



Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

12 FASCICULE DU BREVET A5

21 Numéro de la demande: 00179/96

22 Date de dépôt: 24.01.1996

24 Brevet délivré le: 28.02.2001

45 Fascicule du brevet
publiée le: 28.02.2001

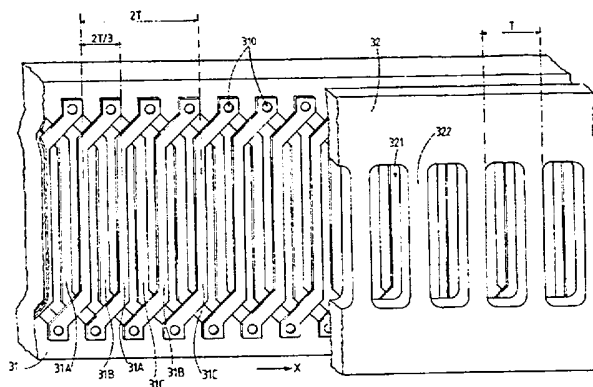
73 Titulaire(s):
Hans Ulrich Meyer, 42, rue de Lausanne,
1110 Morges (CH)

72 Inventeur(s):
Hans Ulrich Meyer, 42, rue de Lausanne,
1110 Morges (CH)

74 Mandataire:
Ardin & Cie S.A., 122, rue de Genève C.P. 56,
1226 Thônex (Genève) (CH)

54 Capteur inductif de déplacement.

57 Le capteur inductif de déplacement linéaire ou curvilinéaire comprend un premier élément ou curseur (31) et un second élément ou échelle (32), sous forme d'une bande présentant des caractéristiques électromagnétiques spatialement périodiques, telles que des fenêtres (321) et des montants (322). Le premier élément (31) comprend une série d'enroulements qui sont par exemple trois méandres entrelacés (31A à 31C) et un circuit électronique agencé pour produire un courant électrique dans au moins un des enroulements (31A) et à mesurer les effets produits par la position des caractéristiques électromagnétiques de l'échelle (32) sur les inductances d'au moins une partie des enroulements (31B, 31C) de ce premier élément (31). Par cette disposition, on obtient un capteur de déplacement simple, robuste, peu encombrant, d'une faible consommation de courant et insensible à l'eau.



Description

La présente invention a pour objet un capteur inductif de déplacement comportant deux éléments mobiles l'un par rapport à l'autre le long d'un chemin pourvu d'enroulements, disposés le long de ce chemin et dont les inductances varient périodiquement en fonction du déplacement relatif des deux éléments, et des moyens électroniques pour déterminer la valeur dudit déplacement par la mesure des inductances des enroulements.

Le resolver et la synchro sont des réalisations connues de tels capteurs rotatifs. Ils comportent un élément rotatif, ou rotor, avec un enroulement primaire et un élément fixe, ou stator, avec deux ou trois enroulements secondaires dont les couplages à l'enroulement du rotor varient sinusoïdalement en fonction du déplacement angulaire du rotor. Des moyens électroniques, par exemple un convertisseur synchro-digital, déterminent le déplacement angulaire du rotor à partir de l'amplitude et de la phase des signaux couplés dans les enroulements du stator par un signal périodique de référence sur l'enroulement primaire. La précision de tels capteurs peut atteindre quelques minutes d'arc.

Une autre réalisation d'un capteur linéaire ou rotatif fonctionnant sur le même principe est l'Inductosyn de Farrand Controls Inc., Valhalla, N.Y., dont les surfaces en regard des deux éléments, écartés de 0,25 mm, comportent des enroulements constitués de conducteurs plans formant des méandres en épingle à cheveux d'un pas de 2 mm. La précision réalisable est de l'ordre du micromètre pour la version linéaire, ou de la seconde d'arc pour les versions rotatives.

Ces capteurs sont utilisés en particulier dans l'avionique et la machine-outil, à cause de leur robustesse, de leur insensibilité aux contaminants tels que l'eau et l'huile et de leur bonne tenue aux perturbations électromagnétiques. Mais les fréquences des signaux de mesure sont basses, de 400 Hz à 10 kHz, pour limiter les distortions. Le faible rendement dû à ces basses fréquences et, surtout dans le cas l'Inductosyn, aux faibles inductances des enroulements implique une consommation de courant élevée; de plus, les interconnexions électriques souples ou les collecteurs nécessaires entre deux éléments relativement mobiles rendent le capteur plus encombrant et plus cher. Ces défauts limitent leur domaine d'application. Ils ne peuvent par exemple pas remplacer les capteurs capacitifs, pourtant sensibles à l'eau, dans les pieds à coulisse et autres petits instruments fonctionnant sur piles.

La présente invention a pour but de remédier à ces inconvénients et elle est caractérisée, à cet effet, par le fait que les enroulements sont agencés sur un premier des deux éléments et par le fait que le second élément présente des caractéristiques électromagnétiques spatialement périodiques de période spatiale T le long de ce chemin susceptibles de modifier les inductances des enroulements, lesdits moyens électroniques étant reliés aux enroulements agencés sur le premier élément pour produire un courant électrique dans une partie au moins

desdits enroulements et pour mesurer les effets produits par la position des caractéristiques électromagnétiques spatialement périodiques du second élément sur les inductances d'au moins une partie des enroulements du premier élément.

Ainsi, les connections souples ou collecteurs entre les deux éléments sont éliminées, résultant en un capteur plus simple, moins cher, et moins encombrant. L'absence d'enroulements et d'interconnexions sur le second élément ou échelle, souvent assez long, permet des fréquences de signaux de mesure élevées o l'impédance des enroulements est bien supérieure à leur résistance ohmique, améliorant le rendement du capteur.

Avantageusement, le premier élément comprend des enroulements ou groupes d'enroulements de configuration spatialement périodique, de période spatiale 2T le long du chemin. L'influence du second élément sur ces enroulements se faisant ainsi sur une zone de plusieurs périodes spatiales T est donc renforcée, et les erreurs dues aux variations locales de cette influence diminuées.

Lesdits moyens électroniques peuvent avantageusement être agencés de façon à produire un courant électrique dans une première partie des enroulements au moins temporairement inducteurs et à mesurer les signaux induits dans une seconde partie des enroulements au moins temporairement induits. Ceci permet de réduire, voire d'éliminer la contribution des inductances propres, bien supérieures aux mutuelles, dans la mesure.

Favorablement, la seconde partie des enroulements est disposée en quadrature par rapport à la première partie des enroulements, c'est-à-dire décalés de T/2 pour une période spatiale de 2T, éliminant ainsi l'inductance mutuelle directe au profit de celle due à la présence du second élément.

Une disposition très avantageuse est caractérisée par le fait que le premier élément comprend N enroulements entrelacés sur la même surface et décalés les uns par rapport aux autres d'une distance correspondant à un nombre entier de la quantité T/N le long dudit chemin. On obtient ainsi un premier élément très petit, un couplage optimal et surtout une moindre sensibilité aux imperfections géométriques. Notamment les variations de l'écart des surfaces des deux éléments, dues à des erreurs d'alignement, de guidage et de forme, restent faibles sur de petites distances et perturbent donc peu un ensemble de méandres entrelacés, ceci d'autant moins que les effets locaux sont moyennés sur toute l'étendue des méandres.

Dans une variante favorable, les enroulements sont constitués chacun par deux méandres partiels aller-retour dont les deux connexions aux moyens électroniques sont agencées sur un même côté du premier élément, les deux méandres partiels étant reliés l'un à l'autre sur le côté opposé du premier élément, et comportant des tronçons au moins partiellement superposés. Cette construction permet des connexions électriques très courtes, minimisant les inductances parasites et le rayonnement, tout en quadruplant les inductances pour une surface donnée.

De façon avantageuse, le ou les enroulements

peuvent progressivement être rétrécis des deux côtés du premier élément. Ceci permet d'égaliser les inductances mutuelles et de réduire la sensibilité d'un capteur linéaire de longueur finie aux défauts d'alignement.

Avantageusement, le couplage inductif entre enroulements du premier élément peut être réalisé par l'intermédiaire de courants induits ou courants de Foucault (Wirbelströme, eddy currents) dans le second élément; celui-ci comporte à cet effet une configuration conductrice spatialement périodique, de période spatiale T le long de cet axe. Plusieurs exécutions sont possibles: par exemple une série de spires fermées ou de plages conductrices sur un substrat isolant, ou encore une pièce conductrice en forme d'échelle ou de bande perforée ou avec un relief périodique. On obtient ainsi des échelles facilement réalisables dans un grand choix de matériaux.

Favorablement, lesdits moyens électroniques sont agencés de façon à mesurer des couplages inductifs entre au moins deux enroulements ou groupes d'enroulements d'inductance L et de résistance R en appliquant une impulsion de tension plus courte que la constante de temps L/R aux bornes de l'un des enroulements ou groupes d'enroulements et en mesurant l'impulsion de tension induite aux bornes de l'autre ou des autres enroulements ou groupes d'enroulements. Ceci permet des signaux de mesure de très courte durée pouvant être très espacés pour obtenir une faible consommation moyenne de courant. De plus, ces impulsions courtes résultent en un bon rendement du capteur, les pertes résistives restant faibles en deçà de la constante de temps L/R .

Un mode d'exécution préféré comporte trois enroulements en méandre connectés en étoile, décalés les uns des autres d'une distance correspondant à un nombre entier de la quantité $T/3$ le long dudit chemin, les moyens électroniques étant agencés pour appliquer une impulsion de tension aux bornes de l'un des enroulements et pour combiner les impulsions induites dans les deux autres enroulements de manière à obtenir un signal échantillonné équivalent à celui d'un enroulement fictif intermédiaire décalé d'une distance de $T/2$ par rapport à l'enroulement inducteur correspondant à une position en quadrature.

Favorablement, les moyens électroniques sont agencés de façon à décaler de manière prédéterminée les enroulements inducteurs et induits dans le temps pour obtenir 6 échantillons par période spatiale T formant un signal périodique dont la composante fondamentale obtenue au moyen d'un filtre possède une phase qui varie proportionnellement au déplacement à raison d'un tour complet par période spatiale T .

Ainsi, quatre interconnexions entre les méandres et les moyens électroniques de mesure sont donc suffisantes. Les trois méandres, même réalisés sur un circuit imprimé, résultent en une période spatiale T faible, de l'ordre du millimètre, qui permet une précision de mesure élevée avec des moyens électroniques simples. Un tel capteur est donc simple, robuste, précis et peut être aisément miniaturisé.

Sa faible consommation de courant permet son emploi dans de petits instruments alimentés par piles qui doivent être insensibles à l'eau et autres contaminants, comme par exemple les pieds à coulisse.

D'autres avantages ressortent des caractéristiques exprimées dans les revendications dépendantes et de la description exposant ci-après l'invention plus en détail à l'aide de dessins qui représentent schématiquement et à titre d'exemple un mode d'exécution et des variantes.

La fig. 1 montre en exemple les deux éléments relativement mobiles d'un capteur conforme à l'invention, le premier élément comportant quatre enroulements en forme de méandres plans et le second élément étant une bande conductrice avec des fenêtres.

La fig. 2 illustre les signaux induits entre deux méandres en fonction du déplacement d'un second élément ou échelle.

La fig. 3 montre partiellement les deux éléments d'un capteur conforme à l'invention dont le premier élément comporte trois enroulements entrelacés.

La fig. 4 montre, en variante, une autre configuration possible de trois enroulements entrelacés.

Les fig. 5A à 5E illustrent quelques exemples et variantes de seconds éléments conformes à l'invention.

La fig. 6 représente schématiquement des moyens électroniques d'un capteur conforme à l'invention comportant trois enroulements connectés en étoile.

La fig. 7 montre une séquence de six configurations de signaux de couplage sur ces trois méandres.

La fig. 8 illustre les formes d'ondes des signaux logiques et analogiques des moyens électroniques montrés à la fig. 6.

Les deux éléments mobiles l'un par rapport à l'autre selon un chemin ou un axe X d'un capteur conforme à l'invention sont représentés à la fig. 1. Le premier élément 1 formant par exemple un curseur comporte quatre enroulements conducteurs 1A à 1D en forme de méandres en épingles à cheveux sur la surface en regard du second élément 2, dont seulement la portion de droite est visible pour ne pas cacher le premier élément 1. Le second élément 2, formant par exemple une règle ou échelle de mesure, est une bande conductrice plate pourvue d'une rangée de fenêtres 21 le long de l'axe X , et constitue ainsi l'échelle de mesure. La période spatiale, ou pas, de ces fenêtres 21 est définie comme T . Les méandres 1A à 1D de l'élément 1 ont un pas de $2T$ le long de l'axe X et peuvent donc induire ou détecter des champs électromagnétiques de même période spatiale $2T$. Le couplage entre méandres inducteurs et induits est affecté de manière spatialement périodique par l'échelle de mesure 2, les fenêtres 21 formant avec les conducteurs avoisinants autant de boucles servant d'intermédiaires entre méandres inducteurs et induits du premier élément 1. Le sens de rotation des courants induits par les méandres alterne de fenêtre en fenêtre, de sorte que ces courants se renforcent

mutuellement dans les montants 22 entre les fenêtres 21. Le champ électromagnétique reste donc confiné près des méandres, permettant des fréquences de mesure élevées pour un délai de mesure court, si le capteur fait partie d'une boucle de réglage, ou des impulsions de mesure très courtes, suffisamment espacées pour une basse consommation moyenne de courant, si le capteur fait partie d'un instrument de mesure alimenté par piles.

Les couplages sont mesurés de préférence entre méandres mutuellement en quadrature, donc décalés du quart de leur pas selon X, soit de $T/2$, ceci pour minimiser leur couplage direct. Dans la fig. 1, il s'agit des paires de méandres 1A, 1C et 1B, 1D, chaque paire étant bien entendu disposée de façon à se trouver en regard des mêmes fenêtres 21 de l'échelle 2 pour permettre le couplage par l'intermédiaire de celles-ci.

Le couplage d'un méandre à l'autre pour un déplacement imaginaire à vitesse constante de l'échelle est très schématiquement représenté à la fig. 2 pour quatre positions instantanées successivement décalées de $T/4$, avec les formes d'onde des signaux inducteurs et induits durant ce déplacement. La tension de commande V_1 , consistant à titre d'exemple en une série d'impulsions rectangulaires, est appliquée aux bornes du méandre 1A, donnant lieu par son inductance propre à une série d'impulsions de courant I_1 en forme de rampe dans le méandre 1A. Ces impulsions I_1 induisent des courants 12 autour des fenêtres 21 de l'échelle 2 en regard des méandres 1A, 1B, et ces courants 12 induisant à leur tour des impulsions de tension V_m aux bornes des méandres 1C, 1D. Pour la configuration initiale 0 (zéro), à gauche de la fig. 2, les courants 12 dans l'échelle 2 sont d'amplitude maximum, le couplage ou induction mutuelle entre le méandre 1A et l'échelle étant maximal; la tension V_m aux bornes du méandre 1C par contre est nulle puisque ce méandre se trouve en quadrature avec l'échelle. L'échelle déplacée de $T/4$ affaiblit le couplage entre le méandre 1A et l'échelle, mais le renforce entre celle-ci et le méandre 1C; le produit de ces couplages est ici maximum, donc aussi la tension V_m aux bornes de 1C. Pour un déplacement de $T/2$ le méandre 1A est en quadrature avec l'échelle, résultant en une tension V_m nulle. Enfin, pour un déplacement de $3T/4$, la tension V_m est de nouveau maximum, mais de sens opposé à la tension V_1 , le sens relatif des enroulements couplés par l'intermédiaire de l'échelle ayant changé. Pour plus de clarté, des impulsions intermédiaires sont également montrées dans la fig. 2. On voit que la tension V_m varie périodiquement avec le déplacement, la période spatiale étant T .

Les tensions V_m obtenues des deux paires 1A, 1C et 1B, 1D de méandres en quadrature mutuellement décalés de $1.25 T$ dans la fig. 1, sont donc des fonctions périodiques le long de l'axe X, de période spatiale T , et décalées de $T/4$, ce qui permet de mesurer sans ambivalence la grandeur et le sens du déplacement selon l'axe X.

Il convient de remarquer ici qu'on peut aussi mesurer l'effet du couplage de l'échelle directement dans le méandre inducteur, puisque l'inductance

propre d'un enroulement est aussi influencée par la proximité du second élément; mais pour les degrés de couplage envisagés dans de tels capteurs, la variation relative d'inductance propre due à l'échelle est faible, de l'ordre de 10%, donc de faibles variations de cette inductance provenant par exemple de défauts géométriques ou des interconnexions peuvent fortement influencer la mesure, puisque dans ce cas ces effets ne peuvent être distingués.

L'arrangement des méandres 1A à 1D de la fig. 1 a l'avantage d'être réalisable en une couche de métal. Par contre il n'est pas compact et les variantes d'exécution du second élément, ou échelle 2 sont restreintes du fait qu'elles doivent assurer le couplage local entre au moins deux méandres séparés. Le degré de couplage est de plus réduit, chaque méandre ne couvrant que la moitié du contour d'une fenêtre. Enfin le couplage est impossible entre méandres répartis le long de X, par exemple 1A et 1B dans la fig. 1.

Il est donc extrêmement avantageux d'avoir, dans un capteur conforme à l'invention, des enroulements formés de méandres entrelacés, montrés à titre d'exemple à la fig. 3. On élimine ainsi tous les inconvénients précités avec une couche conductrice supplémentaire, dont le coût peut même être compensé par la réduction de la surface du substrat. Plusieurs configurations d'un nombre N arbitraire de méandres entrelacés sont ainsi possible.

A la fig. 3, un premier élément ou curseur 31 avec $N=3$ méandres entrelacés 31A, 31B, 31C, d'un pas de $2T$ et successivement décalés de $2T/3$, est en regard d'un second élément ou échelle 32, ici une bande conductrice avec une rangée de fenêtres 321 et de montants 322 d'un pas T . On voit que les méandres 31A, 31B, 31C sur le premier élément 31 sont réalisés sur deux niveaux de métallisation afin de pouvoir se croiser. Le passage, ou contact galvanique, d'un niveau à l'autre de chaque méandre se fait aux contacts 310. Ailleurs, les conducteurs sont isolés par une faible couche, invisible sur la fig. 3, ce qui serait le cas pour une réalisation en films minces ou circuit intégré; mais cette couche peut très bien être plus épaisse, par exemple une couche isolante d'un circuit imprimé multicouches, ou le circuit imprimé même, le substrat du premier élément 31 étant dans ce dernier cas entre les deux couches conductrices, contrairement à la fig. 3 où celles-ci sont du même côté du substrat.

Comme leurs contacts ou trous métallisés 310 ont un pas de $2T/3$, les méandres 31A, 31B, 31C de la fig. 3 sont facilement réalisables sur un circuit imprimé pour des pas T de l'ordre du millimètre. Mais, si, le pas entre ces contacts peut être réduit à $T/3$, comme à la fig. 4, on peut réaliser des enroulements plus compacts. A la fig. 4, chacun des enroulements 41A, 41B, 41C du premier élément 41 est constitué de deux méandres aller-retour en série dont les tronçons rectilignes sont superposés, quadruplant ainsi leur inductance pour une même surface. On voit en effet que les tronçons rectilignes de l'enroulement 41B, dont les méandres aller-retour sont mis en évidence dans la fig. 4, sont parcourus dans le même sens, indiqué par des flèches, par des courants inducteurs ou induits. Du

fait de cette configuration aller-retour des enroulements, les connexions sont du même côté et peuvent donc être très courtes, minimisant les inductances parasites et le rayonnement. Les méandres des enroulements de la fig. 4 sont progressivement rétrécis aux bouts, afin d'égaliser les inductances mutuelles et de réduire la sensibilité de cette configuration de longueur finie aux défauts d'alignement d'un tel capteur linéaire. Dans une version rotative il suffira par exemple de répartir l'enroulement sur tout le périmètre.

Selon l'application, on préférera une de ces solutions ou encore une autre configuration. Ces enroulements entrelacés prennent moins de place, sont moins sensibles aux erreurs de forme, et fonctionnent avec une grande variété d'échelles qui peuvent être conductrices comme dans les exemples ci-dessus ou magnétiquement perméables, la modulation des champs de couplage se faisant alors par la proximité des montants 322 de l'échelle 32.

L'échelle peut être homogène comme dans la fig. 1 ou déposée sur un substrat. Au lieu de propriétés géométriques telles que les fenêtres 21 de la fig. 1, son influence sur les champs électromagnétiques peut résulter de variations locales de conductivité, par exemple en dopant un semiconducteur, ou de perméabilité, par exemple par une bande magnétisée. Néanmoins, les échelles conductrices métalliques sont spécialement avantageuses par leurs qualités, à savoir résistance à l'abrasion, aux contaminants et à la température, dilatation faible, stabilité, rigidité. Les échelles comportant des conducteurs sur des substrats isolants sont également intéressantes, puisqu'elles peuvent consister en un circuit imprimé, bon marché, ou un circuit constitué par une couche mince conductrice sur un substrat céramique léger mais très précis, très stable et d'un faible coefficient de dilatation.

Quelques exemples de seconds éléments ou échelles conformes à l'invention sont montrés aux fig. 5A à 5E. L'échelle 5A est en forme de disque conducteur muni de fenêtres radiales pour un capteur rotatif. L'échelle 5B comporte des boucles conductrices sur un substrat isolant. Ces deux échelles peuvent être lues par des enroulements entrelacés ou non. L'échelle 5C comporte des îlots conducteurs dans lesquels sont induits des courants de Foucault. L'échelle conductrice 5D est en relief, agissant par les courants de Foucault sous la surface la plus proche du premier élément. Pour être efficace, une hauteur du relief de 0.2T est suffisante. L'échelle conductrice ou magnétiquement perméable 5E comporte un relief en deux dimensions, permettant la lecture des deux coordonnées par deux premiers éléments disposés selon deux axes orthogonaux. Ces échelles 5C à 5E doivent être lues par des enroulements entrelacés. D'autres échelles conformes à l'invention sont possibles, le choix de l'échelle optimale dépendant de l'application.

Des moyens électroniques de capteurs conformes à l'invention sont décrits ci-après à titre d'exemple pour un capteur comportant trois enroulements sur le premier élément, tels qu'illustrés aux fig. 3 et 4. La fig. 6 montre schématiquement ces moyens électroniques, ou circuit, avec les trois

méandres A, B, C, entrelacés mais représentés de manière distincte pour plus de clarté. Ils sont connectés en étoile, avec leur bornes communes reliées ici à une tension positive V_+ , pouvant être la tension d'alimentation du circuit. Les autres bornes, désignées par LA, LB, LC, sont respectivement connectées aux transistors de commande TA, TB, TC, aux diodes limitrices de surtension DA, DB, DC, ainsi qu'aux bornes de même nom LA, LB, LC des portes de transmission ou transistors de commutation TG. Les transistors de commande sont à effet de champ à enrichissement de type MOS, à canal N.

Le principe de mesure est le suivant. On mesure le couplage via l'échelle en générant une impulsion de tension sur le méandre A et en échantillonnant simultanément la différence des tensions induites sur les deux autres méandres B et C, les méandres inducteurs et induits étant ainsi en quadrature, comme on le verra plus loin.

Ce couplage varie de manière spatialement périodique, de période spatiale T comme cela a été expliqué en référence à la fig. 2, et on peut donc obtenir une séquence périodique de tensions échantillonnées simplement en générant la prochaine impulsion sur le méandre suivant B et en échantillonnant la différence de tension des méandres suivants C, A, etc. Cette séquence donne trois échantillons par période, ce qui est suffisant pour déterminer la phase du signal échantillonné.

Celle-ci varie linéairement avec le déplacement pour autant que les harmoniques spatiaux de la caractéristique de couplage en fonction du déplacement soient négligeables. Ceci est normalement le cas, étant donné que les harmoniques spatiaux pairs sont faibles, que l'harmonique spatial 3 n'est pas échantillonné, et que ceux d'ordre 5 et supérieur sont fortement atténués pour un écart suffisant, de l'ordre de 0,2 T, entre la surface comportant les méandres et celle de l'échelle. En effet, les harmoniques spatiaux du champ d'un méandre diminuent exponentiellement avec l'écart, un harmonique d'ordre m diminuant de moitié pour un écart de 0,11T/m. La phase du signal peut alors être calculée en fonction des valeurs numérisées de l'amplitude et de la polarité des trois tensions échantillonnées. La méthode est rapide, mais nécessite un convertisseur analogique-numérique et une unité arithmétique.

Les moyens électroniques décrits ici et illustrés à la fig. 6 déterminent la phase directement par filtrage d'un signal échantillonné six fois par période, le filtrage passe-bas étant plus simple pour un nombre d'échantillons par période plus élevé. L'harmonique spatial 3 est échantillonné dans ce cas, mais peut être filtré. Par contre l'harmonique spatial 5 est transposé sur la fondamentale par l'échantillonnage et doit donc être suffisamment atténué avant, par exemple par la forme des méandres et de l'échelle ou simplement par un écart suffisant, comme indiqué plus haut.

Les fig. 7a à 7f montrent une possibilité de générer avec trois méandres connectés en étoile, tels que montrés à la fig. 3, six configurations par période T, tout en respectant la quadrature entre méan-

dres inducteurs et méandres induits. Les méandres entrelacés A, B, C, connectés en étoile y sont représentés avec leur borne commune à droite; pour des enroulements tels que montrés à la fig. 4, composés chacun de deux méandres aller-retour superposés dont les courants ont le même sens, toutes les bornes seraient bien entendu du même côté. Des flèches noires marquent le méandre inducteur et le sens du courant inducteur, et des flèches blanches marquent les méandres induits et la polarité de mesure. Dans la fig. 7a le méandre A est inducteur et les méandres B et C sont induits. Comme leurs segments voisins possèdent la même polarité de mesure, ils sont donc équivalents à un méandre fictif intermédiaire, en quadrature avec le méandre inducteur et leur couplage mutuel en l'absence d'échelle est donc nul. Ici, la configuration des méandres implique des polarités de mesure aux bornes toujours opposées: dans la fig. 7a, la flèche blanche marquant la polarité du méandre B s'éloigne de la borne LB, tandis que celle du méandre C va vers la borne LC; on mesure donc la différence de tension. En décalant la configuration de la fig. 7a de $T/6$, on remarque que cette fois le méandre inducteur serait entre deux méandres, lesquels deviendraient donc inducteurs, ce qui augmenterait la consommation de courant et la complexité du circuit; par contre le méandre induit fictif se placerait sur un méandre réel. Mais comme on mesure un couplage, on peut sans autre échanger méandres inducteurs et induits pour obtenir la configuration de la fig. 7b, avec les méandres A, B induits et C inducteur. A chaque décalage de $T/6$, on échange ainsi les méandres inducteurs et induits, pour obtenir les configurations restantes, toutes avec un méandre inducteur et deux méandres induits. Enfin, le sens des flèches est inversé dans les fig. 7c, 7d, pour n'avoir qu'un seul sens de courant inducteur dans les méandres afin de simplifier les circuits de commande. En inversant également les polarités de mesure, celle du signal couplé reste correcte.

Ces six configurations sont générées par le circuit 10 de la fig. 6. A cet effet, un générateur 50 génère un train d'impulsions à sa sortie CP qui sert d'horloge à un registre à décalage 51 et commande les portes logiques de type «et» 6A à 6C et 7a à 7f. L'entrée D du registre à décalage 51 est commandée par une porte logique de type «ou inversé» 52 reliée aux deux premières sorties Q1, Q2 du registre, résultant en un compteur de module 3, chacune de ses sorties Q1, Q2, Q3 étant successivement à l'état logique 1 pendant que les deux autres sont à 0. Le changement d'un état au suivant se fait au flanc descendant du signal sur CP. Le flanc descendant du signal sur la sortie Q3 bascule un diviseur 53 dont la sortie RP alterne entre les états logiques 0 et 1. Pour plus de clarté, les formes d'onde des signaux sur CP, Q1, Q2, Q3, RP sont représentées dans la fig. 8. La sortie Q1 est montrée initialement à l'état logique 1 et les sorties RP et CP à l'état logique 0.

Lorsque CP passe à l'état logique 1, donc quand une impulsion commence, la porte 6A de la fig. 6 est activée et enclenche le transistor TA, qui met la

borne LA du méandre A à la masse (zéro volt). Le méandre A devient donc inducteur. Simultanément la porte 7a, dont une entrée reçoit via l'inverseur 54 le complément du signal sur RP, a ses trois entrées à l'état logique 1 et enclenche deux portes ou transistors de commutation TG, dont l'un relie la borne LC du méandre C au condensateur C1 et à l'entrée «+» de l'amplificateur 80 à entrée différentielle, et dont l'autre relie la borne LB du méandre B au condensateur C2 et à l'entrée «-» de l'amplificateur 80. On a donc la configuration de la fig. 7a, et l'on peut aisément vérifier que les configurations des fig. 7b à 7f sont bien générées par le circuit de la fig. 6.

A la fin de l'impulsion sur la sortie CP, les transistors de commutation TG sont déclenchés, et les condensateurs C1 et C2 ont emmagasiné les tensions induites dans les méandres C et B; le transistor de commande TA est déclenché. La fig. 8 montre aussi les formes d'onde aux bornes LA, LB, LC, ainsi que le signal différentiel échantillonné et amplifié AS à la sortie de l'amplificateur 80, et le signal filtré AF, à la sortie du filtre 90. En mesurant le déphasage entre le signal AF et la phase de référence RP, on obtient une quantité proportionnelle au déplacement, un tour de 360 degrés de déphasage correspondant à une période spatiale T de la règle. La mesure d'un déphasage sur un nombre quelconque de périodes est bien connue. A titre d'exemple, elle peut se ramener à une différence de temps entre les transitions de même polarité du signal AF et de la phase RP. Mais comme elle comporte une ambiguïté d'un nombre entier de pas T, puisqu'un déphasage correspondant à un nombre entier de périodes donne une différence de temps nulle entre ces transitions, on doit aussi comptabiliser le nombre de périodes durant le déplacement à mesurer, afin d'éviter des écarts de mesure d'un nombre entier de pas T. Le déplacement sur plusieurs périodes spatiales T équivaut donc à un déphasage sur le même nombre de tours. Comme plus haut, on pourrait se passer du filtre 90, et calculer le déplacement à partir des tensions échantillonnées du signal AS. Il est clair qu'ici aussi, la vitesse d'échantillonnage doit être suffisante par rapport à la vitesse maximale de déplacement pour suivre ce dernier sans risque de manquer un nombre entier de pas T.

Dans la réalisation d'un tel capteur, il faut veiller à ce que les inductances propres des méandres soient égales et leurs inductances mutuelles directes aussi faibles que possible. Les lignes de connexion aux bornes des méandres, en particulier, doivent contribuer aussi peu que possible à ces inductances, donc rester courtes. Une bonne solution consiste par exemple à tout intégrer sur un substrat semi-conducteur, à proximité immédiate des méandres, voire inclure ceux-ci sur le substrat. La non-linéarité résiduelle peut être compensée si nécessaire électroniquement ou en ajustant les inductances propres et mutuelles, soit par la forme des enroulements comme par exemple dans la fig. 4, soit par l'influence d'écrans conducteurs à proximité des enroulements.

La faible inductance propre de tels méandres, de

l'ordre du microhenry, entraîne des montées de courant très rapides, de quelques ampères par microseconde: pour une consommation de courant suffisamment basse, la durée des impulsions doit être inférieure à 100 ns. Une limite supérieure de la durée est aussi donnée par la constante de temps L/R , L étant l'inductance propre du méandre et R sa résistance plus celle du transistor de commande. Elle varie de quelques ns (méandre sur circuit intégré) à quelques 100 ns (circuit imprimé). Les paramètres de commutation des transistors CMOS modernes sont compatibles avec de telles durées d'impulsions. De plus ces paramètres varient assez lentement pour garantir une uniformité suffisante entre impulsions rapprochées, donc une bonne précision de mesure. Comme les variations de courant sont élevées pendant ces impulsions, le rapport signal/bruit est élevé et la mesure est peu susceptible d'être électromagnétiquement perturbée, d'autant plus que le niveau des tensions induites est de l'ordre de 100 mV avec une tension d'alimentation de 3 V. Pour que la consommation moyenne reste faible, il faut un écart de temps suffisant entre impulsions. Un écart de 50 microsecondes, correspondant pour un pas T de l'échelle de 0,75 mm à un décalage spatial de 0,125 mm, permettrait de suivre des déplacements de vitesse inférieurs à 2,5 mètres par seconde. Avec une durée d'impulsion de 50 ns, une tension de 3 V et une inductance de 1 microhenry, on obtient une consommation moyenne de courant de 40 microampères environ, adéquate pour un instrument de mesure tel qu'un pied à coulisse. Le faible pas de l'échelle allié à la facilité d'interpolation permet une précision de mesure de l'ordre du micromètre.

Il est bien entendu que les modes de réalisation décrits ci-dessus ne présentent aucun caractère limitatif et qu'ils peuvent recevoir toutes modifications désirables à l'intérieur du cadre tel que défini par la revendication 1. En particulier, les moyens électriques pourraient être agencés de façon à produire un courant électrique dans un enroulement donné du premier élément et à mesurer les effets produits par la position des caractéristiques électromagnétiques de l'échelle sur l'inductance propre du même enroulement.

Le nombre d'enroulements prévus sur le premier élément pourrait être très différent. On pourrait ainsi envisager seulement un ou deux enroulements, ou encore un nombre élevé d'enroulements entrelacés ou non.

Le capteur peut être linéaire, curvilinéaire, hélicoïdal ou présenter tout autre chemin X le long duquel les deux éléments sont déplacés l'un par rapport à l'autre.

Le circuit électronique 10 pourrait être constitué de manière très différente, en effectuant la répartition des méandres inducteurs et induits, ainsi que l'évaluation du signal induit par rapport au déplacement au moyen d'autres composants électroniques.

Revendications

1. Capteur inductif de déplacement comportant deux éléments (1, 2; 31, 32) mobiles l'un par rap-

port à l'autre le long d'un chemin (x) pourvus d'enroulements (1A à 1D; 31A à 31C) disposés le long de ce chemin et dont les inductances varient périodiquement en fonction du déplacement relatif des deux éléments, et des moyens électroniques (10) pour déterminer la valeur dudit déplacement par la mesure des inductances des enroulements, caractérisé par le fait que les enroulements (1A à 1D; 31A à 31C) sont agencés sur un premier (1; 31) des deux éléments et par le fait que le second élément (2, 32) présente des caractéristiques électromagnétiques spatialement périodiques (21, 22; 321, 322) de période spatiale T le long de ce chemin susceptibles de modifier les inductances des enroulements, lesdits moyens électroniques (10) étant reliés aux enroulements agencés sur le premier élément pour produire un courant électrique dans une partie au moins desdits enroulements et pour mesurer les effets produits par la position des caractéristiques électromagnétiques spatialement périodiques du second élément sur les inductances d'au moins une partie des enroulements du premier élément.

2. Capteur selon la revendication 1, caractérisé par le fait que le premier élément (1; 31) comprend des enroulements ou groupes d'enroulements de configuration spatialement périodique, de période spatiale $2T$ le long du chemin.

3. Capteur selon la revendication 1 ou 2, caractérisé par le fait que lesdits moyens électroniques (10) sont agencés de façon à produire un courant électrique dans une première partie des enroulements au moins temporairement inducteurs et à mesurer les signaux induits dans une seconde partie des enroulements au moins temporairement induits.

4. Capteur selon la revendication 3, caractérisé par le fait que la seconde partie des enroulements est disposée en quadrature par rapport à la première partie des enroulements.

5. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé par le fait que le premier élément (31; 41) comprend N enroulements (31A à 31C; 41A à 41C) entrelacés sur la même surface et décalés les uns par rapport aux autres d'une distance correspondant à un nombre entier de la quantité T/N le long dudit chemin (x).

6. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé par le fait que les enroulements sont constitués chacun par deux méandres partiels (41A, 41B, 41C) aller-retour dont les deux connexions aux moyens électroniques (10) sont agencés sur un même côté du premier élément, les deux méandres partiels étant reliés l'un à l'autre sur le côté opposé du premier élément, et comportant des tronçons au moins partiellement superposés.

7. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé par le fait que le ou les enroulements (41A, 41B, 41C) sont progressivement rétrécis des deux côtés du premier élément.

8. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé par le fait que le second élément (2; 32) comprend une configuration spatialement périodique au moins partiellement conductrice de période spatiale T le long dudit chemin (x).

9. Capteur selon la revendication 8, caractérisé

par le fait que le couplage inductif entre enroulements du premier élément est réalisé par l'intermédiaire de courants induits ou de courant de Foucault dans le second élément.

10. Capteur selon la revendication 8, caractérisé par le fait que le second élément comprend une série de spires fermées (5B) ou de plages conductrices (5C) sur un substrat isolant, ou encore une pièce conductrice en forme d'échelle (2; 32), de bande perforée ou avec un relief périodique (5D, 5E).

11. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé par le fait que lesdits moyens électroniques (10) sont agencés de façon à mesurer des couplages inductifs entre au moins deux enroulements (A, B, C) ou groupes d'enroulement d'inductance L et de résistance R en appliquant une impulsion de tension plus courte que la constante de temps L/R aux bornes de l'un des enroulements ou groupe d'enroulements et en mesurant l'impulsion de tension induite aux bornes de l'autre ou des autres enroulements ou groupes d'enroulements.

12. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le premier élément (31) comporte trois enroulements (31A à 31C) en méandres connectés en étoile décalés les uns des autres d'une distance correspondant à un nombre entier de la quantité $T/3$ le long dudit chemin (x), les moyens électroniques (10) étant agencés pour appliquer une impulsion de tension aux bornes de l'un des enroulements et pour combiner les impulsions induites dans les deux autres enroulements de manière à obtenir un signal échantillonné équivalent à celui d'un enroulement fictif intermédiaire décalé d'une distance de $T/2$ par rapport à l'enroulement inducteur correspondant à une position en quadrature.

13. Capteur selon la revendication 12, caractérisé en ce que les moyens électroniques (10) sont agencés de façon à décaler de manière prédéterminée les enroulements inducteurs et induits dans le temps pour obtenir 6 échantillons par période spatiale T formant un signal périodique dont la composante fondamentale obtenue au moyen d'un filtre (90) possède une phase qui varie proportionnellement au déplacement à raison d'un tour complet par période spatiale T.

14. Capteur selon la revendication 13, caractérisé en ce que les moyens électroniques (10) comprennent un générateur d'impulsion (50) relié à un registre de décalage (51) dont les sorties sont susceptibles de contrôler, d'une part, des organes de commandes (TA, TB, TC) pour rendre successivement un des enroulements inducteur, et, d'autre part, des commutateurs (TG) pour relier successivement les deux autres enroulements à des organes de mesure (C1, C2, 80, 90) destinés à mesurer les impulsions de tension induites dans ces deux autres enroulements.

15. Capteur selon la revendication 1 ou 2, caractérisé par le fait que lesdits moyens électroniques (10) sont agencés de façon à produire un courant électrique dans au moins un enroulement du premier élément et de mesurer les effets produits par la position des caractéristiques électromagnétiques

spatialement périodiques sur l'inductance propre du même enroulement.

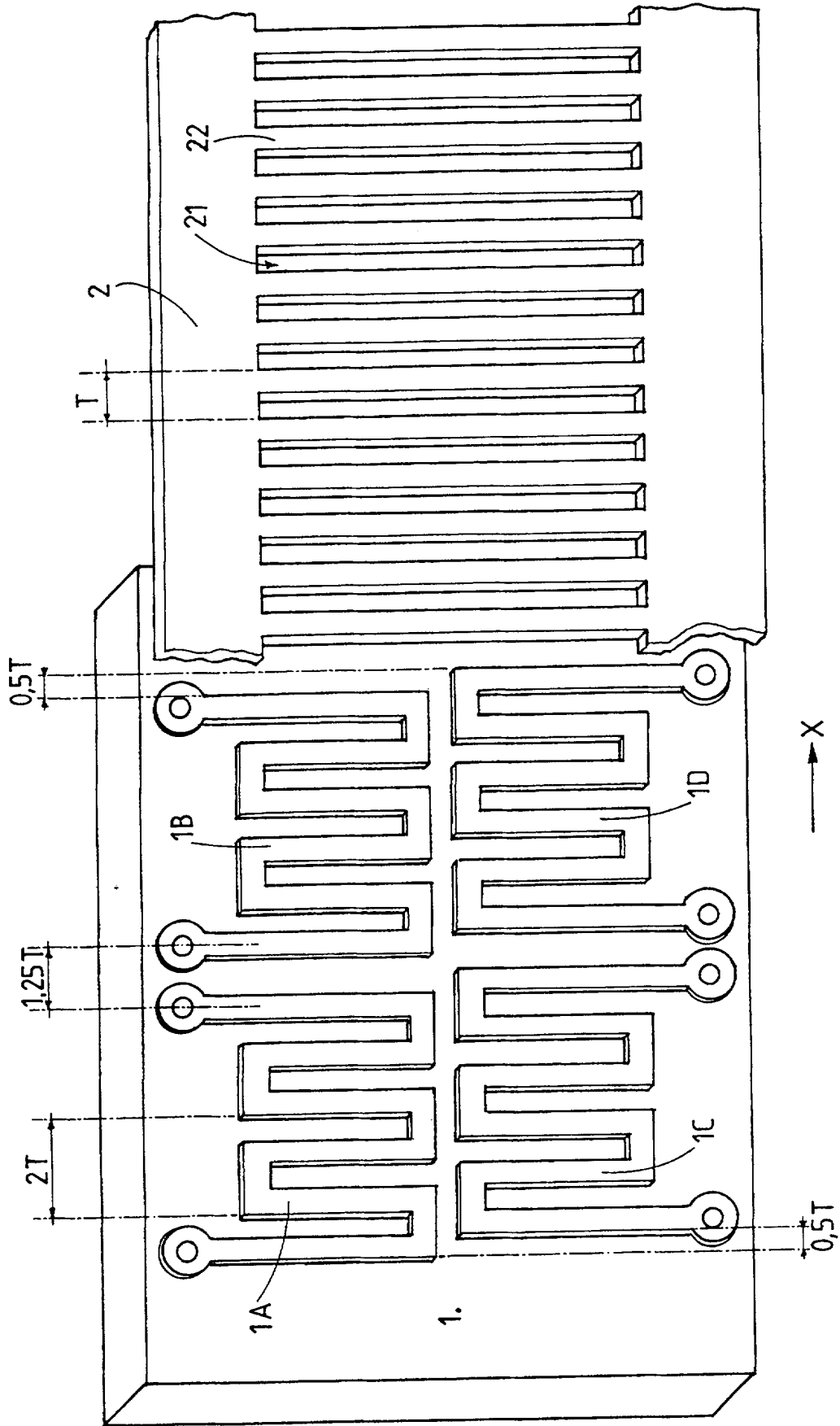


FIG. 1

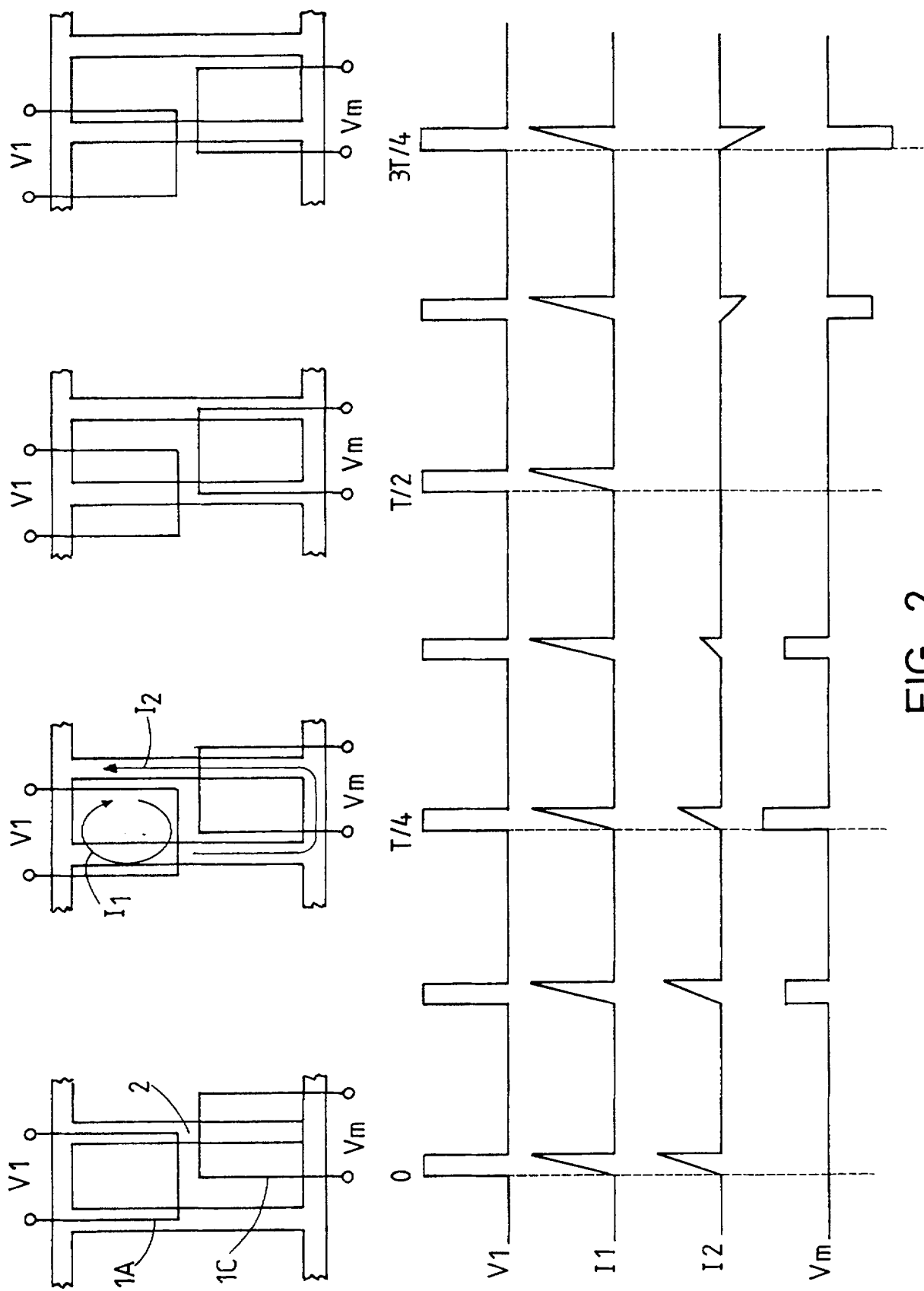
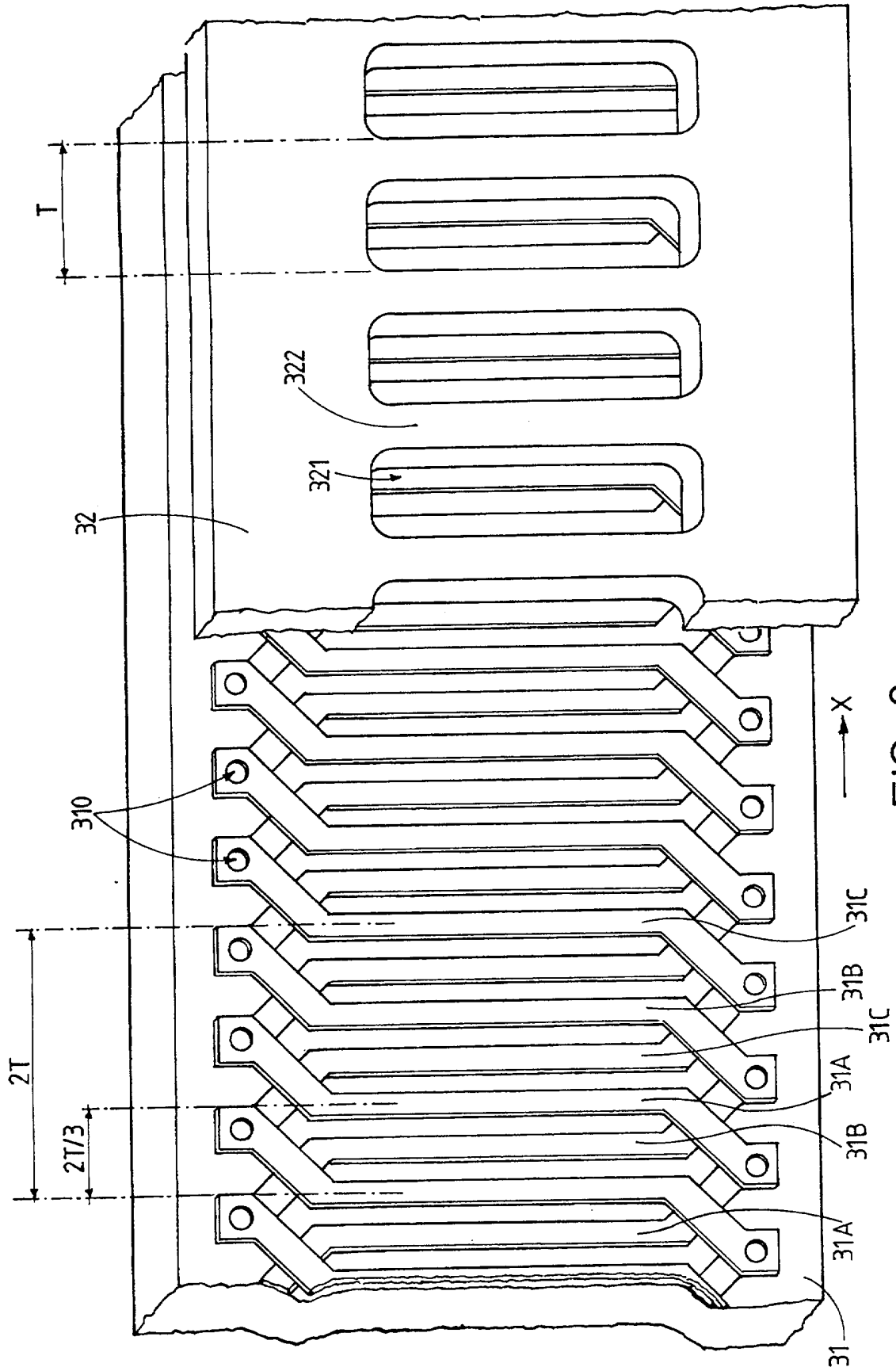


FIG. 2



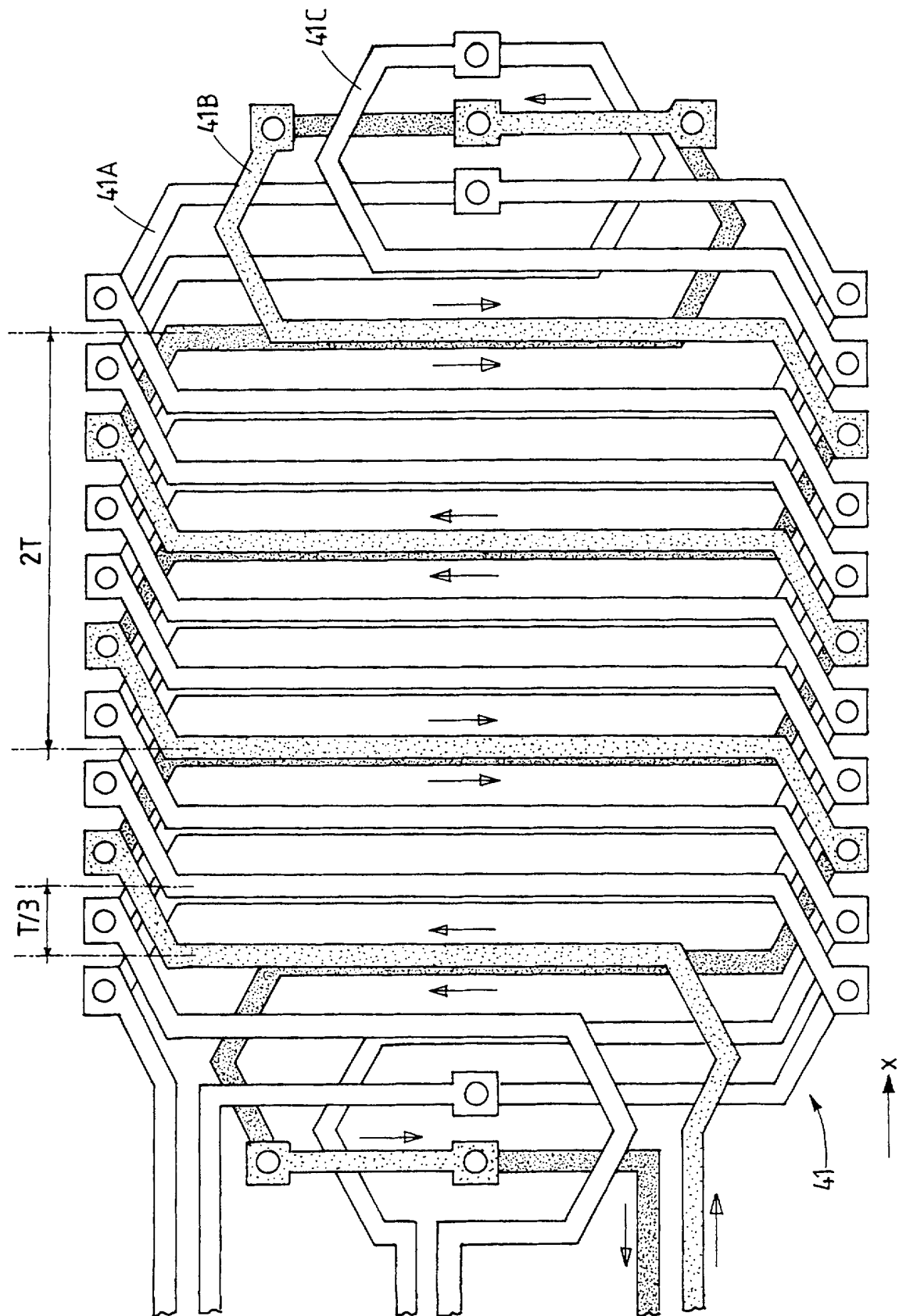
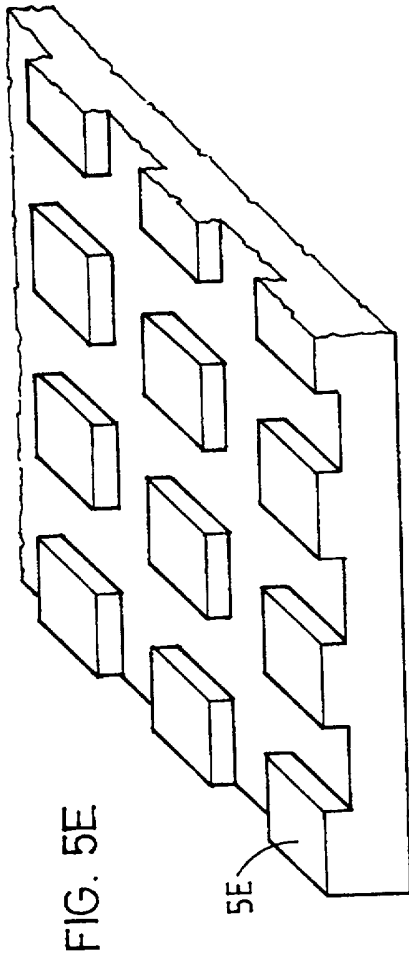
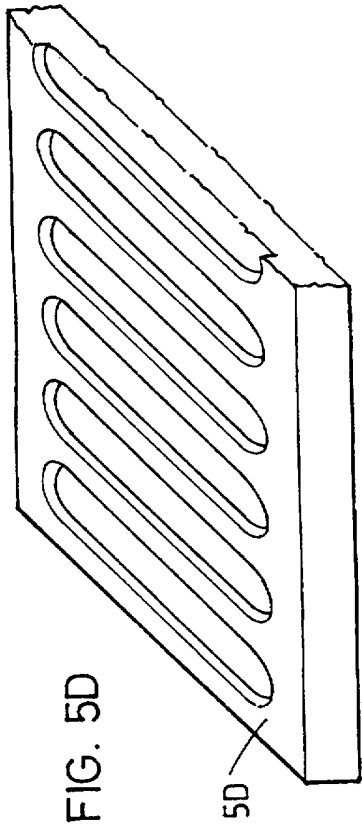
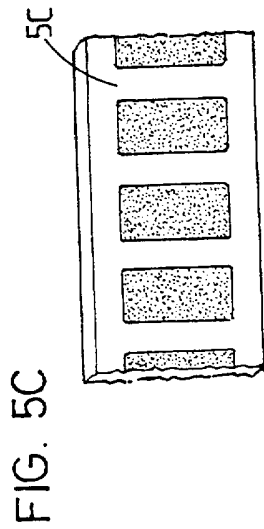
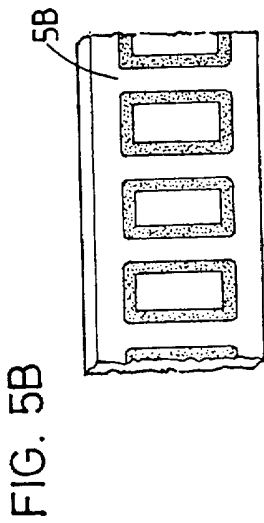
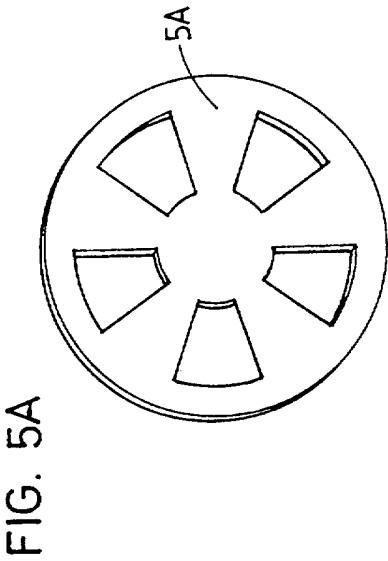


FIG. 4



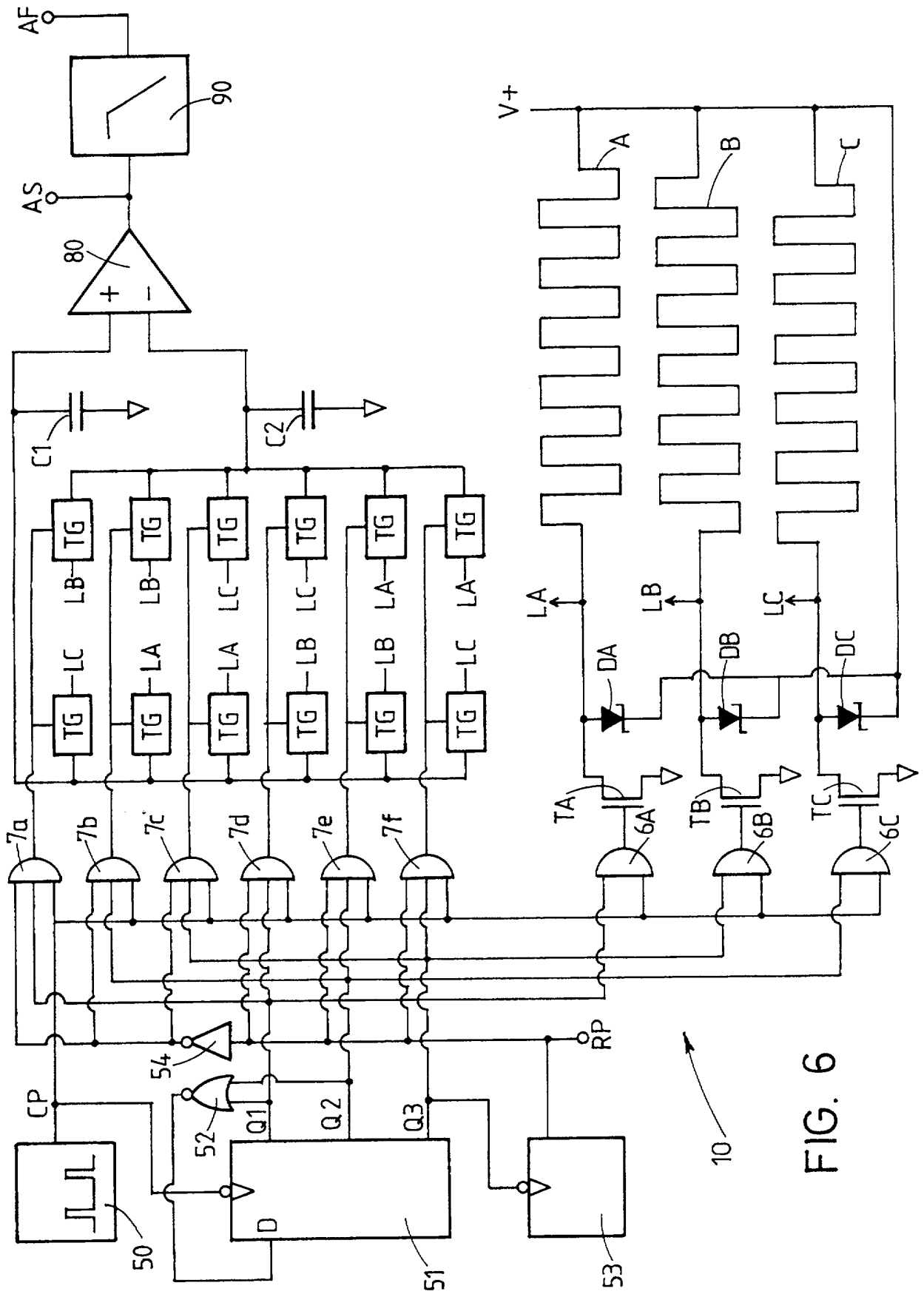


FIG. 6

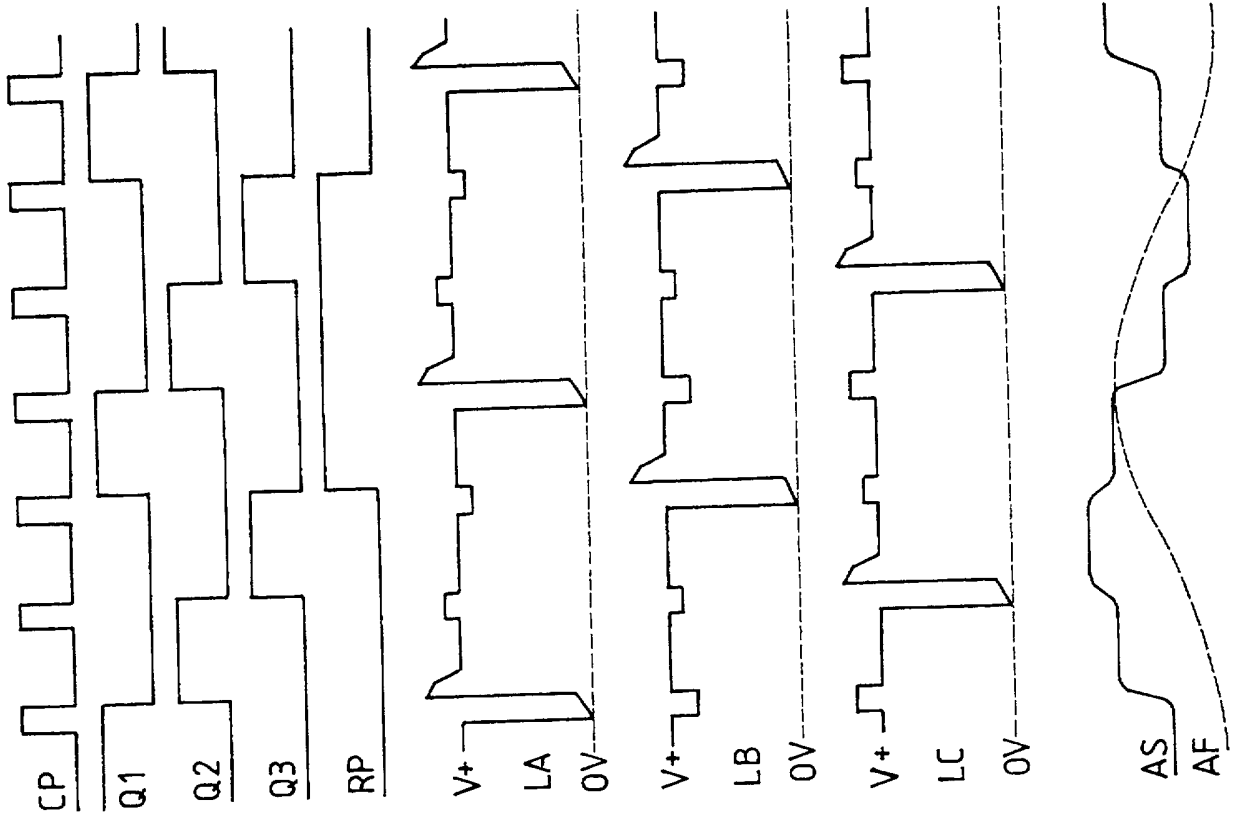


FIG. 8

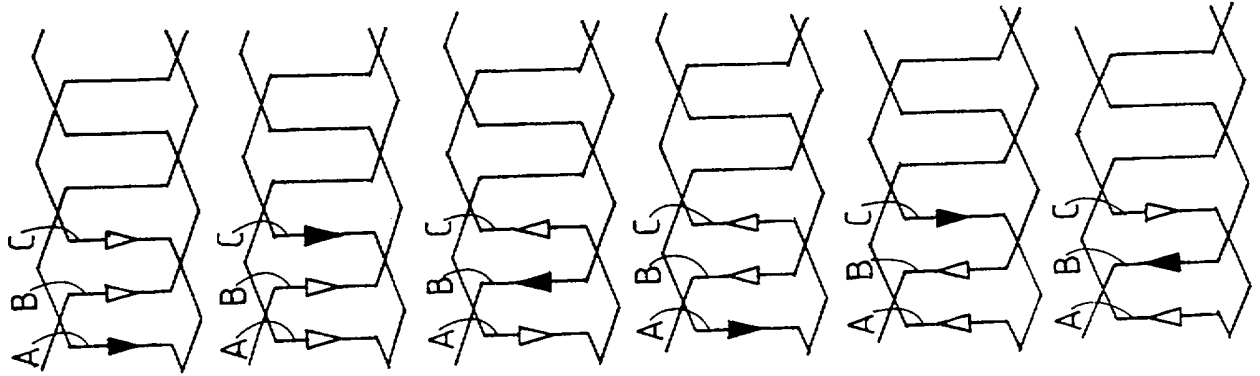


FIG. 7a

FIG. 7b

FIG. 7c

FIG. 7d

FIG. 7e

FIG. 7f