

⑫

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

⑰ Numéro de dépôt: 84101561.3

⑤① Int. Cl.⁴: **G 04 C 3/14**

⑱ Date de dépôt: 21.01.82

⑳ Priorité: 18.03.81 CH 18026/81

④③ Date de publication de la demande:
17.04.85 Bulletin 85/16

⑧④ Etats contractants désignés:
DE FR GB

⑥① Numéro de publication de la demande initiale
en application de l'article 76 CBE: 0 060 806

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

⑦② Inventeur: **Remus, Hans-Jürgen**
Castel 2
CH-2024 St-Aubin(CH)

⑦② Inventeur: **Antognini, Luciano Marco**
Avenue de la Gare 67
CH-1022 Chavannes(CH)

⑦④ Mandataire: **de Montmollin, Henri et al.**
c/o ASUAG - Société Générale de l'Horlogerie Suisse S.A.
6, Faubourg du Lac
CH-2501 Biemme(CH)

⑤④ Procédé de mesure de la tension induite dans la bobine d'un moteur pas-à-pas par la rotation de son rotor.

⑤⑦ Le procédé consiste à produire une représentation de la différence entre le courant qui circulerait dans la bobine à un deuxième instant si la tension induite était nulle depuis un premier instant antérieur au deuxième instant et le courant qui circule effectivement dans la bobine à ce deuxième instant, cette différence étant proportionnelle à la tension induite.

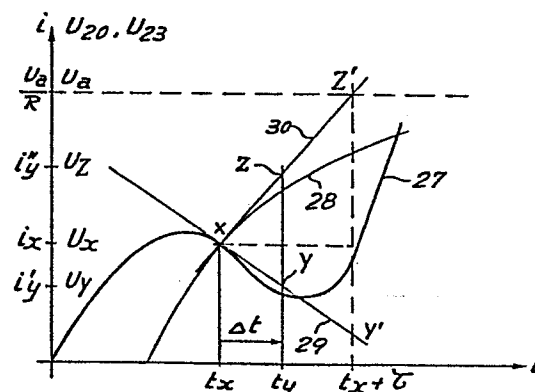


Fig. 7

Cas 359 EP

HM/g

PROCEDE DE MESURE DE LA TENSION INDUITE DANS LA BOBINE
D'UN MOTEUR PAS-A-PAS PAR LA ROTATION DE SON ROTOR

La présente invention se rapporte à un procédé de mesure de la tension induite dans la bobine d'un moteur pas-à-pas par la rotation de son rotor en réponse à l'application à la bobine d'une tension d'alimentation.

5 Les moteurs pas-à-pas sont utilisés dans de nombreux dispositifs où un organe mécanique doit être déplacé d'une quantité déterminée en réponse à un signal électrique. Ils sont notamment utilisés dans les pièces d'horlogerie électroniques. Dans celles-ci, les aiguilles d'affichage de l'heure doivent être déplacées d'une quantité déterminée en réponse à des impulsions de
10 période très précise fournies par une base de temps.

Dans ces pièces d'horlogerie, la plus grande partie de l'énergie fournie par la source d'alimentation électrique, qui est en général une pile, est consommée par le moteur pas-à-pas. Le volume
15 à disposition dans ces pièces d'horlogerie étant très restreint, il est important de limiter autant que possible la consommation de ce moteur pour augmenter la durée de vie de la pile ou, pour une durée de vie donnée, pour pouvoir diminuer son volume.

Dans la plupart des pièces d'horlogerie actuelles, la durée
20 des impulsions motrices envoyées à intervalle régulier au moteur est fixe. Cette durée est choisie de manière à garantir le bon fonctionnement du moteur même dans les plus mauvaises conditions, c'est-à-dire avec une tension de pile faible, pendant l'entraînement du mécanisme de calendrier, en présence de choc ou de champ magnétique externe, etc. Comme ces mauvaises conditions ne se
25 présentent que rarement, le moteur est le plus souvent suralimenté.

Il est possible de réduire notablement la consommation en énergie du moteur en adaptant l'énergie fournie par les impulsions

motrices à la charge momentanée qu'il doit entraîner et à la tension d'alimentation.

05 Une solution à ce problème consiste à prévoir un circuit formateur d'impulsions capable de produire des impulsions de durées différentes et un dispositif qui détecte la rotation ou l'absence de rotation du moteur. La durée des impulsions motrices envoyées au moteur est progressivement réduite jusqu'à ce qu'un pas non effectué soit détecté. Une impulsion de rattrapage est alors envoyée au moteur et l'énergie des impulsions motrices normales est fixée à une valeur supérieure. Cette valeur est maintenue pendant un certain temps. Si le moteur a tourné normalement pendant cette période, la durée des impulsions est à nouveau réduite. Une telle solution ne permet pas une adaptation permanente et rapide des impulsions motrices à la charge du moteur. De plus, cette adaptation lente et l'envoi d'impulsions de rattrapage en cas de non rotation fait que la consommation en énergie est plus élevée qu'il n'est nécessaire.

10 Pour éviter cet inconvénient, il est connu de prévoir des dispositifs qui adaptent la durée de chaque impulsion motrice à la charge que le moteur doit entraîner en réponse à cette impulsion motrice.

20 Le brevet américain 3.500.103 décrit un dispositif qui détecte le mouvement de l'organe mobile du moteur par l'intermédiaire de la tension induite dans une bobine de détection distincte de la bobine motrice et qui interrompt l'impulsion motrice lorsque l'organe mobile atteint soit une position soit une vitesse déterminée.

25 Le brevet américain 3.855.781 propose des solutions selon lesquelles la position du rotor est détectée par la mesure de la tension induite dans une bobine auxiliaire ou créée par la déformation d'un capteur piézo-électrique au passage des dents d'une des roues du train d'engrenage entraîné par le moteur. Cette tension est utilisée pour interrompre l'impulsion motrice.

30 Les dispositifs décrits dans les deux brevets ci-dessus nécessitent des éléments supplémentaires pour fonctionner, ce qui rend leur mise en oeuvre chère et compliquée.

35

Le brevet français 2.200.675 propose de détecter la variation de courant dans la bobine de commande du moteur et d'interrompre l'impulsion motrice lorsque ce courant passe par un minimum. Les limites de cette détection sont imposées par la forme du courant qui dépend de la constante de temps du circuit, de la force contre-électromotrice induite, ainsi que de la charge du moteur. Dans certains cas, le minimum de courant peut disparaître, ce qui rend inefficace le dispositif d'asservissement.

Par ailleurs, le brevet américain 4.114.364 décrit un circuit d'asservissement de la durée des impulsions motrices à la charge du moteur, qui comporte des moyens pour détecter le courant dans la bobine de commande et des moyens pour interrompre l'impulsion lorsque ce courant atteint une valeur égale au rapport entre la tension d'alimentation de la bobine et sa résistance en courant continu, c'est-à-dire lorsque le rotor a terminé son pas. On prévoit également la possibilité d'interrompre l'impulsion avant que le courant ait atteint cette valeur.

Tous les dispositifs décrits ci-dessus utilisent la mesure d'une grandeur physique telle que la vitesse ou la position du rotor ou telle que le courant circulant dans la bobine. Cette mesure est utilisée directement ou par comparaison avec une valeur de référence pour commander l'interruption de l'impulsion motrice. Or aucune de ces grandeurs physiques ne donne d'indication absolue sur l'instant exact où cette impulsion motrice doit être interrompue pour que la consommation d'énergie du moteur soit réellement minimale. Tous ces dispositifs provoquent donc l'interruption de l'impulsion motrice à un instant choisi arbitrairement et qui n'est en général pas l'instant optimum. Dans la pratique, ces dispositifs doivent tenir compte de facteurs de sécurité tels que, la plupart du temps, le moteur consomme trop d'énergie ou ne fonctionne pas avec sécurité.

Cet inconvénient est évité par le procédé selon l'invention, qui consiste à mesurer la tension induite dans la bobine du moteur par le mouvement du rotor, et à interrompre l'impulsion motrice en dépendance de cette mesure de tension induite.

Cette tension induite dans la bobine par le mouvement du

rotor est étroitement liée à l'énergie mécanique fournie par le moteur, par la relation

$$\int U_r . i . dt = \int C . w . dt$$

05

où U_r est cette tension induite, i est le courant qui circule dans la bobine, C le couple fourni par le moteur et w la vitesse angulaire du rotor.

10

Le second terme de l'équation ci-dessus représente l'énergie mécanique totale fournie par le moteur pendant un de ses pas, et le premier terme représente l'énergie électrique qui est transformée, par le moteur, en cette énergie mécanique.

15

La relation ci-dessus montre que la tension U_r induite dans la bobine par la rotation du rotor est directement liée à l'énergie mécanique fournie par le moteur. Le courant i qui intervient également dans cette relation, ainsi que toutes les autres grandeurs physiques qui peuvent être mesurées sur un moteur en rotation, dépendent également de facteurs non liés à cette énergie mécanique, telles que la tension de la source d'alimentation et la résistance ohmique de la bobine. Il en découle que la mesure de la tension induite U_r constitue le procédé le plus adéquat pour déterminer avec précision et sécurité l'instant optimal d'interruption de l'impulsion motrice.

20

25

Il faut noter que la tension induite dans la bobine par le mouvement du rotor ne constitue qu'une partie de la tension induite globale qui est citée dans le brevet français 2.200.675 et dont le maximum coïncide avec le minimum du courant circulant dans la bobine, lorsque ce minimum existe. L'autre partie de la tension induite globale est constituée par la tension d'auto-induction créée dans la bobine par les variations du courant qui y circule.

30

35

Cette tension d'auto-induction n'étant pas liée directement à l'énergie fournie par le moteur, la tension induite globale ne constitue pas une grandeur adéquate pour déterminer l'instant optimum d'interruption de l'impulsion motrice. A cela s'ajoute le fait, déjà cité, que le courant dans la bobine ne présente pas toujours de minimum. En outre, ce minimum, lorsqu'il est présent,

n'est pas suffisamment net pour que sa détection puisse se faire avec précision.

L'invention va maintenant être décrite plus en détail à l'aide du dessin dans lequel :

- 05 - La figure 1 représente le schéma équivalent d'un moteur pas-à-pas;
- La figure 2a illustre la variation du courant dans la bobine du moteur dans deux cas de charge de ce moteur;
- La figure 2b illustre la variation de la tension induite dans 10 la bobine par la rotation du rotor dans les mêmes cas de charge;
- La figure 3 illustre la variation de la durée de l'impulsion motrice minimum et du temps mis par la tension induite pour atteindre un seuil déterminé en fonction de la charge entraînée par le moteur;
- 15 - La figure 4 est un schéma bloc d'un exemple de dispositif selon l'invention;
- La figure 5 illustre le fonctionnement du dispositif de la figure 4;
- La figure 6 est un schéma d'un premier exemple de circuit de 20 mesure de la tension induite dans la bobine par la rotation du rotor;
- La figure 7 illustre le principe de fonctionnement du circuit de la figure 6;
- La figure 8 illustre le fonctionnement du circuit de la 25 figure 6;
- La figure 9 est un schéma d'un deuxième exemple de circuit de mesure de la tension induite dans la bobine par la rotation du rotor;
- La figure 10 illustre le fonctionnement du circuit de la 30 figure 9;
- La figure 11 est un schéma d'un troisième exemple de circuit de mesure de la tension induite dans la bobine par la rotation du rotor;
- La figure 12 est un schéma d'un premier exemple de circuit 35 utilisant la mesure de la tension induite dans la bobine par la rotation du rotor pour interrompre l'impulsion motrice;

- La figure 13 illustre le fonctionnement du circuit de la figure 12;

05 - La figure 14 est un schéma d'un deuxième exemple de circuit utilisant la mesure de la tension induite dans la bobine par la rotation du rotor pour interrompre l'impulsion motrice; et

- La figure 15 illustre le fonctionnement du circuit de la figure 14.

10 La figure 1 représente le schéma équivalent d'un moteur pas-à-pas. La bobine de ce moteur est représentée par une bobine 1, d'inductivité L et de résistance nulle, et par une résistance 2, de valeur R égale à la résistance de la bobine du moteur. La source de tension induite dans la bobine par la rotation du rotor est symbolisée par une source de tension 3. La valeur de cette tension induite est désignée par U_r .

15 Les courbes 4 et 5 de la figure 2a, qui sont bien connues, illustrent la variation du courant i dans la bobine du moteur en fonction du temps, pendant l'impulsion motrice, dans des cas où la charge entraînée par le moteur est faible, respectivement forte.

20 Les courbes 6 et 7 de la figure 2b illustrent, dans les mêmes cas de charge, la variation de la tension U_r , mesurée par un dispositif qui sera décrit plus loin.

25 Les courbes 4 et 5 montrent que, juste après l'instant t_0 d'enclenchement de l'impulsion motrice, le courant dans la bobine croît suivant une loi exponentielle, avec une constante de temps égale à L/R , indépendamment de la charge que doit entraîner le moteur. Le rotor est encore immobile et la tension U_r est nulle (figure 2b).

30 A l'instant t_1 , le rotor commence à tourner. La source 3 commence à fournir la tension U_r induite par la rotation du rotor, et le courant i dans la bobine cesse donc d'avoir une variation exponentielle. Il suit une courbe qui dépend de la charge entraînée par le moteur, et dont les courbes 4 et 5 sont deux exemples. La tension U_r suit une courbe qui dépend également de la charge entraînée par le moteur. La courbe 6 de la figure 2b correspond à la courbe 4 de la figure 2a, et la courbe 7 à la courbe 5.

35 Quelle que soit la charge entraînée par le moteur, la tension U_r passe par un maximum, avant de passer par zéro à l'instant où

le rotor passe par sa position d'équilibre avec courant, c'est-à-dire la position qu'il finit par prendre, après quelques oscillations, si l'impulsion motrice n'est pas interrompue.

05 La tension U_r oscille ensuite autour de zéro jusqu'à ce que le rotor s'immobilise.

Il existe plusieurs possibilités d'exploiter l'information fournie par la mesure de la tension U_r . Celle-ci, comme les autres grandeurs physiques qui peuvent être mesurées sur le moteur, ne présente pas de point particulier qui coïncide exactement avec l'instant où l'impulsion motrice doit être interrompue pour que la consommation du moteur soit minimum.

15 Cependant, des mesures ont montré que quelle que soit l'information qui est extraite de la mesure, cette information est liée très directement à la durée optimum de l'impulsion motrice. La loi qui lie cette information et cette durée est toujours une loi simple, qui permet d'exploiter facilement l'information extraite de la mesure de la tension U_r .

20 Parmi les informations qui peuvent être extraites de la mesure de la tension U_r , on peut citer la position dans le temps ou l'amplitude du maximum de cette tension U_r , le temps mis par cette tension U_r pour atteindre un certain seuil sur son flanc montant ou sur son flanc descendant, sa dérivée ou son intégrale, etc. Des essais ont montré que l'information donnée par le temps mis par la tension U_r pour atteindre un certain seuil est la plus facile à extraire de la mesure de la tension U_r et à exploiter pour déterminer la durée optimum de l'impulsion motrice.

25 La figure 3 illustre la variation de la durée minimum T_1 de l'impulsion motrice nécessaire pour faire tourner un moteur en fonction du couple C que ce moteur doit fournir. Cette variation est sensiblement linéaire et présente une dispersion assez faible pour un type de moteur déterminé. Elle peut être exprimée par la relation

$$T_1 = T_{01} + a.C$$

35

où T_{01} est la durée minimum de l'impulsion motrice pour une charge nulle et a la pente de la droite.

La variation du temps T2 mis par la tension U_r pour atteindre un seuil U_s déterminé a également été reportée sur cette figure 3. Elle est également sensiblement linéaire et peut être exprimée par la relation

05

$$T2 = T02 + b.C$$

10

où T02 est le temps mis par la tension U_r pour atteindre la tension de seuil U_s en l'absence de charge et b est la pente de la droite.

Il est intéressant de noter que, dans une assez large gamme de valeurs de la tension de seuil U_s , la relation entre T2 et C reste linéaire. Les termes T02 et b dépendent bien entendu de la tension U_s choisie.

15

La relation entre les temps T1 et T2 est également linéaire et elle est donnée par l'équation :

$$T1 = \frac{a}{b} (T2 - T02 + \frac{b}{a} T01)$$

20

Dans cette équation, les termes a, b, T01 et T02 sont des constantes pour un type de moteur donné et pour une tension de seuil U_s déterminée. Elle peut donc s'écrire sous la forme

25

$$T1 = k(T2 + K) \quad (1)$$

avec $k = \frac{a}{b}$ et $K = \frac{b}{a} T01 - T02$

30

Les termes k et K peuvent être facilement calculés à partir de la mesure des temps T01 et T02 et des temps T1 et T2 pour une charge connue. Une fois qu'ils ont été déterminés, pour un type de moteur, ils peuvent être utilisés dans le circuit de commande de ce type de moteur, dont la figure 4 donne le schéma de principe. La figure 5 montre la variation des signaux en quelques points de cette figure 4.

35

Dans la figure 4, la référence 8 désigne un circuit dont la sortie délivre un signal S8 à un circuit de commande 9 chaque fois que le moteur 10 doit avancer d'un pas.

05 Le circuit 8 peut être constitué, à titre d'exemple non limitatif, par l'oscillateur et la chaîne de division de fréquence d'une montre électronique, et il peut être agencé de manière à délivrer des signaux périodiques ayant diverses fréquences. Ces signaux seront décrits plus loin.

10 En réponse au signal S8, le circuit de commande 9 délivre une impulsion motrice I au moteur 10. Dans le cas où ce moteur 10 est un moteur pas-à-pas tel qu'il est couramment utilisé dans les montres, la polarité correcte de l'impulsion motrice I est déterminée également par le circuit 9.

15 Un circuit de mesure 11 est relié au moteur 10. Il est agencé, d'une manière dont des exemples seront donnés plus loin, pour délivrer une tension U_m proportionnelle à la tension U_r induite dans la bobine du moteur par la rotation du rotor.

20 La tension mesurée U_m est appliquée à un circuit détecteur 12 qui délivre un signal S12 à l'instant où cette tension U_m dépasse une tension de référence U_s judicieusement choisie.

25 Un circuit de calcul 13, dont des exemples de réalisation seront décrits plus loin, délivre un signal S13 un certain temps après avoir reçu le signal S12. L'instant où ce signal S13 est délivré dépend du temps qui s'est écoulé entre le début de l'impulsion motrice et l'apparition du signal S12, et des deux constantes k et K qui sont également fournies, sous une forme adéquate, au circuit de calcul 13. Le signal S13 est utilisé par le circuit de commande 9 pour interrompre l'impulsion motrice I.

30 La figure 6 donne le schéma de principe d'un exemple de circuit 11 de mesure de la tension U_r . Ce circuit 11, comme les autres circuits qui seront décrits plus loin, est alimenté par une source de tension, non représentée. Cette source délivre une tension positive $+U_a$ et une tension négative $-U_a$ par rapport à un point milieu qui est mis à la masse du circuit. La tension $-U_a$ est destinée, notamment, à alimenter les amplificateurs différentiels
35 utilisés dans ces circuits.

Cette figure 6 montre le moteur 10 branché, de manière classique, dans un pont de quatre transistors MOS 14, 15, 16 et 17 faisant partie du circuit de commande 9 de la figure 4. Les transistors 14 et 15, de type p, ont leurs sources reliées au pôle positif $+U_a$ de la source d'alimentation, non représentée. Les transistors 16 et 17, de type n, ont leur source reliée à la masse du circuit, à travers une résistance de mesure 18, de faible valeur, faisant partie du circuit de mesure 11 de la figure 4. Les drains des transistors 14 et 16 sont reliés à l'une des bornes du moteur 10, et les drains des transistors 15 et 17 à l'autre.

Les électrodes de commande des quatre transistors 14 à 17 sont reliées à un circuit logique, non représenté dans cette figure 6, qui délivre les signaux logiques nécessaires à la commande de ces transistors. Un exemple de ce circuit logique sera donné plus loin.

Le circuit de mesure 11 comporte un amplificateur 20 dont l'entrée est reliée au point 19 commun aux sources des transistors 16 et 17 et à la résistance 18. Le gain de cet amplificateur 20 est choisi de manière que sa tension de sortie U_{20} soit égale à la tension d'alimentation $+U_a$ lorsque le courant i circulant dans la bobine du moteur est égale à U_a/R .

La sortie de cet amplificateur 20 est reliée à l'entrée d'une porte de transmission 21, et à l'entrée inverseuse d'un amplificateur différentiel 22. La porte de transmission 21 est commandée par un signal logique 21C qui est fourni, par exemple, par le circuit 8 de la figure 4, et qui sera décrit plus loin.

La sortie de cette porte de transmission 21 est reliée au point 23 de jonction d'une résistance 24, ayant une valeur R_{24} , et d'un condensateur 25 ayant une capacité C_{25} . Le point 23 est également relié, à travers un amplificateur 26, à l'entrée non inverseuse de l'amplificateur différentiel 22.

L'amplificateur 26 a pour seul but de diminuer la charge que constituerait, pour le circuit R-C 24-25, l'entrée de l'amplificateur 22. Le gain de cet amplificateur 26 est choisi égal à 1.

Le circuit formé par la résistance 24 et le condensateur 25 est branché entre la borne $+U_a$ de la source d'alimentation et la masse. La valeur R_{24} de la résistance 24 et la capacité C_{25} du

condensateur 25 sont choisies de manière que

$$R_{24}.C_{25} = \frac{L}{R}$$

05

où L et R sont, comme ci-dessus, l'inductivité et la résistance de la bobine du moteur.

10

Lorsque le signal 21C est à l'état "0", la porte de transmission 21 est dans son état bloquant. La tension au point 23 varie donc de manière exponentielle, vers sa valeur asymptotique, qui est égale à la tension d'alimentation $+U_a$, avec la même constante de temps $\tau = R_{24}.C_{25}$ que le courant qui circulerait dans la bobine du moteur si le rotor était bloqué, c'est-à-dire si la tension U_r était nulle.

15

Lorsque la porte de transmission 21 est dans son état conducteur, la tension au point 23 est égale à la tension de sortie de l'amplificateur 20.

20

La figure 7 illustre le principe de fonctionnement de ce circuit. Dans cette figure 7, la courbe 27 représente la variation, pendant une impulsion motrice, de la tension U_{20} de sortie de l'amplificateur 20. Cette courbe 27 est une image du courant i qui circule dans la bobine du moteur 10.

25

de l'amplificateur

Tant que la porte de transmission 21 reste conductrice, la tension U_{23} au point 23 suit la même courbe 27. La tension U_{22} de sortie de l'amplificateur différentiel 22 reste donc nulle. Si, à un instant t_x quelconque, la porte 21 devient bloquante, la tension U_{20} continue à suivre la courbe 27. La tension U_{23} , par contre, commence à suivre la courbe 28, qui est la courbe exponentielle passant par le point X, de constante de temps $\tau = R_{24}.C_{25}$ et de valeur asymptotique égale à $+U_a$. Cette courbe 28 est exactement la même que celle que suivrait la tension U_{20} si, à l'instant t_x , le rotor était brusquement bloqué, ce qui annulerait la tension U_r . Elle est donc l'image du courant i' qui circulerait, dans ces conditions, dans la bobine du moteur.

30

35

Les tensions U_{20} et U_{23} étant appliquées aux entrées inverses et directes de l'amplificateur différentiel 22, la tension de sortie U_{22} de ce dernier vaut donc $U_{23} - U_{20}$.

On va montrer ci-dessous que, pendant un court instant après que la porte 21 est devenue bloquante, cette tension $U_{22} = U_{23} - U_{20}$ est proportionnelle à la tension U_{rx} , c'est-à-dire à la valeur de la tension induite dans la bobine du moteur par la rotation du rotor à l'instant t_x .

La tension U_{20} est proportionnelle au courant i qui circule dans la bobine pendant une impulsion motrice. D'une manière générale, ce courant i peut être exprimé par la relation

$$i(t) = \frac{U_a - U_r - L \frac{di}{dt}}{R} \quad (2)$$

qui se déduit facilement du circuit de la figure 1 dans le cas où la tension $+U_a$ est appliquée au moteur par son circuit de commande, non représenté dans cette figure 1.

En chaque point de la courbe 27, la pente est donnée par l'équation suivante, qui se déduit facilement de l'équation (2):

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_a - U_r - R \cdot i}{L}$$

Au point X, cette pente est donnée par :

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_x} = \frac{U_a - U_{rx} - R \cdot i_x}{L}$$

où U_{rx} et i_x sont respectivement les valeurs de U_r et de i au point X.

La tangente 29 à la courbe 27 au point X a donc pour équation

$$i'(t) = \frac{U_a - U_{rx} - R \cdot i_x}{L} \cdot t + C_1 \quad (3)$$

où C_1 est une constante d'intégration qui peut se calculer en tenant compte de la condition

$$i' = i_x \text{ pour } t = t_x$$

Tous calculs faits, l'équation de la tangente 29 devient :

$$i'(t) = i_x + \frac{U_a - U_{rx} - R.i_x}{L} (t - t_x) \quad (3)$$

Au point Y, pour lequel $t = t_y$, on trouve :

$$i'_y = i_x + \frac{U_a - U_{rx} - R.i_x}{L} (t_y - t_x) \quad (4)$$

On a vu ci-dessus que si, à l'instant t_x , le rotor était brusquement bloqué, ce qui annulerait la tension U_r , le courant i circulant dans la bobine suivrait, après cet instant t_x , une courbe exponentielle dont la courbe 28 est une image. Dans ce cas, l'équation (2) ci-dessus deviendrait :

$$i(t) = \frac{U_a - L \frac{di}{dt}}{R} \quad (5)$$

Les mêmes raisonnements que ci-dessus montrent que l'ordonnée i''_y du point Z situé en $t = t_y$ sur la tangente 30 à l'exponentielle 28 est égale à

$$i''_y = i_x + \frac{U_a - R.i_x}{L} (\Delta t) \quad (6)$$

où $\Delta t = t_y - t_x$.

En soustrayant l'équation (4) ci-dessus de cette équation (6), on trouve

$$i''_y - i'_y = \frac{U_{rx}}{L} (\Delta t)$$

ou encore

$$U_{rx} = L. \frac{i''_y - i'_y}{\Delta t} \quad (7)$$

05

On voit donc que en chaque point X de la courbe 27, la tension U_{rx} induite dans la bobine par la rotation du rotor est proportionnelle au segment Y - Z, pour un temps de mesure $\Delta t = t_y - t_x$ donné.

10

Notamment, pour $\Delta t = \tau$, U_{rx} est égale à la longueur du segment Z' - Y' de la figure 7, où Y' et Z' sont les points des tangentes 29 et 30 situés à l'abscisse $(t_x + \tau)$. L'ordonnée du point Z' est égale à U_a/R qui est la valeur asymptotique de l'exponentielle 28.

15

Si Δt est choisi suffisamment petit, les tangentes 29 et 30 peuvent être confondues avec les courbes 27 et 28. Le courant i'_y peut être remplacé par le courant i_y et le courant i''_y par le courant qui circulerait dans la bobine à l'instant t_y si la tension induite U_r était annulée à l'instant t_x .

20

Si on se souvient que la tension U20 est proportionnelle au courant i et que la tension U23 est proportionnelle au courant qui circulerait dans la bobine après l'instant t_x si la tension induite était annulée à cet instant t_x , on voit que l'équation (7) ci-dessus peut s'écrire

25

$$U_{rx} = J. \frac{U23_y - U20_y}{\Delta t}$$

30

où J est un facteur de proportionnalité qui dépend de la valeur de la résistance 18 et du gain de l'amplificateur 22, et $U23_y$ et $U20_y$ sont les valeurs des tensions U23 et U20 à l'instant t_y .

Les figures 8a et 8b illustrent le fonctionnement du circuit de la figure 6 lorsque la porte de transmission 21 est commandée par un signal 21C tel que celui qui est représenté à la figure 8c.

35

Dans le présent exemple, la porte de transmission 21 est conductrice lorsque le signal 21C est à l'état logique "1", et

bloquée lorsque ce signal 21C est à l'état logique "0". Le signal de commande 21C est constitué, par exemple, par des impulsions ayant une période de 250 micro-secondes environ qui sont à l'état logique "1" pendant quelques micro-secondes, et à l'état "0" le reste du temps. La porte de transmission 21 devient donc conductrice pendant quelques microsecondes toutes les 250 microsecondes, et elle est bloquante le reste du temps.

A la figure 8a, la courbe 31 représente à nouveau la tension U20, qui est une image du courant i dans la bobine. La courbe 32 en dents de scie qui lui est superposée représente la tension U23. En effet, chaque fois que la porte de transmission 21 devient conductrice, c'est-à-dire lorsque le signal 21C est à l'état "1", la tension U23 devient égale à la tension U20. Lorsque la porte de transmission 21 est bloquante, c'est-à-dire lorsque le signal 21C est à l'état "0", la tension U23 varie selon une courbe telle que la courbe exponentielle 28 représentée à la figure 7.

La courbe en dents de scie 33 de la figure 8b représente, à une échelle différente de celle de la figure 8a, la tension U22 de sortie de l'amplificateur différentiel 22. Cette tension U22 est égale à zéro chaque fois que la porte de transmission 21 est conductrice, et elle est égale à la différence des tensions U23 et U20 lorsque la porte de transmission 21 est bloquée. Comme les intervalles de temps pendant lesquels la porte de transmission 21 est bloquée sont égaux entre eux, la courbe 34, qui est l'enveloppe de la courbe 33, est une image de la tension U_r induite dans la bobine du moteur par la rotation du rotor.

Cette enveloppe 34 pourrait être obtenue en filtrant la tension U22 dans un filtre passe-bas. Le signal de sortie de ce filtre pourrait être amplifié dans un amplificateur dont le gain serait choisi en tenant compte de tous les facteurs de proportionnalité introduits dans le circuit de la figure 6 par le choix de la résistance de mesure 18, du gain de l'amplificateur 20 et de la période du signal de commande 21C. Le signal de sortie de cet amplificateur serait alors égal à la tension induite U_r . Mais ce filtrage et cette amplification ne sont pas nécessaires. La tension U22 elle-même peut être directement utilisée comme tension de mesure U_m dans le circuit de la figure 4. La tension U_s ' à laquelle

le la tension U_m est comparée dans le circuit 12 de la figure 4 doit bien entendu être choisie en tenant compte des facteurs de proportionnalité ci-dessus.

05 Il faut noter que la tension U_{22} est indépendante de la tension d'alimentation U_a , puisque les tensions U_{23} et U_{20} sont toutes deux proportionnelles à cette tension U_a .

10 La différence des courants i''_y et i'_y dont il a été montré ci-dessus qu'elle est proportionnelle à la tension U_{rx} induite dans la bobine du moteur par la rotation du rotor au temps t_x (voir la figure 7), peut être écrite de la manière suivante :

$$i''_y - i'_y = i''_y - i'_x + i'_x - i'_y$$

En termes de tension, cette équation peut s'écrire :

15

$$U_z - U_y = U_z - U_x + U_x - U_y \quad (8)$$

La figure 7 montre que :

20

$$U_z - U_x = (U_a - U_x) \frac{\Delta t}{\tau}$$

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

25

$$U_z - U_y = (U_a - U_x) \frac{\Delta t}{\tau} + U_x - U_y \quad (9)$$

Cette expression montre que la tension U_{rx} , qui est proportionnelle à $(U_z - U_y)$, peut être mesurée sans que la tension U_z elle-même doive être mesurée.

30

La figure 9 montre le schéma de principe d'un circuit de mesure 11 (figure 4) fournissant une tension U_{m1} proportionnelle à U_{rx} sur la base de l'équation (9) ci-dessus.

35

Dans cette figure 9, la résistance 18 de mesure du courant circulant dans le moteur (non représenté dans cette figure 9) et l'amplificateur 20 dont la tension de sortie est une image de ce courant sont identiques à la résistance 18 et à l'amplificateur 20 de la figure 6.

La sortie de l'amplificateur 20 est reliée, par l'intermé-

diaire d'une porte de transmission 61 à une première borne d'un condensateur 62 de capacité C62, et à l'entrée non-inverseuse d'un amplificateur différentiel 63. La deuxième borne du condensateur 62 est reliée à la masse du circuit.

05 La sortie de l'amplificateur 63 est reliée à son entrée inverseuse. Le gain de cet amplificateur est donc égal à un. Sa sortie est également reliée, à travers deux portes de transmission 64 et 65, aux premières bornes de deux condensateurs 66 et 67, de capacité C66 et C67.

10 La deuxième borne du condensateur 66 est reliée à travers une porte de transmission 68 à la borne $+U_a$ de la source d'alimentation et la deuxième borne du condensateur 67 est reliée à la sortie de l'amplificateur 20 par une porte de transmission 69.

15 La première borne du condensateur 66 et la deuxième borne du condensateur 67 sont reliées à une première borne de sortie du circuit, désignée par B1, par des portes de transmission 70, respectivement 71. La deuxième borne du condensateur 66 et la première borne du condensateur 67 sont reliées à une deuxième borne de sortie du circuit, désignée par B2, par des portes de transmission 72, respectivement 73.

20 Les portes de transmission 61 et 70 à 73 sont commandées ensemble par un signal désigné par C1, et les portes de transmission 64, 65, 68 et 69 sont commandées, également ensemble, par un signal désigné par C2.

25 Ces signaux C1 et C2, qui peuvent être délivrés, par exemple, par le circuit 8 de la figure 4, et qui sont représentés à la figure 10, ont des périodes identiques de 0,5 millisecondes par exemple et des durées également identiques, faibles par rapport à leur période, de 30 microsecondes par exemple. Chacun d'eux apparaît au milieu de la période de l'autre. La figure 7 peut également être utilisée pour comprendre le fonctionnement du circuit de la figure 9.

30 Lorsque, à un instant t_x le signal C1 met la porte de transmission 61 dans son état conducteur, le condensateur 62 se charge à la tension U_x qui est proportionnelle au courant i_x circulant à cet instant dans la bobine. La tension U_x apparaît à la sortie de l'amplificateur 63. Le rôle des portes de transmission 70 à 73 qui

35

sont également rendues conductrices à cet instant sera discuté plus loin.

05 A l'instant t_y , le signal C2 rend les portes de transmission 64, 65, 68 et 69 conductrices. La tension U_x mémorisée par le condensateur 62 et l'amplificateur 63 est donc appliquée à la première borne du condensateur 66 et du condensateur 67. En même temps, la tension U_a est appliquée à la deuxième borne du condensateur 66 et une tension proportionnelle au courant qui circule à cet instant t_y dans la bobine du moteur est appliquée à la deuxième borne du condensateur 67. Comme le temps Δt qui sépare les instants t_x et t_y est court, cette tension peut être considérée comme étant la tension U_y de la figure 7. A cet instant t_y , le condensateur 66 se charge donc à une tension $U_{66} = U_a - U_x$ et le condensateur 67 se charge à une tension $U_{67} = U_x - U_y$.

15 Les charges Q_{66} et Q_{67} emmagasinées dans ces condensateurs sont donc respectivement :

$$Q_{66} = C_{66} (U_a - U_x)$$

et $Q_{67} = C_{67} (U_x - U_y)$

20

L'impulsion C1 suivante rend les portes de transmission 70 à 73 conductrices. Pendant cette impulsion C1, les condensateurs 66 et 67 sont donc branchés en parallèle avec les bornes de sortie B1 et B2 du circuit. La tension U_{m1} qui apparaît alors à ces bornes est égale à :

25

$$U_{m1} = \frac{Q_{66} + Q_{67}}{C_{66} + C_{67}} = \frac{1}{C_{66} + C_{67}} [C_{66}(U_a - U_x) + C_{67}(U_x - U_y)] \quad (10)$$

30

Si les condensateurs 66 et 67 sont choisis de manière que $C_{66} = C_{67} \frac{\Delta t}{\tau}$, l'équation (10) peut s'écrire :

$$U_{m1} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{\tau}} [(U_a - U_x) \frac{\Delta t}{\tau} + U_x - U_y] \quad (11)$$

35

L'expression entre les crochets est proportionnelle à la tension U_{rx} (voir l'équation 9 ci-dessus). La tension U_{m1} est donc

également proportionnelle à U_{rx} .

Il faut noter que, avec ce circuit, la tension U_{m1} représentative de la tension U_r induite à l'instant t_x dans la bobine par la rotation du rotor n'apparaît à la sortie du circuit que à un instant $t_x + 2\Delta t$. Ce retard n'est pas gênant puisque Δt est court.

Il faut également noter que l'une ou l'autre des bornes de sortie B1 et B2 peut être mise à la masse du circuit sans que le fonctionnement de celui-ci soit modifié.

Dans le circuit de la figure 6, la précision de la valeur mesurée dépend directement de la précision de la valeur de la résistance 24 et du condensateur 25. Il est bien connu qu'il est difficile, dans une fabrication de série, d'obtenir une grande précision pour de tels éléments. Le circuit de la figure 9 ne présente pas cet inconvénient. La précision de la mesure ne dépend en effet que du rapport des capacités des condensateurs 66 et 67. Or, même en fabrication de grande série, ce rapport peut être garanti avec une très bonne précision.

Le circuit de la figure 9, comme celui de la figure 6 d'ailleurs, présente cependant un autre petit inconvénient. Pour faire les calculs et les raisonnements ci-dessus, il a été admis que les transistors 14 à 17 du circuit de commande du moteur (figure 6) ne présentent aucune résistance interne lorsqu'ils sont conducteurs. En réalité, cette résistance interne n'est pas nulle, et l'asymptote des courbes exponentielles telles que la courbe 28 de la figure 7 n'est pas située à l'ordonnée U_a mais à une ordonnée $U'_a = U_a - \Sigma R_T \cdot \frac{U_a}{R + \Sigma R_T}$. Dans cette expression, R représente la valeur de la résistance de mesure 18, et ΣR_T la somme des résistances internes des transistors conducteurs. Ces résistances étant différentes d'un transistor à l'autre et, en plus, variables en fonction du courant qui traverse les transistors, cette valeur U'_a ne peut pas être déterminée avec exactitude.

L'erreur sur la mesure de la valeur de la tension induite par la rotation du rotor causée par le remplacement de U'_a par U_a n'est pas très importante. Néanmoins la figure 11 montre le schéma d'un troisième circuit de mesure qui élimine cette source d'erreur.

Tous les éléments décrits à propos de la figure 9 se retrou-

vent dans la figure 11, à l'exception des portes de transmission 68 et 72 qui ne figurent pas dans ce schéma. En outre, la deuxième borne du condensateur 66 et la borne de sortie B2 sont reliées directement à la masse.

05 La borne de sortie B1 du circuit de la figure 9 est reliée à l'entrée inverseuse d'un amplificateur différentiel 74. L'entrée non-inverseuse de cet amplificateur 74 est reliée à la masse. La sortie de cet amplificateur 74 est reliée à son entrée inverseuse par un condensateur 75 branché en parallèle avec une porte de transmission 76. La sortie de l'amplificateur 74 est en outre re-
10 liée, à travers une porte de transmission 77, à l'entrée non-inverseuse d'un amplificateur différentiel 78. Un condensateur 79 et une porte de transmission 80 sont branchés en parallèle entre cette entrée non-inverseuse de l'amplificateur 78 et la masse.

15 La sortie de l'amplificateur 78 constitue la sortie du circuit de mesure 11. Cette sortie est reliée à l'entrée inverseuse de l'amplificateur 78 par une résistance 81 et à la masse du circuit par une résistance 82. L'entrée non-inverseuse de l'amplificateur 78 est en outre reliée par une porte de transmission 83 à
20 l'entrée non-inverseuse d'un amplificateur différentiel 84. Un condensateur 85 et une porte de transmission 86 sont branchés en parallèle entre cette entrée de l'amplificateur 84 et la masse.

 La sortie de l'amplificateur 84 est reliée à son entrée inverseuse. Le gain de cet amplificateur 84 est donc égal à un. Sa
25 sortie est également reliée, par une porte de transmission 87, à une première borne d'un condensateur 88. L'autre borne de ce condensateur 88 est reliée à la masse. Enfin, la première borne du condensateur 88 est reliée par une porte de transmission 89 à
 l'entrée inverseuse de l'amplificateur 74.

30 Les portes de transmission 77 et 89 sont commandées par le signal C1 décrit ci-dessus, en même temps que les portes de transmission 61, 70, 71 et 73. Les portes de transmission 76 et 87 sont commandées par le signal C2 également décrit ci-dessus, comme les portes de transmission 64, 65 et 69. Les portes de transmission 80
35 et 86 sont commandées par un signal C3 qui peut être, par exemple, délivré par le circuit 9 de commande du moteur 10 et qui est à l'état "0" pendant les impulsions motrices et à l'état "1" le

reste du temps. Les portes 80 et 86 sont donc conductrices entre les impulsions motrices et bloquées pendant ces impulsions motrices. Enfin, la porte de transmission 83 est commandée par un signal C4 qui est normalement à "0" et qui passe à l'état "1" pendant quelques microsecondes environ une milliseconde après le début de l'impulsion motrice. Les signaux C3 et C4 sont également représentés à la figure 10.

Le fonctionnement du circuit situé entre la sortie de l'amplificateur 20 et la borne B1 est identique à celui du circuit de la figure 9. Cependant, du fait que la deuxième borne du condensateur 66 est reliée à la masse du circuit et non à la tension U_a , ce condensateur 66 se charge à la tension $-U_x$, et non à la tension $(U_a - U_x)$ en réponse au signal C2. L'expression de la charge Q66 devient donc:

$$Q_{66} = C_{66} (-U_x)$$

L'équation (11) ci-dessus dans laquelle le terme U_a est remplacé par 0 montre que la tension U_{m2} qui apparaîtrait à la borne B1 en réponse au signal C1 si les éléments 74 à 89 n'existaient pas serait :

$$U_{m2} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{\tau}} (-U_x \frac{\Delta t}{\tau} + U_x - U_y) \quad (12)$$

Une comparaison de cette équation (12) avec l'équation (11) ci-dessus montre que :

$$U_{m2} = U_{m1} - \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{\tau}} U_a \frac{\Delta t}{\tau}$$

Il faut noter que tant que le rotor est immobile, c'est-à-dire entre les impulsions motrices et tout au début de celles-ci, la tension U_{m1} est nulle. La tension U_{m2r} qui apparaîtrait à la borne B1 dans ces conditions serait donc :

$$U_{m2r} = - \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{\tau}} U_a \frac{\Delta t}{\tau} \quad (13)$$

Le fonctionnement du circuit composé des éléments 74 à 89 est le suivant :

05 Entre les impulsions motrices, le signal C3 est à "1". Les condensateurs 79 et 85 sont donc court-circuités par les portes de transmission 80 et 86 qui sont conductrices. La sortie de l'amplificateur 78, qui est la sortie du circuit de mesure, et la sortie de l'amplificateur 84 sont au potentiel de la masse.

10 Le condensateur 88 est déchargé puisque la sortie de l'amplificateur 84, qui est à la masse, lui est reliée à chaque impulsion C2 par la porte de transmission 87.

A chaque impulsion C2, le condensateur 75 est également déchargé par la porte de transmission 76 qui le court-circuite. Immédiatement après chacune de ces impulsions C2, la sortie de l'amplificateur 74 est donc également au potentiel de la masse.

15 Un instant Δt après chacune de ces impulsions C2, une impulsion C1 rend les portes de transmission 70, 71, 73, 77 et 89 conductrices. La somme des charges contenues à cet instant dans les condensateurs 66, 67 et 88 est donc transférée dans le condensateur 75. La tension U75 aux bornes de ce condensateur serait alors :

20

$$U_{75} = - \frac{Q_{66} + Q_{67} + Q_{88}}{C_{75}}$$

25 si la porte de transmission 80 n'était pas conductrice. Le signe - qui apparaît dans cette équation résulte du fait que la borne B1 est reliée à l'entrée inverseuse de l'amplificateur 74.

30 En réalité, cette tension U75 reste nulle tant que le signal C3 est à l'état "1" et les charges Q66 et Q67 sont transmises à la masse par cette porte de transmission 80. La charge Q88 du condensateur 88 est de toute façon nulle à cet instant. La sortie de l'amplificateur 78 reste donc au potentiel de la masse.

35 Au début de chaque impulsion motrice, le signal C3 passe à l'état "0" et y reste. Les portes de transmission 80 et 86 sont donc bloquées.

Le processus décrit ci-dessus se reproduit à la première impulsion C1 qui suit le début de l'impulsion motrice mais, cette fois-ci, le condensateur 79 se charge à la tension U75 définie

ci-dessus. La porte de transmission 83 est encore bloquée, ce qui fait que la tension de sortie de l'amplificateur 84 ne change pas, et que le condensateur 88 reste déchargé. La tension U75 ci-dessus devient donc égale à

05

$$U_{75} = - \frac{Q_{66} + Q_{67}}{C_{75}}$$

Comme $Q_{66} = C_{66} (-U_x)$ et $Q_{67} = C_{67} (U_x - U_y)$, on peut écrire :

10

$$U_{75} = - \frac{C_{66} (-U_x) + C_{67} (U_x - U_y)}{C_{75}}$$

A l'instant D de la dernière impulsion C1 précédant l'impulsion C4, cette tension U75 a la valeur

15

$$U_{75D} = - \frac{C_{66} (-U_{xD}) + C_{67} (U_{xD} - U_{yD})}{C_{75}}$$

où U_{xD} et U_{yD} sont les valeurs de U_x et de U_y à cet instant D.

20

L'impulsion C4 est produite environ une milliseconde après le début de l'impulsion motrice, à un instant où le rotor est encore immobile. Cette impulsion C4 ouvre brièvement la porte de transmission 83. Le condensateur 85 se charge donc à cette tension U_{75D} qui apparaît également à la sortie de l'amplificateur 84. L'impulsion C2 suivant cette impulsion C4 ouvre la porte de transmission 87 et le condensateur 88 se charge donc également à la tension U_{75D} . La charge électrique Q88 du condensateur 88 devient donc égale à :

25

$$Q_{88} = - C_{88} \frac{C_{66} (-U_{xD}) + C_{67} (U_{xD} - U_{yD})}{C_{75}}$$

30

Il faut noter que le condensateur 85 reste pratiquement chargé à la tension U_{75D} tant que la porte de transmission 86 reste bloquée, si la résistance d'entrée de l'amplificateur 84 est grande, ce qui est le cas. Les changements ultérieurs de la tension de sortie de l'amplificateur 74 n'ont plus d'influence sur cette tension puisque la porte de transmission 83 est de nouveau bloquée en permanence.

35

A chaque impulsion C1 suivante, le condensateur 88 se décharge dans le condensateur 75, en même temps que les condensateurs 66 et 67. La charge du condensateur 75 devient donc

$$05 \quad Q_{75} = Q_{66} + Q_{67} + Q_{88}$$

Il faut encore noter que, à chaque impulsion C2, le condensateur 88 se recharge à la tension U_{75D} qui est mémorisée par le condensateur 85.

10 A n'importe quel instant après l'impulsion C4, on peut donc écrire :

$$Q_{75} = C_{66} (-U_x) + C_{67} (U_x - U_y) - C_{88} \frac{C_{66} (-U_{xD}) + C_{67} (U_{xD} - U_{yD})}{C_{75}}$$

15

Si $C_{88} = C_{75}$, et si, comme ci-dessus, $C_{66} = C_{67} \frac{\Delta t}{\tau}$, cette équation devient :

$$Q_{75} = C_{67} \left(-U_x \frac{\Delta t}{\tau} + U_x - U_y + U_{xD} \frac{\Delta t}{\tau} - U_{xD} + U_{yD} \right)$$

20

La tension U_{75} , qui est égale à $\frac{Q_{75}}{C_{75}}$, peut donc s'écrire :

$$U_{75} = \frac{C_{67}}{C_{75}} \left(-U_x \frac{\Delta t}{\tau} + U_x - U_y + U_{xD} \frac{\Delta t}{\tau} - U_{xD} + U_{yD} \right) \quad (14)$$

25

Cette tension U_{75} est indépendante de la tension U_a , ou de la tension U_a' . En outre, elle est proportionnelle à la tension U_{rx} induite dans la bobine du moteur à l'instant t_x par la rotation du rotor. En effet, à l'instant D défini ci-dessus, la tension U_{m2} donnée par l'équation (12) s'écrit :

30

$$U_{m2} = - \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{\tau}} \left(U_{xD} \frac{\Delta t}{\tau} - U_{xD} + U_{yD} \right)$$

L'équation (14) ci-dessus peut donc s'écrire :

35

$$U_{75} = \frac{C_{67}}{C_{75}} \left[-U_x \frac{\Delta t}{\tau} + U_x - U_y - \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau} \right) U_{m2} \right] \quad (15)$$

en fonction des caractéristiques des divers composants du circuit de la figure 11, notamment des capacités des divers condensateurs et des gains des amplificateurs.

05 La figure 12 montre un exemple de circuit réalisant la fonction des circuits 9, 12 et 13 de la figure 4. Dans cet exemple, le circuit 12 est constitué par un simple amplificateur différentiel 41. La tension U_m , constituée par la tension de sortie de l'un des circuits 11 décrits ci-dessus, est appliquée à l'entrée non inverseuse de cet amplificateur 41, dont l'entrée inverseuse reçoit une
10 tension U_s' choisie comme cela a été expliqué ci-dessus. Cette tension U_s' peut être fournie par une source séparée ou par un simple diviseur de tension branché aux bornes de la source alimentant tout le circuit.

Dans cette figure 12, le circuit de commande 9 du moteur 10
15 comporte les transistors 14 à 17 décrits à propos de la figure 6. Il comporte en outre un flip-flop 42 de type D dont l'entrée d'horloge Ck est reliée à la sortie S8 du circuit 8 de la figure 4. L'entrée D de ce flip-flop 42 est reliée à sa sortie inverse Q^* de sorte qu'il change d'état chaque fois que le signal S8 passe de
20 l'état logique "0" à l'état logique "1". La sortie directe Q du flip-flop 42 est reliée à une première entrée d'une porte ET 43 dont la sortie est reliée aux électrodes de commande des transistors 14 et 16. La sortie Q^* du flip-flop 42 est reliée à une première entrée d'une porte ET 44 dont la sortie est reliée aux
25 électrodes de commande des transistors 15 et 17.

Le circuit de commande 9 comporte en outre un flip-flop 45, de type D, dont l'entrée d'horloge Ck est reliée à la sortie S8 du circuit 8 par l'intermédiaire d'un inverseur 58.

L'entrée D de ce flip-flop 45 est en permanence à l'état
30 logique "1", et sa sortie Q est reliée à la seconde entrée des portes 43 et 44.

Le circuit de calcul 13 comporte un flip-flop 46, également de type D, dont l'entrée d'horloge Ck est reliée à la sortie S8 du circuit 8 et dont l'entrée D est en permanence à l'état logique
35 "1". Les sorties Q et Q^* du flip-flop 46 sont respectivement reliées aux premières entrées de deux portes ET 47 et 48 dont les deuxièmes entrées sont reliées, ensemble, à la sortie Q du flip-flop 45.

Le rotor étant immobile à l'instant D, la tension U_{m2} est égale à la tension U_{m2r} , définie par l'équation (13) ci-dessus.

En remplaçant dans l'équation (15), le terme U_{m2} par la valeur de U_{m2r} tirée de cette équation (13), on peut écrire :

$$U75 = \frac{C67}{C75} \left(-U_x \frac{\Delta t}{\tau} + U_x - U_y + U_a \frac{\Delta t}{\tau} \right) \quad (16)$$

Une comparaison de cette équation (16) avec l'équation (11) ci-dessus montre que :

$$U75 = \frac{C67}{C75} \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau} \right) U_{m1}$$

La tension U_{m1} étant proportionnelle à la tension U_{rx} , la tension U75 l'est également.

Si la capacité C75 est choisie égale à $C67 \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau} \right)$, alors $U75 = U_{m1}$.

Il est bien clair, cependant, qu'un autre rapport peut être choisi entre la capacité C75 et les capacités C67 et C88. De même, le gain des amplificateurs 74 et 84 peut être choisi différent de un. De toute façon la tension U75 restera proportionnelle à U_{m1} , et donc à la tension U_{rx} induite à l'instant t_x dans la bobine du moteur par la rotation du rotor.

Il faut noter que, puisque l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur 75 est reliée à la masse, les condensateurs 66, 67 et 88 se déchargent complètement dans le condensateur 75 à chaque impulsion C1. A chaque impulsion C2, ce condensateur 75 est court-circuité par la porte de transmission 76 et la tension U75 calculée ci-dessus retombe à zéro. Le condensateur 79 qui est chargé à cette tension U75 à chaque impulsion C1 assure la mémorisation de cette tension entre deux impulsions C1 successives. La tension U75 mémorisée par le condensateur 79 est amplifiée par l'amplificateur 78 d'un facteur qui peut être fixé librement par le choix du rapport des valeurs des résistances 81 et 82. La tension U78 de sortie de l'amplificateur 78 est également proportionnelle à la tension U_{rx} , et peut donc constituer la tension U_m appliquée au circuit de comparaison 12 de la figure 4. La tension de référence U_s appliquée dans ce cas à ce circuit 12 doit évidemment être choisie

L'entrée R de remise à zéro du flip-flop 46 est reliée à la sortie de l'amplificateur différentiel 41.

05 Trois portes de transmission 49, 50 et 51 ont leur entrée de commande respectivement reliées aux sorties des portes 47 et 48, et à la sortie Q^* du flip-flop 45. Ces portes de transmission 49, 50 et 51 sont semblables à la porte de transmission 21 de la figure 6. Lorsque leur entrée de commande est à l'état logique "0", elles sont dans leur état bloquant et lorsque leur entrée de commande est à l'état logique "1", elles sont dans leur état
10 conducteur.

La porte de transmission 49 est branchée entre le pôle positif $+U_a$ de la source d'alimentation et une résistance 52, de valeur R52.

15 La porte de transmission 50 est branchée entre le pôle négatif $-U_a$ de la source d'alimentation et une résistance 53, de valeur R53.

Enfin, la porte de transmission 51 est branchée entre une tension U_b , qui sera définie plus loin, et une résistance 54, de valeur R54.

20 Les secondes bornes des résistances 52, 53 et 54 sont reliées entre elles et à l'entrée inverseuse d'un amplificateur différentiel 55, dont l'entrée non inverseuse est reliée à une tension déterminée, qui est celle de la masse dans le présent exemple.

25 Un condensateur 56, de capacité C56, est branché entre le point commun des résistances 52 à 54 et la masse.

La sortie de l'amplificateur 55 est reliée à une première entrée d'une porte ET 57 dont la deuxième entrée est reliée à la sortie Q^* du flip-flop 46. La sortie de cette porte 57 est reliée à l'entrée R de remise à zéro du flip-flop 45.

30 Le fonctionnement de ce circuit va maintenant être expliqué, à l'aide du diagramme de la figure 13. Au repos, la sortie Q des flip-flops 45 et 46 est à l'état "0". La sortie de portes 43, 44, 47 et 48 est donc également à "0". Les transistors 14 et 15 sont donc conducteurs, ce qui court-circuite la bobine du moteur 10.
35 Les transistors 16 et 17 sont bloqués. Les portes de transmission 49 et 50 sont bloquées, alors que la porte de transmission 51 est rendue conductrice par l'état "1" présent à la sortie Q^* du flip-flop 45.

La tension U56 aux bornes du condensateur 56 est donc égale à la tension U_b . Si cette tension est positive, comme dans cet exemple, les sorties de l'amplificateur 55 et de la porte 57 sont à "0".

05 Si la tension U_b est négative, la sortie de l'amplificateur 55 et la sortie de la porte 57 sont à "1".

Comme le rotor du moteur 10 est immobile, la tension U22 est nulle, et la sortie de l'amplificateur 41 est à "0".

10 On admettra, pour cette explication, que la sortie Q du flip-flop 42 est pour le moment à "0" et que le signal S8 de sortie du circuit 8 prend l'état "1" pour quelques microsecondes chaque fois que le moteur doit avancer d'un pas.

Dès que le signal S8 passe à "1", à l'instant t_0 , les sorties Q des flip-flops 42 et 46 passent à "1".

15 La sortie de la porte 57 passe donc à "0", même si la sortie de l'amplificateur 55 est à "1" à cet instant.

Lorsque le signal S8 repasse à "0", quelques microsecondes plus tard, la sortie Q du flip-flop 45 passe également à "1".

20 La sortie de la porte 43 passe donc aussi à "1". Le transistor 14 se bloque et le transistor 16 devient conducteur. Le courant i commence à circuler dans la bobine du moteur 10, à travers les transistors 15 et 16. La tension au point 19 commence à augmenter et à agir sur le circuit de mesure 11 comme cela a été expliqué à propos des figures 6, 9 ou 12.

25 En même temps, la sortie Q^* du flip-flop 45 passe à "0", ce qui bloque la porte de transmission 51. La sortie de la porte 47 passe à "1", ce qui rend la porte de transmission 49 conductrice. La tension $+U_a$ est donc appliquée au condensateur 56 à travers la résistance 52, et la tension U56 commence à augmenter selon une courbe exponentielle ayant une constante de temps τ_1 déterminée par le produit $R52.C56$. Pour simplifier le dessin, la variation de la tension U56 a été représentée, à la figure 13, comme une variation linéaire.

30 Lorsque à l'instant t_d , la tension U22 dépasse la tension de seuil U_s' , la sortie de l'amplificateur 41 passe à "1". La sortie Q du flip-flop 46 repasse donc à "0", ce qui provoque le blocage de la porte de transmission 49. La valeur U_d atteinte par la

tension U56 à l'instant t_d dépend du temps T2 mis par la tension induite U_r pour atteindre la tension de seuil U_s , de la valeur de la tension U_b et de la constante de temps τ_1 .

05 Au même instant t_d la sortie Q^* de ce flip-flop 46 passe à "1", ce qui rend conductrice la porte de transmission 50. La tension $-U_a$ est donc maintenant appliquée au condensateur 56 à travers la résistance 53. La tension U56 commence donc à diminuer, à partir de la valeur U_d , avec une constante de temps τ_2 déterminée par le produit $R53.C56$.

10 Lorsque à l'instant t_1 , cette tension U56 devient égale à une tension déterminée, qui est la tension de la masse dans le présent exemple, la sortie de l'amplificateur 55 passe à "1", ce qui remet le flip-flop 45 dans son état de repos, c'est-à-dire avec sa sortie Q à "0" et sa sortie Q^* à "1". La sortie de la porte 43 repasse donc à "0", ce qui bloque le transistor 16 et rend conducteur le transistor 14. Le courant i est donc interrompu, et le rotor du moteur termine son pas grâce à son inertie et grâce à une partie de l'énergie qui est emmagasinée, sous forme d'énergie magnétique, dans l'inductivité de la bobine. Le rotor est freiné par le court-circuit qui est établi à travers les transistors 14 et 15.

20 Le temps T3 mis par la tension U56 pour devenir égale à zéro dépend de la tension U_d qu'elle avait atteinte à l'instant t_d et de la constante de temps τ_2 .

25 La durée T1 de l'impulsion motrice est égale à la somme des durées T2 et T3. Comme T3 dépend de la tension U_d , et que cette tension U_d dépend elle-même de la durée T2, on voit que cette durée T1 dépend directement du temps T2 mis par la tension U_r induite dans la bobine du moteur par la rotation du rotor pour atteindre une valeur U_s prédéterminée.

30 Connaissant par des essais, comme cela a été expliqué plus haut, la durée T01 de l'impulsion motrice nécessaire pour faire tourner le moteur sans charge, le temps T02 mis par la tension induite U_r pour atteindre la valeur U_s lorsque le moteur est également sans charge, et les coefficients a et b des droites qui
35 représentent la variation en fonction de la charge du moteur de la durée de l'impulsion motrice et du temps mis par la tension U_r

pour atteindre le seuil U_s , il est facile de déterminer les constante de temps τ_1 et τ_2 ainsi que la tension U_b de manière que la relation (1) mentionnée ci-dessus soit vérifiée. C'est donc sous la forme de ces paramètres τ_1 , τ_2 et U_b que les constantes k et K de cette relation (1) sont introduites dans le présent exemple du circuit de calcul 13. La tension U_b peut être choisie négative, si nécessaire, pour tenir compte du signe de la constante K .

A l'instant t_i , l'état "0" de la sortie Q du flip-flop 45 provoque le blocage de la porte de transmission 50. L'état "1" de la sortie Q^* de ce flip-flop 45 rend la porte de transmission 51 conductrice. La tension U_b est donc à nouveau appliquée au condensateur 56 à travers la résistance 54. La tension U_{56} augmente donc à nouveau, jusqu'à ce qu'elle atteigne, après un certain temps, la tension U_b .

Dès que la tension U_{56} devient à nouveau positive, la sortie de l'amplificateur 55 repasse à "0". Cette sortie ne reste donc à l'état "1" que pendant un temps très court.

Un certain temps après l'instant t_d la tension U_{22} redescend en dessous de la tension U_s' . La sortie de l'amplificateur 41 repasse donc à "0". Ce temps, qui ne joue aucun rôle dans le fonctionnement du circuit, dépend de la charge mécanique entraînée par le moteur et de la valeur de la tension U_s' .

Lorsque le signal S_8 repasse à "1", le processus décrit ci-dessus recommence, avec la seule différence que cette fois-ci, c'est la sortie Q^* du flip-flop 42, et donc la sortie de la porte 44, qui passe à "1". Le transistor 15 se bloque, et le transistor 17 devient conducteur, ce qui provoque le passage du courant i dans le sens inverse de celui qu'il avait dans le cas précédent.

La figure 14 illustre un autre exemple de circuit réalisant la fonction du circuit de calcul 13 de la figure 4.

Ce circuit comporte un flip-flop 91, de type D, dont l'entrée d'horloge C_k reçoit le signal S_8 de sortie du circuit 8 de la figure 4. L'entrée D de ce flip-flop 91 est en permanence à l'état logique "1". Sa sortie Q est reliée à l'entrée U/D de détermination du sens de comptage d'un compteur réversible 92. Ce compteur 92 est également présélectionnable, ce qui signifie que, en réponse à une impulsion sur une entrée de commande C, son contenu prend

une valeur déterminée par les états logiques "0" ou "1" qui sont appliqués à des entrées de présélection désignées, ensemble, par P.

05 L'entrée de commande C du compteur 92 est également reliée à la sortie S8 du circuit 8, et ses entrées P sont reliées, d'une manière fixe ou modifiable qui sera décrite plus loin, aux potentiels représentant les états logiques "0" et "1".

10 Le compteur 92 comprend également une entrée d'horloge Ck qui est reliée à la sortie d'une porte OU 93 dont les entrées sont respectivement reliées aux sorties de deux portes ET 94 et 95.

15 Les entrées de la porte 94 sont respectivement reliées à la sortie Q du flip-flop 45 de la figure 12, non représenté dans cette figure 14, à la sortie Q du flip-flop 91, et à un circuit, également non représenté, qui délivre un signal périodique ayant une fréquence f1. Ce circuit peut être le circuit 8 de la figure 4 et la fréquence f1 est choisie d'une manière qui sera décrite plus loin.

20 Les entrées de la porte 95 sont respectivement reliées à la sortie Q du flip-flop 45, à la sortie Q* du flip-flop 91 et à un circuit, qui peut être également le circuit 8 de la figure 4, et qui délivre un signal périodique ayant une fréquence f2 dont le choix sera également décrit plus loin.

25 Les sorties du compteur 92, désignées ensemble par S, sont reliées à un circuit de détection 96 dont la sortie prend l'état "1" lorsque le contenu du compteur 92 est égal à zéro. Ce circuit de détection 96 peut être constitué simplement par une porte OU inverse dont chaque entrée est reliée à une sortie du compteur 92.

30 La sortie de ce circuit de détection 96 est reliée à une entrée d'une porte ET 97 dont l'autre entrée est reliée à la sortie Q* du flip-flop 91.

Enfin, la sortie de la porte 97 est reliée à l'entrée R de remise à zéro du flip-flop 45 de la figure 12, non représenté dans la figure 14.

35 Le fonctionnement de ce circuit, qui est illustré par la figure 15, est le suivant :

Lorsque le signal S8 passe à l'état "1", le contenu N du

compteur 92 prend l'état N_i qui lui est imposé par l'état de ses entrées P. En même temps, la sortie Q du flip-flop 91 passe à l'état "1".

05 Lorsque, à la fin de l'impulsion S8, la sortie Q du flip-flop 45 passe à l'état "1", les impulsions de fréquence f_1 traversent les portes 94 et 93 et commencent à incrémenter le contenu du compteur 92, à partir de la valeur N_i que ce contenu a pris en réponse au signal S8.

10 A la fin du temps T_2' , la tension induite mesurée par le circuit 12 atteint la valeur de la tension de référence, et la sortie S12 passe à l'état "1". La sortie Q du flip-flop 91 passe donc à l'état "0" et sa sortie Q^* à l'état "1".

15 La valeur N_d du contenu du compteur 92 à cet instant dépend du temps T_2' mis par la tension induite U_r pour atteindre la tension de seuil U_s , de la valeur initiale N_i prise par le contenu de ce compteur 92 en réponse au signal S8, et de la fréquence f_1 .

20 La sortie Q^* du flip-flop 91 étant maintenant à l'état "1", les impulsions de fréquence f_2 traversent les portes 95 et 93, et commencent à décrémenter le contenu du compteur 92, à partir de cet état N_d .

Lorsque le contenu du compteur 92 atteint la valeur zero, la sortie du circuit de détection 96 et la sortie de la porte 97 passent à l'état "1", ce qui remet à "0" la sortie Q du flip-flop 45.
25 L'impulsion motrice qui avait commencé à la fin du signal S8 est ainsi interrompue.

Le temps T_3' mis par le compteur 92 pour atteindre l'état zéro dépend de la valeur N_d atteinte par son contenu au moment où la sortie S12 du circuit 12 passe à l'état "1" et de la fréquence f_2 .

30 D'une manière similaire au cas de la figure 13, la durée T_1' de l'impulsion motrice est égale à la somme des durées T_2' et T_3' . Comme la durée T_3' dépend de la valeur N_d , et que cette valeur N_d dépend elle-même de la durée T_2' , la durée T_1' de l'impulsion motrice dépend directement du temps T_2' mis par la tension U_r induite dans la bobine du moteur par la rotation du rotor pour atteindre la valeur U_s prédéterminée.
35

Dans ce cas, les fréquences f_1 et f_2 jouent le rôle des cons-

tantes de temps τ_1 et τ_2 du cas de la figure 12, et la valeur initiale N_i joue celui de la tension U_b .

05 Ces fréquences f_1 et f_2 et cette valeur initiale N_i doivent donc être déterminées par les mêmes essais que ceux qui sont nécessaires à la détermination des constantes de temps τ_1 et τ_2 et de la tension U_b dans le cas de la figure 9, de manière que la relation (1) mentionnée ci-dessus soit vérifiée. C'est sous la forme de ces fréquences f_1 et f_2 et de cette valeur initiale N_i que les constantes k et K de cette relation (1) sont introduites dans cet
10 exemple de circuit de calcul 13.

Le cas échéant, selon le signe de la constante K , il faut introduire dans le compteur 92 une valeur initiale N_i négative. Comme la valeur du contenu d'un compteur est toujours un nombre positif, il faut dans ce cas introduire dans le compteur 92 une valeur
15 initiale N_i' égale à la différence entre la capacité de comptage du compteur 92 et la valeur absolue de N_i .

Dans ce cas, le contenu du compteur 92 passe par zéro après que N_i impulsions de fréquence f_1 ont été reçues par son entrée C_k . Mais comme à ce moment la sortie Q^* du flip-flop 91 est encore
20 à l'état "0", le signal "1" délivré par la sortie du circuit 96 est bloqué par la porte 97. L'impulsion motrice n'est donc pas interrompue à cet instant.

Il est évident que les circuits décrits ci-dessus ne constituent que des exemples permettant la mise en oeuvre de l'invention. D'autres circuits de mesure de la tension U_r pourraient être
25 réalisés. De même, l'information fournie par cette mesure pourrait être exploitée différemment. Enfin, même dans le cas où cette information est fournie par le temps mis par cette tension U_r pour dépasser un seuil déterminé U_s , le circuit de calcul 13 pourrait être réalisé différemment.
30

Cependant, ces différences dans la mise en oeuvre de l'invention ne sortiraient pas du cadre de celle-ci.

Il faut encore noter que la relation (1) entre la durée optimum de l'impulsion motrice et le temps T_2 mis par la tension
35 U_r pour dépasser la tension de seuil U_s pourrait ne pas être linéaire. Mais, même dans ce cas, elle pourrait être définie par quelques essais. Le circuit de calcul 13 devrait alors simplement

être conçu de manière à réaliser la fonction voulue.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de mesure de la tension induite dans la bobine d'un moteur pas à pas par la rotation de son rotor en réponse à l'application à la bobine d'une tension d'alimentation, ladite bobine ayant une constante de temps égale au quotient de sa résistance et de son inductivité, caractérisé par le fait qu'il consiste à produire une représentation de la différence entre le courant qui circulerait dans la bobine à un deuxième instant si la tension induite était nulle depuis un premier instant, antérieur au deuxième instant et séparé de celui-ci par une durée déterminée, et le courant qui circule effectivement dans la bobine à ce deuxième instant, ladite différence étant proportionnelle à ladite tension induite.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait qu'il consiste à produire périodiquement ladite représentation avec une période supérieure ou égale à ladite durée déterminée.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé par le fait que la production de ladite image consiste à produire une première tension proportionnelle au courant qui circule dans la bobine, à produire une deuxième tension qui croît exponentiellement depuis le premier instant à partir de la valeur de la première tension au premier instant avec une constante de temps égale à la constante de temps de la bobine, et à produire une troisième tension égale à la différence entre les valeurs de la deuxième et de la première tension au deuxième instant, ladite image étant constituée par ladite troisième tension.

4. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé par le fait que la production de ladite image consiste à produire une première tension proportionnelle au courant qui circule dans la bobine, à mémoriser la valeur de la première tension au premier instant, à produire une deuxième tension égale à la différence entre ladite valeur mémorisée et la valeur de la première tension au deuxième instant, à produire une troisième tension égale à la différence entre ladite tension d'alimentation et ladite valeur mémorisée, et à produire une quatrième tension égale à la somme de

la deuxième tension et du produit de la troisième tension par le quotient de ladite durée et de ladite constante de temps, ladite image étant constituée par ladite quatrième tension.

5 Procédé selon la revendication 2, caractérisé par le fait que la production de ladite image consiste à produire une première
tension proportionnelle au courant qui circule dans la bobine, à
mémoriser, à chaque premier instant, une deuxième tension égale à la
première tension, à produire, à chaque deuxième instant, une troi-
sième tension égale à la différence entre la deuxième tension et la
10 première tension, à mémoriser, à un deuxième instant déterminé situé
avant le début de la rotation du rotor, une quatrième tension égale
à la différence entre la troisième tension et le produit de la
deuxième tension par un facteur constant égal au quotient de ladite
durée et de ladite constante de temps, et à produire une cinquième
15 tension égale à la différence entre, d'une part, la différence entre
la troisième tension et le produit de la deuxième tension par ledit
facteur constant et, d'autre part, la quatrième tension, ladite
image étant constituée par ladite cinquième tension.

1/8

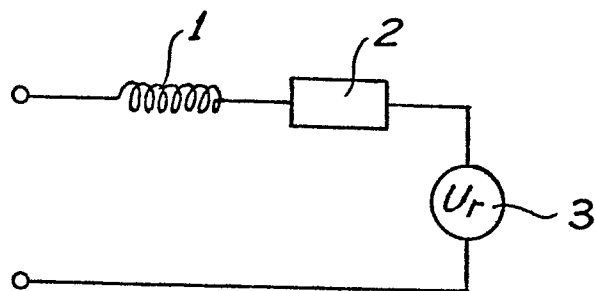


Fig. 1

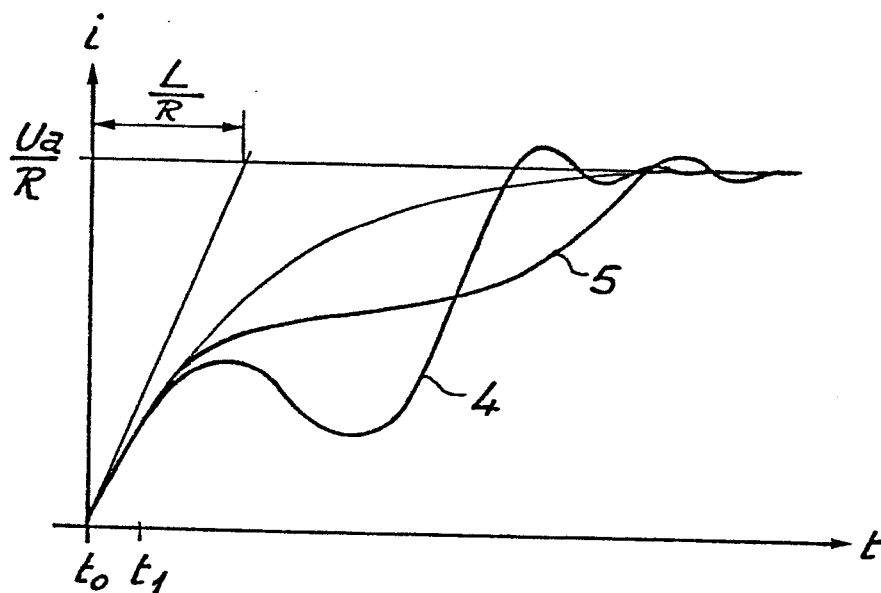


Fig. 2a

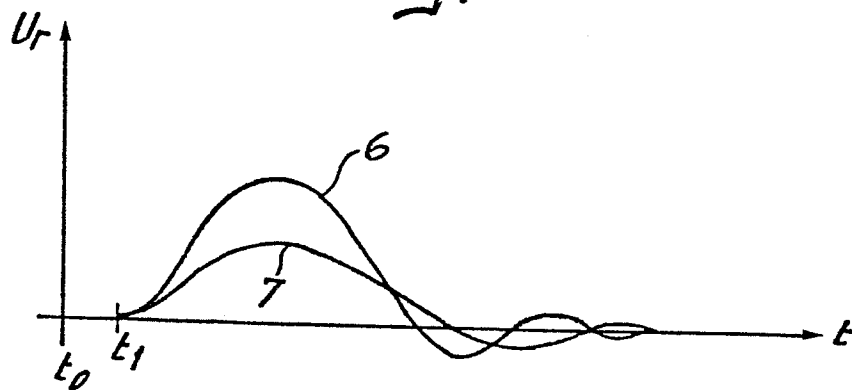


Fig. 2b

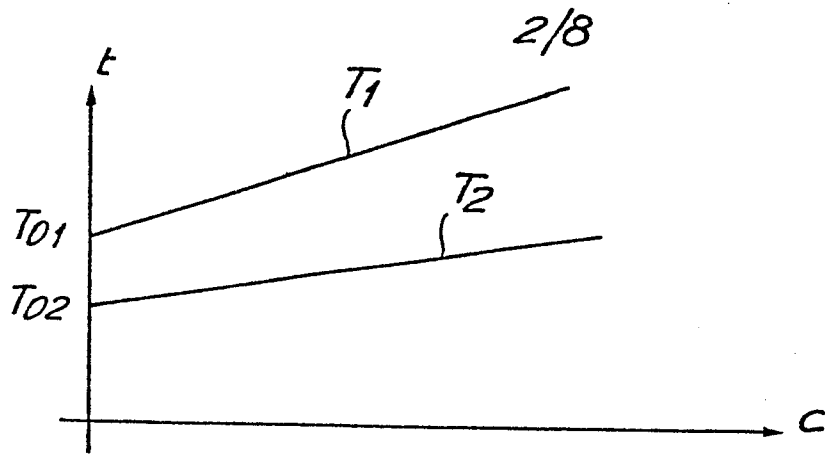


Fig. 3

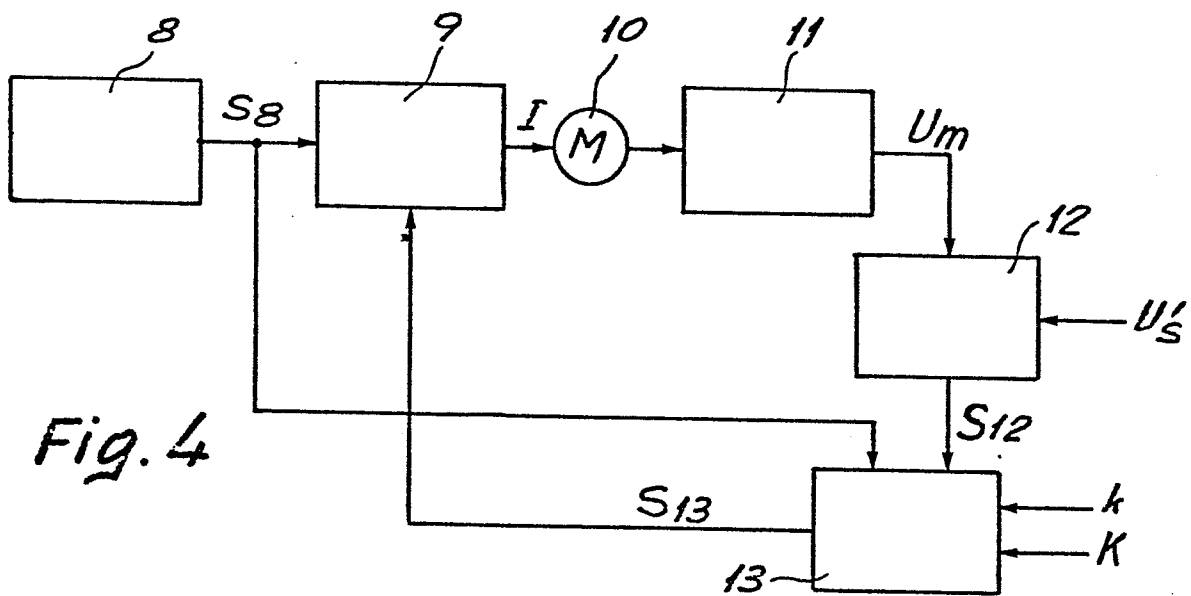


Fig. 4

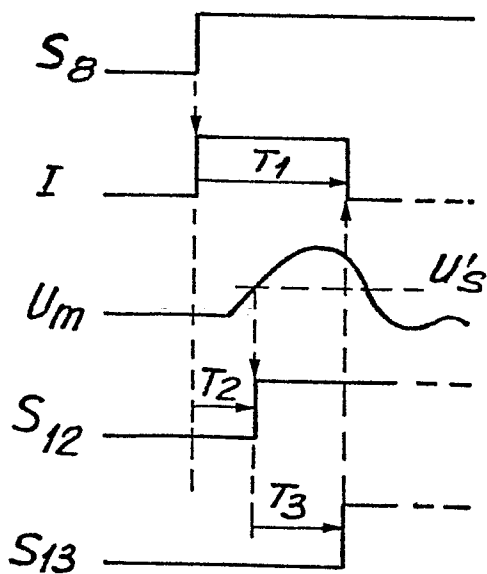


Fig. 5

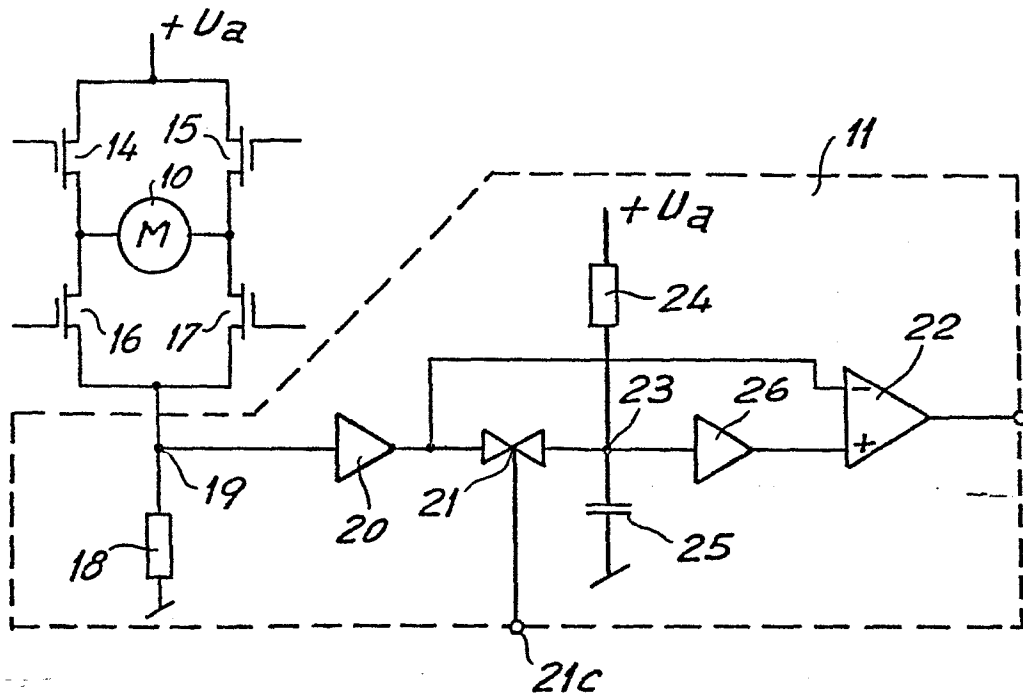


Fig. 6

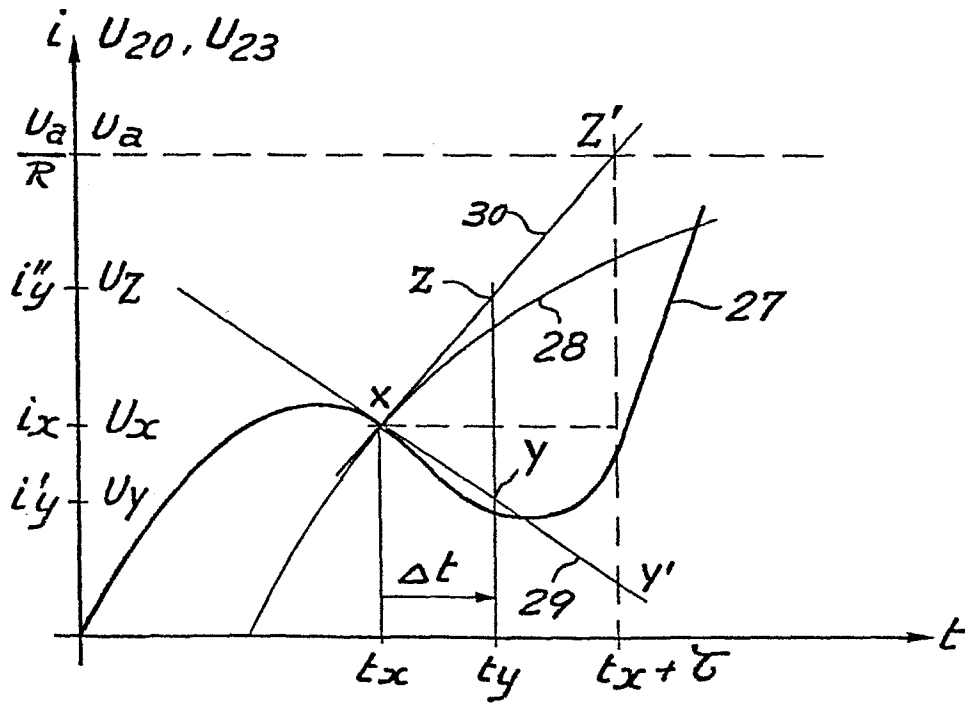


Fig. 7

4/8

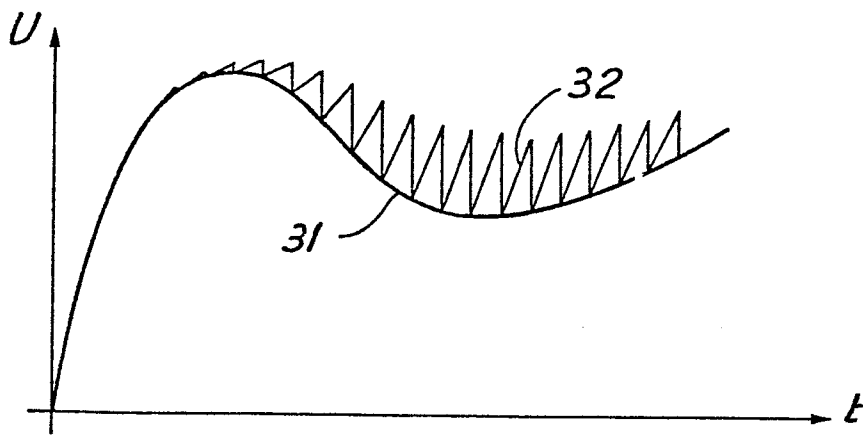


Fig. 8a

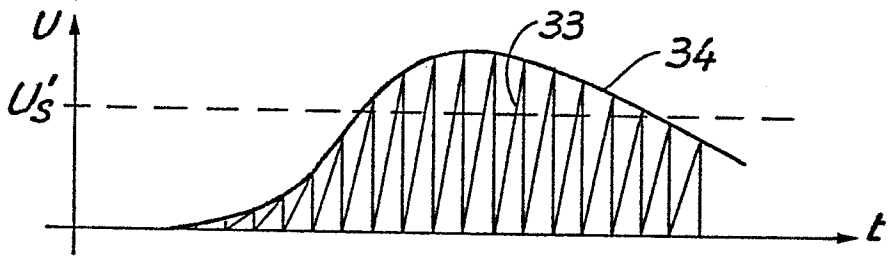


Fig. 8b

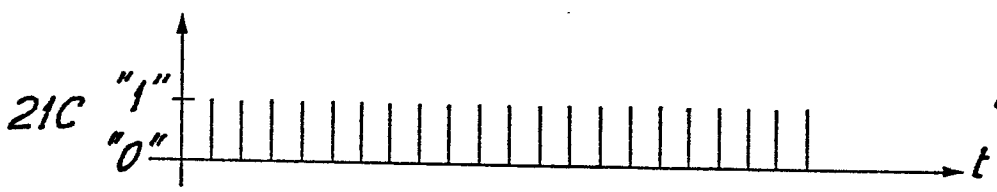


Fig. 8c

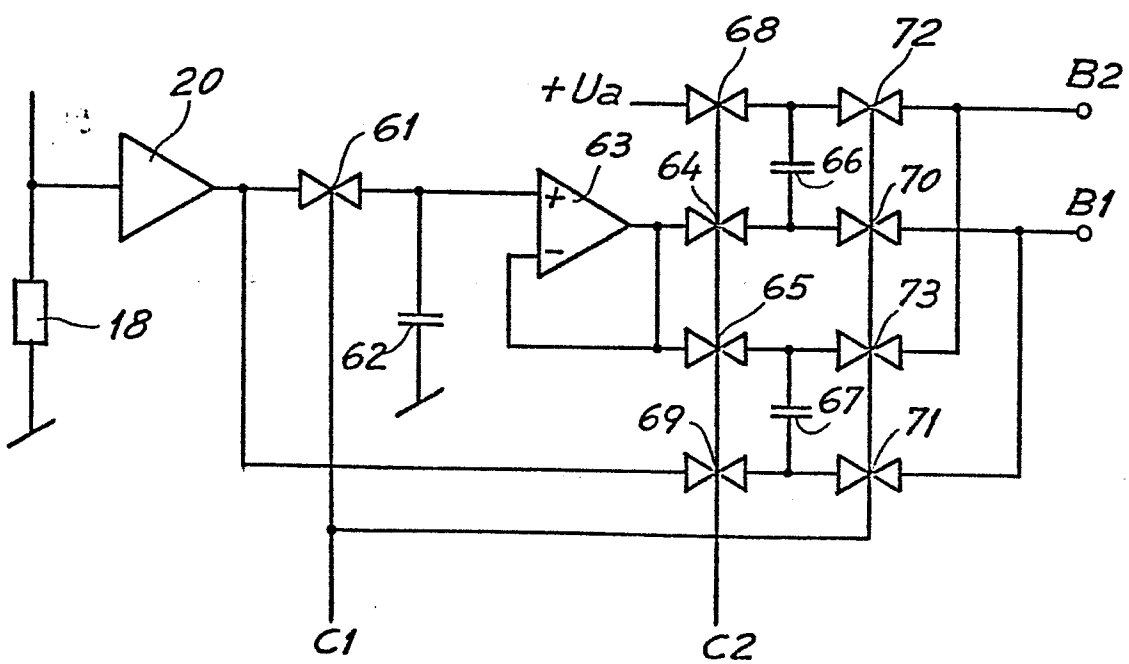


Fig. 9

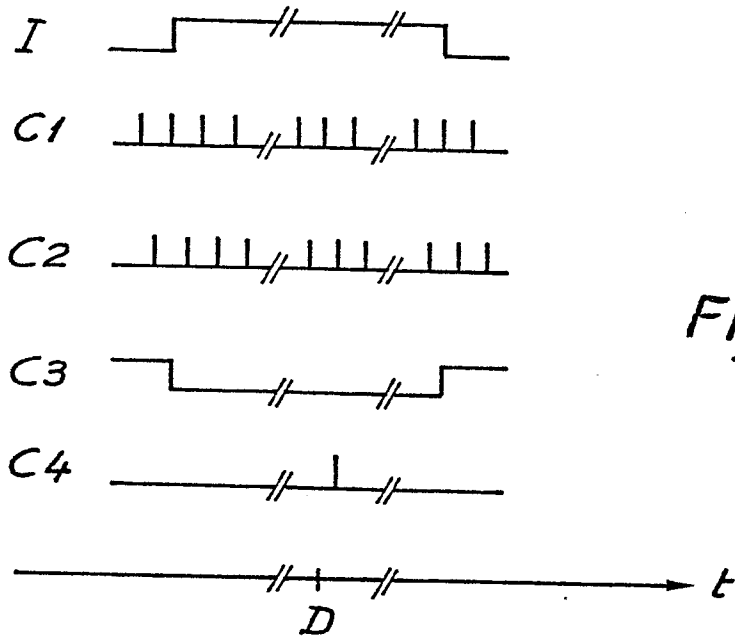


Fig. 10

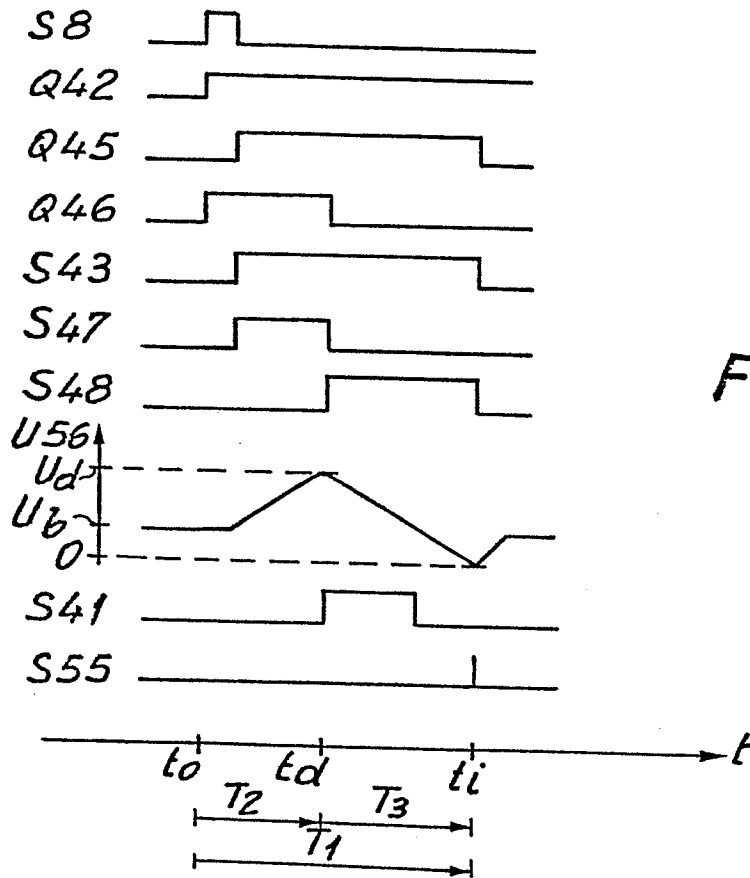


Fig. 13

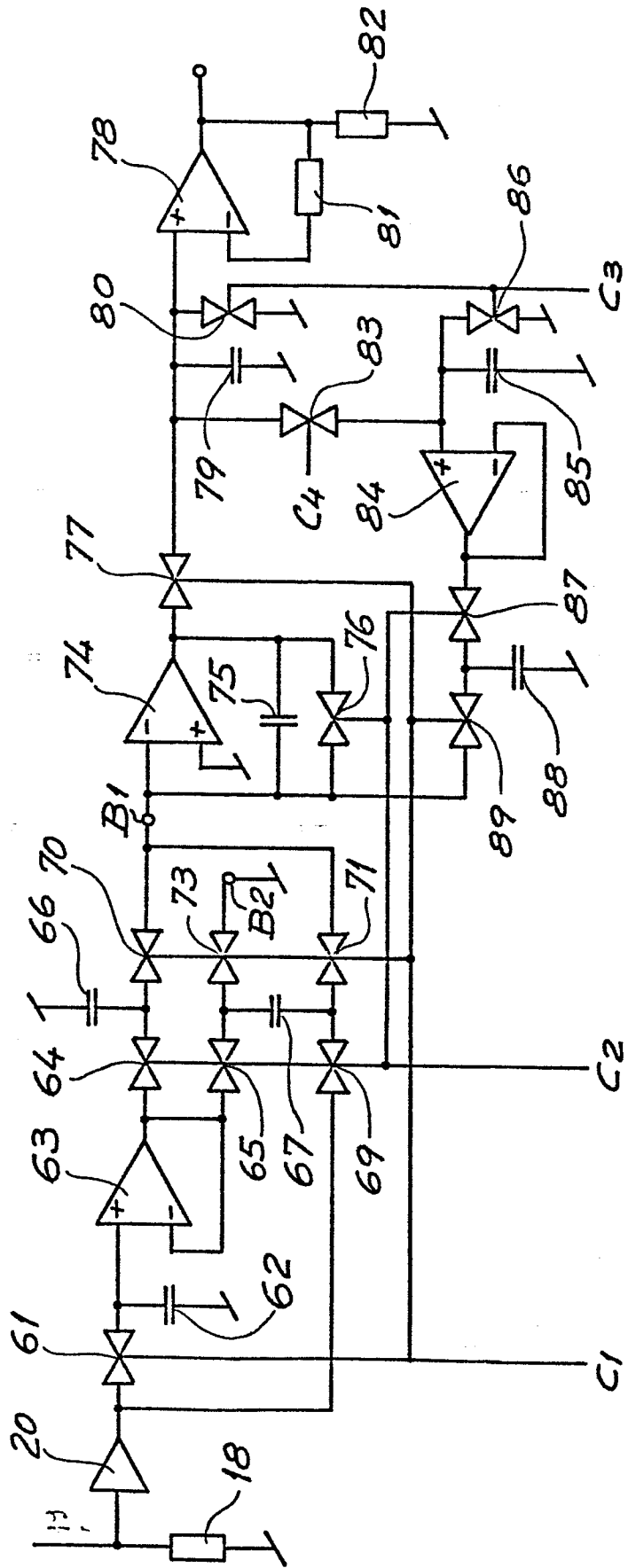


Fig. 11

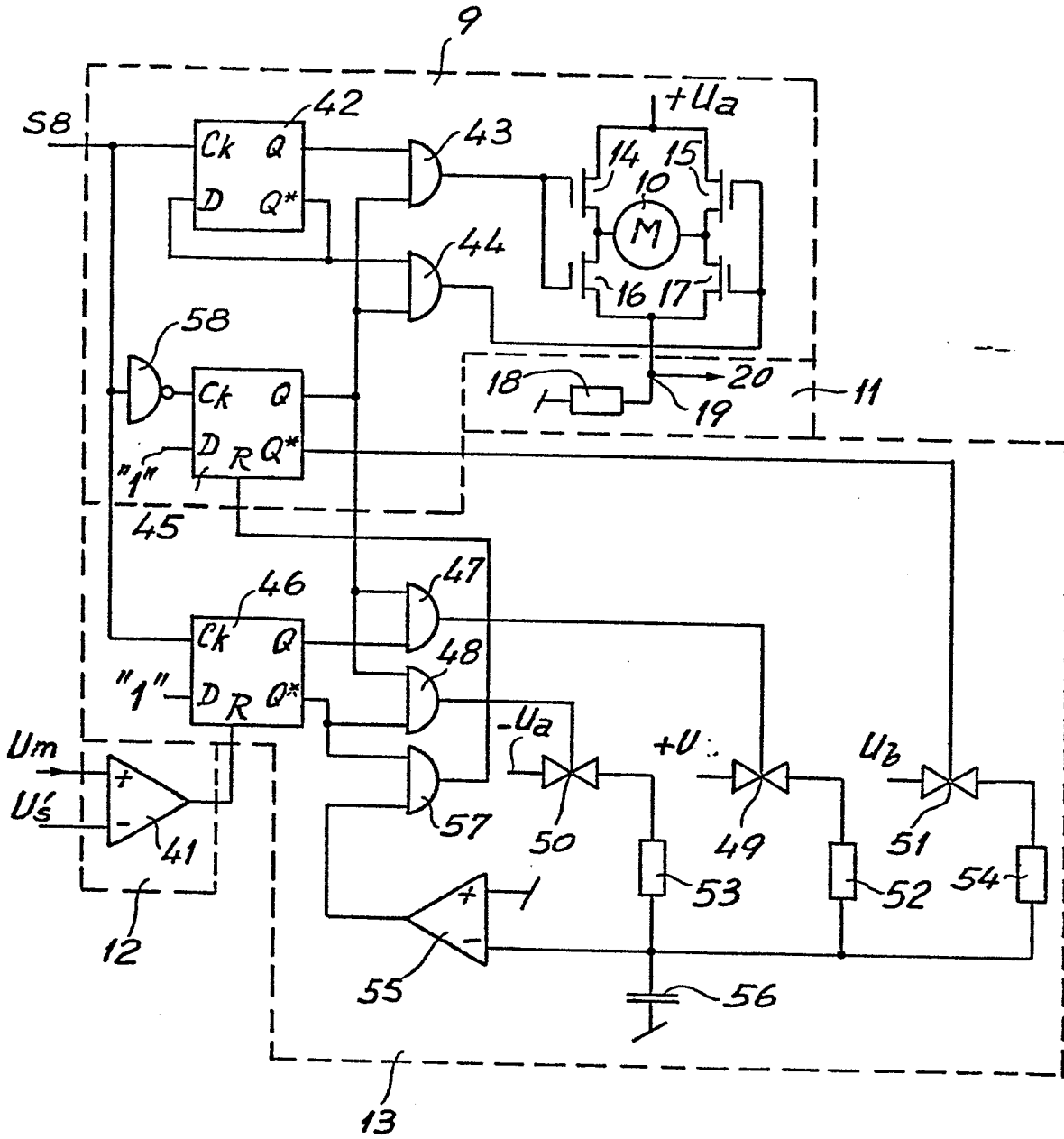


Fig. 12

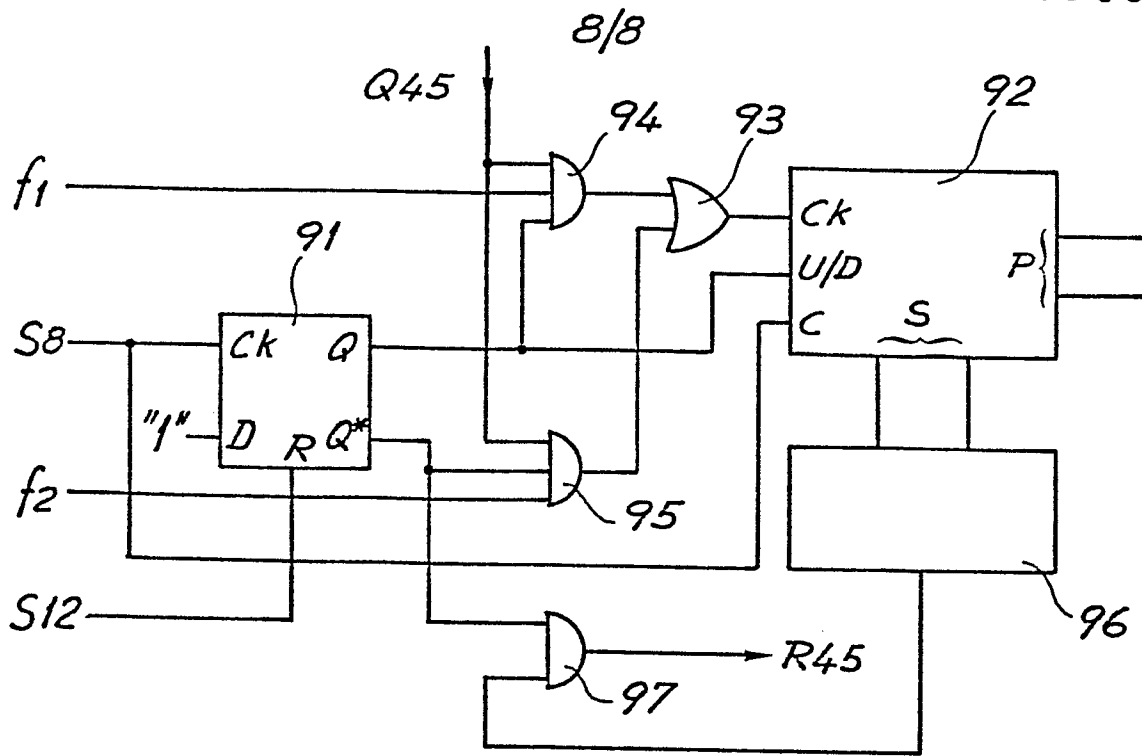


Fig. 14

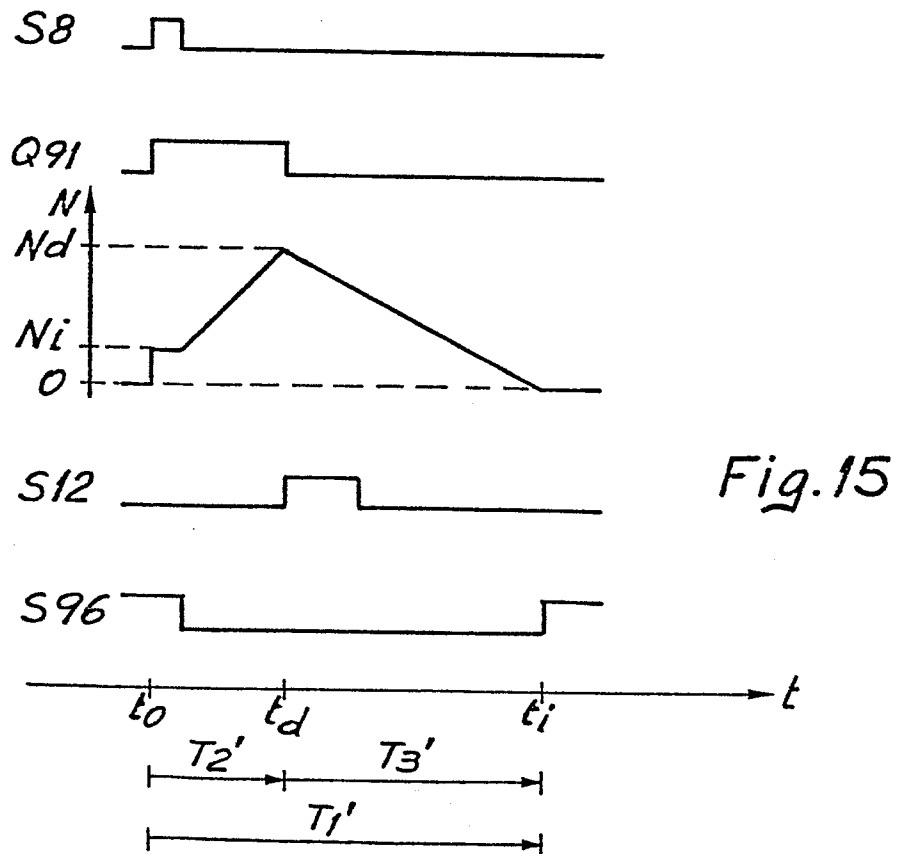


Fig. 15