N \cdot \Delta f$,
où N est, de préférence, un nombre entier naturel non nul.

[0111] En variante, on peut prévoir que seul l'un des deux éléments résonnants 206L, 206R, par exemple l'élément résonnant 206L, soit sensible à l'accélération. En d'autres termes, cela revient à faire en sorte que l'élément résonnant 206R ne soit pas sensible à l'accélération. On se ramène alors à un cas particulier du mode de réalisation précédent, pour lequel $N = 0$.

[0112] La figure 7 est une vue en perspective, schématique et partielle, d'un autre exemple d'accéléromètre 700 du type auquel s'appliquent, à titre d'exemple, des modes de réalisation décrits.

[0113] Dans l'exemple de la figure 7, l'accéléromètre 700 comporte trois masses sismiques 702x, 702y et 702z analogues à la masse sismique 102 de l'accéléromètre 100 (figure 1). En figure 7, les masses sismiques 702x, 702y et 702z sont respectivement reliées à des éléments fixes ou ancrages 704x, 704y et 704z par des transducteurs ou éléments de transduction 706x, 706y et 706z. Les éléments de transduction 706x, 706y et 706z sont analogues aux éléments résonnants 206L et 206R de l'accéléromètre 200 (figure 2). En particulier, les éléments de transduction 706x, 706y et 706z, ou éléments résonnants, peuvent posséder des dimensions semblables à celles des éléments résonnants 206L et 206R. On suppose, pour simplifier, que les éléments résonnants 706x, 706y et 706z sont identiques entre eux, aux dispersions de fabrication près.

[0114] Dans l'orientation de la figure 7, les éléments résonnants 706x, 706y et 706z sont respectivement disposés le long de trois axes O_x , O_y et O_z orthogonaux formant un trièdre direct $Oxyz$. De cette manière, l'accéléromètre 700 est capable de détecter des accélérations dans les trois directions de l'espace. On qualifie alors l'accéléromètre 700 de capteur à trois axes, ou capteur tri axe.

[0115] On a représenté en figure 7 un exemple d'accéléromètre 700 dont chaque élément résonnant 706x, 706y, 706z est relié à une masse sismique 702x, 702y, 702z qui lui est propre. Toutefois, la personne du métier est capable d'adapter ce qui est décrit ci-dessous en relation avec l'accéléromètre 700 à d'autres types d'accéléromètres,

notamment à des accéléromètres (non représentés) dans lesquels au moins deux éléments résonnants sont liés à une même masse sismique et, plus particulièrement, à des exemples d'accéléromètres où les éléments résonnants 706x, 706y et 706z sont tous trois liés à une même masse mécanique.

- [0116] La figure 8 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un autre mode de réalisation d'un circuit 800 de commande d'un capteur. Le circuit 800 fait par exemple partie de, ou est associé à, l'accéléromètre 700 de la figure 7.
- [0117] En figure 8, de façon analogue à ce qui a été exposé précédemment en relation avec la figure 3, on a symbolisé :
- par des traits pleins, des liaisons véhiculant des signaux $x(t)$ analogiques permettant de coder une information sous forme d'amplitude ; et
 - par des traits en pointillé, des liaisons véhiculant des signaux $x(t)$ analogiques permettant de coder une information sous forme de fréquence.
- [0118] Le circuit 800 comporte un bloc 802 symbolisant une boucle d'asservissement configurée pour régler la fréquence d'excitation d'un élément résonnant 803 (FREQ REF). Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant 803 est un oscillateur et la boucle 802 est, par exemple, une boucle d'auto-oscillation ou une boucle à verrouillage de phase. La boucle d'asservissement 802 du circuit 800 est, par exemple, analogue aux boucles d'asservissement 302L et 302R du circuit 300 exposé en relation avec la figure 3.
- [0119] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant 803 est découplé mécaniquement de l'accéléromètre 700, de sorte que l'élément résonnant 803 n'est pas sensible aux accélérations auxquelles est soumis l'accéléromètre 700. L'élément résonnant 803 est, par exemple, analogue aux éléments résonnants 706x, 706y et 706z (figure 7), l'élément résonnant 803 n'étant toutefois lié mécaniquement à aucune des masses sismiques 702x, 702y et 702z de l'accéléromètre 700.
- [0120] Lorsque l'accéléromètre 700 est en fonctionnement, l'élément résonnant 803 est soumis à un signal FREF d'excitation périodique de fréquence sensiblement égale, de préférence égale, à sa fréquence de résonance. Dans le cas où les éléments résonnants 803, 706x, 706y et 706z sont identiques entre eux, la fréquence du signal FREF est en outre sensiblement égale, de préférence égale, à la fréquence de résonance des éléments résonnants 706x, 706y et 706z en position d'équilibre, c'est-à-dire lorsque l'accéléromètre 700 n'est soumis à aucune accélération.
- [0121] Dans la présente description, on suppose pour simplifier que les éléments résonnants 706x, 706y et 706z possèdent tous, en position d'équilibre, une fréquence de résonance égale à celle de l'élément résonnant 803. Toutefois, en pratique, cela n'est pas forcément le cas. La fréquence de résonance de l'élément résonnant 803 peut notamment être différente de celle des éléments résonnants 706x, 706y et 706z à

l'équilibre. Les fréquences de résonance des éléments résonnants 706x, 706y et 706z à l'équilibre peuvent, en outre, être différentes les unes des autres. Ces différences sont, par exemple, évaluées et prises en compte par le circuit 800 lors d'étapes de calibration pouvant avoir lieu après fabrication de l'accéléromètre 700 et/ou pendant l'utilisation de l'accéléromètre 700.

- [0122] Dans le cas où l'accéléromètre 700 est en position d'équilibre, les éléments résonnants 803, 706x, 706y et 706z sont supposés être en résonance et vibrer tous en phase à la même fréquence. Dit autrement, en position d'équilibre, les éléments résonnants 803, 706x, 706y et 706z vibrent, les uns par rapport aux autres, avec un déphasage nul.
- [0123] Dans le cas où la masse sismique 702x, 702y, 702z subit une accélération le long de l'axe Ox, Oy, Oz, la contrainte Fx, Fy, Fz exercée sur l'élément résonnant 706x, 706y, 706z sous l'action du déplacement latéral de la masse sismique 702x, 702y, 702z entraîne un déphasage des mouvements vibratoires de l'élément résonnant 706x, 706y, 706z par rapport au signal périodique FREF, supposé inchangé. Cela provient du fait que la fréquence de résonance hors équilibre de l'élément résonnant 706x, 706y, 706z est différente de la fréquence de résonance de ce même élément résonnant 706x, 706y, 706z lorsque la masse sismique 702x, 702y, 702z est en position d'équilibre.
- [0124] Selon un mode de réalisation, le circuit 800 comporte des détecteurs de phase 804x, 804y et 804z (PHD). Le détecteur de phase 804x, 804y, 804z reçoit, en entrée :
- le signal périodique FREF d'excitation de l'élément résonnant 803 ; et
 - un autre signal FSx, FSy, FSz image des vibrations de l'élément résonnant 706x, 706y, 706z, ces vibrations étant déphasées par rapport au signal FREF lorsque la masse sismique 702x, 702y, 702z est hors équilibre.
- [0125] Dans le mode de réalisation illustré en figure 8, chaque détecteur de phase 804x, 804y, 804z est propre à l'un des éléments résonnants 706x, 706y et 706z. Le détecteur de phase 804x, 804y, 804z est configuré pour évaluer un déphasage, noté $\Delta\phi_x$, $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$, entre le signal FSx, FSy, FSz image des vibrations de l'élément résonnant 706x, 706y, 706z et le signal FREF de référence. Selon un mode de réalisation préféré, le déphasage $\Delta\phi_x$, $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$ est ensuite transmis à un bloc 808x ($H_{c,x}(s)$), 808y ($H_{c,y}(s)$), 808z ($H_{c,z}(s)$) symbolisant l'application d'une fonction de transfert $H_{c,x}(s)$, $H_{c,y}(s)$, $H_{c,z}(s)$.
- [0126] Selon un mode de réalisation, on fait en sorte que, lorsque le capteur 700 est en fonctionnement, la fréquence de résonance de l'élément résonnant 803 et la fréquence de résonance de l'élément résonnant 706x, 706y, 706z soient proches, et dans la bande passante l'une de l'autre. Plus précisément, en supposant que l'élément résonnant 803 possède une fréquence de résonance f_1 et un facteur de qualité Q_1 et que l'élément résonnant 706x, 706y, 706z possède, hors équilibre, une fréquence de résonance f_2 et

un facteur de qualité Q_2 , on fait de préférence en sorte que $|f_1 - f_2| < (f_1/Q_1)$ et que $|f_1 - f_2| < (f_2/Q_2)$.

- [0127] Le bloc 808x, 808y, 808z d'application de la fonction de transfert $H_{c,x}(s)$, $H_{c,y}(s)$, $H_{c,z}(s)$ est, par exemple, similaire au bloc 308 du circuit 300 de la figure 3. De façon analogue à ce qui a été exposé en relation avec la figure 3, la fonction de transfert $H_{c,x}(s)$, $H_{c,y}(s)$, $H_{c,z}(s)$ appliquée par le bloc 808x, 808y, 808z du circuit 800 est, de préférence, une fonction de régulation PID (proportionnelle, intégrale, dérivée) permettant de soumettre la masse sismique 702x, 702y, 702z à une force de compensation F_{comp_x} , F_{comp_y} , F_{comp_z} . Dans le mode de réalisation illustré en figure 8, le déphasage $\Delta\phi_x$, $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$ est utilisé comme signal d'erreur de la boucle de rétroaction.
- [0128] Les caractéristiques et avantages du bloc 308 du circuit 300 sont également applicables aux blocs 808x, 808y et 808z du circuit 800. L'accéléromètre 700 équipé du circuit de commande 800 possède notamment une étendue de mesure, ou gamme de mesure, supérieure à celle d'un accéléromètre dont le circuit de commande serait dépourvu des blocs 808x, 808y et 808z.
- [0129] En pratique, la force de compensation F_{comp_x} , F_{comp_y} , F_{comp_z} est, par exemple, une force électrostatique exercée sur la masse sismique 702x, 702y, 702z par une ou plusieurs électrodes (non représentées). Dans l'exemple de la figure 8, le circuit 800 produit des signaux de sortie SO_x , SO_y et SO_z qui sont par exemple égaux ou proportionnels à des tensions électriques utilisées pour appliquer les forces électrostatiques F_{comp_x} , F_{comp_y} et F_{comp_z} , respectivement.
- [0130] Dans le circuit 800, l'élément résonnant 803 de référence n'est pas sensible aux accélérations tandis que les trois autres éléments résonnants 706x, 706y et 706z sont sensibles, respectivement, à des accélérations suivant les axes O_x , O_y et O_z . Chaque élément résonnant 706x, 706y, 706z possède sa propre boucle de rétroaction permettant de produire la force de compensation F_{comp_x} , F_{comp_y} , F_{comp_z} le long de l'axe O_x , O_y , O_z considéré. Le déphasage $\Delta\phi_x$, $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$ de chaque élément résonnant 706x, 706y, 706z est alors comparé avec l'élément résonnant 803 de référence. Cela permet avantageusement de compenser des dérives en température susceptibles d'affecter l'accéléromètre 700.
- [0131] De manière générale, plus un accéléromètre possède un nombre élevé d'éléments résonnants, et plus l'utilisation d'un circuit du type du circuit 800 exposé en relation avec la figure 8 est avantageuse. Cela provient notamment du fait que le circuit 800 utilise un élément résonnant 803 de référence qui est commun à tous les autres éléments résonnants 706x, 706y, 706z de l'accéléromètre 700.
- [0132] On a décrit ci-dessus en relation avec la figure 8 un mode de réalisation d'un circuit 800 dont l'élément résonnant 803 et les éléments résonnants 706x, 706y et 706z

possèdent les mêmes modes de résonance.

- [0133] Selon un autre mode de réalisation, l'élément résonnant 803 est différent des éléments résonnants 706x, 706y et 706z, mais l'élément résonnant 803 et les éléments résonnants 706x, 706y et 706z possèdent au moins un mode de résonance à la même fréquence.
- [0134] Selon encore un autre mode de réalisation, l'élément résonnant 803 est différent des éléments résonnants 706x, 706y et 706z, mais l'élément résonnant 803 et les éléments résonnants 706x, 706y et 706z possèdent des fréquences de résonance proportionnelles. Dans ce cas, la fréquence f_2 de résonance de chaque élément résonnant 706x, 706y, 706z est par exemple un multiple de la fréquence f_1 de résonance de l'élément résonnant 803 ($f_2 = N.f_1$, où N est un entier naturel supérieur à 1). Le circuit 800 comporte alors de préférence un multiplicateur de fréquences (non représenté) en sortie de l'élément résonnant 803.
- [0135] Dans le circuit 800, l'un des éléments résonnants 803, 706x, 706y et 706z (l'élément résonnant 803, selon le mode de réalisation illustré en figure 8) est mis en résonance grâce à une boucle d'asservissement ou de rétroaction (la boucle 802, toujours selon ce mode de réalisation). Cela permet avantageusement de faire en sorte que le signal FREF soit toujours maintenu à la fréquence f_1 de résonance de l'élément résonnant 803 même en cas de dérive de fréquence due, par exemple, à une variation de température.
- [0136] En variante, l'élément résonnant 803 n'est pas piloté par la boucle de rétroaction 802. L'élément résonnant 803 est alors par exemple commandé par un auto-oscillateur ou par un générateur de fréquences. Dans ce cas, on suppose par exemple que l'accéléromètre 700 n'est pas sensible aux variations de température.
- [0137] Selon encore un autre mode de réalisation, au moins un élément résonnant, parmi l'élément résonnant 803 de référence et les éléments résonnants 706x, 706y et 706z, possède un mécanisme (non représenté) de régulation de sa fréquence de résonance. Dans ce cas, cela permet avantageusement de compenser un biais susceptible d'affecter l'accéléromètre 700 en position d'équilibre.
- [0138] Par exemple, au moins un capteur de température mesure la température de l'accéléromètre 700 (figure 7) et/ou du circuit 800 (figure 8). Dans ce cas, la fréquence f_1 de résonance de l'élément résonnant 803 est par exemple ajustée en fonction de la température mesurée par le capteur.
- [0139] Selon encore un autre mode de réalisation, la compensation du biais susceptible d'affecter l'accéléromètre 700 en position d'équilibre est effectuée grâce à l'application d'une force de compensation statique s'ajoutant à, ou se cumulant avec, au moins l'une des forces de compensation F_{comp_x} , F_{comp_y} et F_{comp_z} .
- [0140] On a décrit ci-dessus en relation avec la figure 8 un mode de réalisation d'un circuit

800 dont la force de compensation F_{compx} , F_{compy} , F_{compz} est issue d'une fonction de transfert $H_{c,x}(s)$, $H_{c,y}(s)$, $H_{c,z}(s)$ de type PID. La fonction de transfert $H_{c,x}(s)$, $H_{c,y}(s)$, $H_{c,z}(s)$ est de préférence appliquée par un bloc 808x, 808y, 808z analogique.

[0141] Selon un autre mode de réalisation, le signal représentatif du déphasage $\Delta\phi_x$, $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$ est préalablement numérisé. Dans ce cas, l'application de la fonction de transfert $H_{c,x}(s)$, $H_{c,y}(s)$, $H_{c,z}(s)$ s'effectue de préférence par un bloc 808x, 808y, 808z numérique.

[0142] En variante, chacun des signaux FS_x , FS_y , FS_z est numérisé avant le détecteur de phase 804x, 804y, 804z associé. La personne du métier est en mesure d'adapter le circuit 800 à cette variante.

[0143] De façon générale, les signaux de sortie SO_x , SO_y et SO_z du circuit 800 sont générés à partir des signaux de sortie des blocs 808x, 808y et 808z d'application des fonctions de transfert $H_{c,x}(s)$, $H_{c,y}(s)$ et $H_{c,z}(s)$, respectivement.

[0144] Selon un mode de réalisation, les signaux de sortie SO_x , SO_y et SO_z du circuit 800 sont identiques aux signaux de sortie des blocs 808x, 808y et 808z.

[0145] Selon un autre mode de réalisation, les signaux de sortie SO_x , SO_y et SO_z du circuit 800 sont proportionnels aux signaux de sortie des blocs 808x, 808y et 808z.

[0146] Plus généralement, selon encore un autre mode de réalisation, les signaux de sortie SO_x , SO_y et SO_z du circuit 800 sont fonction des signaux de sortie des blocs 808x, 808y et 808z. Le signal de sortie SO_x , SO_y , SO_z dépend par exemple du signal de sortie du bloc 808x, 808y, 808z selon une fonction polynomiale, par exemple une fonction polynomiale d'ordre deux.

[0147] On a décrit ci-dessus en relation avec la figure 7 un exemple d'accéléromètre 700 dont les éléments résonnants 706x, 706y et 706z sont directement liés aux masses sismiques 702x, 702y et 702z, respectivement.

[0148] Dans un autre exemple (non représenté), l'accéléromètre comporte au moins une masse sismique mécaniquement liée à deux poutres identiques par un bras de levier possédant un gain noté Γ . Dans ce cas, une accélération, notée a , communiquée à la masse sismique provoque, sur les poutres, des contraintes opposées et d'amplitude T_{acc} proportionnelle à $a\Gamma$. Les poutres sont alors utilisées comme des résonateurs dont la fréquence de résonance, notée f_R , varie selon une équation du type :

[Math.3]

$$f_R = f_0 + \sqrt{k \cdot T_{acc}}$$

[0149] Dans l'équation Math 3 ci-dessus, f_0 représente la fréquence de résonance en position d'équilibre, c'est-à-dire la fréquence de résonance de chaque poutre en l'absence de contrainte ($T_{acc} = 0$), et k représente un facteur dépendant de la géométrie des poutres. Sous l'effet de l'accélération a , les deux résonateurs subissent une contrainte qui a pour effet de modifier leurs fréquences de résonance respectives.

On se ramène ainsi à un cas analogue à ce qui a été décrit précédemment en relation avec l'accéléromètre 200 de la figure 2.

- [0150] Divers modes de réalisation et variantes ont été décrits. La personne du métier comprendra que certaines caractéristiques de ces divers modes de réalisation et variantes pourraient être combinées, et d'autres variantes apparaîtront à la personne du métier. En particulier, la personne du métier est capable d'adapter les circuits 500 et 800 à des modes de réalisation d'accéléromètres comportant un nombre quelconque de masses sismiques et d'éléments résonnants. Les modes de réalisation décrits en relation avec l'accéléromètre 700 et le circuit 800 sont par ailleurs transposables par la personne du métier à l'accéléromètre 200 et au circuit 500.
- [0151] En outre, ce qui a été décrit plus précisément en relation avec des exemples d'application à des accéléromètres s'applique plus généralement à d'autres capteurs à détection résonnante, notamment des gyromètres à détection résonnante pour lesquels on cherche à obtenir un couplage d'au moins deux résonateurs, ou modes de résonance, ayant un décalage en fréquence de résonance le plus précis possible en vue d'atteindre de meilleures performances. Dans ce cas, les boucles de rétroaction sont préférentiellement utilisées pour modifier la fréquence de résonance de l'un des modes, de façon à pouvoir optimiser la différence des fréquences.
- [0152] Enfin, la mise en œuvre pratique des modes de réalisation et variantes décrits est à la portée de la personne du métier à partir des indications fonctionnelles données ci-dessus. En particulier, le choix des valeurs des fréquences d'excitation des éléments résonnants est à la portée de la personne du métier.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de commande d'un capteur (200 ; 700) micro-électromécanique, comprenant les étapes suivantes :
exciter, par un même premier signal (FSL ; FREF), un premier élément résonnant (206L ; 803) et au moins un deuxième élément résonnant (206R ; 706x, 706y, 706z) ; et
évaluer un déphasage ($\Delta\phi$; $\Delta\phi_x$, $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$) entre le premier signal et un deuxième signal (FSR ; FSx, FSy, FSz) image de vibrations du deuxième élément résonnant.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, dans lequel le premier signal (FSL ; FREF) est périodique et de fréquence sensiblement égale, de préférence égale, à une fréquence de résonance (f_{resL} ; f_1) du premier élément résonnant (206L ; 803).
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 2, dans lequel le deuxième élément résonnant (206R ; 706x, 706y, 706z) possède, lorsque le capteur (200 ; 700) est en position d'équilibre, une fréquence de résonance (f_{resR} ; f_2) sensiblement égale, de préférence égale, à la fréquence de résonance (f_{resL} , f_1) du premier élément résonnant (206L ; 803).
- [Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le premier signal (FSL ; FREF) est imposé au premier élément résonnant (206L ; 803) par une boucle d'asservissement (502L ; 802).
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le déphasage ($\Delta\phi$; $\Delta\phi_x$, $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$) est évalué par un détecteur de phase (504 ; 804x, 804y, 804z) propre à chaque deuxième élément résonnant (206R ; 706x, 706y, 706z).
- [Revendication 6] Procédé l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le capteur (200 ; 700) comporte une ou plusieurs masses sismiques (202 ; 702x, 702y, 702z), chaque deuxième élément résonnant (206R ; 706x, 706y, 706z) étant lié à ladite ou à l'une desdites masses sismiques.
- [Revendication 7] Procédé selon la revendication 6, comprenant en outre une étape consistant à exercer une force (F_{comp} ; F_{comp_x} , F_{comp_y} , F_{comp_z}) de rétroaction sur chaque masse sismique (202 ; 702x, 702y, 702z).
- [Revendication 8] Procédé selon la revendication 7, dans lequel la force de rétroaction (F_{comp} ; F_{comp_x} , F_{comp_y} , F_{comp_z}) est produite par une boucle de rétroaction comportant un régulateur (508 ; 808x, 808y, 808z), de préférence un régulateur proportionnel et/ou intégral et/ou dérivé, plus préférentiellement un régulateur proportionnel, intégral et dérivé.

- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, dans lequel le premier élément résonnant (206L ; 803) est découplé mécaniquement de ladite ou desdites masses sismiques (202 ; 702x, 702y, 702z).
- [Revendication 10] Circuit (500 ; 800) adapté à mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.
- [Revendication 11] Capteur (200 ; 700) micro-électromécanique comportant au moins un circuit selon la revendication 10.
- [Revendication 12] Capteur (200) à un axe selon la revendication 11, comportant exactement un deuxième élément résonnant (206R) et un détecteur de phase (504).
- [Revendication 13] Capteur (700) à trois axes selon la revendication 11, comportant exactement trois deuxième éléments résonnants (706x, 706y, 706z) et trois détecteurs de phase (804x, 804y, 804z).
- [Revendication 14] Accéléromètre comportant au moins un capteur (200 ; 700) selon l'une quelconque des revendications 11 à 13.
- [Revendication 15] Gyromètre comportant au moins un capteur (200 ; 700) selon l'une quelconque des revendications 11 à 13.

[Fig. 4]

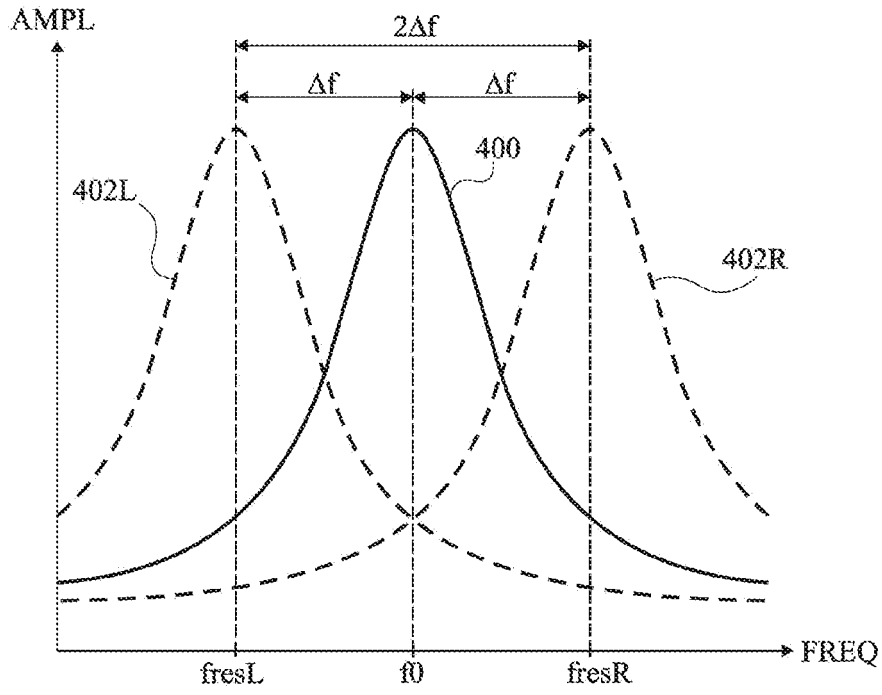


Fig 4

[Fig. 5]

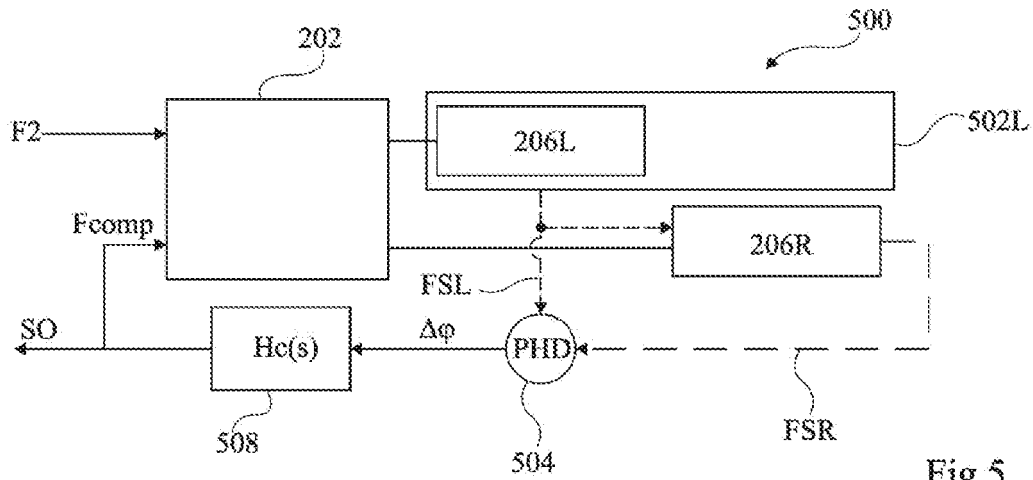


Fig 5

[Fig. 6]

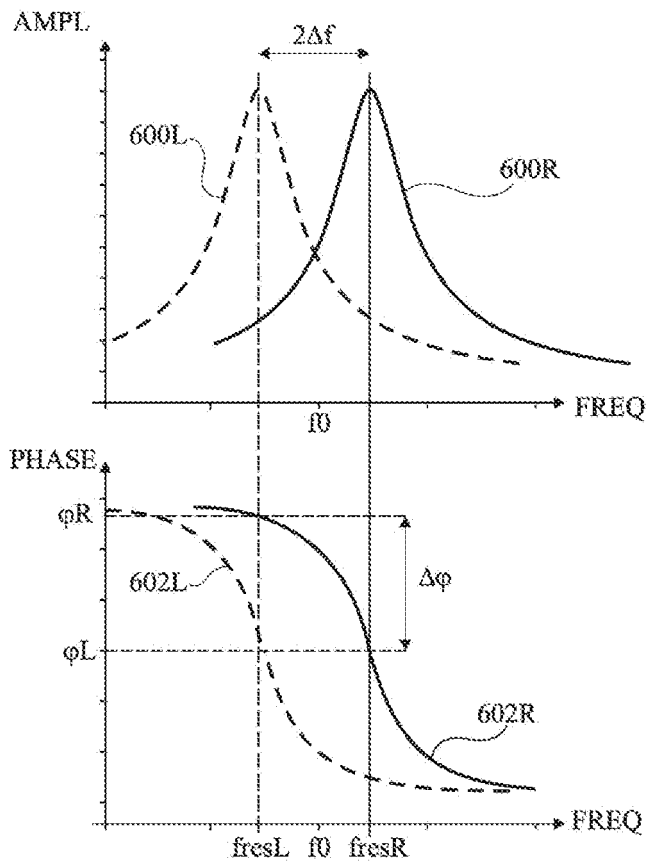


Fig 6

[Fig. 7]

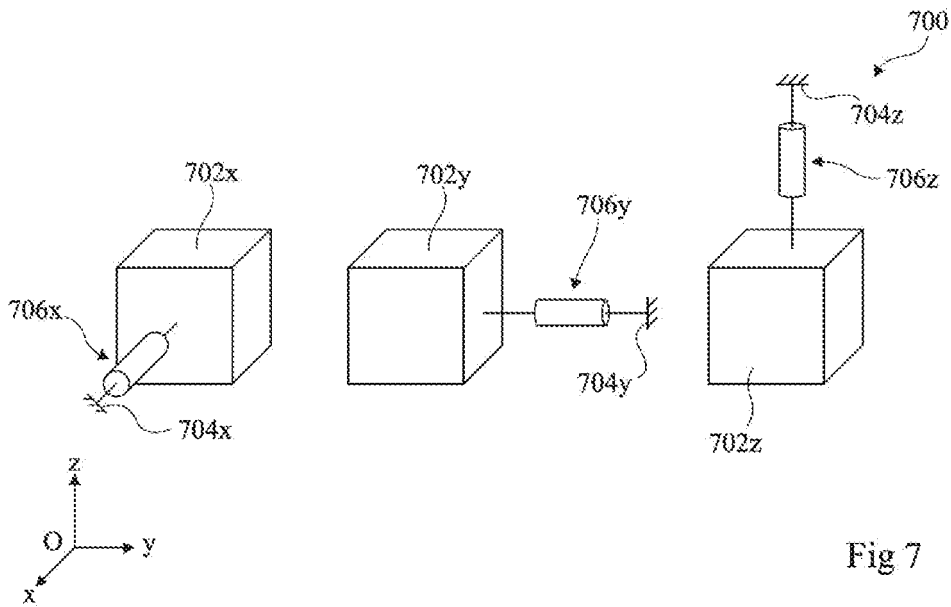


Fig 7

[Fig. 8]

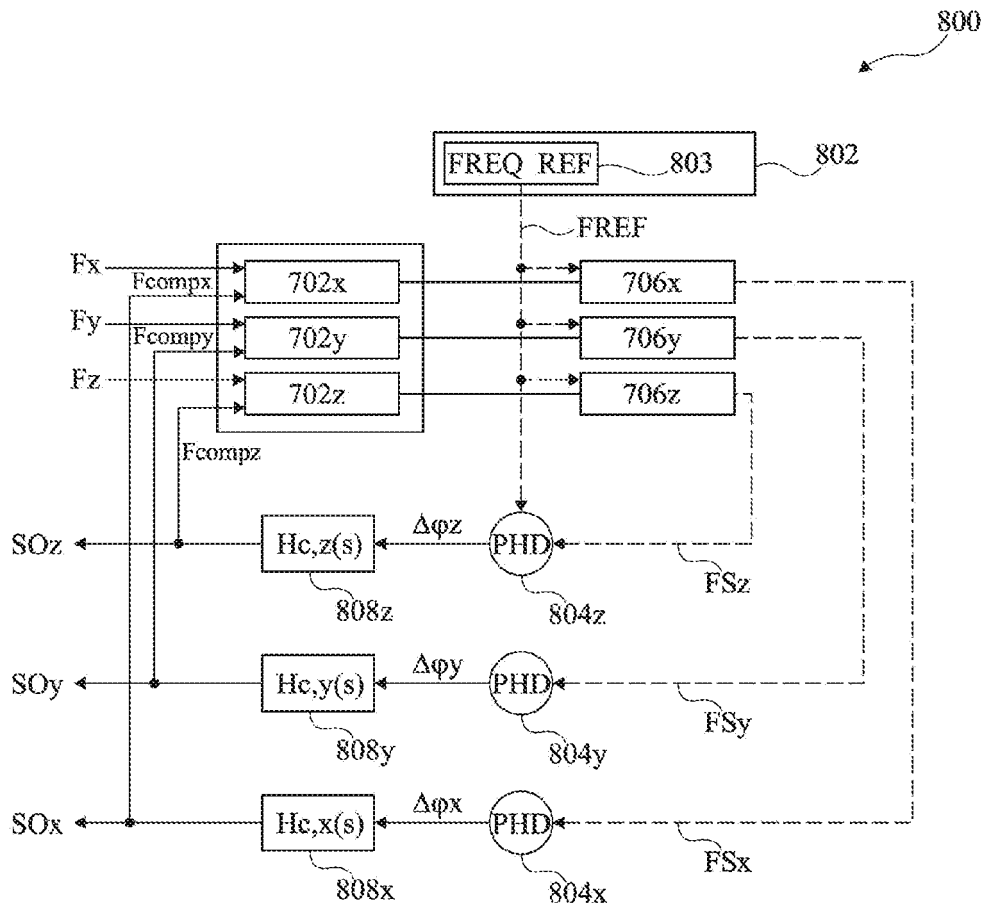


Fig 8

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

EP 3 301 398 A1 (ST MICROELECTRONICS SRL
[IT]) 4 avril 2018 (2018-04-04)

US 2009/064781 A1 (AYAZI FARROKH [US] ET
AL) 12 mars 2009 (2009-03-12)

US 2014/208823 A1 (TRUSOV ALEXANDER A [US]
ET AL) 31 juillet 2014 (2014-07-31)

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT