(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 551 209**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **84 12520**

(51) Int Cl⁴ : G 01 M 1/22.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt** : 8 août 1984.

(30) **Priorité** : US, 9 août 1983, n° 06/521 725.

(43) **Date de la mise à disposition du public de la demande** : BOPI « Brevets » n° 9 du 1er mars 1985.

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés** :

(71) **Demandeur(s)** : *Société dite : BECTON, DICKINSON AND COMPANY.* — US.

(72) **Inventeur(s)** : Nikul S. Kapadia.

(73) **Titulaire(s)** :

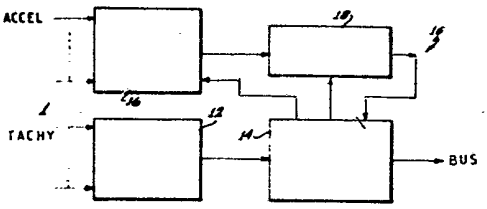
(74) **Mandataire(s)** : Rinuy, Santarelli.

(54) Procédé et appareil de mesure de déséquilibre.

(57) L'invention concerne les techniques d'équilibrage de machines tournantes.

Un appareil de contrôle de vibration comporte notamment un circuit de traitement de signal de tachymètre 12 qui détermine la période de rotation de la machine tournante contrôlée et qui détermine des intervalles appropriés pour l'échantillonnage des données d'accéléromètre. Les données d'accéléromètre échantillonnées sont traitées par un filtre numérique non récursif 18 pour déterminer la vitesse ou le déplacement de crête de la vibration de la machine tournante. Dans une phase de fonctionnement suivante, un dispositif de traitement de données 14 détermine la position du maximum de vibration par rapport à un point de référence sur la machine tournante. L'information fournie permet d'appliquer une masse compensatrice appropriée pour corriger le déséquilibre.

Application aux soufflantes de turboréacteurs à double flux.



FR 2 551 209 - A1

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

La présente invention concerne des systèmes de contrôle de vibration et elle porte plus particulièrement sur un système destiné à mesurer un déséquilibre dans une machine tournante et à déterminer la valeur et la position d'une masse compensatrice permettant d'éliminer pratiquement la condition de déséquilibre.

Des systèmes destinés à contrôler et à analyser les vibrations dans de grandes machines tournantes ont été créés ces dernières années. De tels systèmes sont souhaitables du fait qu'ils permettent de prévoir des défauts naissants, et éventuellement de les éviter. Ceci est particulièrement important si la machine tournante est un moteur d'aéronef dans lequel les conséquences d'un défaut peuvent être désastreuses.

Une perte de l'équilibrage en rotation est une cause qui contribue aux vibrations. Cette perte d'équilibrage peut résulter d'une détérioration mineure du composant tournant par des particules, ou bien elle peut résulter d'autres causes accidentelles qui entraînent toutes une perte de masse ou une modification de la répartition de masse. A titre d'exemple, un turboréacteur d'aéronef équipé d'une soufflante peut rencontrer de petites pierres, du gravier, de la glace ou des objets volants qui, s'ils ne produisent pas des détériorations graves, peuvent ébrécher ou entailler l'aubage tournant de la soufflante, créant ainsi un déséquilibre de masse.

Le changement dans la répartition de masse produit une vibration à la fréquence de rotation, qu'on peut contrôler. Dans la plupart des systèmes, on détecte les vibrations avec un accéléromètre. On peut intégrer ces signaux d'accéléromètre pour obtenir des mesures de vitesse, et on peut intégrer à nouveau les signaux de vitesse pour produire des signaux de déplacement. Avec un tel système, il est possible de calculer la valeur de masse qui doit être ajoutée à un composant tournant pour rétablir l'équilibrage en rotation. Un tel système ne fournit cependant pas une information concernant l'endroit auquel on doit ajouter la masse.

Dans le cas de turboréacteurs d'aéronef à double flux, le rétablissement de l'équilibre de la soufflante peut être une tâche relativement simple, si on peut identifier avec précision l'emplacement auquel la masse doit être ajoutée. Il existe des systèmes destinés à produire un signal qui identifie une position de référence ou d'index particulière sur le composant tournant. On connaît à l'heure actuelle au moins trois de ces systèmes, faisant intervenir un composant magnétique associé à une seule pale, un générateur d'impulsions de référence, ou une dent "courte" ou "absente" dans une roue dentée.

On a conçu des circuits de filtrage appropriés qui peuvent sélectionner et présenter le facteur de déséquilibre. Ce dont on a besoin est un circuit qui, connaissant la valeur du déséquilibre, puisse, sous la dépendance d'impulsions de référence, définir un emplacement pour l'application de masses d'équilibrage appropriées. Un tel système pourrait déclencher un compteur approprié pour déterminer le moment, dans le cycle de rotation, auquel le maximum est apparu. Il est alors possible de déterminer la masse nécessaire pour rétablir l'équilibre et l'emplacement auquel la masse doit être placée.

Conformément à l'invention, on peut adapter un système de contrôle de vibration existant, comme celui décrit dans la demande de brevet des E.U.A. de Kapadia et col. n°06/344 561, déposée le 1er février 1982, dans le but de produire l'information nécessaire pour rééquilibrer un turboréacteur d'aéronef. Le système décrit dans la demande de brevet précitée comprend un filtre numérique non récursif et des circuits d'échantillonnage appropriés. Il présente un résultat exprimé par une vitesse. Un signal de vitesse numérique est cependant disponible dans le système, en sortie du filtre numérique, et on pourrait intégrer ce signal pour donner un signal de déplacement, si on le désire.

Conformément à l'invention, on emploie des circuits supplémentaires pour détecter une impulsion de référence unique provenant de la machine tournante, cette machine pouvant devoir

être modifiée pour produire un tel signal. D'autres circuits déterminent le déplacement maximal pendant chaque cycle. Pendant des cycles suivants, des circuits peuvent reconnaître des déplacements qui sont supérieurs à un pourcentage prédéterminé du maximum.

Ces déplacements reconnus peuvent arrêter un compteur rapide qui démarre sous l'effet de l'impulsion de référence. Le compte représente alors une fraction du cycle de rotation. On fait la moyenne dans le temps d'un nombre prédéterminé d'échantillons, relevés sur une certaine durée, pour présenter un résultat qui identifie la position de déplacement maximal, dans des tolérances acceptables. Cette position est décalée de 180° par rapport au point auquel on doit ajouter la masse pour rétablir l'équilibre.

Du fait des circuits électriques, de l'amortissement mécanique et des techniques de filtrage qui sont employées, l'apparition du maximum peut être "déphasée" par rapport à sa position vraie, et on devra envisager des compensations de phase appropriées. De façon similaire, il est possible de calculer un poids d'équilibrage approprié à partir d'une valeur de déplacement donnée.

En utilisant le système de l'invention, il est possible de déterminer, en vol, la masse nécessaire pour rééquilibrer un moteur. Si seule la turbosoufflante est équilibrée, le système détermine sur quelle pale on doit installer la masse. L'installation de la masse et donc l'équilibrage peuvent être effectués au sol pendant un arrêt de service mineur, sans démontage du moteur. Un tel rééquilibrage périodique tend à éviter que des déséquilibres mineurs ne deviennent des facteurs produisant une contribution majeure aux vibrations, avec les dommages qui en résultent pour les organes tournants, les paliers et les supports.

Le système de l'invention comporte trois modes ou phases de fonctionnement : une première phase dans laquelle on détermine la vitesse du moteur ; une seconde dans laquelle on

échantillonne et on traite les données de l'accéléromètre ; et une troisième phase dans laquelle on détermine la position du déséquilibre. Dans le cadre des seconde et troisième phases, on contrôle la vitesse du moteur après chaque mesure pour s'assurer que les données sont toujours valides. Si la fréquence du moteur a changé pendant une mesure, on doit répéter le processus.

Dans d'autres modes de réalisation, dans lesquels on ne dispose pas du système de contrôle de vibration de la demande de brevet précitée, on peut concevoir un système relativement simple qui est prévu spécialement pour l'opération d'équilibrage et qui utilise un grand nombre d'idées et d'éléments décrits dans la demande de brevet précitée. Dans un tel système, on peut employer des circuits d'échantillonnage appropriés qui sélectionnent des signaux d'accéléromètre conditionnés convenablement, qui sont intégrés pour produire des signaux de vitesse. Les signaux de vitesse sont convertis en un format numérique, à une cadence relativement élevée.

On contrôle la vitesse de rotation, et en mesurant la durée d'un cycle, on peut subdiviser cet intervalle de cycle en un nombre d'échantillons prédéterminé. Un compteur, programmé de façon à produire des impulsions d'échantillonnage aux instants appropriés, commande un filtre numérique non récursif. On peut utiliser le signal de sortie du filtre numérique en tant que valeur de vitesse, ou bien on peut l'intégrer pour représenter le déplacement.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention seront mieux compris à la lecture de la description qui va suivre de modes de réalisation préférés, donnés à titre d'exemple, et en se référant aux dessins annexés sur lesquels :

La figure 1 est un schéma synoptique d'un système d'analyse de vibration conforme à l'invention ;

La figure 2 est un schéma synoptique de circuits de traitement de signal de tachymètre destinés à être utilisés dans le système de la figure 1 ;

La figure 3 est un schéma synoptique de circuits de traitement de signal d'accéléromètre qui conviennent à l'utilisation dans la combinaison de la figure 1 ;

La figure 4 est un schéma synoptique simplifié d'un filtre numérique non récursif de l'art antérieur ; et

La figure 5 est un schéma synoptique plus détaillé du filtre de la figure 4.

En considérant tout d'abord la figure 1, on voit le schéma synoptique de principe d'un système d'analyse de vibration 10 conforme à l'invention. Le système 10 comprend des circuits de traitement de signal de tachymètre 12 et un microprocesseur avec les systèmes fonctionnels qui lui sont associés, 14. Un système de traitement de signal d'accéléromètre 16, séparé, est commandé par le microprocesseur 14 et applique des signaux de données à un filtre numérique à bande étroite 18. Les signaux sont transmis par un bus à l'équipement électronique de l'aéronef.

Les éléments de la figure 1 sont représentés de façon plus détaillée sur les figures 2 et 3. En considérant tout d'abord la figure 2, on suppose que l'équipement existant, installé sur chaque moteur, fournit plusieurs signaux de tachymètre. Comme il est représenté, le système peut accepter jusqu'à quatre signaux de tachymètre, chacun d'eux étant appliqué à un circuit de mise en forme de signal de tachymètre 22. En supposant qu'on dispose de plusieurs signaux de tachymètre, un multiplexeur 24 est branché de façon à recevoir les signaux de tachymètre et, sous la commande du microprocesseur 14, il applique sélectivement les signaux de tachymètre à un discriminateur d'amplitude 26. En combinaison avec une unité logique de commande 28, le discriminateur d'amplitude 26 traite les signaux de tachymètre qui lui sont appliqués. En fonction du système qui est employé dans le moteur pour identifier une position de référence, le discriminateur d'amplitude 26 produit une impulsion de référence par tour de la soufflante.

S'il existe un générateur de signal de référence ou d'index séparé, le signal de ce générateur peut être appliqué directement à l'unité logique de commande 28 en tant que signal

de référence. Parmi les autres types de générateurs de signal de référence, l'un fournit un signal renforcé une fois par tour et un autre fournit un signal notablement diminué une fois par tour. On peut utiliser un détecteur de valeur de crête et un comparateur pour signaler l'apparition d'un signal dont l'amplitude est notablement supérieure à celle d'autres signaux similaires. Un circuit logique simple qui compare un signal présent peut reconnaître une impulsion "manquante" dans un train de signaux par ailleurs régulier.

Selon une variante, le microprocesseur 14 ayant la "connaissance" de la vitesse du rotor détermine l'intervalle de temps entre deux pales adjacentes. Le microprocesseur 14 recherche continuellement des transitions logiques, en temps réel. Lorsqu'il détecte la transition logique "manquante", il signale la position de la pale de référence.

Il existe trois circuits de définition de temps, 30, 32, 34, et le circuit de définition de temps n° 1, 30, et le circuit de définition de temps n° 2, 32, ont la double fonction qui consiste à déterminer la fréquence du tachymètre et à déterminer la position du déséquilibre par rapport à une pale de référence. On détermine la fréquence du tachymètre en mettant hors fonction le détecteur de crête, par l'utilisation du circuit de mise en forme du signal de tachymètre en tant qu'élément écrêteur, au lieu de l'utiliser dans son mode linéaire.

L'unité logique de commande 28 comprend un diviseur rapide de tête destiné à diviser les impulsions de tachymètre d'entrée par le nombre de pales du rotor de la soufflante, lorsque le circuit d'entrée produit une impulsion par pale, cette impulsion pouvant ne pas coïncider avec l'impulsion de référence. La sortie du diviseur rapide de tête applique à la porte du circuit de définition de temps n°1,30,un signal de définition de temps apparaissant une fois par tour. La porte du circuit de définition de temps n° 1, 30, permet à ce circuit de "décompter" des impulsions d'horloge rapides qui lui sont appliquées, aussi longtemps que la porte est ouverte. La pério-

de correspondant à un tour est alors disponible sous la forme d'un nombre qu'on peut diviser pour obtenir l'intervalle d'échantillonnage approprié.

Le circuit de définition de temps n° 2, 32, détermine la présélection de l'horloge programmable, en fonction du type du rotor. On sélectionne l'horloge programmable d'une manière telle que le nombre compté en sens décroissant par le circuit de définition de temps n° 1, 30, représente la vitesse à laquelle des signaux d'accéléromètre doivent être échantillonnés et traités.

Si par exemple la vitesse du rotor est de 100 Hz, ou 10 millisecondes/tour, la durée qui sépare des échantillons d'accéléromètre est de 10,0 millisecondes divisées par 18 échantillons/cycle, soit 555,5 microsecondes. Par conséquent, si on doit utiliser une horloge à 2 MHz, la durée des impulsions d'horloge pour le compteur est de 0,5 microseconde par impulsion d'horloge, et le compte initial qui est exigé dans le circuit de définition de temps pour produire les signaux définissant la période d'échantillonnage appropriée est égal à 1111, ou son équivalent binaire.

Si un compte de 60 est chargé dans le diviseur rapide de tête, ce qui correspond aux nombres de pales de la soufflante, un signal de sortie apparaîtra à chaque tour pour ouvrir la porte du circuit de définition de temps n°1, 30, pendant exactement un tour, soit 10 000 microsecondes. Si le circuit de définition de temps n° 1, 30, reçoit à partir du circuit de définition de temps n° 2, 32, des signaux d'horloge avec une période de 9 microsecondes, 1111 impulsions seront comptées pour créer le compte initial désiré. Pour effectuer ceci, le microprocesseur charge initialement une constante, égale dans ce cas à 18, dans le circuit de définition de temps 32. L'horloge d'entrée à 2 MHz est alors divisée par 18 dans le circuit de définition de temps 32 pour produire des impulsions d'une période de 9 µs.

On utilise le circuit de définition de temps n°3, 34,

pour déterminer la cadence d'échantillonnage pour les circuits de filtre numérique. On charge dans le circuit de définition de temps n° 3, 34, le compte de 1111, qui est obtenu à partir du circuit de définition de temps n° 1, 30, pour obtenir la cadence d'échantillonnage correcte pour une vitesse du rotor de 100 Hz. Après avoir déterminé la vitesse du rotor dans le circuit de définition de temps n° 3, on charge le circuit de définition de temps n° 3, 34, avec une constante appropriée (1111 pour 100 Hz) de façon à déterminer une cadence d'échantillonnage pour la vitesse du rotor qui est mesurée. Une fois qu'on a déterminé la constante de façon empirique, on utilise ensuite dans une phase de fonctionnement suivante les circuits de définition de temps n° 1 et n° 2, 30, 32, pour déterminer la position du déséquilibre par rapport à la pale de référence.

Bien que l'exemple ci-dessus sert à expliquer le processus, dans un appareil caractéristique on place pendant la phase de démarrage un nombre prédéterminé particulier dans le circuit de définition de temps n° 1, 30, et l'horloge d'une période de 9 microsecondes (soit la fraction 1/18 de la cadence de l'horloge à 2 MHz) décrémente le nombre prédéterminé. Le nombre qui reste dans le circuit de définition de temps n° 1 à la fin d'un tour est appliqué au microprocesseur 14 qui détermine la valeur que doit avoir la constante appropriée pour la génération des intervalles d'échantillonnage. Dans l'exemple ci-dessus d'une vitesse du moteur de 100 Hz, la constante sera égale à 1111. Si le circuit de définition de temps n° 3 est maintenant attaqué par l'horloge de base à 2 MHz, un signal de sortie d'échantillonnage apparaîtra 18 fois par tour à une vitesse du rotor de 100 Hz.

Dans la phase de détermination de position, le circuit de définition de temps n° 1, 30, est pré-chargé avec un nombre représentatif d'un cycle complet, ou 360°. Ensuite, à partir d'une table à consulter qui se trouve dans le microprocesseur 14, on place dans le circuit de définition de temps n° 2, 32, une constante qui donne une valeur de comptage de 360

par tour pour une résolution de 1° ou une valeur de comptage de 180 par tour pour une résolution de 2°. On utilise dans cette phase une seconde horloge, à 1,25 MHz, pour attaquer le circuit de définition de temps n° 2, 32.

Pour une résolution de 2° à 100 Hz, le temps écoulé doit être de 55,55 microsecondes pour chaque incrément de 2°. Pour que le circuit de définition de temps n° 2 produise des impulsions à cette cadence, le microprocesseur 14 doit placer une constante dans ce circuit de définition de temps. La table à consulter fournit, à titre de constante, le nombre 69,44 qui, s'il est décrémenté par des impulsions d'horloge correspondant à une horloge de 1,25 MHz, produira une impulsion de sortie tous les 2°. Cette impulsion de sortie décrémente le circuit de définition de temps n° 1 de 2° par impulsion. Lorsqu'il apparaît un signal de données de valeur prédéterminée, comme on l'expliquera ci-après, le comptage dans le circuit de définition de temps n° 1 est arrêté et le nombre enregistré qui représente la position relative est placé dans le microprocesseur.

Selon une variante, on pourrait programmer le circuit de définition de temps n° 1, 30, de façon que la valeur maximale apparaissant pendant des tours suivants soit accumulée et soumise à un calcul de moyenne pour donner une valeur moyenne de la position.

On suppose que la vitesse du rotor demeure constante pendant la durée nécessaire pour déterminer la position du déséquilibre. Si la vitesse du rotor change effectivement, l'information est rejetée et le processus de collecte de données est répété. On détermine une nouvelle cadence d'échantillonnage avant que la position du déséquilibre puisse être identifiée, du fait que, dans le mode de réalisation préféré, le filtre numérique 14 suit la fréquence du rotor.

Comme le montre la figure 3, le mode de réalisation proposé des circuits de traitement de signal d'accéléromètre 16 multiplexe jusqu'à quatre moteurs ou machines tournantes,

dans la mesure où il n'est habituellement pas nécessaire de disposer d'une information en temps réel. Si un fonctionnement continu , en "temps réel", est nécessaire, on peut utiliser le système avec seulement deux machines tournantes ou moteurs.

Dans le cas de turboréacteurs, on multiplexe le système en utilisant l'accéléromètre de soufflante sur chaque moteur. L'accéléromètre de palier n'est habituellement pas utilisé pour l'équilibrage du fait qu'on ne peut pas accéder aisément à cette partie d'un moteur pour l'équilibrage, mais l'information correspondante est nécessaire, du fait qu'un déséquilibre de la soufflante affecte les paliers et le "bruit" des paliers affecte la soufflante. On ne contrôle pas l'accéléromètre de la turbine, du fait que s'il détecte des niveaux de vibration élevés, une révision générale est habituellement nécessaire.

Le système détermine, pour la soufflante, l'amplitude du déséquilibre et sa position. Un multiplexeur 40 multiplexe sélectivement deux signaux d'entrée parmi plusieurs et on considérera que ces signaux définissent l'information du Canal A (c'est-à-dire l'accéléromètre de soufflante) et l'information du Canal B (c'est-à-dire l'accéléromètre de palier ou le second accéléromètre de soufflante) pour chaque moteur. Les données du Canal A et du Canal B doivent toujours être relevées sur le même moteur. Le signal d'entrée peut être l'accélération ou la vitesse ou le déplacement, en fonction du traitement des signaux. Les canaux A et B sont représentés en CA et CB.

Les signaux de sortie du multiplexeur 40 représentant les deux signaux d'entrée sélectionnés, c'est-à-dire le Canal A et le Canal B, sont transmis par des circuits de transmission sélective appropriés à deux filtres anti-repliement, 42, 44, qui peuvent être des filtres passe-bas ayant une fréquence de coupure de 230 Hz (point à 3 dB), pour éviter des effets de repliement des fréquences supérieures dus à l'échantillonnage. Dans un système particulier, la fréquence intéressante du rotor est centrée vers 200 Hz ou 12 000 t/min. Dans

les modes de réalisation présents, le système n'est pas prévu pour déterminer l'amplitude ou la position d'un déséquilibre à des fréquences supérieures à 230 Hz ou 13 800 t/min.

Pour déterminer l'amplitude et la position d'un déséquilibre à des fréquences plus élevées, on peut modifier le filtre anti-repliement pour accepter des fréquences de rotor s'élevant jusqu'à 400 Hz, si on doit contrôler simultanément deux moteurs. On a incorporé dans le système les filtres anti-repliement 42, 44, à quatre pôles et ayant une fréquence de coupure de 230 Hz (point à 3 dB), dans le but d'éviter les perturbations provenant de la fréquence du réseau de distribution d'énergie d'un aéronef, égale à 400 Hz, qu'on trouve habituellement sur un aéronef à turboréacteurs. Par conséquent, tous les parasites à la fréquence du réseau d'alimentation seront atténués d'au moins 24 dB, par la simple utilisation du filtre anti-repliement.

Les signaux de sortie des filtres anti-repliement 42, 44 sont appliqués à un second multiplexeur 46 qui sélectionne le signal de sortie de l'un des deux filtres anti-repliement 42, 44, pour une conversion analogique-numérique rapide qui est effectuée dans un convertisseur analogique-numérique 48, fonctionnant à une cadence constante de 25 kHz. Le signal de sortie du multiplexeur 46 alterne entre un signal de sortie de 40 microsecondes provenant du filtre anti-repliement 42, et un signal de sortie de 40 microsecondes provenant de l'autre filtre anti-repliement 44.

Le signal de sortie analogique est converti sous forme numérique par le convertisseur analogique-numérique 48. Une impulsion de démarrage d'une durée de 2 microsecondes provenant d'un oscillateur libre 50 déclenche la conversion analogique-numérique pour le canal sélectionné provenant du multiplexeur 46. La conversion peut être accomplie en 25 microsecondes. Le signal de sortie numérique est appliqué à une paire de réseaux de bascules de mémorisation 52, 54, ou aux circuits de filtre numérique 18.

Dans le mode de réalisation préféré, les circuits de filtre numérique 18 comprennent une paire d'éléments de mémorisation ou réseaux de bascules 52, 54. On utilise le front positif d'un signal "départ" pour stabiliser les données numériques d'un canal particulier dans les réseaux de bascules 52, 54, pour les canaux respectifs A et B. La cadence à laquelle les réseaux de bascules de mémorisation 52, 54 sont mis à jour est de 12,5 kHz, ou d'une fois toutes les 80 microsecondes, du fait que les données alternent entre les canaux.

Un séquenceur 56 détermine la cadence d'échantillonnage d'un filtre à poursuite, par exemple du type indiqué dans la demande de brevet de Kapadia et Ray précitée. On peut voir qu'à de très faibles vitesses du rotor, par exemple à 20 Hz, la fréquence d'échantillonnage n'est que de 360 Hz, ce qui est proche de la fréquence du réseau d'alimentation en énergie électrique, égale à 400 Hz. A une vitesse du rotor de 22,2 Hz, la composante de fréquence de 400 Hz du réseau d'alimentation en énergie électrique apparaîtra exactement comme un signal du rotor à la même fréquence, et il est impossible de la distinguer. On utilise les filtres anti-repliement pour atténuer d'au moins 24 dB la composante de fréquence du réseau d'alimentation en énergie électrique avant l'échantillonnage. Si la fréquence du rotor est supérieure à 25 Hz, la composante à 400 Hz sera atténuée de 24 dB dans le filtre anti-repliement et elle subira une atténuation supplémentaire de 45 dB dans le filtre à poursuite, ce qui donne un total de 60 dB.

Le séquenceur 56 détermine la fréquence à laquelle les données sont introduites dans une mémoire vive 58 du type premier entré - premier sorti, ou mémoire à accumulation. La cadence à laquelle les réseaux de bascules de mémorisation 52, 54 sont "rafraîchis" est indépendante de la fréquence du rotor, mais la cadence à laquelle le séquenceur 56 rafraîchit les données dans la mémoire vive à accumulation 58 dépend directement de la fréquence du rotor. Les réseaux de bascules de mémorisation 52, 54 font fonction de tampon d'entrée pour la mémoire,

ce qui fait gagner le temps de conversion des données lorsque le séquenceur 56 "demande" des données provenant des canaux d'entrée.

On détermine la cadence à laquelle le séquenceur 56 emplit la mémoire vive à accumulation 58 en multipliant la vitesse de rotation du rotor par 18 échantillons par tour (dans le mode de réalisation préféré). Si la vitesse de rotation est de 50 Hz, la cadence de mise à jour sera de 900 Hz. De façon similaire, si la vitesse de rotation est de 100 Hz, la cadence de mise à jour sera de 1800 Hz.

On a sélectionné la cadence d'échantillonnage de 18 échantillons par cycle de façon à obtenir une largeur de bande de 10 Hz à une vitesse de rotation de 100 Hz. En maintenant le nombre d'échantillons par cycle indépendant de la fréquence de rotation, la largeur de bande sera égale à 10 % de la fréquence. A une vitesse de rotation de 20 Hz, la largeur de bande sera de 2 Hz.

La mémoire vive à accumulation 58 est divisée en deux blocs. L'un des blocs suit les données du canal "A" et le second bloc suit les données du canal "B". Dans le mode de réalisation présent, chaque bloc contient 256 positions de mémoire à huit bits. Le second multiplexeur 46 sélectionne le canal "A" ou le canal "B" pour le passage par le convertisseur analogique-numérique 48, et il mémorise les données dans l'un ou l'autre des réseaux de bascules de mémorisation 52, 54, qui font fonction de tampon d'entrée pour la partie de la mémoire vive à accumulation 58 qui correspond au canal "A" ou au canal "B".

Du fait que le système multiplexe l'information concernant les moteurs au niveau des canaux d'entrée, il est nécessaire que la mémoire à accumulation 58 soit emplie uniquement avec des données d'un moteur sélectionné, pour éliminer toutes les données restantes d'une mesure précédente sur un moteur. Le filtre 18 qui est sélectionné est un filtre numérique non récursif qui ne comporte pas de réaction. Tous les

transitoires qui peuvent exister "s'éteignent" lorsque tous les points de données intermédiaires ou toutes les cellules de mémoire à accumulation sont "rafraîchis" avec de nouvelles données.

Pour éviter des effets "transitoires" de données relatives à un moteur précédent, on ne traite pas des données de moteur immédiatement après la sélection d'un "nouveau" moteur. La première chose qui est exigée dans le mode de réalisation préféré est de collecter 256 mots à 8 bits de données du canal A pour le moteur sélectionné, à sa vitesse de rotation. Un compteur réalisé par matériel, d'une capacité de comptage de 256, incorporé dans le séquenceur 56, est initialisé immédiatement après la sélection d'un moteur à contrôler. Le compteur compte jusqu'à ce que 256 échantillons de données aient été enregistrés dans la mémoire vive à accumulation 58, et à ce moment le compteur signale au microprocesseur 14 que des "transitoires" provenant de la mesure relative au moteur précédent ont disparu.

Le processus de rafraîchissement de la mémoire indiqué ci-dessus ajoute un retard de 256 intervalles de mémoire après la sélection du nouveau moteur. Le retard introduit correspond à 14,22 cycles, ce qui introduit une durée de retard variable, en fonction de la fréquence du rotor. A une fréquence de rotor de 40 Hz, le retard sera de 355,5 millisecondes, tandis qu'à 65 Hz, le retard sera de 218,8 millisecondes. Le retard sera plus court pour des vitesses plus élevées du moteur.

Après que le compteur réalisé par matériel a signalé que la mémoire vive à accumulation 58 contient uniquement des données concernant un "nouveau" moteur, le traitement réel des données démarre. Un algorithme de convolution discret est accompli sur les 256 mots ou multiplets de données. Un mode de réalisation préféré du filtre est représenté sur les figures 5 et 6 de la demande de brevet précitée de Kapadia et col., et ce mode de réalisation est reproduit ici sur les figures 4 et 5.

On va maintenant considérer la figure 4 qui montre sous forme de schéma simplifié la structure d'un filtre numérique non récursif 74, d'un type caractéristique. Comme il est représenté, le filtre 74 comprend un ensemble d'éléments de retard 76, chacun d'eux pouvant enregistrer un échantillon de l'information de signal d'entrée, exprimé sous forme numérique. Comme il est représenté, le filtre comprend M éléments de retard 76, en désignant par M un nombre suffisamment grand pour produire un filtrage raisonnable. L'échantillon présent dans chaque élément de retard est multiplié par une fonction de pondération différente dans un élément multiplicateur 78.

La théorie du filtrage numérique est présentée dans un livre intitulé Digital Filters par R.W. Hamming, édité par Prentice-Hall (1977). On peut en outre obtenir des renseignements supplémentaires en consultant le livre : Theory and Applications of Digital Signal Processing par Rabiner et Gold, (1975), Bell Telephone Laboratories et The Lincoln Laboratories du Massachusetts Institute of Technology, édité par Prentice-Hall.

Le signal de sortie de chaque élément multiplicateur 78 est accumulé dans un registre de sommation 80. Un signal de sortie est alors disponible après chaque échantillonnage.

Au cours du fonctionnement, on sélectionne des coefficients qui produisent un gain de deux ou plus dans le filtre numérique. Le signal de sortie du filtre est bloqué jusqu'à ce qu'un nombre complet d'échantillons valides aient été enregistrés dans les éléments de retard 76. Dans l'exemple considéré, le filtre comprend 256 étages. Le signal de sortie du registre de sommation 80 est donc supprimé jusqu'à ce que 256 échantillons reçus aient été enregistrés dans les éléments de "retard" 76 et traités dans les éléments multiplicateurs 78.

Une fois que la ligne à retard est chargée, chaque échantillon successif peut donner un signal de sortie significatif du filtre qui peut être appliqué au microprocesseur 14 en vue d'une analyse ultérieure.

La figure 5 représente en détail un filtre numérique non récursif 74' qui est utile dans le système considéré. L'échantillon numérisé est appliqué à la mémoire vive à accumulation 58 dans laquelle un nombre d'échantillons prédéterminé sont enregistrés. Un "pointeur" 84 consiste en un compteur d'adresse qui peut accéder à chacune des positions de mémoire pour présenter successivement le contenu de chacune de ces positions au circuit multiplicateur X-Y et accumulateur, 62.

Le pointeur 84 est conçu de façon à "venir au repos" après chaque cycle à une adresse différente, de façon que chaque nouvel échantillon de données puisse être enregistré dans une position différente. Lorsqu'un nombre prédéterminé de "nouveaux" échantillons ont été présentés à la mémoire, les valeurs enregistrées provenant d'un cycle "antérieur" sont rejetées et remplacées par des échantillons de mise à jour.

Une seconde mémoire, ou mémoire de constantes, est constituée par la mémoire morte 60 qui est d'une "taille" égale au nombre d'étages dans le filtre numérique, et qui enregistre les divers coefficients qui sont utilisés pour réaliser le filtre numérique. Un pointeur de constante 86, ou compteur, est utilisé pour parcourir de façon cyclique les diverses positions d'adresse de la mémoire morte 60.

Au moment de l'adressage de chaque position de la mémoire vive à accumulation 58 et de la mémoire morte 60, le contenu de ces positions est appliqué au multiplicateur 62 et le produit des deux signaux d'entrée est accumulé. Dans un cycle, chaque valeur enregistrée dans la mémoire vive 58 sera multipliée par une constante différente dans la mémoire morte 60. Lorsque chaque constante a été adressée, un cycle est terminé et la somme des produits est transférée vers le réseau de bascules de mémorisation de sortie du filtre, 64, qui applique à son tour la quantité résultante au microprocesseur.

Le pointeur de mémoire vive 84 contient un compte qui demeure constant pendant un cycle complet d'adresses de mémoire. Ce nombre fixe change cependant de cycle en cycle, ce

qui a pour effet de présenter l'adresse contenant la valeur "la plus ancienne", de façon qu'elle puisse être remplacée par la valeur la plus récente provenant du circuit détecteur. Le pointeur de mémoire morte 86 recommence simplement le même cycle. Ceci a pour effet de multiplier chaque échantillon enregistré avec un coefficient différent, aussi longtemps que cet échantillon demeure dans la mémoire.

Dans le mode de réalisation préféré, spécialement prévu pour travailler avec deux canaux d'information, la taille de la mémoire vive 58 est doublée pour qu'elle puisse recevoir des échantillons provenant des deux canaux. Un élément de génération de signal de transfert 88 signale l'achèvement de chaque cycle relatif à la mémoire morte 60. Le signal de transfert est appliqué aux éléments d'adressage du circuit de pointeur de mémoire vive à accumulation, 84, de façon qu'une seconde mémoire, qui est pratiquement un double de la première, enregistre les signaux provenant du second canal. Le nombre enregistré dans le pointeur 84 n'est alors changé qu'après l'achèvement à la fois d'un premier cycle portant sur un échantillon provenant du premier canal, et d'un second cycle portant sur un échantillon provenant du second canal.

Lorsque le séquenceur 56 demande un échantillon de données suivant, le nouvel échantillon est enregistré en remplaçant le plus ancien des échantillons présents dans la mémoire vive 58. Du fait que les circuits d'adressage peuvent parcourir la mémoire dans n'importe quel ordre désiré, on peut considérer que le contenu du nouvel échantillon a été décalé d'une position. Par exemple, si on désigne par X_0 à X_{255} les échantillons initiaux enregistrés, le nouvel échantillon est désigné par X_{256} et l'échantillon le plus ancien, X_0, est "détruit" ou éliminé. De façon similaire, l'échantillon X_{257} remplace l'échantillon X_1.

Un nouvel échantillon de sortie sera produit chaque fois que le séquenceur demandera un nouveau mot de données d'entrée. Pour éliminer toute condition d'indétermination liée

aux retards de propagation entre l'échantillon d'entrée et le signal de sortie de l'algorithme de convolution discret, le multiplicateur-accumulateur 62 doit être capable d'accomplir entièrement son algorithme deux fois pendant un seul intervalle d'échantillon, à la vitesse de rotation considérée. Pour la vitesse de rotor très élevée de 200 Hz, la cadence d'échantillonnage sera de 3600 Hz, avec 18 échantillons/cycle.

La durée entre échantillons est de 278 microsecondes, et pendant cette durée des opérations de multiplication et d'accumulation en un nombre total de 512 doivent être accomplies pour les canaux A et B. La vitesse minimale exigée pour multiplier et accumuler un échantillon de données est alors de 278/512, soit environ 540 nanosecondes. Dans le mode de réalisation préféré, le système peut multiplier et accumuler un échantillon de données en moins de 250 nanosecondes, ce qui procure une marge de sécurité raisonnable.

L'intégrale de convolution discrète, utilisée pour un filtre non récursif, produit un retard de phase constant. On peut calculer le retard de phase réel par l'expression : (nombre d'échantillons dans la mémoire vive à accumulation - 1) $_{1/2}$. Du fait qu'il y a 256 échantillons de "mot" dans le filtre, le retard total sera de 127,5 échantillons. Si 18 échantillons sont fournis par cycle, il y a sept cycles complets et un reste de 1,5 échantillons, qui est équivalent à 30°, uniquement par l'intégrale de convolution. Ce retard sera constant (indépendant de la vitesse de rotation), dans la mesure où on prélève toujours 18 échantillons/cycle dans le mode de réalisation préféré.

On utilise cette propriété de retard de phase constant pour localiser le déséquilibre. On détermine l'amplitude du déséquilibre en faisant la moyenne d'échantillons de sortie $X_i Y_i$ de l'algorithme de convolution discret pour un seul cycle complet, c'est-à-dire seulement 18 échantillons. Le signal de sortie moyen fournit l'amplitude du déséquilibre, qui aide également à déterminer l'écart angulaire de la crête de déséquili-

bre par rapport à la pale de référence.

On détermine la position du déséquilibre dans la troisième phase de fonctionnement en obtenant tout d'abord un signal de tachymètre apparaissant une fois par tour, à partir de l'un quelconque des signaux d'entrée de tachymètre, parmi les signaux de tachymètre potentiels, au moins au nombre de trois, tels que:

- un générateur d'impulsions magnétique ou un élément rapporté sur une pale,
- une dent "manquante" ou plus courte, ou bien
- un signal de référence indépendant, apparaissant une fois par tour.

Dans le cas du troisième type de signal d'entrée, aucun traitement supplémentaire n'est nécessaire pour déterminer la position de la pale de référence.

En retournant à la figure 2, on note que le circuit de mise en forme de signal de tachymètre linéaire 22 atténue le signal d'entrée de 50 %. Il fait également fonction de circuit tampon pour le multiplexeur de tachymètre 24. Le multiplexeur sélectionne l'un des quatre signaux d'entrée de tachymètre (c'est-à-dire deux par moteur), pour obtenir un signal de sortie apparaissant une fois par tour. Un discriminateur d'amplitude comprend un détecteur de crête, un comparateur et un circuit de mise en forme à diode (non représenté).

Le détecteur de crête détecte l'amplitude de la crête et il l'atténue de 10 % avant de fixer les limites pour le comparateur. Le comparateur compare le signal d'entrée de tachymètre avec un niveau de tension de référence du comparateur. Lorsque l'amplitude du signal de tachymètre dépasse le niveau de tension de référence du comparateur, la sortie du circuit de mise en forme à diode produit un signal de référence, indiquant la pale de référence, pour aider au calcul de la position correspondant à l'amplitude de crête du déséquilibre.

Dans le second type de signal de tachymètre, produisant une impulsion "manquante" ou d'amplitude inférieure, qui

indique la position de la pale de référence, on peut déterminer la position de la pale de référence par un circuit similaire comprenant un détecteur de crête, un comparateur, un circuit de mise en forme à diode et une interface de microprocesseur. L'interface de microprocesseur est nécessaire dans ce cas pour déterminer de façon logique la position de la pale de référence. La fonction du circuit de mise en forme de tachymètre linéaire, du détecteur de crête et du circuit de mise en forme à diode est exactement la même que celle exposée précédemment.

Une fois que la validité des données a été contrôlée, le microprocesseur 14 manipule le retard ou l'avance de phase produits par des circuits électriques ou une structure de montage mécanique. Le microprocesseur 14 peut consulter une table pour déterminer un facteur de correction pour la phase, en fonction de la vitesse du rotor.

Une table de correction de phase caractéristique est présentée en annexe pour des vitesses de rotor entre 40 Hz et 63,5 Hz.

Une fois que les données correctes ont été obtenues à partir de toutes les manipulations ci-dessus, les données sont comparées avec des mesures précédentes pour vérifier que le maximum et le minimum se répètent dans une plage de 20°. Si on trouve que les nouvelles données, corrigées, ne sont pas dans une plage de 20°, on rejette toutes les mesures précédentes et le système répète toutes les mesures.

Pour déterminer la position du déséquilibre, on charge dans le circuit de définition de temps n°1, 30, un nombre représentant 360°, ou un tour. La sortie du circuit de définition de temps n°2, 32, produit des impulsions d'horloge qui décrémentent le circuit de définition de temps n°1, 30. L'horloge pour le circuit de définition de temps n°1, 30, est fonction de la vitesse du rotor. L'horloge du circuit de définition de temps n°1, 30, doit être produite avec une cadence telle qu'un tour corresponde à un compte de 360° dans le circuit de définition de temps n°1, 30. Si, dans l'exemple considéré, la

vitesse du rotor est de 50 Hz, la période correspondant à un seul tour est de 20 millisecondes, ou 20 000 microsecondes. L'horloge du circuit de définition de temps n°1, 30, doit avoir une période de 20 000/360 pour des intervalles de 1°, ou de 20 000/180 pour des intervalles de 2°. La période d'horloge est de 55,5 microsecondes par degré, ou 111,1 microsecondes pour des intervalles de deux degrés. Dans ce mode de fonctionnement, l'horloge pour le circuit de définition de temps n°2, 32, fonctionne à une fréquence de 1,25 MHz, soit 0,8 microseconde pour chaque impulsion.

Du fait qu'à une vitesse de rotation de 50 Hz, un compte de 1388,9 produit une fréquence d'échantillonnage appropriée, qui est d'un échantillon par incrément de 20°, on peut utiliser le même nombre avec le circuit de définition de temps n°2, 32, pour déterminer l'angle auquel un maximum ou un minimum est détecté.

Le microprocesseur 14 compare des échantillons d'amplitude de déséquilibre avec la valeur de référence prédéterminée dès qu'une impulsion de référence est produite, ce qui indique que la pale de référence vient d'être détectée. On utilise la valeur moyenne du déséquilibre pour déterminer la valeur de référence prédéterminée pour la comparaison des échantillons. On détermine cette valeur de la façon suivante :

Valeur moyenne = X

Valeur de référence prédéterminée = 90 % de 1,57 x X, 1,57 étant la constante qu'on utilise pour déterminer la valeur de crête à partir de la valeur moyenne.

Une fois que le microprocesseur 14 a déterminé qu'un échantillon d'entrée donné quelconque est supérieur à la valeur de référence prédéterminée, il obtient une mesure de position à partir du circuit de définition de temps n°2, 32, qui enregistre la position angulaire. On peut voir que, théoriquement, la meilleure résolution que permet d'atteindre le circuit de définition de temps n°2, 32, est de 20°, avec une cadence d'échantillonnage de 18 échantillons par cycle.

Cependant, si on calcule une moyenne en utilisant la procédure ci-dessus pour déterminer la position, on peut obtenir une excellente précision pour 8 mesures ou plus. Ceci est dû à la nature asynchrone des échantillons de données, par rapport à la position de la pale de référence ou du signal de référence. En pratique, on peut obtenir une précision supérieure à 4° sur un rotor à 60 pales et, du fait que les pales sont séparées de 6°, une précision de 4° doit convenir pour un réglage d'équilibrage à effectuer sur une ou plusieurs pales.

Il y a un facteur, à savoir la vitesse du rotor, qui doit être considéré ici et qui peut affecter la précision du système global. On a supposé dans tout l'exposé ci-dessus que la vitesse du rotor ne change pas pendant la durée du calcul. Le microprocesseur 14 protège le système contre la génération de données erronées en mesurant la vitesse du rotor et en enregistrant par exemple la période de rotation à la fois avant et après la détermination de l'information de déséquilibre. Selon une variante, on pourrait obtenir la vitesse du rotor en fonction du signal de sortie de tachymètre pour un intervalle prédéterminé, cette vitesse étant mesurée à la fois avant et après les calculs de déséquilibre. Si on trouve que la vitesse du rotor n'est pas dans des limites de tolérance acceptables, on rejette toutes les données et on répète le processus de mesure.

On vient ainsi de décrire un procédé et un appareil pour quantifier le déséquilibre dans une machine tournante et pour déterminer la valeur et la position de masses compensatrices destinées à atténuer la condition de déséquilibre. Un accéléromètre signale la vibration d'une machine tournante et, en association avec un tachymètre, on traite les signaux d'accéléromètre, on les échantillonne et on les fait passer par un filtre numérique non récursif du type à poursuite qui isole les vibrations qui apparaissent à la fréquence de rotation.

On détermine et on enregistre la valeur de la vibration due au déséquilibre. Dans une opération suivante, on dé-

termine le point de vibration maximale, par rapport à un point de référence. On peut enregistrer la position, exprimée en degrés de rotation. On modifie la valeur de position par des corrections de phase qui sont nécessitées par le filtre numérique et par les réseaux électroniques de saisie de signal, ce qui permet de déterminer la valeur et la position du point de déséquilibre maximal. Il est alors relativement simple de déterminer la valeur et la position d'une masse d'équilibrage de valeur appropriée qui, lorsqu'elle est installée à la position appropriée, corrige la condition de déséquilibre.

Pendant l'opération, on surveille étroitement la fréquence de la machine tournante. Si la fréquence change au cours d'une mesure, on invalide les résultats et on répète le cycle de mesure. On peut utiliser le système avec des données d'accélération ou, après modification appropriée des signaux d'accéléromètre, avec des signaux représentant une vitesse ou un déplacement. En outre, si plusieurs accéléromètres sont disponibles pour l'analyse de vibration, on peut déterminer et enregistrer la valeur et la position du déséquilibre déterminées à partir de chacun des capteurs.

On peut prépositionner des constantes prédéterminées dans une série de compteurs, de façon à définir des intervalles d'échantillonnage précis qui sont des fractions d'un cycle de rotation. D'autres constantes prépositionnées dans les compteurs permettent de générer d'autres signaux qui ont une relation prédéterminée avec la fréquence de rotation réelle d'un moteur.

Il va de soi que de nombreuses autres modifications peuvent être apportées par l'homme de l'art au dispositif et au procédé décrits et représentés, sans sortir du cadre de l'invention.

A N N E X E

TABLE DE CORRECTION DE PHASE

PHASE	FREQUENCE
(176°)	65,3 Hz
(178°)	64,8 Hz
(178°)	64,2 Hz
(180°)	63,6 Hz
(182°)	63,1 Hz
(182°)	63,6 Hz
(184°)	62 Hz
(186°)	61,5 Hz
(186°)	61 Hz
(188°)	60,5 Hz
(190°)	60 Hz
(192°)	59,51 Hz
(194°)	59 Hz
(196°)	58,51 Hz
(198°)	58 Hz
(198°)	57,54 Hz
(200°)	57,07 Hz
(202°)	56,6 Hz
(204°)	56,15 Hz
(204°)	55,7 Hz
(206°)	55,25 Hz
(208°)	54,81 Hz
(208°)	54,4 Hz
(210°)	53,96 Hz
(212°)	53,54 Hz
(212°)	53,15 Hz
(214°)	52,73 Hz
(216°)	52,3 Hz
(218°)	51,94 Hz
(220°)	51,56 Hz
(220°)	51,18 Hz
(222°)	50,8 Hz

	PHASE	FREQUENCE
	(224°)	50,44 Hz
	(224°)	50,07 Hz
	(226°)	49,71 Hz
5	(228°)	49,36 Hz
	(228°)	49,01 Hz
	(230°)	48,67 Hz
	(232°)	48,33 Hz
	(232°)	47,99 Hz
10	(234°)	47,67 Hz
	(234°)	47,34 Hz
	(236°)	47,02 Hz
	(238°)	46,7 Hz
	(238°)	46,4 Hz
15	(240°)	46,1 Hz
	(242°)	45,8 Hz
	(244°)	45,48 Hz
	(244°)	45,2 Hz
	(246°)	44,89 Hz
20	(246°)	44,6 Hz
	(248°)	44,32 Hz
	(250°)	44,04 Hz
	(250°)	43,76 Hz
	(252°)	43,5 Hz
25	(254°)	43,21 Hz
	(254°)	42,95 Hz
	(256°)	42,69 Hz
	(258°)	42,42 Hz
	(258°)	42,17 Hz
30	(260°)	41,91 Hz
	(262°)	41,66 Hz
	(262°)	41,4 Hz
	(264°)	41,2 Hz
	(264°)	40,9 Hz
35	(266°)	40,7 Hz

PHASE	FREQUENCE
(266°)	40,45 Hz
(268°)	40,21 Hz
(270°)	40,00 Hz

REVENDICATIONS

1. Appareil destiné à permettre l'équilibrage d'un organe tournant d'une machine complexe, caractérisé en ce qu'il comprend : (a) des moyens à transducteurs (ACC.1 - ACC.4) destinés à détecter une condition de déséquilibre dans l'organe tournant et à produire un signal correspondant ; (b) des moyens de génération de signal accouplés à l'organe tournant pour produire un signal représentant sa fréquence de rotation ; (c) des moyens d'échantillonnage (12) connectés aux moyens de génération de signal de façon à générer un nombre prédéterminé d'impulsions d'échantillonnage pendant chaque tour de la machine tournante ; et (d) des moyens de saisie de données (16, 18) connectés aux moyens à transducteurs(ACC.1 - ACC.4) et aux moyens d'échantillonnage (12) qui fonctionnent sous la dépendance d'impulsions d'échantillonnage en produisant le nombre prédéterminé d'échantillons de données à chaque tour, ces moyens de saisie de données comprenant des moyens (48) destinés à convertir les signaux de transducteur sous forme numérique, et des moyens de filtrage numérique (18) destinés à produire des signaux représentatifs de la valeur d'un paramètre de déséquilibre de l'organe tournant ; grâce à quoi il est possible de contrôler un organe tournant déséquilibré, pendant son fonctionnement, pour déterminer la valeur du déséquilibre.

2. Appareil selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens de détermination de valeur (14) qui sont connectés aux moyens de saisie de données (16, 18) dans le but d'indiquer la valeur d'une masse qui est appropriée pour équilibrer l'organe tournant.

3. Appareil selon la revendication 2, caractérisé en ce que les moyens de génération de signal comprennent des moyens destinés à indiquer une position de référence sur l'organe tournant, cet appareil comprenant en outre (e) des moyens de détermination de position connectés aux moyens de saisie de données (16, 18), aux moyens d'échantillonnage (12) et aux moyens de génération de signal dans le but de faire correspon-

dre des signaux représentant un déséquilibre maximal avec une position sur l'organe tournant.

4. Appareil selon la revendication 3, caractérisé en ce que les moyens de détermination de valeur (14) indiquent à la fois la valeur de la masse appropriée pour équilibrer l'organe tournant, et la position d'une telle masse par rapport à la position de référence pour parvenir à une condition d'équilibre.

5. Appareil pour mesurer la valeur et la position d'un déséquilibre produisant une vibration dans une machine tournante, combiné avec des moyens à transducteurs (ACC.1 - ACC.4) destinés à détecter la vibration d'un organe tournant d'une machine complexe et à produire un signal correspondant, et avec des moyens à tachymètre destinés à produire un signal représentatif de la fréquence de rotation de l'organe tournant, caractérisé en ce qu'il comprend : (a) des moyens d'échantillonnage (12) connectés aux moyens à tachymètre de façon à produire un nombre prédéterminé d'impulsions d'échantillonnage par tour de l'organe tournant ; (b) des moyens de saisie de données (16, 18) connectés aux moyens d'échantillonnage (12) et aux moyens à transducteurs (ACC.1 - ACC.4), comprenant des moyens de numérisation (48) et des moyens de filtrage numériques (18), dans le but de produire des signaux représentatifs de la valeur de la vibration produite par un déséquilibre ; et (c) des moyens de détermination de position (14) comprenant des moyens de référence associés à la machine tournante et connectés aux moyens de saisie de données (16, 18) de façon à indiquer la position du point de déséquilibre maximal par rapport à une position de référence ; grâce à quoi on peut déterminer la valeur et la position d'une masse compensatrice destinée à corriger la condition de déséquilibre.

6. Appareil selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens d'enregistrement et de comparaison (14) connectés aux moyens de saisie de données (16, 18), dans le but d'enregistrer une valeur maximale de dé-

séquilibre, comprenant des moyens de traitement de données destinés à comparer une proportion prédéterminée des valeurs enregistrées avec des valeurs échantillonnées courantes, dans le but d'enregistrer une information de position concernant une valeur échantillonnée courante supérieure à la valeur enregistrée, ce qui permet de déterminer une position moyenne, au cours de cycles successifs.

7. Procédé de mesure et de localisation d'un déséquilibre dans une machine tournante, comprenant des moyens destinés à indiquer une position de référence, caractérisé en ce que : (a) on mesure un paramètre de vibration ; (b) on filtre le paramètre de vibration mesuré ; (c) on détermine la valeur maximale du paramètre filtré ; (d) on répète les mesures, en signalant les valeurs supérieures à un pourcentage prédéterminé du maximum mesuré précédemment ; (e) on mesure l'écart angulaire par rapport à un point de référence à l'instant correspondant à la valeur supérieure signalée ; (f) on accumule les valeurs supérieures signalées et on en fait la moyenne ; (g) on accumule les écarts angulaires mesurés et on en fait la moyenne ; et (h) on convertit la moyenne des valeurs supérieures en une valeur correspondante d'une masse d'équilibrage destinée à être fixée à la machine à une position sélectionnée, déterminée par la moyenne des écarts angulaires accumulés, par rapport aux repères de référence.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que le paramètre de vibration correspond à la vitesse, et en ce que le pourcentage prédéterminé est de 90 %.

9. Procédé de mesure et de localisation d'un déséquilibre dans une machine tournante comportant des moyens destinés à indiquer une position de référence, caractérisé en ce que : (a) on mesure la fréquence de rotation ; (b) on mesure un paramètre lié au déséquilibre ; (c) on filtre ce paramètre au moyen d'un filtre numérique non récursif du type à poursuite; (d) on détermine et on enregistre la valeur maximale du paramètre pendant un cycle de fonctionnement ; (e) on signale les

valeurs du paramètre supérieures à 75 % du maximum mesuré, et l'écart angulaire par rapport au repère de référence correspondant, dans un cycle suivant ; (f) on enregistre la valeur d'écart angulaire ; (g) on répète les opérations (e) et (f) pour un nombre prédéterminé d'échantillons ; (h) on fait la moyenne des valeurs d'écart angulaire par rapport au repère de référence pour le nombre prédéterminé de mesures successives ; (i) on fait la moyenne de valeurs de paramètres signalées successives pour le nombre prédéterminé d'échantillons ; (j) on fait correspondre la valeur maximale moyenne du paramètre avec une valeur de masse d'équilibrage ; et (k) on place une masse d'équilibrage de valeur correspondante sur la machine, à une position qui correspond à l'écart angulaire moyen mesuré par rapport au repère de référence ; grâce à quoi l'application de la masse d'équilibrage de valeur appropriée à la position appropriée corrige pratiquement la condition de déséquilibre.

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que le paramètre est l'accélération, et en ce qu'il comprend en outre les opérations consistant à intégrer l'accélération mesurée pour obtenir des signaux représentant la vitesse, et à corriger ladite position pour tenir compte de déphasages qui sont introduits dans le processus de mesure et dans l'équipement de saisie et de traitement de données.

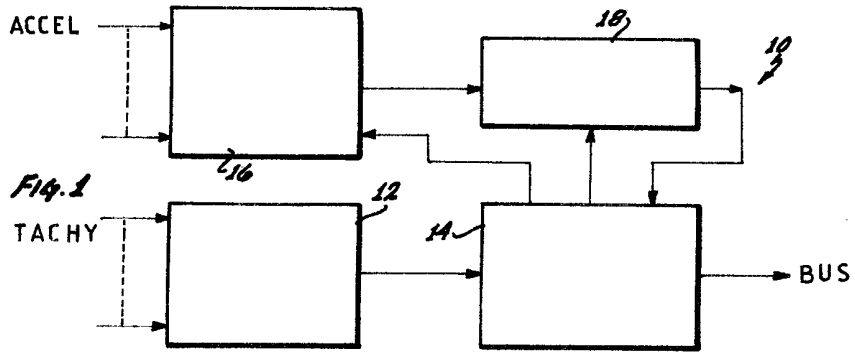


Fig. 1

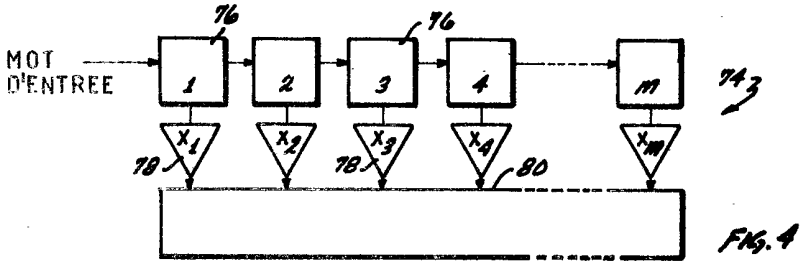


Fig. 4

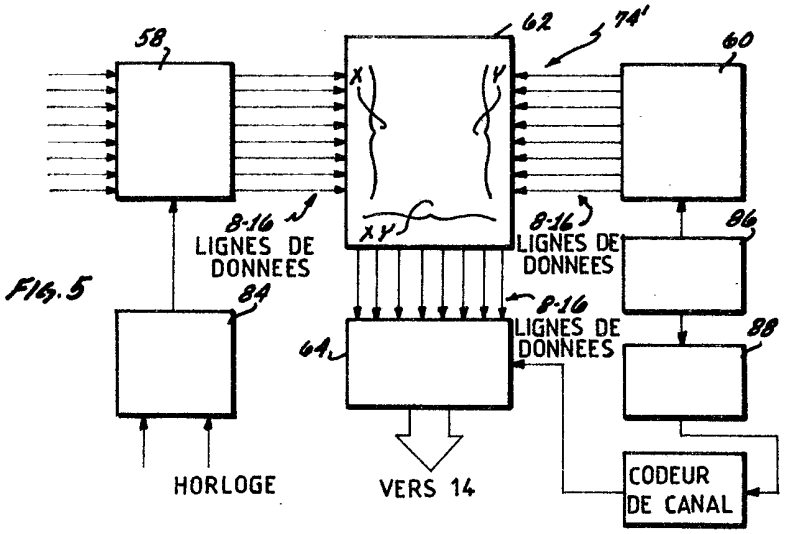


Fig. 5

2551209

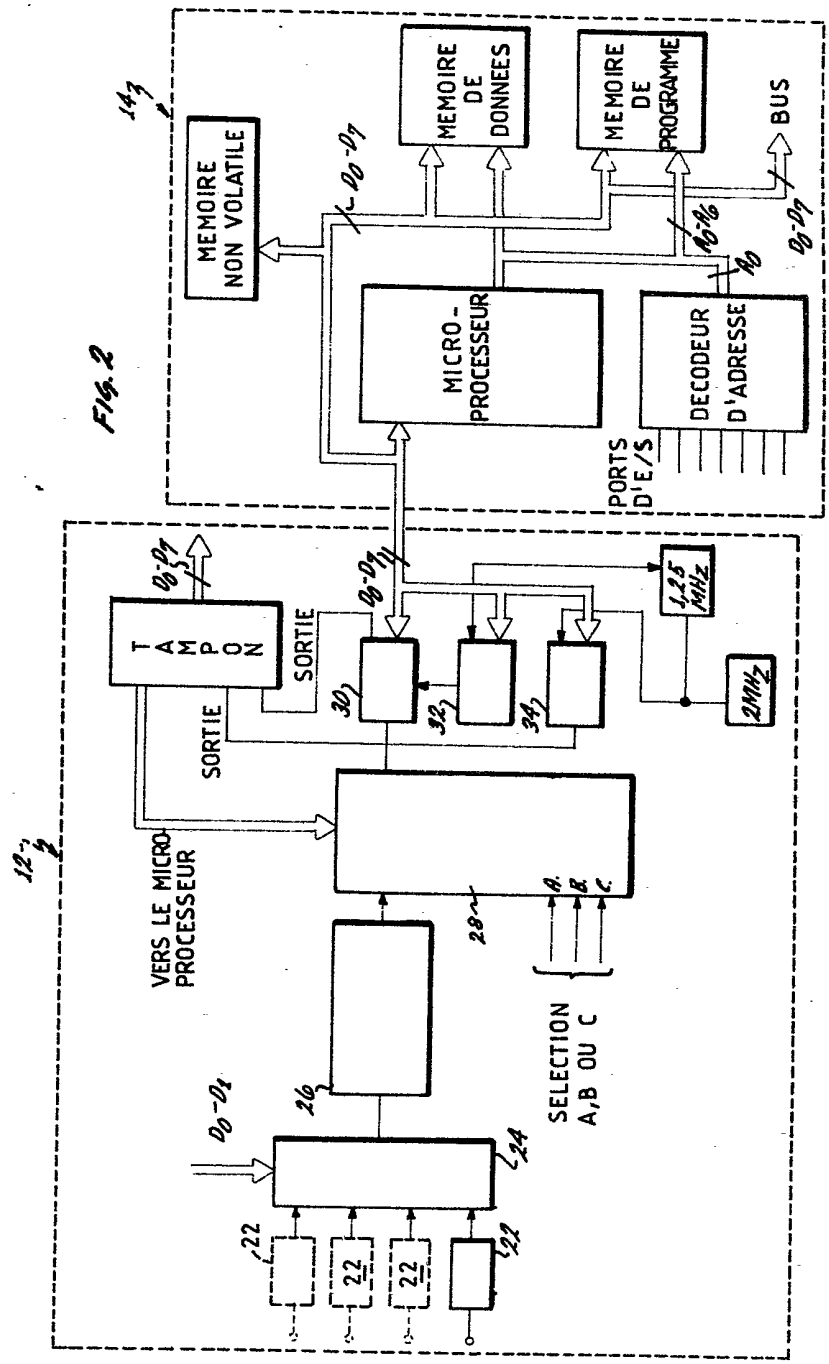


FIG. 2

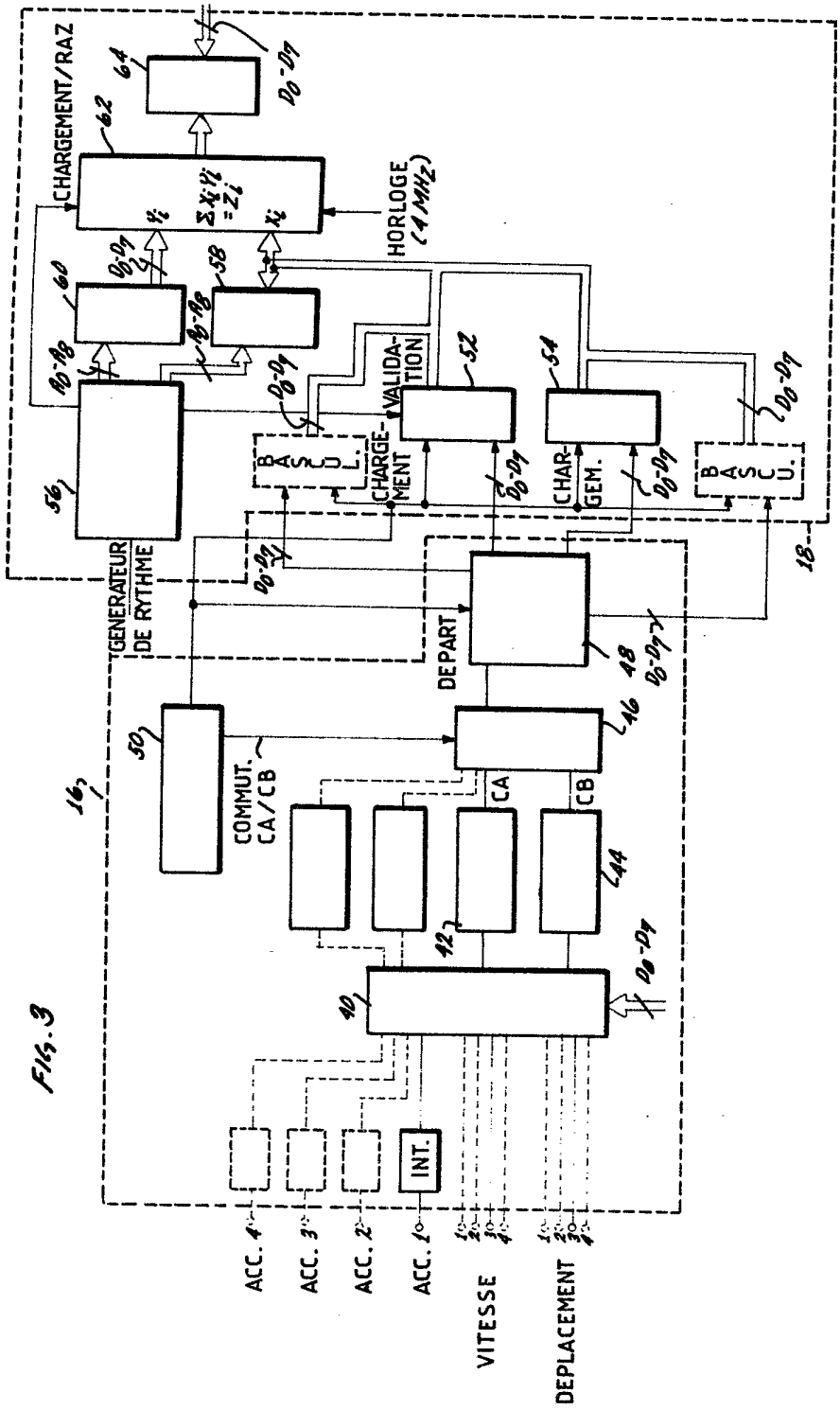

CHARGEMENT/RAZ
HORLOGE (4 MHz)
VALIDATION
CHARGEMENT
CHARGEM.
BASCU.
GENERATEUR DE RYTHME
DEPART
COMMUT. CA/CB
CA
CB
INT.
ACC. 4
ACC. 3
ACC. 2
ACC. 1
VITESSE
DEPLACEMENT

FIG. 3