



0 253 153  
A1

12

⑤ Int. Cl.4: **G04C 3/14**

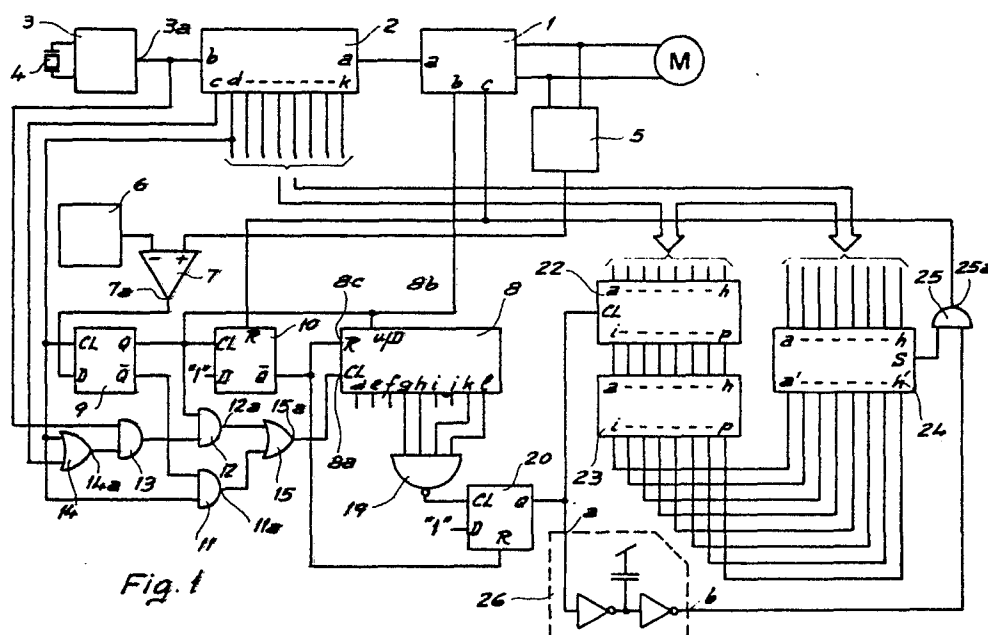
⑦1 Demandeur: **ASULAB S.A.**  
Faubourg du Lac 6  
CH-2501 Bienne(CH)

72 Inventeur: Daho, Taghezout  
Chemin des Bossons 3  
Ch-1018 Lausanne(CH)

74 Mandataire: de Montmollin, Henri et al  
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA  
Passage Max. Meuron 6  
CH-2001 Neuchâtel(CH)

<sup>(57)</sup> Le procédé comporte la mesure de la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  convertie en énergie mécanique par le moteur pendant une impulsion motrice, la détermination du temps mis par cette quantité d'énergie  $E_{me}$  pour atteindre une valeur de référence  $E_{ref}$ , et l'interruption de l'impulsion motrice en dépendance de ce temps.

Le dispositif comporte des moyens (5 à 15) pour mesurer cette quantité d'énergie  $E_{me}$ , des moyens (19, 20, 22) pour déterminer le temps mis par cette quantité d'énergie pour atteindre cette valeur de référence  $E_{ref}$ , et des moyens (23 à 26) pour provoquer l'interruption de l'impulsion motrice en dépendance de ce temps.



**EP 0 253 153 A1**

**PROCEDE ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN MOTEUR PAS A PAS**

Un objet de la présente invention est un procédé de commande d'un moteur pas à pas comprenant une bobine et un rotor couplé magnétiquement à ladite bobine, ledit procédé comportant l'application à ladite bobine d'une impulsion motrice chaque fois que ledit rotor doit tourner d'un pas.

Un autre objet de la présente invention est un dispositif de commande mettant en oeuvre ce procédé.

5 Il existe de nombreux procédés destinés à diminuer la consommation d'un moteur pas à pas en ajustant la quantité d'énergie électrique fournie au moteur pendant une impulsion motrice au couple résistant que le rotor doit vaincre. Ce couple ne pouvant pas être mesuré directement, ces procédés ajustent en fait cette quantité d'énergie électrique en fonction de la mesure ou du calcul d'une grandeur physique dont la valeur ou la variation en fonction du temps dépend plus ou moins directement de ce couple.

10 La détermination du couple résistant appliqué au rotor pendant une impulsion motrice peut être faite après la fin de cette impulsion comme, par exemple, dans le brevet US-A-4 212 156. Dans ce brevet, la variation du courant induit dans la bobine du moteur par les oscillations du rotor après la fin d'une impulsion motrice est prise comme mesure de ce couple, et la durée des impulsions motrices suivantes est modifiée, le cas échéant, en fonction du résultat de cette mesure.

15 La détermination du couple résistant appliqué au rotor peut également être faite pendant chaque impulsion motrice comme, par exemple, dans la demande de brevet EP-A-O 060 806. Dans cette demande, c'est la vitesse de variation de la tension induite dans la bobine du moteur par la rotation du rotor qui est prise comme mesure de ce couple.

20 Ces procédés, ainsi que les nombreux autres qui ne peuvent pas être mentionnés ici, présentent tous l'inconvénient que la grandeur physique qu'ils utilisent comme mesure du couple résistant n'est pas vraiment représentative de ce couple.

Il en résulte que la commande d'un moteur pas à pas selon l'un quelconque des procédés connus ne peut pratiquement pas être optimale. Cela signifie que si le dispositif mettant en oeuvre le procédé choisi est agencé de manière que le moteur fonctionne correctement dans toutes les situations possibles, la consommation de ce moteur sera généralement assez nettement supérieure à sa consommation théorique minimale. Si on essaye de modifier les caractéristiques du circuit de commande de manière que la consommation du moteur diminue et se rapproche de son minimum théorique, alors la sécurité de fonctionnement de ce moteur diminue, c'est-à-dire que son rotor ne tourne plus correctement en réponse à chaque impulsion motrice.

Il est parfois nécessaire d'envoyer à un moteur pas à pas une impulsion motrice telle qu'elle provoque à coup sûr la rotation du rotor, même si le couple résistant appliqué à ce dernier a sa valeur maximale.

Ce cas se présente notamment lorsque le moteur est commandé selon un procédé tel que celui qui est décrit dans le brevet US-A-4 272 837 par exemple.

35 Un tel procédé consiste notamment à appliquer au moteur une impulsion de longue durée, dite impulsion de rattrapage, lorsqu'un circuit adéquat a détecté que son rotor n'a pas tourné en réponse à une impulsion motrice normale, de faible durée.

La durée de l'impulsion de rattrapage est évidemment déterminée de manière qu'elle provoque la rotation du rotor même si le couple résistant appliqué à ce dernier a sa valeur maximale.

40 Mais il peut se produire que la cause d'une non-rotation du rotor en réponse à une impulsion motrice normale ne soit que momentanée, et que le couple appliqué au rotor pendant l'impulsion de rattrapage suivante soit faible. Dans un tel cas, la quantité d'énergie électrique fournie au moteur pendant cette impulsion de rattrapage est beaucoup trop élevée, et il est possible que le rotor du moteur fasse plusieurs pas, au lieu d'un seul, en réponse à cette impulsion de rattrapage.

45 La détection de la rotation ou de la non-rotation du rotor qui est nécessaire dans les procédés de commande qui viennent d'être mentionnés peut être faite de diverses manières.

Ainsi, par exemple, dans le procédé décrit dans le brevet US-A-4 272 837 mentionné ci-dessus, cette détection est réalisée en appliquant au moteur pas à pas une impulsion de détection très courte un certain temps après la fin de chaque impulsion motrice. L'amplitude du courant qui circule dans la bobine du moteur à la fin de cette impulsion de détection permet de déterminer si le rotor a tourné ou non en réponse à l'impulsion motrice précédente.

La différence entre les courants circulant dans la bobine dans l'un et l'autre cas, rotation ou non-rotation du rotor, est cependant faible, ce qui rend difficile une détection sûre de cette non-rotation. En outre, la mesure du courant peut être faussée si le rotor est en mouvement lorsque l'impulsion de détection est appliquée au moteur, soit parce que ce rotor n'a pas encore fini d'osciller autour de sa position d'équilibre, soit parce qu'il a été remis en mouvement, par exemple par un choc.

Il existe d'autres procédés permettant de détecter si le rotor du moteur pas à pas a tourné ou non en réponse à une impulsion motrice. Ces procédés ne seront pas décrits ici, sinon pour relever qu'ils présentent généralement les mêmes inconvénients que le procédé décrit ci-dessus.

Un but de la présente invention est de proposer un procédé de commande d'un moteur pas à pas qui ne présente pas les inconvénients des procédés mentionnés ci-dessus et qui permet, selon la manière dont il est mis en oeuvre, de réduire la consommation du moteur pas à pas pratiquement jusqu'à son minimum absolu, ou de faire tourner le rotor du moteur d'un pas et d'un seul, avec une grande sécurité, et quel que soit le couple résistant appliqué à ce rotor, ou de permettre une détection sûre de la rotation ou de la non-rotation de ce rotor en réponse à une impulsion motrice.

Un autre but de la présente invention est de proposer un dispositif pour la mise en oeuvre de ce procédé.

Ces buts sont respectivement atteints par le procédé et le dispositif revendiqués.

L'invention va être décrite ci-après à l'aide du dessin annexé dans lequel:

-la figure 1 représente le schéma d'un circuit qui met en oeuvre le procédé selon l'invention pour ajuster la durée des impulsions motrices en fonction du couple résistant appliqué au rotor du moteur;

-la figure 2 est un diagramme illustrant le fonctionnement d'une partie du circuit de la figure 1;

-la figure 3 représente la variation de la consommation d'un moteur pas à pas commandé par le circuit de la figure 1 en fonction du courant de référence, pour plusieurs couples résistants appliqués au rotor;

-la figure 4 représente la variation de la durée optimale de l'impulsion en fonction du courant de référence, pour plusieurs couples résistants appliqués au rotor;

-la figure 5 représente la relation entre le temps mis par la quantité d'énergie  $E_{me}$  pour atteindre la valeur de référence  $E_{ref}$  et la durée optimale de l'impulsion motrice;

-la figure 6 est un diagramme illustrant le fonctionnement d'une autre partie du circuit de la figure 1;

-la figure 7 représente une autre forme d'exécution d'un circuit de mise en oeuvre du procédé selon l'invention;

-la figure 8 est un diagramme illustrant le fonctionnement du circuit de la figure 7;

-la figure 9 représente le schéma d'un circuit qui peut être associé au circuit de la figure 1 pour déterminer si le rotor du moteur tourne correctement ou non en réponse à une impulsion motrice; et

-les figures 10a et 10b sont des diagrammes illustrant le fonctionnement du circuit de la figure 9.

D'une façon générale, on sait que le rotor d'un moteur pas à pas est soumis en permanence à un couple résistant  $T_r$  qui s'oppose à la rotation de ce rotor.

Ce couple résistant  $T_r$  est produit par les couples de frottement du rotor lui-même et des éléments mécaniques qu'il entraîne dans leurs paliers et entre eux, par les courants de Foucault et les phénomènes d'hystérèse qui sont produits dans le stator du moteur par les variations du champ magnétique qui traverse ce stator, et par le couple de positionnement du rotor, tant que ce rotor n'a pas dépassé la position angulaire d'équilibre instable où ce couple de positionnement devient un couple moteur.

Ce couple résistant  $T_r$  est donc variable en fonction du temps de manière aléatoire, et il peut prendre n'importe quelle valeur entre une valeur minimale  $T_{r_{min}}$  et une valeur maximale  $T_{r_{max}}$  qui dépendent toutes deux des caractéristiques du moteur et des éléments mécaniques qu'il entraîne et qui peuvent être déterminées analytiquement ou par des essais.

A chaque valeur de ce couple résistant  $T_r$  correspond une quantité d'énergie mécanique  $E_{mm}$  qui est celle que le moteur doit fournir, au minimum, pour que son rotor tourne d'un pas. Notamment, aux valeurs  $T_{r_{min}}$  et  $T_{r_{max}}$  de ce couple résistant correspondent respectivement des valeurs  $E_{mm_{min}}$  et  $E_{mm_{max}}$  de cette quantité d'énergie. Ce couple résistant  $T_r$  et cette quantité d'énergie  $E_{mm}$  sont liés par une relation mathématique qui ne sera pas donnée ici car elle est bien connue des spécialistes et n'a en outre pas de rapport direct avec l'invention.

D'autre part, on sait également que l'énergie électrique  $E_{p_{ox}}$  fournie par la source d'alimentation du moteur entre le début d'une impulsion motrice situé à un instant  $t_0$  et un instant quelconque  $t_x$  vérifie l'équation suivante:

$$E_{p_{ox}} = E_{me_{ox}} + E_{j_{ox}} + E_{ma_{ox}} \quad (1)$$

dans laquelle:

- $E_{me_{0x}}$  est la partie de l'énergie électrique  $E_{p_{0x}}$  qui a été convertie en énergie mécanique par le moteur et transmise par celui-ci à la charge qu'il entraîne entre les instants  $t_0$  et  $t_x$ ;

- $E_{j_{0x}}$  est la partie de cette énergie  $E_{p_{0x}}$  qui a été dissipée par effet Joule dans la bobine du moteur et dans son circuit de commande entre ces instants  $t_0$  et  $t_x$ ; et

5 - $E_{ma_{0x}}$  est la partie de l'énergie  $E_{p_{0x}}$  qui a été utilisée pour créer l'énergie magnétique présente dans le moteur à l'instant  $t_x$ .

Il faut noter que, comme ci-dessus, les indices affectant éventuellement les symboles des diverses énergies mentionnées dans la suite de cette description seront toujours formés de deux caractères qui seront respectivement identiques aux indices affectant les symboles des instants entre lesquels l'énergie  
10 considérée est produite ou dissipée.

Pendant une impulsion motrice commençant à un instant  $t_0$  et se terminant à un instant  $t_n$ , l'énergie électrique  $E_{me_{0n}}$  convertie en énergie mécanique par le moteur est utilisée pour vaincre le couple résistant  $Tr$  mentionné ci-dessus et pour fournir aux divers éléments mécaniques entraînés par le rotor et au rotor lui-même leur énergie cinétique.

15 Après la fin de l'impulsion motrice, la source d'alimentation du moteur ne fournit évidemment plus d'énergie électrique.

Si la quantité d'énergie  $E_{me_{0n}}$  a été égale à la quantité d'énergie  $E_{mm}$  correspondant au couple  $Tr$  appliqué au rotor pendant cette impulsion motrice, le rotor termine son pas, après la fin de l'impulsion motrice, en réponse à une énergie mécanique provenant de la reconversion de l'énergie cinétique des  
20 divers éléments mobiles, du couple de positionnement du rotor lorsque ce couple est un couple moteur, et, si la bobine est mise en court-circuit dès la fin de l'impulsion motrice, de la reconversion d'une partie de l'énergie magnétique  $E_{ma}$  emmagasinée dans le moteur à l'instant  $t_n$ . Le reste de cette énergie magnétique  $E_{ma}$  est dissipé par effet Joule dans la bobine du moteur. Dans ce cas, la durée de l'impulsion motrice a été optimale, et la consommation du moteur a été minimale. Cette durée optimale de l'impulsion  
25 motrice sera appelée  $\tau$  dans la suite de cette description.

Si la quantité d'énergie  $E_{me_{0n}}$  a été supérieure à la quantité d'énergie  $E_{mm}$ , c'est-à-dire si la durée de l'impulsion motrice a été supérieure à la durée optimale  $\tau$ , le rotor dépasse sa position finale et effectue une ou plusieurs oscillations autour de celle-ci. Pendant ces oscillations, la différence entre les quantités  
30 d'énergie  $E_{me_{0n}}$  et  $E_{mm}$  est convertie en énergie thermique par effet Joule dans la bobine du moteur et par les différents frottements mentionnés ci-dessus. Si cette différence est importante, le rotor peut même effectuer plus d'un pas en réponse à cette quantité d'énergie  $E_{me_{0n}}$ .

Si la quantité d'énergie  $E_{me_{0n}}$  a été inférieure à la quantité d'énergie  $E_{mm}$ , le rotor ne termine pas son pas et revient à sa position de départ en réponse à son couple de positionnement, ou, dans certains cas, reste bloqué dans une position intermédiaire.

35 Si l'on désire commander le moteur de manière que son rotor fasse certainement un pas en réponse à une impulsion motrice même si le couple résistant  $Tr$  a sa valeur maximale  $Tr_{max}$ , on voit qu'il suffit de mesurer en permanence la quantité d'énergie  $E_{me}$  que le moteur convertit en énergie mécanique, et d'interrompre l'impulsion motrice lorsque cette quantité d'énergie  $E_{me}$  devient égale à la quantité d'énergie  $E_{mm_{max}}$  correspondant à ce couple résistant maximal  $Tr_{max}$ .

40 Par contre, si l'on désire commander le moteur de manière que sa consommation soit aussi faible que possible, la simple mesure de la quantité d'énergie  $E_{me}$  ne permet pas d'interrompre l'impulsion motrice à l'instant le plus adéquat.

En effet, la quantité d'énergie électrique  $E_{me_{0x}}$  que le moteur convertit en énergie mécanique entre le début d'une impulsion motrice et un instant  $t_x$  quelconque ne dépend absolument pas du couple résistant  
45  $Tr$  qui s'oppose la rotation du rotor, mais uniquement des caractéristiques électriques et magnétiques du moteur lui-même et des caractéristiques de son circuit de commande.

Des considérations théoriques qui ne seront pas reproduites ici et qui ont été vérifiées et confirmées par des essais pratiques ont montré que, par contre, la variation en fonction du temps de la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  convertie en énergie mécanique par le moteur est directement dépendante du  
50 couple résistant  $Tr$ .

Plus précisément, l'accroissement de cette énergie  $E_{me}$  est d'autant plus rapide que ce couple  $Tr$  est faible.

Par conséquent, le temps  $T$  mis par cette énergie  $E_{me}$  pour atteindre une valeur de référence prédéterminée est une très bonne mesure du couple résistant  $Tr$ .

55 Il a en outre été constaté que la durée optimale  $\tau$  de l'impulsion motrice dépend directement du temps  $T$  mentionné ci-dessus. Cette durée optimale  $\tau$  est bien entendu égale ou supérieure à ce temps  $T$  et la relation qui la lie à ce temps  $T$  peut être déterminée analytiquement en connaissant les caractéristiques du moteur et de la charge qu'il entraîne, ou par des essais.

La mesure du temps T permet donc, à l'aide de cette relation, de déterminer la durée optimale  $\tau$  de l'impulsion motrice.

Le même principe peut être utilisé pour déterminer si le rotor du moteur a tourné correctement ou non en réponse à une impulsion motrice. En effet, si la quantité d'énergie  $E_{me}$  convertie par le moteur atteint une valeur prédéterminée avant qu'un temps également prédéterminé ne se soit écoulé, cela signifie que le rotor a correctement fait son pas. Si cette quantité d'énergie  $E_{me}$  n'atteint pas cette valeur prédéterminée dans ce temps, cela signifie que le rotor n'a pas tourné.

On voit que la mesure de la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  qui est convertie en énergie mécanique par le moteur peut servir de base, d'une manière qui sera précisée plus loin, pour commander efficacement ce moteur dans tous les cas mentionnés ci-dessus.

De l'équation (1) ci-dessus, on tire facilement que:

$$E_{me0x} = E_{p0x} - E_{j0x} - E_{ma0x} \quad (2)$$

On sait en outre que:

$$E_{p0x} = \int_{t_0}^{t_x} U \cdot i_s(t) \cdot dt \quad (3)$$

$$E_{j0x} = \int_{t_0}^{t_x} R \cdot i_m(t)^2 \cdot dt \quad (4)$$

$$E_{ma0x} = \int_{t_0}^{t_x} L \cdot i_m(t) \cdot \frac{di_m}{dt} \cdot dt \quad (5)$$

dans lesquelles:

-U est la tension de la source d'alimentation du moteur;

- $i_s(t)$  est le courant fourni par cette source;

- $i_m(t)$  est le courant circulant dans la bobine du moteur; et

-R et L sont respectivement la résistance et l'inductance de la bobine du moteur.

L'équation (2) ci-dessus peut donc s'écrire:

$$E_{me0x} = \int_{t_0}^{t_x} U \cdot i_s(t) \cdot dt - \int_{t_0}^{t_x} R \cdot i_m(t)^2 \cdot dt - \int_{t_0}^{t_x} L \cdot i_m(t) \cdot \frac{di_m}{dt} \cdot dt \quad (6)$$

Il est possible de concevoir un circuit électronique capable de fournir un signal représentatif de la quantité d'énergie  $E_{me0x}$ .

Ce circuit peut par exemple comporter des moyens pour produire des signaux proportionnels aux courants  $i_s$  et  $i_m$ , ainsi que des circuits analogiques ou numériques permettant de réaliser les diverses opérations de l'équation (6). Ce circuit n'est pas représenté car sa réalisation découle directement de l'équation (6).

La figure 1 représente notamment le schéma d'un exemple de circuit permettant également de fournir un signal représentatif de la quantité d'énergie  $E_{me0x}$ , dans un cas particulier où le moteur pas à pas est commandé de manière que le courant qui passe dans sa bobine soit sensiblement constant et égal à un courant de référence  $I_{ref}$  (voir la figure 2).

Dans le cas illustré par la figure 1, le moteur, désigné par la référence M, est alimenté par un circuit formateur d'impulsions motrices 1 qui ne sera pas décrit en détail ici car il peut être semblable à un circuit ayant la même fonction et qui est décrit dans la demande de brevet EP-A-O 057 663.

Ce circuit formateur 1 est agencé de manière à enclencher une impulsion motrice IM à chaque instant, désigné par  $t_0$  comme ci-dessus, où le rotor du moteur M doit tourner d'un pas, en réponse au passage de l'état logique "1" à l'état logique "0" d'un signal de commande qu'il reçoit sur son entrée 1a.

Dans cet exemple, ce signal de commande est formé par des impulsions périodiques ayant une fréquence de 1 Hz, qui sont fournies par une sortie 2a d'un diviseur de fréquence 2 dont l'entrée 2b est reliée à la sortie 3a d'un oscillateur 3 piloté par un quartz 4. Il est évident que, dans d'autres applications, le signal de commande appliqué à l'entrée 1a du formateur 1 peut ne pas être périodique.

Le signal de sortie de l'oscillateur 3 a une fréquence de 32768 Hz. Outre sa sortie 2a, le diviseur 2 comporte des sorties intermédiaires 2c à 2k délivrant des signaux ayant respectivement des fréquences de 16'384 Hz, 8'192 Hz, 4'096 Hz, 2'048 Hz, 1'024 Hz, 512 Hz, 256 Hz, 128 Hz et 64 Hz.

Ces circuits 2 et 3 ne seront pas décrits en détail ici, car ils sont classiques et bien connus des spécialistes.

Le circuit formateur 1 est agencé de manière à relier, à chaque instant  $t_0$ , la bobine du moteur M à une source d'alimentation en énergie électrique non représentée. A partir de cet instant  $t_0$ , la tension  $U_m$  aux bornes de la bobine du moteur M est donc égale à la tension U de cette source d'alimentation.

Le courant  $i_m$  qui commence à circuler dans la bobine à cet instant  $t_0$  (voir la figure 2) est mesuré par un circuit de mesure 5 qui produit une tension proportionnelle à ce courant  $i_m$ . Ce circuit de mesure 5 ne sera pas non plus décrit ici, car il peut être semblable à un circuit ayant la même fonction et qui est décrit dans la demande de brevet EP-A-O 057 663 déjà mentionnée.

Le circuit de la figure 1 comporte en outre une source 6 qui produit une tension proportionnelle au courant de référence  $I_{ref}$  mentionné ci-dessus.

Les rapports de proportionnalité entre le courant  $i_m$  et la tension produite par le circuit 5 d'une part, et entre le courant  $I_{ref}$  et la tension produite par la source 6 d'autre part sont identiques.

Les tensions produites par le circuit 5 et par la source 6 sont appliquées à un comparateur analogique 7, de type classique. Du fait que les rapports de proportionnalité mentionnés ci-dessus sont égaux, on peut dire que le comparateur 7 compare le courant  $i_m$  au courant  $I_{ref}$ .

Le comparateur 7 délivre à sa sortie 7a un signal qui prend l'état logique "1" lorsque le courant  $i_m$  est inférieur au courant  $I_{ref}$  et l'état logique "0" dans le cas contraire.

La sortie 7a du circuit comparateur 7 est reliée à l'entrée D d'une bascule 9 de type D dont l'entrée d'horloge CL reçoit le signal ayant une fréquence de 8'192 Hertz fourni par la sortie 2d du circuit diviseur 2 et qui, pour une raison qui sera rendue évidente par la suite de cette description, sera appelé signal d'échantillonnage. Les instants où ce signal d'échantillonnage passe de l'état logique "1" à l'état logique "0" seront appelés instants d'échantillonnage.

De manière classique, la sortie Q de la bascule 9 prend le même état que son entrée D à chaque passage de son entrée CL de l'état logique "1" à l'état logique "0". Il en est d'ailleurs de même pour les autres bascules de type D qui seront mentionnées ci-dessous.

Juste après l'instant  $t_0$ , le courant  $i_m$  est inférieur au courant  $I_{ref}$ . La sortie 7a du comparateur 7 et la sortie Q de la bascule 9 sont donc à l'état "1".

Lorsque le courant  $i_m$  devient supérieur au courant  $I_{ref}$ , la sortie 7a du comparateur 7 passe à l'état logique "0".

Au premier instant d'échantillonnage suivant ce passage de la sortie 7a du comparateur 7 à l'état "0", qui est désigné par la référence  $t_1$ , la sortie Q de la bascule 9 passe également à l'état "0".

Le circuit 1, dont une entrée 1b est reliée à la sortie Q de la bascule 9, est agencé de manière à répondre à cet état "0" de la sortie Q de la bascule 9 en déconnectant la bobine du moteur M de la source d'alimentation et en mettant cette bobine en court-circuit.

A partir de l'instant  $t_1$ , la tension  $U_m$  aux bornes de la bobine du moteur M est donc nulle, et le courant  $i_m$  commence à diminuer. Lorsqu'il devient inférieur au courant  $I_{ref}$ , la sortie 7a du comparateur 7 repasse à l'état "1". A l'instant d'échantillonnage suivant, la sortie Q de la bascule 9 passe donc également à l'état "1". En réponse à ce dernier état "1", le circuit 1 supprime le court-circuit de la bobine du moteur M et relie à nouveau cette bobine à la source d'alimentation. Le courant  $i_m$  recommence donc à augmenter, et le processus décrit ci-dessus recommence jusqu'à un instant désigné par  $t_n$  à la figure 2, où le circuit 1 reçoit sur une entrée 1c un signal d'interruption de l'impulsion motrice.

Ce signal d'interruption est constitué par le passage de l'état logique "0" à l'état logique "1" de la sortie d'un circuit qui sera décrit plus loin, sortie qui est bien entendu reliée à cette entrée 1c du formateur 1.

En réponse à ce signal d'interruption, le circuit 1 déconnecte la bobine du moteur M de la source d'alimentation et met cette bobine en court-circuit, de manière permanente, jusqu'à l'instant  $t_0$  suivant où tout le processus décrit ci-dessus recommence.

Il faut noter que, en réalité, la période  $\Delta$  du signal d'échantillonnage est courte par rapport aux temps de montée ou de descente du courant dans la bobine. Il en résulte que l'amplitude des dépassements de  $i_m$  de part et d'autre de  $i_{ref}$  est faible, et qu'on peut considérer que  $i_m$  est constant et égal à  $i_{ref}$  entre les instants  $t_1$  et  $t_n$ . Il en résulte également que les périodes du signal d'échantillonnage sont beaucoup plus nombreuses que cela n'a été représenté à la figure 2 pendant chacune des périodes où le courant dans la bobine croît ou décroît.

Pour chaque instant  $t_x$  situé après l'instant  $t_1$  où le courant  $i_m$  est interrompu pour la première fois, les termes de l'équation (2) ci-dessus peuvent s'écrire:

$$Eme_{0x} = Eme_{01} + Eme_{1x}$$

$$Ep_{0x} = Ep_{01} + Ep_{1x}$$

$$Ej_{0x} = Ej_{01} + Ej_{1x}$$

$$\text{et } Ema_{0x} = Ema_{01} + Ema_{1x}.$$

A l'instant  $t_1$ , le rotor n'a pratiquement pas encore tourné, et le moteur n'a encore fourni aucune énergie mécanique. On a donc

$$Eme_{01} = 0.$$

Tenant compte de ce fait, on voit facilement que l'équation (2) ci-dessus peut s'écrire:

$$Eme_{0x} = Eme_{1x} = Ep_{1x} - Ej_{1x} - Ema_{1x} \quad (7)$$

De manière analogue à ce qui a été fait ci-dessus pour les termes de l'équation (2), on peut écrire les termes de l'équation (7) de la manière suivante:

$$Ep_{1x} = \int_{t_1}^{t_x} U \cdot i_s(t) \cdot dt \quad (3')$$

$$Ej_{1x} = \int_{t_1}^{t_x} R \cdot [i_m(t)]^2 \cdot dt \quad (4')$$

$$Ema_{1x} = \int_{t_1}^{t_x} L \cdot i_m(t) \cdot \frac{di_m}{dt} \cdot dt \quad (5')$$

dans lesquelles les symboles ont la même signification que dans les équations (3), (4) et (5).

De l'équation (5') ci-dessus, on tire facilement que

$$Ema_{1x} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot [i_m(x)]^2 - \frac{1}{2} \cdot L \cdot [i_m(1)]^2$$

dans laquelle  $i_m(x)$  et  $i_m(1)$  sont respectivement les courants circulant dans la bobine aux instants  $t_x$  et  $t_1$ .

Mais, comme on l'a vu ci-dessus, le courant  $i_m$  est pratiquement constant et égal à  $i_{ref}$  entre les instants  $t_1$  et  $t_n$ . Si l'instant  $t_x$  considéré est situé avant cet instant  $t_n$ , on voit que  $i_m(x) = i_m(1)$ , et que  $Ema_{1x} = 0$ .

L'équation (7) ci-dessus peut donc s'écrire, dans ce cas particulier,

$$E_{me_{0x}} = \int_{t_1}^{t_x} U \cdot i_s(t) dt - \int_{t_1}^{t_x} R \cdot I_{ref}^2 \cdot dt$$

$$\text{ou encore} \quad E_{me_{0x}} = U \cdot \int_{t_1}^{t_x} i_s(t) dt - R \cdot I_{ref}^2 \int_{t_1}^{t_x} dt \quad (8)$$

Au cours de chaque impulsion motrice, la bobine du moteur est reliée à la source d'alimentation pendant un certain nombre de périodes du signal d'échantillonnage ayant chacune une durée  $\Delta$ . Dans la suite de cette description, on appellera  $C1_x$  le nombre de ces périodes qui sont comprises entre l'instant  $t_1$  où le courant dans la bobine est interrompu pour la première fois et l'instant  $t_x$  considéré.

Pendant chacune de ces  $C1_x$  périodes, le courant  $i_s$  fourni par la source est égal au courant  $i_m$  circulant dans la bobine, qui est lui-même pratiquement égal au courant de référence  $I_{ref}$ .

Pendant les autres périodes du signal d'échantillonnage situées entre l'instant  $t_1$  et l'instant  $t_x$ , la bobine du moteur est déconnectée de la source d'alimentation. Le courant  $i_s$  est donc nul pendant ces autres périodes.

Il en découle que l'on peut écrire:

$$U \cdot \int_{t_1}^{t_x} i_s(t) \cdot dt = U \cdot I_{ref} \cdot \Delta \cdot C1_x$$

Par ailleurs, si l'on appelle  $C2_x$  le nombre total de périodes du signal d'échantillonnage situées entre les instants  $t_1$  et  $t_x$ , on voit que

$$R \cdot I_{ref}^2 \cdot \int_{t_1}^{t_x} dt = R \cdot I_{ref}^2 \cdot \Delta \cdot C2_x$$

L'équation (8) ci-dessus peut donc s'écrire:

$$E_{me_{0x}} = U \cdot I_{ref} \cdot \Delta \cdot C1_x - R \cdot I_{ref}^2 \cdot \Delta \cdot C2_x \quad (9)$$

ou encore:

$$E_{me_{0x}} = k \cdot (p \cdot C1_x - C2_x) \quad (10)$$

$$\text{avec } k = R \cdot I_{ref}^2 \cdot \Delta$$

$$\text{et } p = \frac{U}{R \cdot I_{ref}}$$

Les facteurs k et p étant constants, il découle de l'équation (10) que, dans le cas présent où le courant circulant dans la bobine est pratiquement constant et égal  $I_{ref}$ , la quantité d'énergie électrique  $E_{me_{0x}}$  convertie en énergie mécanique par le moteur entre le début d'une impulsion motrice et un instant  $t_x$  quelconque est proportionnelle à la différence entre, d'une part, le produit du nombre  $C1_x$  par le facteur p et, d'autre part, le nombre  $C2_x$ .

Il faut noter que l'équation (9) ci-dessus peut également s'écrire:

$$E_{me_{0x}} = k' \cdot \left( C1_x - \frac{1}{p} \cdot C2_x \right) \quad (11)$$

$$\text{avec } k' = U \cdot I_{ref} \cdot \Delta$$

$$\text{et } p = \frac{U}{R \cdot I_{ref}}$$

comme dans l'équation (10).

Par conséquent, la quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$  est également proportionnelle à la différence entre, d'une part, le nombre  $C1_x$  et, d'autre part, le quotient du nombre  $C2_x$  par le facteur p.

Pour que la valeur de  $E_{me_{0x}}$  donnée par l'une ou l'autre des équations (10) ou (11) ci-dessus soit exacte, il faut évidemment que l'instant  $t_x$  considéré ne soit pas absolument quelconque, mais qu'il coïncide avec un des instants d'échantillonnage. Mais comme la fréquence du signal d'échantillonnage est relativement élevée, l'erreur commise lorsque l'instant  $t_x$  considéré ne coïncide pas avec un instant d'échantillonnage est faible.

Dans les cas où le facteur p qui multiplie le nombre  $C1_x$  dans l'équation (10) ci-dessus est un nombre entier, le calcul du terme entre parenthèses dans cette équation (10) peut être réalisé assez simplement. On voit qu'il suffit par exemple d'incrémenter un compteur réversible de p unités pendant chacune des périodes du signal d'échantillonnage où la bobine du moteur est reliée à la source d'alimentation, et de décrémenter ce compteur d'une unité à tous les instants d'échantillonnage, que la bobine soit reliée à la source d'alimentation ou non. Le contenu  $N_x$  de ce compteur sera ainsi en permanence égal à  $p \cdot C1_x - C2_x$ , et donc proportionnel à la quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$ .

Aux instants d'échantillonnage où la bobine est reliée à la source d'alimentation, il faut incrémenter le compteur de p unités et, simultanément, le décrémenter d'une unité. Pour éviter les problèmes qui peuvent se poser du fait de cette simultanéité, on peut simplement incrémenter le compteur de (p-1) unités à chaque instant d'échantillonnage où la bobine du moteur est reliée à la source d'alimentation, et ne décrémenter ce compteur d'une unité qu'aux instants d'échantillonnage où la bobine du moteur est déconnectée de la source d'alimentation.

Dans ces conditions, le contenu  $N_x$  du compteur est en permanence égal à

$$(p-1) C1_x - (C2_x - C1_x) \quad (12)$$

On voit facilement que cette expression (12) est égale au terme entre parenthèse de l'équation (10) ci-dessus.

Le même principe peut être utilisé dans les cas où le facteur p mentionné ci-dessus n'est pas un nombre entier.

Dans ces cas, il suffit par exemple d'incrémenter le compteur de  $n \cdot (p-1)$  unités pendant les périodes du signal d'échantillonnage où la bobine du moteur est reliée à la source d'alimentation, n étant un nombre entier tel que  $n \cdot (p-1)$  soit également entier, et de décrémenter le compteur de n unités lorsque la bobine du moteur est déconnectée de la source. Dans ces conditions, le contenu du compteur est en permanence égal à

$$n \cdot (p-1) \cdot C1_x - n \cdot (C2_x - C1_x) \quad (13)$$

On voit facilement que cette expression (13) est égale à n fois le terme entre parenthèses de l'équation (10) ci-dessus et qu'elle est donc également proportionnelle à la quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$ .

La figure 1 montre également le schéma d'un exemple de circuit permettant de calculer l'expression (12), dans un cas où le facteur  $p$  défini ci-dessus est égal à 4. Dans ce cas, le compteur réversible mentionné ci-dessus doit donc être incrémenté de trois unités à chaque instant d'échantillonnage où la bobine du moteur est connectée à la source d'alimentation, et décrétement d'une unité à chaque instant d'échantillonnage où cette bobine est déconnectée de cette source et mise en court-circuit.

Ce compteur réversible est désigné par la référence 8 à la figure 1. Son entrée d'horloge 8a est reliée à la sortie d'un circuit logique formé des portes ET 11 à 13 et des portes OU 14 et 15, qui sont reliées entre elles, avec les sorties Q et  $\overline{Q}$  de la bascule 9, avec la sortie de l'oscillateur 3 et avec les sorties 2c et 2d du diviseur de fréquence 2 de la manière représentée.

L'entrée 8b de commande de sens de comptage de ce compteur 8 est reliée à la sortie Q de la bascule 9, et son entrée 8c de remise à zéro est reliée à la sortie  $\overline{Q}$  d'une bascule 10 de type D.

L'entrée d'horloge CL de cette bascule 10 est reliée à la sortie Q de la bascule 9, son entrée D est reliée en permanence au potentiel correspondant à l'état logique "1", et son entrée R de remise à zéro est reliée à la sortie du circuit, déjà mentionné, qui produit le signal d'interruption de l'impulsion motrice sous la forme d'un passage de l'état logique "0" à un état logique "1" et qui sera décrit plus loin.

A la fin de chaque impulsion motrice, la sortie  $\overline{Q}$  de la bascule 10 est donc mise à l'état "1". Il est aisé de voir que cette sortie  $\overline{Q}$  de la bascule 10 est encore dans cet état "1" à l'instant  $t_0$  qui marque le début de l'impulsion motrice suivante, et qu'elle reste dans cet état jusqu'à l'instant  $t_1$  suivant cet instant  $t_0$ .

Entre la fin d'une impulsion motrice et l'instant  $t_1$  situé après le début de l'impulsion motrice suivante, l'entrée R de remise à zéro du compteur 8 est donc à l'état "1", et le contenu de ce compteur est égal à zéro.

Il faut noter que, d'une manière générale, le contenu du compteur 8 est un nombre qui est représenté en système binaire par les états "0" ou "1" des sorties 8d à 8l de ce compteur 8. Le chiffre de poids le plus faible de ce nombre est représenté par l'état logique de la sortie 8d, et le chiffre de poids le plus fort est représenté par l'état de la sortie 8l.

On a vu ci-dessus que, après chaque instant  $t_0$ , la sortie Q de la bascule 9 passe à l'état "0" à l'instant  $t_1$  qui est l'instant d'échantillonnage suivant l'instant où le courant  $i_m$  dépasse pour la première fois le courant de référence  $I_{ref}$ .

A cet instant  $t_1$ , la sortie  $\overline{Q}$  de la bascule 10 passe donc à l'état "0" en réponse à ce passage à l'état "0" de la sortie Q de la bascule 9.

Il est aisé de voir, à l'aide des diagrammes de la figure 6, que pendant chaque période du signal d'échantillonnage, la sortie 15a de la porte 15 délivre trois impulsions lorsque la sortie Q de la bascule 10 est à l'état "1", ou une seule impulsion lorsque cette sortie Q de la bascule 10 est à l'état "0".

Tant que l'entrée R de remise à zéro du compteur 8 est à l'état "1", ces impulsions produites par la sortie 15a de la porte 15 n'ont aucun effet sur le compteur 8, dont le contenu est maintenu à zéro.

Par contre, à partir de l'instant  $t_1$ , ces impulsions incrémentent ou décrétement ce compteur 8, selon l'état de son entrée 8b.

Il est facile de voir que, lorsque la sortie Q de la bascule 9 est à l'état "1", c'est-à-dire lorsque la bobine du moteur M est reliée à la source d'alimentation, le compteur 8 est incrémenté d'une unité par chacune des trois impulsions produites par la sortie 15a de la porte 15 pendant chaque période du signal d'échantillonnage.

De même, le compteur 8 est décrétement d'une unité à chaque période du signal d'échantillonnage lorsque la sortie Q de la bascule 9 est à l'état "0", c'est-à-dire lorsque la bobine du moteur M est déconnectée de la source d'alimentation et mise en court-circuit.

On voit donc que, à un instant  $t_x$  quelconque situé après un instant  $t_1$  et jusqu'à la fin de chaque impulsion motrice, le contenu du compteur 8 est égal au nombre  $N_x$  défini par l'expression (12) ci-dessus, et qu'il est donc proportionnel à la quantité d'énergie électrique  $E_{me0x}$  qui a été convertie en énergie mécanique par le moteur depuis le début de l'impulsion motrice.

Le calcul de la quantité d'énergie  $E_{me0x}$  peut également être fait sur la base de l'équation (11) ci-dessus, à l'aide d'un compteur réversible dont le contenu est en tout temps un nombre  $N_x$  égal au terme entre parenthèses de cette équation (11).

Dans ce cas, ce compteur est par exemple incrémenté d'une unité à chaque instant d'échantillonnage où la bobine est reliée à la source d'alimentation, et décrétement en permanence à une fréquence égale au rapport entre la fréquence du signal d'échantillonnage et le facteur  $p$ .

La figure 7 représente un exemple des modifications qu'on peut apporter au circuit de la figure 1 pour en faire un circuit de mesure de la quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$  à l'aide de l'équation (11) ci-dessus, dans un cas où la fréquence du signal d'échantillonnage est de 8'192 Hz, comme dans l'exemple de la figure 1, et le facteur  $p$  est égal 2,67. La fréquence du signal de décrémentation du compteur mentionné ci-dessus est donc, théoriquement, égale à 3'068,2 Hz.

Les composants 1 à 7 de ce circuit sont identiques aux composants du circuit de la figure 1 qui portent les mêmes références et n'ont pas été représentés dans cette figure 7. Les bascules 9 et 10 de cette figure 7 sont identiques à celles qui portent les mêmes références dans la figure 1 et sont commandées de la même manière que ces dernières.

Le compteur 8 de la figure 1 est remplacé par un compteur réversible 27 ayant une entrée d'incrémentement 27a, une entrée de décrémentation 27b et une entrée de remise à zéro 27c.

L'entrée d'incrémentement 27a du compteur 27 est reliée à la sortie d'une porte ET 30 dont les entrées sont respectivement reliées à la sortie Q de la bascule 9 et à la sortie 2d du diviseur 2, qui est la sortie qui délivre le signal d'échantillonnage.

L'entrée de décrémentation 27b du compteur 27 est reliée à la sortie d'une porte ET 28 dont les entrées sont respectivement reliées à la sortie 2e du diviseur 2 et à la sortie d'une porte NON-ET 29. Les entrées de cette porte 29 sont respectivement reliées aux sorties 2f et 2g du diviseur 2.

L'entrée de remise à zéro 27c du compteur 27 est reliée à la sortie  $\overline{Q}$  de la bascule 10.

On voit que, comme c'est le cas pour le compteur 8 de la figure 1, le contenu du compteur 27 est maintenu à zéro depuis la fin de chaque impulsion motrice jusqu'à l'instant  $t_1$  qui suit le début de l'impulsion motrice suivante.

Depuis cet instant  $t_1$ , le contenu du compteur 27 est incrémenté d'une unité à chaque instant d'échantillonnage où la sortie Q de la bascule 10 est à l'état "1", c'est-à-dire où la bobine du moteur M est reliée à la source d'alimentation.

En outre, toujours depuis cet instant  $t_1$ , le contenu du compteur 27 est décrémenté par le signal produit par la sortie de la porte 28.

On voit facilement, à l'aide des diagrammes de la figure 8, que ce signal de décrémentation du compteur 27 a une fréquence moyenne égale aux trois-quarts de la fréquence du signal fourni par la sortie 2e du diviseur 2, soit 3'072 Hz.

On voit donc que, depuis chaque instant  $t_1$ , le contenu du compteur 27 est un nombre qui est pratiquement égal, en permanence, au nombre  $N_x$  défini ci-dessus, et donc au terme entre parenthèses de l'équation (11) ci-dessus, et qu'il est donc également pratiquement proportionnel à la quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$ .

Le fait que la fréquence moyenne du signal de décrémentation du compteur 27 soit égale, dans ce cas, à 3'072 Hz et non à la valeur théorique de 3'068,2 Hz introduit évidemment une erreur dans ce calcul de la quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$ . Dans ce cas particulier, cette erreur est suffisamment faible pour pouvoir être négligée.

Il n'est pas toujours facile de produire à partir des signaux disponibles dans le circuit un signal de décrémentation du compteur 27 ayant une fréquence suffisamment proche de la fréquence théorique pour que l'erreur commise sur la mesure de la quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$  soit négligeable. Dans un tel cas, il suffit de modifier la valeur du courant  $I_{ref}$  qui a été choisie, de manière que le coefficient  $p$  prenne une valeur pour laquelle la fréquence théorique du signal de décrémentation du compteur 27 soit égale, ou au moins presque égale, à la fréquence d'un signal pouvant être facilement produit à partir des signaux disponibles.

On a vu ci-dessus que, pour chaque valeur du couple résistant  $Tr$  qui s'oppose à la rotation du rotor pendant une impulsion motrice, le moteur doit fournir une quantité d'énergie mécanique  $E_{mm}$  déterminée pour que son rotor fasse juste un pas en réponse à cette impulsion motrice. Pour que la consommation du moteur soit minimale, il faut donc interrompre chaque impulsion motrice à l'instant où la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  convertie en énergie mécanique par le moteur atteint cette valeur  $E_{mm}$ .

On a également vu ci-dessus que, pendant chaque impulsion motrice, le temps  $T$  mis par la quantité d'énergie  $E_{me}$  pour atteindre la valeur d'une quantité d'énergie de référence  $E_{ref}$  prédéterminée dépend du couple résistant  $Tr$  qui s'oppose à la rotation du rotor, et qu'il existe une relation bien définie entre ce temps  $T$  et la durée optimale  $\tau$  de l'impulsion motrice.

La figure 5 donne un exemple de cette relation qui dépend évidemment des caractéristiques du moteur et des éléments mobiles qu'il entraîne et qui peut être déterminée analytiquement et/ou par des essais.

Pour déterminer la durée optimale  $\tau$  d'une impulsion motrice, il faut donc mesurer en permanence la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  convertie en énergie mécanique depuis le début de cette impulsion motrice, mesurer la durée  $T$  du laps de temps qui sépare le début de l'impulsion motrice de l'instant, désigné par  $t_2$ , où cette quantité d'énergie  $E_{me}$  atteint la valeur de la quantité d'énergie de référence  $E_{ref}$ ,  
 5 déterminer la durée optimale  $\tau$  de l'impulsion motrice correspondant à cette durée  $T$ , et interrompre l'impulsion motrice lorsque sa durée devient égale à cette durée optimale  $\tau$ .

On a vu ci-dessus que, en fait, le circuit de mesure de la quantité d'énergie  $E_{me}$ , dont des exemples ont été décrits, ne donne pas la valeur réelle de cette quantité d'énergie  $E_{me}$ , mais fournit un signal de mesure, analogique ou numérique, qui lui est proportionnel. En pratique, la durée  $T$  mentionnée ci-dessus  
 10 est donc celle qui sépare le début de l'impulsion motrice de l'instant où ce signal de mesure atteint une valeur de référence proportionnelle à la quantité d'énergie de référence  $E_{ref}$ . Les rapports de proportionnalité entre la quantité d'énergie  $E_{me}$  et la valeur du signal de mesure d'une part, et entre la quantité d'énergie de référence  $E_{ref}$  et la valeur de référence d'autre part sont bien entendu égaux.

Dans le présent exemple où la consommation du moteur doit être aussi faible que possible, on choisit  
 15 de préférence comme quantité d'énergie de référence  $E_{ref}$  la quantité d'énergie  $E_{mm_{min}}$  que doit fournir le moteur pour que son rotor fasse juste un pas lorsque le couple résistant qu'il doit vaincre a sa valeur minimale  $Tr_{min}$ .

On pourrait également choisir pour  $E_{ref}$  une valeur inférieure à celle de la quantité d'énergie  $E_{mm_{min}}$ . Par contre, il ne serait pas judicieux de choisir pour  $E_{ref}$  une valeur supérieure à celle de la quantité  
 20 d'énergie  $E_{mm_{min}}$ , car la durée des impulsions motrices serait alors supérieure à la durée optimale chaque fois que le couple résistant  $Tr$  aurait sa valeur minimale  $Tr_{min}$ .

L'instant  $t_2$  défini ci-dessus est donc celui où le signal de mesure produit par le circuit de mesure de la quantité d'énergie  $E_{me}$  atteint la valeur correspondant à cette quantité d'énergie  $E_{mm_{min}}$ .

La figure 1 représente également un exemple de circuit permettant de mesurer la durée  $T$  qui sépare le  
 25 début d'une impulsion motrice de cet instant  $t_2$ .

On peut rappeler que, dans cette figure 1, le signal de mesure de la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  convertie en énergie mécanique par le moteur depuis le début d'une impulsion motrice est constitué par le contenu du compteur 8, c'est-à-dire par le nombre binaire formé par les états logiques "0" ou "1" des sorties de ce compteur 8.

Dans l'exemple de cette figure 1, la valeur du signal de mesure correspondant à l'énergie  $E_{mm_{min}}$  prise  
 30 comme référence est celle pour laquelle les sorties g, h, k et l du compteur 8 sont simultanément à l'état logique "1", les autres sorties de ce compteur 8 étant à l'état logique "0". Le nombre binaire représenté par cette combinaison d'états a une valeur, exprimée en notation décimale, de 408.

Le circuit permettant de mesurer la durée  $T$  comporte une porte NON-ET 19 dont les entrées sont  
 35 reliées, chacune, à l'une des sorties g, h, k et l du compteur 8.

La sortie de cette porte 19 est reliée à l'entrée d'horloge CL d'une bascule 20, de type D, dont l'entrée D est reliée en permanence au potentiel représentant l'état logique "1" et dont l'entrée R de remise à zéro est reliée à la sortie  $\overline{Q}$  de la bascule 10.

La sortie Q de cette bascule 20 est reliée à l'entrée de commande CL d'un circuit de mémoire 22 dont  
 40 les entrées sont reliées aux sorties d à k du diviseur 2.

Le circuit de mémoire 22 est d'un type bien connu. Il est agencé de manière que, lorsque son entrée de commande CL est à l'état "0", il soit "transparent", c'est-à-dire que l'état logique de ses sorties i à p soit identique, en permanence, à l'état logique de ses entrées a à h. Par contre, lorsque son entrée de commande CL est à l'état "1", ses sorties i à p sont bloquées dans l'état logique qu'elles avaient à l'instant  
 45 où cette entrée CL a pris cet état "1".

Le circuit de mesure du temps  $T$  formé de la porte 19, de la bascule 20 et du circuit de mémoire 22 fonctionne de la manière suivante:

On a vu ci-dessus que, entre la fin d'une impulsion motrice et l'instant  $t_1$  situé après le début de l'impulsion motrice suivante, la sortie  $\overline{Q}$  de la bascule 10 est à l'état "1". Pendant ce temps, la sortie Q  
 50 de la bascule 20 est donc maintenue à l'état "0", et le circuit de mémoire 22 est transparent. En outre, le contenu du compteur 8 est maintenu à zéro.

A l'instant  $t_0$  qui marque le début de chaque impulsion motrice, toutes les sorties du diviseur 2 sont à l'état logique "0". Après cet instant  $t_0$  les états de ces sorties se modifient régulièrement, au rythme du signal produit par l'oscillateur 3, et ces états logiques forment ensemble un nombre binaire qui représente,  
 55 à chaque instant, la durée qui s'est écoulée depuis l'instant  $t_0$  immédiatement précédent.

A l'instant  $t_1$  qui suit le début d'une impulsion motrice, la sortie  $\overline{Q}$  de la bascule 10 passe à l'état "0", et le contenu du compteur 8 commence à augmenter, de manière à représenter la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  convertie en énergie mécanique par le moteur.

Lorsque, à l'instant  $t_2$ , ce contenu du compteur 8 atteint la valeur de référence mentionnée ci-dessus, dans le présent exemple la valeur 408, la sortie de la porte 19 passe à l'état "0". En réponse à ce passage, la sortie Q de la bascule 20 passe à l'état "1". Depuis cet instant  $t_2$ , les sorties du circuit de mémoire 22 restent donc bloquées dans un état qui est celui que les sorties d à k du diviseur 2 avaient à cet instant  $t_2$ . Le nombre binaire formé par les états logiques des sorties i à p du circuit de mémoire 22 est donc une mesure de la durée T du laps de temps qui s'est écoulé entre le début de l'impulsion motrice et l'instant  $t_2$  où la quantité d'énergie Eme a atteint la valeur de référence prédéterminée, dans cet exemple la valeur  $Emm_{min}$ .

Il faut noter que la porte 19 joue le rôle d'un comparateur numérique, puisqu'elle produit un signal lorsque le contenu du compteur 8 devient égal au nombre de référence, dans cet exemple 408. Elle pourrait donc être remplacée sans difficulté par un tel comparateur numérique dont les premières entrées seraient reliées aux sorties 8d à 8m du compteur 8, et dont les deuxièmes entrées seraient reliées en permanence aux potentiels représentant les états logiques "0" ou "1" de manière que la combinaison de ces états forme le nombre binaire voulu.

La figure 1 montre également un exemple de circuit destiné à déterminer la durée optimale  $\tau$  de l'impulsion motrice en fonction de la durée T mesurée par le circuit décrit ci-dessus. Dans cet exemple, ce circuit comporte une simple mémoire morte 23, souvent appelée PROM, mot formé par les initiales de sa désignation en anglais (Programmable Read Only Memory).

Les entrées a à h de cette mémoire morte 23 sont reliées aux sorties i à p du circuit de mémoire 22, et elle est programmée de manière à matérialiser la relation entre le temps T mesuré par le circuit qui vient d'être décrit et la durée optimale  $\tau$  de l'impulsion motrice. Cela signifie que pour chaque nombre binaire formé, après chaque instant  $t_2$ , par les états logiques des sorties i à p du circuit de mémoire 22, c'est-à-dire pour chaque valeur particulière du temps T, les sorties i à p de la mémoire morte 23 présentent des états logiques formant un deuxième nombre binaire qui représente la durée optimale  $\tau$  correspondant à ce temps T.

La figure 1 représente également un exemple de circuit permettant d'interrompre l'impulsion motrice lorsque sa durée devient égale à la durée optimale  $\tau$  déterminée à l'aide de la mémoire morte 23.

Ce circuit comporte, dans cet exemple, un comparateur numérique 24 dont les premières entrées a à h sont reliées aux sorties d à k du diviseur 2, et dont les deuxièmes entrées a' à h' sont reliées aux sorties i à p de la mémoire morte 23. La sortie s du comparateur 24 est normalement à l'état logique "0", et elle ne prend l'état "1" que si le nombre binaire formé par les états logiques de ses entrées a à h est égal au nombre binaire formé par les états logiques de ses entrées a' à h'.

Cette sortie s du comparateur 24 est reliée à une première entrée d'une porte ET 25 dont la deuxième entrée est reliée à la sortie Q de la bascule 20 par l'intermédiaire d'un circuit retardateur 26 dont le rôle sera décrit plus loin. La sortie 25a de la porte 25 est reliée à l'entrée 1c du circuit formateur 1 et à l'entrée R de remise à zéro de la bascule 10.

On a vu ci-dessus que, pendant chaque impulsion motrice, les sorties i à p de la mémoire morte 23 présentent, après l'instant  $t_2$ , des états logiques qui forment un nombre binaire correspondant à la durée optimale  $\tau$  de cette impulsion motrice. Après cet instant  $t_2$ , le nombre binaire formé par les états logiques des sorties d à k du diviseur 2 continue à croître. Lorsque ce nombre binaire devient égal à celui qui est formé par les états logiques des sorties i à p de la mémoire morte 23, c'est-à-dire à l'instant  $t_n$  où la durée de l'impulsion motrice devient égale à la durée optimale  $\tau$ , la sortie s du comparateur 24 passe à l'état "1". La sortie du circuit retardateur 26 étant également à l'état "1" à cet instant, la sortie 25a de la porte 25, et donc l'entrée 1c du circuit formateur 1 et l'entrée R de remise à zéro de la bascule 10, passent également à l'état "1".

Par conséquent, le circuit formateur 1 interrompt l'impulsion motrice, et le contenu du compteur 8 est remis à zéro.

Cette situation reste inchangée jusqu'à l'instant  $t_0$  suivant, où tout le processus décrit ci-dessus recommence.

Il peut arriver que, juste après l'instant  $t_2$ , les sorties i à p de la mémoire morte 23 prennent, pendant un temps très court, un état logique différent de leur état définitif. Le circuit retardateur 26, qui comporte dans le présent exemple deux inverseurs et un condensateur reliés de la manière représentée, est destiné à empêcher qu'un état "1" qui apparaîtrait éventuellement à la sortie s du comparateur 24 pendant ce temps ne provoque l'interruption prématurée de l'impulsion motrice.

En résumé, on voit que chaque impulsion motrice produite par le circuit de la figure 1 a une durée qui est égale à la durée optimale  $\tau$  correspondant au couple résistant  $Tr$  qui est effectivement appliqué au rotor pendant cette impulsion motrice.

Toutes autres choses étant égales, le procédé selon l'invention mis en oeuvre par le circuit de la figure 1, par exemple, est donc celui qui permet de commander le moteur avec la consommation d'énergie électrique la plus faible.

Cet avantage est dû au fait que la grandeur physique qui sert de base à la détermination de la durée de chaque impulsion motrice est la quantité d'énergie électrique convertie en énergie mécanique par le moteur, dont la variation en fonction du temps est directement liée à la valeur du couple résistant que doit vaincre le rotor du moteur pendant cette impulsion motrice.

Dans les cas où, comme dans le cas de la figure 1, le moteur est commandé de manière que le courant  $i_m$  passant dans sa bobine pendant une impulsion motrice soit sensiblement constant et égal une valeur  $I_{ref}$  entre les instants  $t_1$  et  $t_n$ , la quantité totale d'énergie électrique  $E_p$  fournie par la source d'alimentation pendant cette impulsion motrice dépend évidemment de cette valeur  $I_{ref}$ .

La figure 3 montre un exemple de l'allure de cette dépendance pour quatre couples résistants différents  $Tr_{min}$ ,  $Tr_1$ ,  $Tr_2$  et  $Tr_{max}$ .

On voit sur cette figure 3 que, pour chaque valeur du couple résistant, il existe une valeur  $I_{ref}$  pour laquelle cette quantité d'énergie  $E_p$  est minimale.

La figure 3 montre également que cette valeur  $I_{ref}$  pour laquelle la quantité d'énergie  $E_p$  est minimale augmente avec la valeur du couple résistant  $Tr$ .

En outre, on voit sur cette figure 3 que si l'on choisit pour  $I_{ref}$  la valeur  $I_{min}$  correspondant à la quantité minimale d'énergie  $E_p$  que doit fournir la source d'alimentation du moteur lorsque le couple résistant  $Tr$  a sa valeur  $Tr_{min}$ , cette quantité d'énergie  $E_p$  augmente très rapidement avec l'augmentation du couple résistant  $Tr$ . Cette quantité d'énergie  $E_p$  peut même devenir infinie lorsque le couple résistant  $Tr$  s'approche de sa valeur maximale  $Tr_{max}$ . Cela signifie que le moteur n'est plus capable, dans ce cas, de convertir suffisamment d'énergie électrique en énergie mécanique pour faire tourner le rotor ou, en d'autres termes, que la durée optimale  $\tau$  de l'impulsion motrice devrait être infinie, comme cela est visible sur la figure 4.

Il est donc judicieux de choisir pour le courant de référence  $I_{ref}$  une valeur supérieure à la valeur  $I_{min}$  mentionnée ci-dessus et inférieure ou égale à la valeur  $I_{max}$  qui est celle pour laquelle la quantité d'énergie  $E_p$  est minimale lorsque le couple résistant  $Tr$  a sa valeur maximale  $Tr_{max}$ . Cette valeur  $I_{ref}$  est de préférence choisie de manière que, quel que soit le couple résistant  $Tr$ , la quantité d'énergie  $E_p$  effectivement fournie par la source ne soit que légèrement supérieure à la quantité d'énergie  $E_p$  minimale correspondant à ce couple  $Tr$ . La valeur  $I_c$  indiquée dans la figure 3 remplit cette condition.

Des considérations semblables aux précédentes peuvent être faites dans les cas où le moteur est commandé de manière que la tension qui lui est appliquée soit constante pendant chaque impulsion motrice, c'est-à-dire que, dans un tel cas, il existe une valeur optimale de cette tension pour laquelle la quantité d'énergie  $E_p$  fournie par la source d'alimentation est minimale.

Mais cette source d'alimentation est généralement constituée par une pile dont la tension ne peut pas être choisie librement.

Il faudrait donc prévoir un circuit produisant cette tension optimale à partir de la tension de la source d'alimentation. Or un tel circuit consomme lui-même une quantité d'énergie électrique non négligeable. Il en résulte que, globalement, la consommation d'un moteur alimenté par cette tension optimale n'est pas sensiblement plus faible que la consommation du même moteur alimenté directement par la tension de la source d'alimentation.

Dans les exemples décrits ci-dessus, la mesure de la quantité d'énergie électrique  $E_{me}$  convertie en énergie mécanique par le moteur pendant une impulsion motrice est utilisée pour déterminer la durée de cette impulsion motrice.

Cette mesure peut également être utilisée pour déterminer si le rotor tourne correctement ou non en réponse cette impulsion motrice.

On a vu en effet ci-dessus que le temps  $T$  mis par la quantité d'énergie  $E_{me}$  pour atteindre la valeur de référence  $E_{ref}$  est une mesure de la valeur du couple résistant  $Tr$  appliqué au rotor. Lorsque ce couple  $Tr$  a sa valeur maximale  $Tr_{max}$ , ce temps  $T$  a donc également une valeur maximale  $T_{max}$ , qui dépend bien entendu des caractéristiques du moteur et de la charge qu'il entraîne.

Il en découle que si, pour une raison quelconque, le couple résistant  $Tr$  appliqué au rotor pendant une impulsion motrice a une valeur supérieure à sa valeur maximale  $Tr_{max}$ , la quantité d'énergie  $E_{me}$  n'atteint pas la valeur de référence  $E_{ref}$  avant que le temps  $T_{max}$  ne soit écoulé.

Il en est de même si, toujours pour une raison quelconque, la polarité de l'impulsion motrice ne correspond pas à la position angulaire qu'occupe le rotor au début de cette impulsion motrice, et que, par conséquent, cette dernière ne peut pas faire tourner ce rotor, indépendamment de la valeur du couple résistant  $Tr$ .

Il est donc possible de détecter si le rotor tourne correctement ou non en réponse une impulsion motrice en déterminant à un instant de détection  $t_d$  séparé du début de cette impulsion motrice par une durée au moins égale à  $T_{\max}$  si la quantité d'énergie Eme a atteint la valeur de référence ou non.

La figure 9 montre le schéma d'un exemple de circuit qui réalise cette détection dans un cas où le  
5 temps  $T_{\max}$  a une durée de 11 millisecondes environ.

Ce circuit comporte dans ce cas une bascule 41 de type D et une porte ET 42.

L'entrée d'horloge CL de la bascule 41 est reliée à la sortie 2a du diviseur 2 de la figure 1, son entrée D est reliée en permanence au potentiel qui représente l'état logique "1", et son entrée R de remise à zéro est reliée à la sortie Q de la bascule 20 de la figure 1. Les entrées de la porte 42 sont respectivement  
10 reliées à la sortie Q de cette bascule 41 et aux sorties 2j et 2k du diviseur 2 de la figure 1.

On voit facilement, à l'aide des diagrammes des figures 10a et 10b, que la sortie Q de la bascule 41 passe à l'état "1" à chaque instant  $t_0$ . En outre, on voit que, après chaque instant  $t_0$ , l'une au moins des sorties 2j et 2k du diviseur 2 est à l'état "O" pendant une période et demi du signal produit par la sortie 2j du diviseur 2, soit pendant 11,7 millisecondes. Dans cet exemple, l'instant situé à la fin de cette période de  
15 11,7 millisecondes où le signal à 128 Hz produit par la sortie 2j du diviseur 2 passe à l'état "1" est l'instant de détection  $t_d$  mentionné ci-dessus. La sortie 42a de la porte 42 est donc maintenue à l'état "O" jusqu'à cet instant  $t_d$ , indépendamment de l'état de la sortie Q de la bascule 41.

Si le rotor du moteur tourne correctement en réponse à une impulsion motrice commençant à un instant  $t_0$ , la quantité d'énergie Eme atteint la valeur de référence  $E_{ref}$  à un instant  $t_2$  situé moins de 11  
20 millisecondes après cet instant  $t_0$ , c'est-à-dire avant l'instant  $t_d$ . A cet instant  $t_2$ , la sortie Q de la bascule 20 passe à l'état "1", comme cela a été montré ci-dessus, et la sortie Q de la bascule 41 repasse donc à l'état "O" et y reste jusqu'au début de l'impulsion motrice suivante. La sortie 42a de la porte 42 reste donc également à l'état "O". Cette situation est illustrée par la figure 10a.

Si par contre le rotor ne tourne pas correctement en réponse à une impulsion motrice, la quantité  
25 d'énergie Eme n'a pas encore atteint la valeur de référence  $E_{ref}$  à l'instant  $t_d$ . La sortie Q de la bascule 20 est donc encore à l'état "O", et la sortie Q de la bascule 41 est encore à l'état "1". Il en résulte que la sortie 42a de la porte 42 passe à l'état "1" à cet instant  $t_d$ . Cet état "1" constitue le signal de détection de la non-rotation du rotor. Cette situation est illustrée par la figure 10b.

Un circuit tel que celui qui est représenté à la figure 9 est évidemment particulièrement bien adapté  
30 pour détecter la rotation ou la non-rotation du rotor d'un moteur commandé par des impulsions motrices dont la durée est ajustée en dépendance de la quantité d'énergie électrique Eme convertie en énergie mécanique pendant ces impulsions motrices, puisque les moyens de mesure de cette quantité d'énergie Eme sont déjà compris dans le circuit produisant ces impulsions motrices.

Il faut cependant noter que cette détection de la rotation ou de la non-rotation du rotor peut également  
35 être réalisée quelle que soit la manière dont ces impulsions motrices sont produites.

Ainsi, il est par exemple tout à fait possible de concevoir un circuit de commande d'un moteur pas à pas comportant un formateur produisant des impulsions motrices ayant une première durée fixe, relativement courte, ou une deuxième durée, plus longue que la première, selon qu'un signal de détection indique que le rotor tourne correctement ou non en réponse aux impulsions motrices de courte durée.

Ce signal de détection pourrait être produit par un circuit comportant des moyens de mesure de la  
40 quantité d'énergie Eme tels que ceux qui sont formés par les éléments 5 à 15 de la figure 1, des moyens de détermination de l'instant où cette quantité d'énergie Eme atteint une valeur de référence  $E_{ref}$  tels que ceux qui sont formés par les éléments 19 et 20 de cette figure 1, et des moyens de détection de la rotation ou de la non-rotation du rotor tels que ceux qui sont formés par les éléments 41 et 42 de la figure 9.

La mesure de la quantité d'énergie Eme peut également être utilisée dans un circuit produisant des  
45 impulsions motrices pendant lesquelles la quantité d'énergie mécanique fournie par le moteur a une valeur fixe et prédéterminée.

Un tel circuit ne sera pas représenté ici, car il peut être très semblable à celui de la figure 1. Il suffit en effet de remplacer dans celui-ci la porte 19 par une porte du même genre mais dont les entrées sont  
50 reliées aux sorties du compteur 8 qui sont à l'état "1" lorsque la quantité d'énergie Eme est égale à cette quantité d'énergie mécanique de valeur prédéterminée. En outre, les éléments 22 à 26 du circuit de la figure 1 peuvent être supprimés, la sortie Q de la bascule 20 étant alors reliée directement l'entrée 1c du circuit formateur 1.

On voit facilement que, avec un tel circuit, chaque impulsion motrice est interrompue dès que la  
55 quantité d'énergie Eme devient égale à la valeur prédéterminée. La quantité d'énergie mécanique fournie par le moteur pendant ces impulsions motrices est donc constante.

Ces dernières impulsions motrices peuvent avantageusement remplacer les impulsions de rattrapage de durée fixe qui sont produites par certains circuits de commande connus lorsque le rotor du moteur ne tourne pas correctement en réponse à une des impulsions courtes qu'ils produisent normalement.

Dans un tel cas, la valeur prédéterminée mentionnée ci-dessus est évidemment de préférence celle de la quantité d'énergie mécanique  $Emm_{max}$  que doit fournir le moteur lorsque le couple résistant  $Tr$  appliqué à son rotor a sa valeur maximale  $Tr_{max}$ .

Le fait que la quantité d'énergie mécanique  $Emm$  fournie par le moteur pendant ces impulsions a une valeur fixe a comme avantage qu'elles ne provoquent jamais une rotation du rotor de plus d'un pas, contrairement à ce qui peut se passer avec les impulsions de rattrapage de durée fixe produites par les circuits de commande connus.

Un circuit combinant de la manière évoquée ci-dessus la production d'impulsions motrices de durée fixe et relativement courte et la production d'impulsions de rattrapage pendant lesquelles la quantité d'énergie mécanique fournie par le moteur est constante et prédéterminée ne sera pas décrit ici car sa réalisation est à la portée de l'homme du métier.

Il faut encore noter que la présente invention n'est pas limitée à la commande de moteurs pas à pas tels qu'ils sont couramment utilisés dans les pièces d'horlogerie électroniques, c'est-à-dire qui comprennent un rotor comportant un aimant permanent bipolaire disposé dans une ouverture sensiblement cylindrique ménagée dans un stator portant une bobine, mais qu'elle peut être utilisée pour commander des moteurs pas à pas de n'importe quel genre, par exemple des moteurs dont le rotor comporte un aimant permanent multipolaire et/ou dont le stator porte deux ou plusieurs bobines.

## Revendications

1. Procédé de commande d'un moteur pas à pas (M) comprenant une bobine et un rotor couplé magnétiquement à ladite bobine, ledit procédé comportant l'application à ladite bobine d'une impulsion motrice chaque fois que ledit rotor doit tourner d'un pas, caractérisé par le fait qu'il comporte en outre la mesure de la quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) convertie en énergie mécanique par le moteur depuis le début de ladite impulsion motrice, la comparaison entre ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) et une valeur de référence d'énergie ( $E_{ref}$ ) et l'interruption de ladite impulsion motrice en dépendance de ladite comparaison.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait que ladite valeur de référence d'énergie ( $E_{ref}$ ) est sensiblement égale à la quantité d'énergie mécanique ( $Emm_{min}$ ) que ledit moteur (M) doit fournir pour que ledit rotor tourne juste d'un pas lorsque le couple résistant ( $Tr$ ) qui lui est appliqué a sa valeur minimale ( $Tr_{min}$ ), et que ladite interruption comporte la mesure du temps (T) mis par ladite quantité d'énergie électrique pour atteindre ladite valeur de référence d'énergie ( $E_{ref}$ ) et la détermination de la durée optimale ( $\tau$ ) de l'impulsion motrice en fonction dudit temps (T), ladite impulsion motrice étant interrompue à la fin de ladite durée optimale ( $\tau$ ).

3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait que ladite valeur de référence d'énergie ( $E_{ref}$ ) est sensiblement égale à la quantité d'énergie mécanique ( $Emm_{max}$ ) que ledit moteur (M) doit fournir pour que ledit rotor tourne juste d'un pas lorsque le couple résistant ( $Tr$ ) qui lui est appliqué a sa valeur maximale ( $Tr_{max}$ ), et que ladite interruption est réalisée en réponse à ladite comparaison lorsque ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) atteint ladite valeur de référence d'énergie ( $E_{ref}$ ).

4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait qu'il comporte en outre la production d'un signal de détection de la non-rotation dudit rotor lorsque ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) n'atteint pas ladite valeur de référence d'énergie ( $E_{ref}$ ) après un temps déterminé.

5. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait que ladite mesure de ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) comporte le calcul de la première expression suivante:

$$E_{me_{0x}} = \int_{t_0}^{t_x} U \cdot i_s(t) \cdot dt - \int_{t_0}^{t_x} R \cdot [i_m(t)]^2 \cdot dt - \int_{t_0}^{t_x} L \cdot i_m(t) \cdot \frac{di_m}{dt} \cdot dt$$

dans laquelle:

$-t_0$  et  $t_x$  sont respectivement l'instant de début de l'impulsion motrice et un instant quelconque situé après l'instant  $t_0$ ;

- $E_{me_{0x}}$  est ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) convertie en énergie mécanique entre les instants  $t_0$  et  $t_x$ ;

- $U$  est la tension de la source d'alimentation du moteur ( $M$ );

- $i_s(t)$  est le courant débité par cette source d'alimentation;

5 - $i_m(t)$  est le courant circulant dans la bobine du moteur ( $M$ );

et

- $R$  et  $L$  sont respectivement la résistance et l'inductance de cette bobine.

6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé par le fait qu'il comporte en outre la production d'un signal d'échantillonnage périodique définissant une pluralité d'instants d'échantillonnage, deux instants  
10 d'échantillonnage consécutifs étant séparés par une période égale à la période dudit signal d'échantillonnage, l'asservissement du courant ( $i_m$ ) circulant dans ladite bobine pendant ladite impulsion motrice à une valeur de référence de courant ( $I_{ref}$ ) comprenant la connexion de ladite bobine à ladite source à chaque instant d'échantillonnage où ledit courant ( $i_m$ ) circulant dans ladite bobine est inférieur à ladite  
15 valeur de référence de courant ( $I_{ref}$ ) et la déconnexion de ladite bobine de ladite source et la mise en court-circuit de ladite bobine à chaque instant d'échantillonnage où ledit courant ( $i_m$ ) circulant est supérieur à ladite valeur de référence de courant ( $I_{ref}$ ), ladite première expression se réduisant alors à la deuxième expression suivante:

$$E_{me_{0x}} = U \cdot I_{ref} \cdot \Delta \cdot C1_x - R \cdot I_{ref}^2 \cdot \Delta \cdot C2_x$$

20

dans laquelle:

- $\Delta$  est la durée de la période dudit signal d'échantillonnage.

- $C1_x$  est un premier nombre égal au nombre d'instants d'échantillonnage où ledit courant ( $i_m$ ) circulant dans ladite bobine est supérieur à ladite valeur de référence de courant ( $I_{ref}$ ) qui sont situés entre l'instant  $t_0$   
25 et l'instant  $t_x$ ; et

- $C2_x$  est un second nombre égal au nombre total d'instants d'échantillonnage situés entre l'instant  $t_0$  et l'instant  $t_x$

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé par le fait que le calcul de ladite deuxième expression comporte le calcul d'un troisième nombre ( $N_x$ ) selon la formule suivante:

30

$$N_x = p \cdot C1_x - C2_x$$

dans laquelle:

- $N_x$  est ledit troisième nombre; et

35 - $p$  est un facteur constant égal à

$$\frac{U}{R \cdot I_{ref}},$$

40

ledit troisième nombre ( $N_x$ ) étant proportionnel à ladite quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$ .

8. Procédé selon la revendication 6, caractérisé par le fait que le calcul de ladite deuxième expression comporte le calcul d'un troisième nombre ( $N_x$ ) selon la formule suivante:

45

$$N_x = C1_x - \frac{1}{p} \cdot C2_x$$

dans laquelle:

- $N_x$  est ledit troisième nombre; et

50 - $p$  est un facteur constant égal à

$$\frac{U}{R \cdot I_{ref}},$$

55

ledit troisième nombre ( $N_x$ ) étant proportionnel à ladite quantité d'énergie  $E_{me_{0x}}$ .

9. Dispositif pour la mise en oeuvre du procédé selon la revendication 1, comprenant des moyens (1) pour produire ladite impulsion motrice, caractérisé par le fait qu'il comporte en outre des moyens (8, 10 à 15; 10, 27 à 30) pour produire un signal de mesure de la quantité d'énergie électrique (Eme) convertie en énergie mécanique par ledit moteur depuis le début de ladite impulsion motrice, des moyens (19) répondant audit signal de mesure pour produire un signal de comparaison entre ladite quantité d'énergie électrique (Eme) et une valeur de référence d'énergie (E<sub>ref</sub>), et des moyens (20, 22 à 25; 20) pour produire un signal d'interruption de ladite impulsion motrice en dépendance dudit signal de comparaison.

10. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé par le fait que ladite quantité d'énergie de référence (E<sub>ref</sub>) est sensiblement égale à la quantité d'énergie mécanique (Emm<sub>min</sub>) que ledit moteur doit fournir pour que ledit rotor tourne juste d'un pas en réponse à ladite impulsion motrice lorsque le couple résistant (Tr) appliqué audit rotor a sa valeur minimale (Tr<sub>min</sub>), et que lesdits moyens (20, 22 à 25; 20) pour produire un signal d'interruption comportent des moyens (20, 22) pour mesurer le temps (T) mis par ladite énergie électrique (Eme) pour atteindre ladite valeur de référence d'énergie (E<sub>ref</sub>), des moyens (23) pour déterminer la durée optimale (τ) de ladite impulsion motrice en fonction dudit temps (T), et des moyens (24, 25) pour produire ledit signal d'interruption à la fin de ladite durée optimale (τ).

11. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé par le fait que ladite valeur de référence d'énergie (E<sub>ref</sub>) est sensiblement égale à la quantité d'énergie mécanique (Emm<sub>max</sub>) que ledit moteur doit fournir pour que ledit rotor tourne juste d'un pas en réponse à ladite impulsion motrice lorsque le couple résistant (Tr) appliqué audit rotor a sa valeur maximale (Tr<sub>max</sub>), et par le fait que lesdits moyens (20, 22 à 25; 20) pour produire un signal d'interruption comportent des moyens (20) pour produire ledit signal d'interruption en réponse audit signal de comparaison.

12. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé par le fait qu'il comporte en outre des moyens (41, 42) pour produire un signal de détection de la non-rotation dudit rotor lorsque ladite quantité d'énergie électrique (Eme) n'atteint pas ladite valeur de référence d'énergie (E<sub>ref</sub>) après un temps déterminé.

13. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé par le fait que lesdits moyens (8, 10 à 15; 10, 27 à 30) pour produire un signal de mesure de ladite quantité d'énergie électrique (Eme) sont agencés de manière à calculer la première expression suivante:

$$Eme_{0x} = \int_{t_0}^{t_x} U \cdot i_s(t) \cdot dt - \int_{t_0}^{t_x} R \cdot [i_m(t)]^2 \cdot dt - \int_{t_0}^{t_x} L \cdot i_m(t) \cdot \frac{di_m}{dt} \cdot dt$$

dans laquelle:

-t<sub>0</sub> et t<sub>x</sub> sont respectivement l'instant de début de l'impulsion motrice et un instant quelconque situé après l'instant t<sub>0</sub>;

-Eme<sub>0x</sub> est ladite quantité d'énergie électrique (Eme) convertie en énergie mécanique entre les instants t<sub>0</sub> et t<sub>x</sub>;

-U est la tension de la source d'alimentation du moteur (M);

-i<sub>s</sub>(t) est le courant débité par cette source d'alimentation;

-i<sub>m</sub>(t) est le courant circulant dans la bobine du moteur (M);

et

-R et L sont respectivement la résistance et l'inductance de cette bobine.

14. Dispositif selon la revendication 13, caractérisé par le fait que lesdits moyens (1) pour produire une impulsion motrice sont agencés de manière à répondre, pendant ladite impulsion motrice, à un premier état d'un signal de contrôle pour relier ladite source d'alimentation à ladite bobine et à un deuxième état dudit signal de contrôle pour déconnecter ladite source de ladite bobine et pour mettre ladite bobine en court-circuit, par le fait qu'il comporte en outre des moyens (2d) pour produire un signal d'échantillonnage périodique définissant une pluralité d'instant d'échantillonnage séparés les uns des autres par des périodes égales à la période dudit signal d'échantillonnage, des moyens (5 à 7, 9) répondant audit signal d'échantillonnage pour produire ledit signal de contrôle avec ledit premier ou ledit second état selon que, à l'un desdits instants d'échantillonnage, le courant (i<sub>m</sub>) circulant dans ladite bobine est inférieur ou supérieur à une valeur de référence de courant (I<sub>ref</sub>), ledit courant (i<sub>m</sub>) étant ainsi asservi à ladite valeur de référence de courant (I<sub>ref</sub>) et ladite première expression se réduisant alors à la deuxième expression suivante:

$$Eme_{0x} = U \cdot I_{ref} \cdot \Delta \cdot C1_x - R \cdot I_{ref}^2 \cdot \Delta \cdot C2_x$$

dans laquelle:

- $\Delta$  est la durée de la période dudit signal d'échantillonnage.

- $C1_x$  est un premier nombre égal au nombre d'instants d'échantillonnage où ledit courant ( $i_m$ ) circulant dans ladite bobine est supérieur à ladite valeur de référence de courant ( $I_{ref}$ ) qui sont situés entre l'instant  $t_0$  et l'instant  $t_x$ ; et

- $C2_x$  est un second nombre égal au nombre total d'instants d'échantillonnage situés entre l'instant  $t_0$  et l'instant  $t_x$ .

15. Dispositif selon la revendication 14, caractérisé par le fait que lesdits moyens (8, 10 à 15; 10, 27 à 30) pour produire un signal de mesure de ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) comportent des moyens (11 à 15) répondant audit signal d'échantillonnage et audit signal de contrôle pour produire (p-1) impulsions d'incrémentations, avec

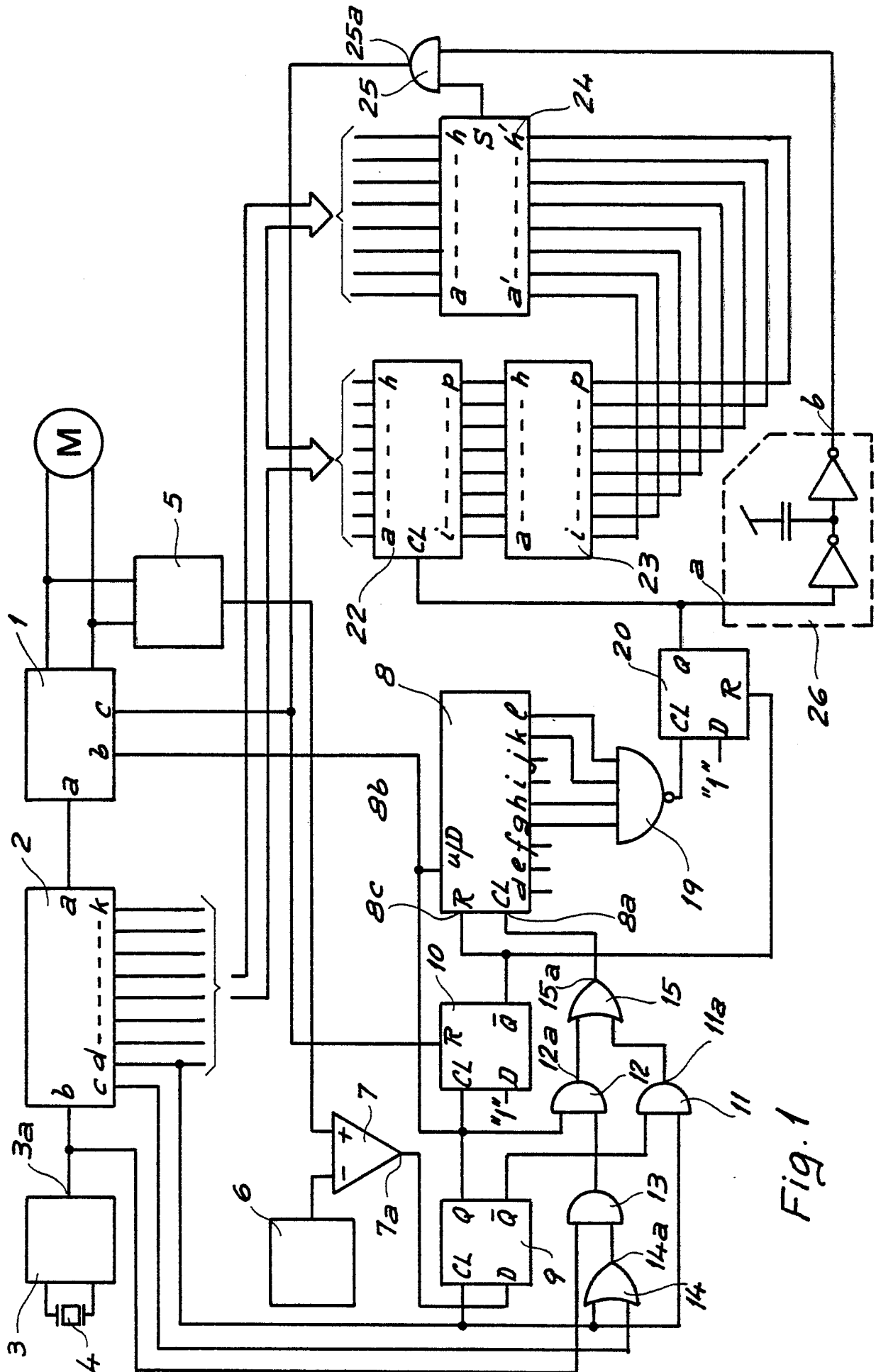
$$p = \frac{U}{R \cdot I_{ref}},$$

à chaque instant d'échantillonnage où ledit signal de contrôle est dans son premier état et pour produire une impulsion de décrémentation à chaque instant d'échantillonnage où ledit signal de contrôle est dans son deuxième état, et des moyens de comptage (8) répondant auxdites impulsions d'incrémentations et auxdites impulsions de décrémentation pour produire ledit signal de mesure de ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ).

16. Dispositif selon la revendication 14, caractérisé par le fait que lesdits moyens (8, 10 à 15; 10, 27 à 30) pour produire un signal de mesure de ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ) comportent des moyens (28 à 30) répondant audit signal d'échantillonnage et audit signal de contrôle pour produire une impulsion d'incrémentations à chaque instant d'échantillonnage où ledit signal de contrôle est dans son premier état et pour produire des impulsions de décrémentation périodiques ayant une période égale à p fois la période dudit signal d'échantillonnage, avec

$$p = \frac{U}{R \cdot I_{ref}},$$

et des moyens de comptage (27) répondant auxdites impulsions d'incrémentations et auxdites impulsions de décrémentation pour produire ledit signal de mesure de ladite quantité d'énergie électrique ( $E_{me}$ ).



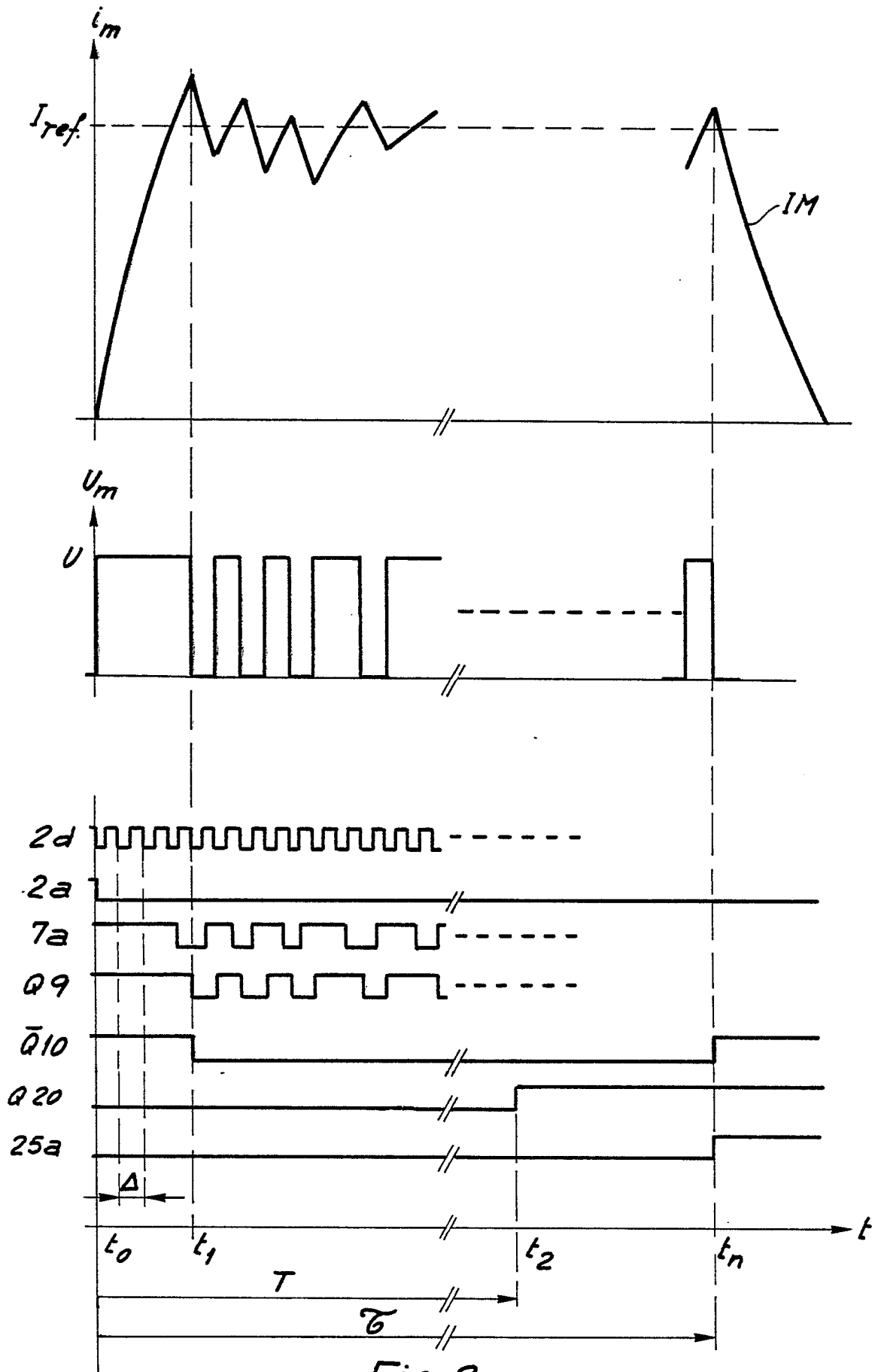
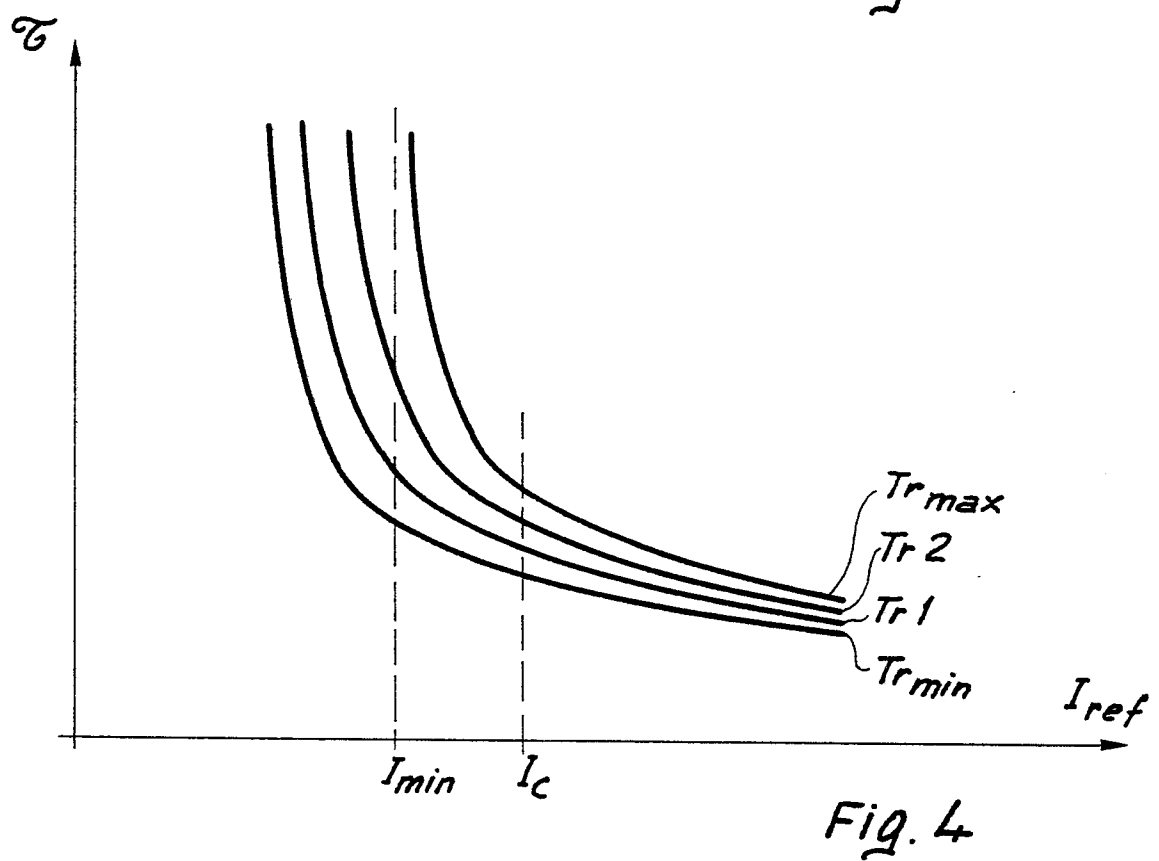
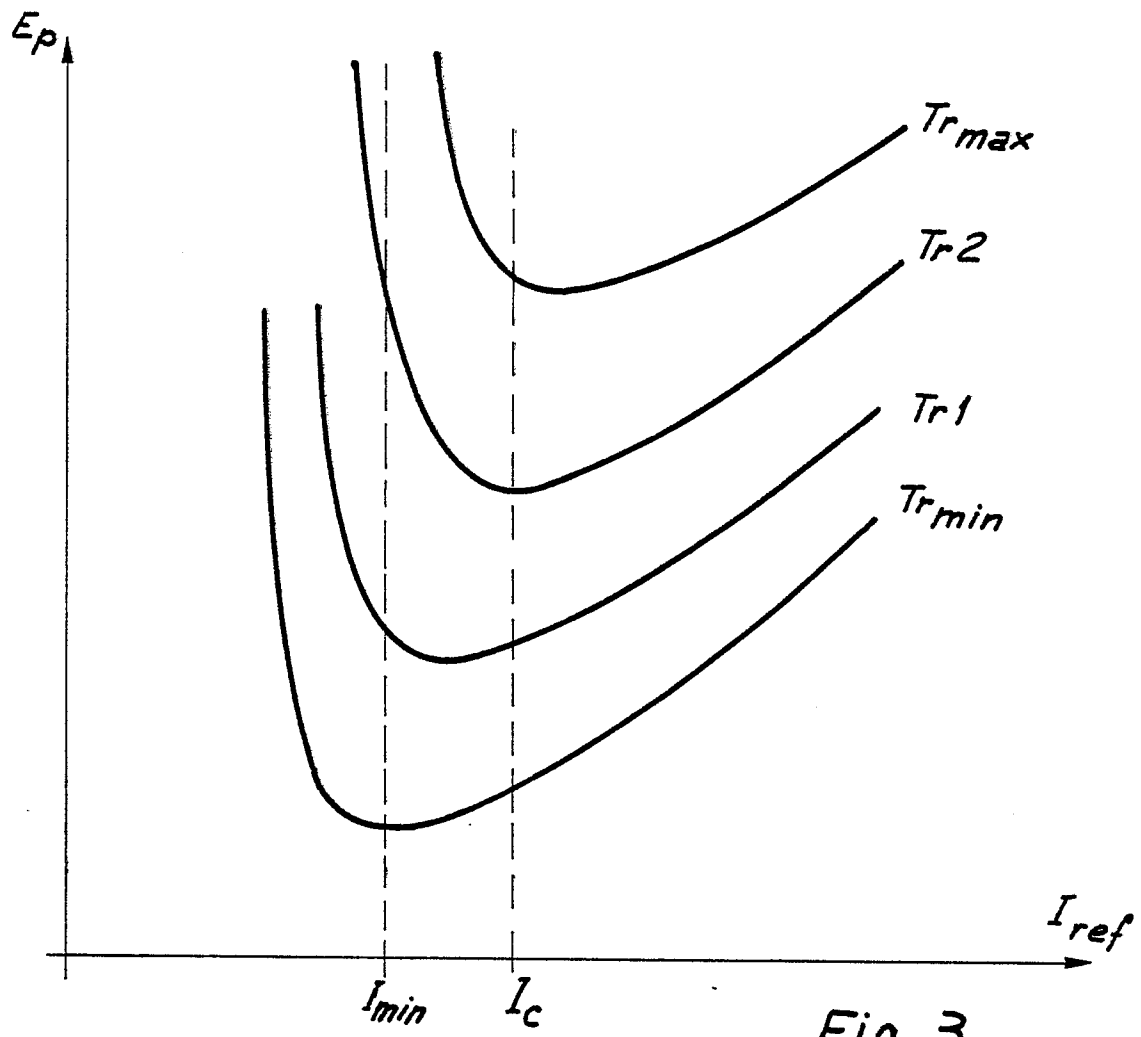


Fig. 2



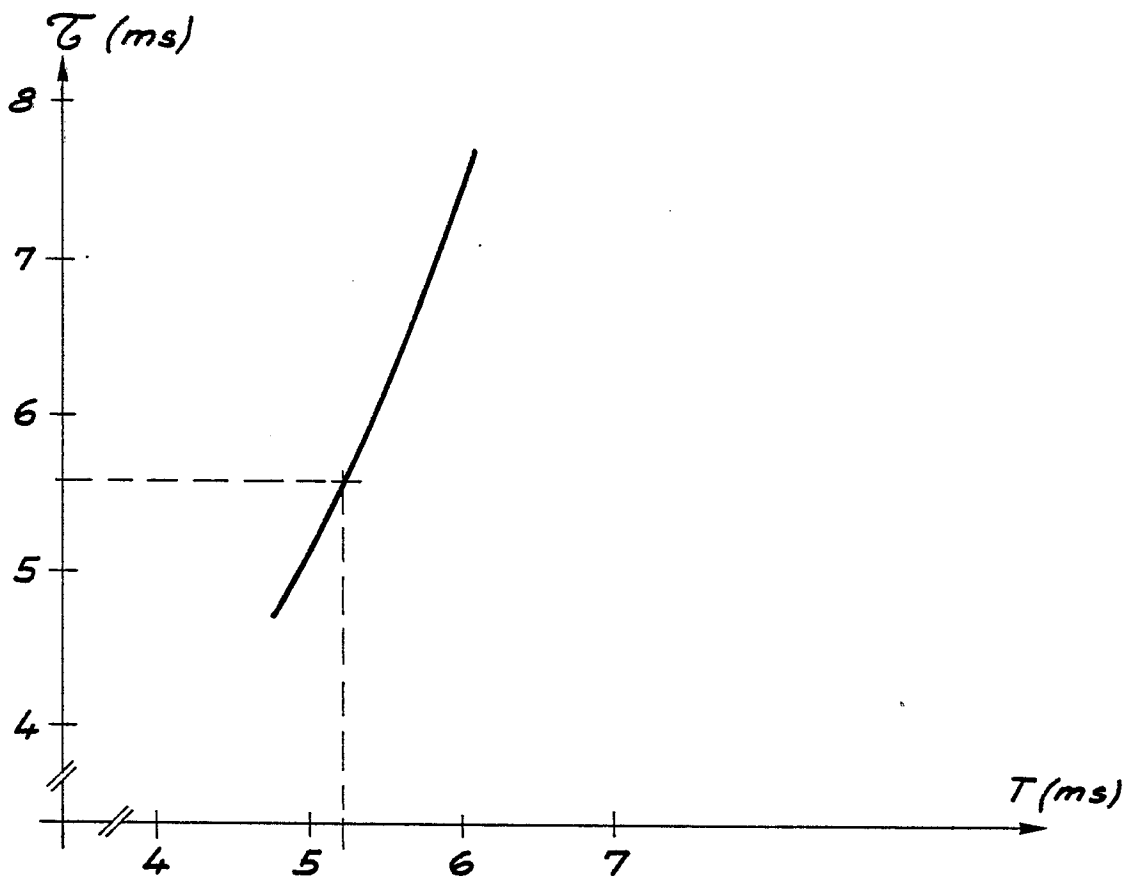


Fig. 5

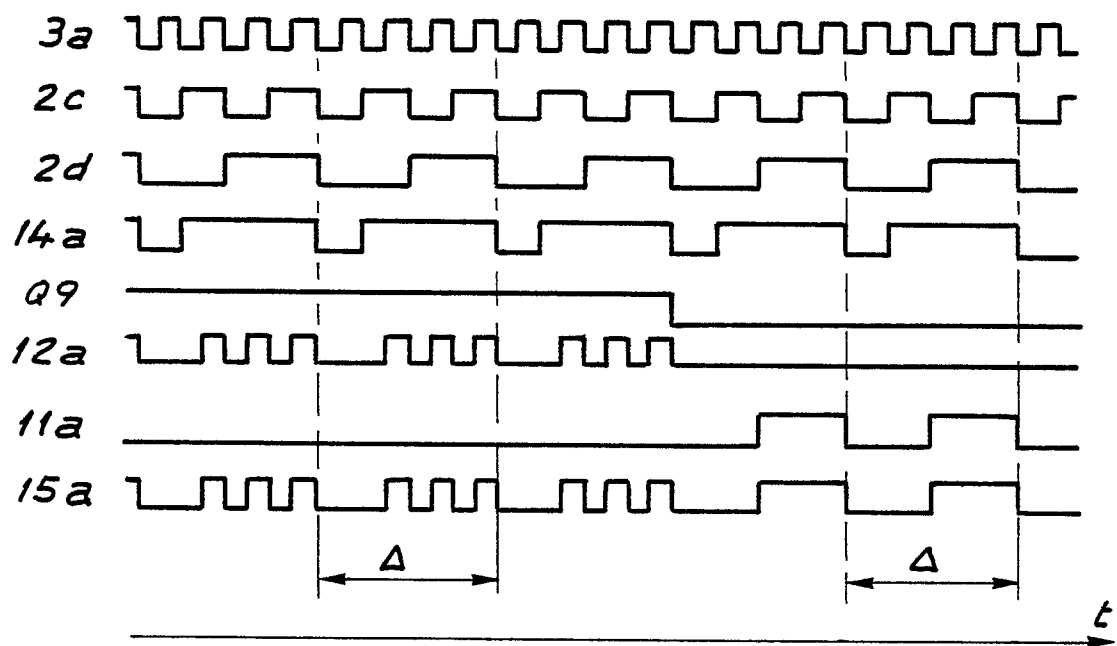


Fig. 6

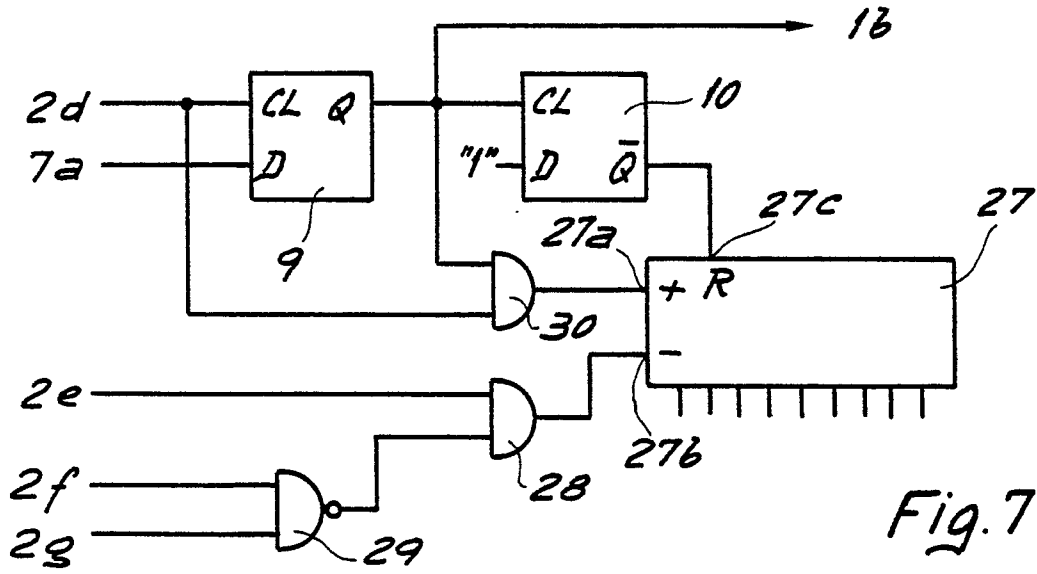


Fig. 7

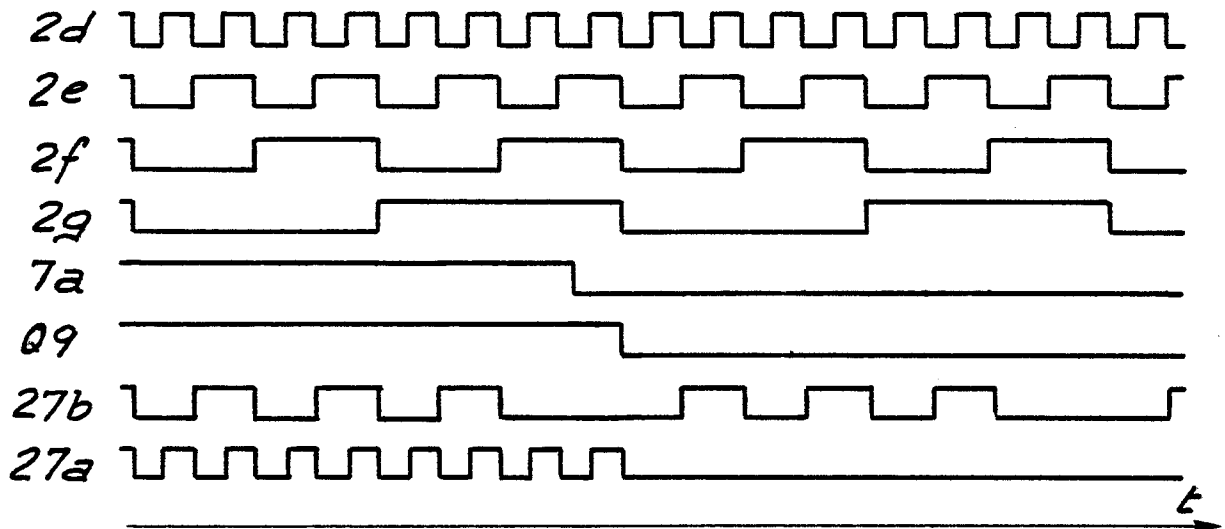


Fig. 8

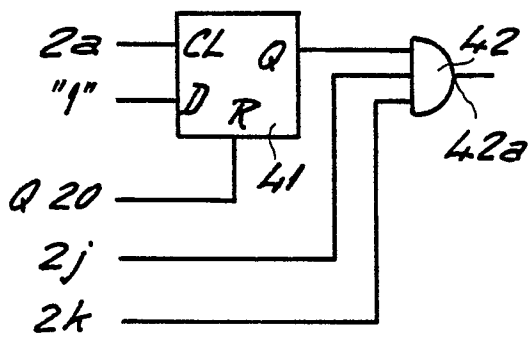


Fig. 9

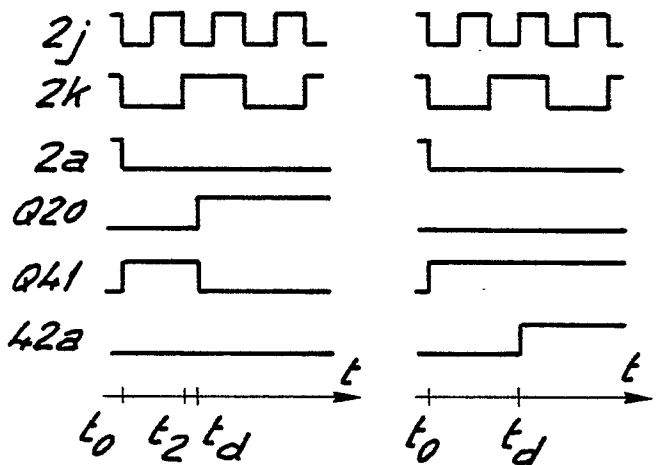


Fig. 10a

Fig. 10b



| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                           | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes                                                                                                                                                                                                                                       | Revendication concernée                                                                                                                                                                                                                                             | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl. 4)       |
| X                                                                                                                                                                                                                                   | EP-A-0 140 089 (OMEGA S.A.)<br>* Page 4, lignes 1-17; page 6, lignes 1-29; page 8, lignes 1-22; figures *                                                                                                                                                                                                             | 1, 3, 4                                                                                                                                                                                                                                                             | G 04 C 3/14                                 |
| A                                                                                                                                                                                                                                   | ---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 5, 6, 11-13                                                                                                                                                                                                                                                         |                                             |
| D, A                                                                                                                                                                                                                                | EP-A-0 060 806 (ASULAB S.A.)<br>* Page 7, line 6 - page 8, line 36; figures *                                                                                                                                                                                                                                         | 2-10                                                                                                                                                                                                                                                                |                                             |
| A                                                                                                                                                                                                                                   | 10ième CONGRES INTERNATIONAL DE CHRONOMETRIE, no. 1, 10 septembre 1979, pages 73-80, Büren, CH; A. PITTET et al.: "Amélioration de la fiabilité et de la consommation d'énergie de moteurs pas à pas par une technique d'auto-contrôle"<br>* Page 76, dernier paragraphe - page 78, colonne de droite, paragraphe 1 * | 1, 2                                                                                                                                                                                                                                                                |                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                     | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl. 4) |
|                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                     | G 04 C<br>H 02 P                            |
| A                                                                                                                                                                                                                                   | GB-A-2 082 806 (ETA S.A.)<br>* Page 4, lignes 89-112 *                                                                                                                                                                                                                                                                | 6                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                             |
| A                                                                                                                                                                                                                                   | EP-A-0 076 780 (ASULAB S.A.)<br>--- -/-                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
| Le présent rapport de recherche a été établi pour toutes les revendications                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
| Lieu de la recherche<br>LA HAYE                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Date d'achèvement de la recherche<br>21-10-1987                                                                                                                                                                                                                     | Examineur<br>EXELMANS U.G.J.R.              |
| CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
| X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie<br>A : arrière-plan technologique<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br><br>& : membre de la même famille, document correspondant |                                             |



| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                 |                                                 | Page 2                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | Revendication concernée                         | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl. 4)       |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | US-A-4 542 329 (M.T. XUAN)<br><br>-----                                         |                                                 |                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                 |                                                 | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl. 4) |
| Le présent rapport de recherche a été établi pour toutes les revendications                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                 |                                                 |                                             |
| Lieu de la recherche<br>LA HAYE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                 | Date d'achèvement de la recherche<br>21-10-1987 | Examineur<br>EXELMANS U.G.J.R.              |
| <b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b><br>X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie<br>A : arrière-plan technologique<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire<br>T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br>& : membre de la même famille, document correspondant |                                                                                 |                                                 |                                             |