

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 9 septembre 1985.

30 Priorité : DE, 11 septembre 1984, n° P 34 33 351.7.

43 Date de la mise à disposition du public de la demande : BOP I « Brevets » n° 11 du 14 mars 1986.

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : Société dite : MTU MOTOREN- UND TURBINEN-UNION MUNCHEN GMBH. — DE.

72 Inventeur(s) : Kurt Ding, Hartwig Knoll, Josef Wenzl et Hermann Biebl.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : Cabinet Claude Rodhain.

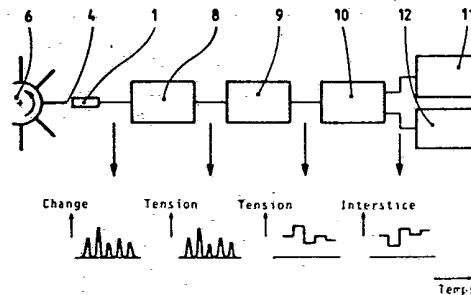
54 Dispositif de mesure capacitif pour mesurer la distance entre deux éléments, mobiles l'un par rapport à l'autre.

57 1. L'invention concerne un système de mesure capacitif pour mesurer la distance ou interstice entre deux éléments mobiles l'un par rapport à l'autre, avec une sonde 1 et un dispositif d'acquisition et/ou d'exploitation des valeurs de mesure 8, 9, 10, 11, 12.

2. Le problème à résoudre consiste à permettre l'utilisation d'une petite sonde non refroidie et à éviter que les mesures soient influencées par les actions extérieures.

3. Le dispositif est caractérisé en ce que le condensateur formé par la sonde 1 et un élément en regard 4 est polarisé avec deux tensions de référence, l'interstice étant déduit de la capacité d'interstice.

4. L'invention est applicable notamment aux éléments mobiles des turbomachines.



1

"Dispositif de mesure capacitif pour mesurer la distance entre deux éléments, mobiles l'un par rapport à l'autre".

L'invention a pour objet un dispositif de mesure capacitif basé sur une mesure de charge pour mesurer la distance entre deux éléments mobiles l'un par rapport à l'autre notamment la distance d'un rotor conducteur à l'enveloppe d'une machine, avec une sonde et un dispositif d'acquisition et/ou d'exploitation pour les valeurs de mesure.

Dans le cas de deux éléments mobiles l'un par rapport à l'autre, par exemple d'éléments de construction de machines, notamment de turbomachines de tous types, il est important de connaître le plus exactement possible la distance, appelée interstice dans la suite, entre les éléments. Dans les turbomachines, la grandeur de l'interstice entre les aubes du rotor et l'enveloppe a une influence sur les pertes dites pertes par fuites, qui agissent à leur tour directement sur le rendement des machines.

Dans le but d'effectuer une mesure de distance, on utilise déjà un appareil électromécanique de mesure de distance qui est décrit dans le document DE-PS 28 07 296. Dans cet appareil, un palpeur est guidé dans une vis de précision avec une butée d'extrémité de référence. La vis de précision est à son tour montée dans l'enveloppe et est entraînée de façon commandée par un moto-réducteur avec un capteur d'angle codé. Avec cette disposition, la course du palpeur est déduite de la mesure de l'angle de rotation et le contact entre le palpeur et le rotor est contrôlé par un montage électronique de sensibilité élevée, qui commence à réagir même quand le palpeur n'est pas en contact mécanique avec l'aube.

A côté de l'avantage d'une mesure d'interstice sans contact, le procédé par palpeur présente cependant encore des inconvénients. Avec ce procédé, on ne peut mesurer que la distance à l'aube la plus longue d'une couronne de rotor et la mesure n'est pas possible dans le cas de processus transitoires rapides.

Un autre procédé connu de mesure d'instertice est le procédé de triangulation avec mesure par voie optique. Les sondes que l'on utilise pour cela sont de construction encombrante, elles ne peuvent être mises en oeuvre au-delà de 200°C qu'avec un refroidissement et leur précision de mesure n'est pas suffisante. En outre, dans le cas de rotors tournant à grande vitesse, on ne peut effectuer qu'une mesure de la longueur moyenne des aubes et non de la longueur d'une aube individuelle.

On connaît en outre des procédés de mesure capacitifs à l'aide d'une technique de modulation de fréquence. Les mêmes inconvénients que dans le procédé optique décrit précédemment se manifestent dans ces procédés de mesure capacitifs. Cependant, une forte dépendance vis-à-vis de la température et une dépendance vis-à-vis des vibrations font que le dispositif de mesure ne convient pas dans certains cas, notamment pour les turbomachines. On mesure alors, notamment, le désaccord d'un circuit oscillant à résonance dont la fréquence n'est pas déterminée seulement par la capacité de mesure, mais aussi par les capacités de la sonde et des câbles, dont les variations lors des fluctuations de température influencent directement la mesure. La même chose est valable pour les vibrations.

L'invention a pour but de créer un dispositif de mesure de distance pouvant fonctionner avec une sonde non refroidie, relativement petite, permettant les mesures sur des aubes individuelles et présentant un caractère dynamique relativement élevé, c'est-à-dire permettant d'effectuer des mesures même lors de la variation rapide d'un état. En outre, les actions extérieures, telles que la température, les vibrations et la pression ne doivent pas pouvoir influencer les résultats de mesure au-delà d'une limite de tolérance.

A cet effet, l'invention concerne un dispositif de mesure du type ci-dessus caractérisé en ce que :

a) le condensateur formé par la sonde de mesure et l'élément situé en regard est polarisé à une tension de

référence réglable qui est stabilisée dans une unité de tension d'alimentation,

b) la mesure est effectuée avec deux tensions de référence et est donc également réalisable sur des rotors mal mis à la terre,

c) l'amplificateur de charge et le générateur de tension (U_{ref}) sont disposés à distance de la sonde,

d) la sonde est raccordée à l'amplificateur de charge et au générateur de tension par un câble triaxial,

e) la largeur de bande de l'amplificateur de charge est accordée sur les fréquences contenues dans le signal de charge auquel on s'attend,

f) la surface de mesure de la sonde est plus petite que la surface balayée par l'élément mobile et elle est dirigée vers celle-ci et,

g) la capacité d'interstice C_s est déterminée à partir de la quantité de charge mesurée par l'équation $C_s = Q/U_{ref}$ et le diamètre d'interstice est déterminé à partir de la capacité d'interstice par l'équation $C_s = A + B/d + C$, dans laquelle A, B, C sont des grandeurs étalonnées.

Des dispositions indiquées dans la suite permettent d'obtenir des modes de réalisation avantageux de l'invention.

Les avantages les plus importants de l'invention sont indiqués ci-après :

Le dispositif de mesure capacitif suivant l'invention convient aussi bien pour des mesures stationnaires que pour des mesures non stationnaires. Il convient aussi, surtout, pour les mesures effectuées sur des aubes individuelles.

Le dispositif de mesure peut aussi être étalonné de façon simple et sûre lorsque la machine est à l'arrêt, par exemple en déplaçant la sonde contre une aube stationnaire d'une couronne du rotor et par modulation de la tension de polarisation (U_{ref}).

Le dispositif de mesure est rendu insensible aux vibrations par la technique de blindage actif en tension continue

dans la sonde et le câble. Etant donné qu'on mesure la charge s'écoulant dans la capacité d'interstice et hors de celui-ci, les variations de capacité du câble ou de la sonde dues à des variations de température ne faussent pas le résultat de mesure.

5 La mesure de la longueur individuelle des aubes est possible jusqu'à des fréquences de changement d'aubes de 50 kHz environ.

10 Il est possible d'effectuer la mesure de la variation de l'interstice en fonction du temps lors de processus transitoires (accélération, décélération).

La sonde du dispositif de mesure est très petite et peut être introduite avec un câble de connexion souple dans de petites ouvertures de l'enveloppe. Elle peut être utilisée sans refroidissement jusqu'à 600°C.

15 Le dispositif de mesure est muni d'une installation de mesure électronique rapide pour déterminer la hauteur des signaux d'impulsions d'aubes successives; cela permet la conversion rapide de la hauteur de signal mesurée en une valeur d'interstice ainsi qu'une sortie numérique et/ou analogique de
20 l'interstice.

D'autres caractéristiques et avantages ressortiront de la description ci-après et des dessins annexés représentant schématiquement des exemples de réalisation de l'invention, dessins dans lesquels :

25 - la Fig. 1a représente schématiquement, avec un agrandissement de l'interstice du rotor, un élément de la couronne de rotor d'une turbine axiale, la variation des pertes de rendement étant représentée en regard ;

30 - la Fig.1b est une vue similaire à la Fig.1a, dans le cas d'un compresseur radial ;

- la Fig.2 représente les variations des signaux de mesure obtenus suivant la position d'une couronne de rotor à aubes vis-à-vis d'une sonde du dispositif de mesure suivant l'invention ;

35 - la Fig.3 représente le principe de construction de la chaîne de mesure ;

- la Fig.4 est un schéma par blocs de composants de la chaîne de mesure ;

- la Fig.5 est une vue en perspective d'une sonde montée dans l'enveloppe avec le rotor correspondant ;

5 - la Fig.6 est une vue en coupe d'une partie de l'enveloppe d'une turbomachine avec la sonde montée;

- la Fig.7 représente la construction de la sonde de mesure;

10 - la Fig.8 représente l'amplificateur de charge avec ses connexions.

La Fig.1a représente un exemple dans lequel la couronne d'aubes d'un rotor de turbine comporte des aubes mobiles 4 ayant une longueur h et un interstice 5 vis-à-vis de l'enveloppe 2 comportant un stator avec un anneau fixe d'aubes directrices 5. On a reporté à côté les pertes de rendement en pourcentage en fonction de l'interstice radial de rotor relatif. On constate une relation linéaire entre les deux grandeurs. La Fig.1b représente un compresseur radial avec un rotor 6 et une enveloppe extérieure 2, le cas échéant avec un stator ou anneau d'aubes directrices 5.

20 Comme dans le cas de la Fig.1a, on a également désigné ici par h la longueur efficace des aubes et par S l'interstice du rotor vis-à-vis de l'enveloppe. Le graphique tracé à côté représente les variations en pourcentage des pertes de rendement en fonction de l'interstice de rotor rotatif. Ces résultats sont valables non seulement pour les compresseurs, mais aussi pour les pompes, les soufflantes, les ventilateurs, les turbocompresseurs de suralimentation et les machines similaires.

30 On voit sur la Fig.2 la position de la sonde 1 par rapport à la couronne d'aubes du rotor 6 et les signaux de mesure ainsi obtenus. Sur la partie gauche de la Fig.2, un intervalle entre aubes se trouve en face de la sonde et, sur la partie droite de la Fig.2, une pointe d'aubes se trouve, couchée ou debout, en face de la sonde. Le sens de rotation du rotor 6

35

comportant la couronne d'aubes est indiqué par des flèches. Le signal de sortie 7 de l'amplificateur de charge et son affectation à une position déterminée entre l'aube et la sonde sont également indiqués par des flèches. Le signal de sortie est
5 minimal au milieu de chaque intervalle et il est maximal (pointe de tension) lorsque la distance entre la pointe d'aube et la sonde (interstice) est minimale.

La chaîne de mesure représentée sur la Fig.3 comporte d'abord, en partant de la gauche, le condensateur formé par la sonde 1 fixée dans l'enveloppe et par la pointe d'aube 4, une conversion capacité-charge ayant lieu dans ce condensateur. Ensuite, en allant vers la droite on voit la conversion charge-tension et la production d'une tension de sonde qui ont lieu dans l'amplificateur de charge 8. La formation d'un signal, la mesure de la valeur de pointe et la conversion numérique ont lieu dans l'installation électronique de traitement 9. La commande du déroulement et le calcul de l'interstice ont lieu dans l'ordinateur 10. La documentation relative aux valeurs de mesure est donnée, par exemple, par une imprimante 11 ou par une machine à écrire 12. On peut aussi utiliser d'autres sorties et/ou enregistrements de données ainsi que des appareils enregistreurs.
10
15
20

Le schéma par blocs représenté sur la Fig.4 montre l'unité amplificateur de charge-tension de sonde constituée de l'amplificateur de charge 8, de l'amplificateur différenciateur 13, de la source de tension de sonde 14 et du bloc d'alimentation 15, qui sert à la conversion de la tension de charge et à la production de la tension de sonde.
25

L'amplificateur de charge et l'amplificateur différenciateur sont branchés en série. Les signaux de sortie de l'amplificateur de charge, pondérés par l'amplificateur-différenciateur, sont transmis à l'installation électronique de traitement. Comme représenté, l'amplificateur de charge 8 est aussi relié à la source de tension de charge 14.
30

35 Sur la Fig 5, ainsi que sur la Fig.6, on peut

voir des dispositions dans l'espace de sondes dans l'enveloppe d'une turbomachine. La disposition par rapport au rotor est représentée en perspective sur la Fig.5. On voit clairement la surface de sonde active et la disposition tri-axiale des électrodes et des couches isolantes. La sonde est disposée pour pouvoir être étalonnée dans l'enveloppe de la machine, à une distance de sécurité de l'aube la plus longue. On a indiqué l'interstice entre le rotor (ici les pointes des aubes) et l'enveloppe.

Dans l'exemple de la Fig.6, la sonde est montée dans une enveloppe en plusieurs éléments. La sonde est affectée de la référence numérique 1 et son support de la référence numérique 3, tandis que l'enveloppe porte la référence numérique 2. La distance à la pointe d'aubes de la couronne tournante 6 est désignée par "S", l'aube-tournante par 4 et l'aube directrice par 5.

On peut voir que la sonde 1 est petite et facile à monter et à raccorder. Ainsi, par exemple, le diamètre de la sonde représentée sur la Fig.6 était égal à 10mm environ et la hauteur de celle-ci était encore plus faible. Un câble de connexion peut être raccordé directement à la sonde du côté situé à l'opposé des pointes d'aubes. De préférence, l'unité d'amplification de charge (représentée sur la Fig.4) est disposée dans un carter robuste spécial, conjointement avec le régulateur de la tension de sonde et l'alimentation en courant électrique (bloc d'alimentation).

Si le condensateur d'interstice est polarisé par rapport au rotor avec une tension continue constante U_{ref} , la surface de sonde active est chargée et déchargée électriquement à chaque passage d'une aube.

Si la surface de sonde active 18 est, dans le système de mesure, raccordée à l'amplificateur de charge, il est produit à sa sortie un signal de tension U_A qui constitue une mesure de la quantité de charge Q envoyée ou prélevée à son entrée.

La quantité de charge maximale Q_{imax} lors de chaque changement d'aube est fonction de la capacité du condensateur d'interstice C_{si} et, par suite, de la distance d_i de l'aube individuelle 4 à la sonde, conformément à l'équation : $Q_{\text{imax}} = C_{\text{si}} \cdot U_{\text{ref}} = U_{\text{ref}} \cdot f(d_i)$; $f(d_i)$ donne la relation entre l'interstice et la capacité, cette relation étant déterminée par étalonnage.

Etant donné que l'amplificateur de charge 8 est raccordé à la sonde 1 avec une protection par un câble triaxial 17, dans lequel l'âme et le blindage de protection sont au même potentiel, l'amplificateur de charge 8 n'enregistre pas de variation de capacité propre de la sonde ou du câble dans la zone située entre l'écran de protection et l'âme de la sonde 1. En effet, aucun décalage de charge n'a lieu par variation de charge car cette zone du condensateur est au même potentiel des deux côtés. En d'autres termes, on ne détermine que la capacité du condensateur d'interstice qui varie en fonction de la distance entre la sonde 1 et l'aube 4. La sonde 1 est disposée le plus près possible de l'élément mobile 4. La distance entre la sonde 1 et l'aube 4 la plus longue peut cependant être choisie librement. Pourtant, si elle est prise à la plus faible valeur possible, il en résulte un accroissement de la sensibilité du dispositif de mesure. La surface de mesure ou surface frontale 18 de la sonde 1 peut aussi être adaptée au contour intérieur de l'enveloppe 2, si celui-ci s'écarte, par exemple, d'une surface plane.

La sonde 1 montée dans l'enveloppe 2 constitue, conjointement avec la pointe d'aube 4, le condensateur d'interstice dont on doit mesurer et indiquer la distance entre plaques. Avec une position connue de la surface de sonde active 18 dans l'enveloppe, on obtient directement l'interstice de rotor "S" à partir de la distance entre plaques.

L'amplificateur de charge 8 à large bande de fréquence convertit la quantité de charge du condensateur d'interstice pour obtenir le signal de tension 7 indiqué sur la Fig.2. La

largeur de bande de l'amplificateur de charge 8 est alors avantageusement accordée sur les fréquences contenues dans le signal de fréquence auquel on s'attend. Pour ne pas réduire la fréquence limite supérieure de l'amplificateur de charge, il est avantageux que le câble de connexion de sonde 17 soit le plus court possible.

L'installation électronique de traitement 9 a pour fonction, après filtrage et amplification du signal, de mesurer individuellement la valeur de pointe de chaque impulsion de passage d'aube et de la numériser. Les valeurs d'amplitudes d'impulsions déterminées sont alors transmises en parallèle en tant que bits à l'ordinateur 10.

L'ordinateur 10 commande le déroulement de la mesure suivant le mode de fonctionnement choisi par l'utilisateur et convertit les valeurs de mesure (volts) en valeurs d'interstice S (en mm).

En tant que modes de fonctionnement, on peut choisir (en 16):

- a) mesure stationnaire ,
- b) mesure non stationnaire ,
- c) mesure sur aube individuelle,
- d) étalonnage.

Il faut distinguer le fonctionnement avec mesure stationnaire et le fonctionnement avec mesure non stationnaire. En effectuant la mesure deux fois avec une polarité différente de la tension de sonde et en formant ensuite la moyenne arithmétique, on obtient une valeur de signal d'interstice fonction de la tension de polarisation de la sonde, même avec une mauvaise mise à la terre du rotor. On doit effectuer l'inversion de polarité de la tension de polarisation de sonde avec une fréquence de cycles adaptée au cas d'application considéré. Cette fréquence peut à chaque fois être aisément déterminée par des essais; elle est notamment différente pour des mesures stationnaires et des mesures non stationnaires. Avec le mode de fonctionnement stationnaire, on peut inverser automatiquement la tension de polarisation de sonde après un intervalle de temps

qui peut être présélectionné. Avec le mode de fonctionnement non stationnaire, on peut interrompre l'inversion de polarité, par exemple pendant des phases d'accélération ou de décélération rapides de la machine. On détermine alors un facteur de correction lors d'un processus d'inversion unique. L'ordinateur traite automatiquement ce facteur de correction avec, dans cet exemple, des valeurs de signaux d'interstice pris avec une polarité.

En tant que résultat de mesure, l'ordinateur peut indiquer, indépendamment du mode de fonctionnement, le plus faible interstice par tour, le plus grand interstice ou encore l'interstice moyen. De même, on peut effectuer une mesure sur aubes individuelles, mesure dans laquelle on détermine les valeurs d'interstice pour chaque aube et on les reporte sur une liste. La sortie des résultats de mesure est différente suivant que la mesure est stationnaire ou non stationnaire.

Pour effectuer l'étalonnage précédant une mesure, on procède comme suit :

On déplace la sonde 1 par rapport à l'enveloppe 2 dans la direction de l'élément mobile tel que couronne de rotor 6 avec aubes en saillie. Par modulation périodique de la tension de référence (tension de polarisation de sonde), on modifie la charge du condensateur formé par la sonde et l'aube ; on obtient ainsi un signal d'étalonnage.

La construction de la sonde de mesure capacitive est visible d'après l'exemple représenté sur la Fig.7.

La surface de mesure 18 est protégée de façon coaxiale par les couches 19,20 disposées entre les conducteurs et présentant une épaisseur prédéterminée (résistance au claquage). Cette surface 18 est raccordée à l'amplificateur de charge (voir Fig.8) par le câble triaxial 17. Le raccordement a lieu par le conducteur intérieur à un pôle de l'amplificateur 8 et par le conducteur extérieur à l'autre pôle par l'intermédiaire de la connexion de masse. Les couches 19,20 assurant l'isolement et le blindage de protection peuvent être en verre, en céramique,

en métal, en matière plastique ou en une combinaison (non conductrice) de ces matières. Ces couches peuvent être assemblées entre elles de façon à résister aux sollicitations mécaniques et à la température.

5 Des modifications peuvent être apportées aux
exemples de réalisation représentés et décrits sans restreindre
l'étendue de protection de l'invention. On peut aussi effectuer
d'autres applications que celles qui ont été décrites précédem-
ment. Le système de mesure peut être complètement automatisé en
10 ce qui concerne la commande, l'exploitation, le contrôle des
défauts et on le fait fonctionner avec plusieurs canaux. L'in-
vention n'est pas limitée aux turbomachines, mais est applica-
ble d'une façon générale aux moteurs et aux machines industriel-
les ainsi qu'en tant que sonde de mesure de distance aux machi-
15 nes-outils et aux systèmes de manipulation tels que robots.

REVENDEICATIONS

5 1°) Dispositif de mesure capacitif basé sur une mesure de charge pour mesurer la distance entre deux éléments mobiles l'un par rapport à l'autre, notamment la distance d'un rotor conducteur (4) à l'enveloppe (2) d'une machine, avec une sonde (1) et un dispositif d'acquisition et/ou d'exploitation (8,9,10,11,12) pour les valeurs de mesure, caractérisé en ce que :

10 a) le condensateur formé par la sonde de mesure (1) et l'élément (4) situé en regard est polarisé à une tension de référence réglable qui est stabilisée dans une unité de tension d'alimentation (15),

15 b) la mesure est effectuée avec deux tensions de référence et est donc également réalisable sur des rotors mal mis à la terre,

c) l'amplificateur de charge (8) et le générateur de tension (U_{ref}) sont disposés à distance de la sonde,

d) la sonde est raccordée à l'amplificateur de charge et au générateur de tension par un câble triaxial,

20 e) la largeur de bande de l'amplificateur de charge est accordée sur les fréquences contenues dans le signal de charge auquel on s'attend,

25 f) la surface de mesure (18) de la sonde est plus petite que la surface balayée par l'élément mobile et elle est dirigée vers celle-ci et,

30 g) la capacité d'interstice C_s est déterminée à partir de la quantité de charge mesurée par l'équation $C_s = Q/U_{ref}$ et le diamètre d'interstice est déterminé à partir de la capacité d'interstice par l'équation $C_s = A + B/d + C$, dans laquelle A,B,C sont des grandeurs étalonnées.

35 2°) Dispositif de mesure selon la revendication 1 caractérisé en ce que la surface de mesure (18) de la sonde (fonction de son diamètre) est plus petite que la surface (fonction de la distance périphérique) entre deux aubes d'un rotor (6) à aubes (4) sur lequel on doit effectuer la mesure.

3°) Dispositif de mesure selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que la sonde (1)

est disposée dans une paroi de l'enveloppe (2) de façon à être fixée et à pouvoir être étalonnée.

5 4°) Dispositif de mesure selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que la polarité de la tension de polarisation fournie par l'amplificateur de charge (8) au condensateur peut être inversée.

5°) Dispositif de mesure selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'inversion est effectuée automatiquement.

10 6°) Dispositif de mesure selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que l'acquisition et l'exploitation des valeurs de mesure peuvent être effectuées avec plusieurs canaux, l'unité comportant au moins un microprocesseur ou un ordinateur (10), notamment un micro-ordinateur.

15 7°) Dispositif de mesure selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le dispositif de mesure de charge et le circuit de réglage donnant la tension de polarisation forment une unité de construction.

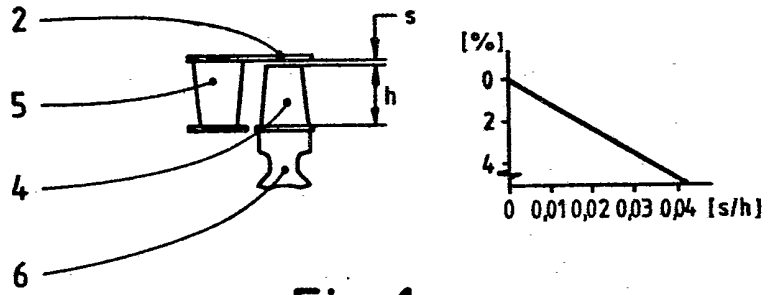


Fig.1a

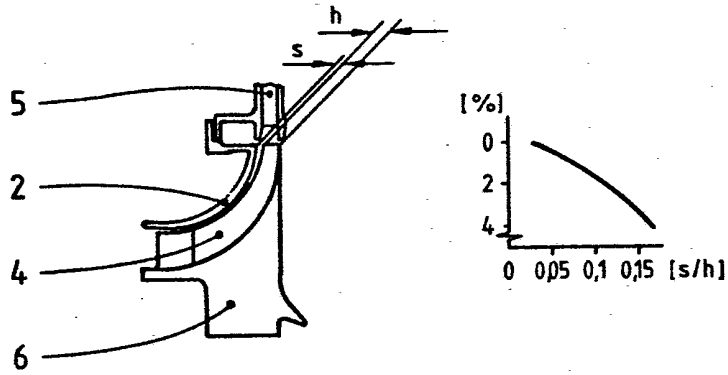


Fig.1b

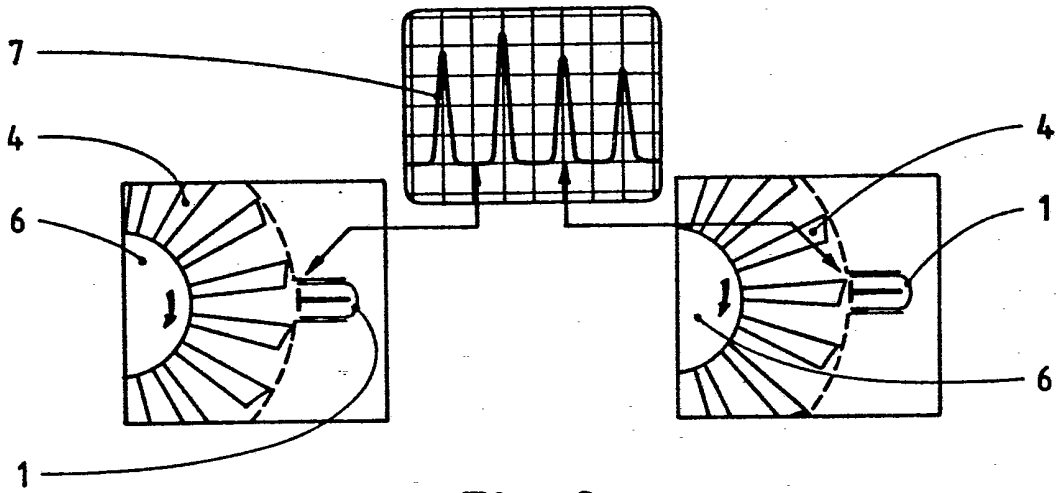


Fig.2

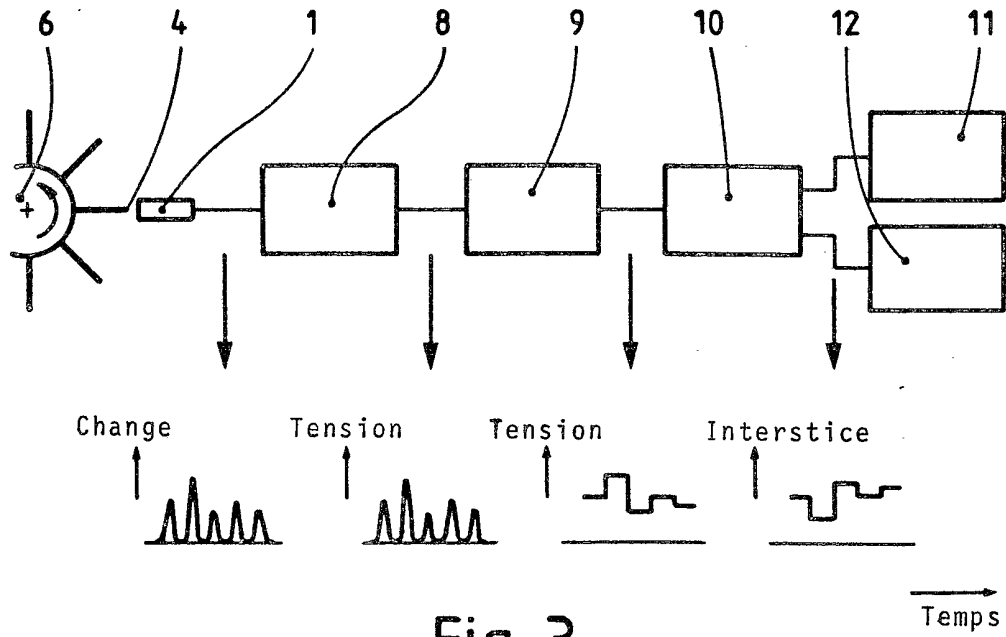


Fig. 3

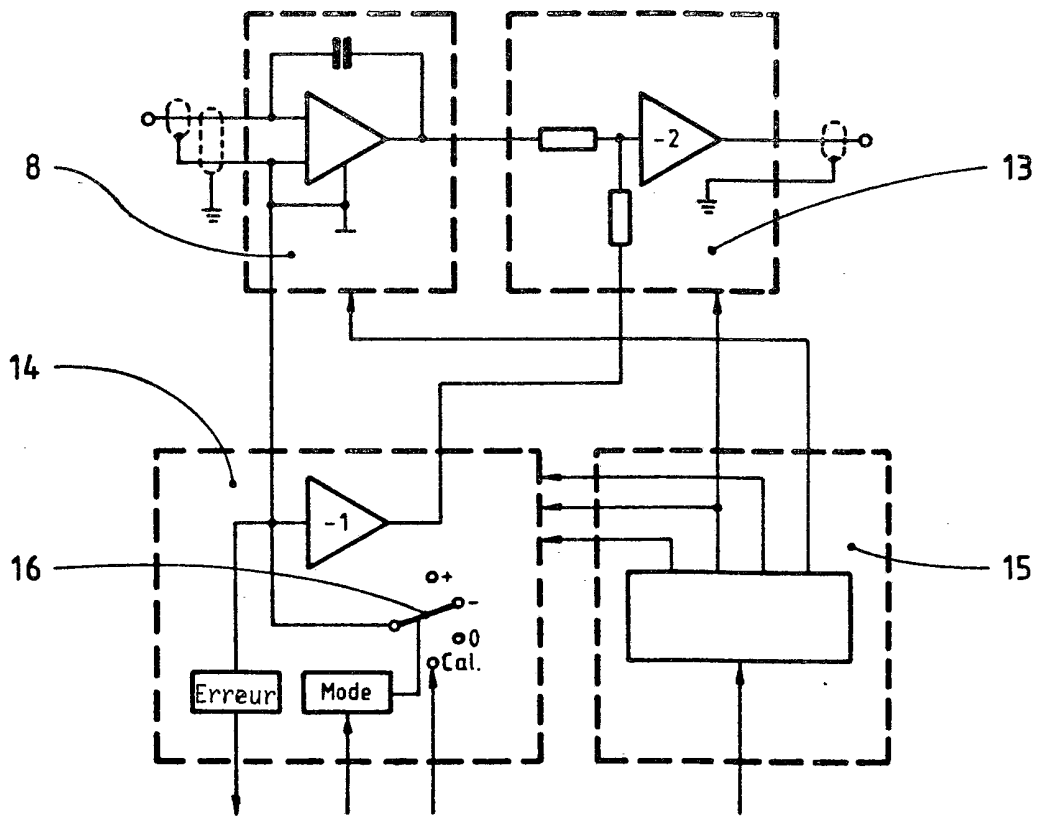


Fig. 4

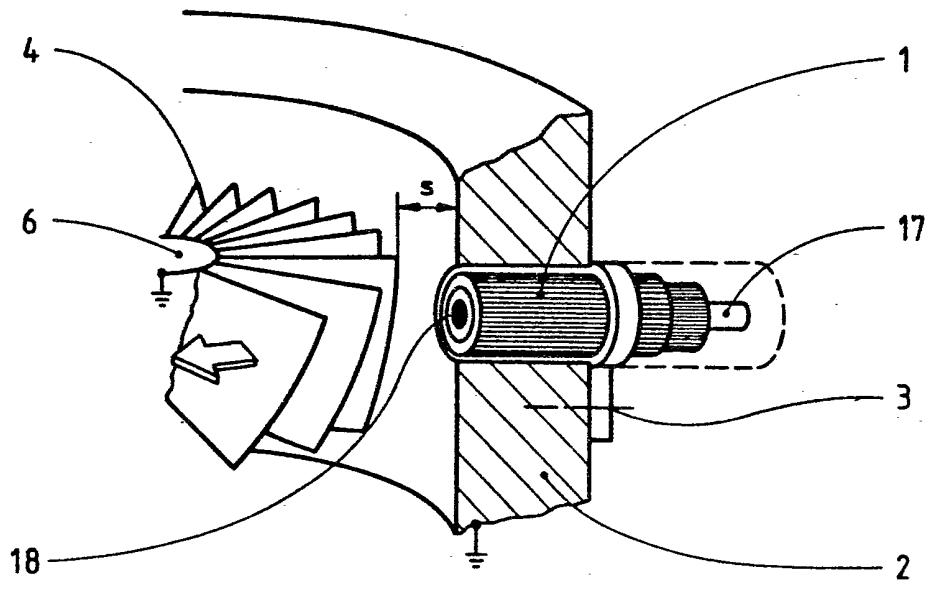


Fig. 5

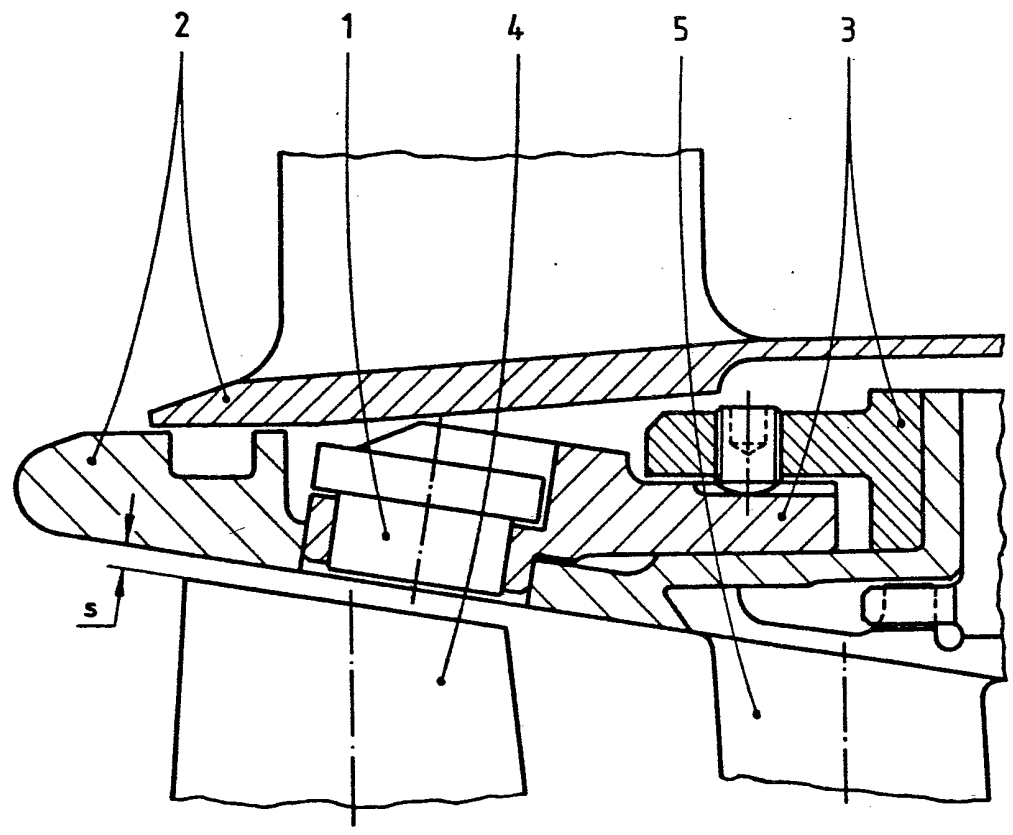


Fig. 6

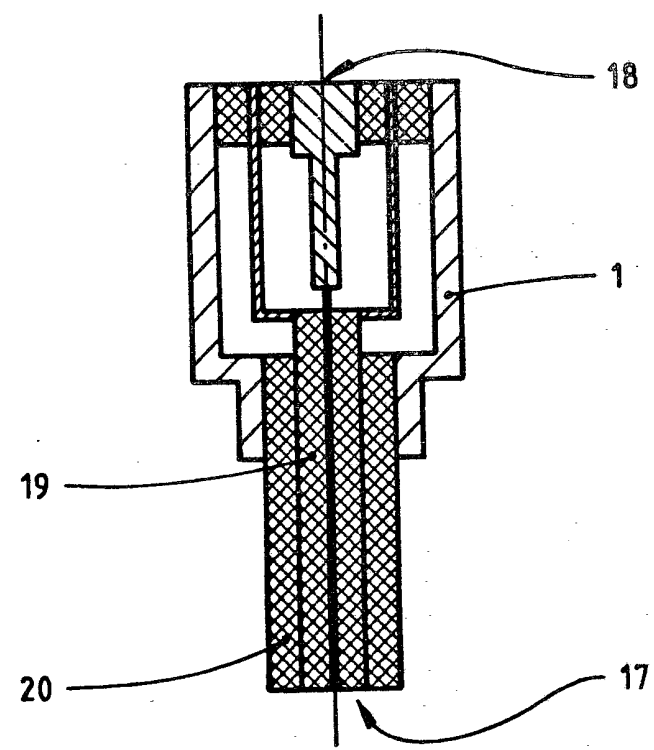


Fig. 7

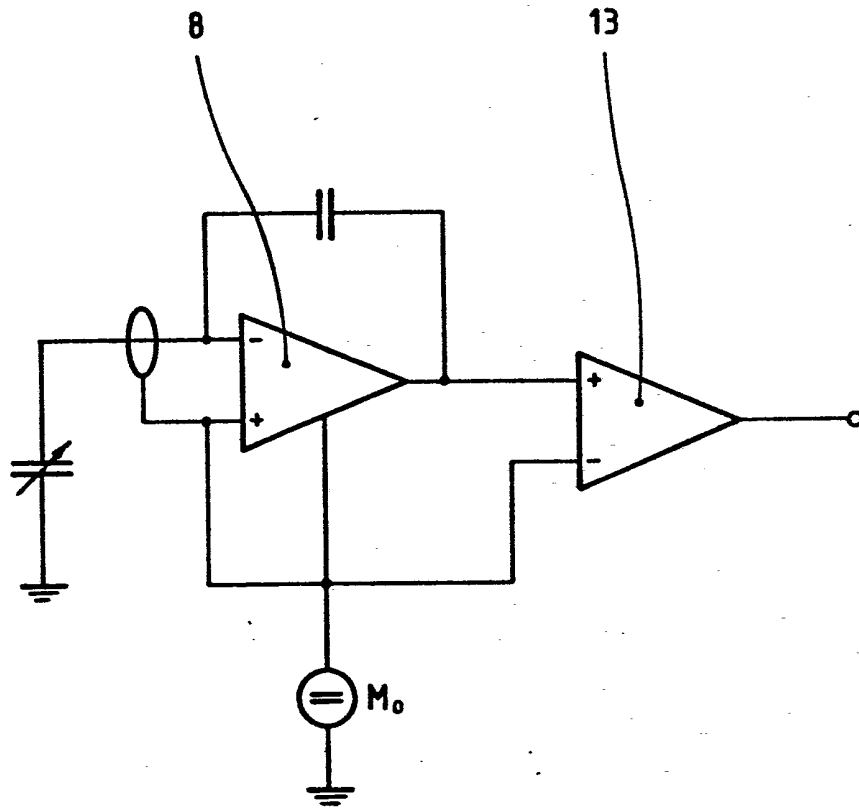


Fig. 8