(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

PCT

(43) Date de la publication internationale
5 février 2009 (05.02.2009)

(10) Numéro de publication internationale
WO 2009/016289 A2

(51) Classification internationale des brevets :
G01M 13/04 (2006.01) *G01H 11/00* (2006.01)
G01M 7/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2008/000910

(22) Date de dépôt international : 26 juin 2008 (26.06.2008)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0704614 27 juin 2007 (27.06.2007) FR

(71) Déposant *(pour tous les États désignés sauf US)* : **UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE ARDENNE** [FR/FR]; Villa Douce, 9, boulevard de la Paix, F-51097 Reims Cedex (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants *(pour US seulement)* : **MARCONNET, Patrick** [FR/FR]; 55, rue des Dames de France, F-51390 Gueux (FR). **POTTIER, Bernard** [FR/FR]; 11, rue des Salines, F-51100 Reims (FR). **RASOLOFONDRAIBE, Lanto** [FR/FR]; 2F avenue du Général de Gaulle, F-51100 Reims (FR).

(74) Mandataire : **DEBAY, Yves**; Cabinet Debay, 126 Elysée 2, F-78170 La Celle Saint Cloud (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR MONITORING THE VIBRATORY STATE OF A ROTATING MACHINE

(54) Titre : DISPOSITIF ET PROCÉDÉ DE SURVEILLANCE DE L'ÉTAT VIBRATOIRE D'UNE MACHINE TOURNANTE

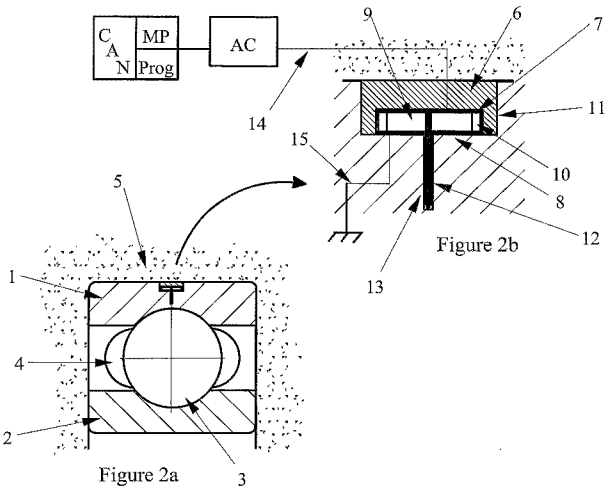


Figure 2b

Figure 2a

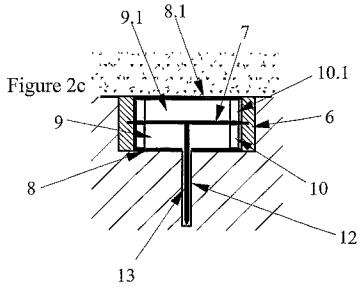


Figure 2c

(57) **Abstract:** The present invention relates to a device for monitoring the vibrations generated by a bearing of a machine formed by two coaxial races, an outer race and an inner race, with one fixed with respect to the frame of a machine and the other rotating, between which races is trapped at least one rolling element which is able to move, vibrations generated by other members of the machine having a respective frequency signature passing through this bearing, characterized in that the device comprises at least one non-conductive positioning means mounted on an element in contact with an element of the bearing, the positioning means positioning a conductive element, forming a first plate of a capacitor to form a capacitive sensor, at a distance from a conductive part of a race of the bearing, forming the second plate of the capacitor, and the positioning means being secured to a partitioning means so as to create an insulating medium between these two plates.

(57) **Abrégé :** La présente invention concerne un dispositif de surveillance des vibrations générées par un roulement d'une machine formé par deux bagues, extérieure et intérieure, l'une fixe par rapport au bâti d'une machine et l'autre tournante, coaxiales entre lesquelles au moins un élément roulant est emprisonné et susceptible de se déplacer, des vibrations générées par d'autres organes de la machine possédant une signature fréquentielle respective transitant par ce roulement, caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de positionnement non-conducteur

[Suite sur la page suivante]

WO 2009/016289 A2

ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

monté sur un élément en contact avec un élément du roulement, le moyen de positionnement positionnant un élément conducteur, réalisant une première armature d'un condensateur pour former un capteur capacitif, à une distance d'une partie conductrice d'une bague du roulement, formant la seconde armature du condensateur, et le moyen de positionnement étant solidaire d'un moyen de cloisonnement pour créer un milieu isolant entre ces deux armatures.

Dispositif et procédé de surveillance de l'état vibratoire d'une machine tournante.

La présente invention se rapporte au domaine des composants mécaniques des machines tournantes dont les mécanismes de rotation sont sensibles au balourd ou sont susceptibles d'exciter la structure des machines telles que les turbines, les alternateurs, moteurs et réducteurs, etc. et plus particulièrement au domaine des roulements à billes, à aiguilles ou à rouleaux.

Les roulements sont des composants mécaniques qui guident la rotation d'un arbre dans un palier en limitant les frottements qui pourraient être occasionnés par le mouvement d'une des deux pièces par rapport à l'autre. Les roulements sont formés par deux bagues coaxiales, l'une dite intérieure et l'autre extérieure entre lesquelles des éléments mobiles sont placés et maintenus. Ces éléments mobiles, généralement des billes, bien qu'emprisonnés entre les deux bagues coaxiales assurent la rotation d'une des bagues par rapport l'autre.

Dans certains modèles, les billes sont remplacées par des rouleaux cylindriques ou tronconiques. Les roulements sont alors capables de supporter un effort radial supérieur par rapport aux roulements à billes classiques. De même, certains roulements, dits à aiguilles, utilisent des rouleaux de faible diamètre comparé à leur longueur, présentant l'avantage d'être moins encombrant grâce à un espace radial réduit.

Pourtant, même si l'utilisation de roulements réduit les frottements dus à la rotation d'un arbre dans son palier, une fatigue des composants mécaniques va apparaître une fois qu'un certain nombre de rotations est dépassé. Cette détérioration atteint les organes roulants comme les bagues. Elle peut prendre la forme d'une usure naturelle, l'écaillage, d'une corrosion, d'un grippage, d'une abrasion, etc. qui va générer un choc, ou bien prendre la forme d'un déséquilibrage de l'arbre provoquant un balourd. Cette

détérioration de l'état du mécanisme se traduit alors par une vibration qui augmente avec l'usure.

Ainsi, il est connu que si l'augmentation des vibrations permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques du spectre vibratoire de la machine va permettre d'en identifier la cause et donc de définir le délai avant que le seuil critique ne soit atteint. Suivant le type d'altération du mécanisme, la vibration varie. Le balourd d'un déséquilibrage de l'arbre produit une excitation sinusoïdale tandis que l'écaillage d'une piste d'un roulement va provoquer un choc qui se traduit par une excitation impulsionnelle au passage de chacun des éléments mobiles du roulement sur l'écaille.

Actuellement, la principale méthode pour caractériser et surveiller l'état de chaque composant essentiel d'une machine tournante consiste en l'utilisation de capteurs vibratoires de type accéléro-métriques. Le phénomène utilisé dans ce type de capteur est appelé piézo-électricité. Sous l'action d'une force mécanique, certains corps peuvent se polariser. Pour utiliser cette propriété, les capteurs piézoélectriques présentent la forme d'un disque dont chacune des surfaces est reliée à une électrode. Une pression sur une face du capteur génère une contrainte mécanique qui polarise le capteur. La charge générée est par la suite amplifiée pour pouvoir être mesurée.

Pour pouvoir mesurer les vibrations dues à une détérioration, ces capteurs piézo-électriques sont disposés à proximité des points stratégiques des principaux composants de la machine surveillée. La fréquence des vibrations du roulement se traduit par une fréquence de contrainte/pression à la surface du capteur, transformée sous la forme d'une variation d'un signal électrique mesuré.

Il apparaît que l'utilisation de tels capteurs présente de nombreux inconvénients. En plus de leur coût élevé, ces capteurs ne peuvent pas toujours être positionnés au plus près de la source à l'origine de la vibration éventuelle. Or les vibrations engendrées par les défauts du roulement ont la

particularité de se propager dans l'ensemble de la structure de la machine. Ces vibrations peuvent ainsi changer de milieu du fait du changement de la nature des matériaux, ce qui provoque alors des phénomènes de réflexion, de réfraction mais encore de conversion du mode de propagation. Il est donc important pour mesurer correctement les vibrations d'une machine que les capteurs soient positionnés sur des points de mesure optimums. Dans le cas d'une utilisation de capteurs accéléro-métriques ou piézo-électriques, l'accession à ces points de mesure optimum n'est pas toujours possible. Par ailleurs, les vibrations sont amorties au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de la source qui leur a donné naissance. Le positionnement de ces capteurs à distance de la source des vibrations entraine alors une atténuation importante du signal mesuré.

De plus, il faut noter que ces capteurs vibratoires ont une qualité de mesure qui dépend de la surface contre laquelle ils sont positionnés. Cette surface doit pouvoir transmettre correctement les vibrations mesurées sans qu'il n'y ait de perte d'information.

La présente invention a pour objet de fournir au moins un capteur capable de palier un ou plusieurs inconvénients de l'art antérieur tout en améliorant la qualité du signal vibratoire mesuré et en proposant une solution à faible coût.

Cet objectif est atteint par un dispositif de surveillance d'une machine des vibrations générées par un roulement formé par deux bagues, l'une extérieure et l'autre intérieure, l'une fixe par rapport au bâti d'une machine et l'autre tournante, coaxiales entre lesquelles au moins un élément roulant est emprisonné et susceptible de se déplacer, des vibrations générées par d'autres organes de la machine transitant par ce roulement, chacun des organes de la machine possédant une signature fréquentielle respective, caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de positionnement non-conducteur monté sur au moins un élément en contact avec au moins un élément du roulement ou monté sur au moins un des éléments du roulement, le moyen de positionnement comportant au moins un

logement pour positionner au moins un élément conducteur, constituant une première armature d'au moins un condensateur pour former un capteur capacitif, à une distance d'une partie conductrice fixée ou intégrée à une bague du roulement, formant la seconde armature du condensateur ou capteur capacitif, et le moyen de positionnement non-conducteur étant solidaire d'au moins un moyen de cloisonnement qui permet de créer, entre au moins deux armatures d'un même condensateur, un espace formant un milieu isolant diélectrique et ce moyen de cloisonnement assurant l'étanchéité de ce milieu isolant et en étant en contact avec une partie de la bague du roulement fixant ou intégrant la seconde armature, les armatures du capteur capacitif étant montées perpendiculairement à l'axe de déplacement des vibrations surveillées et en ce que, la seconde armature étant intégrée ou solidarisée dans une bague de roulement fixe par rapport à un bâti de la machine au fond d'une première cavité de la bague de roulement, un moyen de positionnement non-conducteur d'au moins une armature vient former un capteur capacitif en disposant la première armature en face de la seconde armature, un moyen de cloisonnement annulaire fermant le milieu isolant qui sépare les deux armatures, et en ce que, une seconde cavité plus étroite que la première cavité étant réalisée dans le fond de la première cavité et formée par un alésage orienté selon un axe perpendiculaire à l'axe de rotation du roulement et passant par le centre de rotation du roulement, l'extrémité d'une aiguille monté sur la première armature perpendiculairement à un plan tangent à la première armature vienne se maintenir en contact avec le fond de la seconde cavité situé dans la profondeur de la bague de roulement et en face du chemin de roulement en contact avec au moins un élément roulant.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisée en ce que le module de Young du moyen de positionnement est inférieure à celui de l'aiguille montée sur la première armature et/ou celui de la bague de roulement.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce qu'une troisième armature est intégrée ou solidarisée à la surface du bâti de la machine située au niveau de l'orifice de la cavité de la bague de roulement en contact avec le bâti de la machine, le moyen de positionnement non-conducteur disposant la première armature en face de la troisième armature simultanément entre les deuxième et troisième armatures de sorte que les première et troisième armatures, séparées par un moyen de cloisonnement de forme annulaire pour fermer un milieu isolant, forment un second capteur capacitif.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que le moyen de cloisonnement est formé par une lame métallique solidaire du moyen de positionnement et en contact avec au moins une partie de la surface à laquelle la seconde armature se trouve solidarisée ou intégrée.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que le moyen de cloisonnement est formé par un joint élastique solidaire du moyen de positionnement, le joint élastique présentant une lèvre en contact avec au moins une partie de la surface à laquelle la seconde armature se trouve solidarisée ou intégrée.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce qu'au moins trois premières armatures conductrices sont positionnées par un moyen de positionnement non-conducteur, radialement par rapport à au moins une seconde armature conductrice solidarisée ou intégrée à une partie d'une bague du roulement, les axes passant respectivement par les positions de chacune des paires d'éléments conducteurs formant un capteur capacitif et le centre de rotation du roulement réalisent entre eux des angles (α) d'au plus 120°.

Un autre avantage d'un dispositif selon l'invention avec plusieurs capteurs capacitifs disposés à 120° par rapport à l'axe coaxial des bagues

du roulement est que la localisation de l'éventuel défaut est réalisée avec une plus grande précision.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce qu'au moins deux armatures conductrices en vis à vis sont l'une convexe et l'autre concave dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation du roulement.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que le moyen de positionnement non-conducteur positionne au moins une première armature conductrice axialement par rapport à une seconde armature conductrice solidarisée ou intégrée à une bague du roulement.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que le moyen de positionnement non-conducteur positionne une paire d'armatures conductrices, l'une radialement, l'autre axialement par rapport à au moins une armature conductrice solidarisée ou intégrée à une bague du roulement.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce qu'un seul espace formant le milieu isolant diélectrique est commun à la paire de condensateurs formés par au moins deux armatures conductrices positionnées par le moyen de positionnement non-conducteur d'une part et au moins une armature conductrice solidarisée ou intégrée à une bague du roulement d'autre part.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce qu'au moins trois premières armatures sont positionnées radialement par au moins un moyen de positionnement non-conducteur en face d'au moins une seconde armature solidarisée ou intégrée à une bague du roulement formant un premier ensemble d'au moins trois capteurs capacitifs, et en ce que sur au moins une face du roulement, au moins trois premières armatures sont positionnées par au moins un moyen de positionnement non-conducteur en face d'au moins une seconde

armature solidarisée ou intégrée à une bague du roulement, formant au moins un second ensemble d'au moins trois autres capteurs capacitifs, les trois capteurs capacitifs de chacun de ces ensembles étant positionnés à égale distance de l'axe de rotation (Z-Z) du roulement de sorte que, dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation (Z-Z) du roulement, les plans passant respectivement par les axes de symétrie de chacun des capteurs capacitifs et le centre de rotation du roulement forment entre eux des angles (α) de 120.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de réglage de la distance qui sépare au moins deux armatures participant à la formation d'un même capteur capacitif.

Un autre avantage du dispositif de l'invention est que le réglage de la distance entre les armatures permet de définir la sensibilité et la valeur du condensateur à vide.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que les paires d'armatures de chacun des capteurs capacitifs sont reliées à un montage électronique respectif formant un amplificateur de charge destiné à délivrer en temps réel un signal représentatif des déplacements d'une armature par rapport à l'autre dus aux vibrations lors du fonctionnement du roulement mécanique.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que chaque paire d'armatures est solidarisée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature solidarisée ou intégrée à la bague de roulement est reliée à la masse et la première armature positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur est reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble blindé dont le blindage est relié à l'entrée non-inverseuse de l'ALI, l'entrée non-inverseuse de l'ALI étant reliée à un générateur fournissant une tension

continue ou alternative (*Ve*), la sortie de l'ALI étant reliée à son entrée inverseuse via un condensateur (*Cf*) et une résistance montée en parallèle.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que chaque paire d'armatures est associée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature solidarisée ou intégrée à la bague de roulement est reliée à un générateur fournissant une tension (*Ve*) et la première armature positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur est reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble blindé dont le blindage est relié à une armature d'un condensateur (*Cs*) reliée à la masse et dont l'autre armature se trouve reliée à l'entrée inverseuse (*i*) de l'ALI, un condensateur (*Cf*) étant disposé entre l'entrée inverseuse de l'ALI et la sortie de l'ALI et trois résistances montées en T, l'une des résistances reliée à la masse, étant positionnées en parallèle par rapport au condensateur (*Cf*), l'entrée non-inverseuse (*n.i*) de l'ALI étant reliée à la masse

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que la sortie de l'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) est reliée à l'entrée d'un convertisseur analogique digital dont la sortie est utilisée par un circuit à microprocesseur pour calculer la variation de distance par l'exécution d'un programme mettant en œuvre la formule :

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

et pour déclencher une alarme par comparaison du résultat obtenu avec un seuil mémorisé, Δx représentant la variation de la distance (d) séparant les deux armatures du condensateur, ΔV_s représentant la variation de la tension à la sortie de l'amplificateur, *Ve* représentant la composante continue ou alternative de la tension à l'entrée de l'amplificateur, S_c représentant la sensibilité de la capacité et C_f représentant la capacité du condensateur reliant la sortie de l'ALI à l'entrée inverseuse.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce qu'il comprend un moyen de détection de la fréquence de rotation du roulement pour réaliser des mesures lorsque les bagues du roulement sont dans une position définie l'une par rapport à l'autre.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de traitement fréquentiel du signal vibratoire mesuré au niveau des armatures du condensateur permettant d'obtenir le signal vibratoire d'au moins un des différents organes de la machine par comparaison avec les signatures vibratoires respectives de chacun des organes de la machine enregistrées au niveau d'au moins un moyen de mémorisation.

Selon une autre variante de l'invention, le dispositif de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de traitement temporel du signal vibratoire d'au moins un des organes de la machine permettant d'obtenir plusieurs paramètres statistiques de ce signal pour être comparés avec des paramètres statistiques de défauts enregistrés au niveau d'un moyen de mémorisation.

Un autre objectif de l'invention est de proposer un procédé qui permette de mesurer en temps réel, précisément et à distance de petites variations de capacités dues aux vibrations du roulement en évitant la mesure de capacités parasites dues à un effet d'antenne.

Cet objectif est atteint grâce à un procédé de surveillance des vibrations mettant en jeu un dispositif de surveillance selon l'invention, caractérisé en ce qu'il comprend au moins une étape de mesure des charges induites par couplage capacitif sur une première armature conductrice d'un condensateur à écartement variable positionnée par un moyen de positionnement non-conducteur, une seconde armature conductrice solidarisée ou intégrée à une bague du roulement étant à un potentiel fixé.

Selon une variante de l'invention, le procédé de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que la paire d'armatures étant solidarisée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature solidarisée ou intégrée à la bague reliée à la masse, la première armature étant positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur et reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble blindé dont le blindage est relié à l'entrée non-inverseuse de l'ALI, l'entrée non-inverseuse de l'ALI étant reliée à un générateur fournissant une tension continue ou alternative (*Ve*), la sortie de l'ALI étant reliée à son entrée inverseuse via un condensateur (*Cf*) et une résistance montée en parallèle, le procédé comprend au moins une étape de calcul de la variation (Δx) de la distance séparant les deux armatures du condensateur à partir de la variation de la tension (ΔV_s) à la sortie d'un amplificateur de charge (AC) en utilisant la relation :

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

Δx représentant la variation de la distance (d) séparant les deux armatures du condensateur, ΔV_s représentant la variation de la tension à la sortie de l'amplificateur, *Ve* représentant la composante continue ou alternative de la tension à l'entrée de l'amplificateur, S_c représentant la sensibilité de la capacité et C_f représentant la capacité du condensateur reliant la sortie de l'ALI à l'entrée inverseuse.

Selon une autre variante de l'invention, le procédé de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que la paire d'armatures étant associée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature solidarisée ou intégrée à la bague de roulement est reliée à un générateur fournissant une tension continue ou alternative (*Ve*) et la première armature positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur est reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble blindé dont le blindage est relié à une armature d'un condensateur (*Cs*) reliée à la masse et dont l'autre

armature se trouve reliée à l'entrée inverseuse (*i*) de l'ALI, un condensateur (*Cf*) étant disposé entre l'entrée inverseuse de l'ALI et la sortie de l'ALI et trois résistances montées en T, l'une des résistances reliée à la masse, étant positionnées en parallèle par rapport au condensateur (*Cf*), l'entrée non-inverseuse (*n.i*) de l'ALI étant reliée à la masse, le procédé comprend au moins une étape de calcul de la variation (Δx) de la distance séparant les deux armatures du condensateur à partir de la variation de la tension (ΔV_s) à la sortie d'un amplificateur de charge (AC) en utilisant la relation :

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

Δx représentant la variation de la distance (d) séparant les deux armatures du condensateur, ΔV_s représentant la variation de la tension à la sortie de l'amplificateur, *Ve* représentant la composante continue ou alternative de la tension à l'entrée de l'amplificateur, S_c représentant la sensibilité de la capacité et C_f représentant la capacité du condensateur reliant la sortie de l'ALI à l'entrée inverseuse.

Selon une autre variante de l'invention, le procédé de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que, la sortie de l'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) étant reliée à l'entrée d'un convertisseur analogique digital (CAN) dont la sortie est utilisée par un circuit à microprocesseur (MP) pour calculer la variation de distance par l'exécution d'un programme (Prog), le procédé comprend au moins une étape de déclenchement d'une alarme après comparaison de la variation (Δx) de l'écartement entre les deux armatures avec une valeur seuil.

Selon une autre variante de l'invention, le procédé de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que, le dispositif comprenant un moyen de mémorisation de la signature vibratoire de chacun des organes de la machine, le procédé présente au moins :

- une étape de mesure du signal vibratoire au niveau des armatures du capteur capacitif positionné au niveau du roulement,

- une étape de comparaison du signal vibratoire mesuré avec la signature vibratoire mémorisée d'au moins un organe défini de la machine,
- une étape de détermination puis d'extraction du signal vibratoire propre à l'organe défini de la machine depuis le signal vibratoire mesuré.

Selon une autre variante de l'invention, le procédé de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que, le dispositif comprenant un moyen de mémorisation de valeurs seuils de défaut de plusieurs paramètres statistiques, le procédé présente au moins :

- une étape de mesure du signal vibratoire au niveau des armatures du condensateur positionné au niveau du roulement,
- une étape de calcul de paramètres statistiques du signal vibratoire mesuré,
- une étape de comparaison des paramètres statistiques calculés avec des valeurs seuils de défauts mémorisées,
- une étape de détermination de l'importance du défaut.

Selon une autre variante de l'invention, le procédé de surveillance de vibrations est caractérisé en ce que, le dispositif comprenant au moins un moyen d'affichage, le procédé présente au moins une étape d'affichage de la position et de l'importance d'un défaut.

Un avantage de l'invention est que le procédé comprenant au moins une étape de traitement des signaux délivrés par les capteurs capacitifs par l'utilisation d'au moins une technique d'analyse vibratoire, il permet de déterminer l'origine, la nature et/ou l'importance des défauts du roulement et des organes surveillés de la machine.

Un autre avantage de l'invention est que le procédé permet une surveillance continue du roulement et des organes de la machine.

L'invention, ses caractéristiques et ses avantages apparaîtront plus clairement à la lecture de la description faite en référence aux figures annexées dans lesquelles :

- les figures 1a et 1b présentent un dispositif de roulement connu, représenté respectivement selon un axe perpendiculaire à l'axe de rotation (Z-Z) du roulement et selon un plan passant par l'axe de rotation (Z-Z) du roulement,
- les figures 2a, 2b et 2c représentent un mode de réalisation de l'invention selon deux variantes de réalisation,
- la figure 3 représente un premier schéma de montage électronique du dispositif de l'invention
- la figure 4 représente un second schéma de montage électronique du dispositif de l'invention.

Le roulement mécanique est formé de deux bagues coaxiales, l'une intérieure (2) et l'autre extérieure (1) entre lesquelles sont disposés et maintenus emprisonnés des éléments roulants (3). Ces différentes pièces sont généralement réalisées en acier pour demeurer résistantes à la compression. La face interne de la bague extérieure (1), tout comme la face externe de la bague intérieure (2), présente un chemin de roulement incurvé pour s'adapter à la forme des éléments roulants (3). La combinaison des deux chemins situés sur les bagues respectives assure le maintien des éléments roulants (3) entre les deux bagues (1, 2) tout en garantissant leur déplacement dans un circuit circulaire centré sur l'axe de rotation (Z-Z) du roulement, coaxial aux deux bagues. L'écartement entre les éléments roulants (3) est maintenu constant grâce à une cage (4) qui vient se positionner sur chaque face du roulement, au niveau des ouvertures radiales sur les éléments roulants (3), entre les deux bagues (1, 2) du roulement.

Les éléments roulants (3) peuvent être de plusieurs types. Généralement, il s'agit de billes mais dans certains modèles, les billes sont remplacées par des rouleaux cylindriques ou tronconiques. Les roulements sont alors capables de supporter un effort radial supérieur par rapport aux

roulements à billes classiques. Pour réduire l'espace radiale, le diamètre des rouleaux peut être diminué par rapport à leur longueur ; les éléments roulants sont alors appelés aiguilles. Les différents éléments roulants (3) sont généralement maintenus à distance entre eux par une cage (4) qui permet leur répartition homogène dans le circuit circulaire formé par les deux bagues (1, 2).

Pour supprimer tout jeu éventuel et par la même occasion toute vibration inutile risquant de fausser les mesures, le roulement mécanique est légèrement précontraint. Au niveau du roulement, au moins un élément additionnel non-conducteur : un moyen de positionnement (6) est rajouté.

Le principe de l'invention consiste à placer une première armature conductrice (7) du condensateur à proximité et en face d'une partie conductrice solidarisée ou intégrée à la bague fixe par rapport au bâti (5) qui forme une seconde armature (8). La distance qui vient séparer les deux armatures conductrices (7, 8) est alors très faible, inférieur ou de l'ordre du dixième de millimètre. L'espace (9) séparant les deux armatures est un milieu isolant dit diélectrique. Pour former cet espace (9), le moyen de positionnement (6) non-conducteur positionne d'une part une première armature (7) à distance de la bague de roulement et est associé d'autre part à au moins un moyen de cloisonnement (10) qui se prolonge de chaque coté de la première armature (7) jusqu'à venir en contact avec la seconde armature solidarisée ou intégrée à la bague fixe du roulement. Le moyen de cloisonnement (10), solidaire du moyen de positionnement (6) non-conducteur, vient ainsi réaliser un espace (9) entre les deux armatures conductrices (7, 8) qui forme un milieu isolant diélectrique. De plus, le moyen de cloisonnement (10) assure l'étanchéité du milieu isolant de l'espace (9) ainsi créé.

Les condensateurs à écartement variable ainsi formés par les armatures conductrices (7, 8) séparées par un milieu isolant diélectrique (9) ont des capacités de l'ordre du picofarad avec des variations de l'ordre du femto-farad. Pour permettre des variations d'écartement entre ces deux

armatures (7, 8), le moyen de positionnement (6) présente un module de Young inférieur à celui du roulement ou du bâti de façon à pouvoir se déformer lorsqu'il se trouve traversé par des vibrations et ainsi permettre une variation de l'écartement des deux armatures du capteur capacitif formé par le condensateur.

Selon le mode de réalisation choisi, le moyen de cloisonnement (10) peut être formé par une lame métallique solidaire du moyen de positionnement (6), la lame métallique venant en contact avec la partie de la surface de la bague (1 ou 2) du roulement qui est solidarisée ou intègre la seconde armature (8) du condensateur formant le capteur capacitif. Selon un autre mode de réalisation, ce moyen de cloisonnement (10) peut également être formé par un joint élastique solidaire du moyen de positionnement (6), le joint élastique présentant une lèvre qui vient en contact avec la partie de la surface de la bague (1 ou 2) du roulement qui est solidarisée ou intègre la seconde armature (8) du condensateur formant le capteur capacitif.

La réalisation du dispositif de l'invention consiste à intégrer le capteur capacitif dans l'épaisseur d'une des bagues (1, 2), intérieure ou extérieure, du roulement. La bague (1, 2) qui intègre le capteur comprend alors au moins un alésage, un lamage ou un perçage pour venir former au moins une cavité (11) dans la profondeur de la bague (1, 2) du roulement. Dans cette cavité (11), un moyen de positionnement (6) non-conducteur est disposé de façon à positionner une première armature (7) conductrice, perpendiculairement à l'axe de la cavité (11), à proximité et en face d'une seconde armature (8) positionnée dans le fond de la cavité (11) où elle se trouve solidarisée ou intégrée à la bague de roulement (1, 2). Entre les deux armatures, un espace (9) délimitant un milieu isolant est réalisé par un moyen de cloisonnement (10). Selon un mode de réalisation particulier, ce moyen de cloisonnement (10) présente une forme annulaire fixé au moyen de positionnement (6).

Selon une variante du second mode de réalisation, le moyen de positionnement (6) est maintenu en contact avec le bâti (5) de la machine,

directement ou bien à travers un élément particulier comme par exemple une pastille d'acier. La surface contact est alors réalisée au niveau de l'orifice de la cavité (11) qui vient déboucher à la surface de la bague du roulement (1, 2). Au travers de cette zone de contact, le moyen de positionnement (6) est sensible aux vibrations qui proviennent directement du bâti (5) de la machine et plus uniquement aux vibrations qui proviennent ou transitent par le roulement.

Le dispositif de détection de l'invention permet de réaliser un capteur capacitif capable de mesurer les vibrations dues aux contraintes de compression des éléments roulants (3) sur le chemin de roulement. Selon la théorie de Hertz, la répartition des contraintes dues à la compression se traduit par une diminution de la déformation avec la distance du point de contact de l'élément roulant (3) sur le chemin de roulement (mais toujours en dehors de la zone de contrainte maxi (de Hertz) en sous couche). La mesure de cette déformation se doit donc d'être réalisée, dans la profondeur, au plus près du point de contact de l'élément roulant sur le chemin de roulement.

Le capteur capacitif est intégré dans l'épaisseur d'une des bagues (1, 2) du roulement. La bague (1, 2) qui comprend le capteur présente alors une première cavité (11) disposé radialement par rapport à l'axe de rotation (Z-Z) du roulement. Une première armature (7) est alors mise en place par un moyen de positionnement (6) à proximité et en face d'une seconde armature (8) solidarisée ou intégrée dans le fond de la cavité, un moyen de cloisonnement (10) assurant l'étanchéité d'un espace isolant diélectrique entre les deux armatures (7, 8). La surface de la première armature (7) qui fait face à la seconde armature (8) est montée d'une aiguille (13) perpendiculairement au plan de l'armature (7) et disposée selon un axe sensiblement identique à l'axe de la première cavité (11). Cette aiguille (13) est orientée dans la profondeur de la bague de roulement en direction du chemin de roulement. L'aiguille se trouve introduite dans une seconde cavité (12) située dans le fond de la première (11). Cette seconde cavité (12) se trouve ainsi disposée selon le même axe que la première cavité, c'est à dire

radialement par rapport à l'axe de rotation (Z-Z) du roulement. L'extrémité « libre » de l'aiguille (13) est alors maintenue en contact avec le fond de la seconde cavité (12), l'autre extrémité se trouvant fixé à la première armature.

Selon une variante de réalisation, le moyen de positionnement (6), seul ou avec un autre moyen rigide, remplit l'ensemble de la première cavité (11) et notamment recouvre l'ensemble de la surface de la première armature (7) qui se trouve sur la face opposée à celle en contact avec l'aiguille (13). Le module de Young du moyen de positionnement (6) est alors très inférieur à celui des différents éléments du capteur et du roulement et notamment très inférieur à celui de l'aiguille (13) et à celui de la bague (1, 2) du roulement. Ainsi, lorsqu'un élément roulant (3) vient exercer une contrainte sur le chemin de roulement, cette contrainte se dissipe dans la profondeur de la bague (1, 2) du roulement tandis qu'elle exerce un déplacement de l'aiguille (13) selon son axe proportionnel à l'importance de la contrainte au niveau du point de contact entre l'aiguille (13) et le fond de la seconde cavité (12) dans la bague (1, 2) de roulement. Le déplacement de l'aiguille (13) entraine alors un déplacement de la première armature (7) avec un écrasement du moyen de positionnement (6) contre l'orifice obstrué de la première cavité (11). Ce déplacement de la première armature (7) se traduit alors au niveau du capteur par un écartement des deux armatures (7, 8).

Selon une autre variante de réalisation, le moyen de positionnement (6) ne positionne pas la première armature (7) en venant recouvrir la surface de l'armature (7) qui ne fait pas face à la seconde armature, mais au contraire laisse la surface libre de façon à la positionnée à proximité et face à une troisième armature (8.1). Cette troisième armature (8.1) se trouve alors positionnée au niveau de l'orifice de la première cavité (11), solidarisée ou intégrée au bâti (5) de la machine ou à un élément en contact avec l'orifice de la première cavité (11) au niveau de la surface de la bague de roulement. Un second moyen de cloisonnement (10.1), préférentiellement annulaire, vient alors fermer l'espace (9.1) qui sépare la première (7) et la troisième armature (8.1) pour isoler un milieu diélectrique. Dans cette variante de

réalisation, le déplacement de l'aiguille (13) entraine, ici encore, un écartement des première (7) et seconde (8) armatures et dans le même temps un rapprochement des première (7) et troisième (8.1) armatures. Le moyen de positionnement (6), qui, ici aussi, présente un module de Young inférieure à celui des différents éléments du capteur et du roulement et notamment très inférieur à celui de l'aiguille (13) et à celui de la bague (1, 2) du roulement, est pressé contre l'orifice de la première cavité (11). Ainsi, à partir de trois armatures (7, 8, 8.1) deux condensateurs et donc deux capteurs sensitifs sont construits permettant d'obtenir deux signaux pour une même vibration.

Une disposition régulière de ces capteurs capacitifs sur un même coté du roulement permet de faciliter la localisation d'un éventuel défaut à l'origine de vibrations dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation du roulement. La disposition de ces capteurs permet alors une mesure plus fine du signal vibratoire, et ainsi facilite la rectification par rééquilibrage d'un éventuel défaut de type balourd. De même, une disposition régulière et symétrique de ces capteurs capacitifs sur chacun des cotés du roulement facilite la localisation de la source des vibrations dans un plan contenant l'axe de rotation du roulement. Ces différents capteurs permettent ainsi la mesure d'une part des signaux vibratoires provenant directement du roulement et d'autre part des signaux vibratoires provenant des différents organes de la machine via le bâti (5) et qui, en se propageant, traversent le roulement. Le signal vibratoire de chacun des organes de la machine présente alors une signature fréquentielle propre.

Une disposition optimale des différents capteurs capacitifs consiste à positionner les capteurs à égale distance de l'axe de rotation du roulement de façon à ce que les plans passant respectivement par chacun des capteurs et par le centre de rotation du roulement présentent entre eux des angles (α) de 120°. Ainsi la présence d'au moins trois capteurs capacitifs disposés radialement sur le roulement et d'au moins trois capteurs disposés axialement sur chacune des faces du roulement permet d'effectuer une

surveillance optimale des vibrations qui traverse l'ensemble des éléments du roulement tout en facilitant la localisation de l'origine de la vibration.

Par ailleurs, les armatures (7, 8) disposées axialement sont préférentiellement planes, tandis que celles qui se trouvent disposées radialement, sont pour l'une concave et pour l'autre convexe de façon à être adaptées à la courbure du roulement. De plus, les différentes armatures peuvent être de forme diverses, circulaires, carrées, ovales, etc.

Pour mesurer les variations de capacités des capteurs en fonctions des vibrations, les armatures conductrices (7, 8) des condensateurs variables de l'invention sont associées à un montage électronique appelé amplificateur de charge par des moyens de connections appropriés (14, 15).

Une première armature (8) forme un conducteur situé en vis-à-vis mais fixe relativement à une seconde (7) intégrée à au moins une partie de la surface d'une bague du roulement. La variation de la capacité au cours du temps d'un tel condensateur est donnée par la relation :

$$C(t) = \varepsilon \frac{S}{d - s(t)} = \varepsilon \frac{S}{x(t)}$$

avec d la distance séparant les deux armatures, $s(t)$ l'amplitude de la variation de l'armature considérée comme mobile par rapport à son point d'équilibre, S la surface active des armatures et ε la permittivité du vide.

La sensibilité de la capacité (S_c) du condensateur est alors définie par la relation :

$$S_c = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{\Delta C}{\Delta(d - s(t))} = +\varepsilon \frac{S}{(d - s(t))^2} = +\varepsilon \frac{S}{[x(t)]^2} \approx +\varepsilon \frac{S}{d^2}$$

Cette sensibilité peut être considérée comme constante pour des petites variations de $s(t)$. Les déplacements de l'armature étant faibles, de l'ordre de quelques micromètres, il est nécessaire d'avoir une grande sensibilité. La distance d est alors de l'ordre de plusieurs dizaines de fois $s(t)$, ce qui détermine le point de fonctionnement du condensateur. Par exemple pour des surfaces en regard de $S \approx 28mm^2$, une distance entre armatures

d=0,01mm le diélectrique étant l'air, on obtient un condensateur dont la capacité au point de fonctionnement est égale à *C=25 pF* avec une sensibilité $S_C=25.10^5 pF/m=0,25\ pF/\mu m$ et pour un déplacement $\Delta d=0,05\mu m=50nm$ la variation de capacité ΔC est de *0,125pF* ($\Delta C=S_C*\Delta d=0,25*0,05=0,125pF$). Les condensateurs ont alors des capacités de l'ordre de quelques picofarads avec des variations de l'ordre de quelques dizaines de femtofarads.

Pour un déplacement Δd = 0,05μm et $\varepsilon S = 25.10^{-5}.pFm$			
D (m)	*C (pF)*	S_C *(pF/μm)*	$\Delta C = S_C*\Delta d$ *(fF)*
1.10^{-5}	25	2,5	0,125 =125
$1,5.\ 10^{-5}$	16,66	1,11	0,055 = 55
$2.\ 10^{-5}$	12,5	0,625	0,031 = 31
$3.\ 10^{-5}$	8,33	0,28	0,014 = 14
$4.\ 10^{-5}$	6,5	0,16	0,008 = 8
$5.\ 10^{-5}$	5	0,1	0,005 = 5

La distance d entre les armatures doit être la plus petite possible, $d=10^{-5}m=100\mu m$ est idéale. On peut augmenter la sensibilité *Sc* en plaçant *n* surfaces actives en regards dans ce cas on obtient :

$$C=(n-1)\frac{\varepsilon S}{D} \qquad et \qquad S_C=(n-1)\frac{\varepsilon S}{D^2} \qquad \Rightarrow \qquad \Delta C=(n-1)\frac{\varepsilon S}{D^2}\Delta d$$

L'objectif étant de mesurer avec précision et à distance de petites variations de capacités pour traduire en temps réel les variations de la distance entre les deux armatures dues au vibrations dans le roulement, les méthodes dites à deux pôles ne peuvent convenir car la mesure indiquerait alors la valeur de *C(t)+Cp*, où *Cp* est la capacité parasite des fils de liaison due à un effet d'antenne.

La méthode utilisée consiste à considérer les charges induites par couplage capacitif sur une seule des deux armatures, l'autre armature étant à un potentiel fixé. La variation des charges induites est alors l'image analogique du déplacement *s(t)*.

Un schéma de montage électronique de l'amplificateur de charge utilisé est présenté sur la figure 6. L'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI)

utilisé doit être préférentiellement de type JFET, MOSFET ou CMOS avec une très haute impédance d'entrée. Cette forte impédance lui confère alors une importante immunité aux bruits avec un courant de polarisation inférieur à 2 *fA*. Dans ce montage, l'armature conductrice (8) du condensateur intégrée à une partie de la bague du roulement, est reliée à la masse. L'autre armature conductrice (7), positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur (6), de chacun des condensateurs est gardée par un anneau et reliée à l'entrée inverseuse (*i.*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) par un câble (14) blindé dont le blindage (14.3) se trouve relié à l'entrée non-inverseuse (*n.i.*) de l'ALI. L'ALI est relié par un générateur de tension continu au niveau de son entrée non-inverseuse. Dans un tel montage, la capacité parasite (*Cp*) due au câble de liaison qui pourrait perturber les mesures n'est pas traduite à la sortie de l'ALI. Seule la composante continue et les variations de tension dues au déplacement de l'armature dite mobile sont alors traduites à la sortie de l'ALI. Entre la sortie et l'entrée inverseuse (*i.*) de l'ALI, un condensateur de capacité (C_f) est monté en parallèle avec une résistance (R).

Un second schéma de montage électronique de l'amplificateur de charge utilisé se trouve présenté sur la figure 7. L'armature conductrice (8) du condensateur intégrée à une partie de la bague du roulement est, ici, reliée à un générateur. L'autre armature conductrice est, ici aussi, gardée par un anneau et reliée à l'entrée inverseuse (*i.*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) par un câble (14) blindé dont le blindage (14.3) se trouve relié à la masse avec un condensateur (*Cs*). L'autre armature du condensateur (*Cs*) est reliée, elle aussi, à l'entrée inverseuse (*i.*) de l'ALI. De même, entre l'entrée inverseuse (*i.*) et la sortie de l'ALI, un autre condensateur (*Cf*) se trouve positionné. Sur le condensateur (*Cf*), trois résistances (R1, R2 et R3) disposées en T et dont l'une (R3) d'entre elles est reliée à la masse, se trouvent également montées en parallèle. L'entrée non-inverseuse (*n.i.*) de l'ALI est, elle, reliée à la masse.

La relation qui lie la tension de sortie *Vs(t)* à la charge *Q(t)* sur l'armature (7) dont les charges induites sont mesurées est ainsi :

$$V_s(t) = -\frac{Q(t)}{C_f} = -Ve\frac{C}{C_f}$$

Les charges induites étant égales à : $Q = CV$, les variations de charge dues au déplacement relatif des armatures sont données par : $\Delta Q = C\Delta V$.

La relation qui lie la tension de sortie de l'ALI à la vibration du roulement est alors :

$$\Delta Vs = -\frac{\Delta Q}{C_f} = -\frac{\Delta V}{C_f} \quad \Rightarrow \quad \Delta C = -\frac{C_f}{Ve}\Delta V_s = S_c.\Delta x$$

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

où : Δx représente la variation de la distance *d* séparant les deux armatures du condensateur, ΔV_s représente la variation de la tension à la sortie de l'amplificateur, *Ve* représente la composante continue ou alternative de la tension à l'entrée de l'amplificateur, S_c représente la sensibilité de la capacité et C_f représente la capacité du condensateur reliant la sortie de l'ALI à l'entrée inverseuse.

Ainsi, par exemple, si $\Delta x = 1\mu m = 10^{-6}m$ et $C_f = 1pF$, V = 5V, Sc = 10^4pF/m² = 10^{-8}F/m² alors $V_s = 0,1V$. La résistance R est négligeable dans le calcul de la transmittance. Si on souhaite que Δx et ΔV_s soient de même signe, la tension *Ve* peut alors être négative.

La sortie de l'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) peut être reliée à l'entrée d'un convertisseur analogique digital (CAN) dont la sortie est utilisée par un circuit à microprocesseur (MP) afin de calculer la variation de distance (Δx) par l'exécution d'un programme (Prog) utilisant la formule :

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

et pour permettre le déclenchement d'une alarme après comparaison du résultat du calcul avec une valeur seuil mémorisée.

Le dispositif de l'invention peut être relié à un moyen de traitement du signal vibratoire mesuré. Le traitement de ce signal permet une analyse temporelle d'une part et une analyse fréquentielle d'autre part.

En effet, chaque élément tournant d'une machine mécanique est caractérisé par une ou plusieurs fréquences caractéristiques de défauts. Un roulement, par exemple, est caractérisé par trois fréquences de défauts telles que la fréquence caractéristique de défaut d'un élément roulant (3), et les fréquences de défauts de chacune des bagues, intérieure (2) et extérieure (1). Ces fréquences sont, au préalable, calculées à partir des caractéristiques géométriques du roulement comme le nombre d'éléments roulants (3), le diamètre de la bague intérieure (2) et le diamètre de la bague extérieure (1) ainsi que la vitesse de rotation du moteur puis enregistrées dans un moyen de mémorisation. L'analyse du spectre de puissance du signal délivré par le capteur capacitif permet donc de localiser le ou les défauts présents dans le roulement et de suivre dans le temps l'évolution de l'amplitude de chaque fréquence afin de déterminer le nombre de cycles de fonctionnement du composant avant la rupture.

Par ailleurs, l'état mécanique d'un roulement ou d'autres composants tournants d'une machine mécanique peut être caractérisé par des paramètres statistiques que l'on appelle indicateurs de défaut. Parmi ces paramètres, les plus utilisés sont la valeur R.M.S., aussi appelé valeur efficace du signal, le facteur crête, formé par le rapport entre la valeur de pointe et la valeur efficace du signal, ou bien encore le Kurtosis qui correspond à une mesure des pics ou de l'aplatissement relatif d'une distribution d'une variable aléatoire réelle par rapport à une distribution gaussienne. Ces différents paramètres statistiques sont calculés à partir du signal vibratoire du roulement. Il s'agit alors de détecter un changement significatif dans ces paramètres, par comparaison avec des valeurs seuil enregistrées dans un moyen de mémorisation. La détermination de ces valeurs seuil est réalisée au préalable soit par une expérimentation de la

machine, soit par des lois statistiques. La caractérisation du défaut et l'estimation de sa gravité permettent d'établir un diagnostic.

Ainsi, lorsqu'un défaut apparaît sur un organe de la machine, il est facile d'estimer son degré de sévérité, de suivre son évolution et éventuellement de pronostiquer le remplacement du composant, soit par l'analyse temporelle du signal délivré par le capteur, soit par l'analyse fréquentielle du même signal. L'emplacement de ce capteur capacitif a l'avantage de pouvoir délivrer directement la signature du défaut du composant mécanique et permet ainsi d'éviter les erreurs de diagnostic.

Il est important de faire remarquer que les signaux issus des différents capteurs du dispositif de l'invention peuvent être utilisés pour d'autres applications, comme par exemple la régulation de la vitesse de rotation du roulement en fonction du balourd ou bien encore la mesure de l'adhérence d'une roue sur le sol.

Le dispositif de l'invention peut être relié à un moyen d'affichage pour permettre, après que la variation de la distance (Δx) est calculée, de visualiser la position d'un éventuel défaut du roulement.

Il doit être évident pour les personnes versées dans l'art que la présente invention permet des modes de réalisation sous de nombreuses autres formes spécifiques sans l'éloigner du domaine d'application de l'invention comme revendiqué. Par conséquent, les présents modes de réalisation doivent être considérés à titre d'illustration mais peuvent être modifiés dans le domaine défini par la portée des revendications jointes ;

REVENDICATIONS

1. Dispositif de surveillance des vibrations d'une machine générées par un roulement formé par deux bagues, l'une extérieure (1) et l'autre intérieure (2), l'une fixe par rapport au bâti (5) de la machine et l'autre tournante, coaxiales entre lesquelles au moins un élément roulant (3) est emprisonné et susceptible de se déplacer, des vibrations générées par d'autres organes de la machine transitant par ce roulement, chacun des organes de la machine possédant une signature fréquentielle respective, caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de positionnement (6) non-conducteur monté sur au moins un élément en contact avec au moins un élément du roulement ou monté sur au moins un des éléments du roulement, le moyen de positionnement (6) comportant au moins un logement pour positionner au moins un élément conducteur, constituant une première armature (7) d'au moins un condensateur pour former un capteur capacitif, à une distance d'une partie conductrice fixée ou intégrée à une bague (1, 2) du roulement, formant la seconde armature (8) du condensateur ou capteur capacitif, et le moyen de positionnement (6) non-conducteur étant solidaire d'au moins un moyen de cloisonnement (10) qui permet de créer, entre au moins deux armatures (1, 2) d'un même condensateur, un espace (9) formant un milieu isolant diélectrique et ce moyen de cloisonnement assurant l'étanchéité de ce milieu isolant et en étant en contact avec une partie de la bague du roulement fixant ou intégrant la seconde armature (8), les armatures (7, 8) du capteur capacitif étant montées perpendiculairement à l'axe de déplacement des vibrations surveillées.et en ce que, la seconde armature (8) étant intégrée ou solidarisée dans une bague (1, 2) de roulement fixe par rapport à un bâti (5) de la machine au fond d'une première cavité (11) de la bague de roulement, un moyen de positionnement non-conducteur d'au moins une armature (7) vient former un capteur capacitif en disposant la première armature (7) en face de la seconde armature (8), un moyen de cloisonnement (10) annulaire

fermant le milieu isolant (9) qui sépare les deux armatures (7, 8), et en ce que, une seconde cavité (12) plus étroite que la première cavité (11) étant réalisée dans le fond de la première cavité (11) et formée par un alésage orienté selon un axe perpendiculaire à l'axe de rotation (Z-Z) du roulement et passant par le centre de rotation du roulement, l'extrémité d'une aiguille (13) montée sur la première armature (7) perpendiculairement à un plan tangent à la première armature (7) vient se maintenir en contact avec le fond de la seconde cavité (12) situé dans la profondeur de la bague (1, 2) de roulement et en face du chemin de roulement en contact avec au moins un élément roulant (3).

2. Dispositif de surveillance de vibrations selon la revendication 1, caractérisée en ce que le module de Young du moyen de positionnement (6) est inférieure à celui de l'aiguille (13) montée sur la première armature (7) et/ou celui de la bague (1, 2) de roulement.

3. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications 1 à 2, caractérisé en ce qu'une troisième armature (8.1) est intégrée ou solidarisée à la surface du bâti (5) de la machine située au niveau de l'orifice de la cavité (11) de la bague (1, 2) de roulement en contact avec le bâti (5) de la machine, le moyen de positionnement (6) non-conducteur disposant la première armature (7) en face de la troisième armature (8.1) simultanément entre les deuxième (8) et troisième (8.1) armatures de sorte que les première (7) et troisième (8.1) armatures, séparées par un moyen de cloisonnement (10.1) de forme annulaire pour fermer un milieu isolant (9.1), forment un second capteur capacitif.

4. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le moyen de cloisonnement (10) est formé par une lame métallique solidaire du moyen de positionnement (6) et en contact avec au moins une partie de la surface à laquelle la seconde armature (8) se trouve solidarisée ou intégrée.

5. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le moyen de cloisonnement (10) est formé par un joint élastique solidaire du moyen de positionnement (6), le joint élastique présentant une lèvre en contact avec au moins une partie de la surface à laquelle la seconde armature (8) se trouve solidarisée ou intégrée.

6. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'au moins trois premières armatures conductrices sont positionnées par un moyen de positionnement (6) non-conducteur, radialement par rapport à au moins une seconde armature (8) conductrice solidarisée ou intégrée à une partie d'une bague du roulement, les axes passant respectivement par les positions de chacune des paires d'éléments conducteurs formant un capteur capacitifs et le centre de rotation du roulement réalisent entre eux des angles (α) d'au plus 120°.

7. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'au moins deux armatures conductrices (7, 8) en vis à vis sont l'une convexe et l'autre concave dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation du roulement.

8. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications 3 à 6, caractérisé en ce que le moyen de positionnement (6) non-conducteur positionne au moins une première armature conductrice (7.2) axialement par rapport à une seconde armature conductrice (8) solidarisée ou intégrée à une bague du roulement.

9. Dispositif de surveillance de vibrations selon l'une des revendications 3 à 8, caractérisé en ce que le moyen de positionnement (6) non-conducteur positionne une paire d'armatures conductrices (7, 8), l'une radialement (7.1), l'autre axialement (7.2) par rapport à au moins une armature conductrice (8) solidarisée ou intégrée à une bague du roulement.

10. Dispositif de surveillance de vibrations selon la revendication 9, caractérisé en ce qu'un seul espace (9) formant le milieu isolant diélectrique est commun à la paire de condensateurs formés par au moins deux armatures conductrices (7.1, 7.2) positionnées par le moyen de positionnement (6) non-conducteur d'une part et au moins une armature conductrice (8) solidarisée ou intégrée à une bague du roulement d'autre part.

11. Dispositif de surveillance de vibrations selon au moins une des revendications précédente, caractérisé en ce qu'au moins trois premières armatures sont positionnées radialement par au moins un moyen de positionnement (6) non-conducteur en face d'au moins une seconde armature (8) solidarisée ou intégrée à une bague du roulement formant un premier ensemble d'au moins trois capteurs capacitifs, et en ce que, sur au moins une face du roulement, au moins trois premières armatures sont positionnées par au moins un moyen de positionnement (6) non-conducteur en face d'au moins une seconde armature (8) solidarisée ou intégrée à une bague (1, 2) du roulement, formant au moins un second ensemble d'au moins trois autres capteurs capacitifs, les trois capteurs capacitifs de chacun de ces ensembles étant positionnés à égale distance de l'axe de rotation (Z-Z) du roulement de sorte que, dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation (Z-Z) du roulement, les plans passant respectivement par les axes de symétrie de chacun des capteurs capacitifs et le centre de rotation du roulement forment entre eux des angles (α) de 120.

12. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de réglage de la distance qui sépare au moins deux armatures (7, 8) participant à la formation d'un même capteur capacitif.

13. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les paires d'armatures de chacun des capteurs capacitifs sont reliées à un montage électronique respectif

formant un amplificateur de charge destiné à délivrer en temps réel un signal représentatif des déplacements d'une armature par rapport à l'autre dus aux vibrations lors du fonctionnement du roulement mécanique.

14. Dispositif de surveillance de vibrations selon la revendication 13, caractérisé en ce que chaque paire d'armatures est associée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature (8) solidarisée ou intégrée à la bague de roulement est reliée à la masse et la première armature (7) positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur (6) est reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble (14) blindé dont le blindage (14.3) est relié à l'entrée non-inverseuse de l'ALI, l'entrée non-inverseuse de l'ALI étant reliée à un générateur fournissant une tension continue ou alternative (*Ve*), la sortie de l'ALI étant reliée à son entrée inverseuse via un condensateur (*Cf*) et une résistance (R) montée en parallèle.

15. Dispositif de surveillance de vibrations selon la revendication 13, caractérisé en ce que chaque paire d'armatures est associée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature solidarisée ou intégrée à la bague de roulement est reliée à un générateur fournissant une tension continue ou alternative (*Ve*) et la première armature (7) positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur (6) est reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble (14) blindé dont le blindage (14.3) est relié à une armature d'un condensateur (*Cs*) reliée à la masse et dont l'autre armature se trouve reliée à l'entrée inverseuse (*i*) de l'ALI, un condensateur (*Cf*) étant disposé entre l'entrée inverseuse de l'ALI et la sortie de l'ALI et trois résistances (R1, R2, R3) montées en T, l'une (R3) des résistances reliée à la masse, étant positionnées en parallèle par rapport au condensateur (*Cf*), l'entrée non-inverseuse (*n.i*) de l'ALI étant reliée à la masse.

16. Dispositif de surveillance de vibrations selon les revendications 14 et 15, caractérisé en ce que la sortie de l'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) est reliée à l'entrée d'un convertisseur analogique digital dont la sortie est utilisée par un circuit à microprocesseur pour calculer la variation de distance par l'exécution d'un programme mettant en œuvre la formule :

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

et pour déclencher une alarme par comparaison du résultat obtenu avec un seuil mémorisé, Δx représentant la variation de la distance (d) séparant les deux armatures du condensateur, ΔV_s représentant la variation de la tension à la sortie de l'amplificateur, Ve représentant la composante continue ou alternative de la tension à l'entrée de l'amplificateur, S_c représentant la sensibilité de la capacité et C_f représentant la capacité du condensateur reliant la sortie de l'ALI à l'entrée inverseuse.

17. Dispositif de surveillance de vibrations selon une des revendications précédente, caractérisé en ce qu'il comprend un moyen de détection de la fréquence de rotation du roulement pour réaliser des mesures lorsque les bagues du roulement sont dans une position définie l'une par rapport à l'autre.

18. Dispositif de surveillance de vibrations selon la revendication 16 ou 17, caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de traitement fréquentiel du signal vibratoire mesuré au niveau des armatures (7, 8) du condensateur permettant d'obtenir le signal vibratoire d'au moins un des différents organes de la machine par comparaison avec les signatures vibratoires respectives de chacun des organes de la machine enregistrées au niveau d'au moins un moyen de mémorisation.

19. Dispositif de surveillance de vibrations selon la revendication 18, caractérisé en ce que le dispositif comprend au moins un moyen de traitement temporel du signal vibratoire d'au moins un des organes de la

machine permettant d'obtenir plusieurs paramètres statistiques de ce signal pour être comparés avec des paramètres statistiques de défauts enregistrés au niveau d'un moyen de mémorisation.

20. Procédé de surveillance des vibrations mettant en jeu un dispositif de surveillance selon une des revendication précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend au moins une étape de mesure des charges induites par couplage capacitif sur une première armature conductrice (7) d'un condensateur à écartement variable positionnée par un moyen de positionnement non-conducteur, une seconde armature conductrice (8) solidarisée ou intégrée à une bague du roulement étant à un potentiel fixé.

21. Procédé de surveillance de vibrations selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la paire d'armatures étant associée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature (8) solidarisée ou intégrée à la bague reliée à la masse, la première armature (7) étant positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur (6) et reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble (14) blindé dont le blindage (14.3) est relié à l'entrée non-inverseuse de l'ALI, l'entrée non-inverseuse de l'ALI étant reliée à un générateur fournissant une tension continue ou alternative (*Ve*), la sortie de l'ALI étant reliée à son entrée inverseuse via un condensateur (*Cf*) et une résistance (R) montée en parallèle, le procédé comprend au moins une étape de calcul de la variation (Δx) de la distance séparant les deux armatures (7, 8) du condensateur à partir de la variation de la tension (ΔV_s) à la sortie d'un amplificateur de charge (AC) en utilisant la relation :

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

Δx représentant la variation de la distance (d) séparant les deux armatures du condensateur, ΔV_s représentant la variation de la tension à la sortie de l'amplificateur, *Ve* représentant la composante continue ou

alternative de la tension à l'entrée de l'amplificateur, S_c représentant la sensibilité de la capacité et C_f représentant la capacité du condensateur reliant la sortie de l'ALI à l'entrée inverseuse.

22. Procédé de surveillance de vibrations selon la revendication 20, caractérisé en ce que la paire d'armatures étant associée à un montage électronique formant un amplificateur de charge (AC), la seconde armature solidarisée ou intégrée à la bague de roulement est reliée à un générateur fournissant une tension continue ou alternative (*Ve*) et la première armature (7) positionnée par le moyen de positionnement non-conducteur (6) est reliée à l'entrée inverseuse (*i*) d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) à haute impédance par un câble (14) blindé dont le blindage (14.3) est relié à une armature d'un condensateur (*Cs*) reliée à la masse et dont l'autre armature se trouve reliée à l'entrée inverseuse (*i*) de l'ALI, un condensateur (*Cf*) étant disposé entre l'entrée inverseuse de l'ALI et la sortie de l'ALI et trois résistances (R1, R2, R3) montées en T, l'une (R3) des résistances reliée à la masse, étant positionnées en parallèle par rapport au condensateur (*Cf*), l'entrée non-inverseuse (*n.i*) de l'ALI étant reliée à la masse, le procédé comprend au moins une étape de calcul de la variation (Δx) de la distance séparant les deux armatures (7, 8) du condensateur à partir de la variation de la tension (ΔV_s) à la sortie d'un amplificateur de charge (AC) en utilisant la relation :

$$\Delta x = -\frac{C_f}{Ve.S_c}\Delta V_s$$

Δx représentant la variation de la distance (d) séparant les deux armatures du condensateur, ΔV_s représentant la variation de la tension à la sortie de l'amplificateur, *Ve* représentant la composante continue ou alternative de la tension à l'entrée de l'amplificateur, S_c représentant la sensibilité de la capacité et C_f représentant la capacité du condensateur reliant la sortie de l'ALI à l'entrée inverseuse.

23. Procédé de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, la sortie de l'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) étant reliée à l'entrée d'un convertisseur analogique digital (CAN) dont la sortie est utilisée par un circuit à microprocesseur (MP) pour calculer la variation de distance par l'exécution d'un programme (Prog), le procédé comprend au moins une étape de déclenchement d'une alarme après comparaison de la variation (Δx) de l'écartement entre les deux armatures avec une valeur seuil.

24. Procédé de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, le dispositif comprenant un moyen de mémorisation de la signature vibratoire de chacun des organes de la machine, le procédé présente au moins :
    - une étape de mesure du signal vibratoire au niveau des armatures (7, 8) du capteur capacitif positionné au niveau du roulement,
    - une étape de comparaison du signal vibratoire mesuré avec la signature vibratoire mémorisée d'au moins un organe défini de la machine,
    - une étape de détermination puis d'extraction du signal vibratoire propre à l'organe défini de la machine depuis le signal vibratoire mesuré.

25. Procédé de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, le dispositif comprenant un moyen de mémorisation de valeurs seuils de défaut de plusieurs paramètres statistiques, le procédé présente au moins :
    - une étape de mesure du signal vibratoire au niveau des armatures (7, 8) du capteur capacitif positionné au niveau du roulement,
    - une étape de calcul de paramètres statistiques du signal vibratoire mesuré,

- une étape de comparaison des paramètres statistiques calculés avec des valeurs seuils de défauts mémorisées,
- une étape de détermination de l'importance du défaut.

26. Procédé de surveillance de vibrations selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, le dispositif comprenant au moins un moyen d'affichage, le procédé présente au moins une étape d'affichage de la position et de l'importance d'un défaut.

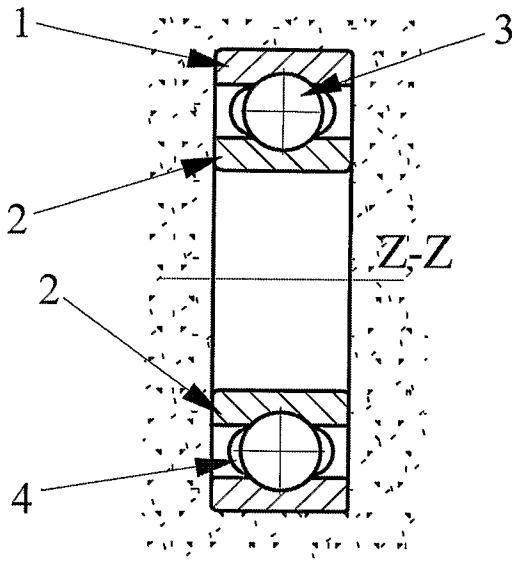


Figure 1a

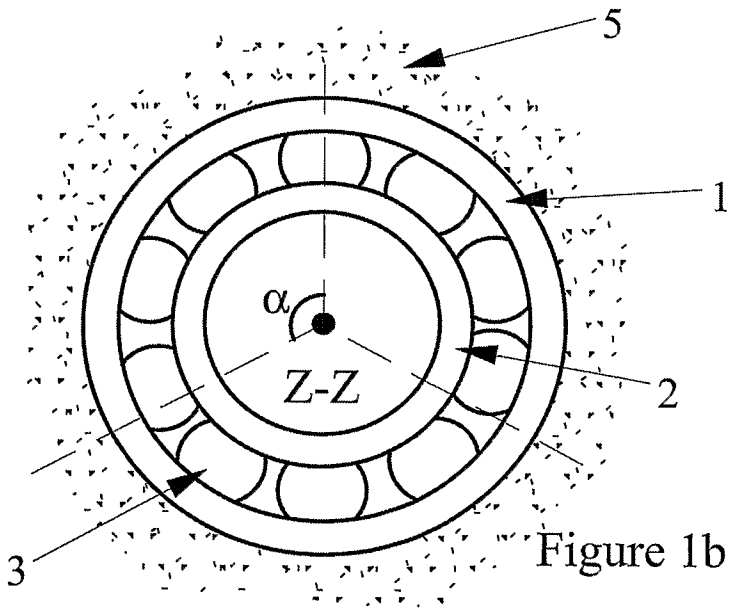


Figure 1b

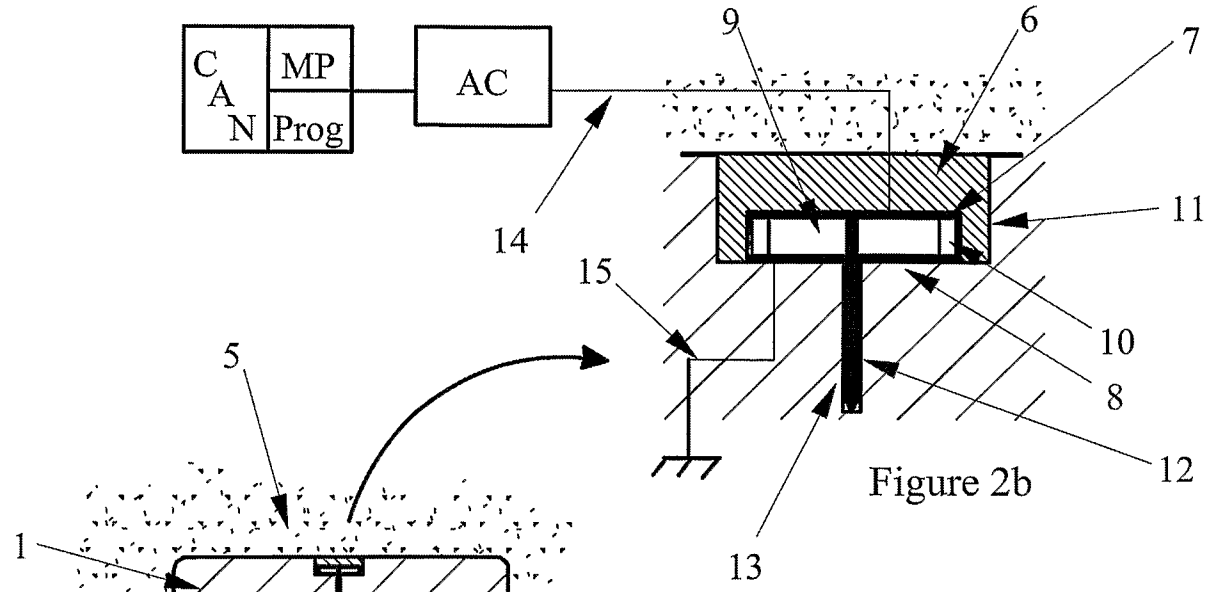


Figure 2b

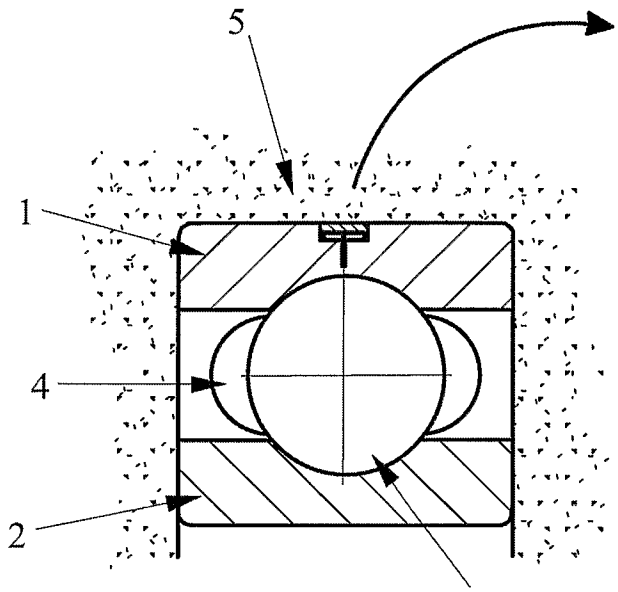


Figure 2a

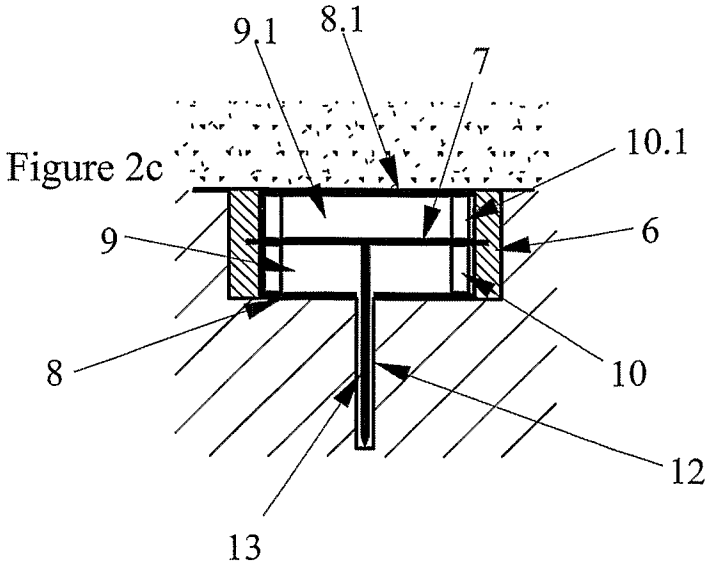


Figure 2c

Fig.3

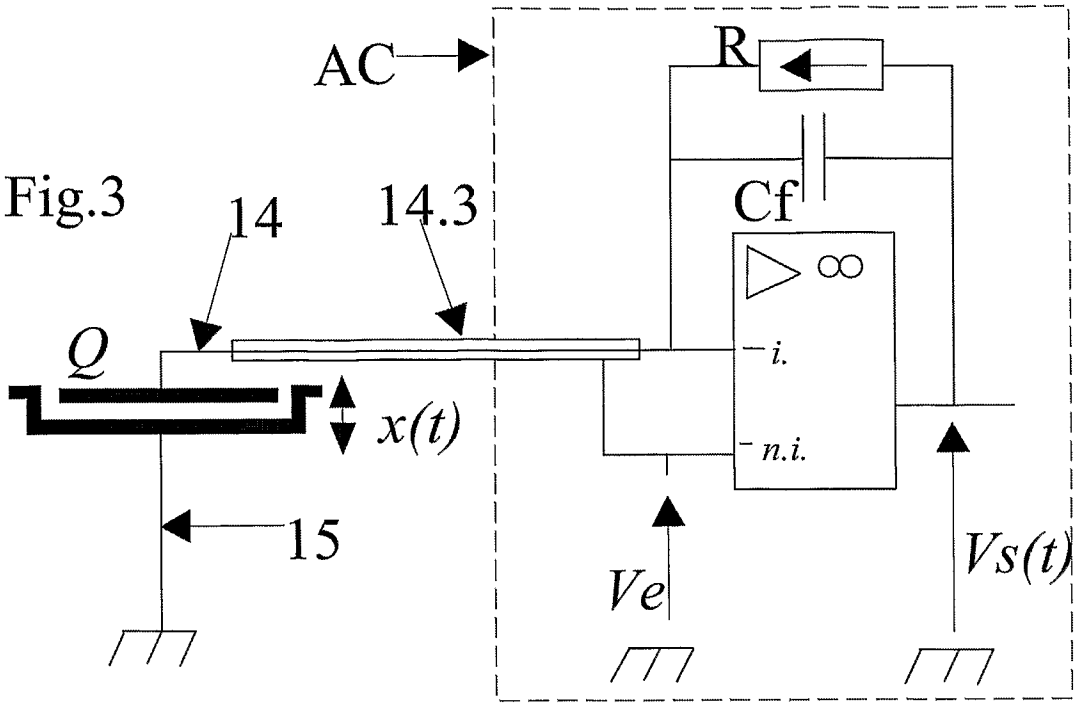
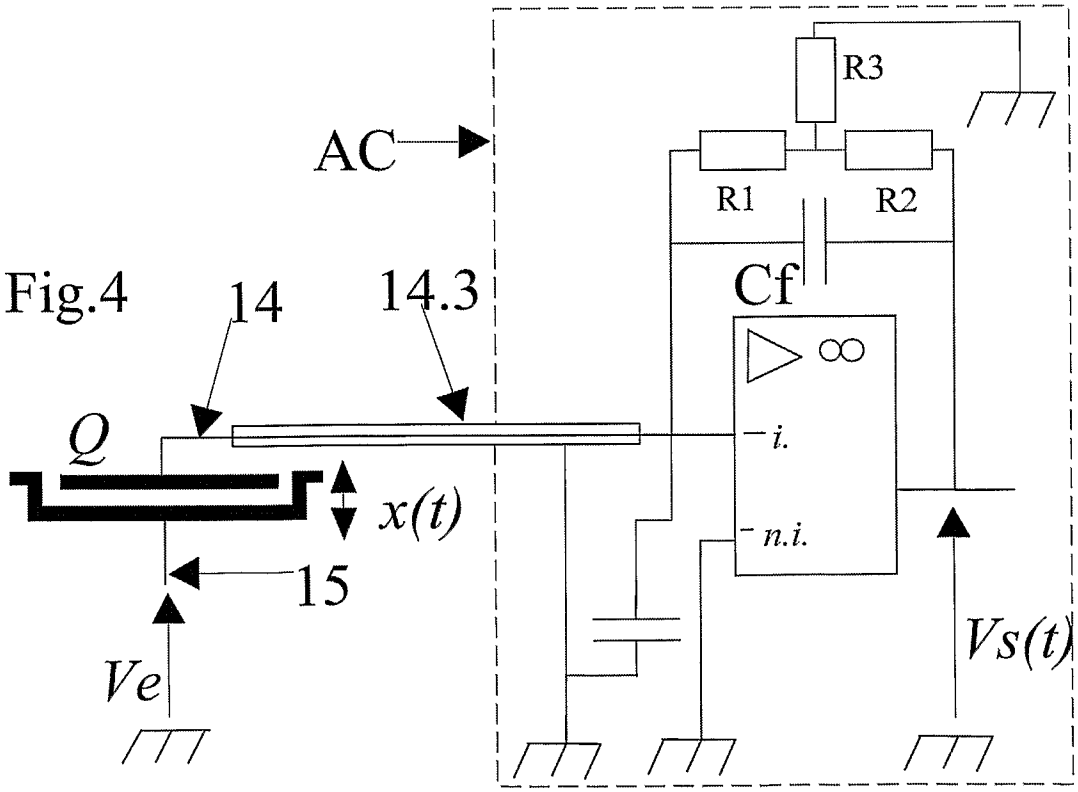

AC
R
Cf
14
14.3
Q
x(t)
15
i.
n.i.
Ve
Vs(t)

Fig.4


R3
AC
R1
R2
Cf
14
14.3
Q
x(t)
15
i.
n.i.
Ve
Vs(t)